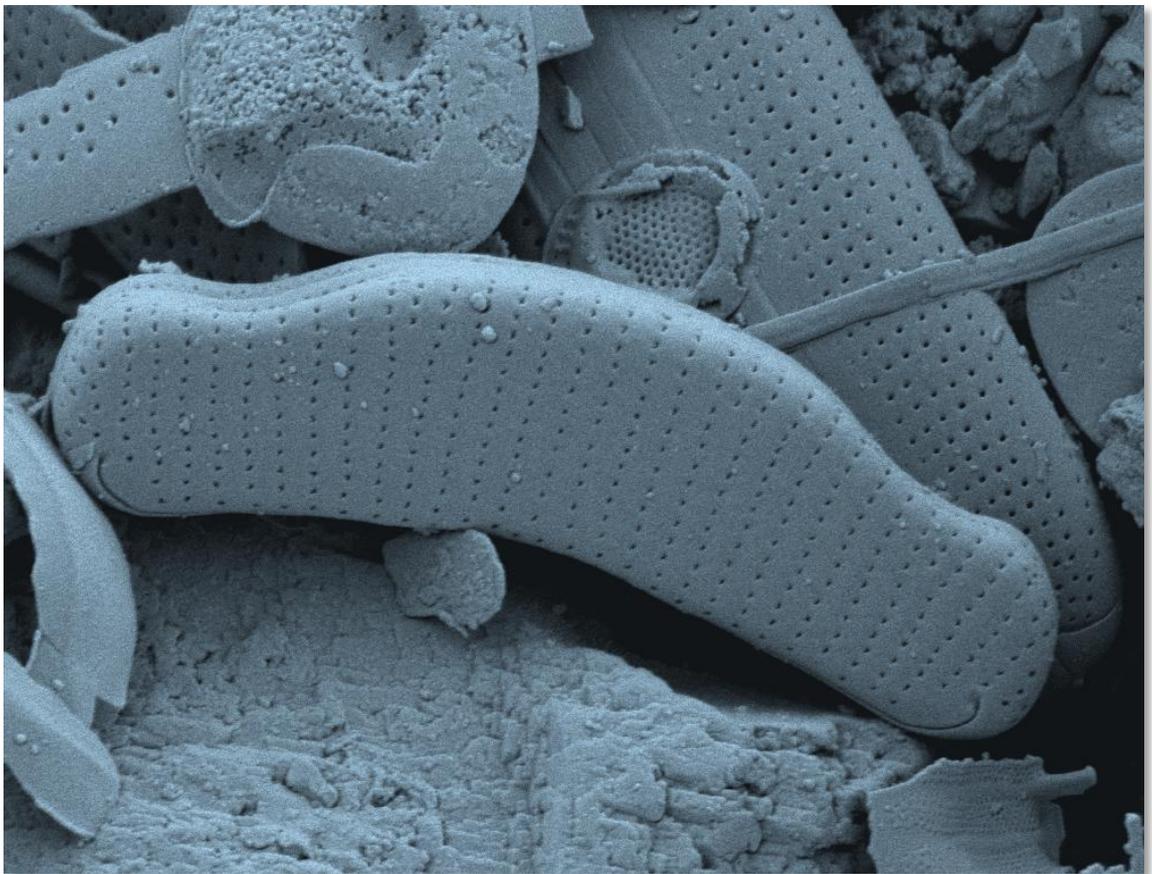


Bericht zum Untersuchungsauftrag

Vergleich von historischen Diatomeengesellschaften des Kleinen und Großen Arbersees sowie Rachelsees mit Daten des bayerischen Versauerungsmonitorings



Dr. Gabriele Hofmann

September 2014

Im Auftrag des
Bayerischen Landesamtes
für Umwelt

Inhalt

Einleitung	1
Datensatz	2
Taxonomische Harmonisierung	4
Indikation von Versauerung	6
Artenspektren und Rote Liste	9
Gesellschaften und indizierte Versauerung	12
Großer Arbersee	12
Kleiner Arbersee	15
Rachelsee	17
Die Entwicklung der Versauerung im Überblick	19
Zusammenfassung	20
Literatur	21
Anhang	24

Einleitung

Der schädliche Einfluss hoher Säuregehalte und ihrer Folgewirkungen auf die Biozönosen – insbesondere der erhöhten Gehalte an Aluminium und Schwermetallen – sind vielfach belegt. So liegen in stark versauerten Bächen und Seen ähnlich einschneidende Umstrukturierungen vor wie in hoch saproben Gewässern, was in einer drastischen Artenverarmung und – damit einhergehend – in einer schwer wiegenden Störung des empfindlichen Nahrungsnetzes zum Ausdruck kommt. Doch nicht nur die Lebensgemeinschaften der Oberflächengewässer sind betroffen. So ist bei Fortschreiten der Gewässerversauerung regional mit einer Gefährdung des Grundwassers zu rechnen. Die Überwachung des Säurezustands sensibler Gewässer und die bundesweite Einbeziehung von Versauerungserscheinungen in die biologische Gütebewertung sind daher dringend geboten.

In Bayern werden bereits seit 1983 im Rahmen der Sonderuntersuchung 80.6 „Versauerung oberirdischer Gewässer“ Langzeiterhebungen durchgeführt, mit dem Ziel, Ausmaß und Verbreitung, aber auch Entwicklung und Ursachen der Gewässerversauerung zu dokumentieren (ZAHN 1990; GIETL & SCHMEDTJE 1994; BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT 1999). Seit 1992 wird in die Gütekarte eine Zustandsbewertung von versauerungssensitiven Gewässern einbezogen.

Die Erfassung der Gewässerversauerung stützt sich dabei hauptsächlich auf biologische Indikatoren. Als geeignete Zeigerorganismen bieten sich Diatomeen aufgrund ihrer hohen Sensibilität und weiten Verbreitung an. Infolge ihrer artspezifisch variierenden Toleranzen und Präferenzen reagieren sie auf Veränderungen des Säurezustands mit charakteristischen Verschiebungen des Arteninventars und der Arthäufigkeiten – ein Umstand, den sich bereits HUSTEDT (1938/39) zu Nutze machte. Mit der Einstufung der Diatomeenarten nach ihrem Vorkommen in verschiedenen pH-Bereichen lieferte er die Grundlagen für die Nutzung der Diatomeen als pH-Indikatoren. Gegenwärtig stehen verschiedene Bewertungsverfahren zur Quantifizierung von Versauerung in Fließgewässern zur Verfügung (ALLES 1999, CORING 1999, ANDRÉN & JARLMAN 2008).

Aber auch in der Seenbewertung kommen Diatomeen zum Einsatz. Wie in einem Zeitarchiv bilden subfossile Diatomeengemeinschaften in Sedimenten von versauerungssensitiven Seen Veränderungen von Umweltvariablen ab und erlauben die Rekonstruktion historischer Verhältnisse. Da die anthropogene Versauerung überwiegend erst in der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts auftrat, kann die Entwicklung des Versauerungsgeschehens aber auch anhand von historischen Benthosproben aufgezeigt werden, die einen Blick in die Vergangenheit wie durch kleine Fenster in der Zeit erlauben.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, die Entwicklung der Versauerung in den beiden Arberseen und im Rachelsee im Bayerischen Wald durch Auswertung von historischen Proben, die bis ins Jahr 1912 zurückreichen und aktuellen Daten des bayerischen Versauerungsmonitorings darzustellen.

Datensatz

Der Datensatz umfasst zum einen aktuelle Erhebungen des Bayerischen Landesamtes für Umwelt, die 2013 im Rahmen des biologischen Gewässermonitorings am Großen und Kleinen Arbersee sowie am Rachelsee durchgeführt wurden. An den drei Seen wurden in jeweils vier Uferbereichen benthische Diatomeenproben entnommen und präpariert. Durch einen Auftragnehmer wurden Artenzusammensetzung und Arthäufigkeiten durch mikroskopische Analysen erfasst. Die Methodik folgt hierbei der Handlungsanweisung von SCHAUMBURG et al. (2011) zur Bewertung der ökologischen Qualität nach EU-Wasserrahmenrichtlinie. Die Diatomeendaten wurden in Form von Excel-Dateien zur weiteren Auswertung zur Verfügung gestellt.

Die Auswertung der historischen Proben wurde im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt bereits im Rahmen der Entwicklung des PHYLIB-Verfahrens durchgeführt. So sollte anhand der historischen Gesellschaften der Referenzzustand verschiedener bayerischer Seen hinsichtlich der Diatomeengesellschaften ermittelt werden. Zum Auffinden geeigneter Proben wurden umfangreiche Recherchen in verschiedenen deutschen Diatomeensammlungen unternommen. Die beiden Arberseen und der Rachelsee sind in den geprüften Sammlungen durch insgesamt acht Proben vertreten. Davon stammen sechs Proben aus dem Großen Arbersee. Der Kleine Arbersee und der Rachelsee sind lediglich durch eine Probe vertreten. Fünf der Proben stammen aus der Sammlung von Willi Krieger (1886-1954), die im Botanischen Museum Berlin-Dahlem archiviert ist und wurden im Juli und August 1933 gesammelt (siehe Tabelle 1). Zwei Präparate sind in der Sammlung des bayerischen Diatomeenforschers Franz Josef Weinzierl (1888-1969) verwahrt (Botanische Staatssammlung München) und datieren in die Jahre 1936 und 1949. Eine weitere Probe wurde in der Sammlung von Friedrich Hustedt (Alfred-Wegener-Institut, Bremerhaven) aufgefunden. Die Probe wurde im Jahr 1912 gesammelt und stammt ihrer Etikettierung nach von Anton Mayer (1867-1951), einem berühmten Regensburger Diatomologen.

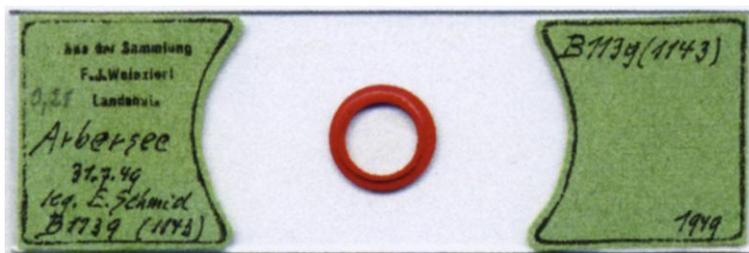


Abbildung 1: Beispiel eines Präparats aus dem Arbersee aus der Sammlung Weinzierl

Ergänzend wurde die Untersuchung von ARZET (1987) herangezogen, der in seiner Dissertation Sedimentkerne verschiedener versauerungssensitiver deutscher Seen diatomologisch untersuchte. Verfügbar waren jedoch nur die Daten der Oberflächensedimente vom Großen und Kleinen Arbersee sowie vom Rachelsee, für die älteren Schichten liegen keine Artenlisten vor. Die Entnahme der Sedimentkerne erfolgte in den Jahren 1982 und 1983 (siehe Tabelle 1). Die Kerne reichen unterschiedlich weit in die Zeit zurück und erlaubten beim Großen Arbersee eine durchgehende Rekonstruktion der pH-Werte bis in die 1840er Jahre. Beim Rachelsee wird der Zeitraum bis vor 1750 erfasst (ARZET 1987). Die Datierungsangaben zum Kern aus dem Kleinen Arbersee sind ungenau, ein dem Großen Arbersee vergleichbares Alter ist jedoch anzunehmen.

Tabelle 1: Untersuchte Proben

Mst-Nr. = Messstellennummer

See*	Stelle	Herkunft/Sammlung	Mst-Nr.	Datum
Arbersee	Seewand	Mayer 200E 1043 (229)		17.09.1912
Großer Arbersee		Krieger 5304		Juli 1933
Großer Arbersee	Rand an einem Zufluss	Krieger 5306		August 1933
Großer Arbersee		Krieger 5308		August 1933
Großer Arbersee	Ufer am Weg zur Seewand	Weinzierl B 573 (666)		Juli 1936
Arbersee		Weinzierl B 1138 (1143)		31.7.1949
Großer Arbersee		Arzet		März 1983
Arbersee		BLfU	192246	08.10.2013
Arbersee		BLfU	192247	08.10.2013
Arbersee		BLfU	192248	08.10.2013
Arbersee		BLfU	192249	08.10.2013
Kleiner Arbersee		Krieger 5314		August 1933
Kleiner Arbersee		Arzet		Juli 1982
Kleiner Arbersee		BLfU	192238	08.10.2013
Kleiner Arbersee		BLfU	192239	08.10.2013
Kleiner Arbersee		BLfU	192240	08.10.2013
Kleiner Arbersee		BLfU	192241	08.10.2013
Rachelsee		Krieger 5310		August 1933
Rachelsee		Arzet		Juli 1982
Rachelsee		BLfU	192254	09.10.2013
Rachelsee		BLfU	192255	09.10.2013
Rachelsee		BLfU	192256	09.10.2013
Rachelsee		BLfU	192257	09.10.2013

* Benennung der Seen entsprechend der Etikettierung der historischen Präparate

Taxonomische Harmonisierung

Die Erhebungen des Jahres 2013 erfolgten auf der Grundlage der aktuell gültigen Bestimmungsliteratur und erforderten nur minimale Anpassungen. Die Sedimentkerne wurden dagegen vor der in den Jahren 1986 bis 1991 erfolgten Neu-Bearbeitung der Süßwasserflora untersucht (Band 2/1 bis 2/4, KRAMMER & LANGE-BERTALOT 1986-1991). Auch nach 1991 hat sich der Umfang der heute gültigen Bestimmungsliteratur noch erheblich erweitert. Dies ist Folge weitreichender taxonomischer Änderungen und Neubeschreibungen, die unter anderem im Zuge des verstärkten Einsatzes von Diatomeen im Rahmen der deutschen Monitoringprogramme zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EUROPÄISCHE UNION 2000) entstanden sind. Die Daten von ARZET (1987) stammen daher aus einer Zeit, in der viele Taxa noch unbekannt waren oder unter anderem Namen geführt wurden. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, mussten die Taxalisten daher überprüft und taxonomisch harmonisiert werden. Dabei wurden folgende, aktuelle Bestimmungswerke berücksichtigt: HOFMANN et al. (2011), KRAMMER (2000), LANGE-BERTALOT (1993, 2001), LANGE-BERTALOT & MOSER (1994), LANGE-BERTALOT & METZELTIN (1996) und LANGE-BERTALOT et al. (2011).

Die taxonomische Harmonisierung umfasste folgende Schritte:

- Alte Taxanamen (Synonyme) wurden in die aktuell gültigen Benennungen überführt, die dem Stand der bundesdeutschen Taxalisten vom September 2011 entsprechen (MAUCH et al. 2003, aktualisierte Fassung).
- Taxa, die sowohl mit Synonymen als auch mit gültigen Namen geführt waren, wurden zusammengefasst.
- Arten, die entweder schwer zu unterscheiden sind und/oder deren Identität durch mehrfache Umbenennungen in der Literatur nicht mehr eindeutig zugeordnet werden können, wurden unter einer Taxabezeichnung zusammengefasst.

Die harmonisierte Liste umfasst 145 Taxa und wurde abschließend einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. Taxa mit bekannter Autökologie, deren Vorkommen in den untersuchten Gewässern mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden können, wurden dabei nicht vorgefunden.

Eine uneingeschränkte Vergleichbarkeit der Benthosproben mit denen der Sedimentkerne besteht dennoch nicht. Dies ist vor allem in der Herkunft und Beschaffenheit des Materials begründet. So enthalten Proben des Diatomeenaufwuchses aus dem Litoral in der Regel vitale Gesellschaften des jeweiligen Standortes. In Oberflächensedimenten lagern sich hingegen neben Diatomeen des Freiwassers (Plankton) auch abgelöste und verdriftete benthische Formen aus den Litoralzonen ab. Profundalgemeinschaften sind daher "Friedhofgemeinschaften" von Arten unterschiedlicher Provenienz. Sie integrieren über deutlich längere Zeiträume als benthische Gesellschaften und können zudem einen mehr bis weni-

ger hohen Anteil von obligatorisch oder fakultativ planktischen Arten enthalten. Auch in den Oberflächensedimenten des Großen und Kleinen Arbersees wurden von ARZET (1987) drei centriscche Arten der Gattung *Aulacoseira* (*A. ambigua*, *A. distans*, *A. lirata*) nachgewiesen, die beachtliche Anteile erreichen (Summenanteile von 29% bzw. 16%). Ihre Vorkommen vermindern die Anteile der benthischen Arten in den Kernen, wodurch die Vergleichbarkeit mit den Benthosproben mehr oder weniger eingeschränkt wird.

Indikation von Versauerung

Zur Quantifizierung der Versauerung wurden die Anteile von *Eunotia exigua*, *Psammodium helveticum* und *Pinnularia subcapitata* berechnet. Diese Arten gelten als zuverlässige Indikatoren von anthropogener Versauerung und werden als solche im PHYLIB-Verfahren zur Bewertung der ökologischen Qualität bzw. des ökologischen Potenzials herangezogen (SCHAUMBURG et al. 2011). Im Rahmen von PHYLIB werden allerdings saure Seen fälschlicherweise mit versauerten Seen gleichgesetzt. Die Präsenz von Säurezeigern führt in der Bewertung daher in jedem Fall – je nach deren Häufigkeit – zu einer unterschiedlich starken Abwertung der ökologischen Qualität. Die Tatsache, dass natürlich saure, zumeist mehr oder wenige dystrophe Seen existieren, wird dadurch ignoriert. So enthält die PHYLIB-Liste der Versauerungszeiger neben den genannten Indikatoren anthropogener Versauerung viele typische Arten von Moorgewässern.

In der vorliegenden Auswertung wurden dagegen die Anteile der Indikatoren anthropogener Versauerung und die Häufigkeiten dystropher Taxa separat berechnet. Als Grundlage hierzu diente die in HOFMANN (2014) dokumentierte Indikatorliste dystropher Taxa, in der folgende Taxa ergänzt wurden: *Aulacoseira distans*, *Brachysira wygaschii*, *Encyonema lunatum*, *Encyonopsis aequalis*, *Eunotia naegelii*, *Eunotia serra* var. *serra*, *Stenopterobia curvula* und *S. delicatissima* (siehe Tabelle 3).

Zur Bewertung des Versauerungsgeschehens wurden weiterhin die pH-Klassifikationen von HUSTEDT (1938/1939) herangezogen, die die Grundlagen zur Verwendung von benthischen Diatomeen als Indikatoren unterschiedlicher Säurezustände darstellen. So basieren alle heute gängigen Indikationsverfahren letztlich auf Hustedts Einteilung der Diatomeen in fünf „Säuregruppen“ (siehe Tabelle 2). Die in den folgenden Jahrzehnten gewonnenen Erkenntnisse zur Taxonomie und Verbreitung von Diatomeenarten wurden von VAN DAM et al. (1994) in eine „Checkliste“ der ökologischen Indikationswerte implementiert. Auch heute noch stellt die Häufigkeitsverteilung der Säuregruppen eine Basis-Auswertung bei Untersuchungen zur Versauerung dar.

Tabelle 2: Definition der pH-Gruppen nach HUSTEDT (1938/39) und VAN DAM et al. (1994)

pH-Gruppen	Verbreitung im pH-Spektrum
Acidobiont	Vorkommen bei pH < 7, optimale Verbreitung bei pH < 5.5
Acidophil	Vorkommen um pH 7, überwiegende Verbreitung bei pH < 7
Circumneutral	Vorkommen im Bereich um pH 7
Alkaliphil	Vorkommen um pH 7, vorwiegende Verbreitung bei pH > 7
Alkalibiont	Vorkommen ausschließlich bei pH > 7, optimale Verbreitung bei pH 8,5
Indifferent	Verbreitung im pH-Spektrum ohne erkennbares Optimum

Tabelle 3: Dystrophie-Indikatoren

Klassifikation nach HOFMANN (2014), *ergänzte Klassifikationen

DV-Nr.	Taxa	Zahl der Proben mit Vorkommen	Summenprozent in allen Proben
6799	<i>Aulacoseira distans</i>	3	37,6
6291	<i>Brachysira brebissonii</i>	21	149,0
6296	<i>Brachysira serians</i>	15	7,2
16168	<i>Brachysira wygaschii*</i>	1	0,2
26567	<i>Chamaepinnularia mediocris</i>	16	23,6
26177	<i>Encyonema hebridicum</i>	4	1,2
26302	<i>Encyonema lunatum*</i>	1	0,2
26172	<i>Encyonema neogratile</i> var. <i>neogratile</i>	1	1,7
26132	<i>Encyonopsis aequalis</i>	2	7,8
26132	<i>Encyonopsis aequalis*</i>	2	7,8
6213	<i>Eunotia bilunaris</i> var. <i>bilunaris</i>	5	4,8
26342	<i>Eunotia compacta</i>	5	12,7
16667	<i>Eunotia diadema</i>	2	0,6
6357	<i>Eunotia diodon</i>	1	1,1
6358	<i>Eunotia faba</i>	4	3,9
6359	<i>Eunotia fallax</i> var. <i>fallax</i>	5	7,5
6362	<i>Eunotia glacialis</i>	5	5,4
6214	<i>Eunotia incisa</i>	25	253,7
6367	<i>Eunotia meisteri</i>	3	3,9
26338	<i>Eunotia mucophila</i>	20	80,7
6371	<i>Eunotia naegelii*</i>	4	5,5
26343	<i>Eunotia nymanniana</i> Lectotypus	1	1,3
6373	<i>Eunotia paludosa</i> var. <i>paludosa</i>	2	40,2
6851	<i>Eunotia praerupta</i> var. <i>praerupta</i>	1	15,8
6375	<i>Eunotia rhomboidea</i>	25	491,6
6850	<i>Eunotia serra</i> var. <i>serra*</i>	1	2,0
36243	<i>Eunotia subherkiniensis</i>	2	8,4
6382	<i>Eunotia sudetica</i>	1	0,4
26357	<i>Eunotia trinacria</i>	2	0,4
26397	<i>Frustulia crassinervia</i>	3	3,7
6187	<i>Frustulia rhomboides</i> var. <i>rhomboides</i>	1	0,6
26398	<i>Frustulia saxonica</i>	26	137,2
26641	<i>Kobayasiella parasubtilissima</i>	8	29,1
36184	<i>Pinnularia microstauron</i>	9	5,6
36195	<i>Pinnularia rupestris</i>	1	4,5
16074	<i>Pinnularia silvatica</i>	4	1,4
16087	<i>Stenopterobia curvula*</i>	4	1,4
6690	<i>Stenopterobia delicatissima*</i>	9	4,8
6698	<i>Tabellaria ventricosa</i>	2	4,8

Seit der Klassifikation von VAN DAM et al. (1994) haben die Kenntnisse zur Verbreitung der Diatomeenarten im pH-Spektrum stetig zugenommen, nicht zuletzt durch zahlreiche Erhebungen im Vorfeld und während der Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie. In einer früheren Untersuchung (HOFMANN 2014) wurden daher die Klassifikationen von VAN DAM et al. (1994) überarbeitet: Taxanamen wurden in die gültige Taxonomie überführt, bisher nicht geführte Indikatorarten ergänzt und diverse pH-Klassifikationen auf Grundlage von Literaturdaten und Expertenwissen verändert. Letzteres betrifft vor allem seltene Taxa, die im Rahmen der Indikation von untergeordneter Bedeutung sind. In der Liste der modifizierten Klassifikationen finden sich jedoch auch einige „prominente“ Arten. Zu nennen ist beispielsweise *Psammothidium helveticum*, ein weit verbreiteter und nicht selten dominanter Indikator periodisch stark saurer Gewässer. In der Klassifikation nach VAN DAM et al. (1994) ist die Art fälschlicherweise der alkaliphilen Artengruppe zugeordnet.

Als zusätzliche Informationen wurden der Halobienindex (ZIEMANN et al. 1999, verändert und erweitert durch Hofmann in SCHAUMBURG et al. 2012, Tabelle 33), der Saprobienindex (ROTT et al. 1997) und der Trophie-Index (HOFMANN 1994) berechnet. Diese ermöglichen Aussagen zur Salinität, zur organischen Belastung und zum trophischen Zustand der untersuchten Gewässerstellen. Weiterhin wurden als Kenngrößen der Gesellschaften die Taxazahlen, die Diversitäten nach SHANNON & WEAVER (1949), die Evenness (HAEUPLER 1982) sowie Zahl und Häufigkeiten der Roten Liste-Taxa (LANGE-BERTALOT 1996) dokumentiert und dem Auftraggeber in elektronischer Form übermittelt.

Artenspektren und Rote Liste

In den beiden Arberseen und im Rachelsee wurden insgesamt 145 Taxa nachgewiesen, deren Vorkommen und Häufigkeiten in Tabelle A 1 im Anhang dokumentiert sind. Die mit Abstand höchste Artenzahl wurde im Großen Arbersee verzeichnet (siehe Tabelle 4). So sind 90% aller in den drei Seen erfassten Taxa im Großen Arbersee vertreten. Der Vergleich mit der von ARZET (1987) in einem Sedimentkern erfassten Taxazahl legt nahe, dass durch die vorliegende Untersuchung der weitaus größte Teil des Arteninventars des Großen Arbersees erfasst wurde. So wurden in dem Sedimentkern, dessen tiefste untersuchte Schichten in die 1840er Jahre datiert sind, "lediglich" 120 Diatomeenarten nachgewiesen.

Die Repräsentativität des Artenspektrums gilt jedoch nur für den Großen Arbersee. Im Kleinen Arbersee und im Rachelsee liegen die Taxazahlen deutlich niedriger (52% bzw. 36% des Gesamtarteninventars) – auch im Vergleich mit den von Arzet in den Sedimentkernen nachgewiesenen Zahlen (siehe Tabelle 4). Bedingt wird dies vermutlich durch den geringeren Probenumfang, der im Großen Arbersee und Rachelsee jeweils nur sechs Proben umfasst. Aber auch die zeitliche Verteilung der Proben ist als Ursache in Betracht zu ziehen. So liegt für die beiden Seen jeweils nur ein Präparat aus der Zeit vor der Versauerungsperiode vor.

Tabelle 4: Gesamttaxazahlen im Großen Arbersee, Kleinen Arbersee und Rachelsee

Gewässer	Probenahme-Jahre	Probenzahl	Taxa	Taxa ARZET (1987)
Großer Arbersee	1912, 1933, 1936, 1949, 1983, 2013	11	130	120
Kleiner Arbersee	1933, 1982, 2013	6	75	130
Rachelsee	1933, 1982, 2013	6	52	115

Die hohe ökologische Wertigkeit der Seen kommt in den artenreichen Vorkommen von Diatomeen der Roten Liste Deutschlands (LANGE-BERTALOT 1996) deutlich zum Ausdruck. Trotz ihrer Versauerung sind die Gewässer auch heute noch Lebensraum zahlreicher gefährdeter Diatomeenarten. Diese sind acidophil, zumeist dystroph und typische Bewohner intakter Moorgewässer. Bezieht man die Taxa der Vorwarnliste ein, erreichen die Rote Liste-Arten in allen drei Seen sehr hohe Anteile an der Gesamttaxazahl (> 50%, siehe Tabelle 5). Ein Verzeichnis der Vorkommen und Häufigkeiten der nachgewiesenen Taxa der Roten Liste ist Tabelle 6 zu entnehmen.

Tabelle 5: Vorkommen von Taxa der Roten Liste Deutschlands im Überblick

Kategorien: 1 = vom Aussterben bedroht, 2 = stark gefährdet, 3 = gefährdet, G = Gefährdung anzunehmen, R = extrem selten, V = Vorwarnliste

Kategorie	Großer Arbersee	Kleiner Arbersee	Rachelsee
1 vom Aussterben bedroht	3	1	-
2 stark gefährdet	6	2	3
3 gefährdet	15	9	6
G Gefährdung anzunehmen	20	14	8
R extrem selten	-	1	-
V Zurückgehend (Vorwarnliste)	23	16	12
Gesamtzahl	67	43	29
Anteil an der Gesamttaxazahl	52 %	57 %	56 %

Tabelle 6: Vorkommen und Häufigkeiten von Taxa der Roten Liste Deutschlands

Rote Liste-Kategorien (RL): 1 = vom Aussterben bedroht, 2 = stark gefährdet, 3 = gefährdet, G = Gefährdung anzunehmen, R = extrem selten, V = Vorwarnliste; n = Zahl der Vorkommen; % = Prozentsumme in allen Proben

DV-Nr.	Taxon	RL	Großer Arbersee		Kleiner Arbersee		Rachelsee	
			n	%	n	%	n	%
16667	Eunotia diadema	1	2	0,6				
6358	Eunotia faba	1	5	3,7	1	0,2		
6850	Eunotia serra var. serra	1	1	2,0				
16168	Brachysira wygaschii	2					1	0,2
26160	Encyonema elginense	2	1	0,5				
26343	Eunotia nymanniana Lectotypus	2	1	1,3				
36243	Eunotia subherkiniensis	2	1	8,3			1	0,2
6382	Eunotia sudetica	2	1	0,4				
16011	Navicula leptostriata	2	1	1,8	1	1,5		
16087	Stenopterobia curvula	2	1	0,6	1	0,2	2	0,4
26056	Achnanthydium linearoides	3	1	0,2	1	0,6		
16167	Brachysira procera	3	2	1,2				
6296	Brachysira serians	3	5	2,3	4	1,5	2	1,8
26177	Encyonema hebridicum	3	1	+	3	0,7	2	0,6
26302	Encyonema lunatum	3	1	0,2				
26172	Encyonema neogracile var. neogracile	3	1	1,7	1	+		
26342	Eunotia compacta	3	3	7,5	1	4,5	1	0,6
6371	Eunotia naegelii	3	2	4,5	1	0,2	1	0,9
6851	Eunotia praeupta var. praeupta	3	1	15,8				
26376	Fragilaria exiguiformis	3	1	0,4				
26426	Gomphonema parvulus	3	1	0,8				
6809	Navicula angusta	3	2	2,8				
6566	Neidium bisulcatum var. bisulcatum	3	1	0,2	2	0,2	2	0,6
26511	Placoneis ignorata	3	1	0,5				
26058	Psammothidium marginulatum	3			1	1,5		
6690	Stenopterobia delicatissima	3	3	0,8	3	1,6	3	1,1
6799	Aulacoseira distans var. distans	G	1	22,5	1	13,4	1	1,7

			Großer Arbersee		Kleiner Arbersee		Rachelsee	
6716	<i>Aulacoseira lirata</i>	G	1	4,2	1	3,0		
6810	<i>Caloneis tenuis</i>	G	1	1,1				
26218	<i>Encyonema perpusillum</i>	G	1	0,2	1	+	1	0,9
26163	<i>Encyonopsis falaisensis</i>	G	1	0,2				
6362	<i>Eunotia glacialis</i>	G	5	5,4	1	+		
6364	<i>Eunotia implicata</i>	G	3	1,0				
6367	<i>Eunotia meisteri</i>	G	1	0,2	1	1,0	1	2,7
26338	<i>Eunotia mucophila</i>	G	6	19,2	5	2,8	5	23,9
6379	<i>Eunotia soleirolii</i>	G					1	+
6187	<i>Frustulia rhomboides</i> var. <i>rhomboides</i>	G	1		1	0,6		
6917	<i>Navicula exilis</i>	G	1	1,3				
16349	<i>Navicula notha</i>	G	3	5,4	3	2,9		
6109	<i>Neidium iridis</i>	G	1	0,2	1	0,2		
26673	<i>Neidium longiceps</i>	G					1	+
6619	<i>Peronia fibula</i>	G	8	119,0	5	18,8	3	4,4
6660	<i>Pinnularia schoenfelderi</i>	G	1	0,5	1	0,2		
36201	<i>Pinnularia subgibba</i>	G	4	0,6			1	0,2
6674	<i>Pinnularia viridiformis</i> var. <i>viridiformis</i>	G	1					
26001	<i>Psammothidium altaicum</i>	G	2	2,2	3	1,7		
16096	<i>Tabellaria quadriseptata</i>	G	2	0,2	1	0,6		
6698	<i>Tabellaria ventricosa</i>	G	2	4,4	1	0,4		
16101	<i>Pinnularia borealis</i> var. <i>scalaris</i>	R			2	1,2		
6268	<i>Achnanthes oblongella</i>	V	1	0,2	1	0,2		
26481	<i>Adlafia bryophila</i>	V	3	0,6	1	1,5	3	4,6
26642	<i>Adlafia suchlandtii</i>	V	1	1,3				
26567	<i>Chamaepinnularia mediocris</i>	V	7	1,5	3	1,7	5	2,0
6346	<i>Diploneis oblongella</i>	V	1	3,4				
6070	<i>Diploneis ovalis</i>	V	1	1,0				
6373	<i>Eunotia paludosa</i> var. <i>paludosa</i>	V	2	4,2				
6168	<i>Eunotia pectinalis</i> var. <i>pectinalis</i>	V	2	1,0	2	4,7	3	1,6
6375	<i>Eunotia rhomboidea</i>	V	9	19,3	6	112,7	6	169,7
6383	<i>Eunotia tenella</i>	V	5	59,7	2	2,1	1	0,6
26357	<i>Eunotia trinacria</i>	V	1	0,2	1	0,2		
6169	<i>Fragilaria virescens</i> var. <i>virescens</i>	V	3	3,2	1	1,5	1	0,8
26397	<i>Frustulia crassinervia</i>	V	2	3,5			1	0,2
26398	<i>Frustulia saxonica</i>	V	11	99,9	6	14,0	5	15,9
26425	<i>Gomphonema exilissimum</i>	V	4	3,7	5	5,2		
6424	<i>Gomphonema hebridense</i>	V	2	0,2				
26641	<i>Kobayasiella parasubtilissima</i>	V	5	22,3	2	3,7	1	3,2
6820	<i>Neidium affine</i> var. <i>affine</i>	V	2	0,2	4	2,1		
6564	<i>Neidium ampliatum</i>	V	3	0,9	2	0,2	1	0,4
26053	<i>Nupela lapidosa</i>	V	1	0,5				
36184	<i>Pinnularia microstauron</i>	V	5	3,9	2	0,2	4	1,5
16074	<i>Pinnularia silvatica</i>	V	3	1,2			1	0,2
26091	<i>Psammothidium subatomoides</i>	V			1	0,4		
6129	<i>Stauroneis anceps</i> var. <i>anceps</i>	V	1	0,3				
6074	<i>Tabellaria fenestrata</i>	V			1	0,5		

Gesellschaften und indizierte Versauerung

Großer Arbersee

Die Gesellschaften des Großen Arbersees werden durch arten- und individuenreiche Vorkommen dystropher Diatomeen geprägt. Zeitweise treten acidophile Arten hinzu, die nicht als typische Moordiatomeen gelten (siehe Tabelle 7). Circumneutrale Arten sind vorhanden, erreichen aber zumeist nur geringe Anteile. Einzig im Jahr 1949 ist durch *Diatoma mesodon*, *Planothidium lanceolatum* und *Pinnularia viridis* ein verstärktes Aufkommen dieser säuresensibler Arten zu beobachten, das sich in den Folgeproben jedoch nicht fortsetzt.

Tabelle 7: Aspektbildner und häufige Diatomeen des Großen Arbersees 1912 bis 2013

rot = acidobionte und acidophile Arten, blau = circumneutrale Arten, braun = dystrophe Arten

Max. Häufigkeit > 50%	≤ 50% und > 25%	≤ 25% und > 10%	≤ 10% und > 5%
Eunotia tenella	Brachysira brebissonii	Aulacoseira distans	Achnanthydium minutissimum
	Eunotia paludosa	Diatoma mesodon	Chamaepinnularia mediocris
	Eunotia rhomboidea	Eunotia exigua	Diademesmis perpusilla
	Frustulia saxonica	Eunotia incisa	Eunotia fallax
	Peronia fibula	Eunotia praeurupta	Eunotia minor
		Kobayasiella parasubtilissima	Eunotia mucophila
		Pinnularia viridis	Eunotia subherkiensis
		Psammothidium acidoclinatum	Planothidium lanceolatum
		Tabellaria flocculosa	Psammothidium helveticum

Die meisten der häufigen Arten sind mit wechselnden Anteilen von 1912 bis 2013 vertreten, zeigen jedoch auffällige Verschiebungen ihrer Häufigkeiten. So ist 1983 eine deutliche Zunahme von Indikatoren anthropogener Versauerung nachzuweisen (siehe Tabelle 8 und Abbildung 2). Erreichten diese bis 1949 lediglich Anteile bis zu 3%, wurde im Oberflächensediment des Jahres 1983 ein Wert von 29% verzeichnet. Blieben die von Arzet bei der Zählung mit erfassten centrischen Diatomeen unberücksichtigt, läge der Wert sogar bei rund 40%. In den Proben des Jahres 2013 nehmen die Versauerungsindikatoren schließlich wieder auf Anteile zwischen 6% und 13% ab, was auf eine gegenüber 1983 deutlich verminderte Säurebelastung hinweist. So reduziert *Eunotia exigua*, die Charakterart anthropogener Versauerung, ihre Anteile von 19% (bzw. 26% bei Nicht-Berücksichtigung der Centrales) in 1983 auf Werte zwischen 2% und 9% in 2013.

Obgleich durch die verminderte Zahl von Versauerungsindikatoren eine Abnahme der Säurebelastung indiziert wird, stellt sich die Diatomeenflora auch aktuell noch als stark gestört dar. Dies kommt nicht allein durch die immer noch starke Präsenz von Versauerungszeigern zum Ausdruck. Auch viele der noch in der ersten Hälfte des vergangen

Jahrhunderts vertretenen dystrophen Diatomeen scheinen verschwunden. Bei diesen handelt es sich vor allem um stenöke Moordiatomeen der Gattung *Eunotia*. Zu nennen sind *E. compacta*, *E. diodon*, *E. fallax*, *E. nymanniana*, *E. paludosa*, *E. praerupta*, *E. serra*, *E. subherkiensis*, *E. sudetica* und *E. trinacria*. Nicht mehr nachzuweisen waren gleichfalls zahlreiche, überwiegend dystrophe Arten anderer Gattungen wie beispielsweise *Kobayasiella parasubtilissima*, *Encyonopsis aequalis*, diverse *Neidium*-Arten, *Tabellaria ventricosa*. Unter den nach 1949 nicht mehr registrierten Arten finden sich auch einige vom Aussterben bedrohte (*E. serra*) und stark gefährdete Moordiatomeen (*E. nymanniana*, *E. subkerkiensis*, *E. sudetica*). In den Gesellschaftsanteilen der dystrophen Artengruppe kommt dies allerdings nur undeutlich zum Ausdruck, da die sensiblen Dystrophiezeiger zeitweise durch andere, jedoch weniger stenöke Moorarten ersetzt werden (z.B. *Eunotia rhomboidea*).

Auffällig ist gleichfalls das zeitliche Muster von *Psammothidium acidoclinatum* (vormals als *P. marginulatum* bestimmt). Diese in Seen und Teichen versauerter Einzugsgebiete lokal verbreitete Art tritt im Großen Arbersee erstmals 2013 auf und erreicht relativ hohe Individuendichten bis zu 15%. Die Art scheint stehende Gewässer bevorzugt zu besiedeln und wird im PHYLIB-Verfahren nicht als Versauerungszeiger geführt. Ihre bisherigen Fundorte legen jedoch eine moderate Toleranz gegenüber anthropogener Versauerung nahe.

Tabelle 8: Indikatoren anthropogener Versauerung und Dystrophiezeiger im Großen Arbersee in den Jahren 1912 bis 2013

VZ [%] = Prozentualer Anteil von Versauerungsindikatoren, DZ = Artenzahl von Dystrophiezeigern, DZ [%] = Prozentualer Anteil von Dystrophiezeigern, HI = Halobienindex, Taxa = Gesamttaxazahl, RL = Zahl von Arten der Roten Liste, RL [%] = Prozentualer Anteil von Rote Liste-Arten

Präparat	Datum	VZ [%]	DZ	DZ [%]	HI	Taxa	RL	RL [%]
Mayer 200E 1043 (229)	17.09.1912	1,0	12	30,0	-75	22	9	81,1
Krieger 5304	Juli 1933	0,2	17	61,8	-77	34	20	60,9
Krieger 5306	August 1933	2,5	17	49,7	-63	49	28	38,5
Krieger 5308	August 1933	0,0	9	99,4	-70	12	6	89,5
Weinzierl B 573 (666)	Juli 1936	0,8	8	87,1	-80	16	9	68,2
Weinzierl B 1138 (1143)	31.7.1949	3,1	7	16,0	-44	49	17	21,0
Arzet	März 1983	29,4	8	42,2	-67	26	11	39,8
BLfU 192246	08.10.2013	8,5	11	36,9	-76	28	17	54,0
BLfU 192247	08.10.2013	13,4	10	57,1	-76	28	14	65,0
BLfU 192248	08.10.2013	6,2	10	76,5	-85	27	16	43,3
BLfU 192249	08.10.2013	9,5	9	31,8	-85	25	15	50,8

In ARZET (1987, Abb. 14) ist in dem 1983 entnommenen Kern eine Zunahme der Versauerungsindikatoren *Eunotia exigua* und *Psammothidium helveticum* (dort als noch als *Achnanthes austriaca* geführt) seit den 1960er Jahren dokumentiert. Wann der Pessimalzustand erreicht war und die Abnahme der diatomeen-indizierten Versauerung eingesetzt hat, kann auf Grund des Fehlens von Daten in den Jahren 1984 bis 2012 nicht bestimmt werden.

Da die Gesellschaften durchgehend von Arten gebildet werden, die eine hohe Sensibilität gegenüber saprobiellen und trophischen Belastungen aufweisen, ergeben sich zu allen untersuchten Zeitpunkten oligotrophe und oligosaprobe Verhältnisse (TI = 1,40-1,79, SI = 1,00-1,17). Der Halobienindex liegt mit Werten zwischen -85 und -63 erwartungsgemäß im stark negativen Bereich. Lediglich die 1949 entnommene Probe weist einen geringfügig höheren Wert auf (HI = -44), bewegt sich aber gleichfalls noch in der infrahaloben Klasse (= extrem elektrolytarm und sauer).

Kleiner Arbersee

Die Untersuchung des Sedimentkernes durch Arzet im Jahr 1983 erbrachte eine große Ähnlichkeit mit der Diatomeenflora des Großen Arbersees. Auch die vorliegenden Daten zum Diatomeenaufwuchs weisen eine hohe Übereinstimmung im Arteninventar beider Seen auf. Wie im Großen Arbersee werden die Gesellschaften durch die Dominanz acidophiler und dystropher Diatomeen geprägt (siehe Tabelle 9). Unterschiede ergeben sich hauptsächlich durch die hohen Individuendichten von *Tabellaria flocculosa*, die die Gesellschaften des Jahres 2013 lokal dominiert. 1933 wurde die Art dagegen nur in geringer Zahl angetroffen. Auch die Gesamtzahl der häufigen Arten ist deutlich geringer als im Großen Arbersee (vergleiche Tabellen 7 und 9), was vermutlich auf die Tatsache zurückzuführen ist, dass lediglich eine Probe aus der Vorkriegszeit vorliegt. Aspektbildend sind im Kleinen Arbersee weiterhin die dystrophen Arten *Brachysira brebissonii*, *Eunotia rhomboidea*, *E. incisa* und der Versauerungszeiger *E. exigua* vertreten. Im Sedimentkern des Jahres 1983 ist zusätzlich die fakultativ planktische *Aulacoseira distans* individuenreich enthalten. Floristisch bemerkenswert ist das Vorkommen von *Encyonopsis aequalis*, einer nach KRAMMER (1997) bisher selten gefundenen Art. Sie soll oligotrophe Gewässer mit niedrigem Elektrolytgehalt und Moorgewässer besiedeln und wurde hier vorläufig als dystroph klassifiziert.

Tabelle 9: Aspektbildner und häufige Diatomeen des Kleinen Arbersees 1933 bis 2013

rot = acidobionte und acidophile Arten, blau = circumneutrale Arten, braun = dystrophe Arten

Max. Häufigkeit > 50%	≤ 50% und > 25%	≤ 25% und > 10%	≤ 10% und > 5%
<i>Tabellaria flocculosa</i>	<i>Brachysira brebissonii</i>	<i>Eunotia exigua</i>	<i>Encyonopsis aequalis</i>
	<i>Eunotia rhomboidea</i>	<i>Aulacoseira distans</i>	<i>Eunotia mucophila</i>
		<i>Eunotia incisa</i>	<i>Frustulia saxonica</i>
			<i>Peronia fibula</i>
			<i>Pinnularia interrupta</i>
			<i>Psammothidium acidoclinatum</i>
			<i>Psammothidium helveticum</i>

Wie im Großen Arbersee wird auch hier Anfang der 1980er Jahre eine starke Versauerung indiziert. Betrug der Anteil von Indikatoren anthropogener Versauerung 1933 lediglich 3%, wird im Oberflächensediment des Jahres 1982 ein Wert von 29% erreicht. Bliebe die fakultativ planktische Art *Aulacoseira distans* unberücksichtigt ergäbe sich sogar ein Anteil von deutlich über 30%. Wie im Großen Arbersee sinken im Jahr 2013 die Dichten der Versauerungszeiger wieder deutlich ab (Anteile zwischen 9% und 17%), was auf eine gegenüber 1983 deutlich verminderte Säurebelastung hinweist. Die zeitliche Dynamik und das Ausmaß der indizierten Versauerung entspricht damit der des Großen Arbersees.

Mit der Versauerung einher geht ein Rückgang der Artenzahl dystropher Diatomeen. Im Jahr 1933 wurden noch 18 verschiedene Arten nachgewiesen, unter denen sich neben *Eunotia faba* (vom Aussterben bedroht) auch einige stark gefährdete und gefährdete Arten befinden (*Navicula leptostriata*, *Encyonema neogracile*, *Eunotia compacta*). Die Zahl der Rote Liste-Taxa verringert sich von 27 im Jahr 1933 (in einer Probe!) auf durchschnittlich 11 im Jahr 2013. Obgleich eine deutliche Abnahme der anthropogenen Versauerung indiziert wird, ist auch dies Beleg für die gegenwärtig noch tiefgreifend veränderte Diatomeenflora im Kleinen Arbersee.

Nach den Angaben von ARZET (1987) ist davon auszugehen, dass die Versauerung im Kleinen Arbersee in den 1940er bis 1950er Jahren massiv einsetzte und mindestens bis 1982 stetig zugenommen hat. Wann die Erholungsphase begann, ist analog zum Großen Arbersee, auch hier auf Grund des Fehlens von Untersuchungen im Zeitraum von 1983 bis 2012 nicht zu datieren.

Wie im Großen Arbersee bestehen die Gesellschaften durchgehend aus hochgradig saprobie- und trophie-sensiblen Diatomeen. In allen untersuchten Proben ergeben sich bei sehr geringen Schwankungsbreiten oligotrophe und oligosaprobe Verhältnisse (TI = 1,47-1,52, SI = 1,01-1,04). Der Halobienindex liegt mit Werten zwischen -83 und -73 erwartungsgemäß im stark negativen Bereich. und bewegt sich in der infrahaloben Klasse (= extrem elektrolytarm und sauer).

Tabelle 10: Indikatoren anthropogener Versauerung und Dystrophiezeiger im Kleinen Arbersee in den Jahren 1933, 1982 und 2013

VZ [%] = Prozentualer Anteil von Versauerungsindikatoren, DZ = Artenzahl von Dystrophiezeigern, DZ [%] = Prozentualer Anteil von Dystrophiezeigern, HI = Halobienindex, Taxa = Gesamttaxazahl, RL = Zahl von Arten der Roten Liste, RL [%] = Prozentualer Anteil von Rote Liste-Arten

Präparat	Datum	VZ [%]	DZ	DZ [%]	HI	Taxa	RL	RL [%]
Krieger 5314	August 1933	3,4	19	74,8	-75	48	27	42,6
Arzet	Juli 1982	28,9	10	37,5	-74	29	17	35,8
BLfU 192238	08.10.2013	11,1	9	46,0	-83	23	13	41,6
BLfU 192239	08.10.2013	13,6	8	38,2	-75	25	13	35,5
BLfU 192240	08.10.2013	16,9	7	53,2	-73	23	11	46,4
BLfU 192241	08.10.2013	9,4	6	29,7	-73	18	8	28,9

Rachelsee

Im Vergleich mit dem Großen und Kleinen Arbersee stellt sich der Rachelsee als das artenärmste Gewässer dar (siehe Tabelle 4). In den sechs untersuchten Proben wurden lediglich 52 Taxa nachgewiesen. Der Kleine Arbersee ist bei identischem Probenumfang mit 75 Arten deutlich artenreicher. Noch 1933 prägten dystrophe Diatomeen das Gesellschaftsbild des Rachelsees: Mit hohen Anteilen dominieren *Eunotia incisa* und *E. rhomboidea* den Diatomeenaufwuchs des Standortes. Als individuenreiche Begleitart tritt die gleichfalls dystrophe *E. mucophila* hinzu. Aber auch der Versauerungsindikator *E. exigua* erreicht bereits 1933 einen im Vergleich der drei Seen hohen Anteil von 14%. Der dystrophe Aspekt überwiegt jedoch noch deutlich. Vergleichbare Dominanzverhältnisse sind auch für den unteren Bereich des Sedimentkernes dokumentiert, dessen "Diatomeenarchiv" mindestens 400 Jahre in der Zeit zurückreicht. Nach ARZET (1987) scheint der Rachelsee von jeher etwas saurer gewesen zu sein als die beiden Arberseen. Zudem ist eine temporäre pH-Depression bis Mitte des 19. Jahrhunderts dokumentiert, die vermutlich durch die Einleitung sulfidhaltiger Grubenabwässer und Bergbauaktivitäten verursacht wurde.

Tabelle 11: Aspektbildner und häufige Diatomeen des Kleinen Arbersees 1933 bis 2013

rot = acidobionte und acidophile Arten, blau = circumneutrale Arten, braun = dystrophe Arten

Max. Häufigkeit > 50%	≤ 50% und > 25%	≤ 25% und > 10%	≤ 10% und > 5%
<i>Psammothidium acidoclinatum</i>	<i>Eunotia exigua</i>	<i>Achnanthydium minutissimum</i>	<i>Chamaepinnularia mediocris</i>
	<i>Eunotia incisa</i>		<i>Eunotia mucophila</i>
	<i>Eunotia rhomboidea</i>		<i>Frustulia saxonica</i>

Im Oberflächensediment des Jahres 1982 treten die dystrophen Arten in ihrer Häufigkeit deutlich zugunsten des Versauerungszeigers *E. exigua* zurück. Dieser erreicht nun einen Anteil von 34% und indiziert eine bereits fortgeschrittene anthropogene Versauerung. Die Artenzahl der dystrophen Diatomeen indes verringert sich nicht und ist Ausdruck eines unverändert hohen dystrophen Potenzials.

Die Veränderungen der Diatomeenflora im Jahr 2013 sind Ausdruck einer seit den 1990er Jahren dokumentierten, langsamen aber stetigen Zunahme des pH-Wertes. Diese äußert sich nicht nur in einer moderaten Abnahme des Versauerungsindikators *E. exigua* (siehe Tabelle 12). Ebenso bedeutsam ist das Aufkommen des circumneutralen *Achnanthydium minutissimum*, das lokal Anteile bis zu 24% erreicht und auf zeitweise nur noch schwach saure Zustände schließen lässt. Ausdruck einer veränderten Diatomeenflora sind auch die Vorkommen des acidophilen *Psammothidium acidoclinatum*, das wie im Großen Arbersee auch im Rachelsee 2013 erstmals nachgewiesen wurde. Diese in Seen und Teichen versauerter Einzugsgebiete lokal verbreitete *Psammothidium*-Art erreicht relativ hohe Individuendichten bis zu 29%. Die Art scheint stehende Gewässer bevorzugt zu besiedeln und

wird im PHYLIB-Verfahren nicht als Versauerungszeiger geführt. Ihre bisherigen Fundorte legen jedoch eine moderate Toleranz gegenüber anthropogener Versauerung nahe.

Tabelle 12: Indikatoren anthropogener Versauerung und Dystrophiezeiger im Rachelsee in den Jahren 1933, 1982 und 2013

VZ [%] = Prozentualer Anteil von Versauerungsindikatoren, DZ = Artenzahl von Dystrophiezeigern, DZ [%] = Prozentualer Anteil von Dystrophiezeigern, HI = Halobienindex, Taxa = Gesamttaxazahl, RL = Zahl von Arten der Roten Liste, RL [%] = Prozentualer Anteil von Rote Liste-Arten

Präparat	Datum	VZ [%]	DZ	DZ [%]	HI	Taxa	RL	RL [%]
Krieger 5310	August 1933	16,2	9	81,0	-96	19	10	46,2
Arzet	Juli 1982	38,1	9	44,4	-73	21	10	33,8
BLfU 192254	09.10.2013	23,6	9	44,5	-77	22	10	29,3
BLfU 192255	09.10.2013	23,8	7	41,5	-70	17	8	39,9
BLfU 192256	09.10.2013	21,3	8	64,5	-78	19	11	62,9
BLfU 192257	09.10.2013	19,6	12	50,3	-79	22	13	39,2

Das Inventar von Arten der Rote Liste Deutschlands ist im Rachelsee deutlich geringer als in den beiden Arberseen (siehe Tabellen 5 und 6), wenngleich auch hier mit *Brachysira wygaschii*, *Eunotia subherkiensis* und *Stenopterobia curvula*, alles dystrophe Diatomeen, drei stark gefährdete Taxa nachgewiesen wurden.

Wie in den Arberseen werden weder saprobiellen Belastungen noch Eutrophierungseinflüsse angezeigt. In allen sechs Proben ergeben sich bei sehr geringen Schwankungsbreiten der Indizes oligotrophe und oligosaprobe Verhältnisse (TI = 1,49-1,54, SI = 1,01-1,08). Der Halobienindex liegt mit Werten zwischen -96 und -70 erwartungsgemäß im stark negativen Bereich und bewegt sich in der infrahaloben Klasse (= extrem elektrolytarm und sauer).

Die Entwicklung der Versauerung im Überblick

Wie aus Abbildung 2 ersichtlich, zeigt der durch die Diatomeenflora indizierte Verlauf der Versauerung in den beiden Arberseen große Ähnlichkeit. Noch im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts waren Indikatoren anthropogener Versauerung nur in sehr geringer Zahl zu finden. Anfang der 1980er Jahre weisen dann hohe Anteile auf eine bereits fortgeschrittene starke Versauerung hin. Im Jahr 2013 wird im Zuge verminderter Schwefeldepositionen ein Rückgang der Säurebelastung angezeigt. In beiden Seen stellt sich die Diatomeenflora dennoch weiterhin als stark gestört dar. Dies wird nicht allein durch die immer noch individuenreichen Vorkommen von Versauerungszeigern bedingt. Auch viele der noch im ersten Drittel des vergangenen Jahrhunderts vertretenen dystrophen Diatomeen scheinen verschwunden zu sein.

Im Unterschied zu den Arberseen waren im Rachelsee Versauerungsindikatoren bereits 1933 in beachtlicher Zahl vertreten. Im Jahr 1982 stieg ihr Anteil auf nahezu 40% und nimmt damit im Vergleich der drei Seen den höchsten Wert an. Wie in den Arberseen ist die Versauerung im Jahr 2013 auch im Rachelsee rückläufig, übersteigt in ihrem Ausmaß jedoch unverändert die des Großen und Kleinen Arbersees.

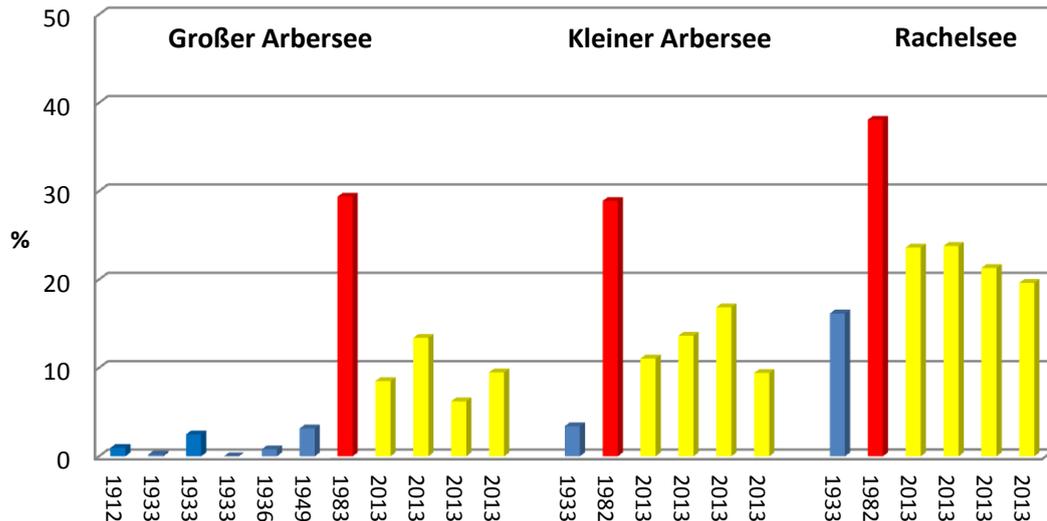


Abbildung 2: Häufigkeiten der Indikatoren anthropogener Versauerung

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie dokumentiert die im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt durchgeführten Untersuchungen der Diatomeenflora in historischen und aktuellen Proben des Großen und Kleinen Arbersees sowie des Rachelsees. Die historischen Proben entstammen überwiegend den Jahren 1912 bis 1936, die aktuellen Proben wurden im Jahr 2013 im Rahmen des biologischen Gewässermonitorings entnommen. Zusätzlich berücksichtigt wurden Daten von Oberflächenproben dreier Sedimentkerne, die Anfang der 1980er Jahre in den Seen entnommen und analysiert wurden (ARZET 1987). Der Auswertung liegen insgesamt 23 Diatomeenproben zu Grunde.

In den beiden Arberseen weist der durch die Diatomeenflora indizierte Verlauf der Versauerung eine große Ähnlichkeit auf. Noch im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts waren Indikatoren anthropogener Versauerung nur in sehr geringer Zahl vertreten. Anfang der 1980er Jahre weisen hohe Anteile von Versauerungszeigern dann auf eine bereits fortgeschrittene starke Versauerung hin. Im Jahr 2013 wird im Zuge verminderter Schwefeldepositionen wieder ein Rückgang der Säurebelastung angezeigt.

Obgleich durch die verminderte Zahl von Versauerungsindikatoren gegenwärtig ein Rückgang der Säurebelastung indiziert wird, stellt sich die Diatomeenflora der beiden Arberseen auch aktuell noch als stark gestört dar. Dies wird nicht allein durch die immer noch individuenreichen Vorkommen von Versauerungszeigern belegt. Auch viele der noch im ersten Drittel des vergangenen Jahrhunderts vertretenen Moordiatomeen scheinen aus den beiden Arberseen verschwunden zu sein, unter ihnen zahlreiche Arten der Roten Liste mit hohen Gefährdungsgraden.

Im Unterschied zu den beiden Arberseen waren im Rachelsee Versauerungsindikatoren bereits 1933 in beachtlicher Zahl vertreten. Im Jahr 1982 erreicht ihr Anteil im Vergleich der drei Seen den höchsten Wert. Wie in den Arberseen ist die Versauerung im Jahr 2013 auch im Rachelsee rückläufig, übersteigt in ihrem Ausmaß jedoch unverändert die des Großen und Kleinen Arbersees.

Literatur

- ALLES, E. (1999): Fließgewässerversauerung im Schwarzwald. Ökologische Bewertung auf der Basis benthischer Diatomeen.- Zentraler Fachdienst Wasser – Boden – Abfall – Altlasten bei der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.- Handbuch Wasser 2: 1-507.
- ANDRÉN, C. & JARLMAN, A. (2008): Benthic diatoms as indicators of acidity in streams.- *Fundamental and Applied Limnology*, Archiv für Hydrobiologie 173/3: 237-253.
- ARZET, K. (1987): Diatomeen als pH-Indikatoren in subrezentem Sedimenten von Weichwasserseen.- *Diss. Abt. Limnol. Innsbruck* 24: 1-266.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (Hrsg.) (1999): Versauerung oberirdischer Gewässer in Bayern.- *Informationsberichte des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft* 4/99: 1-343.
- CORING, E. (1999): Säuregrad. Indikation mit Hilfe von Diatomeen. In: VON TÜMPLING, W. & FRIEDRICH, G. (Hrsg.): *Biologische Gewässeruntersuchung.- Methoden der biologischen Gewässeruntersuchung* 2: 298-305.
- EUROPÄISCHE UNION (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.- *Amtsblatt der Europäischen Union* L 32771, 22.12.2002.
- HAEUPLER, H. (1982): Evenness als Ausdruck der Vielfalt in der Vegetation. Untersuchungen zum Diversitätsbegriff.- *Diss Botanicae* 65: 1-268.
- HOFMANN, G. (1994): Aufwuchs-Diatomeen in Seen und ihre Eignung als Indikatoren der Trophie.- *Bibliotheca Diatomologica* 30: 1-241.
- HOFMANN, G. (2000): Säurezustandsbewertung ausgewählter Fließgewässer von Niederbayern, Oberfranken und Unterfranken anhand von benthischen Diatomeen.- *Bericht zum Meßprogramm „Versauerung oberirdischer Gewässer in Bayern“, im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft*: 1-31 und Anhang.
- HOFMANN, G. (2014): Bewertung des Säurezustands von Fließgewässern des bayerischen Versauerungsmonitorings anhand von benthischen Diatomeen.- *Bericht zum Projekt „25 Jahre Versauerungsmonitoring – SAMOWA25“*: 1-57.
- HOFMANN, G.; WERUM, M. & LANGE-BERTALOT, H. (2011): *Diatomeen im Süßwasser-Benthos von Mitteleuropa*.- Gantner Verlag, 908 S.
- HUSTEDT, F. (1938/1939): Systematische und ökologische Untersuchungen über die Diatomeenflora von Java, Bali und Sumatra.- *Archiv Hydrobiologie Suppl.* 15: 638-798; 16: 274-394.
- KRAMMER, K. & LANGE-BERTALOT, H. (1986-91): *Süßwasserflora von Mitteleuropa, Bacillariophyceae*. 2/1: Naviculaceae, 876 S.; 2/2: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirella-

ceae, 596 S.; 2/3: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae, 576 S.; 2/4: Achnantheaceae, 437 S.; Stuttgart (Fischer).

- KRAMMER, K. (1997): Die cymbelloiden Diatomen. Eine Monographie der weltweit bekannten Taxa. Teil 2. *Encyonema* part., *Encyonopsis* and *Cymbellopsis*.- Bibliotheca Diatomologica 37: 1-469.
- KRAMMER, K. (2000): The genus *Pinnularia*.- Diatoms of Europe 1: 1-703.
- LANGE-BERTALOT, H. (1993): 85 Neue Taxa.- Bibliotheca Diatomologica 27: 1-454.
- LANGE-BERTALOT, H. (2001): *Navicula* sensu stricto. 10 Genera Separated from *Navicula* sensu lato *Frustulia*.- Diatoms of Europe 2: 1-526.
- LANGE-BERTALOT, H. & MOSER, G. (1994): *Brachysira*. Monographie der Gattung.- Bibliotheca Diatomologica 29: 1-212.
- LANGE-BERTALOT, H. (1996): Rote Liste der Kieselalgen (Bacillariophyceae) Deutschlands.- Schriftenreihe für Vegetationskunde 28: 633-678.
- LANGE-BERTALOT, H. & METZELTIN, D. (1996): Oligotrophie-Indikatoren. 800 Taxa repräsentativ für drei diverse Seen-Typen.- *Iconographia Diatomologica* 2: 1-390.
- LANGE-BERTALOT, H.; BAK, M. & WITKOWSKI, A. (2011): *Eunotia* and some related genera.- Diatoms of Europe 6: 1-747.
- MAUCH, E.; SCHMEDTJE, U.; MAETZE, A. & FISCHER, F. (2003): Taxaliste der Gewässerorganismen Deutschlands zur Kodierung biologischer Befunde.- Informationsberichte des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft 1/03: 1-388.
- ROTT, E.; HOFMANN, G.; PALL, K.; PFISTER, P. & PIPP, E. (1997): Indikationslisten für Aufwuchsalgen. Teil 1: Saprobielle Indikation.- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Wien: 1-73.
- SCHAUMBURG, J.; SCHRANZ, C.; STELZER, D. & VOGEL, A. (2011): Handlungsanleitung für die ökologische Bewertung von Seen zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie: Makrophyten und Phytobenthos: 1- 124. Bayerisches Landesamt für Umwelt (Stand August 2011).
- SCHAUMBURG, J.; SCHRANZ, C.; STELZER, D.; VOGEL, A. & GUTOWSKI, A. (2012): Verfahrensanleitung für die ökologische Bewertung von Fließgewässern zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie: Makrophyten & Phytobenthos: 1- 191. Arbeitsmaterialien des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (Stand Januar 2012).
- SHANNON, C.E. & WEAVER, W. (1949); *The mathematical theory of communication*.- Urbana (Univ. Illinois Press), 117 S.
- VAN DAM, H.; MERTENS, A. & SINKELDAM, J. (1994): A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands.- *Netherlands Journal of Aquatic Ecology* 28(1): 117-133.

ZAHN, H. (1990): Ergebnisbericht zur Sonderuntersuchung 80.6 „Versauerung oberirdischer Gewässer (Berichtszeitraum 1983-1990)“, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München, 49 S.

ZIEMANN, H.; NOLTING, E. & RUSTIGE K.H. (1999): Bestimmung des Halobienindex.
In: VON TÜMPLING, W. & FRIEDRICH, G. (Hrsg.): Biologische Gewässeruntersuchung.-
Methoden der Biologischen Gewässeruntersuchung 2: 310-313.

Anhang

Tabelle A 1: Verzeichnis und Häufigkeiten der in den Arberseen und im Rachelsee nachgewiesenen Diatomeentaxa

n = Zahl der Vorkommen in 23 Proben; % = Summenprozent in 23 untersuchten Proben

DV-Nr.	Taxon	Großer Arbersee		Kleiner Arbersee		Rachelsee	
		n	%	n	%	n	%
16110	<i>Achnanthes curtissima</i>			1	0,4		
6268	<i>Achnanthes oblongella</i>	1	0,2	1	0,2		
26097	<i>Achnantheidium</i>	3	0,6	1	0,9		
26056	<i>Achnantheidium linearioides</i>	1	0,2	1	0,6		
26060	<i>Achnantheidium minutissimum</i> var. <i>minutissimum</i>	6	11,2	4	1,2	5	33,3
26481	<i>Adlafia bryophila</i>	3	0,6	1	1,5	3	4,6
26642	<i>Adlafia suchlandtii</i>	1	1,3				
6983	<i>Amphora pediculus</i>			1	+		
36017	<i>Asterionella ralfsii</i>			1	0,2		
6798	<i>Aulacoseira ambigua</i>	1	1,9				
6799	<i>Aulacoseira distans</i> var. <i>distans</i>	1	22,5	1	13,4	1	1,7
6716	<i>Aulacoseira lirata</i>	1	4,2	1	3,0		
6291	<i>Brachysira brebissonii</i>	9	106,8	6	33,1	3	4,1
6295	<i>Brachysira neoexilis</i>	2	1,9	2	1,6	1	1,7
16167	<i>Brachysira procera</i>	2	1,2				
6296	<i>Brachysira serians</i>	5	2,3	4	1,5	2	1,8
16168	<i>Brachysira wygaschii</i>					1	0,2
6810	<i>Caloneis tenuis</i>	1	1,1				
26567	<i>Chamaepinnularia mediocris</i>	7	10,5	3	1,7	5	11,0
6157	<i>Cymbella</i>	1	0,2				
6895	<i>Cymbella microcephala</i>	1	0,2				
26210	<i>Cymbopleura naviculiformis</i>	1	0,3				
26497	<i>Diadесmis contenta</i>	2	0,6				
26525	<i>Diadесmis perpusilla</i>	2	9,0				
6185	<i>Diatoma anceps</i>	1	0,2				
6949	<i>Diatoma mesodon</i>	2	19,7				
6346	<i>Diploneis oblongella</i>	1	3,4				
6070	<i>Diploneis ovalis</i>	1	1,0				
26288	<i>Encyonema</i>			1	0,2		
26160	<i>Encyonema elginense</i>	1	0,5				
26177	<i>Encyonema hebridicum</i>	1	+	3	0,7	2	0,6
26302	<i>Encyonema lunatum</i>	1	0,2				
26172	<i>Encyonema neogracile</i> var. <i>neogracile</i>	1	1,7	1	+		
26218	<i>Encyonema perpusillum</i>	1	0,2	1	+	1	0,9
36062	<i>Encyonema silesiacum</i>	1	0,5				

		Großer Arbersee		Kleiner Arbersee		Rachelsee	
26318	Encyonema ventricosum					1	1,1
26320	Encyonopsis	1	0,2				
26132	Encyonopsis aequalis	1	0,4	1	7,4		
26163	Encyonopsis falaisensis	1	0,2				
26568	Eolimna minima	1	0,3				
6998	Eunotia	2	0,7			1	0,2
6213	Eunotia bilunaris var. bilunaris	4	4,6			1	0,2
26342	Eunotia compacta	3	7,5	1	4,5	1	0,6
16667	Eunotia diadema	2	0,6				
6357	Eunotia diodon	1	1,1				
6975	Eunotia exigua var. exigua	9	46,4	6	62,0	6	132,7
6358	Eunotia faba	5	3,7	1	0,2		
6359	Eunotia fallax var. fallax	3	7,0	1	0,2	1	0,4
6362	Eunotia glacialis	5	5,4	1	+		
6364	Eunotia implicata	3	1,0				
6214	Eunotia incisa	9	72,9	6	61,2	6	85,7
6367	Eunotia meisteri	1	0,2	1	1,0	1	2,7
6369	Eunotia minor	5	13,1			3	0,6
26338	Eunotia mucophila	6	19,2	5	20,8	5	23,9
6371	Eunotia naegeli	2	4,4	1	0,2	1	0,9
26343	Eunotia nymmanniana Lectotypus	1	1,3				
6373	Eunotia paludosa var. paludosa	2	40,2				
36241	Eunotia paratridentula	4	1,2	3	4,6		
6168	Eunotia pectinalis var. pectinalis	2	1,0	2	4,7	3	1,6
6851	Eunotia praerupta var. praerupta	1	15,8				
6375	Eunotia rhomboidea	9	109,3	6	112,7	6	169,7
6850	Eunotia serra var. serra	1	2,0				
6379	Eunotia soleirolii					1	+
6381	Eunotia subarcuatoides	1	0,2	1	2,3	1	1,7
36243	Eunotia subherkiniensis	1	8,2			1	0,2
6382	Eunotia sudetica	1	0,4				
6383	Eunotia tenella	5	59,7	2	2,1	1	0,6
26357	Eunotia trinacria	1	0,2	1	0,2		
6161	Fragilaria	1	0,2	1	0,2	1	0,2
6388	Fragilaria brevistriata var. brevistriata			1	0,4		
16573	Fragilaria construens	1	1,6	1	0,2		
6828	Fragilaria construens f. venter			1	0,9		
26376	Fragilaria exiguiformis	1	0,4				
16995	Fragilaria gracilis			1	0,2		

		Großer Arbersee		Kleiner Arbersee		Rachelsee	
26375	<i>Fragilaria rumpens</i>	3	3,1				
16658	<i>Fragilaria ulna</i> var. <i>ulna</i>	1	0,4				
6169	<i>Fragilaria virescens</i> var. <i>virescens</i>	3	3,2	1	1,5	1	0,8
26397	<i>Frustulia crassinervia</i>	2	3,5			1	0,2
6187	<i>Frustulia rhomboides</i> var. <i>rhomboides</i>	1	+	1	0,6		
26398	<i>Frustulia saxonica</i>	11	99,1	6	14,0	5	15,9
6794	<i>Gomphonema</i>	3	2,6			1	+
6080	<i>Gomphonema acuminatum</i> var. <i>acuminatum</i>	1	0,4				
6217	<i>Gomphonema clavatum</i>	1	4,5				
26425	<i>Gomphonema exilissimum</i>	4	3,7	5	5,2		
6883	<i>Gomphonema gracile</i>	2	0,5				
6424	<i>Gomphonema hebridense</i>	2	0,2				
26426	<i>Gomphonema parvulus</i>	1	0,8				
16572	<i>Gomphonema parvulum</i> - Sippen	1	0,5	1	0,2		
26641	<i>Kobayasiella parasubtilissima</i>	5	22,3	2	3,7	1	3,2
6005	<i>Melosira varians</i>	2	0,2	3	0,6	1	0,4
6446	<i>Meridion circulare</i> var. <i>constrictum</i>	1	0,3				
6990	<i>Navicula</i>	3	0,7	1	0,2		
6809	<i>Navicula angusta</i>	2	2,8				
6917	<i>Navicula exilis</i>	1	1,3				
16011	<i>Navicula leptostriata</i>	1	1,8	1	1,5		
16349	<i>Navicula notha</i>	3	5,4	3	2,9		
6822	<i>Neidium</i>	1	0,5	3	1,1	3	4,4
6820	<i>Neidium affine</i> var. <i>affine</i>	2	0,2	4	2,1		
6564	<i>Neidium ampliatus</i>	3	0,9	2	0,2	1	0,4
6566	<i>Neidium bisulcatum</i> var. <i>bisulcatum</i>	1	0,2	2	0,2	2	0,6
6109	<i>Neidium iridis</i>	1	0,2	1	0,2		
26673	<i>Neidium longiceps</i>					1	+
6972	<i>Nitzschia</i>	3	0,6				
6931	<i>Nitzschia hantzschiana</i>	1	0,8				
16576	<i>Nitzschia palea</i>	1	0,5				
6605	<i>Nitzschia perminuta</i>	2	0,4	1	0,6		
26053	<i>Nupela lapidosa</i>	1	0,5				
6619	<i>Peronia fibula</i>	8	118,9	5	18,8	3	4,4
6151	<i>Pinnularia</i>	5	2,7	3	1,9	4	2,3
36169	<i>Pinnularia borealis</i>	1	1,5				
16101	<i>Pinnularia borealis</i> var. <i>scalaris</i>			2	1,2		
6121	<i>Pinnularia gibba</i> var. <i>gibba</i>	1	0,2			1	0,2
6637	<i>Pinnularia gibba</i> var. <i>linearis</i>	1	0,2				

		Großer Arbersee		Kleiner Arbersee		Rachelsee	
6844	<i>Pinnularia interrupta</i>	2	1,9	1	8,2	1	3,5
36184	<i>Pinnularia microstauron</i>	5	3,9	2	0,2	4	1,5
36195	<i>Pinnularia rupestris</i>	1	4,5				
6660	<i>Pinnularia schoenfelderi</i>	1	0,5	1	0,2		
16074	<i>Pinnularia silvatica</i>	3	1,2			1	0,2
6662	<i>Pinnularia sinistra</i>	2	2,0				
16481	<i>Pinnularia subcapitata</i> var. <i>elongata</i>	2	0,5	1	0,9	1	+
26914	<i>Pinnularia subcapitata</i> var. <i>subcapitata</i>	7	11,1	6	7,9	6	9,8
36201	<i>Pinnularia subgibba</i>	4	0,6			1	0,2
6674	<i>Pinnularia viridiformis</i> var. <i>viridiformis</i>	1	+				
36207	<i>Pinnularia viridis</i>	3	15,3				
26511	<i>Placoneis ignorata</i>	1	0,5				
16606	<i>Planothidium frequentissimum</i> var. <i>frequentissimum</i>	2	3,6				
26048	<i>Planothidium lanceolatum</i>	1	8,9				
26831	<i>Psammothidium acidoclinatum</i>	4	28,1	4	9,5	4	60,6
26001	<i>Psammothidium altaicum</i>	2	2,2	3	1,7		
26031	<i>Psammothidium helveticum</i>	5	17,0	6	13,4	1	+
26058	<i>Psammothidium marginulatum</i>			1	1,5		
26091	<i>Psammothidium subatomoides</i>			1	0,4		
26235	<i>Reimeria sinuata</i> var. <i>sinuata</i>	1	0,5				
36214	<i>Sellaphora pupula</i>	1	0,3				
6821	<i>Stauroneis</i>	2	0,5				
26854	<i>Stauroneis acidoclinata</i>	2	1,0	1	+		
6129	<i>Stauroneis anceps</i> var. <i>anceps</i>	1	0,3				
16087	<i>Stenopterobia curvula</i>	1	0,6	1	0,2	2	0,4
6690	<i>Stenopterobia delicatissima</i>	3	0,8	3	1,6	3	1,1
6228	<i>Surirella brebissonii</i> var. <i>kuetzingii</i>	1	0,3				
6155	<i>Tabellaria</i>	1	3,6				
6074	<i>Tabellaria fenestrata</i>			1	0,5		
36222	<i>Tabellaria flocculosa</i>	9	65,7	6	149,7	6	7,2
16096	<i>Tabellaria quadrisepata</i>	2	0,2	1	0,6		
6698	<i>Tabellaria ventricosa</i>	2	4,4	1	0,4		