



Mit Unterstützung von Bund, Land und Europäischer Union

 Bundesministerium  
Land- und Forstwirtschaft,  
Regionen und Wasserwirtschaft

**LE 14-20**  
Entwicklung für den Ländlichen Raum



regio IMST



Europäischer  
Landwirtschaftsfonds für  
die Entwicklung des  
ländlichen Raums.  
Hier investiert Europa in  
die ländlichen Gebiete.



*Zitation:*

Teubner K. (2023) Mikrobielle Dynamik: Planktonische Cyanobakterien und Algen im Piburgersee. Untersuchungsergebnisse im Rahmen des REGIO-Projekts - Qualitätsverbesserung Piburger See, Projektbericht, 14 Seiten

*Fotos auf dem Cover:* Phytoplankton Piburger See bei Phasenkontrast unter dem Lichtmikroskop in Zählkammern, Lichtmikroskop mit Phasenkontrast, Probenahmeflaschen Piburger See 2023.

PD Dr. Katrin Teubner  
[Katrin.teubner@univie.ac.at](mailto:Katrin.teubner@univie.ac.at)  
<https://www.lakeriver.at/>

# Mikrobielle Dynamik: Planktonische Cyanobakterien und Algen im Piburgersee

## Untersuchungsergebnisse im Rahmen des REGIO-Projekts - Qualitätsverbesserung Piburger See

Katrin Teubner <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Functional and Evolutionary Ecology, Faculty of Life Sciences, University of Vienna, Vienna, Austria,

**Zusammenfassung** Alle taxonomischen Phytoplanktongruppen sind entlang der beprobten Tiefen 0m, 3m, 6m, 9m und 12m über den Untersuchungszeitraum 29 Juni bis 21 September 2023 im Piburger See vertreten, wenngleich für das Gesamtphytoplankton in 6m Tiefe (tiefste Probenahmestelle im Epilimnion) im Mittel die höchsten Biovolumina gemessen wurden. Von Frühsommer bis Sommer entwickeln sich zuerst die Chrysophyceen. Die Entwicklung der Cyanobakterien beginnt ebenfalls im Frühsommer, wird aber im Sommer unterbrochen. Im Sommer entwickeln sich dafür vorrangig die Dinophyceen, die Grünalgen s.l. und die Cryptophyceen. Zu den dominanten bzw. fast stetig vorhandenen Artvertretern jener Gruppen, von Frühsommer bis Sommer, zählen *Dinobryon divergens* (Chrysophyceen), *Botryococcus braunii* (Grünalgen naher Vertreter, Trebouxiophyceae) und *Pandorina morum* (Grünalge). Erst im Spätsommer kommt es bei den Cyanobakterien zu einem erneuten Wachstum, und zwar sowohl vonseiten der trichalen Form *Dolichospermum lemmermannii* als auch den koloniebildenden kleinzellig-coccalen Formen wie *Aphanothece* und *Aphanocapsa*. Die Besonderheit bei *Dolichospermum lemmermannii* ist weiters, dass bereits im frühen Sommer 2023 deutlich viele Dauerzellen beobachtet werden konnten, die als eine Vorbereitung auf ein Ruhestadium interpretiert werden können. Bei dem erneuten Biomassezuwachs beginnend im Spätsommer, tritt die Bildung von Dauerzellen ein zweites Mal auf, verzögert nach der Bildung vegetativer Zellen. Auch *Ceratium hirundinella*, bildet die höchsten Biovolumina im Spätsommer bzw. Herbst. Auffallend ist weiter, dass *Dinobryon divergens*, *Botryococcus braunii* und *Aphanothece* spec. / *Aphanocapsa* spec. selbst in tiefen Wasserschichten des Metalimnions (9 und 12 m) vertreten sind, wogegen *Pandorina morum* und *Ceratium hirundinella* sowie quasi auch *Dolichospermum lemmermannii* dort ausbleiben. Über den dreimonatigen Zeitraum wöchentlicher Probenahme ergeben sich die höchsten Biovolumenanteile am Gesamtphytoplankton durch die Grünalgen (37%) und die Cryptophyceen (22%), wogegen die Cyanobakterien mit nur 11% relativ wenig beitragen. Der geringe Anteil der Cyanobakterien am Gesamtphytoplankton im Piburger See wird vermutlich dem kühlen Sommer 2023 zuzuschreiben sein, da eine expansive Massenentwicklung dieses Cyanobakteriums in anderen alpinen Seen laut einer italienischen Studie (Salmaso et al, 2015) nur während sommerlicher Hitzeperioden auftritt. Wenn diese Annahme richtig ist, lassen sich für den Piburger See bei Sommerhitze künftiger Jahre höhere Biovolumina für *Dolichospermum lemmermannii* vermuten. Die Beobachtung von *Dolichospermum lemmermannii* im Piburger See kann als Neufund gelten, da dieses Cyanobakterium in früheren Phytoplanktonpublikationen zum Piburger See nicht erwähnt wird. Zu den potentiellen Toxinbildnern im Piburger See, die zugleich auch dominante Arten im Plankton sind, können neben der prokaryotischen Lebensform *Dolichospermum lemmermannii* auch eukaryotische Plankter (Algen) gezählt werden, wie etwa *Dinobryon divergens* und *Ceratium hirundinella*. Die Angaben zu Vertretern potentieller Phytotoxinproduktion sind der Literatur entnommen. Toxinmessungen wurden 2023 nicht im Piburger See durchgeführt. Bei allen übrigen Phytoplanktern im Piburger See 2023 sind entweder nur geringe Zelldichten entwickelt worden oder es ist keine Phytotoxinproduktion aus der Literatur bekannt.

## 1 Einleitung: Bedeutung planktonischer Mikroben in Hinsicht der Wasserqualität

Das Phytoplankton ist ein natürlicher Bestandteil im Ökosystem See. Als Primärproduzenten nehmen sie eine zentrale Rolle als stoffliche Quelle in verschiedenen Nahrungsnetzen ein. Je nach Jahreszeit kommt es

natürlicherweise zu saisonalen Sukzessionen und damit zu wechselnden Kombination von Arten in der planktonischen Gemeinschaft, die für das Seenplankton verschiedener Seentypen gut bekannt sind (z.B., Sommer et al.,

1986). Wenn allerdings sich Algenblüten massiv entwickeln, und diese von phytotoxinproduzierenden Vertretern gebildet werden, kommt es zur mehrfachen Beeinträchtigung, nämlich sowohl für das Ökosystem und infolge dessen auch für die menschliche Nutzung. Phytotoxine, insbesondere Cyanotoxine, stellen eine weitgreifende Beeinträchtigung der Gewässernutzung bezüglich Erholung und Trinkwassergewinnung dar (Chorus und Welker, 2021; Cerasino et al. 2022).

Abgesehen von einer potentiellen Gefährdung durch Phytotoxinproduktion, schlägt sich eine Algenblüte oft auch auf den Verlust der Wasserklarheit nieder, sodass aktiv Maßnahmen zur Gewässerrestaurierung häufig ergriffen werden (e.g., Alte Donau: Dokulil et al., 2018; Piburger See: Pechlaner, 1979). Wassertransparenz ist in

zweierlei Hinsicht von zentraler Bedeutung (Teubner et al, 2020). Es ist zum einen der einzige Parameter, der durch menschliche Wahrnehmung die Beurteilung der Wasserqualität durch die Bevölkerung zugänglich macht. Zum anderen zeigt die Wassertransparenz den Fortschritt einer Seesaniierung und einen guten Gewässerzustand in Summe an. Die Wassertransparenz kann damit als sozio-ökologischer Indikator eines Gewässers gesehen werden, verbindet eine Ökosystemnutzung (ecosystem services) mit nachhaltiger Ökosystemgesundheit (ecosystem health). Eine hohe Wassertransparenz, d.h., eine Kontrolle von Algenblüten, insbesondere wenn diese von potentiellen Toxinproduzenten gebildet werden, ist daher auch für den Piburger See von zentraler Bedeutung.

## 2 Ziel der Studie: Identifizierung dominanter und potenziell toxischer Phytoplanktonvertreter

Der Schwerpunkt dominante Phytoplankter zu untersuchen, hat sich mit der Thematik Eutrophierung der Seen entwickelt, da eine massive Biovolumenentwicklung des Phytoplanktons meist durch ein unausgewogenes Wachsen weniger dominanter Arten zustande kommt. Die Gruppe der Cyanobakterien konnte sich mit auffälligen Massenentwicklungen merkbar im Zuge der weltweiten Eutrophierung global ausbreiten.

Die Entwicklung von massiven Biomassen in Seen an sich ist bereits sehr problematisch, weil einem massiven Aufbau in der Vegetationsperiode ein massiver Abbau und mit letzterem eine starke Sauerstoffzehrung erfolgt. Die Massenentwicklung von Cyanobakterien, jedoch, wird vordergründig mit Interesse verfolgt, weil viele Vertreter der Cyanobakterien Cyanotoxine bilden können und so das Leben der Organismen im See aber auch die Nutzung des Sees durch den Menschen einschränken (Chorus und Welker, 2021; Cerasino et al. 2022, Teubner et al, 2022). Cyanobakterien, allerdings, erwachsen nur dann eben zu einem Problem für ein Gewässer und dessen Nutzung, wenn sie sich alleinig und massiv entwickeln. Cyanobakterien sind in vielen Planktongemeinschaften natürlicherweise und typischerweise MIT vertreten und gelten von daher nicht generell als problematisch. Auch ist erwähnenswert, dass nicht in allen stark eutrophierten Seen massiv Cyanobakterien, sondern „ersatzweise“ bspw. die Massenentwicklung von toxischen Grünalgen beobachtet werden.

Problematische Massenentwicklungen in flachen Seen sind gegeben, wenn sich die Cyanobakterien *Microcystis*, *Aphanizomenon*, *Planktothrix agardhii* und *Dolichospermum flos-aquae*, *D. lemmermannii* entwickeln (u.a., Teubner, 1996), für tiefe alpine Seen vordergründig meist das Cyanobakterium *Planktothrix rubescens* (u.a., Kurmayer et al., 2011; Dokulil und Teubner, 2012). Die Ausbreitung von Cyanobakterien macht allerdings nicht vor alpinen Seen halt, vor allem dann nicht, wenn sich ökophysiologisch betrachtet nachhaltig begünstigende Wachstumsbedingungen für die Cyanobakterien ergeben. Somit kommt es nicht nur zum „Einwandern“ von Arten aus benachbarten Gewässern, sondern auch von anderen Kontinenten, was mit der Problematik invasive Arten bzw. Alien species heute viel debattiert wird. So gilt es, auch für den Piburger See, das Ausmaß und die Ursache von rezenten Phytoplanktonblüten zu erfassen und das Wissen im Zuge eines Seenmanagements zu verarbeiten.

Frühere Beschreibungen zur Phytoplanktongemeinschaft Piburger See, von Tolotti et al. (2002, 2005, 2011, 2012), haben das nostocale Cyanobakterium *Dolichospermum lemmermannii* in den Artenlisten nicht erwähnt. Salmaso et al. (2015) beschreibt die rezente Ausbreitung der Massenaufkommen von *Dolichospermum lemmermannii* in die tiefen Seen südlich der Alpen, zeigt heterogene Besiedlungsmuster auf und verweist auf eine mögliche Einschränkung menschlicher Wassernutzung. Von daher gilt es zu ergründen, wie weit sich *Dolichospermum lemmermannii* auch im Piburger See ausbreiten konnte und welche anderen potentiellen Phytotoxinproduzenten zugleich sich hier entwickelt

haben. Ein guter Überblick zu den toxischen Cyanobakterien (Prokaryoten) ist in [Chorus und Welker \(2021\)](#), zu den toxischen Algen (Eukaryoten) in [Watson et al. \(2015\)](#) gegeben.

An dieser Stelle sei der Vollständigkeit halber auch erwähnt, dass nicht alle Vertreter der Cyanobakterien problematisch sind, sondern manche Nostocales bspw. sogar als essbar (Nahrungsmittel) oder als Delikatesse gelten, wie *Nostoc commune* oder *Nostoc pruniforme*. Andere Cyanobakterien, wie *Spirulina*, wiederum werden als Nahrungsergänzungsmittel verbreitet gehandelt. Auch bei den eukaryotischen Vertretern lässt sich nicht nur das Beispiel von Toxinbildnern in der Literatur finden. So werden umgekehrt eukaryotische Arten, die dem Menschen dermatologisch sehr gut verträglich sind, beschrieben. Dies gilt z.B. für die massenhaft im Piburger See vorkommende Grünalge *Botryococcus braunii* (Trebouxiaceae) ([Buono et al., 2012](#)). Damit schließt sich

der Kreis der Argumentation, dass im Piburger See nicht ausschließlich auf potentielle Phytotoxinproduzenten, und da keinesfalls nur eingeschränkt auf *Dolichospermum lemmermannii* geschaut werden sollte. Es gilt insgesamt das Verteilungsmuster der Phytoplankter über die Tiefenstufen und über den sommerlichen Zeitverlauf bis in den Herbst zu verfolgen, um die räumliche und zeitliche Dynamik der Planktonentwicklung zu erfassen. Dabei sollte sich auf dominante und stetig auftretende Algenarten und Algengruppen konzentriert werden, da Änderungen der Dominanzverhältnisse in der Phytoplanktongemeinschaft ggf. Nutzungseinschränkungen des Sees mit sich bringen können (ecosystem services). Die Artenliste von Phytoplanktern Piburger See 2023 soll biomassestarke bzw. stetige Arten hervorheben und in dem Fall, zugleich ein potentieller Toxinbildner zu sein, dementsprechend textlich markiert werden.

## 3 Methode

### 3.1 BEPROBUNG DES PHYTOPLANKTONS

Die 13 Probenahmen im Piburger See (47° 11' 42" N, 10° 53' 20" O) erfolgten im Zeitraum vom 29.6. bis zum 21.9.2023 im wöchentlichen Rhythmus. Die Wasserproben wurden vom Projektteam vor Ort jeweils in den Seetiefen 0m, 3m, 6m, 9m und 12m mit einem Schöpfer entnommen und mit Lugol'scher Lösung in 300mL Flaschen fixiert.

### 3.2 BESTIMMUNG DER TAXA

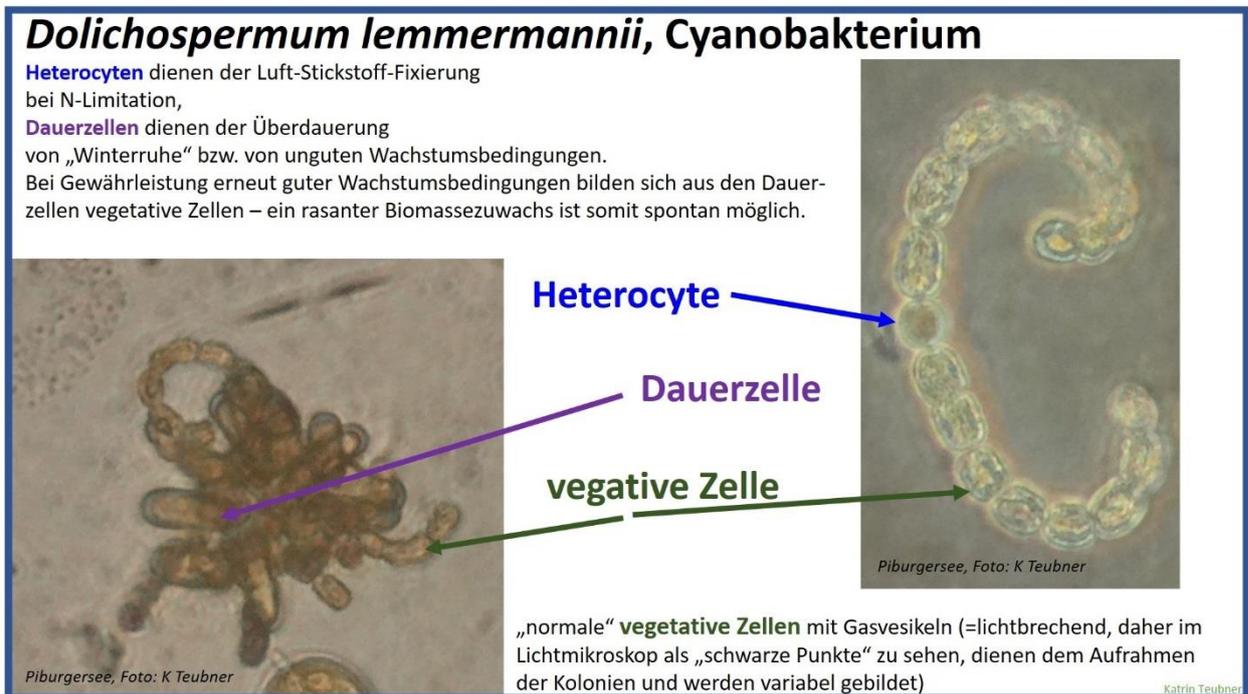
Sowohl die Bestimmung der Phytoplanktontaxa als auch die Zählung erfolgten unter einem Lichtmikroskop mit Phasenkontrast. Taxonspezifische Merkmale, wie bspw. die phasenweise ausgebildeten Dauerzellen und Heterocyten bei *Dolichospermum lemmermannii* oder anderen nostocalen Cyanobakterien (Abb. 1), wurden quantitativ erfasst. Die Vertreter der Phytoplankter sind in Tabelle 1 als Liste aufgeführt.

Als Bestimmungsliteratur dienen im wesentlichen [Kaštovský et al. \(2018\)](#) und die Internetseite [algaebase](https://www.algaebase.org/) (<https://www.algaebase.org/>).

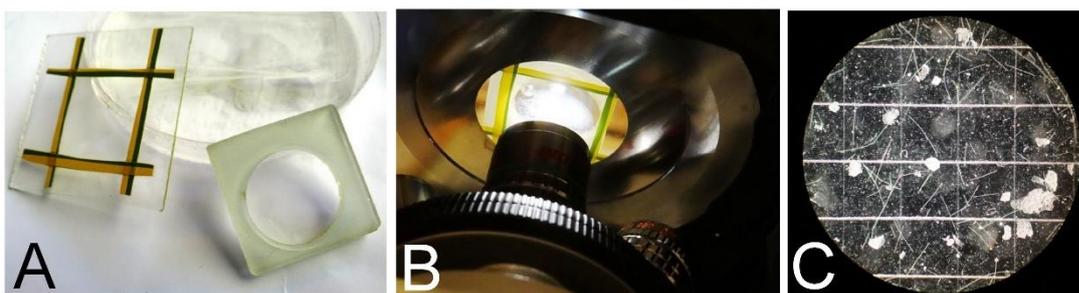
### 3.3 MIKROSKOPISCHE QUANTIFIZIERUNG DES PHYTOPLANKTONS

Zur mikroskopischen Quantifizierung wurden die Phytoplankter von jeweils 300 mL Probenahmenvolumen für das Auszählen in Sedimentationskammern angereichert (Abb. 2). Bei der Vermessung der Zelldimensionen wurde sich auf den zellplasmahaltigen Zellkörper bezogen, um so ein Biovolumen äquivalent zum Chlorophyll-a Gehalt der Zellen zu erfassen. Die Relation zwischen Phytoplanktonbiovolumen und dem Chlorophyll-a Gehalt der Phytoplankter, sowie die Umrechnung des Phytoplanktonbiovolumens in Phytoplankton-Frischbiomasse wird in [Teubner et al. \(2018, 2022\)](#) beschrieben.

Die Grundlagen der Erfassung des Phytoplanktonbiovolumens, die dem Verdrängungsvolumen der Zellen im Wasser entspricht, werden u.a. in [Rott \(1981\)](#) dargelegt.



**Abbildung 1:** *Dolichospermum lemmermannii*, lugolfixierte Zählproben in Zählkammern unter dem Lichtmikroskop. Neben der Erfassung der Zelldimensionen zwecks Biovolumenbestimmung, ist bei Nostocalen auch die Quantifizierung von Dauerzellen und Heterocyten wichtig, um das Vorkommen und Wachstum dieser Cyanobakterien am Standort ökophysiologisch zu verstehen. Beide Zellformen lassen sich morphologisch leicht von den vegetativen Zellen unterscheiden.



**Abbildung 2:** Mikroskopisches Abschätzen des Biovolumens vom Phytoplankton. **A:** leere Sedimentationskammer, dient befüllt dem Sedimentieren der Lugol fixierten Seewasserprobe. **B:** Auszählung unter dem Umgekehrten Lichtmikroskop im Phasenkontrast, wobei die Phytoplankter auf dem Zählraster in der Sedimentationskammer liegen. **C:** Blick durch das Okular auf die Probe in der Sedimentationskammer, hier zum Überblick bei geringer Vergrößerung. Große Algenkolonien sind in dieser Wasserprobe viel seltener als Algenfäden zu finden, und jene Algenfäden wiederum seltener als kleine Zellen. Daher müssen für seltenere große Algenkolonien große Flächen der Kammer ausgezählt werden, für dicht liegende kleine Zellen dagegen genügen vergleichsweise kleinere Flächen um die Algen einer Planktonprobe repräsentativ über das gesamte Größenspektrum zu erfassen. Das weite Größenspektrum ergibt sich im Piburger See durch die großen Zellen von *Ceratium hirundinella* und *Gyrodinium helveticum*, sowie den z.T. riesigen Kolonien von *Botryococcus braunii* und *Dolichospermum lemmermannii* bis hin zu den kleinen Zellen von *Plagioselmis lacustris* oder *Aphanocapsa* spec. Das Phytoplanktonbiovolumen können generell alle Größenklassen dominieren, sowohl ein Vorkommen unzählig vieler kleinzelliger Arten oder wenige der

riesige Zellformen bzw. große Kolonien. Ökologisch, allerdings, sind ein massenhaft kleinzelliges Phytoplankton gegenüber jenem mit großzelligem oft eher spärlicheren Phytoplankton verschieden zu interpretieren. Die Planktonvertreter im Piburger See, die als potentiell toxisch verstanden werden, gehören allesamt entweder großzelligen Formen (*Ceratium hirundinella*) oder Arten riesiger Kolonieverbände bildend an (*Dolichospermum lemmermannii*, *Dinobryon divergens*). Mit der Lugolfixierung zerfallen oftmals riesige gallertartige Kolonieverbände (coccale Cyanobakterien, aber auch geknäulte Kolonien von *Dolichospermum lemmermannii*) bzw. verlieren die Zellen die Verbindung zu ihren Koloniestrukturen (z.B. *Dinobryon divergens*: Zellen separieren sind von den Zellulosehäusern und Häuser zerfallen in kleine Gruppen). Solche Fixiermittelartefakte sollten bei der ökologischen Interpretation der Ergebnisse der Biovolumenabschätzung nicht unberücksichtigt bleiben. (Abbildung modifiziert aus [Teubner et al, 2022](#))

**Tabelle 1:** Liste der beobachteten planktischen Algen und Cyanobakterien in dem Beobachtungszeitraum vom 29 Juni bis 21 September 2023. Grün sind Vertreter markiert, die wenigstens eine von beiden genannten Bedingungen erfüllen: stetig oder oft über Wochen vorhanden bzw. zeitweise sehr hohe Biovolumenanteile am Gesamtphytoplankton erreichend. Für den Fall, dass jene Vertreter als potentiell toxisch gelten, sind die Namen zusätzlich in einen Text-Rahmen gesetzt (prokaryotische Plankter, d.h. Cyanobakterien siehe [Chorus und Welker \(2021\)](#), eukaryotischen Plankter, d.h. Algen siehe [Watson et al. \(2015\)](#)).

- **Cyanobacteria**, Chroococcales, Synechococcales

*Aphanothece* spec.

*Aphanocapsa* spec.

*Chroococcus minutus*

*Coelosphaerium kuetzingianum*

*Cyanodictyon reticulatum*

*Gomphosphaeria aponina*

*Limnococcus limneticus*

*Radiocystis* spec.

*Snowella lacustris*

*Microcystis viridis*

*Limnothrix redekei*

*Pseudanabaena tenuis*

- **Cyanobacteria**, Oscillatoriales

*Oscillatoria limosa*

*Phormidium* spec.

*Planktothrix rubescens* (De Candolle ex Gomont)

*Anagnostidis* & Komárek

*Tychonema* spec.

- **Cyanobacteria**, Nostocales

*Aphanizomenon gracile*

*Aphanizomenon klebahnii*

*Aphanizomenon skujae*

*Dolichospermum lemmermannii* (Richter) P.Wacklin,  
L.Hoffmann & J.Komárek

*Cuspidothrix issatschenkoii*

- **Bacillariophyceae**

Sammelgruppe einzelliger zentrischen Diatomeen

*Aulacoseira granulata*

*Asterionella formosa*

*Fragilaria crotonensis*

*Navicula* spec.

*Nitzschia acicularis*

*Tabellaria fenestrata*

*Tabellaria flocculosa*

- **Cryptophyceae**

*Cryptomonas curvata* Ehrenberg

*Cryptomonas erosa* Ehrenberg

*Cryptomonas marsonii*

*Cryptomonas ovata* Ehrenberg

*Cryptomonas platyuris* Skuja

*Komma caudata*

*Plagioselmis lacustris* Ehrenberg

*Plagioselmis nannoplanctica*

- **Chrysophyceae**

*Bitrichia chodatii*

*Chrysococcus rufescens*

*Dinobryon bavaricum*

*Dinobryon divergens* O.E.Imhof

*Uroglena nygaardii* Bourrelly

*Mallomonas caudata* Iwanoff [Ivanov]

*Mallomonas crassisquama*

*Ochromonas* spec.

- **Coccolithophyceae**

*Chrysochromulina parva* Lackey

- **Chlorophyceae**

*Chlamydomonas* spec.

*Coelastrum astroideum*

*Radiococcus* spec.

*Coenochloris* spec.

*Crucigenia fenestrata*

*Crucigenia quadrata*

*Crucigenia rectangularis*

*Eutetramorus fottii*

*Lanceola spatulifera*

*Monoraphidium griffithii*

*Mucidosphaerium pulchellum*

*Oocystis lacustris*

*Pandorina morum* (O.F.Müller) Bory

*Phacotus lenticularis* (Ehrenberg) Diesing  
*Pseudopediastrum boryanum*  
*Scenedesmus ellipticus*  
*Scenedesmus obtusus*  
*Scenedesmus quadricauda*  
*Tetraëdron caudatum*  
*Tetraselmis spec*  
*Tetrastrum komarekii*

#### • Trebouxiophyceae

*Botryococcus braunii* Kützing  
*Planctonema lauterbornii*

#### • Charophyceae

Chara?

*Cosmarium depressum*  
*Cosmarium pygmaeum* Skuja  
*Staurostrum paradoxum*  
*Elakatothrix gelatinosa*

#### • Dinophyceae

*Apocalathium aciculiferum*

*Ceratium hirundinella* (O.F.Müller) Dujardin

*Gymnodinium pygmaeum*

*Gymnodinium ubberimum*

*Gyrodinium helveticum* (Penard) Y.Takano & T.Horiguchi

*Peridiniopsis spec*

*Peridinium cinctum*

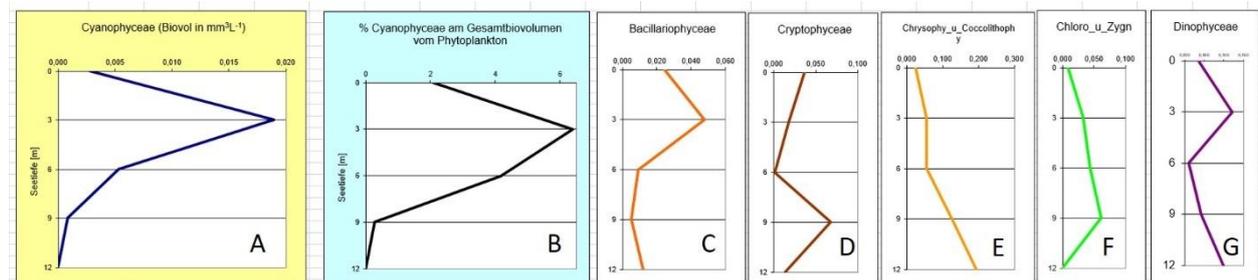
*Peridinium willei*

## 4 Ergebnisse und Diskussion

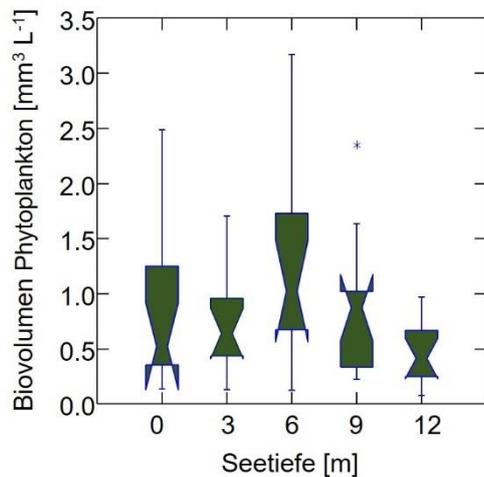
Um die mikrobielle Dynamik in der Planktongemeinschaft, den Cyanobakterien und Algen, und dabei insbesondere die Entwicklung potentieller Phytotoxinbildner im Piburger See besser zu verstehen, ergeben sich folgende Fragen bei der Phytoplanktonauswertung:

- in welchem Ausmaß entwickeln einzelne, auch ggf. toxische Algengruppen dominante Vorkommen

- sind jene Gruppen oder auch Arten räumlich an bestimmte Gewässertiefen bevorzugt gebunden
- zeigen sich deutlich zeitliche Schwankungen des Auftretens und damit saisonale Muster dominanter und ggf. auch potentiell toxischer Phytoplankter



**Abbildung 3:** Tiefenprofil für die Phytoplankton-Großgruppen am 29. Juni 2023. Cyanophyceae als absolute (A) und relative Biovolumina (B), Bacillariophyceae (C), Cryptophyceae (D), Chrysophyceae und Coccolithophyceae (E), Chlorophyceae und Zygnematophyceae (F) und Dinophyceae (G).



**Abbildung 4:** Tiefenverteilung des Gesamtphytoplanktons über die Gesamtheit der 13 Probenahmeterminale. Gekerbte Box-Whisker Darstellung: da die Kerben der Boxen benachbarter Tiefenstufen jeweils überlappen, wird graphisch angezeigt, dass es in keinem Fall eine statistische signifikante Unterscheidung zwischen benachbarten Tiefenstufen gibt, auch wenn die höchsten Biovolumina in 6m Tiefe gemessen wurden.

### 3.1 DOMINANTE PHYTOPLANKTON- VERTRETER UND POTENTIELL TOXISCHE TAXA

Die dominanten und potentiell auch als toxisch erachteten Phytoplanktonvertreter (Watson et al., 2015; Chorus und Welker, 2021) sind in der Liste der Phytoplanktonvertreter markiert (Tabelle 1). Als Cyanotoxinbildner sind eine Reihe von Cyanobakterien in der Literatur bekannt, wobei jene Gattungen, wie bspw. *Microcystis*, oder auch andere im Piburger See 2023 selten beobachtete nostocale Cyanobakterien wenig relevant erscheinen, da sie 2023 nur geringe Biovolumina entwickelt haben. Damit kann unter den Cyanobakterien nur *Dolichospermum lemmermannii* als problematischer Plankter hier gesehen werden.

Ähnlich verhält es sich mit den Chrysophyceen. Auch wenn generell *Mallomonas*-Arten als Toxinbildner beschrieben werden, erreichen sie keine herausragenden Biovolumina von Juni bis September 2023. Nur *Dinobryon divergens* wäre hier als potentiell problematisch einzustufen, da diese Art relativ stetig

mit erhöhten Biovolumina über Wochen vorkommt. Analoges gilt auch für die Dinophyceen, wobei nicht auszuschließen ist, dass im Piburger See auch Arten der Gattung *Peridinium* potentielle Phytotoxinbildner sind. Aber es bleibt auch hier nur eine Art, nämlich *Ceratium hirundinella*, als potentieller Toxinbildner relevant, da diese Dinoflagellaten-Art über längere Perioden höhere Biomassen im Piburger See gebildet hat.

### 3.2 RÄUMLICHE VERTEILUNG: ALGENVORKOMMEN JE SEETIEFE

Das Tiefenprofil ist beispielhaft für Ende Juli gezeigt (Abb. 3). Für die absoluten als auch relativen Biovolumina bilden die Cyanobakterien in 3m Gewässertiefe die stärksten Vorkommen aus (Abb. 3 A, B). Auch die Kieselalgen (Bacillariophyceae, Abb. 3 C) und Dinoflagellaten (Abb. 3 G) bilden in 3m Gewässertiefe ein Biomasse-Maximum. Dagegen weichen übrige hier gezeigte Algengruppen deutlich von diesem Tiefenverteilungsmuster ab.

Ein epilimnetisches Biomassemaximum in 2-3 m Gewässertiefe, was meist mit einer optimalen Lichtverfügbarkeit von 10-12% gegenüber der Seenoberfläche einhergeht (Teubner et al, 2020, 2022), tritt relativ häufig auf. Nur an Tagen verminderter Sonneneinstrahlung, z.B. bei Bewölkung, werden die höchsten Biovolumina direkt an der Seenoberfläche gebildet. Der Vergleich der Biovolumina über den gesamten Datensatz Piburger See 2023 zeigt allgemein, dass die höchsten Biovolumina in 6m, also der lichtabgewandten Seite des Epilimnions zu finden sind (Abb. 4).

Algenphysiologisch ist meist nicht die Frage „viel Licht“ für einen Biomassezuwachs zur Verfügung zu haben, sondern „nicht zu viel“, weil eine zu hohe Lichtintensität (und UV) den Photosynthese Apparat schädigen kann. Wenn mindestens über vier Stunden am Tag der zelluläre Aufbau (Photosynthese) gegenüber dem zellulären Abbau (Respiration) überwiegt, ist ein Zuwachs an Algenbiomasse und damit Wachstum gewährleistet. Weiters ist für manche Phytoplankter, wie die Cyanobakterien, Cryptophyceen, Bacillariophyceen und auch Dinoflagellaten bekannt, sich nicht strikt autotroph, sondern mixotroph, also damit zeitweise weniger lichtabhängig heterotroph, ernähren zu können. Vor diesem algenphysiologischen Hintergrund erklärt sich das erhebliche Vorkommen der Phytoplankter auch in den tieferen (metalimnetischen) Schichten im

Piburger See, wenn der gesamte Datensatz der 13 Profile angeschaut wird (Abb. 4). In jener Tiefe von 9 und 12m sollten typischerweise etwas weniger als 1% der Lichtintensität der Seenoberfläche noch vorliegen (Annahme aus anderen alpinen Seen hergeführt, Messwerte im Piburger See Sommer 2023 hier nicht verfügbar). Dieses dim-Licht ist algenphysiologisch von hoher Relevanz und „bedient“ räumlich eine relativ mächtige Tiefen-Wasserschicht, da das Licht beim Eindringen in den Wasserkörper mit der Tiefe nicht linear, sondern exponentiell abnimmt.

So ist festzuhalten, dass neben den Nährstoffverhältnissen auch die Lichtverfügbarkeit für ein optimales Phytoplanktonwachstum von entscheidender Bedeutung ist. In tiefen alpinen Seen ist das sogenannte Tiefen-Chlorophyllmaximum allgemein an eine Ausprägung von einem Metalimnion bei thermischer Schichtung gekoppelt. Mit der fortschreitenden Erwärmung im Sommer, wird die seenoberflächennahe Wasserschicht zunehmend mächtiger und die Sprungschicht wandert dabei weiter in die Gewässertiefe. Im Mondsee (Dokulil und Teubner, 2012, 2023) variiert das Tiefenchlorophyllmaximum daher je nach sommerlicher Probenahme zwischen (6) 7m im Frühsommer und bis 12m im Hoch- oder Spätsommer. Im Piburger See sind im Untersuchungszeitraum der thermischen Schichtung die Proben von 0-6m dem Epilimnion, die Tiefenstufen 9 und 12 m dem Metalimnion zuzuordnen (Niedrist et al, 2018).

### 3.3 ZEITLICHE VERTEILUNG: WÖCHENTLICHE SCHWANKUNGEN UND SAISONALE MUSTER

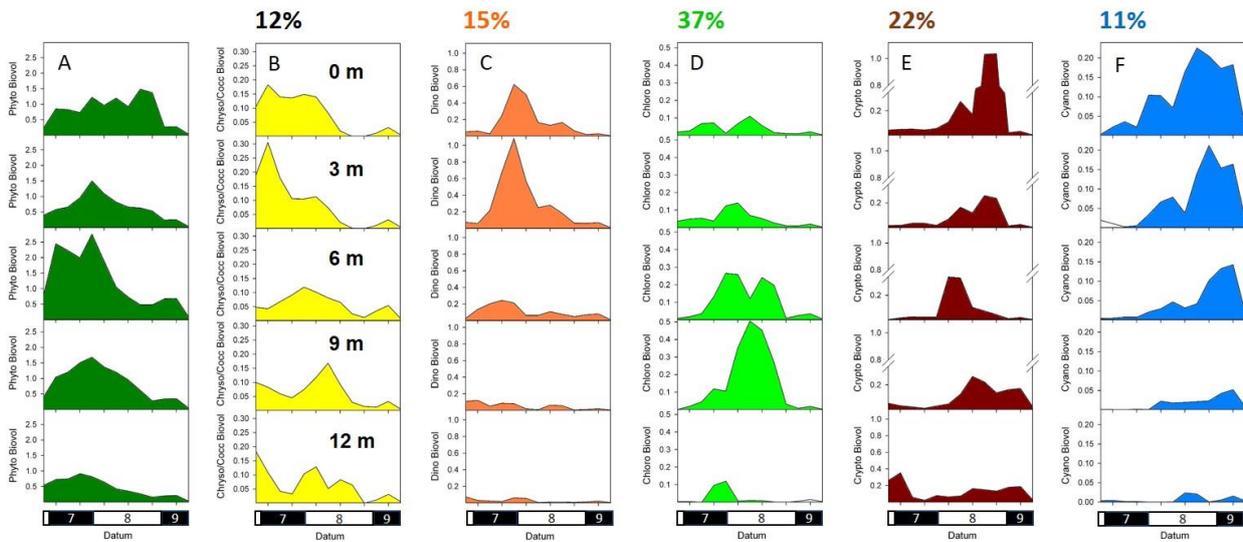
Die Verteilung der Biovolumina des Gesamtphytoplanktons und von fünf ausgewählten Algengruppen, aber auch von einzelnen Arten, ist in Abb. 5 und 6 dargestellt. Es ist auf den ersten Blick ganz offensichtlich, dass mit den wöchentlichen Probenahmen eine hohe Dynamik sowohl räumlich über die Tiefenstufen als auch zeitlich über drei Sommer-Herbst Monate aufgezeichnet wurde.

Die starke Variabilität des Gesamtphytoplanktonbiovolumens über die Zeit ergibt in der Tiefenstufe von 6 m (Abb. 5A). Laut Niedrist et al. (2018), ist es die tiefste epilimnetische Schicht. Weiters ist auffällig, dass der Schwerpunkt der Phytoplanktonentwicklung in dieser Tiefenschicht bereits zu Sommerbeginn, im Wesentlichen bedingt durch die beginnende Entwicklung der Grünalgen und Chrysophyceen liegt. Massenentwicklungen in Tiefenschichten sind auch in anderen

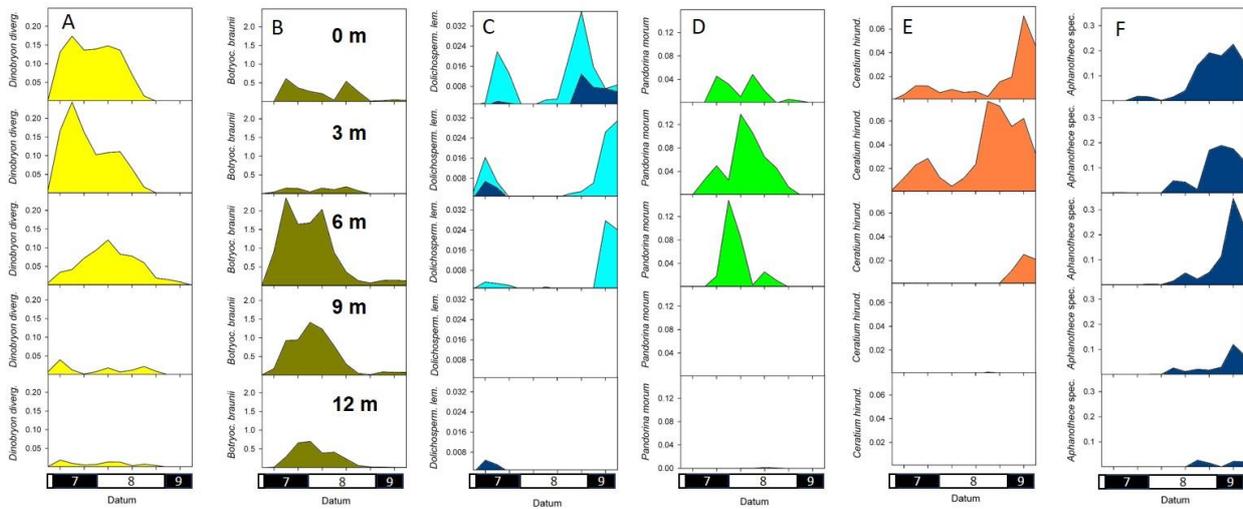
dimiktischen Seen oft zu Beginn der thermischen Schichtung auffällig, wogegen später die sommerliche Biomasseentwicklung aufgrund der saisonalen Nährstoffverknappung nur noch einschränkt verläuft (Bsp. Mondsee, Abb. 10 in Dokulil und Teubner, 2012).

Ein rasanter Biomassezuwachs im Piburger See in 6m, initialisiert zu Beginn des Sommers, zeigt sich für einen dominanten Artvertreter der Grünalgen s.l., nämlich für *Botryococcus braunii* (Trebouxiophyceae, Abb. 6B) (Bezeichnung Grünalgen s.l., weil die Pigmentmuster dieser vielfältigen Algen sehr ähnlich sind und früher diese taxonomischen Gruppen zu den Chlorophyta zusammengefasst worden sind, auch wenn die heutige gültige Taxonomie einen eher diverseren genetischen Hintergrund widerspiegelt). Der dominante Artvertreter der Chrysophyceen, *Dinobryon divergens* (Abb. 6A), zeigt ebenfalls einen Biomasseschwerpunkt vom zeitigen Sommer bis Sommermitte. Die mixotrophen *Dinobryon*-Arten sind dafür bekannt, dass sie in alpinen Seen innerhalb kurzer Zeiträume kurzfristig massiv Biomasse entwickeln können (Dokulil und Skolaut, 1991; Psenner und Sommaruga, 1992).

Eine frühsommerliche Entwicklung trifft auch für *Dolichospermum lemmermannii*, einem fädigen Vertreter der Cyanophyceen, im Piburger See zu (Abb. 6 C). Allerdings wird hier nach einer Initialisierung der Biomasseentwicklung im frühzeitigen Sommer, eine weitere Entwicklung nachfolgend unterbrochen. Erst im Spätsommer bzw. zu Herbstbeginn kann dieses nostocale Cyanobakterium merkbare Biovolumina entwickeln. Auffällig ist auch, dass *Dolichospermum lemmermannii* bereits im Frühsommer relativ viele Dauerzellen gebildet hat, was als Vorbereitung in einen physiologischen Ruhezustand interpretiert werden kann (Abb. 6 C). Der Schwerpunkt der Entwicklung dieses Cyanobakteriums beginnt neu im Spätsommer und verläuft dann durchgängig weiter in den Herbst – hier saisonal stimmig, dann auch die Bildung von Dauerzellen vor der Winterruhe (vergl. Abb. 1, die zeitliche Entwicklung der Heterocyten ist in Abb. 6C grafisch nicht dargestellt, aber verläuft etwa zugleich mit der Bildung der Dauerzellen). Dasselbe saisonale Muster der Biovolumenentwicklung widerspiegelt sich auch bei coccalen Vertretern der Cyanobakterien, *Aphanothece spec.* und *Aphanocapsa spec.* Damit entwickeln sich im Piburger See coccale und trichale Formen der Cyanobakterien zeitgleich (zutreffend auch für andere Seen, Teubner et al., 1999; Dokulil und Teubner, 2000), wengleich hier wichtig zu erwähnen wäre, dass coccale Formen wie *Microcystis* im Piburger See im Jahr 2023 fast gänzlich fehlten. Dieser letzte Fakt ist auffällig, da die Gattung *Microcystis* global weit verbreitet ist (Chorus und Welker, 2021), auch im Phytoplankton in anderen



**Abbildung 5** Räumliche und zeitliche Verteilung des Phytoplanktons im Wasserkörper des Piburger Sees. Das Gesamtphytoplankton (A) und ausgewählte Algengruppen sind grafisch als Biovolumen in  $\text{mm}^3\text{L}^{-1}$  dargestellt (A-F). Außerdem ist der mittlere Biovolumenanteil am Gesamtphytoplankton über den gesamten Datensatz als Zahl in % für eine jeweilige Phytoplanktongruppe angegeben. Chrysophyceae plus Coccolithophyceae (B), Dinophyceae (C), Grünalgen im weiten Sinne (Chlorophyceae, Trebouxiophyceae, Zygnematophyceae, Klebsormidiophyceae, D), Cryptophyceae (E) bzw. der Cyanophyceae (F). In der Datumsleiste stehen die Zahlen für die Monate Juli, August und September, die Tiefenstufen in B gelten auch für die übrigen Tiefenprofile A, C-F.



**Abbildung 6:** Tiefenprofilardarstellung des Phytoplanktonbiovolumens wie in Abbildung 5, aber hier für einzelne Arten gezeigt: *Dinobryon divergens* (A), *Botryococcus braunii* (B), *Dolichospermum lemmermannii*, Biovolumen der vegetativen Zellen ist dunkelblau, der Dauerzellen hellblau gefärbelt (C), *Pandorina morum* (D), *Ceratiium hirundinella* (E) und *Aphanothoece spec. / Aphanosapsa spec.* (F).

alpinen Seen, wie dem Mondsee, mit vertreten ist. In früheren Phytoplanktonbeschreibungen für den Piburger See, wird *Microcystis* ebenfalls erwähnt (z.B. Tolotti et al, 2011).

Das Ausbleiben der sommerlichen Entwicklung der Cyanobakterien 2023, wird von anderen Algengruppen offensichtlich „als Nische“ genutzt. Die

Dinoflagellaten, die Grünalgen und die Cryptophyceen, die über den gesamten Datensatz der 13 Probenahmen durchschnittlich 15, 37 bzw. 32 Prozent zum Gesamtphytoplankton-Biovolumen beitragen, „füllen das Sommerloch“ (Abb. 5 C-E). Als typischer Hochsommervertreter ist hier die Grünalge *Pandorina morum* zu nennen (Abb. 6D). Weiters ist auffällig, dass

zwar alle in Abb. 5 gezeigten Algengruppen in allen Tiefenstufen von 0 bis 6m vorkommen, einzelne Arten aber, wie *Pandorina morum* und *Ceratium hirundinella* in den metalimnetischen Tiefen 9 und 12 m nicht vertreten sind. Aus der Perspektive potentieller Toxinbildner im Piburger See, sind somit im Frühsommer und Sommer die Chrysophyceen relevant – insbesondere der dominante Vertreter *Dinobryon divergens*. Der Schwerpunkt der Entwicklung potentieller Toxinbildner lag im Jahr 2023 allerdings deutlich verzögert im Spätsommer bzw. im Herbst und damit am Ende bzw. nach der Badesaison im Piburger See. Zu diesem späten Zeitpunkt im Jahr, entwickelten sich deutlich Biovolumina von *Dolichospermum lemmermannii* und auch von *Ceratium hirundinella*. Die insgesamt relativ niedrigen Biovolumina von *Dolichospermum lemmermannii* im Jahr 2023, aber auch das Ausbleiben in der Zeit des Hochsommers, kann in der besonderen Wettersituation im Jahr 2023 wohl begründet liegen – ein kühler und eher wolkenreicher Sommer 2023. Aber ob eher eine erhöhte Wassertemperatur oder daran gekoppelt, ein höherer Lichtgenuss (wolkenloses Wetter bei Hitze, hohe Sonneneinstrahlung), als die entscheidende Ursache für das neuartige Massenaufreten von *Dolichospermum lemmermannii* nach [Salmaso et al. \(2015\)](#) in anderen alpinen Seen zu sehen ist, ist nicht geklärt. *Dolichospermum lemmermannii* hat seinen Verbreitungsschwerpunkt in mesotrophen bis schwach-eutrophen

Seen und tritt subdominant begleitend in Kombination mit *Planktothrix rubescens* (trichales Cyanobakterium, Massenentwicklungen in alpinen Seen bei Eutrophierung verbreitet) aber NICHT in Kombination mit Massenentwicklungen von *Aphanizomenon flos-aquae* (ebenfalls trichales Cyanobakterium häufig in stark eutrophierten, flachen Gewässern) auf (siehe [Teubner, 1996](#), dort ist *Dolichospermum lemmermannii* unter dem damals gültigen Synonym *Anabaena lemmermannii* geführt). Ebenda: Auch scheint *Dolichospermum lemmermannii* eine Breite von polymiktischen und dimiktischen, von flacheren bis moderat-tiefen Seen zu besiedeln (Bsp. dimiktische Seen: Rosinsee und Parsteiner See mit 9 bzw 27m Seentiefe). Bei dem Gewässervergleich in [Teubner, 1996](#) liegt der Schwerpunkt des Vorkommens von *Dolichospermum lemmermannii* daher auf den mesotrophen, im Sommer zumindest zeitweise schichtenden Seen. Somit könnten sowohl eine (schleichende) Nährstoffanreicherung als auch veränderte Schichtungsverhältnisse (in Richtung weniger stabile Abgrenzung Epi- und Metalimnion, Änderung der Mächtigkeit thermischer Schichten vs Lichtdargebot mit der Tiefe, etc.) im Zuge der Erwärmung durch den Klimawandel ([Niedrist et al., 2018](#)) – sofern diese Szenarien aktuell für den Piburger See zutreffen sollten – als Ursache für die aktuelle Entwicklung von *Dolichospermum lemmermannii* nicht außer Acht gelassen werden.

#### 4 Folgerung

Die Entwicklung potentieller Cyanotoxinbildner, hier im Piburger See im Wesentlichen von *Dolichospermum lemmermannii*, kann für das Jahr 2023 als eher untypisch interpretiert werden. Diese Interpretation liegt in der insgesamt unterdrückten/niedrigen Biovolumenbildung 2023 begründet. Aber auch die in den zeitigen (Früh)Sommer vorgelagerte Bildung von Dauerzellen und das quasi gänzliche Ausbleiben von *Dolichospermum lemmermannii* im Sommer, begründen weiter diese Annahme. Die Besonderheit der Planktonentwicklung wird auf das kalte trübe Sommerwetter 2023 zurückzuführen sein, was aber nicht Teil dieser Studie war dies auszuwerten. Im Umkehrschluss würde diese Interpretation aber vermuten lassen, dass in einem kommenden Jahr bei hoher sommerlicher Einstrahlung die Nährstoffressourcen auch von *Dolichospermum lemmermannii* merkbar gut genutzt werden können und es zu erheblichen Biovolumina dieses Taxons kommt. Diese Annahme wird durch die Studie von [Salmaso et al. \(2015\)](#) unterstützt. Dort wurde betont, dass nach erstmals entdeckter Invasion von *Dolichospermum lemmermannii* in etlichen alpinen Seen, die Massenentwicklungen von *Dolichospermum lemmermannii* im Lake Garda sich zeitlich auf die heißen Sommermonate beschränkte.

Eine Trübe des Wasserkörpers, allerdings, wird wohl weniger auf dieses koloniebildende trichale Cyanobakterium zurückzuführen sein, sondern eher auf das zugleich starke Auftreten von coccalen Kolonieformen derselben taxonomischen Gruppe, den coccalen Cyanobakterien. Selbst bei stärkeren Entwicklungen von *Dolichospermum lemmermannii*, welche dichte, makroskopisch gut erkennbar, große Kolonien bilden können, kann eine relative hohe Transparenz des Wassers noch gegeben sein. Erst bei einer Massenentwicklung verhindern aufräumende Kolonien als „Schaum/Teppich“ an der Seeoberfläche dann massiv den Einfall des Lichtes. Von daher, und auch hinsichtlich der

Vermeidung potentieller Phytotoxinproduzenten, ist das Wachstum von *Dolichospermum lemmermanni* durch geeignetes Seenmanagement zu kontrollieren, um Szenarien der Massenentwicklung vorab abzuwenden.

Die Wachstumskontrolle sollte sich aber nicht zu sehr alleine auf *Dolichospermum lemmermanni* konzentrieren, da das Biovolumen anderer potentieller Phytotoxinproduzenten der eukaryotischen Vertreter bzw. auch das Biovolumen der gesamten Phytoplanktongemeinschaft nicht steigen sollte. Neben den Nährstoffverhältnissen, werden auch die Lichtverfügbarkeit in der Tiefe des Wasserkörpers und die thermischen Schichtungsverhältnisse von Bedeutung sein und sollten damit als Begleitparameter in hoher räumlicher Auflösung miterfasst werden. Neben dem anthropogenen Einfluss der Nährstoffgaben, sind auch die Änderungen durch den Klimawandel von Bedeutung, wie für den zurückliegenden Datensatz Piburger See bereits gut gezeigt werden konnte (Niedrist et al. 2018).

**Danksagung** Der Dank hier gilt allen Beteiligten der Probenahme des Teams vor Ort am Piburger See sowie der Unterstützung im Rahmen des REGIO-Projekts - Qualitätsverbesserung Piburger See.

## Literatur

- Buono, S., Langellotti, A. L., Martello, A., Bimonte, M., Tito, A., Carola, A., Apone F., Colucci G., Fogliano, V. (2012). Biological activities of dermatological interest by the water extract of the microalga *Botryococcus braunii*. *Archives of Dermatological Research*, 304, 755-764. <http://dx.doi.org/0.1007/s00403-012-1250-4>
- Cerasino, L., Boscaini, A., Capelli, C., Lepori, F., Franzini, G., Zampieri, C., Giacomazzi, F., Kurmayer, R., Zupančič, M., Eleršek, T., Salmaso, N. (2022). Occurrence of cyanobacterial toxins in freshwaters of the Alpine region. In XXVI Congresso dell'Associazione Italiana di Oceanologia e Limnologia, San Michele all'Adige (TN), 27 giugno-1 luglio, 2022 (p. 45). IT.
- Chorus, I, Welker M; eds. 2021. Toxic Cyanobacteria in Water, 2nd edition. CRC Press, Boca Raton (FL), on behalf of the World Health Organization, Geneva, CH.
- Dokulil M, Teubner K (2000) Cyanobacterial dominance in lakes. *Hydrobiologia*, 438:1–12. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1004155810302>
- Dokulil M, Teubner K (2012) Deep living *Planktothrix rubescens* modulated by environmental constraints and climate forcing. *Hydrobiologia*, 698: 29–46. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-012-1020-5>
- Dokulil M, Teubner K (2023) Long-term adjustment of phytoplankton structure to environmental traits at timescales during lifetime development and over generations. *Hydrobiologia*, <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-023-05365-6>
- Dokulil, M. T., Skolaut, C. (1991). Aspects of phytoplankton seasonal succession in Mondsee, Austria, with particular reference to the ecology of Dinobryon Ehrenb. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 24(2), 968-973.
- Dokulil, M.T., Donabaum, K., Teubner, K. (eds.) (2018) The Alte Donau: Successful restoration and sustainable management - An ecosystem case study of a shallow urban lake. Aquatic Ecology Series, vol 10. Huisman J (ed), Springer: pp 407. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-93270-5>
- Kaštovský, J., Hauer, T., Geriš, R., Chattová, B., Juráň, J., Skácelová, O., Pitelková, P., Pusztai, M., Skaloud, P, Šťastný, J., Čapková, K., Bohunická, M., Mühlsteinová, R. (2018). Atlas sinic a řas České republiky, 1 and 2. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích.
- Kurmayer, R., Schober, E., Tonk, L., Visser, P. M., & Christiansen, G. (2011). Spatial divergence in the proportions of genes encoding toxic peptide synthesis among populations of the cyanobacterium *Planktothrix* in European lakes. *FEMS Microbiology Letters*, 317(2), 127-137. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1574-6968.2011.02222.x>
- Niedrist, G. H., Psenner, R., Sommaruga, R. (2018). Climate warming increases vertical and seasonal water temperature differences and inter-annual variability in a mountain lake. *Climatic Change*, 151, 473-490. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2328-6>
- Pechlaner, R. (1979). Response of the eutrophied Piburger See to reduced external loading and removal of monimolimnic water. *Archiv für Hydrobiologie, Beihefte Ergebnisse der Limnologie*, 13, 293-305.
- Psenner, R., Sommaruga, R. (1992). Are rapid changes in bacterial biomass caused by shifts from top-down to bottom-up control?. *Limnology and Oceanography*, 37(5), 1092-1100.
- Rott, E., 1981. Some results from phytoplankton counting intercalibrations. *Schweizerische Zeitschrift Hydrologie* 43: 35–62.
- Salmaso, N., Capelli, C., Shams, S., Cerasino, L. (2015). Expansion of bloom-forming *Dolichospermum lemmermannii* (Nostocales, Cyanobacteria) to the deep lakes south of the Alps: colonization patterns, driving forces and implications for water use. *Harmful Algae*, 50, 76-87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hal.2015.09.008>
- Sommer, U., Gliwicz, Z. M., Lampert, W., Duncan, A. (1986). The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Archiv für Hydrobiologie*, 106(4), 433-471.
- Teubner K (1996) Struktur und Dynamik des Phytoplanktons in Beziehung zur Hydrochemie und Hydrophysik der Gewässer: Eine multivariate statistische Analyse an ausgewählten

- Gewässern der Region Berlin-Brandenburg. Ph.D thesis, Dept. Ecophysiology, Humboldt University Berlin: 232pp [https://www.lakeriver.at/P/1996\\_PhD-Thesis-Teubner.pdf](https://www.lakeriver.at/P/1996_PhD-Thesis-Teubner.pdf)
- Teubner K, Teubner IE, Pall K, Tolotti M, Kabas W, Drexler S-S, Waidbacher H, Dokulil MT (2022) Macrophyte habitat architecture and benthic-pelagic coupling: Photic habitat demand to build up large P storage capacity and bio-surface by underwater vegetation. *Frontiers in Environmental Science*, 10:901924. <http://dx.doi.org/10.3389/fenvs.2022.901924>
- Teubner, K., Dokulil, M.T., Kurmayer, R. (2022) Eutrophierung, toxische Cyanobakterien am Beispiel des urbanen Donau-Altarmgewässers Alte Donau und des alpinen Mondsees. In: Mikrobiologie und Wasser. Teil 2: Fallstudien zur Illustration der neuen diagnostisch-analytischen Möglichkeiten. Farnleitner AH, Kirschner AKT, Frick C, Proksch P and Vogl W (Hrsg.), *Arbeitsbeihilfe Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV)*, Wien, 52(2):35–45.
- Teubner, K., Feyerabend, R., Henning, H., Nicklisch, A., Woitke, P., Kohl, J.-G. (1999) Alternative blooming of *Aphanizomenon flos-aquae* or *Planktothrix agardhii* induced by the timing of the critical nitrogen-phosphorus-ratio in hypertrophic riverine lakes. *Arch Hydrobiol, Spec Iss Adv Limnol*, 54:325–344
- Teubner, K., Kabas W., Teubner, I.E. (2018) Phytoplankton in Alte Donau: Response to trophic change from hypertrophic to mesotrophic over 22 years. In: Dokulil MT, Donabaum K, Teubner K (eds) *The Alte Donau: Successful restoration and sustainable management - An ecosystem case study of a shallow urban lake. Aquatic Ecology Series*, vol 10. Huisman J (ed), Springer:107–147 [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-93270-5\\_9](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-93270-5_9)
- Teubner, K., Teubner, I., Pall, K., Kabas, W., Tolotti, M., Ofenböck, T., Dokulil, M.T. (2020) New Emphasis on Water Transparency as Socio-Ecological Indicator for Urban Water: Bridging Ecosystem Service Supply and Sustainable Ecosystem Health. *Frontiers in Environmental Science*, 8:573724 <http://dx.doi.org/10.3389/fenvs.2020.573724>
- Tolotti, M., Nickus, U., Thies, H. (2011). Recent phytoplankton changes in a restored mountain lake as a response to nutrients and climate. In 16th Workshop of the International Association of Phytoplankton Taxonomy and Ecology (IAP): San Michele all'Adige (Trento), Italy, 21-28 August 2011 (p. 57).
- Tolotti, M., Rott, E., Thies, H., Psenner, R. (2005). Functional species groups of summer phytoplankton in relation to lake restoration: a long-term study of Piburger See, Austria. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 29(2), 891-894. <http://dx.doi.org/10.1080/03680770.2005.11902810>
- Tolotti, M., Thies, H. (2002). Phytoplankton community and limnochemistry of Piburger See (Tyrol, Austria) 28 years after lake restoration. *Journal of Limnology*, 61(1), 77-88.
- Tolotti, M., Thies, H., Nickus, U., Psenner, R. (2012). Temperature modulated effects of nutrients on phytoplankton changes in a mountain lake. Phytoplankton responses to human impacts at different scales, 61-75.
- Watson, S. B., Whitton, B. A., Higgins, S. N., Paerl, H. W., Brooks, B. W., Wehr, J. D. (2015). Harmful algal blooms. In *Freshwater Algae of North America* (pp. 873-920). Academic Press. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385876-4.00020-7>