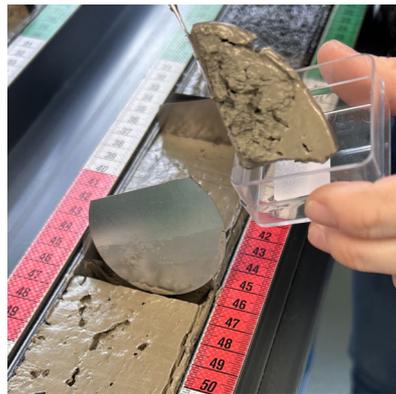


Rekonstruktion des Gesamtphosphors im Pfäffikersee anhand der im Sediment eingelagerten Kieselalgen

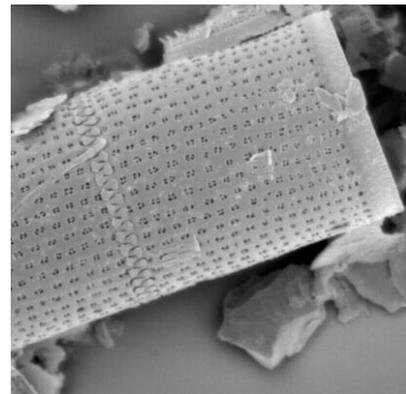
Entwicklung seit dem Jahr 2000



Oxidierter Kern PFÄ23-01B
Bild EAWAG



Entnahme der Sedimentproben
Bild AquaPlus AG



Kieselalge *Aulacoseira islandica*
spp. helvetica
Bild Rolf Klee

Bericht Nr. 2355-B-02
Datum Entwurf: 25.11.2023
Datum Endfassung: 4.12.2023

Impressum

Auftraggeber: Kanton Zürich Baudirektion · Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) · Gewässerschutz
Hardturmstrasse 105 · CH-8005 Zürich
Dr. Pius Niederhauser

Auftragnehmer: AquaPlus AG
Gotthardstrasse 30 · CH-6300 Zug

Projektleitung: Barbara Imhof

Mitarbeiter: Yvonne Bernauer · Joachim Hürlimann · Christa Gufler ·
Margrit Ensner Egloff

Zitervorschlag: AquaPlus 2023: Rekonstruktion des Gesamtphosphors im Pfäffikersee anhand der im Sediment eingelagerten Kieselalgen. Entwicklung seit dem Jahr 2000. Im Auftrag der Baudirektion des Kantons Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Hardturmstrasse 105, CH-8005 Zürich. 29 Seiten, Bericht und Anhang.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	1
1 Ausgangslage und Auftrag	2
2 Grundlagen und Methoden	2
3 Sedimentkern PFÄ23-01	4
4 Ergebnisse und Diskussion	5
4.1 Limnologie des Pfäffikersees	5
4.2 Kieselalgen	7
4.3 Rekonstruktion des Gesamtphosphors	13
5 Fazit	15
6 Literatur	17
<hr/>	
ANHANG	19
ANHANG A: Datierung Sedimentkern PFÄ23-01	20
ANHANG B: Charakterisierung des Pfäffikersees	21
ANHANG C: Zählraten der Kieselalgen (15 Proben)	26
ANHANG D: Bilder typischer Gesichtsfelder zweier Tiefenstufen	29

Zusammenfassung

Auftrag	<p>Der Auftrag 'Rekonstruktion des Gesamtphosphors des Pfäffikersees mittels im Sediment eingelagerten Kieselalgen' wurde am 27.2.2023 an die Firma AquaPlus AG in Zug von der Abteilung Gewässerschutz des AWEL, Kanton Zürich (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft) erteilt. Mit dem Auftrag sind folgende Fragestellungen verknüpft, bezogen auf die letzten rund 20 Jahre:</p> <ul style="list-style-type: none">- Darstellung der planktischen Kieselalgen-Lebensgemeinschaften,- Entwicklung des trophischen Zustandes,- Entwicklung des rekonstruierten Gesamtphosphors.
Datierung des Kernes	<p>Der verwendete Sedimentkern PFÄ23-01 des Pfäffikersees wurde durch die EA-WAG am 12.5.2023 an der tiefsten Stelle entnommen. Die Sedimentationsrate der letzten ca. 5.5 cm (ca. 20 Jahre) betrug rund 2.4 mm/Jahr. Der Kern war im Vergleich zum Kern aus dem Jahr 2000 (PFÄ00-2) leicht komprimiert.</p>
Limnologie	<p>Der Pfäffikersee ist heute mit einem Gesamtphosphorgehalt von weniger als 15 µg P/l ein stabil mesotrophes Gewässer, wobei der mesotrophe Zustand schon seit rund 20 Jahren andauert. Das Tiefenwasser weist während der Stagnation regelmässig keinen Sauerstoff auf, so dass sich Phosphor aus dem Sediment rüch-löst. Diese interne Düngung war in den Jahren 2010-2016 vermutlich Wetter bedingt erhöht, was einen leichten Anstieg des Gesamtphosphors verursachte.</p>
Kieselalgen	<p>Die dominierenden Kieselalgen der letzten 20 Jahre waren die eutraphenten Arten <i>Asterionella formosa</i>, <i>Fragilaria crotonensis</i> und <i>Stephanodiscus parvus</i> (<i>Stephanodiscus parvus/ minutulus</i>) sowie die mesotraphenten Arten <i>Aulacoseira islandica</i> ssp. <i>helvetica</i>, <i>Cyclotella cyclopuncta</i> und <i>Tabellaria flocculosa</i>. Das Aufkommen von <i>Aulacoseira islandica</i> ssp. <i>helvetica</i> und die Zunahme der mesotraphenten Arten während der letzten Jahre sind vermutlich ein Hinweis dafür, dass dem Kieselalgenplankton des Pfäffikersees in den nächsten Jahren der Wechsel zur prägenden mesotrophen Lebensgemeinschaft bevorsteht.</p>
Saisonalität	<p>Basierend auf Planktonzählungen und Auswertungen von Aufwuchsproben des Seeausflusses Aabach bei Niederuster konnten Hinweise zur Saisonalität der dominierenden Taxa eruiert werden. Auf Ebene der Gattungen traten gemäss Planktonzählungen des AWEL die meisten Kieselalgen-Taxa gehäuft im Winter und Frühling auf. Nur Taxa der Gattung <i>Cyclotella</i> erschienen etwas später (Frühling und Sommer). Diese Abfolge dürfte wesentlich beeinflusst sein durch die im Winter im Epilimnion wenig höheren Phosphatkonzentrationen (6-18 µg P/l) wie anschliessend im März und April (< 3 µg P/l).</p>
Biovolumen	<p>Seit rund 15 Jahren änderte das Plankton der Kieselalgen, indem die mesotraphente und eher grosse und Kolonien bildende Form <i>Aulacoseira islandica</i> ssp. <i>helvetica</i> aufkam. Neben dem stetig abnehmenden Phosphorgehalt könnten auch weitere Faktoren dafür verantwortlich sein. Denkbar sind die Temperatur- und Mischungsverhältnisse, der Frassdruck oder die Dauer der Stagnation.</p>
Rekonstruktion Gesamt-P	<p>Die rekonstruierte Gesamtphosphorkonzentration basierend auf den im Sediment eingelagerten Kieselalgen war für die letzten rund 20 Jahre deutlich höher wie die Messwerte. Die Koexistenz von eutraphenten und mesotraphenten Arten dürfte bedingt sein durch die interne Düngung, was sich auf die Rekonstruktion des Gesamtphosphors auswirkt. Der Klimawandel scheint den Prozess der Oligotrophierung infolge zu bremsen.</p>

1 Ausgangslage und Auftrag

Der Auftrag 'Rekonstruktion des Gesamtphosphors des Pfäffikersees mittels im Sediment eingelagerten Kieselalgen' wurde am 27.2.2023 an die Firma AquaPlus AG in Zug von der Abteilung Gewässerschutz des AWEL, Kanton Zürich (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft) erteilt.

Die Arbeiten erfolgten in Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber (AWEL, Herr Dr. Pius Niederhauser, Frau Dr. Barbara Känel), der EAWAG (Frau Prof. Nathalie Dubois, Frau Anita Schlatter, Frau Irene Brunner) und Prof. André Lotter, Luzern.

Die Rekonstruktion der Kieselalgen im Sediment des Pfäffikersees seit den letzten rund 20 Jahren hat folgende Ziele:

- Darstellung der planktischen Kieselalgen-Lebensgemeinschaften der letzten rund 20 Jahre. Dies als Ergänzung zu den Planktondaten des AWEL Zürich, welches seit 2003 nur noch halbquantitative Schätzungen der Planktonmischproben zur Charakterisierung der Algenzusammensetzung durchführt. Entsprechend werden beim AWEL die Kieselalgentaxa auch nicht genauer bestimmt.
- Entwicklung des trophischen Zustandes,
- Entwicklung des Gesamtphosphors.

2 Grundlagen und Methoden

Die folgenden Grundlagen und Methoden sind für das Projekt relevant:

- Kernentnahme am 12.5.2023 durch Frau Anita Schlatter, EAWAG und Herrn Dr. Pius Niederhauser (AWEL) (Kern PFÄ23-01, Koordinaten 2'701'500 / 1'245'250 / 537 m ü. M.).
- Kernaufbereitung und Beprobung durch EAWAG (Öffnen des Kernes, Fotografie, Gefriertrocknung der entnommenen Proben) und AquaPlus AG (Auswahl und Entnahme von 21 Proben). Kern und Auswahl der Proben siehe Anhang A.
- Präparation der gefriergetrockneten Kieselalgenproben durch das Amt für Verbraucherschutz des Kantons Zug (Säurepräparation mit Salzsäure, Schwefelsäure und Endoxidation mit Kaliumnitrat, Einbettung in Naphrax zu Dauerpräparaten).
- Bestimmung der Arten und Zählung von 500 Schalen pro Probe durch AquaPlus AG (Frau Margrit Ensner Egloff, Joachim Hürlimann). Ausgewertet wurden 15 Proben (Auswahl und Tiefenstufen siehe Anhang A). Die Bestimmungen erfolgten mit den gängigen Bestimmungsbüchern Mitteleuropas (Krammer & Lange-Bertalot (1986-1991), Hofmann et al. (2013)) und vor allem gemäss den Bestimmungen zum Zeitpunkt der Erhebungen des Eichda-

tensatzes (Lotter et al (1998)). Bei der Bestimmung des Taxons *Stephanodiscus minutulus* orientierten wir uns vor allem an den REM-Aufnahmen von Rolf Klee anlässlich der letzten Untersuchung (AquaPlus 2001). Da wir im Vergleich zur Untersuchung des Jahres 2000 überschneidende Sedimentkerne und -proben haben, nahmen wir an, dass es sich bei den vorgefundenen kleinen *Stephanodiscus*-Formen (< 10 µm Durchmesser) um dieselbe Art handelt wie in den jüngsten Schichten des Kernes aus dem Jahr 2000. Ganz sicher sind wir natürlich nicht, da aktuell keine REM-Aufnahmen gemacht wurden. Da die beiden Formen unterschiedliche Optima beim Gesamtphosphor aufweisen, haben wir die Bestimmungen im Lichtmikroskop so gut wie möglich gemacht. Je nach Situation ist es aber angebracht vom Taxakomplex *Stephanodiscus parvus/minutulus* zu sprechen. Bei den kleinen Formen der Gattung *Cyclotella* mit einem Durchmesser von ca. 5 bis 10 µm war die Bestimmung nicht immer eindeutig durchführbar (Bruchstücke, Erosion der Schale, Kümmerformen etc.). Die Bestimmung wurde dann jeweils in Anlehnung an in der Probe bereits vorhandene Taxa durchgeführt. Es muss daher angenommen werden, dass insbesondere kleine Formen von *C. atomus*, *C. cyclopuncta*, *C. delicatula* und *C. wuethrichiana* nicht immer eindeutig bestimmbar waren. Grundsätzlich werden die grossen Formen eher in der Häufigkeit unterschätzt. Es sind dies bei den zentralen Arten *Cyclotella prae-termisa* und *Stephanodiscus alpinus*. Bei *Asterionella formosa* (Köpfe gezählt), *Fragilaria crotonensis* (Mitte gezählt) und *Tabellaria flocculosa* (Zwischenbänder nicht gezählt) war dies vermutlich weniger der Fall, da diese oft auch in zählbaren kleinere Bruchstücken vorlagen.

- Datierung und Bestimmung der Sedimentationsrate durch AquaPlus AG; siehe dazu Kapitel 3 und Anhang A.
- Rekonstruktion des Gesamtphosphors durch Herrn Prof. Andy Lotter, Luzern unter Verwendung des Kalibrationsdatensets von Lotter et al. (1998). Beim verwendeten Modell handelt es sich um ein 2-Komponenten WAPLS (weighted averaging partial least squares) Regressions- und Kalibrationsmodell (ter Braak & Juggins 1993). Von den 75 in den Zählungen vorhandenen Kieselalgentaxa konnten deren 69 im Kalibrationsset zugeordnet werden (= 92%). Die Taxa, welche für die Rekonstruktion nicht benutzt wurden, nahmen pro Probe zusammen gezählt relative Häufigkeiten zwischen 0 und 36.2 % ein, wobei die hohen Anteile durch *Aulacoseira islandica* ssp. *helvetica* bestimmt wurden (siehe Kastentext). Die restlichen Arten wiesen maximal zusammen bloss 2.4 % Anteil auf und waren daher für die Rekonstruktion ohne Bedeutung. Es handelt sich dabei mit einem Anteil von ≥ 1 % um *Cyclotella stelligera* (maximale relative Häufigkeit: 2.2 %, in 7 von 15 Proben vorhanden) und *Fragilaria cyclosum* (2.2 %, in 8 von 15 Proben).
- Archivierung der präparierten Proben und Präparate bei AquaPlus AG. 1 Set Präparate wurde dem Auftraggeber übergeben. Die Zählungen wurden dem Auftraggeber elektronisch zugestellt. Sie befinden sich auch in Anhang C.
- Angaben zur Limnologie des Pfäffikersees (Tiefenprofile Gesamtphosphor, Sauerstoff, Temperatur, Massnahmen etc.) ab Website des AWEL¹, gemäss AWEL (2023) sowie Angaben von Herrn Dr. Pius Niederhauser und Frau Dr.

***Aulacoseira islandica*
ssp. *helvetica***

Dieses Taxon tritt im Kalibrationsdatenset nicht auf, sodass keine Angaben zum Gesamtphosphor vorlagen und die Rekonstruktion ohne dieses Taxon berechnet werden musste. Das Taxon ist kälteliebend (Wintermonate) und nach Houk (2003) ist es eine oligo- bis mesotrophe Art im Pegalial von Seen. Auch nach Krisa et al. (2016) tritt das Taxon gehäuft im Plankton von oligo- bis mesotrophen österreichischen Alpenrandseen auf (mit 7 von 10 Trophie-Scores im Bereich 5-30 µg P/l). Wir stufen daher *Aulacoseira islandica* ssp. *helvetica* bezüglich des Optimums des Gesamtphosphors bei 20 µg P/l ein. Im Pfäffikersee um 1950 wie auch im Greifensee und Sempachersee trat das Taxon beim Übergang von mesotroph zu eutroph auf.

¹ <https://www.zh.ch/de/umwelt-tiere/wasser-gewaesser/messdaten/gewaesserqualitaet-seen.html>

Barbara Känel, beide AWEL Zürich (volumengewichtete Monatswerte, Planktondaten AWEL).

3 Sedimentkern PFÄ23-01

In Abbildung 3.1 befindet sich der Kern PFÄ23-01 des Pfäffikersees, welcher für die Untersuchungen am 12.5.2023 durch die EAWAG entnommen wurde. Zudem befindet sich in Abbildung 3.1 die Datierung der obersten 10 cm sowie die Angaben zu den 15 entnommenen Proben (Sedimenttiefe, Sedimentmächtigkeit, berechnetes Alter). Es ergab sich aufgrund dem Vorhandensein der Jahresschichten (Warven) für die letzten rund 23 Jahre eine Sedimentationsrate von 2.4 mm/Jahr. Demnach sind seit der letzten Rekonstruktion des Gesamtphosphors basierend auf dem damaligen Kern PFÄ00-2 um 5.5 cm Sediment hinzugekommen. Der Vergleich mit dem Kern aus dem Jahr 2000 befindet sich in Anhang A. Darnach betrug die Sedimentationsrate um 3.3 mm/Jahr (je nach Tiefe 2.5 bis 5 mm/Jahr). Der neue Kern ist im Vergleich zum früheren Kern leicht komprimiert, was auch optisch beim Vergleich der beiden Kerne erkennbar ist (Anhang A).

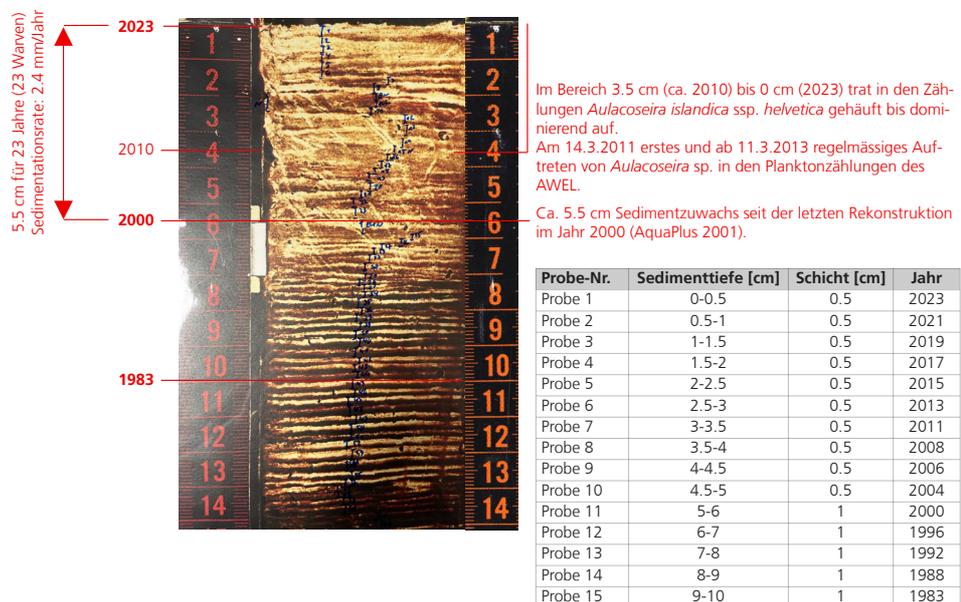


Abbildung 3.1: Sedimentkern PFÄ23-01B des Pfäffikersees im oxidierten Zustand mit Angaben zur Datierung (Zählung der Warven) und Hinweise aus den Planktonzählungen des AWEL. Beprobt wurde die andere Hälfte des Kernes (PFÄ23-01A).

Tabelle rechts: Datierung der 15 untersuchten Sedimentproben basierend auf der Sedimentationsrate von 2.4 mm/Jahr für die obersten 5.5 cm. Die Proben ca. 11 bis 15 dürften sich ab rund 5.5 cm mit dem Kern PFÄ00-2 aus dem Jahr 2000 überschneiden.

Foto Sedimentkern: EAWAG, Dübendorf. Der neue Kern ist im Vergleich zum älteren Kern leicht komprimiert (siehe auch Abb. 4.1 mit den Taxacharts der beiden Kerne und Anhang A).

Zur Plausibilisierung der Datierung verwendeten wir Planktondaten sowie den Vergleich der Kieselalgen-Lebensgemeinschaften der aktuellen mit denjenigen der früheren Untersuchung aus dem Jahr 2000 (Ähnlichkeitsberechnungen). Die Planktondaten des Pfäffikersees, erhoben durch das AWEL, wiesen am 14.3.2011 erstmals und ab 11.3.2013 regelmässig das Taxon *Aulacoseira* sp nach. In unseren Zählungen fanden wir in der Probe 7 (3.0-3.5 cm Tiefe, ca. Jahr 2010) und jünger (bis Probe 1, 0-0.5 cm, Jahr 2023) das Taxon *Aulacoseira islandica* ssp. *helvetica* mit zunehmend höherem Anteil (von 1.4 bis 36.2 % (Abb. 3.1, Abb. 4.1). Wir gehen davon aus, dass es sich bei der Zählung des AWEL und unseren Zählungen um dasselbe Taxon handelt. Somit dürfte der Tiefenbereich um 3-3.5 cm in etwa dem Jahr 2010 bis 2012 entsprechen; was einer Sedimentationsrate um 2.7 mm/Jahr entspricht.

		Kern 2000						
		2000	1997	1993	1990	1987	1984	1982
Kern 2023	2000	78	76	65	67	63	63	57
	1996	68	73	71	59	49	53	56
	1992	57	64	53	62	70	69	48
	1988	62	58	74	74	70	76	88
	1983	61	50	71	62	66	73	83
	1983	61	50	71	62	66	73	83

Zahlen: Ähnlichkeiten zweier Proben nach Renkonen (1938). $\geq 60\%$ bedeutet sehr hohe Ähnlichkeit. gelb markiert: $\geq 70\%$ Ähnlichkeit. Rote Rahmen: in etwa zeitgleiche Probenpaare.

Die Vergleiche der Kieselalgen-Lebensgemeinschaften (Ähnlichkeitsberechnungen, Paarvergleich nach Renkonen (1938)) zwischen den Zählungen des Kernes aus dem Jahr 2023 und denjenigen des Kernes aus dem Jahr 2000 ergaben, dass die untersten 5 Proben des Kernes aus dem Jahr 2023 (Tiefen 5-10 cm, Jahre ca. 1983 bis 2000) sehr hohe Ähnlichkeiten hatten mit den jüngsten 7 Proben des Kernes aus dem Jahr 2000 (Tiefen 0-7 cm, Jahre ca. 1982 bis 2000). Die Übereinstimmung der zeitgleichen Proben der beiden sich überlappenden Kerne betrug oft 70 bis 83 % (siehe Tabelle nebenan). Aus unserer Erfahrung mit der Dominanz-Identität nach Renkonen (1932) wissen wir, dass Ähnlichkeiten zwischen zwei Kieselalgen-Lebensgemeinschaften von $\geq 60\%$ von derselben Probe stammen könnten. Diese hohe bis sehr hohe Übereinstimmungen erfolgten vor allem durch die Taxa *Stephanodiscus minutulus*, *Asterionella formosa*, *Fragilaria crotonensis* und *Cyclotella cyclopuncta*.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Limnologie des Pfäffikersees

Der Pfäffikersee ist heute mit einem Gesamtphosphorgehalt von weniger als $15 \mu\text{g P/l}$ ein deutlich mesotrophes Gewässer. Während der letzten 20 Jahre betrug der über die Tiefenstufen volumengewichtete jährliche Mittelwert $17 \mu\text{g P/l}$ und variierte von Jahr zu Jahr von 12 bis $23 \mu\text{g P/l}$ (siehe auch Kastentext unten). Das Tiefenwasser weist während der Stagnation regelmässig keinen Sauerstoff auf, sodass sich Phosphor aus dem Sediment rüklöst (interne Düngung). Diese interne Düngung war möglicherweise in den Jahren nach 2011 bis ca. 2015 leicht erhöht, was einen leichten Anstieg des Gesamtphosphors hervorrief (siehe auch Abb. 4.5). Dieser Sachverhalt wurde im Gewässerbericht 2022 des AWEL für den Greifensee beschrieben. Im Greifensee führten erhöhte Wassertemperaturen des Oberflächenwassers im Herbst jeweils zu einer verlängerten Stagnationspha-

Zitat aus dem Gewässerbericht 2022 (AWEL 2023, Seite 94): Der Pfäffikersee wäre unter natürlichen Verhältnissen ein nährstoffarmer See mit geringem Algenwachstum, der jährlich durchmischt wird. Bis 1900 dürfte das Tiefenwasser aufgrund der tiefen Phosphorkonzentration nahezu durchgehend sauerstoffhaltig gewesen sein. Seit der Betrieb der Zirkulationsanlage eingestellt wurde, ist die Zirkulationsphase im Winter kürzer geworden. Dadurch konnte sich das Seewasser weniger stark mit Sauerstoff anreichern. Die sauerstoffarme Zone im See im Spätsommer nahm dadurch zu und verringerte den Lebensraum für die Fische. Trotzdem stand ihnen immer eine ausreichend grosse Schicht mit günstigen Sauerstoff- und Temperaturverhältnissen zur Verfügung.

se, was wiederum die interne Düngung begünstigte. Wir gehen davon aus, dass im nahe gelegenen Pfäffikersee derselbe Effekt auch auftrat.

Im Anhang B befinden sich diverse Zusammenstellungen zum Zustand des Pfäffikersees und den getroffenen internen und externen Massnahmen. Sie wurden der Website des AWEL entnommen¹.

Gemäss Messungen des Gesamtphosphors (regelmässig seit 1952) und der Rekonstruktion des Gesamtphosphors (seit 1700, AquaPlus (2001)) kann der Pfäffikersee im Sinne eines anzustrebenden Referenzzustandes als mesotrophes Gewässer eingestuft werden. Das AWEL definiert das ökologische Ziel für den Pfäffikersee mit 25 µg P/l. Damit wird das ökologische Ziel seit vielen Jahren eingehalten.

Die seit dem Jahr 1992 installierte interne Zirkulationsunterstützungsanlage wurde im Jahr 2011 abgestellt. Die Anlage war jeweils von Mitte Dezember bis Ende März, zum Teil bis Anfang April in Betrieb. Seit der Ausserbetriebnahme weist das Tiefenwasser etwas schlechtere Sauerstoffverhältnisse auf, als dies vorher bei laufendem Betrieb der Fall war. Besonders im kurzen Winter 2013/2014 war dies der Fall. Für die Fische gab es aber im Sommer immer eine ausreichend grosse Schicht mit günstigen Sauerstoff- und Temperaturverhältnissen (siehe Anhang B).

Eine kurze Sichtung der Planktondaten des Pfäffikersees (Periode 2003-2021, Daten vom AWEL zur Verfügung gestellt) zeigte wenig Auffälligkeiten, wobei uns das Plankton der Kieselalgen zur Verfügung stand. Die einzelnen Taxa variierten wenig in den Abundanzen, wurden doch 88 % aller Vorkommen der erfassten Plankter die Häufigkeitsklassen (HK) 4 (21%, selten), 4.5 (13%, selten-vereinzelt) und 5 (54 %, vereinzelt) zugewiesen. Sehr häufig (HK 2) wurde nur bei 3 % aller Taxaerfassungen eruiert und dominierend (HK 1) nie. Bei den bestimmten 11 Kieselalgentaxa (*Asterionella formosa*, *Aulacoseira* sp., *Cyclotella bodanica*², *Cyclotella* sp.³, *Diatoma elongata*, *Fragilaria capucina*, *Fragilaria crotonensis*, *Fragilaria cyclosum*, PENNXX (= vermutlich Pennales), *Tabellaria fenestrata* (= vermutlich *Tabellaria flocculosa*) und *Ulnaria* (= *Fragilaria*) *delicatissima*) traten vor allem *Asterionella formosa*, *Cyclotella* als Gattung sowie *Fragilaria cyclosum*, *F. crotonensis* und *Ulnaria* (= *Fragilaria*) *delicatissima* regelmässig, meist gehäuft und über die ganze Periode auf. *Stephanodiscus* als Gattung wurde nicht bestimmt^{2, 3}. Gemäss Auswertungen des AWEL kann es im Frühling trotz tiefer Konzentration des Gesamtphosphors zu einem starken Algenwachstum kommen (Anhang B, Algenbiomasse). Dies war offenbar im März 2013 und etwas weniger ausgeprägt im März 2021 der Fall.

Die Stelle Aabach bei Niederuster liegt unterhalb des Pfäffikersees. Er enthält abgeschwemmte Arten aus dem Plankton des Pfäffikersees und lässt damit zu einem gewissen Grad auf die Saisonalität des Planktons des Pfäffikersees schliessen. Die Häufigkeit der Plankter, auch im Vergleich zum Seeausfluss des eutrophen Greifensees war aber gering, was mit der vermutlich geringen Produktivität des mesotrophen Pfäffikersees zu tun hat (Tabelle 4.1 und Anhang B). Der Aabach wies an der Stelle 046 (ID NAWA TREND) in der Periode der Jahre 2000 bis 2019 im März, wenn auch mit geringen Anteilen Taxa der Gattung *Stephanodi-*

² Die Kieselalgen wurden nicht mittels Präparation genauer bestimmt. Wir gehen daher davon aus, dass mit *Cyclotella bodanica* grosse centrische Kieselalgen gemeint sind. Dazu dürften auch z. B. *Cyclotella radiosa*, *C. preatermissa*, *Stephanodiscus alpinus* gehören.

³ Wir gehen daher davon aus, dass mit *Cyclotella* sp. kleine centrische Kieselalgen gemeint sind. Dazu dürften auch Taxa der Gattung *Stephanodiscus* gehören (z. B. *Stephanodiscus parvus*, *S. minutulus*, *S. medius*, *S. hantzschii*) sowie kleinere *Cyclotella*-Arten (*C. atomus*, *C. cyclopuncta* etc.).

scus und im Oktober *Fragilaria crotonensis* auf (Tabelle 4.1). Die Gattung *Cyclotella* trat nur im März mit sehr geringen Anteilen auf und *Asterionella formosa* überhaupt nicht. Das Taxon *Tabellaria flocculosa* erschien im Ausfluss nur einmal am 11.3.2002 mit einem Anteil von 0.5 %. Anschliessend war auch im Sediment diese Art nicht mehr häufig, so dass es den Weg in den Abfluss nicht mehr fand. Auf die Saisonalität wird im Kapitel 4.2 erneut Bezug genommen.

4.2 Kieselalgen

Im Sediment des Pfäffikersees fanden wir in den 15 untersuchten Proben insgesamt 75 Taxa, wobei pro Probe zwischen 15 und 25 Taxa und im Mittel 20 Taxa vorkamen. Die Diversität H nach Shannon & Weaver (1949) nahm Werte ein von 1.66 bis 3.33 (Mittelwert 2.75). Taxa, die mindestens einmal eine relative Häufigkeit von mehr als 10 % pro Probe erreichten, waren die eutraphenten Arten *Asterionella formosa*, *Fragilaria crotonensis* und *Stephanodiscus minutulus* (*Stephanodiscus parvus/minutulus*), die mesotraphenten Arten *Cyclotella cyclopuncta* und *Tabellaria flocculosa* sowie das Taxon *Aulacoseira islandica* spp *helvetica*, welches wir ökologisch als kälteliebendes und oligo- bis mesotraphentes Taxon einstufen (die Verteilung der Arten im Tiefenprofil des Sedimentes siehe Abb. 4.1). Das dominierende Taxon, welches in jeder Probe auftrat, war das eutraphente Taxon *Stephanodiscus minutulus* (*Stephanodiscus parvus/minutulus*). In den letzten rund 20 Jahren (Sediment 0-5.0 cm, ca. 2003-2023, siehe Abb. 3.1) betrug der mittlere relative Anteil 24 %. Insgesamt nahm aber die Häufigkeit von *Stephanodiscus minutulus* über die Zeit ab. Etwas weniger häufig aber auch in allen 15 Proben auftretend waren in den letzten rund 20 Jahren die ebenfalls eutraphen-

Tabelle 4.1: Oben: Plankton des Aabaches bei Niederuster, Ausfluss des Pfäffikersees in der Aufwuchsprobe der Periode 2000 - 2019 (Stelle NAWA TREND ID 046). Die in der Probe vorhandenen planktischen Formen wurden aus dem Pfäffikersee abgeschwemmt. Sie geben somit einen Hinweis zur Saisonalität des Planktons im Pfäffikersee.

Unten: Plankton der Glatt bei Schwerzenbach, Seeausfluss des eutrophen Greifensees als Vergleich (AquaPlus 2023a).

Angaben als monatliche Mittelwerte der relativen Häufigkeiten pro Taxon. Fettdruck bedeutet maximale Häufigkeit. Daten gemäss NAWA (AquaPlus & PhycoEco 2021) und Datenbank AquaPlus AG, Zug.

Angaben als relative Häufigkeit (monatlicher Mittelwert über die Periode hinweg).

Monat	Periode 2000-2019	März	April	September	Oktober	November
Anzahl Proben Aabach		4	-	-	2	-
<i>Stephanodiscus</i>	[%]	1.8	-	-	0.5	-
<i>Cyclotella</i>	[%]	0.3	-	-	0.0	-
<i>Asterionella formosa</i>	[%]	0.0	-	-	0.0	-
<i>Fragilaria crotonensis</i>	[%]	0.0	-	-	1.3	-

Monat	Periode 2000-2019	März	April	September	Oktober	November
Anzahl Proben Schwerzenbach		6	1	1	3	1
<i>Stephanodiscus</i>	[%]	7.3	3.0	0.0	0.5	0.5
<i>Cyclotella</i>	[%]	0.6	10.0	1.3	1.0	0.3
<i>Asterionella formosa</i>	[%]	1.2	0.0	0.8	3.2	1.0
<i>Fragilaria crotonensis</i>	[%]	0.0	0.0	0.0	5.1	4.0

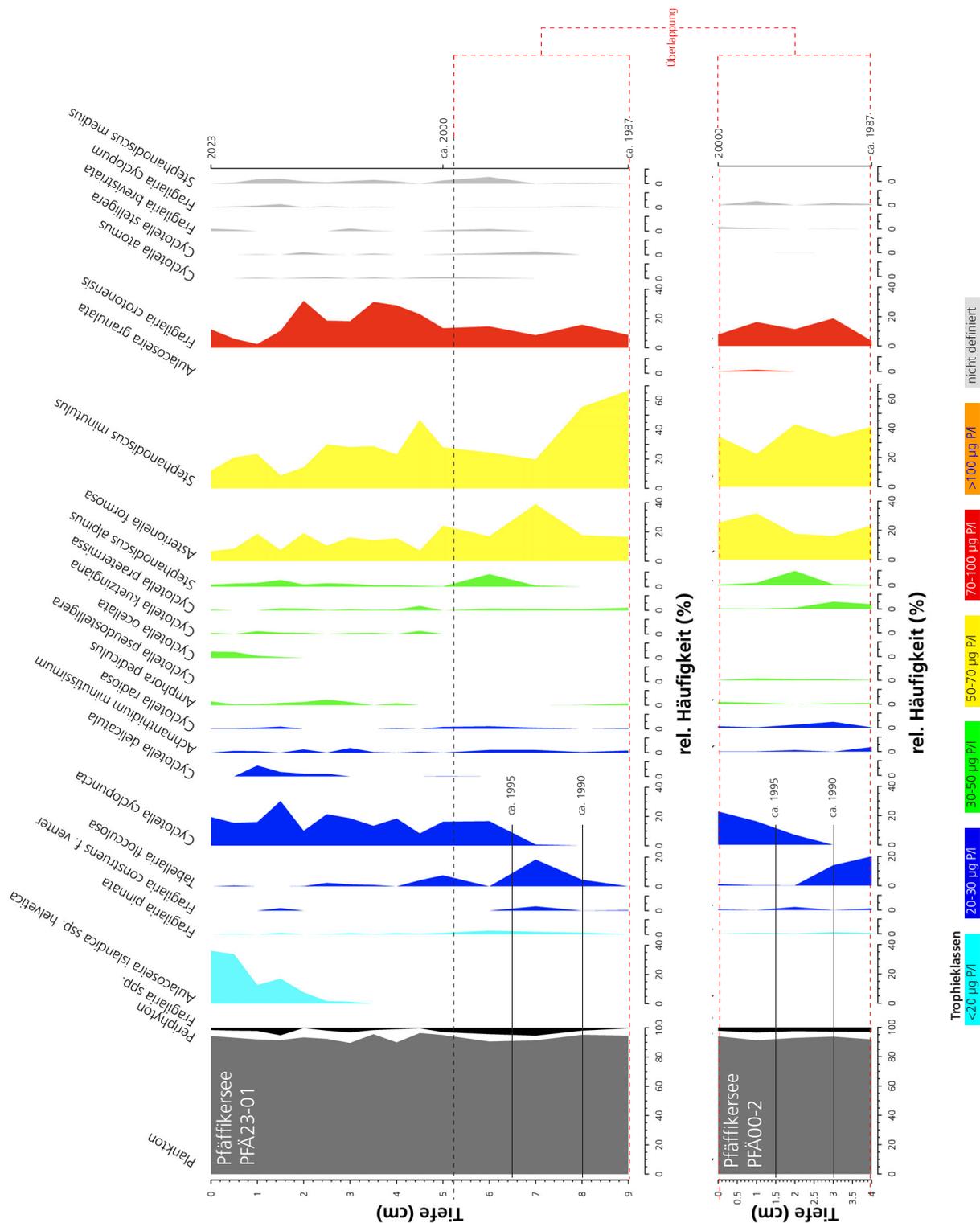
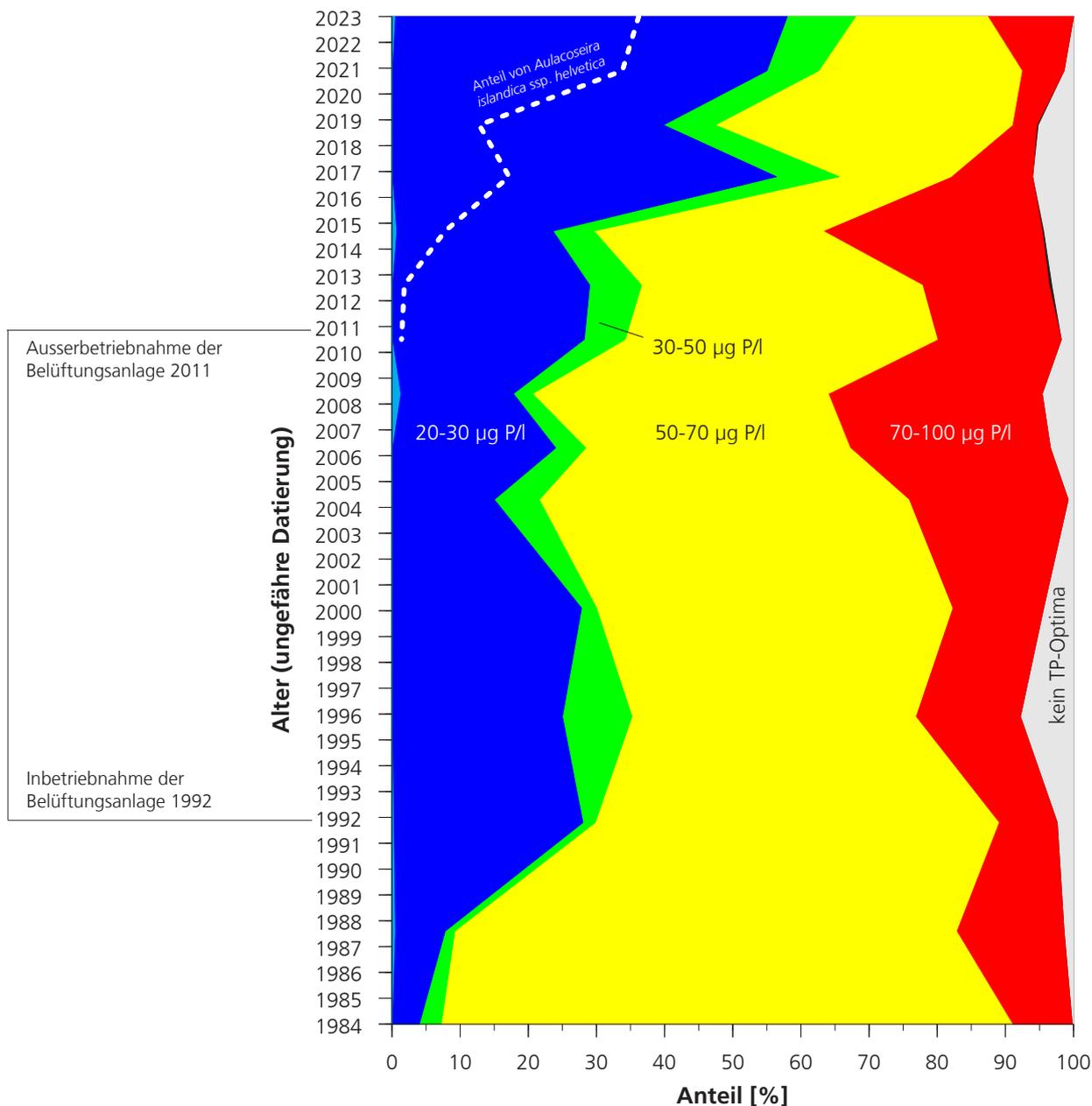


Abbildung 4.1: Oben: Kieselalgen im Sedimentkern PFÄ23-01 des Pfäffikersees (Kernentnahme 12.5.2023). Aufgeführt sind die prozentual wichtigsten Taxa.

Unten: Kieselalgen im Sedimentkern PFÄ00-2 (Kernentnahme 21.6.2000, gemäss AquaPlus (2001)). Dargestellt sind dieselben Taxa wie oben beim Kern PFÄ23-01, wobei damals in den jüngsten 4 cm Sediment keine anderen Taxa prozentual wichtig waren.

Reihenfolge der Taxa von links nach rechts gemäss den artspezifischen TP-Optima. Beim Taxon *Aulacoseira islandica* ssp. *helvetica* wurde das TP-Optima mit 20 µgP/l angenommen. Beim überlappenden Bereich der beiden Kerne gilt es die leichte Komprimierung zu beachten (Anhang A). Aufgrund dem Vorkommen der beiden Taxa *Cyclotella cyclopuncta* und *Tabellaria flocculosa* in den beiden Kernen ist erkennbar, dass die Übereinstimmung zeitlich nicht ganz passt.



Bedeutende Taxa pro Trophieklasse

Trophieklasse	Plankter cf = Bestimmung unsicher	Vorkommen [%] 100 % = 15 Proben	mittlere ¹ / maximale Häufigkeit [%]
<20 µg/l P	<i>Gomphonema pumilum</i>	33	0.5 / 0.6
20 bis <30 µg/l P	<i>Cyclotella cyclopuncta</i>	87	15.9 / 30.6
	<i>Aulacoseira islandica ssp. helvetica</i>	47	15.9 / 36.2
	<i>Tabellaria flocculosa</i>	60	4.5 / 18.4
30 bis <50 µg/l P	<i>Cyclotella ocellata</i>	27	2.6 / 4.2
	<i>Cyclotella praetermissa</i>	80	1.1 / 3.0
	<i>Stephanodiscus alpinus</i>	87	2.2 / 8.6
50 bis <70 µg/l P	<i>Asterionella formosa</i>	100	16.0 / 39.0
	<i>Stephanodiscus cf. minutulus</i>	100	28.7 / 66.8
70 bis <100 µg/l P	<i>Fragilaria crotonensis</i>	100	16.4 / 32.2
	<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	7	0.2 / 0.2
≥100 µg/l P	keine Plankter	-	- / -

Abbildung 4.2: Anteil der Trophieklassen im Sedimentkern PFÄ23-01 des Pfäffikersees, basierend auf den artspezifischen Optima des Gesamtphosphors.

¹ die mittlere Häufigkeit bezieht sich auf Proben mit Vorkommen des Taxon.

ten Arten *Fragilaria crotonensis* (19 % mittlerer Wert) und *Asterionella formosa* (13 % mittlerer Wert). Das mesotraphente Taxon *Cyclotella cyclopuncta*, welches als Optimum einen Gesamtphosphorwert von 25 µg P/I (TP-Klasse: 20 - 30 µg P/I) aufweist, trat in 13 der 15 Proben auf (17 % mittlerer Wert der letzten rund 20 Jahre).

In den letzten rund 20 Jahren fällt auf, dass das eutrathente Taxon *Stephanodiscus minutulus* (*Stephanodiscus parvus/minutulus*) in der Tendenz abnahm und die mesotraphenten Arten *Cyclotella cyclopuncta* und *Aulacoseira islandica* ssp. *helvetica* an relativer Häufigkeit zunahmen. Die Zunahme des Taxon *Aulacoseira islandica* ssp. *helvetica* nach dem Jahr ca. 2013 stimmt auch recht gut mit den Planktonzählungen des AWEL überein (siehe auch Kapitel 3).

Dieser Wechsel der Artenzusammensetzung geht - langfristig betrachtet - wohl in die Richtung eines durch mesotrophe Taxa dominiertes Kieselalgen-Plankton. Obwohl die mittleren Phosphorwerte schon deutlich < 20 µg P/I betragen, können sich eindeutig eutrathente Arten noch halten. Es dürften dafür ähnliche Faktoren und Prozesse verantwortlich sein wie im Greifensee. Es handelt sich dabei um Faktoren wie die interne Düngung infolge von Sauerstoffarmut im Sommer und Änderungen in der Dauer der Stagnation; vermutlich auch infolge des Klimawandels. Es können aber durchaus auch andere Faktoren mitbestimmend sein, wie das Auftreten von *Aulacoseira islandica* ssp. *helvetica* vermuten lässt. So benötigt die im Verhältnis grosse und Kolonien bildende Form *Aulacoseira* nach Pannard et al. (2008) häufigere Durchmischungen (physikalische Störungen) um nicht abzusinken und um sich in der euphotischen (lichtdurchfluteten) Zone halten zu können. Dieser Sachverhalt zeigt, dass das Aufkommen oder Verschwinden von Arten im Plankton komplex ist und oft nicht nur durch einen Faktor wie den Phosphorgehalt ausgelöst wird. Bemerkenswert ist, dass das Aufkommen von *Aulacoseira islandica* ssp. *helvetica* mit der Ausserbetriebnahme der Zwangszirkulation zusammenfällt (Abb. 4.2). Möglicherweise hatte die starke künstlich Belüftung das Wachstum dieser Art gestört.

Auffällig ist die deutliche Abnahme der mesotraphenten Art *Tabellaria flocculosa*. In den Sedimentproben der jüngeren Schichten (Abb. 4.1) nahm sie seit dem Jahr ca. 2000 nur noch ganz geringe Anteile ein (≤ 2.4 %). Diese geringe Häufigkeit entspricht auch den Planktondaten des AWEL, wo *Taballaria fenestrata* nur zweimal im März 2003 mit sehr geringer Häufigkeit erfasst wurde. Die Abnahme der mesotraphenten und Kolonien bildenden Art *Tabellaria flocculosa* mit einem TP-Optima von 25 µgP/I dürfte kaum nur durch den inzwischen tieferen Phosphorgehalt verursacht worden sein. Möglicherweise sind physikalische Faktoren wie Durchmischungsdynamik, Dauer der Stagnation und Zirkulation oder Wassertemperatur und damit die Viskosität oder biologische Effekte verursacht durch Frassdruck (Zooplankton) oder Krankheiten mitverantwortlich.

Der Anteil des Periphytons (Aufwuchsarten) war über die ganze Periode (2000 bis 2023) in etwa gleich hoch (Mittelwert 5 %, 4 bis 14 Taxa) und damit ähnlich wie vor dem Jahr 2000.

Saisonalität

Das Auftreten der Arten im Jahresverlauf kann basierend auf den untersuchten Sedimentproben nicht eruiert werden. Diese Information kann aber aus den Plankton-Zählraten des AWEL (2003 - 2021) und den Aufwuchsproben im Aabach bei Niederuster (Seeauslauf) vage gelesen werden. So erreichten die Kieselalgen in den Planktonproben über alle Jahre im März die grösste mittlere Dichte (HK 3.5 bis 4), während anschliessend die Dichte abnahm (April und Mai: HK 4 bis 4.5) und im Sommer, Herbst und Winter ähnlich tief blieb (HK 4.5 bis 5)⁴. Auf Ebene der Gattungen traten gemäss Planktonzählungen des AWEL die meisten Kieselalgen-Taxa gehäuft im Winter und Frühling auf. Nur *Cyclotella* sp. erschien etwas später (Frühling und Sommer). Das Auftreten von *Stephanodiscus minutulus* (*Stephanodiscus parvus/minutulus*) konnte nicht aus den Planktondaten eruiert werden, da dieses Taxon nicht erfasst wird. Wir gehen aber davon aus, dass sich dieses euträphente Taxon wie im Greifensee auch früh im Jahr entwickelt. Damit stellt sich die Frage, wie diese Koexistenz der beiden ökologisch unterschiedlichen Taxa (*S. minutulus* und *C. cyclopuncta*) erklärt werden kann. Einerseits ist *Stephanodiscus* als euträphente Art sehr tolerant und vermag sich auch im mesotrophen Bereich lange zu halten. Demgegenüber kommt *Cyclotella* wohl schon im leicht eutrophen Zustand vor, aber ist vermutlich konkurrenzschwach. Andererseits erscheinen eben zumindest die kleinen Taxa *Stephanodiscus minutulus* und *S. parvus* sehr früh im Jahr, weil dann infolge der Zirkulation noch Phosphor im lichtdurchfluteten Epilimnion vorhanden ist. Diese kleinen Formen dürften in der Lage sein, sich innert sehr kurzer Zeit (Wochen) sehr stark zu vermehren und damit den biologisch verfügbaren Phosphorgehalt im Epilimnion stark zu reduzieren. Damit dürften im Epilimnion im Frühling und in den Folgemonaten

⁴ Ausgewertet wurden die Häufigkeitsklassen (HK) pro Taxon. Dazu wurde die Skala HK 1 bis HK 5 umgekehrt, das heisst eine HK 1 wurde zu HK 5, eine HK 1.5 zu HK 4.5 etc. bis HK 5 zu HK 1. Damit konnten die HK pro Probe aufsummiert und über den Monat aller Jahre gemittelt werden. Je höher diese Summe war, umso dichter das Plankton.

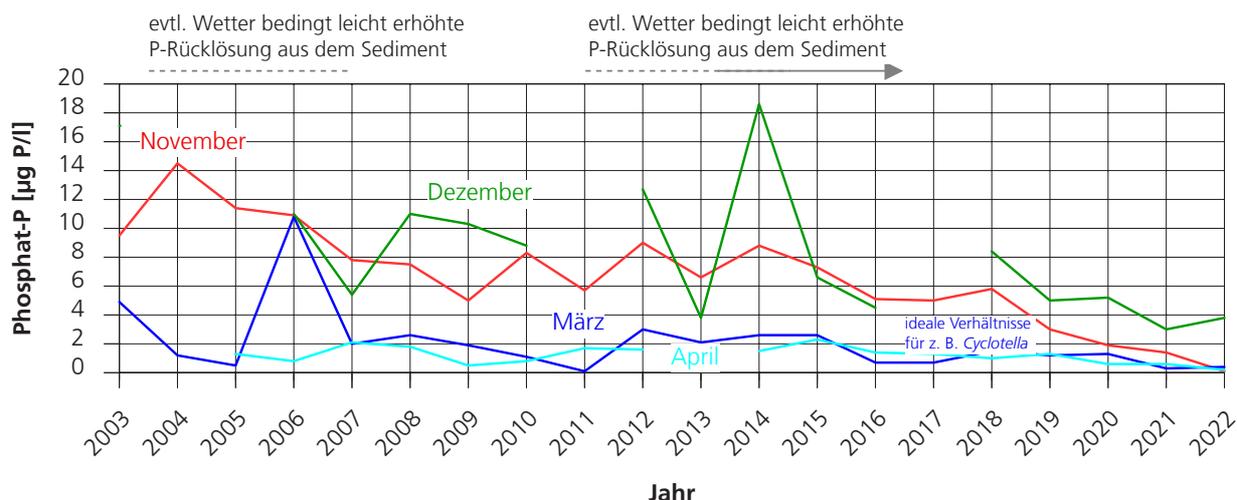


Abbildung 4.3: Verlauf der pro Monat gemessenen und über die Tiefe volumengewichteten mittleren Phosphatwerte der Periode 2003 bis 2022. Gezeigt werden die Monate November und Dezember mit leicht erhöhten Phosphatwerten (oft 6-8 µg P/l, aber auch 10-18 µg P/l) sowie März und April mit meist sehr tiefen Phosphatwerten (< 3 µg P/l, ideal für gewisse *Cyclotella* Arten).

Januar und Februar fast keine Daten (vermutlich infolge Eisbildung).

Verhältnisse mit wenig Phosphor vorhanden sein, so dass die mesotraphenten und konkurrenzschwächeren *Cyclotella*-Arten mit geringerer Dichte aufkommen können. Mit Sicherheit spielen aber auch andere Faktoren eine Rolle (Temperatur, Durchmischung, Licht, Zooplankton, Krankheiten etc.). Diese Koexistenz von zwei ökologisch unterschiedlichen Arten beobachteten wir auch in anderen Seen, trotz jahrelangem Zustand der Mesotrophie (Türlersee, Fählensee). Gemäss den chemischen Messungen des AWEL während der Periode 2003-2022 kann für den Pfäffikersee gezeigt werden, dass in den Herbst- und Wintermonaten November und Dezember (Januar, Februar keine Messwerte; vermutlich infolge Eisbedeckung) der über die Tiefe volumengewichtete mittlere Phosphatgehalt mit Werten von 6-8 µg P/l, aber auch 10-18 µg P/l jeweils messbar höher ist wie im März und April mit Werten um < 3 µg P/l (Abb. 4.3). Damit sind doch im Winter und Vorfrühling nach der Eisschmelze vermutlich Verhältnisse vorhanden, so dass sich im Winter zuerst das eutraphente Taxon *Stephanodiscus parvus / minutulus* entwickeln kann und dann nachher in deutlich anderem trophischen Milieu das mesotraphente Taxon *Cyclotella cyclopuncta*. Im Sediment allerdings erscheinen dann akkumuliert beide Taxa zusammen.

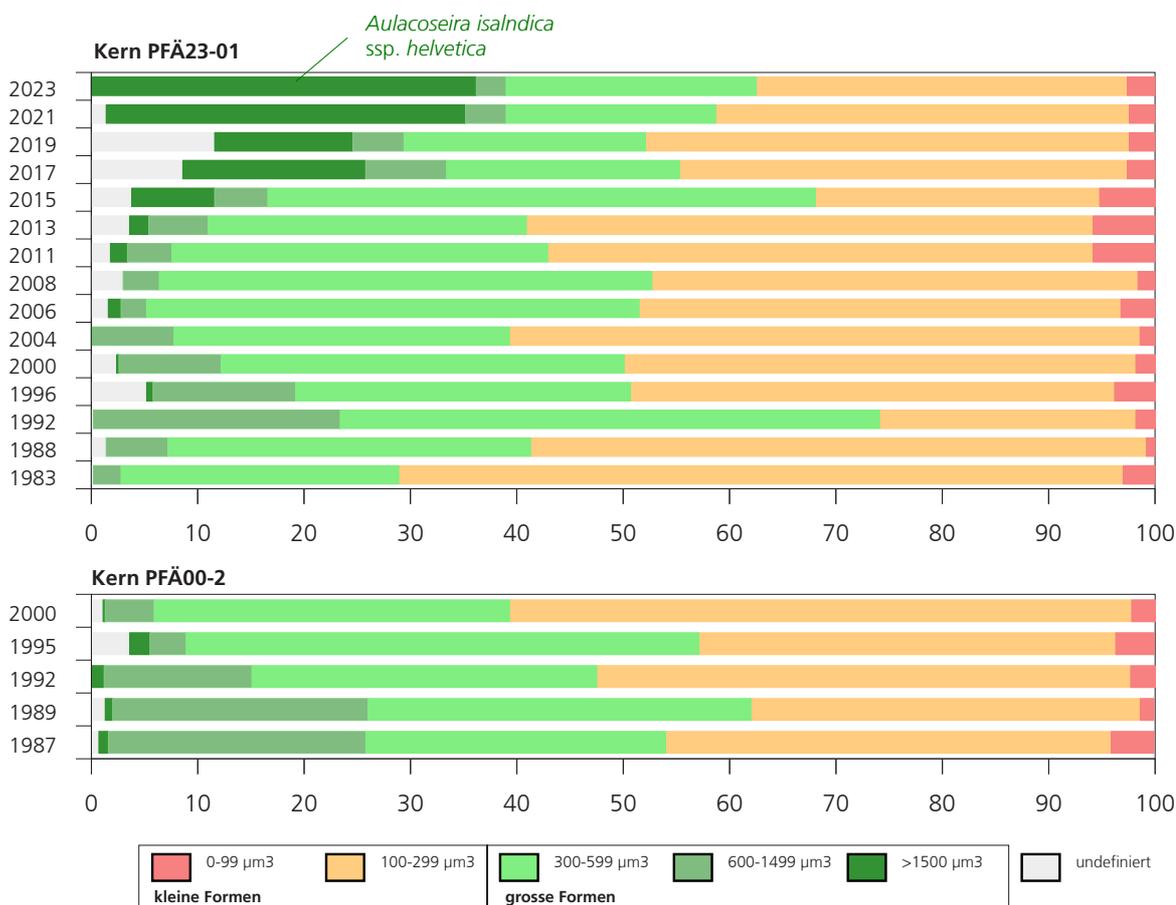


Abbildung 4.4: Entwicklung des Biovolumens nach Rimet (2010) in den Kernen PFÄ23-01 (Kernentnahme 2023, 15 Proben) und PFÄ00-2 (Kernentnahme 2000, obersten 5 Proben). Horizontale Achsen stellen Prozente der Biovolumenklassen dar.

Kleine Formen: *Stephanodiscus parvus*, *S. minutulus*, kleine *Cyclotellen*

Grosse Formen: *Asterionella formosa*, *Aulacoseira islandica* ssp. *helvetica*, *Fragilaria crotonensis*, *Stephanodiscus alpinus*, *Tabellaria flocculosa*

Undefiniert: *Fragilaria cyclopum*, *Cyclotella delicatula*, *Stephanodiscus medius*

Biovolumen

Die Änderungen der Artenzusammensetzungen im Plankton während der letzten rund 20 Jahre bewirkte vor allem in den letzten Jahren seit dem Aufkommen von *Aulacoseira islandica* ssp. *helvetica* eine deutliche Änderung in der Grösse der Organismen. Es gilt dabei zu beachten, dass sich die Auswertung der Biovolumen und damit indirekt die Grösse der Organismen gemäss Rimet et al. (2010) auf Standardvolumen bezieht. So nahmen basierend auf dieser Auswertung gemäss Abbildung 4.4 die grossen Formen mit einem Biovolumen von $> 1'500 \mu\text{m}^3$ zu und die Formen mit einem Biovolumen um $100\text{-}299 \mu\text{m}^3$ und $300\text{-}599 \mu\text{m}^3$ ab. Siehe dazu auch Anhang D, mit zwei typischen Bildern von Gesichtsfeldern der Tiefenstufen 9-10 cm (Probe 15, ca. Jahr 1983) und 0-0.5 cm (Probe 1, 2023). Die effektiven Verhältnisse im lebenden Plankton dürften noch stärker ausgefallen sein. Dies weil einige der grossen Formen wie z. B. *Asterionella formosa* und *Fragilaria crotonensis* Kolonien bilden, welche schon in der Rohprobe und daher auch im Präparat nicht mehr vorhanden sind oder zerbrochen waren. Die kleinen Formen wie z. B. *Stephanodiscus parvus* bilden aber keine Kolonien. Nebst Änderungen im Phosphorgehalt dürften die Viskosität⁵ des Wassers, der Frassdruck durch das Zooplankton, die Dauer der Stagnationsphase sowie weitere Faktoren diese Grössenänderungen bedingen. Die kleinen Formen dürften eher schnell vermehrend sein, während die grossen Arten für den Zellaufbau mehr Silizium benötigen und damit vermutlich längere Generationszeiten haben.

4.3 Rekonstruktion des Gesamtphosphors

Die Rekonstruktion des Gesamtphosphors basierend auf den im Sediment eingelagerten Kieselalgen befindet sich in Abb. 4.5. Der Verlauf zeigt, dass seit dem Jahr 2000 bis ins Jahr ca. 2015 die Kieselalgen in etwa immer ähnliche Phosphorwerte indizieren (TP-mittel: $65 \mu\text{g P/l}$, TP-low $33 \mu\text{g P/l}$), wobei sich die Messwerte des Gesamtphosphors deutlich tiefer befinden wie die Kurve TP-low. Anschliessend sinkt der rekonstruierte Wert des Gesamtphosphors leicht und beträgt im Jahr 2023 rund $50 \mu\text{g P/l}$ (TP-mittel: $51 \mu\text{g P/l}$, TP-low $26 \mu\text{g P/l}$). Damit bildet der Verlauf der Rekonstruktion in etwa denselben Trend wie die gemessenen Phosphorwerte ab, aber auf deutlich höherem (eutrophen) Niveau. Würde bei der Rekonstruktion das mesotrophente Taxon *Aulacoseira islandica* ssp. *helvetica* mit einem Optimum von $20 \mu\text{g P/l}$ einberechnet, wäre der rekonstruierte Gesamtphosphor in etwa um rund $10 \mu\text{g P/l}$ tiefer. Aber auch mit dieser Berücksichtigung des Taxon *Aulacoseira islandica* ssp. *helvetica* indizieren die Kieselalgen immer noch ein zu hohes trophisches Niveau. Das Taxon *Aulacoseira islandica* ssp. *helvetica* trat früher schon im Pfäffikersee (um 1950, AquaPlus 2001) über eine kurze Zeitspanne mit geringen Anteilen auf. Zudem erschien es auch im Greifensee

⁵ Die Viskosität bezeichnet die Zähflüssigkeit von Flüssigkeiten und Gasen (Fluiden). Je höher die Viskosität ist, desto dickflüssiger (weniger fließfähig) ist das Fluid; je niedriger die Viskosität, desto dünnflüssiger (fließfähiger) ist es (Angaben gemäss: <https://de.wikipedia.org/wiki/Viskosität>). Die Viskosität ist von der Temperatur abhängig. So sinken Partikel (z. B. Plankter) in warmem Wasser schneller ab wie in kaltem und daher zähflüssigerem Wasser. Wärmeres Wasser fördert somit Plankter die dank ihrer Körperform und -grösse, Kolonienbildung, Schwebefortsetzungen, allenfalls dank aktiver Bewegung oder geringerem spezifischen Gewicht (Öltröpfchen, Gaseinlagerungen in Vakuolen etc.) weinger schnell absinken.

(AquaPlus 2004a) und im Sempachersee (AquaPlus 2004b). In allen drei Seen war das Taxon während rund 10 bis 20 Jahren Bestandteil des Planktons und zwar beim Übergang vom mesotrophen zum eutrophen Zustand. Es scheint also, dass das Aufkommen von *Aulacoseira islandica* ssp. *helvetica* auch beim umgekehrten Prozess vom eutrophen zum mesotrophen Zustand stattfindet. Grundsätzlich ist es aber sehr erstaunlich wie lange sich eutraphente Arten wie z. B. *Stephanodiscus minutulus* auch unter deutlich mesotrophen Verhältnissen halten können.

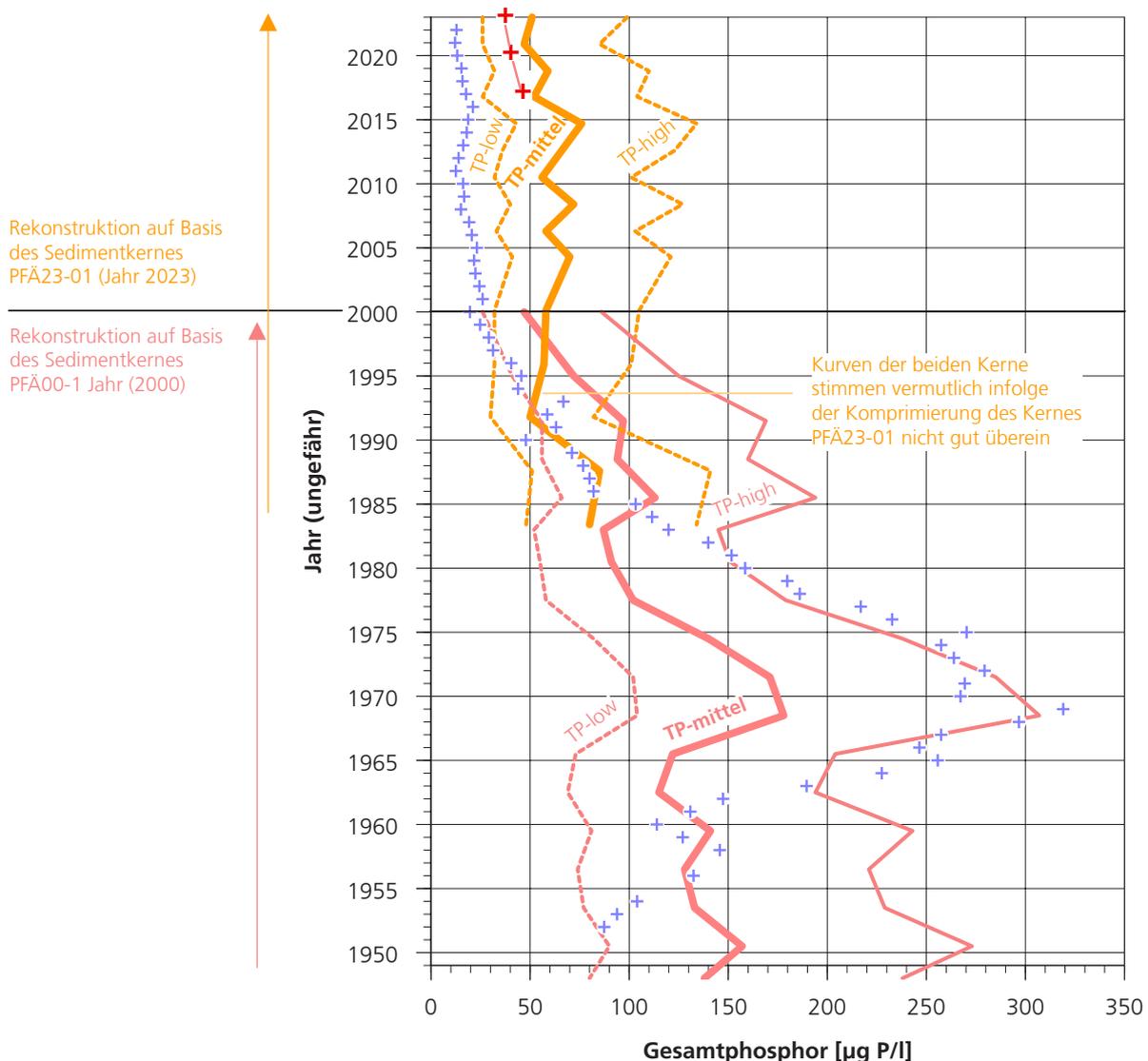


Abbildung 4.5: Rekonstruktion des Gesamtphosphors im Pfäffikersee basierend auf im Sediment eingelagerten Kieselalgen. Gezeigt sind die aktuelle Rekonstruktion der letzten rund 23 Jahre sowie die Rekonstruktion basierend auf dem Kern aus dem Jahr 2000 (AquaPlus 2001).

Rekonstruierter Gesamtphosphor ohne Miteinbezug des mesotraphenten Taxon *Aulacoseira islandica* ssp. *helvetica*. Bei Miteinbezug wäre TP-mittel im Jahr 2023 ca. 10 µg P/l tiefer (+).

Messwerte des Gesamtphosphors (blaue Kreuze, gemittelt über Tiefe nach Volumen und über Untersuchungsdaten pro Jahr) gemäss AWEL, TP-Rekonstruktion durch Prof. A. Lotter, Luzern.

5 Fazit

Im Pfäffikersee nahm seit den 1970er Jahren der gemessene Phosphorgehalt mit wenigen Ausnahmen stetig ab. Das Folgejahr wies oft einen tieferen Phosphorgehalt auf wie das Vorjahr (Abb. 4.5). Die Kieselalgen haben die Eutrophierung wie auch den ersten Teil des Rückgangs des Phosphorgehaltes ('Oligotrophierung') im Grossen und Ganzen gut abgebildet. Dabei passte bei hohen Phosphorwerten der rekonstruierte Wert von TP-high besser und bei tiefen Phosphorwerten der rekonstruierte Wert von TP-low. In den letzten rund 25 Jahren nahm der gemessene Phosphorgehalt weiterhin stetig ab, wobei um die Jahre 2011 bis 2015 dies nicht der Fall war. So stieg der Gesamtphosphor in diesen Jahren von 16 µg P/l auf 21 µg P/l wenig, aber erkennbar an. In all den Jahren aber war der Pfäffikersee, zumindest was den gemessenen mittleren Gesamtphosphor anbelangt, in einem deutlich mesotrophen Zustand. Der rekonstruierte Wert des Gesamtphosphors blieb aber mehr oder weniger konstant und dies auf einem deutlich höheren trophischen Niveau. Die Kieselalgen reagierten was die Rekonstruktion des Gesamtphosphors anbelangt zumindest bis jetzt noch nicht oder nur geringfügig auf diese doch eindeutige Trophieänderung. Anders verhält es sich mit den Trophieklassen gemäss Abbildung 4.2. Diese zeigen seit längerem an (erstmalig um 1988-1991, dann wieder ab ca. 2015 bis heute), dass die mesotrophenten Arten zu Gunsten der eutrophenten Arten zunehmen. Bei der Rekonstruktion prägen aber die eutrophenten Taxa die indizierten Messwerte. Möglicherweise ist dies auch ein Effekt der Eichung, indem gewisse eutrophente Taxa höher gewichtet wurden wie mesotrophente Taxa. Die immer noch deutliche Präsenz der eutrophenten Taxa dürfte aber auch andere Gründe haben. Aus Erfahrung mit anderen Seen (Greifensee, Türlensee, Fählensee) - die als Gemeinsamkeit alle ebenfalls im Sommerhalbjahr ein sauerstoffarmes Tiefenwasser aufweisen - beobachten wir eine ähnliche Koexistenz von mesotrophenten und eutrophenten Arten. Es ist also gut möglich, dass die interne Düngung das Vorkommen der eutrophenten Arten trotz gemessener Mesotrophie begünstigt. Wenn dies so ist, dann dürfte der Klimawandel bei der Ausprägung der Kieselalgen-Lebensgemeinschaften eine wesentliche Rolle spielen. Dies weil höhere Lufttemperaturen bis in den Herbst hinein Änderungen in den Wassertemperaturen im Epilimnion bedeuten, was wiederum eine Verlängerung der sommerlichen Stagnationsphase bewirkt. Eine Verlängerung der Stagnationsphase verursacht bei Seen wie dem Pfäffikersee, welcher im Sommer im Tiefenwasser keinen Sauerstoff aufweist, eine länger andauernde Phosphor-Rücklösung. Damit konzentriert sich der Phosphor im Tiefenwasser stärker auf, was bei der winterlichen Zirkulation zu höheren Phosphorgehalten auch im lichtdurchfluteten Oberflächenwasser führt. Infolge milder Wintertemperaturen gibt es vermutlich kaum eine nennenswerte Winterschichtung und schon gar nicht mehr eine Eisbildung, welche für das Algenwachstum hinderlich wäre. Diese Verhältnisse sind dann im Spätwinter (z. B. ab Februar) für r-Strategen ideal, wie z. B. die eutrophenten Kieselalgen *Stephanodiscus parvulus* / *minutus*. r-Strategen sind Arten von kleiner Grösse, die konkurrenzstark sind, sich schnell fortpflanzen, dafür infolge hoher Sterblichkeit eine kurze Lebensdauer haben. Die dominierenden r-Strategen zehren dann im Spätwinter und Anfang Frühling infolge der sehr hohen Zelldichte viel biologisch verfügbaren Phosphor

weg, so dass im Oberflächenwasser fast kein Phosphat mehr vorhanden ist. Diese nährstoffarmen Bedingungen erlauben es dann ab Frühling Arten wie die mesotraphente *Cyclotella cyclopuncta* aufzukommen, wenn auch in deutlich geringerer Zelldichte.

Dass sich aber in den letzten rund 10 Jahren das Plankton der Kieselalgen änderte, zeigt das Aufkommen der mesotraphenten Art *Aulacoseira islandica* ssp. *helvetica*. Dieses Taxon markierte in anderen Seen mit dem Auftreten während rund 10 bis 20 Jahre den Übergang von eutrophen zu mesotrophen Verhältnissen. So beobachteten wir dies im Pfäffikersee um 1950 sowie im Greifensee und im Sempachersee. Es scheint also, dass nun der umgekehrte Prozess im Gang ist, also der Wechsel von eutraphenten Arten hin zur Dominanz der mesotraphenten Arten. Mit dem Aufkommen der grösseren und Kolonien bildenden Art *Aulacoseira islandica* ssp. *helvetica* änderte sich aber innerhalb der Kieselalgen die Zusammensetzung der Biovolumen. Die Gruppe mit einem Volumen von $> 1'500 \mu\text{m}^3$ Zellvolumen nahm deutlich zu. Ob dieser Wechsel wirklich rein Phosphor getrieben ist, lässt sich nicht bestimmen. Änderungen in Zellbeschaffenheit (z. B. grösseres Volumen, vermutlich höherer Siliziumgehalt etc.) und im Zellaufbau (z. B. von Einzelzelle zu Kolonien bildend etc.) können durchaus auch durch Faktoren wie Frassdruck (Änderungen im Zooplankton) oder geringere Viskosität (schnelleres Absinken) infolge wärmerem Wasser oder länger dauernde Phase der Stagnation verursacht sein. Mit diesem Aspektwechsel zeigt sich, dass sich im Pfäffikersee die Lebensgemeinschaft der Kieselalgen über die letzten rund 15 Jahre änderte, sei es hinsichtlich der Artenzusammensetzung, des Biovolumens wie vermutlich auch der Dynamik (Abnahme der r-Strategen). Die Änderungen basieren vorwiegend auf der Zunahme von mesotraphenten Arten. Dies erachten wir als deutlichen Hinweis, dass angenommen werden kann, dass dieser Umbau der Lebensgemeinschaft noch nicht abgeschlossen ist und sich weiter in Richtung Mesotrophie bewegen wird.

Damit zeigt sich, dass der Weg der Eutrophierung sich nicht zwingend mit gleicher Geschwindigkeit und derselben Artenabfolge umkehren lässt. Zumindest die Kieselalgen reagieren im Pfäffikersee verzögert, z. T. bedingt durch den Klimawandel. Dies hat zur Konsequenz, dass die Rekonstruktion des Gesamtphosphors wie es das Modell von Lotter et al. (1998) für die Eutrophierung relativ gut ermöglicht, offenbar aber die Oligotrophierung zeitlich nur verzögert nachvollzogen werden kann. Ähnliche Situationen zeigten sich im seit rund 20 Jahren mesotrophen Türlensee (AquaPlus 2023b). Die eutraphenten Arten werden vermutlich erst aus dem Gewässer verdrängt, wenn der Gesamtphosphorwert über eine lange Zeit sehr tief ist ($\leq 15 \mu\text{g P/l}$) und gleichzeitig kein sauerstoffloses Tiefenwasser mit Phosphor-Rücklösung vorhanden ist. Im Bodensee zumindest nahm im Sediment unter diesen Umständen ($< 10 \mu\text{g P/l}$, permanent Sauerstoff im Tiefenwasser) das eutraphente Taxon *Stephanodiscus minutulus* massiv ab ($< 5\%$ Anteil) und das mesotraphente Taxon *Cyclotella cyclotella* deutlich zu ($> 20\%$ Anteil) (SeeWandel 2023). Der Klimawandel wirkt sicher bremsend auf den Prozess der Oligotrophierung; dies zumindest bei Seen mit sauerstofflosem Tiefenwasser in den Sommermonaten.

6 Literatur

- AWEL (2023): Wasser und Gewässer 2022. Kanton Zürich, Baudirektion, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL, Abteilung Gewässerschutz, Dr. Andrew Faeh, Stampfenbachstrasse 14, CH-8090 Zürich. 131 Seiten.
- AquaPlus (2001): Entwicklung des Gesamtphosphors im Pfäffikersee anhand der im Sediment eingelagerten Kieselalgen. Rekonstruktion seit ca. 1700. Im Auftrag der Baudirektion des Kantons Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL, Abteilung Gewässerschutz, Hardturmstrasse 105, CH-8005 Zürich. 45 Seiten, Bericht und Anhang.
- AquaPlus (2004a): Entwicklung des Gesamtphosphors im Greifensee anhand der im Sediment eingelagerten Kieselalgen. Rekonstruktion seit ca. 1620. Im Auftrag der Baudirektion des Kantons Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL, Abteilung Gewässerschutz, Hardturmstrasse 105, CH-8005 Zürich. 68 Seiten, Bericht und Anhang.
- AquaPlus (2004b): Entwicklung des Gesamtphosphors im Sempachersee anhand der im Sediment eingelagerten Kieselalgen. Rekonstruktion seit ca. 1600. Im Auftrag der Dienststelle für Umwelt und Energie des Kantons Luzern. 73 Seiten, Bericht und Anhang.
- AquaPlus (2021): Trophieverhältnisse Fählensee: Entwicklung des Nährstoffgehaltes seit dem 15. Jahrhundert. Untersuchung eines Seesedimentkernes mittels Kieselalgen zur Rekonstruktion des Gesamtphosphors. Fachbericht erstellt im Auftrag des Bau- und Umweltsdepartementes, Kanton Appenzell Innerrhoden, Gaiserstrasse 8, CH-9050 Appenzell. 31 Seiten, Bericht und Anhang.
- AquaPlus (2023a). Rekonstruktion des Gesamtphosphors des Greifensees mittels im Sediment eingelagerten Kieselalgen. Entwicklung seit dem Jahr 2000. Im Auftrag der Baudirektion des Kantons Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL, Abteilung Gewässerschutz, Hardturmstrasse 105, CH-8005 Zürich. 30 Seiten, Bericht und Anhang.
- AquaPlus (2023b): Rekonstruktion des Gesamtphosphors des Türlersees mittels im Sediment eingelagerten Kieselalgen. Entwicklung seit dem Jahr 2000. Im Auftrag der Baudirektion des Kantons Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL, Abteilung Gewässerschutz, Hardturmstrasse 105, CH-8005 Zürich. 31 Seiten, Bericht und Anhang.
- AquaPlus & PhycoEco (2021): NAWA TREND Biologie 2019, Teil Diatomeen und Äusserer Aspekt. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). 62 Seiten, Bericht und Anhang.
- Hofmann, G., Werum, M. & Lange-Bertalot, H. (2013): Diatomeen im Süßwasser - Benthos von Mitteleuropa. Bestimmungsflora Kieselalgen für die ökologische Praxis. Über 700 der häufigsten Arten und ihre Ökologie. 2. korrigierte Auflage. Koeltz Scientific Books, Königstein, 908 Seiten.
- Houk, V. (2003) Atlas of Freshwater Centric Diatoms with a Brief Key and Descriptions. Part I. Melosiraceae, Orthoseiraceae, Paraliaceae and Aulacoseiraceae. Czech Phycology Supplement, Volume 1, Czech Phycological Society, Olomouc.

- Krammer, K. & Lange-Bertalot, H. (1986-1991): Bacillariophyceae. In: Ettl H. Gerloff J. Heynig H. & Mollenhauer D. (eds.): Süßwasserflora von Mitteleuropa. Band 1-4, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Krisa, H, Hainz, R., Donabaum, K. & Wolfram, G. (2016). Aktualisierung der Trophie-Scores zur Bewertung des Phytoplanktons in österreichischen Alpenseen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 21 Seiten.
- Lotter, A.F. Birks, J. Hofmann, W. & Marchetto, A. (1998): Modern diatom, cladocera, chironomid, and chrysophyte cyst assemblages as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in the Alps. II. Nutrients. *J. Paleolimnol.* 19: 443-463.
- Pannard, A., M. Bormans, and Y. Lagadeuc. 2008. Phytoplankton species turnover controlled by physical forcing at different time scales. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 65: 47–60.
- Renkonen, O. (1938): Statistisch-ökologische Untersuchungen über die terrestrische Käferwelt der finnischen Bruchmoore. *Ann. Zool. Soc. Bot. Fenn. Vanamo*; 6: 1-231.
- Rimet, F., Berthon, V. & Bouchez, A. 2010. Formes de vie, guildes écologiques et classes de tailles des diatomées d'eau douce. INRA-Thonon, Rapport 290/10, 10 Seiten mit Anhängen.
- SeeWandel (2023): SeeWandel, Projektzusammenfassung Juni 2023: Leben im Bodensee – gestern, heute und morgen. Vertreten durch PD Dr. Piet Spaak, Überlandstrasse 133, CH-8600 Dübendorf
- Shannon, C. & Weaver, W. (1949): The mathematical theory of communication. Univ. Illinois Press. Urbana.
- ter Braak, C.J.F. & Juggins, S. (1993): Weighted averaging partial least squares regression (WA-PLS): an improved method for reconstructing environmental variables from species assemblages. *Hydrobiologia* 269/270: 485-502.

Anhang A

Datierung Sedimentkern PFÄ23-01

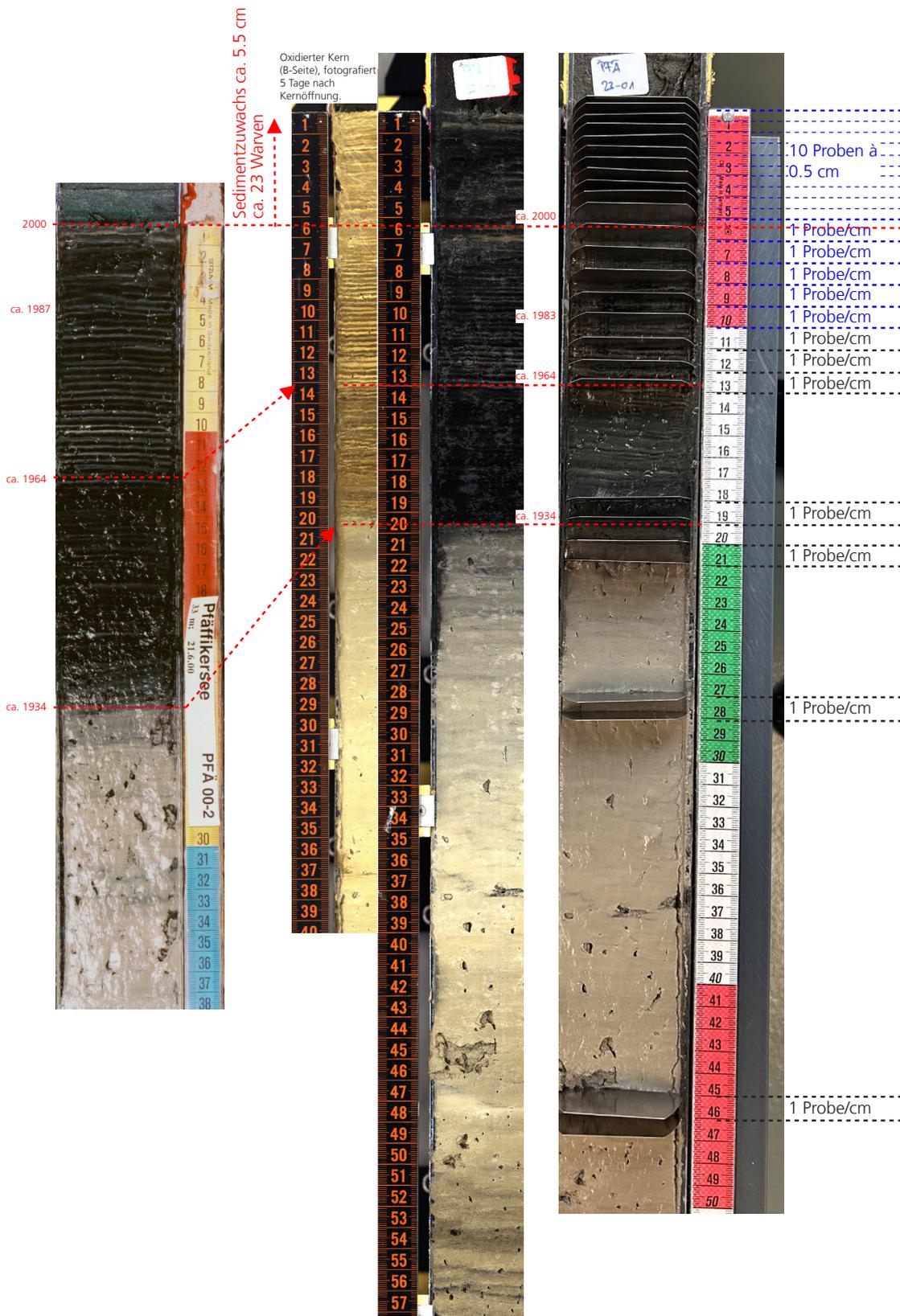
PFÄ00-2

Dieser Kern wurde für die TP-Rekonstruktion im Jahr 2000 verwendet.

PFÄ23-01B/A

Der Vergleich der beiden Kerne ist schwierig. Der Kern PFÄ23-01 dürfte wenig komprimiert sein. Im oxidierten Kern (B-Seite) können die Warven einigermaßen gut gezählt werden. Der Sedimentzuwachs dürfte demnach seit dem Jahr 2000 (23 Warven) rund 5.5 cm gewesen sein (= 2.4 mm/Jahr). Es wurden 21 Proben entnommen (blau: Auswahl der untersuchten 15 Proben).

PFÄ23-01A



Anhang B

Charakterisierung des Pfäffikersees

- Zustand des Pfäffikersees (1 Seite)
- Beurteilung des Seezustandes (1 Seite)
- Entwicklung des Phosphorgehaltes im Pfäffikersee seit 1700 (1 Seite)
- Entwicklung des Chlorophyllgehaltes (1 Seite)

Pfäffikersee



Höhenlage	537 m ü. M.	Seeabfluss	Aa
Seeoberfläche	3.03 km ²	C_{mittel}	860 l/s
Maximale Tiefe	35.0 m	C_{347}	77 l/s
Mittlere Tiefe	18.8 m	Aufenthaltszeit	ca. 770 Tage
Seevolumen	57.1 Mio m ³		

Beurteilungsskala: für Details siehe Mess- und Beurteilungsmethoden Seen

Koordinaten Messstelle (tiefste Stelle) 701'625 / 245'400

Gesamtphosphor Pfäffikersee

Ökologisches Ziel: 0.025

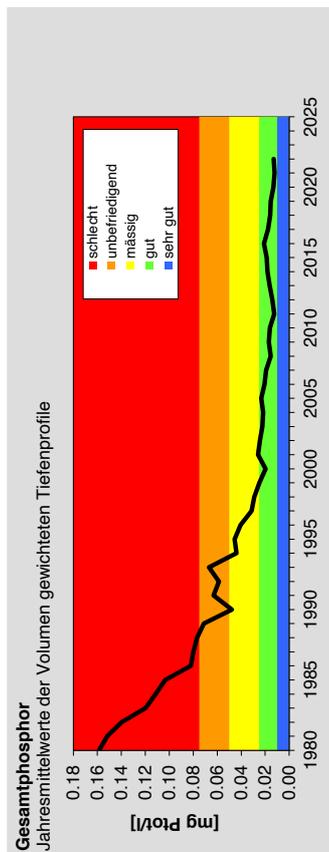
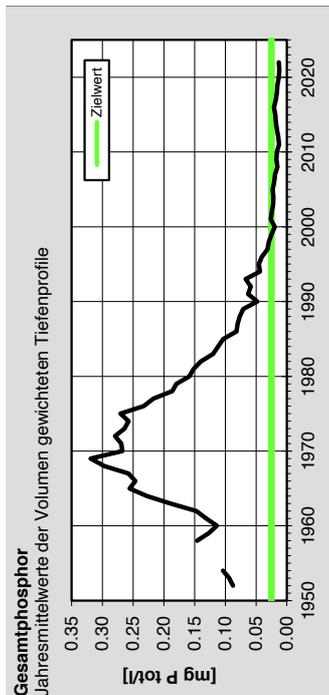


Handlungsbedarf:

- Stabilisierung der Phosphorkonzentration unter 0.025 mg P_{tot}/l durch Aufrechterhaltung der getroffenen Massnahmen in den Bereichen Landwirtschaft und Siedlungsentwässerung

Wichtige Ereignisse:

- 1948: Erlass Schutzverordnung Pfäffikersee
- 1950: Inbetriebnahme ARA Pfäffikon
- November 1992: Inbetriebnahme der seeinternen Zirkulationsunterstützungsanlage
- 23.9.1999: grosses Felchensterben; die Ursache konnte trotz umfangreichen Untersuchungen nicht ermittelt werden
- 2004: Aufhebung ARA Bärenswil, Anschluss an ARA Wetzikon
- Frühling 2011: Ausserbetriebnahme der seeinternen Zirkulationsunterstützungsanlage



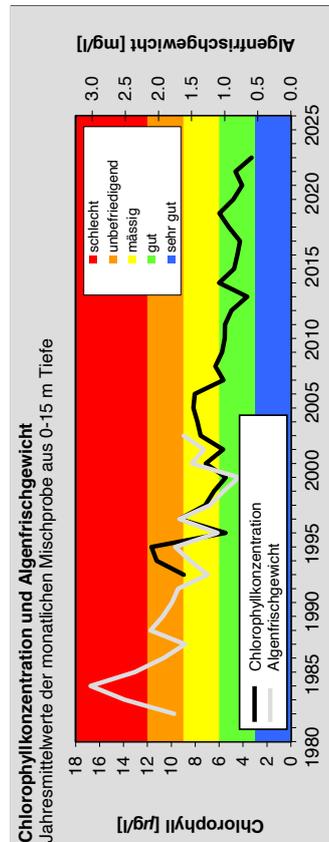
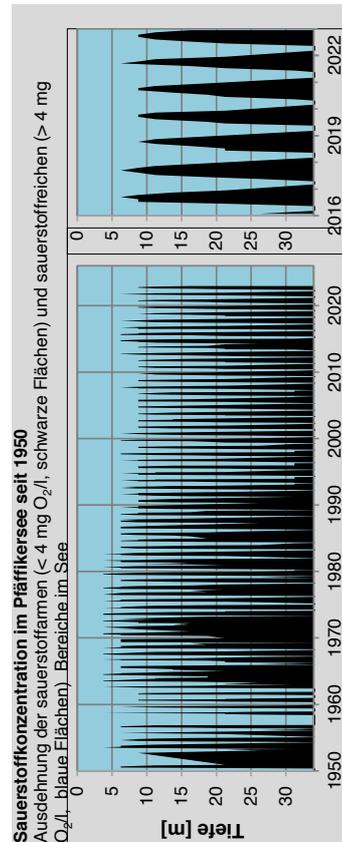
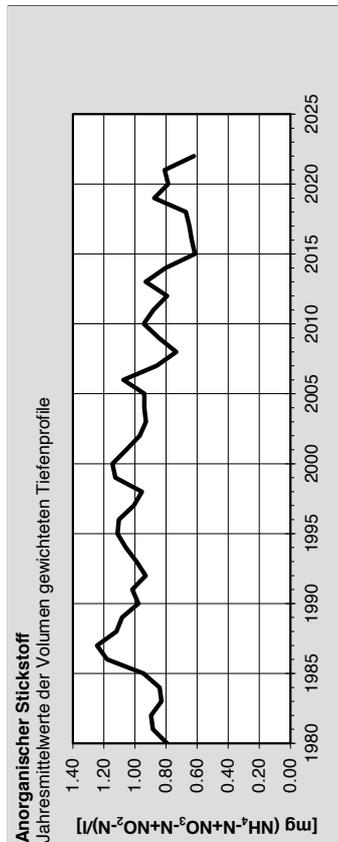
Pfäffikersee: Beurteilung des Seezustands

Aktuell weist der See einen guten Zustand bezüglich Phosphor und Algenmenge auf, dennoch ist im Sommer ab 8-9 m Tiefe meist nicht mehr genügend Sauerstoff für Fische vorhanden.

Der Pfäffikersee wäre unter natürlichen Verhältnissen ein nährstoffarmer See mit geringem Algenwachstum. Bis 1900 dürfte das Tiefenwasser aufgrund der tiefen Phosphorkonzentrationen nahezu durchgehend sauerstoffhaltig gewesen sein.

Die Stickstoffkonzentrationen haben in den letzten 35 Jahren deutlich abgenommen. Dazu beigetragen haben erhöhte Anforderungen an die Stickstoffelimination in den ARA. Strengere Abgasvorschriften haben den Stickstoffeintrag in die Gewässer über die atmosphärische Deposition weiter reduziert. Ein sorgfältigeres Düngermanagement infolge des ökologischen Leistungsnachweises hat ebenfalls zu einer Reduktion der Stickstoff- aber auch der Phosphoreinträge aus landwirtschaftlich genutzten Flächen geführt. Kurzzeitig kann es jedoch immer wieder zu einem Anstieg der Stickstoffkonzentrationen kommen - auch 2019. Ursache dafür sind Niederschlagsperioden, die auf längere Trockenperioden folgen. Bei Trockenheit wird kaum Stickstoff aus den Böden ausgewaschen. Überschüssiger Stickstoff lagert sich im Boden an und gelangt erst in der nächsten Niederschlagsperiode in erhöhter Konzentration in die Gewässer. Die Phosphorkonzentration erfüllt die Zielvorgabe (0.025 mg P_{tot}/l) bezüglich Gesamtphosphorgehalt seit 1999, liegt aber noch über der natürlichen Hintergrundbelastung. Während in den Siebziger- und Achtzigerjahren die Phosphorkonzentration stark zurückging, nahm sie seit 1990 nur noch langsam ab. Die Abnahme führte zu einer Reduktion der Algendichte, die seit 2008 regelmäßig als gut beurteilt werden kann. Insbesondere Massenerkrankungen im Herbst traten seit 1997 nicht mehr auf.

Die Anforderung für Sauerstoff kann noch nicht eingehalten werden. Während der sommerlichen Stagnationsphase werden durch den Abbau von sedimentierender Biomasse die Sauerstoffvorräte im Tiefenwasser aufgezehrt. Zur Erreichung von sauerstoffhaltigem Wasser in allen Tiefen muss der Phosphorgehalt im See nochmals um zirka 40% reduziert werden, zeigt eine neue Studie der Eawag. Der Betrieb der Anlage zur Unterstützung der Zirkulation wurde im Frühjahr 2011 eingestellt. Der See weist seither vermehrt etwas schlechtere Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser auf, als dies mit dem Betrieb der Anlage der Fall war. Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt nach kurzen Wintern wie z.B. 2013/2014. Es stand aber immer eine ausreichend grosse Schicht mit günstigen Sauerstoff- und Temperaturverhältnissen für die Fische zur Verfügung.



16.02.2023

Entwicklung des Phosphorgehaltes im Pfäffikersee seit 1700

Rekonstruktion der Nährstoffbelastung

Mit einem 1 m langen Sedimentkern konnte anhand der eingelagerten Schalen von toten Kieselalgen die Nährstoffgeschichte der letzten 300 Jahre rekonstruiert werden. Aus der Form der Kieselalgenschalen konnte auf die entsprechende Kieselalgenart und daraus auf die zur Lebzeit der Algen herrschenden Nährstoffverhältnisse geschlossen werden. Dabei ist zu beachten, dass Kieselalgen auf einen Rückgang der Nährstoffverhältnisse verzögert reagieren.

Entwicklung der Nährstoffbelastung

- 1730-1750: Erhöhung des Gesamtphosphorgehaltes auf über 0.06 mg P/l (deutlich nährstoffreich) durch Torfabbau in Pfäffikon und Seegräben
- 1750-1830: Rückgang des Phosphorgehaltes durch Regelungen im Torfabbau und stabile mittlere Nährstoffbelastung um 0.02 mg P/l während 40 Jahren
- 1830-1850: Erhöhung des Phosphorgehaltes auf 0.04 mg P/l (schwach nährstoffreich) durch erneut intensiven Torfabbau und Beginn Industrialisierung
- 1850-1920: Rückgang des Gesamtphosphorgehaltes auf 0.02 mg P/l bis 1890 und stabiler mittlerer Nährstoffgehalt bis 1920
- 1920-1970: rasche Zunahme des Gesamtphosphorgehaltes auf 0.3 mg P/l (sehr nährstoffreich) durch Einleitung ungenügend gereinigter Abwässer und zunehmender Verbrauch von phosphathaltigen Waschmitteln
- 1970-2000: Abnahme des Gesamtphosphorgehaltes durch verbesserte Reinigungsleistung der ARA, Phosphatverbot in Waschmitteln und umweltfreundlichere Produktion in der Landwirtschaft

Biologisches Sanierungsziel

Der Pfäffikersee wies am Ende des 18. und 19. Jahrhunderts einen stabilen mittleren Nährstoffgehalt auf. Charakterisiert wurde dieser Zustand durch Kieselalgenarten, die wenig bis schwach nährstoffhaltige Gewässer bevorzugten.

gen. Diese Arten, u.a. mehrere *Cyclotella*-Arten (*Cyclotella distinguenda*, *C. comensis/pseudocomensis*, *C. bodanica* sowie *C. cyclopunctata*) stellen hinsichtlich der zukünftigen Kieselalgenzusammensetzung ein anzustrebendes biologisches Ziel dar.

Aktueller Zustand

Der Gesamtphosphorgehalt liegt seit 2007 unter 0.020 mg P/l. Im Jahr 2000 dominierte die nährstoffliebende Frühlingsart *Stephanodiscus minutulus/parvus*. Sofern sich die Phosphorkonzentration unter 0.020 mg P/l stabilisiert, dürfte der Anteil dieser Art allmählich zurückgehen und durch einen grösseren Anteil von *Cyclotella*-Arten sowie durch die heute schon vorhandenen *Fragilaria crotonensis*, *Asterionella formosa* und/oder *Tabellaria flocculosa* abgelöst werden.

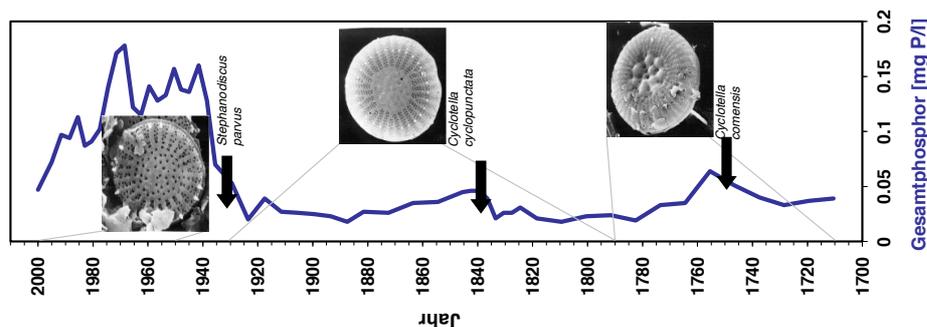
Wichtige Ereignisse

- 1860: Künstliche Absenkung des Sees und Regulierung des Seeausflusses
- 1896: Bau der Kanalisation Pfäffikon und Einleitung des ungereinigten Abwassers in den See
- 1935: grosses Fischsterben
- 1948: Erlass Schutzverordnung Pfäffikersee
- 1950-1982: Inbetriebnahme und diverse Erweiterungen der ARA Pfäffikon und Bärenwil
- 1986: Phosphatverbot in Waschmitteln
- 1992: Inbetriebnahme der seeinternen Zirkulationsunterstützungsanlage
- 1994: Erweiterung und Sanierung ARA Pfäffikon
- 2011: Betrieb der Zirkulationsunterstützungsanlage eingestellt

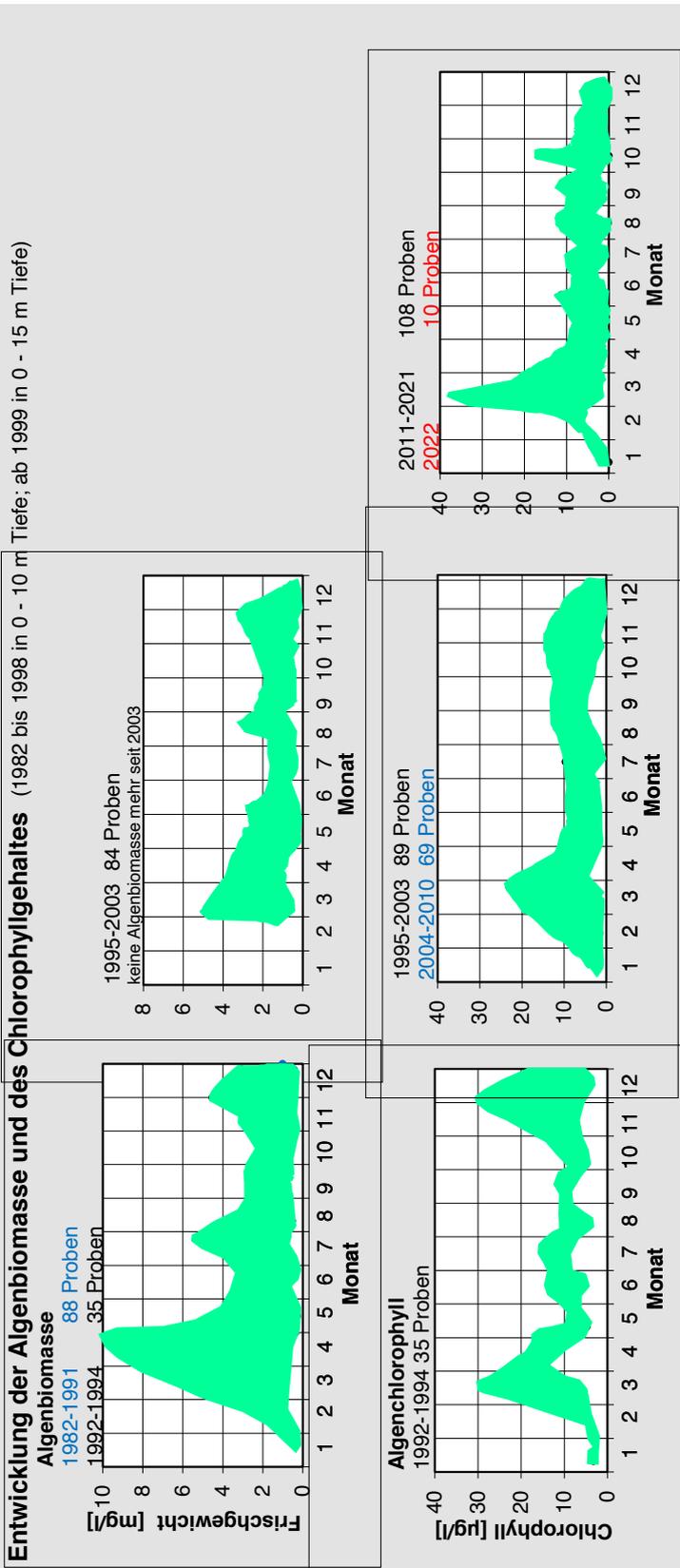
Literatur

Entwicklung des Gesamtphosphors im Pfäffikersee anhand der im Sediment eingelagerten Kieselalgen: Bericht Aqua Plus 2001.

Fotos Rasterelektronenmikroskopie: Rolf Klee, Bay. Landesamt für Wasserwirtschaft, Wielenbach



Pfäffikersee



Gegenüber der Periode von 1982 bis 1994 wurde im Pfäffikersee zwischen 1995 und 2003 ein Rückgang der Algenbiomasse im Frühjahr und Herbst beobachtet. Bemerkenswert sind die hohen Werte von über 15 µg Chlorophyll pro Liter im November und Dezember 1994. Die Ursache war eine ausserordentlich späte Massenentwicklung der Alge *Dinobryon divergens*, welche durch hohe Wassertemperaturen und eine langanhaltende Schönwetterperiode im Herbst 1994 ermöglicht wurde.

Auch in der Periode von 2011 bis 2021 ging die Algenmenge nochmals zurück und weist damit auf eine allmähliche Gesundung des Sees hin. Diese erfreuliche Tendenz zeigt sich auch in der längerfristigen Entwicklung der Phosphorbelastung des Sees. Der Phosphorgehalt liegt im Pfäffikersee seit 1999 im Bereich der Zielvorgaben.

Im Frühjahr kann es allerdings auch bei diesen relativ tiefen Phosphorkonzentrationen, die jedoch noch immer deutlich über den natürlichen Konzentrationen liegen, zu einem starken Algenwachstum kommen. Dies war z.B. im März 2013 und in geringerem Mass im März 2021 der Fall, als günstige Umweltbedingungen das Wachstum von Kieselalgen stark begünstigten.

Anhang C

Zähldaten der Kieselalgen (15 Proben)

Gewässer: Pfäffikersee
Kern: PFÄ23-01
Probenahmedatum: 12.5.2023
Probenehmerin: Anita Schlatter, EAWAG
Koordinaten: 2'701'500 / 1'245'250
Meereshöhe: 537 m ü. M.

Stellenliste

Sedimentprobe Nummer	Probe 01	Probe 02	Probe 03	Probe 04	Probe 05
Sedimenttiefe	0-0.5 cm	0.5-1 cm	1-1.5 cm	1.5-2 cm	2-2.5 cm
Zähllistennummer AquaPlus	18960	18961	18962	18963	18964

Sedimentprobe Nummer	Probe 06	Probe 07	Probe 08	Probe 09	Probe 10
Sedimenttiefe	2.5-3 cm	3-3.5 cm	3.5-4 cm	4-4.5 cm	4.5-5 cm
Zähllistennummer AquaPlus	18965	18966	18967	18968	18969

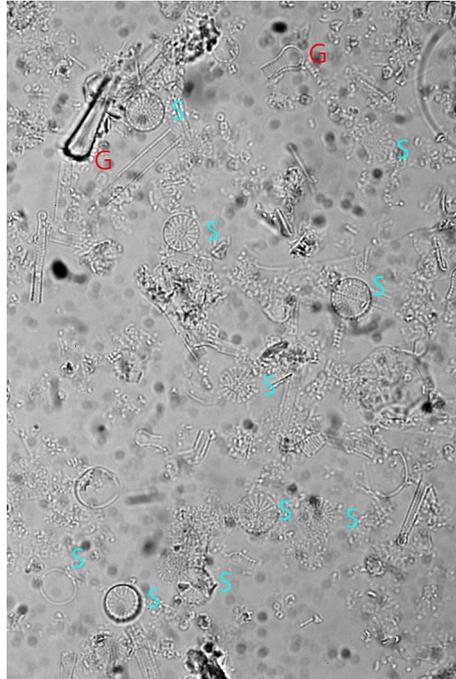
Sedimentprobe Nummer	Probe 11	Probe 12	Probe 13	Probe 14	Probe 15
Sedimenttiefe	5-6 cm	6-7 cm	7-8 cm	8-9 cm	9-10 cm
Zähllistennummer AquaPlus	18970	18971	18972	18973	18974

Sedimentprobe Nummer weitere Angaben siehe Stellenliste	Probe 01	Probe 02	Probe 03	Probe 04	Probe 05	Probe 06	Probe 07	Probe 08	Probe 09	Probe 10	Probe 11	Probe 12	Probe 13	Probe 14	Probe 15
<i>Achnanthes conspicua</i> MAYER	0.4					0.2			0.8	0.8					
<i>Achnanthes lanceolata</i> ssp. <i>frequentissima</i> var. <i>frequentissima</i> LANGE-BERTALOT									0.4						0.8
<i>Achnanthes minutissima</i> KUETZING		1.2	1		2.2		3.2	0.4		0.6		1.8	1.8	0.4	1.4
<i>Achnanthes minutissima</i> var. <i>scotica</i> (CARTER) LANGE-BERTALOT		0.6													
<i>Achnantheidium affine</i> (GRUNOW) CZARNECKI				0.4											
<i>Achnantheidium catenatum</i> (BILY & MARVAN) LANGE-BERTALOT											0.8				
<i>Achnantheidium pyrenaicum</i> (HUSTEDT) KOBAYASI		0.6			0.6					0.6			0.6		
<i>Amphora copulata</i> (KUETZING) SCHOEMAN & ARCHIBALD									0.4						
<i>Amphora inariensis</i> KRAMMER	0.4														
<i>Amphora pediculus</i> (KUETZING) GRUNOW	2.6	0.6	0.6	1.6	2.2	3.8	2.2		1.4					0.2	1.2
<i>Asterionella formosa</i> HASSALL	6.8	8.6	18.8	7.6	19.2	10.6	16.4	14.4	15.8	7.4	24.2	17	39	17.8	16.6
<i>Aulacoseira islandica</i> ssp. <i>helvetica</i> (O.MUELLER) SIMONSEN	36.2	33.8	12.8	17.2	7.8	1.8	1.4								
<i>Brachysira neoxilis</i> LANGE-BERTALOT			1						1						
<i>Caloneis bacillum</i> sensu DICH 2006 (GRUNOW) CLEVE									0.4						
<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>euglypta</i> sensu Krammer & Lange-Bertalot 1991 Fig 53/9, 5 und sensu Hofmann et al. 2011 Fig 19/7									0.8		0.2	0.4			
<i>Cyclotella atomus</i> HUSTEDT			0.6		0.6	1		0.8		0.8	1	0.6			
<i>Cyclotella bodanica</i> GRUNOW															0.2
<i>Cyclotella cyclopuncta</i> HAKANSSON & CARTER	19.6	15.6	16.2	30.6	10.2	21.6	18.8	13.6	18.6	8.4	16.4	16.8	0.8		
<i>Cyclotella delicatula</i> HUSTEDT			7.4	3	1.8	1.8					0.2				
<i>Cyclotella kuetzingiana</i> THWAITES	0.8		2	1	0.8		0.6	0.8		2.2					
<i>Cyclotella ocellata</i> PANTOCSEK	4.2	4	1.4	0.6											
<i>Cyclotella praetermissa</i> LUND	0.6			1.4	1.2	0.2	0.8	0.4	0.6	3		1.2	1	0.8	1.8
<i>Cyclotella radiosa</i> (GRUNOW) LEMMERMANN	0.2	0.2	0.8	1.6					0.4		1.4	1.8	0.8		0.4
<i>Cyclotella stelligera</i> CLEVE & GRUNOW			0.4		1.8	0.4		0.8			0.4	1	2.2		
<i>Cyclotella wuethrichiana</i> DRUART & STRAUB						0.6									
<i>Cymbella microcephala</i> (Artengruppe) GRUNOW		0.4				0.6	0.4	0.6		0.8	0.2		0.2	0.2	
<i>Denticula tenuis</i> KUETZING							0.4								
<i>Diatoma tenuis</i> C.AGARDH	0.6							0.2							
<i>Diatoma vulgare</i> BORY DE SAINT-VINCENT			0.2												
<i>Encyonema minutum</i> (HILSE) D.G.MANN			0.2											0.6	
<i>Encyonema silesiacum</i> (BLEISCH) D.G.MANN					0.2										0.2
<i>Fragilaria brevistriata</i> GRUNOW	1.6	1					1.8	0.4			0.6	1.4			
<i>Fragilaria capucina</i> var. <i>austriaca</i> (GRUNOW) LANGE-BERTALOT													0.4		
<i>Fragilaria capucina</i> var. <i>gracilis</i> (OESTRUP) HUSTEDT					0.2	0.2	0.4								
<i>Fragilaria capucina</i> var. <i>mesolepta</i> (RABENHORST) RABENHORST						0.8			0.2						
<i>Fragilaria capucina</i> var. <i>vaucheriae</i> (KUETZING) LANGE-BERTALOT								0.6			1.4				
<i>Fragilaria construens</i> f. <i>venter</i> (EHRENBERG) HUSTEDT				1.8									3		0.4
<i>Fragilaria crotonensis</i> KITTON	12.6	6.2	2.6	11.6	32.2	18.6	18.2	31.4	29	23	13.4	14.6	8.6	15.8	8.8
<i>Fragilaria cyclopus</i> (BRUTSCHY) LANGE-BERTALOT		0.6	1.2	2.2		0.8		0.4				0.2	0.2	0.8	
<i>Fragilaria mesolepta</i> RABENHORST			1												
<i>Fragilaria pinnata</i> auct		0.4		1		0.2	0.8	0.2	0.8	0.4	1	2.6	1.8	1.2	
<i>Fragilaria tenera</i> (W.SMITH) LANGE-BERTALOT				0.2											
<i>Fragilaria ulna</i> (NITZSCH) LANGE-BERTALOT							0.2					0.2			
<i>Geissleria cummerowi</i> (KALBE) LANGE-BERTALOT									0.4						
<i>Gomphonema angustivalva</i> REICHARDT														0.4	

Sedimentprobe Nummer weitere Angaben siehe Stellenliste	Probe 01	Probe 02	Probe 03	Probe 04	Probe 05	Probe 06	Probe 07	Probe 08	Probe 09	Probe 10	Probe 11	Probe 12	Probe 13	Probe 14	Probe 15
Gomphonema olivaceum (HORNEMANN) BREBISSON				0.2											
Gomphonema olivaceum var. Fusspol vorgezogen Arbeitsname E. Reichardt 2002									0.4	0.4					
Gomphonema parvulum var. parvulum f. saprophilum LANGE-BERTALOT & REICHARDT														0.2	
Gomphonema pumiloide-Kleinformen Arbeitsname E. Reichardt 2002					0.6			0.6							
Gomphonema pumilum var. elegans REICHARDT & LANGE-BERTALOT								0.6					0.2		
Meridion circulare (GREVILLE) C.AGARDH														0.2	
Navicula capitata EHRENBERG									0.4						
Navicula contenta GRUNOW			0.2			0.4									
Navicula cryptotenella LANGE-BERTALOT		0.6				0.2			0.8						
Navicula lanceolata (C.AGARDH) EHRENBERG														0.2	
Navicula menisculus var. grunowii LANGE-BERTALOT											0.2			0.2	0.4
Navicula pseudoventralis HUSTEDT					0.4										
Navicula pupula KUETZING			0.2			0.2									
Navicula reichardtiana LANGE-BERTALOT			1.4				1						0.4		0.4
Navicula subhamulata GRUNOW											0.6				
Navicula sublucidula HUSTEDT									0.8			1.4			
Navicula tripunctata (O.F.MUELLER) BORY DE SAINT-VINCENT			0.8									0.8			
Navicula utermoehlii HUSTEDT			0.2			0.2		0.4	0.4					0.2	
Navicula veneta KUETZING												0.2			
Navicula ventralis KRASSKE									0.6						
Nitzschia dissipata (KUETZING) GRUNOW		0.8													0.2
Nitzschia lacuum LANGE-BERTALOT															0.4
Platessa zieglerei (LANGE-BERTALOT) LANGE-BERTALOT												0.4			
Rhoicosphenia abbreviata (C.AGARDH) LANGE-BERTALOT					0.2										
Simonsenia delognei (GRUNOW) LANGE-BERTALOT				1											
Stephanodiscus alpinus HUSTEDT	1.4	2.2	2.6	4.6	1.6	2.4	2	1	1	0.6	0.2	8.6	0.8		
Stephanodiscus hantzschii < 12um GRUNOW				0.2											
Stephanodiscus medius HAKANSSON		0.8	3	3.4	1.6	1	1.8	2.6	1.6		2.2	4.6		0.6	
Stephanodiscus minutulus (KUETZING) GRUNOW in CLEVE & MOELLER	12	21.2	23.4	8.8	14.4	30	28.2	28.8	23	46.8	28	24.4	19.8	55.6	66.8
Tabellaria flocculosa (ROTH) KUETZING		0.6			0.2	2.4	1.4	1		4.2	7.6		18.4	4.6	
Anzahl gezählte Schalen	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Taxazahl	15	20	25	21	21	24	19	21	24	15	19	20	18	18	15
Diversität H	2.74	2.88	3.33	3.27	3.02	2.96	2.95	2.65	2.83	2.41	2.8	3.16	2.62	2	1.66

Anhang D

Bilder typischer Gesichtsfelder zweier Tiefenstufen mit unterschiedlich grossen Arten (Biovolumen).



Probe 16 (9-10 cm Tiefe, Jahr ca. 2000)

Viele kleine Formen wie *Stephanodiscus parvus / minutulus*, markiert mit einem hellblauen 'S'. Nur wenig grosse Formen wie *Asterionella formosa* (Bruchstücke), markiert mit einem roten 'G'.

Lichtmikroskope, 100-er Objektiv Ölimmersion, Hellfeld.



Probe 1 (0-0.5 cm Tiefe, Jahr 2023)

Zwei grosse Formen wie *Aulacoseria islandica* spp. *helvetica* und *Asterionella formosa* (Bruchstück), markiert mit einem roten 'G' und etliche kleine Formen wie *Stephanodiscus parvus / minutulus*, *Cyclotella* cf. *cyclopuncta* und *Achnanthydium pyrenaicum*, markiert mit einem hellblauen 'S'.

Lichtmikroskope, 100-er Objektiv Ölimmersion, Hellfeld.