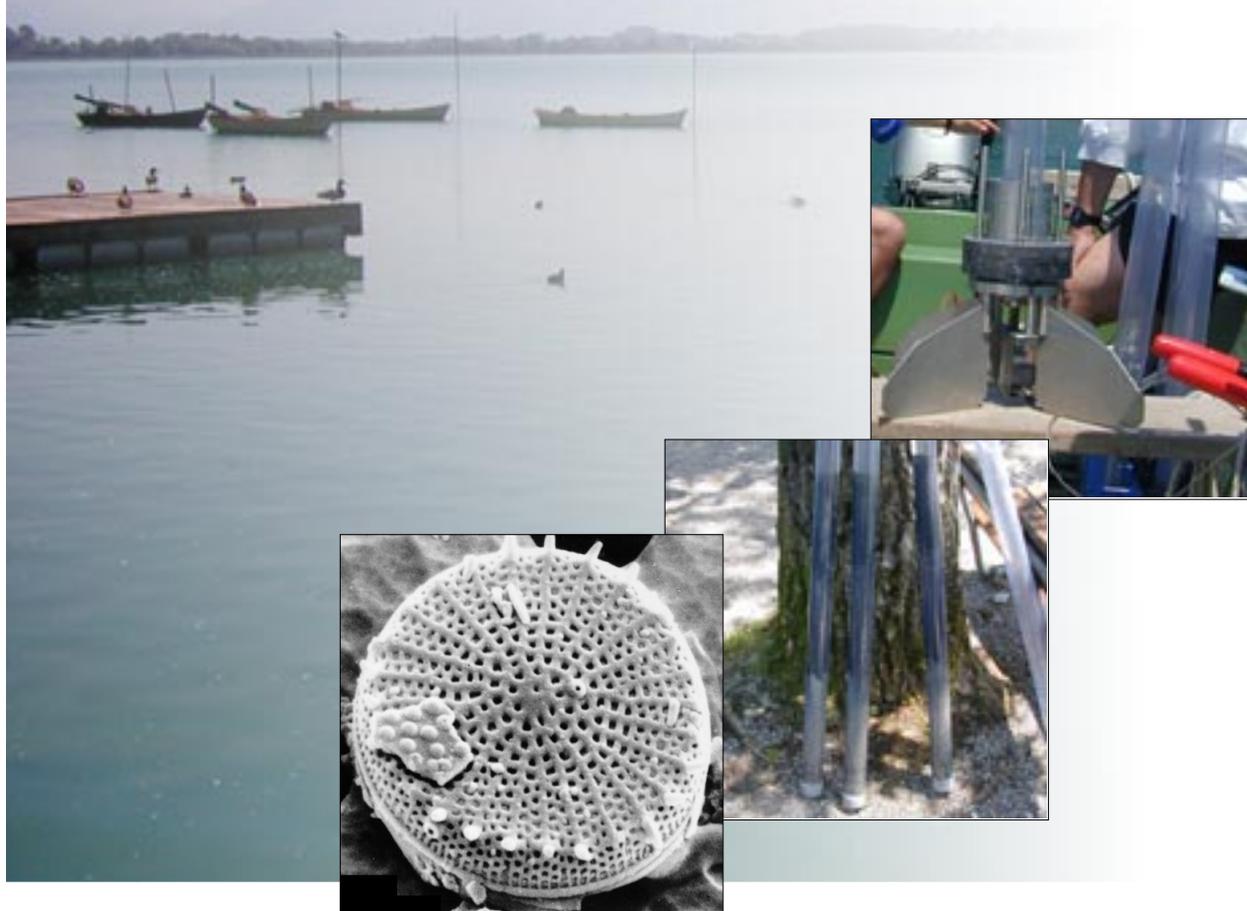


# ***Entwicklung des Gesamtphosphors im Pfäffikersee anhand der im Sediment eingelagerten Kieselalgen***

***Rekonstruktion***

***seit 1700***



**Unterägeri, Juni 2001**

**Titelbild**

Hintergrund: Pfäffikersee, aufgenommen am 21. Juni 2000

Unten rechts: Gerät zur Entnahme von Sedimentkernen

Unten Mitte: Entnommene Sedimentkerne

Unten links: Kieselalge *Stephanodiscus parvus* (REM-Aufnahme Herr W. Güttinger, Pura)

---

# INHALTSVERZEICHNIS

## BERICHT

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2.</b>	<b>Auftragserteilung</b>	<b>2</b>
<b>3.</b>	<b>Bisherige Erkenntnisse und Messdaten zur Nährstoffentwicklung im Pfäffikersee</b>	<b>3</b>
3.1	Kurze Literaturzusammenstellung	3
3.2	Limnologisch relevante Ereignisse und Beobachtungen im Pfäffikersee und seinem Einzugsgebiet	3
3.3	Entwicklung des Gesamtphosphors gemäss Messungen	5
<b>4.</b>	<b>Grundlagen und verwendete Methoden</b>	<b>7</b>
4.1	Sedimentkern PFÄ00-2 und Datierung	7
4.2	Kieselalgen	9
4.3	Trophiegradbestimmung aus chemischen Daten	11
<b>5.</b>	<b>Resultate</b>	<b>12</b>
5.1	Kieselalgen-Stratigraphie	12
5.2	Taxazahl und Diversität	16
5.3	Gesamtphosphor-Rekonstruktion	16
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</b>	<b>22</b>
<b>7.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>25</b>

## ANHANG **28**

A	Resultate der Schnellzählung und Auflistung der ausgezählten Proben	29
	Relative Kieselalgenschalendichte pro 1-cm-Sedimentschicht	30
	Kieselalgen-Zählresultate	31
	Eichdatensatz: TP Training Set 72 Seen von Prof. Lotter	37
B	Unterlagen zur Datierung des Sedimentkernes PFÄ00-2	42
	Isotopenmessungen	45

## 1. Einleitung

Der Pfäffikersee wird seit dem Winterhalbjahr 1992/93 mittels einer Zirkulationsunterstützungsanlage saniert. Neben dieser internen Sanierungsmassnahme tragen seit den 1970er Jahren externe Sanierungsmassnahmen (Kläranlagenbau und -ausbau, Siedlungsentwässerung, Schutzverordnungen, Extensivierungen in der Landwirtschaft, etc.) zur deutlichen Senkung des in den 1950er Jahren schon sehr hohen Nährstoffgehaltes bei. Die Zielsetzung für die Sanierung eines Sees wird in der neuen Gewässerschutzverordnung grundsätzlich und sehr allgemein geregelt (GSchV Anhang II Art 13 Absatz 2). So gilt für Schweizer Seen, dass der *Nährstoffgehalt höchstens eine mittlere Produktion von Biomasse zulassen darf*. Ausgenommen von dieser Verpflichtung sind Seen, welche eine hohe biologische Produktion auf Grund besonderer natürlicher Verhältnisse aufweisen. Weitergehende spezifische Angaben zur Präzisierung der Sanierungsziele sind aber in der GSchV nicht enthalten.

Mit der vorliegenden Rekonstruktion der Entwicklung des Gesamtphosphors im Pfäffikersee soll die Nährstoffgeschichte über mehrere Jahrhunderte zurück aufgezeigt werden. Damit sollen Erkenntnisse gewonnen werden, die weit über die heute verfügbaren chemischen Messungen des Gesamtphosphors hinausgehen. Es soll aufgezeigt werden wie die Nährstoffverhältnisse im 18., 19. und 20. Jahrhundert waren und wann und unter welchen Umständen menschbedingte Veränderungen eintraten. Mittels dieser Nährstoffentwicklung soll dann für den Pfäffikersee geprüft werden, ob das zur Zeit gültige Sanierungsziel von 25 µg P/l (Baudirektion Kanton Zürich 1998) den natürlichen Verhältnissen entspricht oder angepasst werden muss. Zudem sollen weitere, allenfalls auch auf biologischen Kriterien basierte Sanierungsziele vorgeschlagen werden.

Für die Rekonstruktion früherer Nährstoffverhältnisse in Seen eignet sich die Untersuchung von im Sediment abgelagerten Schalen toter Kieselalgen besonders gut. Die Schalen enthalten Silikate, welche in den Seesedimenten über Jahrhunderte erhalten bleiben. Aus der Form der Schalen kann auf die entsprechenden Kieselalgenarten und auf die zur Lebenszeit dieser Algen herrschenden Nährstoffverhältnisse (Gesamtphosphor) geschlossen werden. Für die zeitliche Zuordnung ist die Datierung der Sedimentablagerung Voraussetzung.

## 2. Auftragserteilung

Der Auftrag 'Rekonstruktion der Trophiegeschichte des Pfäffikersees mittels Kieselalgen' wurde am 12. Mai 2000 an die Firma AquaPlus in Unterägeri erteilt. Als Auftraggeber zeichnet das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL, Abteilung Gewässerschutz, Oberflächengewässerschutz) der Baudirektion des Kantons Zürich. Die Arbeiten erfolgten in Zusammenarbeit mit Dr. Pius Niederhauser (Auftraggeber, Kernentnahme, Lieferung der Gesamtphosphormesswerte), Herr Alois Zwysig, EAWAG (Kernentnahme), Dr. Mike Sturm, EAWAG (Datierung des Sedimentkernes) und Prof. André Lotter, University of Utrecht, Niederland (Berechnung der Gesamtphosphor-Rekonstruktion). Die Präparation der Proben, die Bestimmung und Zählung der Kieselalgen, die Rekonstruktion der trophischen Verhältnisse sowie die Berichterstattung erfolgte durch AquaPlus.

### 3. Bisherige Erkenntnisse und Messdaten zur Nährstoffentwicklung im Pfäffikersee

#### 3.1 Kurze Literaturzusammenstellung

Der Pfäffikersee wird seit rund 80 Jahren limnologisch untersucht. Aufgrund der limnologischen Literaturzusammenstellung von Märki (1949) und der Literatursammlung von AquaPlus können die Arbeiten von Messikommer (1927, 1928, 1942, 1943, 1947, 1954, 1961), Lieber (1935), Waser et al. (1935), Schweizer (1937), Baudirektion Zürich (1938), Thomas (1941, 1942, 1951, 1955, 1966, 1967, 1969) und Pavoni (1963) als älteste limnologische Werke bezeichnet werden. In diesen Arbeiten werden neben planktologischen Untersuchungen auch chemische Analysen aufgeführt, die auf einen belasteten Seezustand schliessen lassen. Weitere limnologische und gewässerökologische Arbeiten erschienen anschliessend von Pleisch (1970), Ambühl (1962, 1977, 1995), Direktion der öffentlichen Bauten des Kantons Zürich (1978, 1992, 1994, 1996), Wildermuth (1977), Maag (1978), Soracreppa (1978), Wydler (1979), Burgermeister & Lachavanne (1980), Züllig (1982, 1988), Girschweiler (1989), Keller (1989), Lachavanne et al (1991), Kaspar & Vetterli (1992), BUWAL (1994), Keller (1994), Studer (1995), Baudirektion Kanton Zürich (1998), Hirt & Winter (2000) und Steiger et al. (2000). Mit diesen neueren Arbeiten wurden neben chemischen und sedimentologischen Aspekten auch die Gewässersanierung und die Gewässerschutzmassnahmen sowie naturschützerische Themen behandelt. In den Werken von BUWAL (1994), Direktion der öffentlichen Bauten des Kantons Zürich (1992, 1994, 1996) sowie Baudirektion Kanton Zürich (1998) wird der aktuelle Zustand des Pfäffikersees ausführlich und illustrativ beschrieben.

#### 3.2 Limnologisch relevante Ereignisse und Beobachtungen im Pfäffikersee und seinem Einzugsgebiet

In der oben zitierten Literatur sind schon vor dem 2. Weltkrieg limnologische Beobachtungen von gewässerökologischen Veränderungen aufgeführt, die auf eine Verschlechterung des Nährstoffzustandes im Pfäffikersee schliessen lassen. So machte Lieber (1935) schon auf die Belastung des Pfäffikersees aufmerksam, welche offensichtlich durch die Einleitung von Abwasser der Gemeinde Pfäffikon ZH zustandekam. Etwas später erfolgte dann die folgende Wehklage von Thomas (1942): *"Ständig und unaufhörlich fliesst diese eklige Brühe in den See, Tag für Tag. Was wird der See zu diesem Schmutzwasser sagen, das er schlucken muss?"*.

Im folgenden sind basierend auf oben zitierter Literatur in chronologischer Reihenfolge Ereignisse und Beobachtungen aufgeführt, die für den Pfäffikersee von Bedeutung waren. Ob und in welcher Ausprägtheit sich diese Vorkommnisse auf den tophischen Zustand auswirkten oder Auswirkungen einer Trophieveränderung waren wird, sofern möglich, in den Kapitel 5.2 und 5.3 näher eingegangen.

1715: Beginn Torfabbau in Pfäffikon, Wildermuth (1977)

1740: Beginn Torfabbau in Seegräben und Robenhauser Riet, Wildermuth (1977).

Da der Ausbeutung anfänglich keine Schranken gesetzt waren, führte das Torfgraben zu einem planlosen Raubbau, wodurch sich eine strenge Regelung der Allmendnutzung aufdrängte. Über die Einhaltung der scharfen Bestimmungen hinsichtlich Abbau (Menge, Tiefe, Zeitpunkt) und Wiederherstellung des Landes wachte ein 'Turpevogt' (aus Wildermuth 1977).

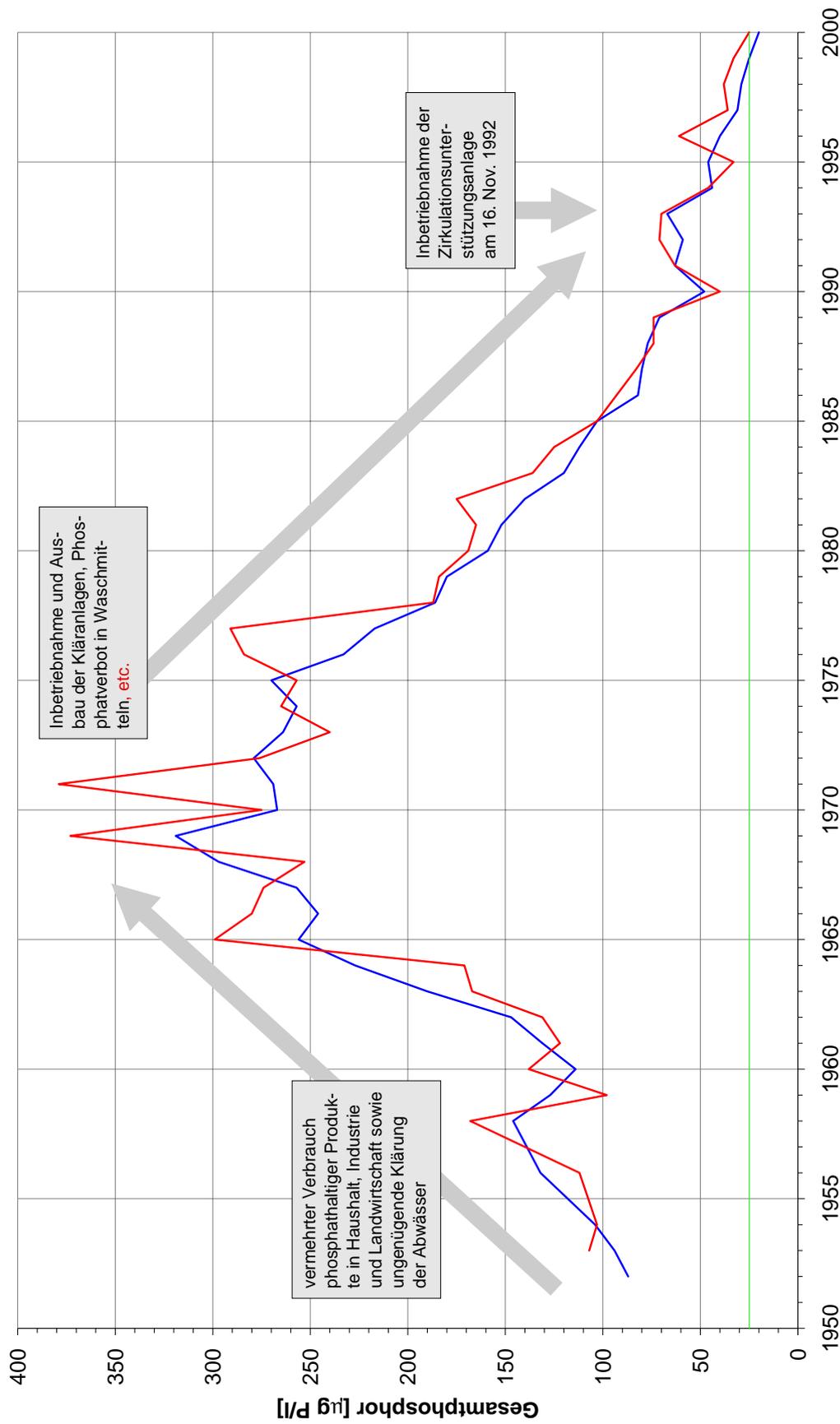
- 19. Jhd.: Intensives Torfstechen, Wildermuth (1977), Beginn Industrialisierung
- 1860: Künstliche Absenkung des Sees und Regulierung des Seeausflusses (Wehr bei der Mühle Stegen in Wetzikon), Wildermuth (1977), Kaspar & Vetterli (1992)
- 1896: Kanalisation Pfäffikon, Einleitung in den See
- 1. Weltkrieg: Intensives Torfstechen, Wildermuth (1977)
- 1935: Grosses Fischsterben, Lieber (1935)
- 1936-1942: Gehäuftes Auftreten von *Tabellaria fenestrata* (heute *T. flocculosa*), Züllig (1982)
- 2. Weltkrieg: Intensives Torfstechen, Wildermuth (1977)
- 1947: Invasion des Plankters *Anabaena affinis* Lemm var. *intermedia* Griff. (Blualge), Messikommer (1947)
- 2.12.1948: Erlass der Schutzverordnung durch den Regierungsrat des Kantons Zürich, Wildermuth (1977)
- 1950: ARA Pfäffikon Inbetriebnahme (1. vollbiologische ARA von Europa)
- 1950-1960: Die letzten Torfgräber stellten ihre Arbeit ein, Wildermuth (1977)
- 1961: Invasion des Plankters *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs. var. *klebahnii* Elenk. (Blualge), Messikommer (1961)
- 1968: ARA Pfäffikon, Erweiterung (Volumenvergrösserung)
- 1951-1968: Deutliche Steigerung der Phosphorzufuhr (3.5-fache Menge), Züllig (1982)
- 1958-1962: Versuche mit künstlicher Belüftung während des Sommerhalbjahres (interne Sanierungs-massnahme), Ambühl (1962), Thomas (1966), Züllig (1982)
- 1973: ARA Bäretswil, Inbetriebnahme
- 1980: Kleinkläranlage Ghöch, Inbetriebnahme
- 1981: ARA Pfäffikon, 4. Stufe
- 1982: ARA Bäretswil, Erweiterung (Filtration)
- 16.11.1992: Inbetriebnahme der Zirkulationsunterstützungsanlage
- 1994: ARA Pfäffikon, Erweiterung und Sanierung.

Lieber (1935) beschreibt, dass der See zum grössten Teil von Torfmooren umgeben ist und, dass die Entwässerungsgräben dieser Torfmoore in den See münden. Damit gelangen nach Lieber 'Humus-säuren' in das Seewasser, welche eine Belastung des Sees durch natürliche Verunreinigungen be-dingen sollen.

Nach Züllig (1988), welcher am 30. Oktober 1984 ein 2.6 m langer Kern entnahm und Pigmentanaly-sen durchführte, neigte der Pfäffikersee bereits vor der derzeitigen zivilisatorischen Einflussnahme zur Eutrophierung (gemessen an den Rohcarotinoiden). Der See erholte sich aber offenbar immer wieder bis zu einem Zustand der Oligotrophie oder Mesotrophie.

### 3.3 Entwicklung des Gesamtposphors gemäss Messungen

Die Entwicklung des Gesamtposphors illustriert basierend auf Messdaten die jüngste Entwicklung der Nährstoffbelastung (Trophiegrad) des Pfäffikersees. Diese Messdaten sind seit 1952 mehr oder weniger lückenlos vorhanden, so dass ein Jahresmittel und die Verhältnisse zum Zeitpunkt der Frühjahreszirkulation (Messwerte der Monate März und April) vorliegen. Die in Abbildung 1 dargestellte Entwicklung des Gesamtposphors zeigt, dass um 1950 der See bereits um  $100 \mu\text{g P/l}$  aufwies. Zu diesem Zeitpunkt war der Pfäffikersee somit bereits eutroph bis hypereutroph. Anschliessend verschlechterte sich der Trophiegrad deutlich, indem die Gesamtposphorwerte auf über  $300 \mu\text{g P/l}$  stiegen (1969 maximaler Jahresmittelwert:  $319 \mu\text{g P/l}$ ; 1971 maximaler Frühjahreszirkulationswert:  $379 \mu\text{g P/l}$ ). Diese deutliche Verschlechterung der Wasserqualität ist auf den zunehmenden Verbrauch phosphorhaltiger Produkte in Haushalt, Industrie und Landwirtschaft sowie auf die noch ungenügende Klärung der Abwässer zurückzuführen. Mit der Inbetriebnahme und dem Ausbau der Kläranlagen (siehe Kapitel 3.2) konnte die Gesamtposphorkonzentration anfänglich leicht und ab ca. 1975 deutlich gesenkt werden. Weitere Bemühungen wie das Phosphatverbot in den Waschmitteln (1. Juli 1986), der erneute Ausbau der Kläranlagen, die Inbetriebnahme der Zirkulationsunterstützungsanlage (16. November 1992) und führten schliesslich zu einer eindrücklichen Senkung der Gesamtposphorkonzentration. So lagen im Jahr 2000 der Jahresmittelwert bei  $20 \mu\text{g P/l}$  und der Frühjahreszirkulationswert bei  $25 \mu\text{g P/l}$ , was genau dem Sanierungsziel von  $25 \mu\text{g P/l}$  entspricht..



**Abb. 1. Entwicklung des Gesamtposphors im Pfäferssee von 1952 bis 2000 gemäss AWEL Zürich.**

Blaue Kurve: Jahresmittelwerte  
 Rote Kurve: Frühjahreszirkulationswerte (März oder April).  
 Grüne Linie: Sanierungsziel 25 µg P/l.

## 4. Grundlagen und verwendete Methoden

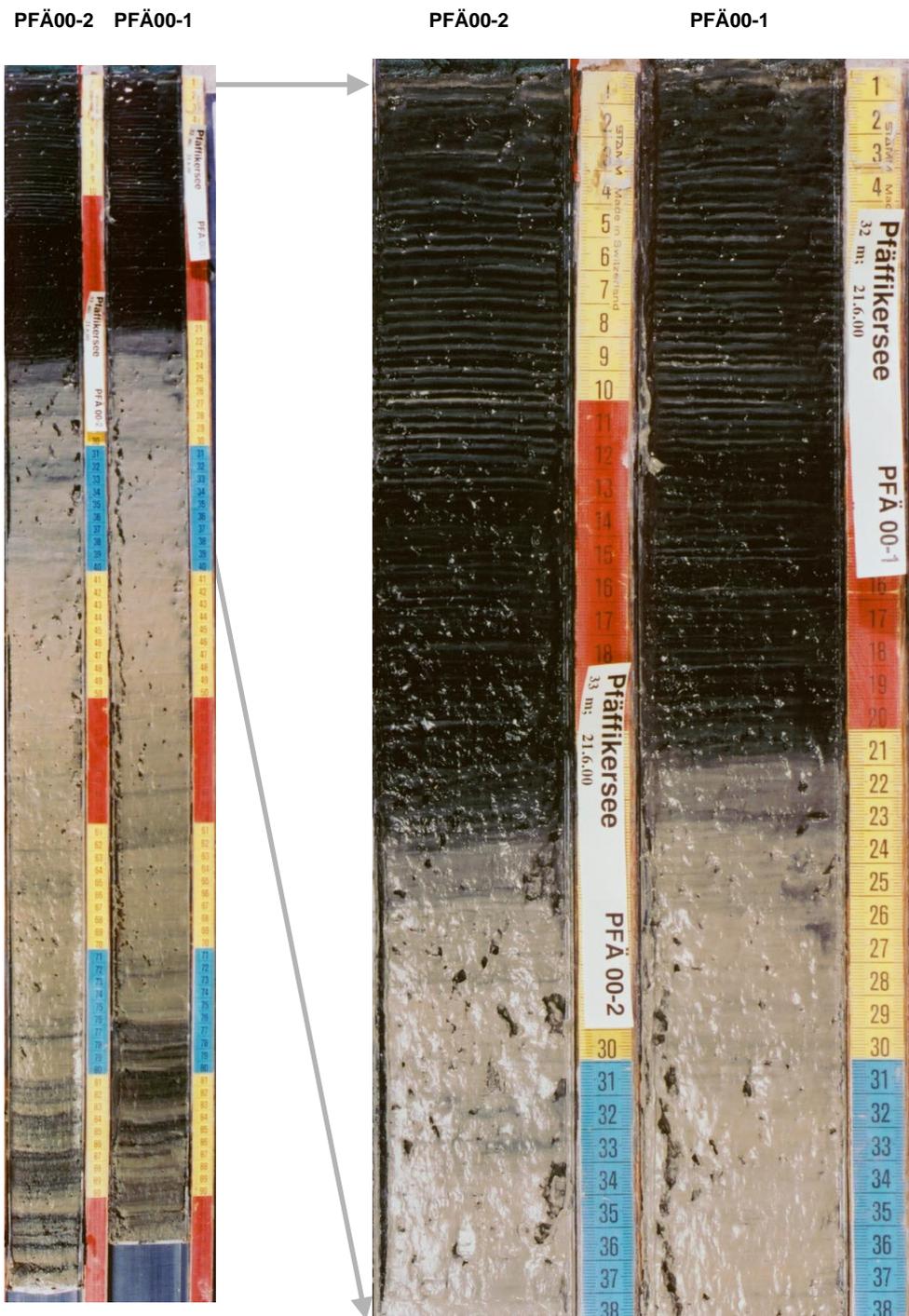
### 4.1 Sedimentkern PFÄ00-2 und Datierung

Am 21. Juni 2000 entnahm Alois Zwyszig, Mitarbeiter der EAWAG unter Mithilfe von Pius Niederhauser (AWEL, Auftraggeber) und Joachim Hürlimann (AquaPlus, Auftragnehmer) dem Pfäffikersee aus einer Tiefe von 32 Metern (ca. Koordinaten: 701 500 / 245 250) mit dem Kurzkerngerät ("gravity corer") der EAWAG drei Sedimentkerne mit einem Durchmesser von 6.3 cm.

Die Kerne wiesen Längen von nicht ganz einem Meter auf, die Länge des für die Rekonstruktion verwendeten Kernes PFÄ00-2 betrug 97 cm. Die Kerne wurden im Sedimentlabor der EAWAG in Kastanienbaum der Länge nach aufgeschnitten und fotografiert (Abb. 2). Der Kern PFÄ00-2 wurde anschliessend von A. Zwyszig in Intervallen von 1 cm Mächtigkeit (Probe 1: 0-1 cm, Probe 2: 1-2cm, etc.) beprobt.

Die Datierung des Kernes PFÄ00-2 erfolgte durch Dr. Michael Sturm an der EAWAG einerseits über die Messung der im Sediment vorhandenen radioaktiven Isotope  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{210}\text{Pb}$ , andererseits optisch über das Abzählen der im oberen Teil der Sedimente vorhandenen Jahreslagen (Varven). Für die Datierung mit radioaktiven Markern wurden 20 Proben mit einem GeLi Bohrloch-Detektor gemessen. Die Messzeit pro Probe betrug mindestens 24 Stunden. Das Vorhandensein von Be-7 in der Probe 1 (0-1 cm) zeigt, dass bei der Kernentnahme kein Material an der Wasser/Sedimentgrenzschicht verloren ging. Die  $^{137}\text{Cs}$ -Messungen zeigten ein erstes  $^{137}\text{Cs}$ -Maximum in 4-5 cm Tiefe (Probe 5), welches dem Tschernobyl-Fallout von 1986 zugeordnet wurde. Ein weiteres  $^{137}\text{Cs}$ -Maximum, welches auf  $^{137}\text{Cs}$ -Fallout der Atombombenversuche von 1963 zurückzuführen ist, tritt in 12-13 cm Tiefe (Probe 13) auf. Die noch messbare Aktivität des natürlicherweise in der Erdatmosphäre gebildeten radioaktiven Isotops  $^{210}\text{Pb}$  (Halbwertszeit 27 Jahre) ist nach etwa 100 Jahren erreicht. Im untersuchten Sedimentkern können aber die Resultate der  $^{210}\text{Pb}$ -Messungen nicht verwendet werden, da wie in anderen eutrophierten Hartwasserseen (Baldegger-, Sempacher- Greifensee etc.) auch, ein Teil des  $^{210}\text{Pb}$  im Porenwasser mobil ist.

Der oberste Teil des Sedimentkernes PFÄ00-2 war schwarz gefärbt, aber geschichtet mit hell-dunklen Jahreslagen (Varven), so dass die Jahre bis in eine Tiefe von 13 cm (1967-1964) mit hoher Genauigkeit und ab 13 cm bis in eine Tiefe von 23 cm (1931) mit geringerer Genauigkeit abgezählt werden konnten. Unterhalb 23 cm Sedimenttiefe war das Sediment ungeschichtet und hellgrau in der Farbe. Turbidite, also Störungen infolge Hochwasser oder anderen Ereignissen traten im betrachteten Kern nicht auf. Unterhalb 23 cm Sedimenttiefe wurde dann unter Annahme einer konstanten Sedimentationsrate von 3.3 mm pro Jahr das Alter extrapoliert. **Somit ist die Datierung vor 1900 sehr unsicher und alle Altersangaben sind daher mit Vorsicht zu benutzen.** Detailangaben zur Datierung des Kernes PFÄ00-2 sind im Anhang B aufgeführt.



**Abb. 2. Fotografische Darstellung von zwei aufgeschnittenen Pfäffikersee-Sedimentkerne. Links: Ganze Kernlänge, rechts: Jahresschichtung der obersten 38 cm. Für die Untersuchungen wurde der Kern PFÄ00-2 verwendet, Kernentnahme am 21. Juni 2000.**

Fotos und Kernaufbereitung: Dr. Mike Sturm, EAWAG Dübendorf.

## 4.2 Kieselalgen

Die **Präparation** der Kieselalgen in den 97 Sedimentproben wurde durch AquaPlus durchgeführt. Sie erfolgte mittels Salzsäure (Entkalkung) und Schwefelsäure sowie Kaliumnitrat (Heissoxidation). Nach der Oxidation wurde das Material mit destilliertem Wasser gewaschen. Die präparierten Kieselalgen wurden dann in das Kunstharz Naphrax eingebettet. Alle für die Kieselalgen aufbereiteten Sedimentproben, Präparate sowie allenfalls noch vorhandenes Rohmaterial werden bei AquaPlus archiviert. Dem Auftraggeber wurde eine vollständige Präparateserie übergeben.

Die **Bestimmung** der Arten erfolgte für die centrischen Taxa im Rasterelektronenmikroskop (Aufnahmen durch Herrn dipl. Ing. Rolf Klee, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, D-82407 Wielenbach). Alle anderen Taxa wurden im Lichtmikroskop bestimmt. Die Nomenklatur orientiert sich weitgehend an Krammer & Lange-Bertalot (1986-1991) sowie einigen wenigen taxaspezifischen Bestimmungswerken. Die Auszählung der Kieselalgenschalen (jede Kieselalgenart besteht aus zwei Schalenhälften, Summe der gezählten Schalen = 100%) erfolgte im Lichtmikroskop bei 1'000-facher Vergrößerung (Ölimmersion, Interferenz).

Basierend auf einer **Schnellzählung** (= Anzahl Schalen pro Gesichtsfeld), mit welcher alle vorhandenen 97 Sedimentproben betrachtet wurden, wurde festgestellt, dass die obersten 29 cm Sediment mit einer Ausnahme (Probe 25) viele Kieselalgen enthielten. Die tieferen Sedimentschichten bis zur Probe 79 wiesen demgegenüber deutlich weniger Kieselalgenschalen auf. Ab Probe 80 bis zum unteren Kernende war dann die Kieselalgendichte wieder höher (siehe Anhang A, relative Dichte der Kieselalgenschalen pro mikroskopisches Gesichtsfeld und 1-cm-Probe). Basierend auf dieser Kieselalgendichteverteilung, der ebenfalls aufgrund der Schnellzählung festgestellten groben Kieselalgentiefenverteilung sowie der damals erst provisorisch vorliegenden Resultate der Sedimentdatierung wurden 55 der insgesamt 97 Sedimentproben für die Auszählung der Kieselalgen ausgewählt. Die Liste der ausgewählten Sedimentproben kann der Zählliste wie auch der Schnellzählung (beides Anhang A) entnommen werden. Die 55 Proben verteilen sich auf den 97 cm langen Sedimentkern, wobei in der oberen Hälfte (0-50 cm) 34 Proben und in der unteren Sedimenthälfte (51-97 cm) 21 Proben ausgezählt wurden, wobei von 0 bis 40 cm Tiefe mindestens jede zweite und von 40 bis 97 cm Tiefe mindestens jede dritte 1-cm Sedimentprobe ausgezählt und für die Rekonstruktion ausgewertet wurde. Damit stützt sich die Rekonstruktion des Gesamtphosphorwertes und des Trophiegrades auf die ganze Länge des Sedimentkernes ab. Mit den **55 Zählungen** wurden pro Zählung (Probe) mindestens 358 und maximal 585 Kieselalgenschalen bestimmt und gezählt, wobei nur bei 8 Zählungen mangels geringer Dichte weniger als 500 Schalen gezählt werden konnten. Die im tieferen Sedimentbereich festgestellte, teilweise geringe Kieselalgendichte dürfte neben der damals sowieso geringeren Primärproduktion auch durch die Auflösung der aus Silikat bestehenden Kieselalgenschalen liegen. Diese findet bei hohen pH-Werten statt, wie sie grundsätzlich in kalkreichen Sedimenten vorkommen können. Schwach verkieselte Kieselalgenschalen werden daher rascher aufgelöst als stark verkieselte. Bei diesem Auflösungsprozess ist zu erwarten, dass aufgrund der selektiven Auflösung nur diejenigen Taxa erhalten bleiben, die stark verkieselt sind. Dies sind in erster Linie Aufwuchsalgen. Da in tieferen Sedimentschichten etliche Schalen von *Cyclotella comensis/pseudocomensis*, *C. cyclopuncta* und *C. ocellata* erodiert waren, konnte die Bestimmung und Zuordnung nicht immer eindeutig gemacht werden. Ähnliches gilt für die Taxa *Cyclotella bodanica*, *C. praetermissa* und *C. radiosa*, wobei diese häufig auch nur in Bruchstücken auftraten und damit deren Zuordnung auch nicht immer eindeutig gemacht werden konnte.

Die Zählraten für die 55 Proben befinden sich in Anhang A. Aufgrund der Zählresultate wurden die relativen Häufigkeiten (rH) der einzelnen Arten berechnet und darauf beruhend die weiteren Auswertungen durchgeführt:

$$rH_{ij} (\%) = (N_{ij} / N_j) * 100\% \quad \text{Formel 1}$$

$rH_{ij}$  = Relative Häufigkeit der Art i in der Probe j  
 $N_{ij}$  = Anzahl gezählte Schalen der Art i in der Probe j  
 $N_j$  = Gesamtzahl der gezählten Schalen der Probe j.

Zur Charakterisierung der Kieselalgen sowie zur **Rekonstruktion des Trophiegrades und des Gesamtphosphors** wurden folgende Verfahren eingesetzt (Berechnungen durch Herrn Lotter):

- 1.) Ermitteln **der stratigraphischen Kieselalgenzonen** (Abbildung 3) sowie der **Taxazahl** und **Diversität** (Abbildung 4). Die Kieselalgenstratigraphie wurde mit der 'optimal sum of squares partitioning' Methode nach Birks & Gordon (1985) zoniert und die statistisch signifikante Anzahl Zonen wurde mit einem 'broken stick' Modell nach Bennett (1996) getestet. Dabei ergaben sich 4 signifikante Kieselalgenzonen, welche mit PFAEFF-1 bis und mit PFAEFF-4 benannt wurden.

Mit diesem Verfahren werden, basierend auf den relativen Häufigkeiten der einzelnen Arten, über Sedimenttiefenstufen hinweg, charakteristische Kieselalgengemeinschaften erkannt und als stratigraphische Kieselalgenzonen zusammengefasst.

- 2.) **Rekonstruktion des Gesamtphosphors** (TP, Abbildung 5 und 6) 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). Die zur Indikation benötigten Angaben sind in Anhang A aufgeführt. Von den 194 in den Zählungen vorhandenen Kieselalgentaxa sind 146 im Kalibrationsset vorhanden (= 75%). Von den fehlenden 48 Taxa (25%), welche für die Rekonstruktion nicht benutzt wurden, haben 2 Taxa relative Häufigkeiten, welche einen Einfluss auf die Rekonstruktion haben könnten. Es waren dies *Cyclotella bodanica* und *Mastogloia smithii* var. *lacustris*, beides Vertreter meso- bis oligotrophen Milieus. Sie erreichten mehr als 1% Anteil (relative Häufigkeit) in den Proben unterhalb 31 Zentimeter Sedimenttiefe (Probe 32). Ihre Maximalanteile betragen für *Cyclotella bodanica* 14.6% (Probe 40) und für *Mastogloia smithii* var. *lacustris* 12.3% (Probe 55). Bei ihrer Berücksichtigung würden wahrscheinlich die berechneten Gesamtphosphorkonzentrationen der tieferen Sedimentschichten eher tiefer ausfallen. Zudem wurde die Fehlerbreite der Rekonstruktion angegeben (TP Tief, TP Hoch). Da die Taxa *Amphora inariensis* ( $rH_{max} = 2.7\%$ ), *Cyclotella distinguenda* ( $rH_{max} = 6.4\%$ ), *Aulacoseira ambigua* ( $rH_{max} = 37.7\%$ ) und *Cyclotella cyclopuncta* ( $rH_{max} = 70.6\%$ ) in etlichen Sedimentproben gehäuft bis dominierend auftraten, im Kalibrationsmodell aber aufgrund geringer Abundanzen eher schwach definierte Optima und Toleranzen aufweisen, führt dies in den tieferen Sedimentschichten, wo die genannten Arten häufiger vorkamen, zu einer beachtlichen Fehlerbreite, die sonst im Bereich der Oligo- bis Mesotrophie nicht in diesem Ausmass auftritt.

Die Entwicklung und Eichung des Kalibrationsdatensets beruht auf einem schweizerischen Kleinseen-Datensatz, welcher von Lotter im Zusammenhang mit einer paläolimnologischen Studie erhoben wurde. Der Datensatz umfasste 68 Kleinseen der Schweiz. In jedem Kleinsee wurden die Kieselalgen des Oberflächensedimentes sowie der Wasserche-

mismus während der Frühjahrszirkulation analysiert. Die anschliessende statistische Analyse ergab für jede Kieselalgenart Gesamtphosphor-Optima und -Toleranzen. Mit der Anwendung der Transferfunktion kann dann basierend auf den gezählten Kieselalgen einer Sedimentprobe die Gesamtphosphorkonzentration berechnet werden.

- 3.) **Rekonstruktion des Gesamtphosphors (TP) unter Verwendung der Analogatechnik** mittels der MAT Methode (modern analogue technique) nach S. Juggins (unpubliziertes Programm) (Abbildung 5 und 6). Der dabei verwendete Dissimilaritätskoeffizient war die 'squared Chord distance' nach Overpeck et al. (1985). Das beste Modell war ein nach Ähnlichkeit gewichtetes MAT Modell mit den 6 ähnlichsten Analoga (Bestimmtheitsmass von  $r^2 = 0.847$ ). Die ähnlichen Proben erhielten somit mehr Gewicht als unähnliche Proben. Der Rekonstruktion des Gesamtphosphors basierend auf der Analogatechnik sollte aber wenig Bedeutung geschenkt werden, da kein nur annähernd gutes Analoga gefunden wurden.

Mit der Analogatechnik werden pro Sedimentstufe Paarvergleiche mit dem Kalibrations-Datensatz von Lotter durchgeführt. Aufgrund der besten Seen-Übereinstimmungen (Analoga) wurde dann pro Sedimentstufe die Phosphorkonzentration berechnet, indem die aktuelle Gesamtphosphorkonzentration (Frühjahrszirkulationswert) der besten Analoga gewichtet gemittelt wurden.

Für weitere Ausführungen bezüglich der verwendeten Methoden verweisen wir auf die zitierte Literatur.

#### 4.3 Trophiegradbestimmung aus chemischen Daten

Aufgrund der Gesamtphosphor-Konzentration (Frühjahrszirkulationswerte) kann der Trophiegrad abgeschätzt werden. Wir verwenden dazu die Unterteilungen gemäss der OECD-Studie (in Lampert & Sommer 1993, Seite 375). Die Unterteilung lautet wie folgt:

<b>Oligotroph:</b>	<b>P<sub>tot</sub></b>	<b>&lt;10 µg P/l</b>
<b>mesotroph:</b>	<b>P<sub>tot</sub></b>	<b>10 - 30 µg P/l</b>
<b>eutroph:</b>	<b>P<sub>tot</sub></b>	<b>30 - 100 µg P/l</b>
<b>hypereutroph:</b>	<b>P<sub>tot</sub></b>	<b>&gt;100 µg P/l</b>

## 5. Resultate

### 5.1 Kieselalgen-Stratigraphie

Im 97 cm langen Sedimentkern PFÄOO-2 wurden 55 Sedimentproben mit einer Schichtdicke von 1 cm Mächtigkeit untersucht. Die Häufigkeiten der wichtigsten Kieselalgenarten sind in Abbildung 3 im Sedimentprofil graphisch dargestellt. Die zeitliche Abfolge der vorgefundenen Kieselalgen illustriert als Ganzes die zivilisationsbedingte Eutrophierung des Pfäffikersees, welche im 18. und 19. Jahrhundert noch abgeschwächt und im 20. Jahrhundert dann deutlich auftrat.

Im Sedimentkern können vier deutlich unterscheidbare Kieselalgenzonen charakterisiert werden. Die unterste, d. h. älteste **Zone PFAEFF-1 (ca. 1710 - ca. 1790)** umfasst die Sedimentschichten unterhalb rund 70 cm Sedimenttiefe bis zum Kernende in 97 cm Sedimenttiefe.

Die Kieselalgenzone PFAEFF-1 wird im wesentlichen durch mehrere *Cyclotella*-Arten sowie durch *Tabellaria flocculosa*, *Fragilaria crotonensis* und *Asterionella formosa* dominiert. Das Vorkommen der drei letztgenannten Arten erstaunt und ist im Vergleich zu anderen Seen zu dieser Zeit atypisch. Es handelt sich dabei um unter stärker mesotrophen bis eutrophen Verhältnissen häufig vorkommende planktische Kieselalgen, die bei hohen Silizium zu Phosphor-Verhältnissen (Si:P) konkurrenzfähig sind. Sie kommen somit bei tiefen Phosphorkonzentrationen noch vor, falls zugleich hohe Siliziumkonzentrationen vorherrschen. Bei den *Cyclotella*-Arten handelt es sich um meso- bis oligotrophe Vertreter (*C. comensis/pseudocomensis*, *Cyclotella cyclopuncta*, *C. radiosa/compta*, *C. bodanica*) aber auch um die unter eutrophen Verhältnissen vorkommende *Cyclotella ocellata*. Bei der in der ganzen Zone PFAEFF-1 sehr häufig vorkommenden *Cyclotella comensis* dürfte es sich nach den Bestimmungsmerkmalen von Scheffler (1994) zu einem sehr grossen Teil um *Cyclotella pseudocomensis* handeln. Dieses Taxon tritt vom Frühjahr bis im Sommer im Plankton von Seen auf. Ebenso enthält *Cyclotella cyclopuncta* wahrscheinlich zu einem eher kleinen Teil das Taxon *Cyclotella wuethrichiana*, wobei versucht wurde, die beiden soweit möglich abzugrenzen. Ähnlich lag die Situation bei Schalen um die Gruppe von *Cyclotella bodanica*, *C. praetermissa* und *C. radiosa/compta*. Bei all den erwähnten *Cyclotella*-Formen war die Abgrenzung immer dann schwierig bis unmöglich, wenn infolge chemischer oder mechanischer Erosion oder infolge Überdeckung durch Störpartikel nicht die ganze Schalen vorhanden oder einsehbar war.

In Zusammenhang mit der Zone PFAEFF-1 speziell erwähnenswert ist das Fehlen der für oligotrophe Verhältnisse typischen Arten der Gattungen *Brachysira* und *Mastogloia*. Aufgrund dieser Artenzusammensetzung kann geschlossen werden, dass sich der Pfäffikersee **im 18. Jahrhundert in einer starken Mesotrophie bis deutlichen Eutrophie** befand.

Die **Zone PFAEFF-2 (ca. 1790 - ca. 1930)** umfasst die Sedimenttiefen 70-24cm. In dieser Zone gab es im Vergleich zur vorher besprochenen Zone PFAEFF-1 einen charakteristischen Wechsel, indem der relative Anteil der Taxa *Cyclotella comensis/pseudocomensis* und *Tabellaria flocculosa* sehr stark zurück ging. Von dieser Abnahme profitierte insbesondere *Cyclotella cyclopuncta*, welche während der ganzen Zone PFAEFF-2 die Kieselalgen-Lebensgemeinschaft dominierte oder zumindest wesentlich prägte. Die immer noch sehr häufig vorkommenden *Cyclotella*-Arten, das Aufkommen von *Mastogloia smithii* var. *lacustris*, eine für oligotrophe Verhältnisse typische Aufwuchsart sowie das weitgehende Fehlen von *Tabellaria flocculosa* in der Zone PFAEFF-2 lassen vermuten, dass in

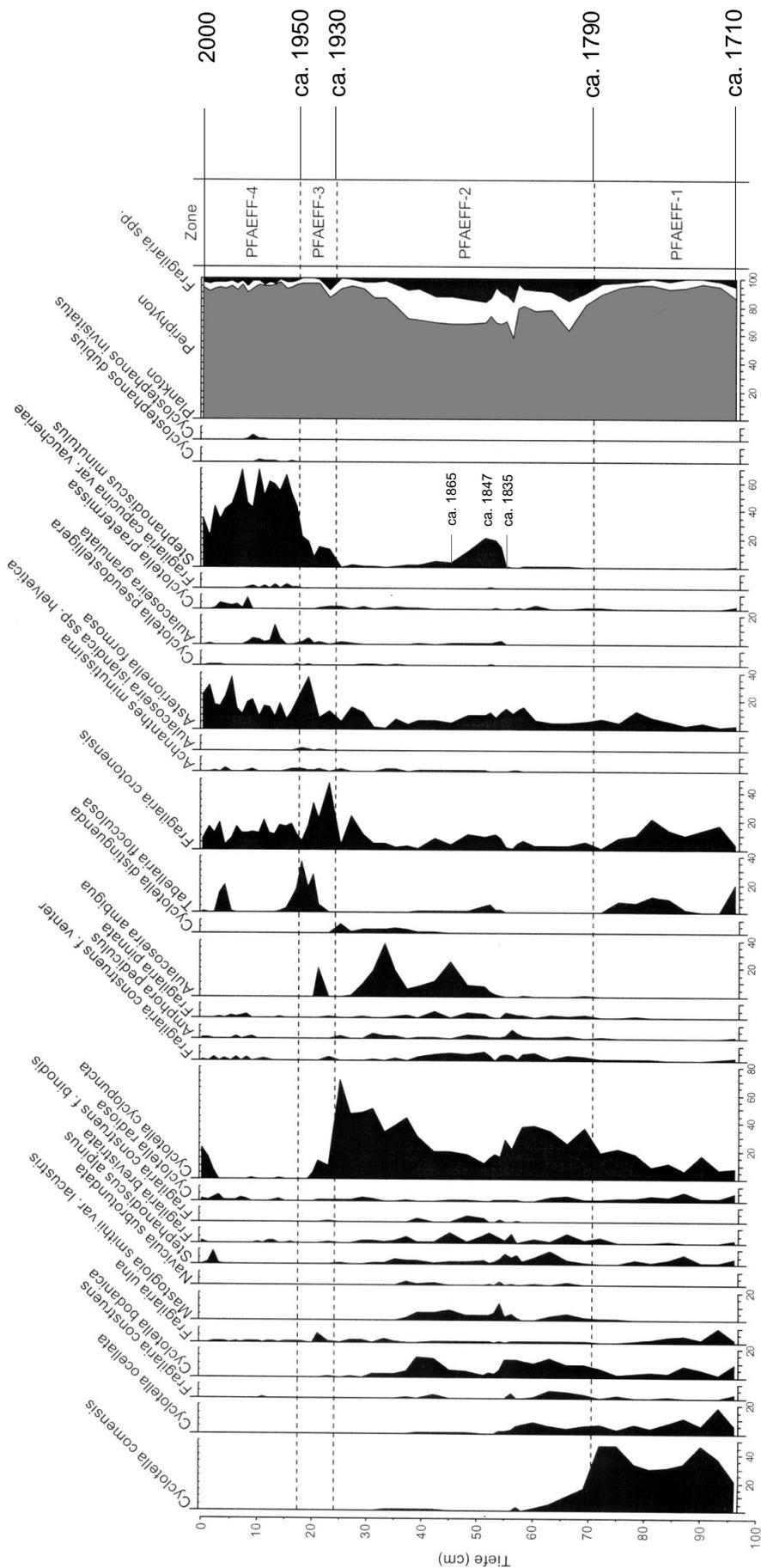
diesem Zeitraum die trophischen Verhältnisse insgesamt etwas besser waren als während der Vorperiode (Zone PFAEFF-1).

Interessant, sehr auffällig und wiederum atypisch ist dann das sehr schnelle Aufkommen von *Stephanodiscus minutulus/parvus* um ca. 1835 (Probe 56, 55-56 cm Tiefe). Die maximale relative Häufigkeit dieses Taxons wurde um ca. 1847 (Probe 52, 51-52 cm) erreicht und nach ca. 1865 (Probe 46, 45-46 cm) war das Taxon wohl noch vorhanden, aber nur mit sehr geringem Anteil. Das Vorhandensein dieser euträphenten Art *Stephanodiscus minutulus*, welche vermischt mit der ebenfalls euträphenten Art *S. parvus* sein dürfte, zeigt eindeutig, dass der Pfäffikersee in dieser Zeitperiode wiederum ein (schwach bis eher deutlich?) eutrophes Milieu aufgewiesen hat. Wenn auch zum Teil in eher geringem Ausmass, aber dennoch klar erkennbar, nahm erwartungsgemäss der Anteil von *Asterionella formosa* schon vor dem Aufkommen von *Stephanodiscus minutulus/parvus* zu. Dasselbe gilt für die Anteile von *Tabellaria flocculosa*, *Fragilaria crotonensis* und *Aulacoseira granulata*, welche aber erst mit dem Auftreten von *Stephanodiscus minutulus/parvus* sich erhöhten. Gleichzeitig verminderte sich der Anteil der *Cyclotella*-Arten. Diese Artabfolge und das Ablösen der *Cyclotella*-Dominanz durch Arten der Gattungen *Tabellaria* und *Fragilaria* wurde auch in anderen Schweizer Seen (z.B. Rotsee: Lotter (1988), Baldeggersee: Lotter (1998)) festgestellt und als Zeichen der Eutrophierung interpretiert. Fast zeitgleich trat mit *Stephanodiscus minutulus/parvus* auch *Aulacoseira ambigua* auf. Das Vorhandensein von *Aulacoseira ambigua* konnte im Rasterelektronenmikroskop bestätigt werden. Da gleichzeitig aber auch *Aulacoseira granulata* auftritt und im Lichtmikroskop die Unterscheidung der beiden Taxa nicht immer eindeutig ist, wurde möglicherweise die relative Häufigkeit des einen Taxons über- und des anderen unterschätzt. Beide Taxa kommen aber im eutrophen Milieu vor, wobei *Aulacoseira granulata* gegenüber dem Trophiegrad tolerant ist und *A. granulata* als euträphent bezeichnet wird (Voigt 1996).

Nach ca. 1885, also nachdem die *Stephanodiscus minutulus/parvus*-Blüte abgeklungen war, kam bis ca. 1930 (Ende der Zone PFAEFF-2) *Cyclotella distinguenda* auf. Dieses Taxon ist typisch für schwach mesotrophe Verhältnisse.

Für die Zone PFAEFF-2 charakteristisch ist der insgesamt hohe Anteil der Aufwuchsarten (Periphyton) sowie zusätzlich der Arten der Gattung *Fragilaria*. Das Vorhandensein dieser Arten verdeutlicht, dass in dieser Zeitperiode (ca. 19. Jhd.) den planktischen Arten eine geringere Bedeutung bezüglich Artenvielfalt zukam. Eine Erklärung hierfür ist aber schwierig und im folgenden sind bloss mögliche Interpretationen aufgeführt, wobei wahrscheinlich mehrere dieser Interpretationen zugleich für die Zunahme der Bedeutung der Uferarten verantwortlich sind:

- 1.) Die Zunahme der Uferarten ist ein Effekt des Torfabbaus (Einschwemmung von Arten aus den Riedgräben). Der Anteil von für diesen Lebensraum typischen Arten ist aber gering.
- 2.) Der Torfabbau erhöhte die Trübung im See. Damit trat für die pflanzlichen Organismen eine deutliche Verschlechterung des Lebensraumes ein und die Dichte insbesondere der Plankter ging zurück. Eine Dichteabnahme wurde in den Sedimenttiefen 30 bis 79 cm Tiefe auch festgestellt (siehe Anhang A). Die Dichteangaben sind aber relativ und nicht mit Einwaage von Sedimentmaterial quantifiziert worden.
- 3.) Die Artenvielfalt und der höhere Anteil der Uferalgen ist ein Effekt von geringerer Produktivität im Pfäffikersee, hervorgerufen durch tiefe Nährstoffkonzentrationen. Damit nahm die Dichte der Plankter ab und infolge besserem Lichtklima im Uferbereich die Uferarten zu. Da aber um 1850 eine Blüte von *Stephanodiscus minutulus/parvus* den Pfäffikersee prägte, muss angenommen werden, dass die Nährstoffkonzentrationen zumindest nicht während des ganzen 19. Jhd tief waren.



Relative Häufigkeit der Kieselalgen [%]

Abb. 3. Kieselalgen im Sedimentkern PFÄ00-2 des Pfäffikersees. Darstellung des gesamten Sedimentkernes. Aufgeführt sind nur die prozentual wichtigsten Taxa. Rechts sind die prozentualen Anteile der planktischen (grau), periphytischen (schwarz) im Tiefenprofil aufgeführt sowie die aufgrund der Kieselalgenegenschaften erhaltene Einteilung (stratigraphische Kieselalgenzonen PFAEFF-1 bis PFAEFF-4). Kernentnahme am 21. Juni 2000.

Grafik: Prof. Dr. André F. Lotter, University of Utrecht, Niederland.

Die Zone PFAEFF-2 wird somit von einigen Artverschiebungen und Ereignissen charakterisiert, wobei die *Stephanodiscus*-Blüte um 1850 als eindeutiges Zeichen eines Eutrophierungsschubes und das Vorhandensein von oligo- bis mesotraphenten Arten (*Mastogloia smithii* var. *lacustris*, *Cyclotella distinguenda*, etc.) als Zeichen der Mesotrophie betrachtet werden kann. Zu Beginn des 19. Jahrhunderts dürften daher noch **mesotrophe** Verhältnisse den Pfäffikersee geprägt haben. Anschließend aber verschlechterte sich der Nährstoffgehalt deutlich, wobei um 1850 **deutlich eutrophe Verhältnisse** dominierten und sich der See dann wieder etwas erholte.

Die **Zone PFAEFF-3 (ca. 1930 - ca. 1950)** umfasst die Sedimenttiefen 23-17cm. Diese Zone charakterisiert weniger eine eigenständige Kieselalgencommunity als vielmehr der deutliche Wechsel in der Artenzusammensetzung von der Zone PFAEFF-2 zu PFAEFF-4. So verschwinden praktisch alle *Cyclotella*-Arten mit Ausnahme von *Cyclotella pseudostelligera*, welche mit geringem Anteil vorkommt sowie viele der Aufwuchsarten und die meisten Arten der Gattung *Fragilaria*. Ebenso verschwindet nach einem letzten Auftreten um ca. 1940 *Aulacoseira ambigua*. Demgegenüber nehmen die relativen Anteile von *Tabellaria flocculosa*, *Fragilaria crotonensis*, *Asterionella formosa* und *Stephanodiscus minutulus/parvus* deutlich zu. Das Aufkommen von *Tabellaria flocculosa* um ca. 1940 erwähnt auch Züllig (1982, S. 52), wobei er diese Beobachtung aus Messikommer (1943) hat und dieses Taxon damals als *Tabellaria fenestrata* bezeichnet wurde.

Die Kieselalgen der Zone PFAEFF-3 verdeutlichen, dass zu diesem Zeitpunkt bereits **eutrophe Verhältnisse** vorherrschten.

Die **Zone PFAEFF-4 (ca. 1950 - 2000)** beinhaltet die obersten 16 cm Sediment. In dieser Zone dominieren die Taxa *Fragilaria crotonensis*, *Asterionella formosa* und *Stephanodiscus minutulus/parvus*. Der Anteil aller anderen Arten ist vergleichsweise zu diesen drei Taxa unbedeutend. Sie alle repräsentieren eutrophe bis hypereutrophe Bedingungen. Erwähnenswert sind aber das Aufkommen der eutraphenten Taxa *Aulacoseira granulata*, *Cyclostephanos dubius* und *C. invistatus* wie auch der für organische Belastungen typische *Fragilaria capucina* var. *vaucheriae*. Diese zum Teil nur kurze Zeit im Pfäffikersee vorhandenen Taxa, welche ab Probe 8 (ca. 1973) und jünger nicht mehr nennenswert auftraten, indizieren wie *Stephanodiscus minutulus/parvus* auch, dass der Pfäffikersee **bis anfangs der 1970er Jahre in einem hocheutrophen Zustand** war. Anschließend nahm der Anteil von *Stephanodiscus minutulus/parvus* langsam ab, was als Zeichen der Verbesserung des Trophiegrades gewertet werden kann. Diese Verbesserung des Nährstoffgehaltes kann auch am Aufkommen anderer Kieselalgentaxa geschlossen werden. So tritt in den Proben 4 bis 9, welche den ungefähren Zeitraum 1973 bis 1990 abdecken, *Cyclotella praeterrimissa* auf und anschließend dann bis ins Jahr 2000 *Cyclotella cyclopuncta*. Sie beide repräsentieren eine zunehmende Verbesserung des Trophiegrades. Aufgrund aber des noch recht häufigen Vorhandenseins von *Stephanodiscus minutulus/parvus* muss aber geschlossen werden, dass **im Jahr 2000 im Pfäffikersee immer noch schwach eutrophes Milieu** vorherrschte. Diese planktische Kieselalge tritt v.a. im Frühjahrespilankton in riesigen Massen (Zelldichten) auf und trägt damit einen Grossteil zum Total der pro Jahr sedimentierten Kieselalgenschalen bei.

## 5.2 Taxazahl und Diversität

Die Taxazahl und die Diversität, berechnet nach Shannon & Weaver (1949) geben einen Eindruck über die Entwicklung der Biodiversität im Sinne der Artenvielfalt (Abb. 4). Es gilt aber zu berücksichtigen, dass die im Sediment beobachteten Taxazahlen und Diversitäten durch Akkumulation (und anderen nicht immer bekannten Prozessen) entstanden sind und nicht denjenigen effektiv im See (Freiwasser und Uferbereich) vorhandenen Werten entsprechen.

So war die Artenvielfalt aufgrund der Sedimentdaten im 19. Jahrhundert, insbesondere in den beiden Phasen der stabilen Mesotrophie, also von 1800 bis 1820 und um 1890 am grössten. Die Taxazahl erreichte dazumal 45 bis 50 Taxa und die Diversität Werte um 4. Diese hohen Werte wird in erster Linie durch das zusätzliche Vorkommen vieler Uferalgen bestimmt. In den anderen Zeitabschnitten war die Taxazahl wie auch die Diversität deutlich tiefer. Der Uferbereich nahm somit im 19. Jahrhundert eine grössere Bedeutung ein als vor und nachher. Ob dies durch geringere Primärproduktion (geringe Planktondichte und daher grössere lichtdurchflutete Uferflächen, mehr Wasserpflanzen und daher mehr ökologische Nischen) oder durch andere Effekte zustandekam ist aus den Daten nicht ersichtlich. Jedenfalls ist die im 19. Jahrhundert beobachtete hohe Taxazahl nicht bloss ein Effekt der Sedimentkomprimierung, denn sonst müssten die tiefer liegenden Sedimentschichten des 18. Jahrhunderts auch hohe Taxazahlen aufweisen.

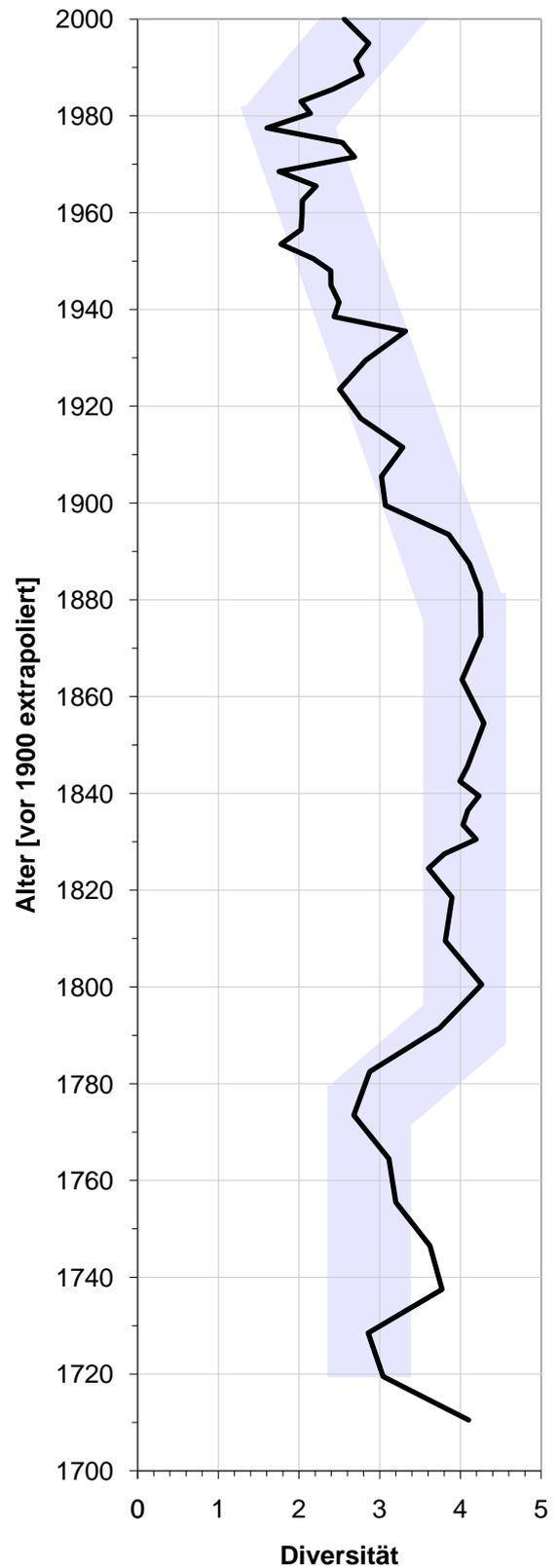
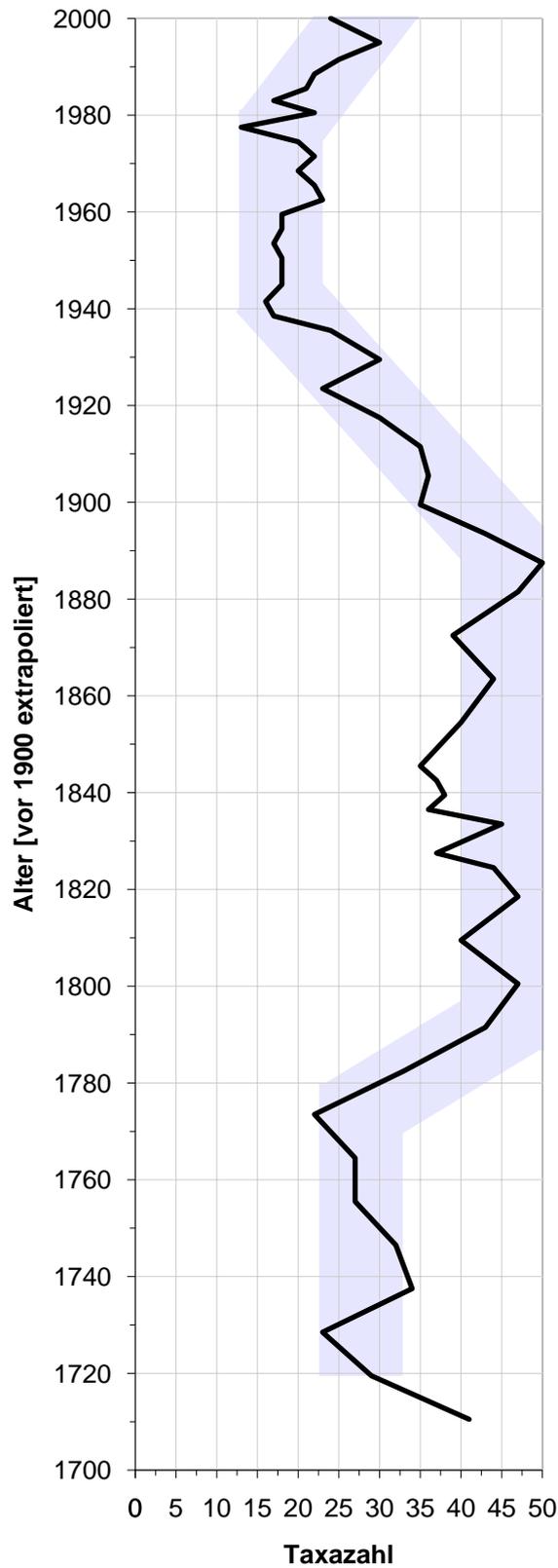
Die Minimalwerte wurden im 20. Jahrhundert erreicht und zwar in der Periode der maximalen Gesamtphosphorbelastung (bis ca. 1980, siehe Abb. 4). Anschliessend erhöhte sich die Taxazahl wie auch die Diversität wieder stetig, was auf die internen und externen Sanierungsmassnahmen zurückzuführen sein dürfte. Mit Taxazahlen um 25 bis 30 und Diversitätswerten um 2.6 bis 2.9 sind aber die im 19. Jahrhundert vorhanden gewesene Taxazahl und Diversität noch nicht erreicht.

## 5.3 Gesamtphosphor-Rekonstruktion

Vorgängig zur Rekonstruktion des Gesamtphosphors soll in Erinnerung gerufen werden, dass die Zusammensetzung der Kieselalgen-Lebensgemeinschaften wohl wesentlich durch den Gesamtphosphorgehalt des Wassers mitbestimmt wird, dass aber auch andere biotische und abiotische Faktoren die Kieselalgen-Lebensgemeinschaft qualitativ und quantitativ beeinflussen, so z.B. der biologisch verfügbare Siliziumgehalt (Si:P-Verhältnis), die Stickstoff-, Licht- und Temperaturverhältnisse, die Konkurrenz um diese Ressourcen und zwischen den Algengruppen sowie der Frassdruck.

Die Rekonstruktion des Gesamtphosphors wurde mittels zwei unterschiedlichen Verfahren durchgeführt (Phosphor-Transferfunktion und Analogatechnik, siehe Kapitel 4.2). Die Resultate der zwei Verfahren sind in den Abbildungen 5 und 6 dargestellt. Im Vergleich untereinander ist der grobe Verlauf der rekonstruierten Gesamtphosphorkonzentration ähnlich, hingegen zeigen sich in den einzelnen Zeitabschnitten zum Teil deutliche Unterschiede. Da mit dem Verfahren der Analogatechnik keine guten Analoga gefunden werden konnten, müssen die so rekonstruierten Gesamtphosphordaten vorsichtig interpretiert werden. Die im folgenden besprochenen Phosphorwerte beruhen daher ausschliesslich auf dem Rekonstruktionsverfahren (Kalibrationsdatenset) von Lotter et al (1998).

Obwohl die Eutrophierung eines Sees ein fliessender Prozess darstellt, versuchen wir im folgenden einzelne Zeitabschnitte zu besprechen. Dabei ist uns bewusst, dass die Abschnittsgrenzen fliessend ineinander übergehen.



**Abb. 4. Entwicklung der Kieselalgen-Taxazahl und der Kieselalgen-Diversität im Pfäffikersee (Sedimentkern PFÄ00-2) von 1710 bis 2000.**

Hellblaue Fläche = Trend.

### **Zeitabschnitt von ca. 1710 bis ca. 1790**

In diesem Zeitabschnitt von rund 80 Jahren erlitt der Pfäffikersee einen **Eutrophierungsschub**, wobei um ca. 1750 bis 1760 der maximale Trophiegrad erreicht wurde. Im Mittelwert indizieren die Kieselalgen Gesamtphosphorwerte von rund 40 µg P/l, wobei das Maximum um 1750 bis 1760 bei über 60 µg P/l gewesen sein dürfte und der Pfäffikersee damit **eutroph** war. Anschliessend verbesserte sich der Zustand wieder, so dass der mittlere Gesamtphosphorwert um 1790 unter 30 µg P/l fiel. Der Pfäffikersee erfuhr somit eine deutliche Belastung, die mit Sicherheit den See eutrophierte. Die Ursache könnte in Zusammenhang mit dem Torfabbau stehen, welcher in Pfäffikon um 1715 begann und ab etwa 1740 auch in Seegräben und Robenhausen erfolgte (siehe Kapitel 3.2). Der Abbau, bei welchem wahrscheinlich auch Entwässerungen von Riedgebieten durchgeführt wurden, mobilisierte mit Huminsäuren und anderen organischen und anorganischen Substanzen angereichertes Wasser. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben erfolgte der Torfabbau zuerst ohne Einschränkungen im Sinne eines planlosen Raubbaus. Die daraus resultierten Regelungen und scharfen Bestimmungen dürften insofern gewirkt haben, dass der Nährstoffgehalt abnahm und damit der Seezustand sich dann verbesserte.

### **Zeitabschnitt von ca. 1790 bis ca. 1920**

In diesem Zeitabschnitt ereignete sich ähnlich wie in der Vorperiode wiederum eine Eutrophierung. Zu Beginn, also um ca. 1780 bis 1820, lag der mittlere Gesamtphosphorwert bei rund 20 µg P/l, was auf einen **stabilen mesotrophen Zustand** schliessen lässt. Anschliessend erhöhte sich die Gesamtphosphorkonzentration, wobei er um ca. 1840 bis 1850 mit 35 bis 45 µg P/l das Maximum erreichte. Damit wurden im 19. Jahrhundert nicht ganz so hohe Werte erreicht wie im 18. Jahrhundert. Der See befand sich aber um 1850 offensichtlich wiederum in einem **eutrophen Zustand**. Als mögliche Ursachen könnten der immer noch betriebene (und allenfalls intensivierte?) Torfabbau sowie der Beginn der Industrialisierung in Frage kommen. Inwieweit die um 1860 getätigte Seeabsenkung den Seezustand beeinflusste, kann aus den Daten nicht erkannt werden.

Anschliessend verbesserte sich der Seezustand bezüglich des Gesamtphosphors wohl langsam aber deutlich, so dass um 1890 die indizierten mittleren Gesamtphosphorkonzentrationen wiederum bei knapp 20 µg P/l lagen. Damit war der Pfäffikersee bis zum Ende des 19. Jahrhunderts erneut in einem **stabilen mesotrophen Zustand**. Unter Berücksichtigung des oberen und unteren Fehlers ergibt sich für 1890 ein Phosphorgehalt von 10 bis 32 µg P/l (Mittelwert 18 µg P/l). Da im Kalibrationsset oligotrophente Taxa wie *Mastogloia smithii* var *lacustris* nicht berücksichtigt wurden, darf angenommen werden, dass im Pfäffikersee der Gesamtphosphorgehalt am Ende des 19. Jahrhunderts eher unter oder um 20 µg P/l lag als darüber. **Der Pfäffikersee dürfte damit vor Beginn der aktuellen Eutrophierung ein schwach mesotropher See gewesen sein.**

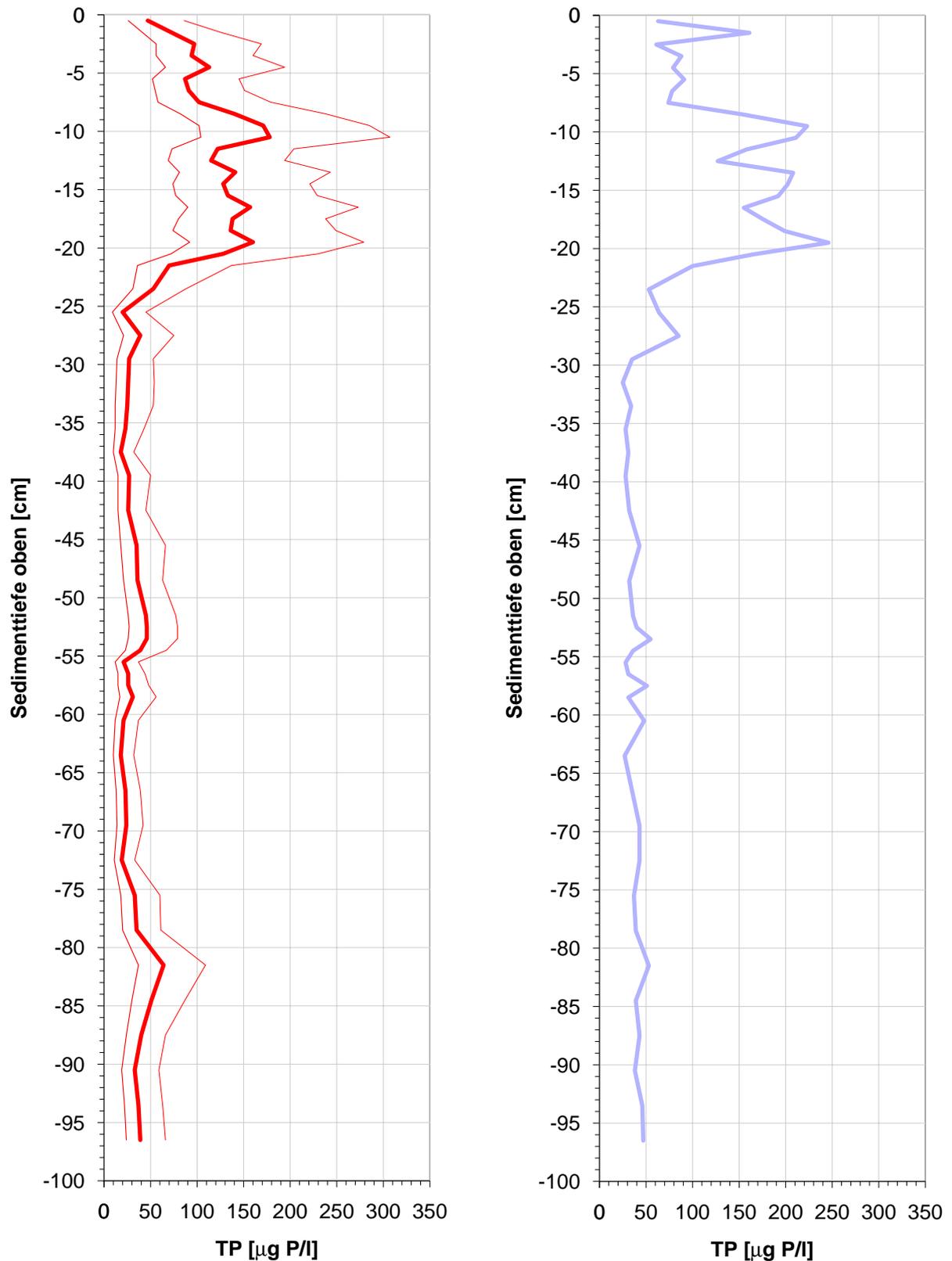
### **Zeitabschnitt von ca. 1920 bis ca. 1970**

Bis ca. 1920 dürfte der Gesamtphosphorwert kaum mehr als 30 µg P/l getragen haben. In den anschliessenden Zwischenkriegsjahre (1920 bis 1940) stieg aber der Gesamtphosphor sehr schnell an. Während er 1920 im Mittel noch 20 µg P/l betrug, erreichte er 1942 aufgrund der Rekonstruktion einen Mittelwert von 160 µg P/l. Diese Erhöhung entspricht einer jährlichen Gesamtphosphorzunahme von 7 bis 8 µg P/l. Aufgrund der Rekonstruktion befand sich der Pfäffikersee somit um 1940 bereits in einem **hypereutrophen Zustand**. Dies lässt sich auch aufgrund der Arbeiten und Aussagen von Lieber (1935) und Thomas (1942) vermuten. Nach einer Phase der gleichbleibenden Belastung, welche aufgrund der Rekonstruktion von rund 1940 bis 1960 dauerte, verschlechterte sich der Seezustand in den 1960er Jahren erneut. Die maximale Gesamtphosphorbelastung wurde im Pfäffikersee aufgrund

der Rekonstruktion wie auch aufgrund der Messdaten um ca. 1970 erreicht (rekonstruierter Mittelwert ca. 180 µg P/l, Maximalwert ca. 300 µg P/l), wobei die gemessenen maximalen Gesamtposphorwerte (Jahresmittelwert 319 µg P/l und Frühjahreszirkulationswert 379 µg P/l) dem rekonstruierten Maximalwert (oberer Fehler) entsprechen (Abb. 6 und 7).

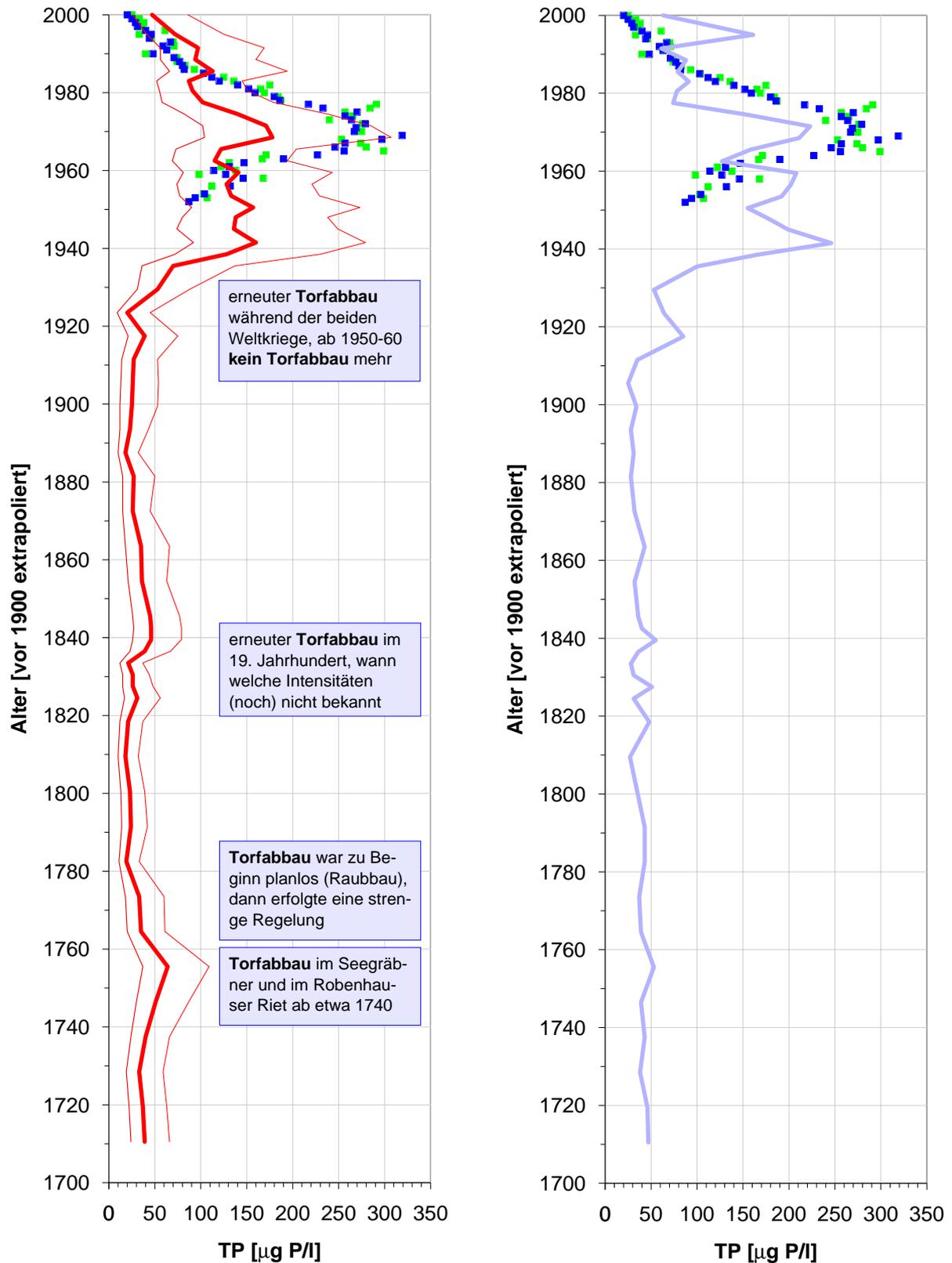
### **Zeitabschnitt von ca. 1970 bis 2000**

Die letzte Periode von rund 30 Jahren illustriert eindrücklich die Abnahme des Gesamtposphors und damit die Verbesserung des Trophiegrades (Oligotrophierung). Während um 1970 der mittlere Gesamtposphorgehalt noch weit im hypereutrophen Milieu lag, sank er bis zum Jahr 2000 aufgrund der Rekonstruktion auf 47 µg P/l (unterer Fehler: 26 µg P/l, oberer Fehler 86 µg P/l). Damit dürfte sich der Pfäffikersee noch in einem **schwach eutrophen Zustand** befinden. Im Vergleich zu den gemessenen Gesamtposphorwerten liegen somit die rekonstruierten Gesamtposphorkonzentrationen höher. Dieses Phänomen ist bekannt und lässt sich insofern erklären, dass sich die eutraphente Kieselalge *Stephanodiscus minutulus/parvus* trotz verbessertem Seezustand noch mit hohen Anteilen im Pfäffikersee halten kann. Ihr Auftreten ist im wesentlichen auf wenige Wochen während der Frühjahresblüte eingeschränkt. Die zu diesem Zeitpunkt (Frühjahr) entwickelten Zelldichten sind im Vergleich zu den restlichen zu irgendeinem Zeitpunkt (Sommer, Herbst, Winter) vorhandenen Zelldichten anderer Kieselalgenarten (z.B. *Cyclotella*) so enorm, dass sie die Resultate der Rekonstruktion im Sinne mit 'zu hohen' Gesamtposphorwerten zu beeinflussen vermögen. Dieses Phänomen der hohen Frühjahresdichten kann auch aus den Phytoplankton-Biomassedaten abgeleitet werden, wie es in Baudirektion des Kantons Zürich (1998) für den Pfäffikersee der Jahre 1982-1987 gezeigt wird.



**Abb. 5. Rekonstruktion der Entwicklung des Gesamtphosphors (TP) im Pfäffikersee mit Hilfe von Kieselalgen im Sedimentkern PFÄ00-2. Dargestellt mit der Sedimenttiefenachse.**

Links: Rekonstruktion mittels Kalibrationsdatenset von Lotter et al. (1998); Mittelwert sowie oberen und unteren Fehler.  
 Rechts: Rekonstruktion mittels Analogatechnik MAT, die Rekonstruktion basiert nur auf schlechten Analoga (hellblaue Linie). Die TP-Rekonstruktion mittels Analogatechnik sollte demnach nicht berücksichtigt werden.



**Abb. 6. Rekonstruktion der Entwicklung des Gesamtphosphors (TP) im Pfäffikersee mit Hilfe von Kieselalgen im Sedimentkern PFÄ00-2. Dargestellt mit der Zeitachse.**

Links: Rekonstruktion mittels Kalibrationsdatenset von Lotter et al. (1998) mit Angabe eines oberen und unteren Fehlers.

Rechts: Rekonstruktion mittels Analogatechnik MAT, die Rekonstruktion basiert nur auf schlechten Analoga (hellblaue Linie). Die TP-Rekonstruktion mittels Analogatechnik sollte demnach nicht berücksichtigt werden.

Blaue Punkte: Gemessener Gesamtphosphor (Jahresmittelwerte).

Grüne Punkte: Gemessener Gesamtphosphor (Frühjahrszirkulationswerte, März/April).

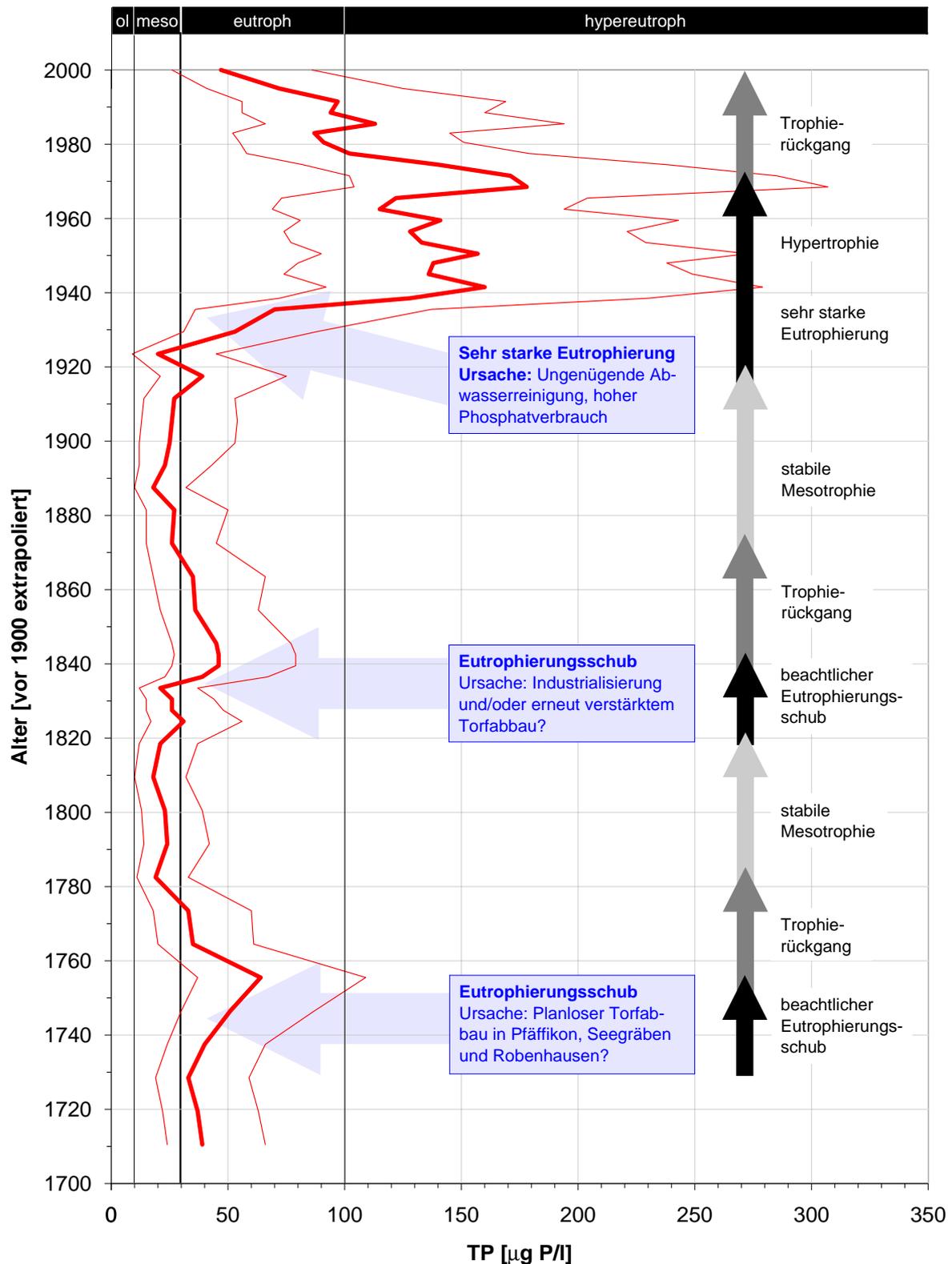
## 6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie über die 'Rekonstruktion der Trophiegeschichte des Pfäffikersees mittels Kieselalgen' hatte zum Ziel, die Trophiegrad- und die Gesamtphosphor-Entwicklung des Pfäffikersees mindestens bis ins 19. Jahrhundert zu ermitteln. Die Untersuchung ist von Interesse, weil der Pfäffikersee im 20. Jahrhundert anthropogen bedingt eine bezüglich des Trophiegrades starke Veränderung durchgemacht hat und heute mittels internen und externen Sanierungsmassnahmen erfolgreich der Trophiegrad verbessert wird. Neben diesem reinen Rekonstruktionsaspekt sollen mit den Untersuchungen chemische und biologische Sanierungsziele abgeleitet werden.

### **Entwicklung der Gesamtphosphor-Konzentration und des Trophiegrades (Abbildung 7)**

Aufgrund der im Sediment vorgefundenen Kieselalgen kann abgeleitet werden, dass der Pfäffikersee während des 18. und des 19. Jahrhunderts je einmal eine deutliche Eutrophierung erfuhr. Der Eutrophierungsschub mit dem Maximum (Mittelwert über  $60 \mu\text{g P/l}$ , deutlich eutroph) um 1750 bis 1760 dürfte in Zusammenhang mit dem planlosen Torfabbau (Raubbau) stehen. Die anschliessende strenge Regelung des Torfabbaus bewirkte dann eine deutliche Verbesserung bezüglich des Trophiegrades, so dass während rund 40 Jahren eine stabile Mesotrophie (Mittelwert um  $20 \mu\text{g P/l}$ ) den Pfäffikersee prägten. Im 19. Jahrhundert verschlechterte sich der Trophiegrad wahrscheinlich infolge erneutem (intensiven?) Torfabbau und dem Beginn der Industrialisierung wiederum. Um 1840 bis 1850 wurde die maximale Belastung erreicht (Mittelwert bei  $35$  bis  $45 \mu\text{g P/l}$ , schwach eutroph). Anschliessend verbesserte sich der Trophiegrad wiederum, bis ca. 1890 erneut eine stabile Mesotrophie erreicht wurde (Mittelwert um  $20 \mu\text{g P/l}$ ). Dieser Zustand der Mesotrophie dauerte dann bis ca. 1920. Anschliessend verschlechterte sich der Gewässerzustand sehr schnell. So stieg der Gesamtphosphor innerhalb der Zwischenkriegsjahre (1920 bis 1940) von rund  $20 \mu\text{g P/l}$  auf einen Mittelwert von rund  $160 \mu\text{g P/l}$  an. Damit befand sich der Pfäffikersee bereits um 1940 in einem hypereutrophen Zustand. Nach der bis ca. 1960 dauernden Phase der gleichbleibenden Belastung verschlechterte sich Seezustand erneut. Um 1970 wurde dann aufgrund der Rekonstruktion wie auch aufgrund der Messwerte die maximale Gesamtphosphorbelastung erreicht (rekonstruierter Mittelwert ca.  $180 \mu\text{g P/l}$ , rekonstruierter Maximalwert ca.  $300 \mu\text{g P/l}$ , gemessener Jahresmittelwert  $319 \mu\text{g P/l}$ , gemessener Frühjahreszirkulationswert  $379 \mu\text{g P/l}$ ). Diese massive Verschlechterung des Trophiegrades wurde durch die noch ungenügende Klärung der Abwässer sowie durch den stetig höheren Verbrauch an phosphorhaltigen Produkten in Haushalt, Industrie und Landwirtschaft hervorgerufen.

Nach 1970 bewirkten dann die ergriffenen externen und internen Sanierungsmassnahmen eine kontinuierliche Verminderung der Gesamtphosphorkonzentration, so dass sich der Pfäffikersee im Jahr 2000 aufgrund der Rekonstruktion in einem schwach eutrophen Zustand befand (rekonstruierter Mittelwert  $47 \mu\text{g P/l}$  mit unterem Fehler  $26 \mu\text{g P/l}$  und oberem Fehler  $86 \mu\text{g P/l}$ ; gemessener Jahresmittelwert  $20 \mu\text{g P/l}$ , gemessener Frühjahreszirkulationswert  $25 \mu\text{g P/l}$ ).



**Abb. 7. Zusammenfassende Darstellung der trophischen Entwicklung im Pfäffikersee.**

Rote Kurven: Rekonstruktion der Gesamtphosphor-Konzentration basierend auf dem Kalibrationsset nach Lotter et al. (1998), Trophieangaben nach OECD-Studie (aus Lampert & Sommer 1993, Seite 375), basierend auf der Gesamtphosphor-Konzentration während der Frühjahrszirkulation. Die angegebenen Trophiephasen und -zustände (schwarze und graue Pfeile) beziehen sich nicht nur auf den Gesamtphosphor, sondern auch auf die im Sediment vorgefundenen Artenabfolgen der Kieselalgen.

## Sanierungsziele

Die Rekonstruktion ergab, dass sich der Pfäffikersee jeweils am Ende des 18. und am Ende des 19. Jahrhunderts in einer stabilen Mesotrophie befand. Die zu diesen Zeitpunkten rekonstruierte Gesamtposphorkonzentration betrug 20 µg P/l. Dieser festgestellte mesotrophe Zustand, charakterisiert durch oligotraphente Aufwuchsarten (z. B. *Mastogloia smithii* var. *lacustris*) sowie durch mehrere oligo- bis mesotraphente *Cyclotella*-Arten (*Cyclotella distinguenda*, *C. comensis/pseudocomensis*, *C. bodanica* sowie *C. cyclopuncta*) stellen hinsichtlich der Kieselalgen ein anzustrebendes biologisches Ziel dar.

Aufgrund des gemessenen Gesamtposphors (Jahresmittelwert) wurde dieser Wert von 20 µg P/l im Jahr 2000 bereits erreicht. Die Frühjahreszirkulationswerte liegen mit 25 µg P/l noch leicht darüber. Sofern die Frühjahreszirkulationswerte über längere Zeit konstant auf 20 µg P/l gesenkt werden können, dürfte die heute noch vorhandene Dominanz der hypereutraphenten Frühlingsart *Stephanodiscus minutulus/parvus* durch einen grösseren Anteil von *Cyclotella*-Arten sowie durch die heute schon vorhandenen *Fragilaria crotonensis*, *Asterionella formosa* und/oder *Tabellaria flocculosa* abgelöst werden. Damit die oben erwähnten **oligo- bis mesotraphenten *Cyclotella*-Arten** im Pfäffikersee wieder dominieren, muss aber die mittlere Gesamtposphorkonzentration auf **< 20 µg P/l** gesenkt werden. Mit grosser Sicherheit wird sich der Erfolg der Sanierungsmassnahmen dann auch im **Uferbereich** äussern, indem dort vermehrt **mesotraphente Kieselalgenarten** an Bedeutung zunehmen werden.

Zur Definition eines weiteren Sanierungszieles könnten theoretisch auch die Erkenntnisse verwendet werden, die in Zusammenhang mit der Artenvielfalt im Sediment (Taxazahl und Diversität) gewonnen wurden. So trat in den Phasen der stabilen Mesotrophie im Sediment jeweils eine deutlich höhere Taxazahl und Diversität auf als im heutigen Sediment, wobei den Uferalgen eine grosse Bedeutung zukam. Die Artenvielfalt der Uferalgen, respektive die Zahl der ökologischen Nischen in der **Uferzone** des Pfäffikersee nahm demnach im 19. Jahrhundert eine deutlich grössere Bedeutung ein als heute. Daraus lässt sich vermuten, dass früher - bedingt durch geringere Nährstoffgehalte und entsprechend bessere Lichtverhältnisse - sowie möglicherweise durch einen grösseren Anteil an ungestörten Uferabschnitten ein höherer Flächenanteil an besiedelbarem Substrat (grössere Tiefenausdehnung, ausgedehntere Flächen mit Wasserpflanzen und Aufwuchsarten) und damit mehr ökologische Nischen vorhanden waren. Die Flachwasserzonen dürften wahrscheinlich **ausgedehnte Wasserpflanzenfelder** aufgewiesen haben. Eine künftige Überwachung (Monitoring) sollte demnach neben den bisherigen chemischen auch biologische Parameter zur Überprüfung der oben erwähnten Sanierungsziele erfassen.

## 7. Literaturverzeichnis

- Ambühl, H. 1962: Die künstliche Belüftung des Pfäffikersees; Orientierung über die ersten Ergebnisse. Verb. Schweizer Abwasserfachleute, Ber. Nr. 77/3, 9 S.
- Ambühl, H. 1977: Überblick über den Zustand der Schweizerischen Oberflächengewässer. Gas - Wasser - Abwasser 57 (1): 27-32.
- Ambühl, H. 1995: Die Feinstruktur jüngster Sedimente von Seen verschiedenen Trophiegrades und von Seen in technischer Sanierung. In : Ambühl, H. (ed).Limnologische Berichte Donau 1994 der Int. Arbeitsgem. Donauforschung, Bd.II, Dübendorf, Wien: 101-126.
- Baudirektion Zürich 1938: Inhalte der 3 Seen im Kanton Zürich. Greifen-, Pfäffiker- und Zürichseevolumen. Tabelle der Kantonalen Baudirektion, Abteilung Wasserbau & Wasserrecht, Zürich.
- Baudirektion Zürich 1998: Oberflächengewässer und Abwasserreinigungsanlagen. Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (Hrsg.) 67 S.
- Bennett, K., 1996: Determination of the number of zones in a biostratigraphical sequence. New Phytologist 132: 155-170.
- Birks, H.J.B., Gordon, A.D. 1985: Numerical methods in Quaternary pollen analysis. Academic Press, London, 317 Seiten.
- Burgermeister, G. & Lachavanne, J.B. 1980: Les macrophytes du Pfäffikersee. Ber. Schweiz. Bot. Ges. 90 (3/4) 213-243.
- BUWAL 1994: Der Zustand der Seen in der Schweiz. BUWAL Schriftenreihe Umwelt, Nr. 237 Gewässerschutz, 1-159.
- Direktion der öffentlichen Bauten des Kantons Zürich 1978: Weitergehende Gewässerschutzmassnahmen im Einzugsgebiet des Greifen- und Pfäffikersees. Orientierungsveranstaltung vom 29. Juni 1978.
- Direktion der öffentlichen Bauten des Kantons Zürich 1992: Oberflächengewässer und Kläranlagen. Amt für Gewässerschutz und Wasserbau (Hrsg.) 75 S.
- Direktion der öffentlichen Bauten des Kantons Zürich 1994: Oberflächengewässer und Kläranlagen. Amt für Gewässerschutz und Wasserbau (Hrsg.) 69 S.
- Direktion der öffentlichen Bauten des Kantons Zürich 1996: Oberflächengewässer und Abwasserreinigungsanlagen. Amt für Gewässerschutz und Wasserbau (Hrsg.) 69 S.
- Girschweiler, H. 1989: Pfäffikersee-Sanierung: Die Fischer drängen. Tages-Anzeiger 25. September 1989.
- Hirt, F. & Winter, D. 2000: Neue Spielregeln am Pfäffikersee. Zürcher Umweltpraxis 22: 45-48
- Kaspar, H. & Vetterli, W. 1992: Neues Regulierwehr Pfäffikersee. Wasser, Energie, Luft 9: 201-204.
- Keller, P. 1994: Dynamik der mikrobiellen Mineralisierung im sedimentnahen Hypolimnion des Pfäffikersees (Kt. Zürich). Diplomarbeit der Universität Zürich, 107 S.
- Keller, R. 1989: Der Pfäffikersee soll eine Zirkulationshilfe erhalten. Tages-Anzeiger 14. August 1989.
- 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.
- Lachavanne, J.-B., Juge, R. & Perfetta, J. 1991: The consequences of water oligotrophication on macrophytic vegetation of Swiss lakes. Verh. Internat. Verein. Limnol., 24 (2): 943-948.
- Lampert, W., Sommer, U., 1993: Limnoökologie. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 1-440.
- Lieber, A. 1935: 1. Der Aabach 2. Untersuchung des Seewassers und des Abwassers von Pfäffikon (Zürich). Dissertation an der ETH Zürich, 52 S.

- Lotter, A.F., 1988: Paläoökologische und paläolimnologische Studie des Rotsees bei Luzern. J. Cramer Verlag, Berlin, 1-187.
- Lotter, A.F., 1998: The recent eutrophication of Baldeggersee (Switzerland) as assessed by fossil diatom assemblages. *The Holocene* 8 (4): 395-405.
- 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.
- Maag, C. 1978: Die kommenden Gewässerschutzaufgaben im Kanton Zürich. *Gas - Wasser - Abwasser* 58 (3), 160-165.
- Märki, E., 1949: Die Limnologie der schweizerischen See und Flüsse. Zusammenstellung der Literatur seit 1900. *Schweiz. Zeitschrift für Hydrologie* 11 (3/4): 650-707.
- Messikommer, E. 1927: Biologische Studien im Torfmoor von Robenhausen unter besonderer Berücksichtigung der Algenvegetation. Aktienbuchdruckerei Wetzikon und Rüti / Mitt. aus dem botanischen Museum der Universität Zürich (CXXII), 1-171 + Anhang.
- Messikommer, E. 1928: Verlandungserscheinungen und Pflanzensukzessionen im Gebiete des Pfäffikersees. *Festschrift Schinz, N Zürich* 73, 286-306.
- Messikommer, E. 1942: Ein Beitrag zur Planktonkunde des Pfäffikersees. *Mitt. d. Naturw. Ges. Winterthur* 23: 145-200.
- Messikommer, E. 1943: Weiterer Beitrag zur Planktonkunde des Pfäffikersees. *Zeitschrift für Hydrologie* 9, 317-346.
- Messikommer, E. 1947: Eine Plankton-Invasion im Pfäffikersee. *Vierteljahrsschr. Naturforsch. Ges. Zürich* 92: S. 275.
- Messikommer, E. 1954: Zur Kenntnis der niederen Sumpf- und Wasserfauna der Gegend des Pfäffikersees (Kt. Zürich). *Revue Suisse de Zoologie* 61 (4): 43-656.
- Messikommer, E. 1961: Eine neue Plankton-Invasion im Pfäffikersee. *Vierteljahrsschr. Naturforsch. Ges. Zürich* 106: 448-449.
- Overpeck, J., Webb, T., Prentice, I., 1985: Quantitative interpretation of fossil pollen spectra: dissimilarity coefficients and the method of modern analogs. *Quaternary Research* 23: 87-108.
- Pavoni, M. 1963: Die Bedeutung des Nannoplanktons im Vergleich zum Netzplankton: Qualitative und quantitative Untersuchungen im Zürichsee, Pfäffikersee und anderen Seen. *Schweiz. Z. Hydrol.*, 25 (2), 219-341.
- Pleisch, P. 1970: Die Herkunft eutrophierender Stoffe beim Pfäffiker- und Greifensee. *Vierteljahrsschr. Naturforsch. Ges. Zürich*, 115 (2) 127-229.
- Scheffler, W., 1994: *Cyclotella pseudocomensis* nov. sp. (Bacillariophyceae) aus norddeutschen Seen. *Diatom Research* 9 (2): 355-369.
- Schweizer 1937: Oberflächengestalt und Wasserhaushalt des oberen Glattales. Dissertation Universität Zürich.
- Shannon, C. & Weaver, W. (1949): *The mathematical theory of communication*. Univ. Illinois Press. Urbana.
- Soraccreppa, B. 1978: Jahreszeitliche Veränderungen von Wasserchemismus und Phykozöosen in zehn Seen der Umgebung von Zürich. *Vierteljahrsschr. Naturforsch. Ges. Zürich*, 123, 161-235.
- Steiger, U., Hirt, F. & Wiedmer, U. 2000: Tätigkeitsbericht Legislaturperiode 1995-1999. Fachstelle Naturschutz Kt. Zürich (Hrsg.) 1-27.
- Studer, J. 1995: Fish in Swiss lake dwelling sites. *Archives Des Sciences* 48: 3, 251-256.
- 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.
- Thomas, E.A., 1941: Beitrag zur Kenntnis des Planktons dreier Zürcher Seen. *Schweiz. Z. Hydrol.*, 9 (1/2), 34-49.

- Thomas, E.A., 1942: Untersuchungen am Greifensee und am Pfäffikersee. Schweizerische Fischerei-Zeitung 2, 7 S.
- Thomas, E.A., 1951: Produktionsforschung auf Grund der Sedimente im Pfäffikersee und Zürichsee. Verh. Internat. Verein. Limnol., 11, 409-421.
- Thomas, E.A., 1955: Stoffhaushalt und Sedimentation im oligotrophen Ägerisee und im eutrophen Pfäffiker- und Greifensee. Mem. Ist. Ital. Idrobiol. Supp. 8: 357-465.
- Thomas, E.A., 1966: Der Pfäffikersee vor, während und nach künstlicher Durchmischung. Verh. Internat. Verein. Limnol., 16, 144-152.
- Thomas, E.A. 1967: Die Phosphat-Hypertrophie der Gewässer. Notwendigkeit und technische Möglichkeit der Zufuhr-Drosselung. Chemisch Weekblad 63 (26/27), 305-319.
- Thomas, E.A. 1969: Untersuchungen über die Auswirkungen und Folgen der Einschichtung von Abwässern in Seen. Gas - Wasser - Abwasser 49 (11), 6 S.
- Voigt, R. 1996: Paläolimnologische und vegetationsgeschichtliche Untersuchungen an Sedimenten aus Fuschlsee und Chiemsee (Salzburg und Bayern). Dissertationes Botanicae Band 270, J. Cramer Berlin, 303 S.
- Waser, E., Blöchliger, G. & Lieber, A. 1935: Der Aabach, Seewasser und Abwasser von Pfäffikon (Zch.). Untersuchungen der öffentlichen Gewässer des Kantons Zürich II, 1-62.
- Wildermuth, H.R. 1977: Der Pfäffikersee. Ein natur- und heimatkundlicher Führer. Druckerei Wetzikon AG, 144 S.
- Wydler, P. 1979: Natur-Juwel Pfäffikersee. Natur und Mensch 21 (3): 3-11.
- Züllig, H. 1982: Untersuchungen über die Stratigraphie von Carotinoiden im geschichteten Sediment von 10 Schweizer Seen zur Erkundung früherer Phytoplankton-Entfaltungen. Schweiz. Zeitschrift für Hydrologie 44 (1): 1-98.
- Züllig, H. 1988: Waren unsere Seen früher wirklich <<rein>>? Anzeichen von Früheutrophierung gewisser Seen im Spiegel jahrtausendealter Seeablagerungen. Gas - Wasser - Abwasser 68 (1), 17-32.

## **Anhang A**

**Resultate der Schnellzählung und Auflistung der ausgezählten Proben**

**Relative Kieselalgenschalendichte pro 1-cm-Sedimentschicht**

**Kieselalgen-Zählresultate**

**Eichdatensatz: TP Training Set 72 Seen von Prof. Lotter**

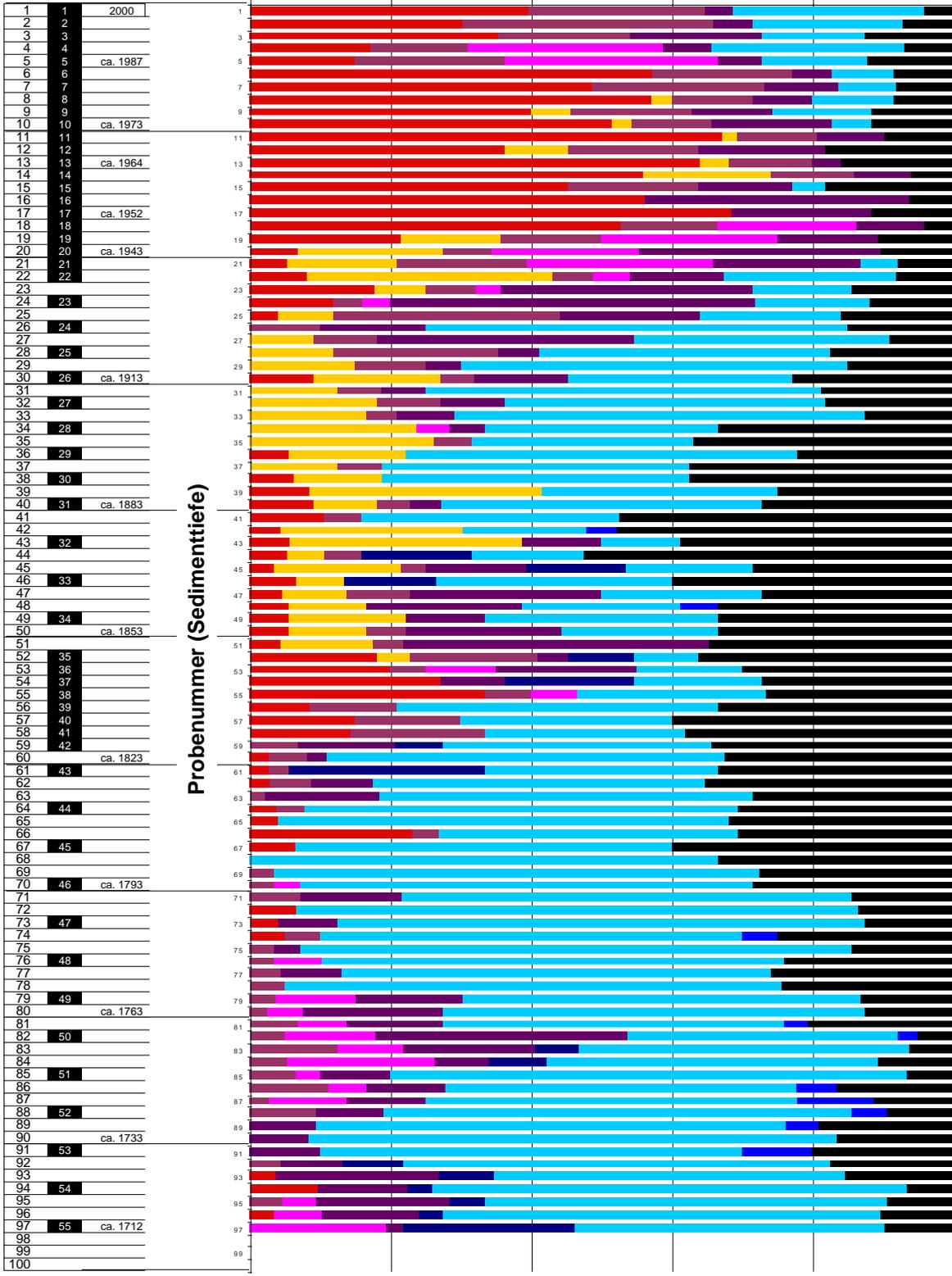
# Pfäffikersee

Probennummer  
55 Proben gezählt

Sedimentalter

Relative Häufigkeit [%]

0% 20% 40% 60% 80% 100%



- Stephanodiscus
- Cyclostephanos
- Aulacoseira
- Asterionella formosa
- Tabellaria
- Fragilaria crotonensis
- Fragilaria
- Thalassiosira pseudonana
- Melosira varians
- Cyclotella
- Stephancostis chantaicus
- Pennales Rest

Probennummer (Sedimenttiefe)

# Pfäffikersee

Relative Diatomeendichte













Präflinkersee Sedimentkern PFÄ00-2		Probe 55	Probe 56	Probe 57	Probe 58	Probe 59	Probe 61	Probe 64	Probe 67	Probe 70	Probe 73	Probe 76	Probe 79	Probe 82	Probe 85	Probe 88	Probe 91	Probe 94	Probe 97	
NGPR	Navicula capitocradialata GERMAIN																			
NCAR	Navicula cari EHRENBURG																			
NCLE	Navicula clemens GRUNOW															0.4	0.2			
NCRY	Navicula cryptocephala KUETZING																			
NCTE	Navicula cryptotenella LANGE-BERTALOT			0.2	0.2			0.2									0.4			
NDEC	Navicula decussis OESTRUP																			
NELG	Navicula elgihensis (GREGORY) RALFS																			
NGOT	Navicula gottlandica GRUNOW	0.6		0.4	0.8		0.2													
NGRE	Navicula gregaria DONKIN																			
NLAN	Navicula lanceolata (J.G.AGARDH) EHRENBURG			0.2							0.4									
NLEN	Navicula lenzi HUSTEDT																			
NMEN	Navicula menisculus SCHUMANN																		0.6	
NMCA	Navicula microcari LANGE-BERTALOT																			
NMIN	Navicula minima GRUNOW						0.2													
NOBL	Navicula oblonga KUETZING								0.4											
NOCU	Navicula occulta KRASSKE																			
NPLA	Navicula placentula (EHRENBURG) GRUNOW					0.6	0.2	0.4												
NPAG	Navicula pseudanglica LANGE-BERTALOT																			
NPTE	Navicula pseudoscutula HUSTEDT								0.6											
NPVE	Navicula pseudoventralis HUSTEDT								0.8											
NPUP	Navicula pupula KUETZING			0.2					0.6									0.2	0.2	
NRAD	Navicula radiosa KUETZING			0.4																
NRCH	Navicula reichardiana LANGE-BERTALOT																			
NRTH	Navicula rotunda HUSTEDT				0.4		1.1													
NSCH	Navicula schoenfeldii HUSTEDT								0.4											
NSCD	Navicula scutelloides W. SMITH																			
NSTR	Navicula stroemii HUSTEDT	0.3								0.4										
NSPD	Navicula subrotunda HUSTEDT	3.1	0.6	1.7				1.3	0.4	2						0.2	0.4		0.4	
NTPT	Navicula tipunctata (O.F.MUELLER) BORY DE SAINT-VINCENT																			
NTOL	Navicula trivialis var. oligotraphenia LANGE-BERTALOT & HOFMANN																			
NTUS	Navicula tuscula (EHRENBURG) GRUNOW			0.4					0.2											
NUTE	Navicula utermoehlii HUSTEDT	0.6	0.8							0.7										
NVTB	Navicula vitabunda HUSTEDT	0.3											0.6							
NBID	Neidium binodis (EHRENBURG) HUSTEDT																			
NEDU	Neidium dubium (EHRENBURG) CLEVE																			
NIRI	Neidium iridis (EHRENBURG) CLEVE																			
NACI	Nitzschia acicularis (KUETZING) W. SMITH																			
NAMP	Nitzschia amphibia GRUNOW																			
NIAN	Nitzschia angustata (W. SMITH) GRUNOW					0.8						0.2								
NDIS	Nitzschia dissipata (KUETZING) GRUNOW			0.2									0.2							
NIFON	Nitzschia fonticola GRUNOW																			
NILA	Nitzschia lacuum LANGE-BERTALOT																			
NIPM	Nitzschia perminuta (GRUNOW) M. PERAGALLO																		0.4	
NIPU	Nitzschia pusilla GRUNOW						0.2													
NIREC	Nitzschia recta HANTZSCH																			
NSIN	Nitzschia sinuata (THWAITES) GRUNOW																			
NSIT	Nitzschia sinuata var. tabularia (GRUNOW) GRUNOW								0.4											
PINU	Pinnularia EHRENBURG			0.4																
PMES	Pinnularia mesolepta (EHRENBURG) W. SMITH																			
RABB	Rhoicosphenia abbreviata (J.G.AGARDH) LANGE-BERTALOT						0.2		0.4											
RCGB	Rhopalodia gibba (EHRENBURG) O.MUELLER																			
RGPA	Rhopalodia gibba var. parallela (GRUNOW) H. et M. PERAGALLO																			
STAN	Stauroneis anceps EHRENBURG								0.2											
SPHO	Stauroneis phoenicenteron (NITZSCH) EHRENBURG									0.2										
SSMI	Stauroneis smithii GRUNOW								0.4										0.4	
STCH	Stephanocostis chantiaicus GENKAL et KUZMIN																			
SALP	Stephanodiscus alpinus HUSTEDT	4.2	7.8	5.3	7	1.7	4.7	9	3.2	1.4		0.4	2.5	1.5	2.9	6.8	1.2	1.1	3.9	
SHAN	Stephanodiscus hantzschii < 12µm GRUNOW																			
SHAA	Stephanodiscus hantzschii = 12µm gemäss Datensatz Lotter																			
SHAB	Stephanodiscus hantzschii > 12µm gemäss Datensatz Lotter																			
STMI	Stephanodiscus minutulus (KUETZING) CLEVE et MOELLER	14	1				0.4	0.4	0.4	0.6									0.2	
SNEO	Stephanodiscus neoastraea HAKANSSON et HICKEL																			
SVES	Stephanodiscus vestibulis HAKANSSON, THIÉRIOT & STÖRMER			0.6	0.8	1.2	0.9	0.8	1										0.6	1.7
SANG	Surirella angusta KUETZING																			
SBIF	Surirella bifrons EHRENBURG																			
TFLO	Tabularia flocculosa (ROTH) KUETZING	2		0.2			0.6		0.4											
TPSN	Thalassiosira pseudonana (= Cycl. gordonensis Typ 1) gemäss Daten Lo.									0.2										20
	Anzahl gezählte Schalen	358	524	532	500	532	527	500	504	585	518	527	510	534	545	556	561	530	538	

**Eichdatensatz: TP Training Set 72 Seen von Prof. A. Lotter**

WA-PLS Statistik, siehe auch: ter Braak &amp; Juggins (1993), Hydrobiologia 269/270, 485-502.

Taxa Cost	Beta ("Optima")	SE of Beta	N	Max. Vorkommen	N2
ABIA	1.2312	0.175	38	2.27	27.853
ABIO	0.926	0.6624	1	0.69	1
ACLE	2.2289	1.2236	4	0.45	3.931
ACON	1.6091	0.2936	22	1.48	18.0592
ACUR	1.4241	1.779	2	1.62	1.5158
ADAO	0.5969	0.3948	5	1.06	4.4834
ADEL	0.6498	0.9224	1	0.45	1
ADID	0.926	0.6624	1	0.49	1
ADST	0.926	0.6624	1	0.49	1
AEXG	1.4744	0.7079	3	1.16	2.5621
AEXI	0.3432	0.2047	5	1.17	4.7936
AFLE	0.3514	0.3226	2	0.45	1.9446
AHEL	-0.7191	2.2541	1	0.88	1
AHIN	0.4292	1.1133	1	0.44	1
AHOS	3.5132	0.4241	4	0.45	3.9996
AJOU	-0.7191	2.2541	1	0.44	1
ALVU	0.926	0.6624	1	1.1	1
ALVS	1.361	0.2891	14	1.15	12.3829
ALBP	0.0654	1.4809	1	0.62	1
ALFR	0.9481	0.2045	23	1.8	19.0012
ALAN	1.3192	0.5355	11	0.62	10.7155
ALAR	1.4367	0.5178	14	0.62	13.653
ALAU	6.745	5.2529	1	0.45	1
ALVD	1.1751	0.5175	5	1.9	3.8239
ALUT	-0.0816	1.6422	1	0.45	1
AMAR	-0.00469	0.2181	2	0.44	2
AMSC	1.0539	0.4465	7	1.96	5.8024
AMAF	2.2327	0.7233	1	1.05	1
AMGR	1.4645	0.4977	6	0.98	5.5143
AMJA	0.7177	0.2206	18	1.38	15.7839
AMMA	4.1266	2.5956	1	0.62	1
AMIN	1.2842	0.087	68	6.57	42.635
AMSA	0.4514	0.4382	3	0.62	2.9268
AMIA	1.2988	0.5263	11	1.52	9.7769
AOBG	3.6052	0.8054	2	0.45	1.9997
AOST	2.1148	1.6851	2	0.49	1.9942
APET	1.3148	1.3848	2	0.62	1.9508
AROK	1.0933	0.7265	2	1.55	1.6897
ASCL	0.6018	0.7402	2	2.3	1.8853
ASAT	0.901	0.4361	4	1.09	3.6277
ASUC	0.926	0.6624	1	1.7	1
ATAE	1.4474	0.2533	1	0.62	1
ATRI	0.137	1.4092	1	0.45	1
AZIE	1.3871	0.3762	10	1.18	8.4357
APEL	0.9715	0.3064	12	3.84	5.3236
AMFO	1.2327	0.6911	4	0.62	3.9296
AINA	1.398	0.3479	5	0.98	4.2413
ALIB	1.4363	0.2485	24	4.73	12.0341
AMMO	-0.0748	1.6096	1	0.62	1
AOVA	1.2266	0.2971	18	3.16	11.3645
APED	1.6017	0.1921	52	3.37	33.0616
ATHU	0.5672	0.5209	5	0.88	4.5676
AVIT	0.8227	0.2346	18	1.98	13.2421
AFOR	2.0587	0.1903	64	6.55	45.1687
AAMB	1.8559	1.2479	5	4.65	3.2569
AUGR	2.9258	0.54	33	6.4	15.7613
AMUZ	1.6139	1.4256	4	1.76	3.299
CBAC	1.0891	0.2762	22	2.26	17.4565
CHYA	2.2807	0.7919	1	0.63	1
CSHU	1.9651	0.5231	2	1.08	1.9413
CSIL	1.3522	0.3056	15	0.89	14.0911
CHIB	1.6996	0.2872	1	1.25	1
CLVD	1.6996	0.2872	1	2.42	1
CNRC	1.6996	0.2872	1	0.62	1
CPLA	5.6116	2.3771	2	0.45	1.9976
SCPE	1.964	0.4369	2	0.62	1.9999
CPED	-0.1321	0.8074	2	0.45	1.9976

Taxa Cost	Beta ("Optima")	SE of Beta	N	Max. Vorkommen	N2
CPLA	1.2126	0.1851	32	0.76	30.655
CDUB	2.1725	0.3973	17	5.32	9.8244
CINV	2.9453	0.2821	23	2.55	16.9057
CATO	1.6445	0.2808	1	0.44	1
CBOA	0.0597	1.4996	1	0.44	1
CCMS	1.4948	0.1548	38	9.09	20.6509
CCCP	0.1996	0.9784	3	2.07	2.6026
CDTG	1.0589	0.4257	9	4.54	4.0722
CDUN	1.1823	0.2179	49	7.61	25.7711
CKRM	1.6481	0.2426	24	1.66	20.2499
CMEN	2.1714	0.6333	7	2.81	3.7482
COCE	1.4654	0.1945	46	8.24	25.0222
CPRA	1.4715	0.2249	31	2.37	23.7905
CPST	1.5628	0.1241	53	3.98	36.8251
CRAD	1.1652	0.0959	47	7.01	27.5005
CROS	1.3661	0.2389	23	1.91	18.6629
CSTE	1.1746	0.7684	5	2.7	3.4033
CWUE	1.9085	0.5823	6	0.45	5.9969
CELL	3.2173	1.6986	1	0.45	1
CSOL	0.2943	0.2479	3	1.77	1.8668
CAFF	0.7692	0.2432	18	1.08	16.4813
CAPH	0.9601	0.5773	6	0.63	5.8312
CANG	1.5471	1.4573	2	1.48	1.8189
CCAE	0.5939	0.4371	7	1.6	5.3981
CCES	1.8574	0.3528	7	0.63	6.6769
CCUS	1.061	0.6143	5	0.69	4.9047
CCYM	0.2351	1.3044	1	0.62	1
CDEL	0.8661	0.653	4	0.77	3.8599
CEHR	1.0401	0.3645	5	0.98	4.4378
CFAL	1.6506	0.8718	2	0.61	1.9765
CGRA	0.7986	0.2783	10	0.88	9.0851
CHEL	1.1262	0.4474	6	0.89	5.5573
CHUS	1.6785	0.9848	2	0.88	1.9417
CLEP	1.5716	0.2015	1	0.77	1
CMIC	1.151	0.1137	45	2.89	33.8038
CMSE	0.9661	0.2296	12	1.51	10.6663
CMIN	1.3559	0.1933	38	1.68	30.6807
CNAV	-0.2333	1.7709	1	0.44	1
CPUS	0.926	0.6624	1	0.69	1
CREI	1.0764	0.4998	1	0.97	1
CSLE	1.1108	0.1911	21	1.51	17.3591
CSIN	2.0705	1.0963	9	0.89	8.5898
CSAE	1.9438	1.0216	4	0.63	3.9998
CTLA	2.1129	0.6362	1	0.44	1
DKUE	2.2327	0.7233	1	0.61	1
DTEN	1.0884	0.197	32	4.33	19.6449
DMES	0.6208	0.2264	11	1.54	9.1291
DMON	1.461	0.4791	5	1.44	3.841
DITE	1.6609	0.5179	17	2.56	10.8559
DVUL	3.1124	1.2324	7	0.62	6.7763
DELL	1.572	0.7868	2	0.56	1.96
DMAR	1.8195	0.365	1	0.76	1
DMOD	1.8195	0.365	1	0.62	1
DOBL	0.6053	0.2164	11	5.53	4.6997
DOCU	1.3227	0.1862	19	3.22	11.3488
DOVA	1.1215	0.229	25	3.54	12.5325
DPAR	1.6408	0.9739	2	0.98	1.9685
EADN	2.7225	0.7103	2	0.63	1.9999
EBIL	0.6993	0.6497	3	0.62	2.9213
EGLA	-0.0748	1.6096	1	0.44	1
EUIN	1.4474	0.2533	1	0.62	1
EMIN	1.2563	0.9581	3	0.88	2.6765
EPRA	-0.0748	1.6096	1	0.44	1
ESOL	1.0727	0.5165	3	0.75	2.7976
ESUB	0.6863	0.9365	2	0.62	2
FBRE	0.8721	0.1201	39	5.76	21.952
FPCO	0.8016	0.5605	5	1.66	4.3677
FCON	0.8796	0.2057	29	4.08	20.5133
FELL	0.512	1.0388	1	0.63	1
FLAP	4.1266	2.5956	1	0.62	1

Taxa Cost	Beta ("Optima")	SE of Beta	N	Max. Vorkommen	N2
FPIN	0.8748	0.113	44	7.69	25.3698
FARC	1.0531	0.3858	9	1.73	6.8616
FCAH	0.9227	0.9867	2	0.89	1.6368
FCAU	1.0167	0.4803	7	2.09	5.0623
FCRU	-0.7151	2.2536	1	0.45	1
FCAP	1.9728	0.3253	17	1.23	15.2341
FCGR	1.4422	0.2963	21	1.62	18.1944
FCME	1.5041	0.4657	10	0.87	9.301
FCVA	1.6313	0.3387	25	1	22.4926
FCBI	0.7982	0.2561	13	2.44	9.1308
FCVE	0.9868	0.1143	47	4.04	33.3646
FCRO	2.9637	0.2685	43	6.47	27.451
FEXI	3.0953	1.5797	1	0.45	1
FFAM	0.6111	0.9505	1	0.62	1
FFAS	1.359	0.2518	1	1.49	1
FLAT	3.3138	1.7861	1	0.44	1
FLEP	1.1395	0.7183	4	1.74	3.2117
FLMA	0.7103	0.308	6	1.74	4.3867
FMON	-0.2062	0.4869	2	0.44	2
FNAN	1.2129	0.2232	30	5.67	18.2079
FPAR	1.4378	0.212	12	5.56	5.1386
FPSC	2.3765	0.8242	4	0.49	3.9918
FPIT	0.897	0.6612	1	0.32	1
FREI	-0.0816	1.6422	1	0.63	1
FROB	1.4731	0.8371	8	3.84	3.1582
FTEN	0.897	0.6612	1	0.32	1
FULN	1.9719	0.1238	53	1.26	47.1968
FUAC	1.6304	0.1293	60	5.97	37.165
FZEL	2.6068	1.139	1	0.62	1
FRSA	1.4474	0.2533	1	0.45	1
FVUL	0.7069	2.0433	2	1.6	1.5113
GACU	2.3626	0.3729	2	0.45	1.9997
GANG	1.6189	1.6146	3	0.62	2.9327
GANT	2.1889	0.5547	8	0.63	7.8583
GCLA	2.7795	1.3311	1	0.62	1
GGLI	4.3039	2.8388	1	0.62	1
GGRA	1.5892	0.4632	3	0.62	2.9354
GGRO	-0.0748	1.6096	1	0.44	1
GMIC	0.4547	0.5414	4	0.63	3.8896
GOLI	2.613	0.9932	8	0.76	7.6542
GPXS	0.7199	0.4596	3	0.98	2.7433
GPAR	1.774	0.8055	5	0.88	4.6791
GPUM	0.9363	0.3149	11	1.89	8.6261
GTER	0.00418	0.581	2	1.34	1.7701
GTRU	1.7983	0.5927	6	0.75	5.6893
GYAC	1.0878	0.1624	28	2.19	21.7038
GYAT	1.8195	0.365	1	0.76	1
HAMP	1.1529	1.2485	3	0.61	2.9384
MVAR	1.1235	0.5077	10	0.96	9.0295
MCIR	1.7662	0.3315	27	1.26	24.1321
NABL	1.4854	0.2135	1	0.62	1
NACO	2.1149	2.3112	2	0.45	1.9931
NAER	1.0764	0.4998	1	0.56	1
NATO	6.745	5.2529	1	0.77	1
NBAC	0.5112	0.5335	2	0.44	2
NBRY	1.2339	1.4585	2	0.44	2
NCAP	1.478	1.0239	4	0.62	3.9036
NCIN	7.3139	5.8112	1	0.45	1
NCTT	0.1255	1.4156	1	0.32	1
NCOC	0.574	0.9715	1	0.45	1
NCOH	0.0678	1.4853	1	0.44	1
NCOF	1.4474	0.2533	1	0.62	1
NCON	4.7781	2.6585	2	0.63	1.9999
NCOS	1.6996	0.2872	1	1.53	1
NCRC	-0.0816	1.6422	1	0.63	1
NCRY	1.191	0.2766	25	5.75	10.6887
NCTE	1.3868	0.1728	48	1.18	41.7809
NCUS	1.4163	0.9261	3	0.69	2.8622
NDET	1.1945	0.4201	2	0.69	1.9067
NDIG	1.0764	0.4998	1	0.4	1

Taxa Cost	Beta ("Optima")	SE of Beta	N	Max. Vorkommen	N2
NELG	3.6103	0.4079	2	0.62	1.9995
NEXG	1.359	0.2518	1	0.44	1
NEXP	1.4474	0.2533	1	0.88	1
NGPE	0.2568	0.8477	2	0.63	1.9692
NGOE	3.6711	1.1573	2	0.62	1.9439
NGOT	2.9518	1.4339	1	0.44	1
NGRO	0.9573	0.7456	2	0.44	2
NGRE	2.3069	0.9795	11	0.99	10.0897
NHAL	1.0764	0.4998	1	0.56	1
NINO	4.1266	2.5956	1	0.44	1
NIAC	-0.7151	2.2536	1	0.62	1
NIPA	3.0953	1.5797	1	0.62	1
NINS	0.926	0.6624	1	0.49	1
NJAR	0.8641	0.4621	2	0.63	1.9459
NKRA	0.926	0.6624	1	0.49	1
NLAE	1.4474	0.2533	1	0.77	1
NLAN	1.1381	0.1891	31	1.58	27.2019
NLAP	0.367	0.7155	2	0.62	1.9729
NLTK	2.7795	1.3311	1	0.44	1
NLEN	1.7761	0.4558	5	6.55	1.8531
NLUN	1.3765	0.8875	4	0.77	3.845
NMED	-0.0748	1.6096	1	0.62	1
NMEN	1.3141	0.1995	40	3.63	21.3128
NMIN	0.9927	0.3413	11	1.09	10.3863
NMIS	0.7419	0.5059	5	0.61	4.8019
NMNO	1.4097	0.241	6	1.7	4.4179
NMOD	1.5056	0.9497	5	0.62	4.8887
NMLF	-0.1234	0.2539	2	1.3	1.6182
NMUT	0.655	0.8893	1	0.62	1
NOBL	2.7013	0.4993	6	0.62	5.8373
NPEL	0.349	0.539	2	0.62	1.9439
NPHY	0.8665	1.1942	2	0.45	1.9446
NPLA	1.5735	0.7321	2	0.88	1.6423
NPRA	0.655	0.8893	1	0.87	1
NPRO	-0.0748	1.6096	1	0.62	1
NPAG	2.3423	0.8549	1	0.62	1
NPSC	1.3998	0.6163	3	0.45	2.9976
NPVE	-0.7191	2.2541	1	1.25	1
NPUP	1.0374	0.1674	38	2.08	28.6982
NPAQ	1.1751	0.7553	4	3.35	2.4324
NPUM	1.0526	0.2648	4	1.47	3.4845
NPPP	1.7635	0.5041	2	0.88	1.9466
NRAD	0.3344	0.6348	2	0.44	1.9514
NRFA	1.1901	1.0913	3	0.89	2.7936
NRCH	1.5819	0.7747	5	0.45	4.9899
NRHY	1.3395	0.1919	22	2.53	14.1781
NRTD	1.6982	0.7982	3	0.76	2.796
NSMM	0.6047	0.791	2	1.84	1.7729
NSCH	1.0342	1.2231	4	0.99	3.6846
NSEM	1.4786	0.4173	15	1.39	13.1012
NSTR	1.8924	0.5633	1	0.32	1
NSCS	2.0028	2.2698	2	0.62	1.9439
NSBH	2.4617	1.5969	2	0.62	1.9508
NSLU	0.137	1.4092	1	0.77	1
NSBM	2.1947	0.9166	4	0.89	3.7773
NSBP	0.655	0.8893	1	0.87	1
NSBR	0.1309	0.3529	5	1.25	4.5501
NTPT	3.0153	0.8973	11	0.89	10.1045
NTRV	1.1075	0.4659	8	1.16	7.4297
NTOL	0.1255	1.4156	1	0.82	1
NTUS	1.2767	2.7674	2	0.45	1.9997
NTMI	0.512	1.0388	1	0.63	1
NUTE	1.1388	0.4228	15	1.32	13.0617
NVEN	0.205	0.4587	3	0.44	3
NVIR	4.1266	2.5956	1	0.62	1
NVTB	0.3279	0.6678	11	4.13	4.9376
NVIO	4.1266	2.5956	1	0.44	1
NWIL	1.638	0.449	8	2.98	4.9716
NEAM	2.2559	0.2619	2	0.62	2
NEDU	0.7436	0.2826	8	0.62	7.7766

Taxa Cost	Beta ("Optima")	SE of Beta	N	Max. Vorkommen	N2
NIRI	3.2173	1.6986	1	0.45	1
NACI	1.0474	1.485	2	0.44	2
NAGN	0.926	0.6624	1	0.98	1
NAMP	2.744	0.7231	4	0.87	3.656
NIAN	0.9792	0.4706	10	1.1	8.6543
NAGF	2.1543	0.4929	3	3.89	1.6551
NIAR	2.6988	1.0281	6	0.63	5.9206
NBCL	0.064	0.2071	5	1.39	4.4837
NCPL	2.4875	0.631	3	0.74	2.7701
NDIS	1.9943	0.2792	39	1.65	33.5304
NDME	1.8993	1.032	10	0.77	9.4256
NELE	1.6156	0.2488	1	0.44	1
NFON	1.5725	0.3997	15	0.77	14.2894
NIFR	0.9731	0.254	13	0.77	12.4608
NIGF	2.0114	0.3738	5	1.32	4.6266
NIGR	1.4253	0.3954	9	1.16	8.0054
NHEU	1.1709	0.4411	6	0.45	5.9306
NICN	0.2218	0.4687	5	0.45	4.9994
NINC	0.4364	0.2766	2	0.45	2
NILA	1.3162	0.1812	25	1.58	21.0891
NLBT	2.2807	0.7919	1	0.63	1
NLIN	1.3619	0.5686	8	0.93	7.2294
NLSU	2.8942	1.3834	1	0.45	1
NPAL	1.5529	0.898	6	0.88	5.5481
NPAD	-0.0748	1.6096	1	1.15	1
NPAE	1.9859	0.3893	14	1.68	10.2481
NIPM	0.6659	0.9344	2	1.15	1.9986
NIPR	0.3056	0.2764	8	0.63	7.8064
NIPU	1.9041	0.7712	8	0.88	7.5254
NREC	2.0062	0.7148	9	0.62	8.8696
NSIO	0.5764	1.0266	1	0.44	1
NSDE	0.897	0.6612	1	0.32	1
NSOC	0.8807	0.6401	6	0.62	5.8386
NSUA	1.4854	0.2135	1	0.62	1
NZSU	1.1272	0.3694	6	1.39	5.3182
PINT	1.6177	0.2703	3	1.52	2.3568
PLAP	0.655	0.8893	1	0.44	1
PMAJ	1.1248	1.4355	3	0.44	3
PMIC	1.1533	0.4198	20	4.34	9.8549
POBS	3.2173	1.6986	1	0.45	1
PSCA	0.926	0.6624	1	0.49	1
PSRO	2.2807	0.7919	1	0.63	1
PVIR	1.5045	1.4784	2	0.63	1.8075
RABB	5.4317	3.0976	2	0.62	1.9439
RGIB	0.5355	0.4021	3	0.45	2.9924
SIDE	2.032	0.2945	4	1.41	3.1995
SAGR	0.7004	0.3622	6	0.88	5.6172
SPHO	0.8396	0.8542	2	0.44	1.9514
SPRO	-0.4316	0.6436	2	0.62	1.8151
SSMI	1.7483	0.4864	7	0.62	6.7065
SALP	1.9034	0.2808	23	2.07	17.754
SHAN	2.6969	0.2487	25	3.44	17.7845
SMED	3.3138	1.7861	1	0.44	1
STMI	2.2064	0.3582	12	0.77	11.4858
SPAV	2.5007	0.2063	56	9.05	33.6885
SANG	2.7538	0.422	4	0.61	3.8857
SBRE	1.3237	0.8042	5	0.63	4.8469
SLIN	1.5425	0.328	8	1.26	6.4316
SUMI	2.2807	0.7919	1	0.45	1
SURO	1.0581	1.1268	2	1.07	1.997
SSPI	1.6996	0.2872	1	0.62	1
TFEN	2.5251	0.7196	7	2.27	5.238
TFLO	1.1118	0.4935	9	1.94	6.8694
TPSN	0.9512	0.3845	21	5.24	11.1314

Beta: eigentlichen Optima, aber nicht mit WA-Optima vergleichbar

SE: Standard Error der Betas, durch jackknifing errechnet

N: Anzahl vorkommen der Art im Training set

Max. Vorkommen: maximales Prozentuales Vorkommen im Training set

N2: Diversitäts Mass nach Hill (1973), Ecology 54, 427-432. Mass für die Anzahl häufiger Arten

## **Anhang B**

### **Unterlagen zur Datierung des Sedimentkernes PFÄ00-2 Isotopenmessungen**

**Projekt :** Pfäffikersee 2000  
**Station :** PFÄ00-2, tiefste Stelle  
**Wassertiefe:** 32 m  
**Probenahmedatum :** 21. Juni 2000  
**EAWAG corer Ø63mm:** entnommen durch A.Zwyszig  
**Auswertung:** M.Sturm / 28.3.2001

Probe-Nr.	Sedimentation		Alter		Alter oben	Alter unten	Isotopen-messungen	<sup>7</sup> Be, <sup>137</sup> Cs Maximum	Lithologie	Bemerkungen	
	oben [cm]	unten [cm]	[mm/y]	[y/cm]							
00-2_00	1	0	1	3.3	3	2000	1997	7Be,137Cs,210Pb	2000/ <sup>7</sup> Be	schwarz/Varven	sichere V.Zählung
00-2_00	2	1	2	3.3	3	1997	1993	137Cs,210Pb		schwarz/Varven	sichere V.Zählung
00-2_00	3	2	3	2.5	4	1993	1990	137Cs,210Pb		schwarz/Varven	sichere V.Zählung
00-2_00	4	3	4	3.3	3	1990	1987	137Cs,210Pb		schwarz/Varven	sichere V.Zählung
00-2_00	5	4	5	3.3	3	1987	1984	137Cs,210Pb	1986/ <sup>137</sup> Cs	schwarz/Varven	sichere V.Zählung
00-2_00	6	5	6	3.3	3	1984	1982	137Cs,210Pb		schwarz/Varven	sichere V.Zählung
00-2_00	7	6	7	5	2	1982	1979	137Cs,210Pb		schwarz/Varven	sichere V.Zählung
00-2_00	8	7	8	3.3	3	1979	1976	137Cs,210Pb		schwarz/Varven	sichere V.Zählung
00-2_00	9	8	9	3.3	3	1976	1973	137Cs,210Pb		schwarz/Varven	sichere V.Zählung
00-2_00	10	9	10	3.3	3	1973	1970	137Cs,210Pb		schwarz/Varven	sichere V.Zählung
00-2_00	11	10	11	3.3	3	1970	1967	137Cs,210Pb		schwarz/Varven	sichere V.Zählung
00-2_00	12	11	12	3.3	3	1967	1964	137Cs,210Pb		schwarz/Varven	sichere V.Zählung
00-2_00	13	12	13	3.3	3	1964	1961	137Cs,210Pb	1963/ <sup>137</sup> Cs	schwarz[±Varven]	unsichere V.-Zählung
00-2_00	14	13	14	3.3	3	1961	1958	137Cs,210Pb		schwarz[±Varven]	unsichere V.-Zählung
00-2_00	15	14	15	3.3	3	1958	1955	137Cs,210Pb		schwarz[±Varven]	unsichere V.-Zählung
00-2_00	16	15	16	3.3	3	1955	1952	137Cs,210Pb		schwarz[±Varven]	unsichere V.-Zählung
00-2_00	17	16	17	3.3	3	1952	1949	137Cs,210Pb		schwarz[±Varven]	unsichere V.-Zählung
00-2_00	18	17	18	3.3	3	1949	1947	137Cs,210Pb		schwarz[±Varven]	unsichere V.-Zählung
00-2_00	19	18	19	5	2	1947	1943	137Cs		schwarz[±Varven]	unsichere V.-Zählung
00-2_00	20	19	20	2.5	4	1943	1940	137Cs,210Pb		schwarz[±Varven]	unsichere V.-Zählung
00-2_00	21	20	21	3.3	3	1940	1937			schwarz[±Varven]	unsichere V.-Zählung
00-2_00	22	21	22	3.3	3	1937	1934			schwarz[±Varven]	unsichere V.-Zählung
00-2_00	23	22	23	3.3	3	1934	1931			schwarz[±Varven]	unsichere V.-Zählung
00-2_00	24	23	24	3.3	3	1931	1928			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	25	24	25	3.3	3	1928	1925			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	26	25	26	3.3	3	1925	1922			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	27	26	27	3.3	3	1922	1919			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	28	27	28	3.3	3	1919	1916			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	29	28	29	3.3	3	1916	1913			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	30	29	30	3.3	3	1913	1910			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	31	30	31	3.3	3	1910	1907			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	32	31	32	3.3	3	1907	1904			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	33	32	33	3.3	3	1904	1901			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	34	33	34	3.3	3	1901	1898			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	35	34	35	3.3	3	1898	1895			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	36	35	36	3.3	3	1895	1892			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	37	36	37	3.3	3	1892	1889			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	38	37	38	3.3	3	1889	1886			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	39	38	39	3.3	3	1886	1883			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	40	39	40	3.3	3	1883	1880			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	41	40	41	3.3	3	1880	1877			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	42	41	42	3.3	3	1877	1874			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	43	42	43	3.3	3	1874	1871			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	44	43	44	3.3	3	1871	1868			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	45	44	45	3.3	3	1868	1865			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	46	45	46	3.3	3	1865	1862			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	47	46	47	3.3	3	1862	1859			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	48	47	48	3.3	3	1859	1856			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	49	48	49	3.3	3	1856	1853			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	50	49	50	3.3	3	1853	1850			hellgrau	Extrapolation

Probe-Nr.	oben		unten	Sedimentation		Alter		Isotopen-messungen	<sup>7</sup> Be, <sup>137</sup> Cs Maximum	Lithologie	Bemerkungen
	[cm]	[cm]	[cm]	[mm/y]	[y/cm]	oben	unten				
00-2_00	51	50	51	3.3	3	1850	1847			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	52	51	52	3.3	3	1847	1844			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	53	52	53	3.3	3	1844	1841			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	54	53	54	3.3	3	1841	1838			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	55	54	55	3.3	3	1838	1835			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	56	55	56	3.3	3	1835	1832			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	57	56	57	3.3	3	1832	1829			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	58	57	58	3.3	3	1829	1826			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	59	58	59	3.3	3	1826	1823			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	60	59	60	3.3	3	1823	1820			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	61	60	61	3.3	3	1820	1817			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	62	61	62	3.3	3	1817	1814			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	63	62	63	3.3	3	1814	1811			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	64	63	64	3.3	3	1811	1808			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	65	64	65	3.3	3	1808	1805			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	66	65	66	3.3	3	1805	1802			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	67	66	67	3.3	3	1802	1799			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	68	67	68	3.3	3	1799	1796			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	69	68	69	3.3	3	1796	1793			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	70	69	70	3.3	3	1793	1790			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	71	70	71	3.3	3	1790	1787			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	72	71	72	3.3	3	1787	1784			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	73	72	73	3.3	3	1784	1781			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	74	73	74	3.3	3	1781	1778			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	75	74	75	3.3	3	1778	1775			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	76	75	76	3.3	3	1775	1772			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	77	76	77	3.3	3	1772	1769			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	78	77	78	3.3	3	1769	1766			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	79	78	79	3.3	3	1766	1763			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	80	79	80	3.3	3	1763	1760			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	81	80	81	3.3	3	1760	1757			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	82	81	82	3.3	3	1757	1754			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	83	82	83	3.3	3	1754	1751			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	84	83	84	3.3	3	1751	1748			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	85	84	85	3.3	3	1748	1745			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	86	85	86	3.3	3	1745	1742			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	87	86	87	3.3	3	1742	1739			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	88	87	88	3.3	3	1739	1736			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	89	88	89	3.3	3	1736	1733			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	90	89	90	3.3	3	1733	1730			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	91	90	91	3.3	3	1730	1727			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	92	91	92	3.3	3	1727	1724			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	93	92	93	3.3	3	1724	1721			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	94	93	94	3.3	3	1721	1718			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	95	94	95	3.3	3	1718	1715			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	96	95	96	3.3	3	1715	1712			hellgrau	Extrapolation
00-2_00	97	96	97	3.3	3	1712				hellgrau	Extrapolation

<b>Projekt :</b>		<b>Pfäffikersee</b>													
<b>Station :</b>		<b>PFÄ00-2</b>													
<b>Probenahmedatum :</b>		<b>21.06.2000; Zwysig, Hürlimann, Niederhauser</b>													
<b>Messblatt <math>\gamma</math>-Messung:</b>		<b>EAWAG</b>													
Probe Nr.	Tiefe		Gew. [g]	Be-7		K-40		Cs-137		Pb-210					
	oben [cm]	unten [cm]		2s Err. [Bq/kg]	2s Err. [Bq/kg]	2s Err. [Bq/kg]	2s Err. [Bq/kg]								
00-2_00 1	0	1	2.6319	99	±	68	210	±	106	40	±	9	281	±	56
00-2_00 2	1	2	3.2166				209	±	110	56	±	11	326	±	61
00-2_00 3	2	3	3.5932				194	±	90	78	±	14	240	±	47
00-2_00 4	3	4	3.4658				201	±	62	146	±	24	216	±	35
00-2_00 5	4	5	3.3096				216	±	96	975	±	157	226	±	50
00-2_00 6	5	6	3.5612				300	±	109	318	±	53	166	±	41
00-2_00 7	6	7	3.8361				199	±	79	50	±	9	153	±	34
00-2_00 8	7	8	3.6558				178	±	80	49	±	9	145	±	34
00-2_00 9	8	9	3.7972				156	±	54	32	±	6	132	±	26
00-2_0 10	9	10	3.5334				136	±	84	33	±	8	139	±	39
00-2_0 11	10	11	3.63				243	±	76	57	±	10	99	±	27
00-2_0 12	11	12	4.5868				109	±	61	86	±	15	96	±	28
00-2_0 13	12	13	3.5985				207	±	65	245	±	40	101	±	24
00-2_0 14	13	14	4.0022				177	±	80	86	±	15	86	±	30
00-2_0 15	14	15	4.5489				165	±	60	84	±	15	89	±	23
00-2_0 16	15	16	3.9937				192	±	84	72	±	13	104	±	33
00-2_0 17	16	17	4.0807				113	±	64	8	±	3	94	±	29
00-2_0 18	17	18	4.0053				142	±	75	4	±	3	74	±	28
00-2_0 19	18	19	3.9759					±			±			±	
00-2_0 20	19	20	4.1291				274	±	94	4	±	3	68	±	28

Tab. B1: Isotopenmessungen Pfäffikersee-Sedimentkern PFÄ00-2.