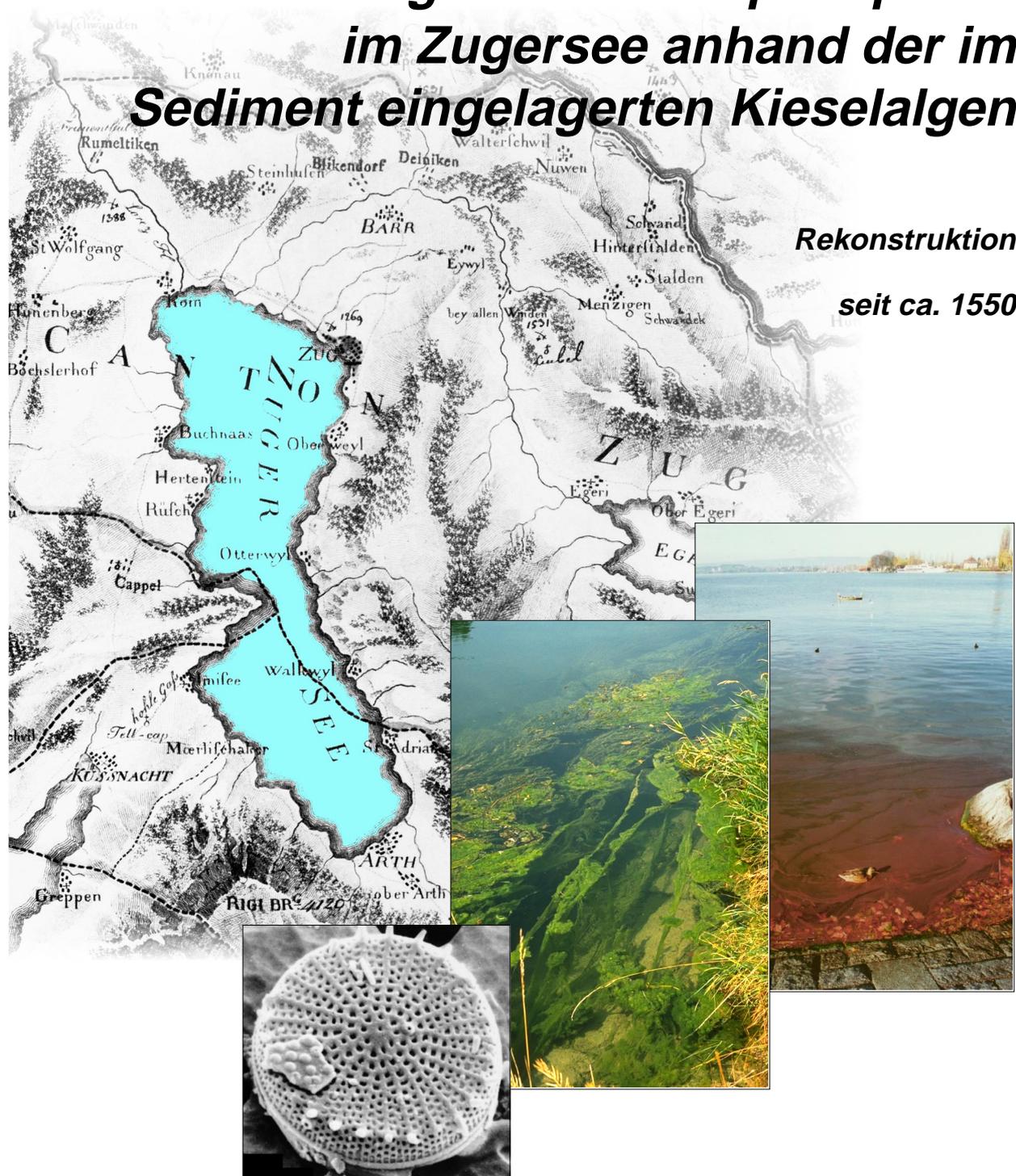


# Entwicklung des Gesamtphosphors im Zugersee anhand der im Sediment eingelagerten Kieselalgen



Unterägeri, Juni 2001

**AquaPlus**  
AquaPlus

**Elber Hürlimann Niederberger**  
Angewandte Ökologie  
Gewässer- und Fischereifragen  
Landschafts- und Naturschutzplanung

Gewerbestrasse 5a CH-6314 Unterägeri  
Telefon 041 / 750 50 09  
Fax 041 / 750 50 28

### **Titelbild**

Hintergrund: Kartenausschnitt aus dem Meyer-Weiss-Atlas (1796/1802)

Unten rechts: Blaualgenblüte *Planktothrix (Oscillatoria) rubescens* (Aufnahme AquaPlus, Unterägeri)

Unten Mitte: Grünalgenbewuchs *Cladophora glomerata* (Aufnahme AquaPlus, Unterägeri)

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

Alle drei Algen sind typisch für eutrophe, d.h. nährstoffreiche Seen.

---

# 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 Zugersee</b>	<b>3</b>
3.1	Kurze Literaturzusammenstellung	3
3.2	Aktuelle Geschichte der trophischen Verhältnisse im Zugersee und im Einzugsgebiet	3
<b>4.</b>	<b>Grundlagen und verwendete Methoden</b>	<b>7</b>
4.1	Sedimentkern ZG99-2 und Datierung	7
4.2	Kieselalgen	9
4.3	Trophiegradbestimmung aus chemischen Daten	12
<b>5.</b>	<b>Resultate</b>	<b>13</b>
5.1	Kieselalgen-Stratigraphie	13
5.2	Taxazahl und Diversität	16
5.3	Gesamtphosphor-Rekonstruktion	16
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</b>	<b>23</b>
<b>7.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>26</b>
	<b>ANHANG</b>	<b>29</b>

A	Resultate der Schnellzählung und Auflistung der ausgezählten Proben	30
	Relative Kieselalgenschalendichte pro 1-cm-Sedimentschicht	31
	Kieselalgen-Zählresultate	32
B	Unterlagen zur Datierung des Sedimentkernes ZG99-2	38
	Isotopenmessungen	41
	Gefrierkern ZG00-A	42
C	Wassergehalt des Sedimentkernes ZG99-2	43

## 1. Einleitung

Die Rückführung der Seen in einen mittelnährstoffreichen Zustand ist als Zielsetzung in der Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 formuliert. Ausgenommen von dieser Verpflichtung sind Seen, welche eine hohe biologische Produktion auf Grund besonderer natürlicher Verhältnisse aufweisen. Sanierungsbedarf ist dann gegeben, wenn ein See, in welchem heute eine hohe biologische Produktion vorherrscht, unter natürlichen Verhältnissen eine geringe oder mittlere biologische Produktion aufweisen würde. Bei Seen mit einer hohen biologischen Produktion muss also abgeklärt werden, ob diese Produktion auf natürlichen Ursachen basiert oder ob sie durch menschliche Einflüsse verursacht worden ist.

Die Nährstoffverhältnisse in einem See stehen in engem Zusammenhang mit der biologischen Produktion (landläufig als Algenwachstum bezeichnet). Eine intensivierete Nährstoffversorgung führt in der Regel zu einer höheren biologischen Produktion. Der Zustand eines Sees kann deshalb einerseits über die Konzentration der Nährstoffe im Seewasser, andererseits über die Menge und Zusammensetzung der im Wasser vorkommenden Lebensgemeinschaft charakterisiert werden. Da die Wasserqualität in den Schweizer Seen erst ab der zweiten Hälfte des 20. Jahrhundert regelmässig untersucht wurde, müssen zur Abklärung der weiter zurückliegenden Nährstoffverhältnisse paläolimnologische Methoden hinzugezogen werden. Die Paläolimnologie befasst sich mit der Untersuchung von Überresten der Lebensgemeinschaften in den Seesedimenten (z.Bsp. Überreste von pflanzlichen Farbstoffen, Kieselalgenschalen, etc.). Da die Sedimente durch die kontinuierliche Ablagerung von im See entstandenen Material und aus dem Einzugsgebiet zugeführten Material in die Höhe wachsen, beschreibt der vertikale Aufbau der Sedimente die früheren Zustände im See.

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 geschlossen werden. Für die zeitliche Zuordnung ist die Datierung der Sedimentablagerung Voraussetzung.

Durch die Untersuchung der Zusammensetzung der Kieselalgenschalen in den Sedimenten des Zugersees und die Datierung der Sedimente konnte die Nährstoffentwicklung des Zugersees in den vergangenen rund 550 Jahren rekonstruiert werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen dienen der Überprüfung der Sanierungsnotwendigkeit und der bereits früher festgelegten Sanierungsziele.

## 2. Auftragserteilung

Der Auftrag 'Rekonstruktion des früheren trophischen Zustandes im Zugersee mit im Sediment eingelagerten Schalen von Kieselalgen' wurde am 22. September 1999 an die Firma AquaPlus in Unterägeri erteilt. Als Auftraggeber zeichnet das Amt für Umweltschutz der Baudirektion des Kantons Zug. Die Arbeiten erfolgten in Zusammenarbeit mit dem Amt für Umweltschutz (Kernentnahme, Kapitel 1, 3.2, 4.1), Dr. Eva Binderheim-Bankay, Rümlang (Kernentnahme, Präparation der Kieselalgen unter

Anleitung von AquaPlus), 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 Bestimmung und Zählung der Kieselalgen, die Rekonstruktion der trophischen Verhältnisse sowie die Berichterstattung erfolgte durch AquaPlus.

### **3. Bisherige Erkenntnisse und Messdaten zur Nährstoffentwicklung im Zugersee**

#### **3.1 Kurze Literaturzusammenstellung**

Der Zugersee wird seit nicht ganz 100 Jahren limnologisch untersucht. Aufgrund der limnologischen Literaturzusammenstellung von Märki (1949) und der Literatursammlung von AquaPlus sind Uttinger (1900), Nussbaumer (1909), Brutschy (1912), Lantzschi (1914), Iten (1933) und Steiner (1944) als älteste limnologische Werke zu erwähnen. Mit der Arbeit von Nussbaumer (1909) wird im Rahmen einer Dissertation schon früh die Verunreinigung von Seen durch Einleitung städtischer Abwässer unter spezieller Berücksichtigung des Zugersees abgehandelt. Weitere ältere, aber regelmässig über den Zustand des Zugersees berichtende Arbeiten sind Regierungsrat Zug (1949-1953), Jaag (1958) und Thomas (1966-1973). Als neuere und zum Teil sehr aktuelle Arbeiten sind Thompson & Kelts (1974), Ruhlé (1976, 1977), Ambühl (1977), Kelts (1978), Soraccreppa (1978), Steinert (1982), Züllig (1982), EAWAG (1984), Fahrni & Liechti (1984), Imboden (1984), Speck (1984), Livingstone (1993, 1997), Bloesch & Sturm (1986), Basler & Partner (1988), Imboden et al. (1988), Locher & Cie AG (1988), Ziegler (1989), J.A.M. (1990), Regierungsrat Zug (1990), Rupper et al. (1990), Aeschbach-Hertig (1994), EAWAG (1994), Jaquet et al. (1994), Gloor (1995), Kunze (1995), Moor (1995), Wehrli et al. (1995), Mengis (1996), Moor et al. (1996), Iseli (1997), Mengis et al. (1997a, b), Keller (1998), GVRZ (1998) und Wüest & Gloor (1998) bekannt. Die grosse Zahl der Arbeiten, Berichte und Publikationen illustriert, dass der Zugersee seit über 20 Jahren von wissenschaftlichem Interesse ist. Diese neueren Arbeiten behandeln neben fischbiologischen, sedimentspezifischen sowie chemisch-physikalischen Aspekten vor allem verschiedene Möglichkeiten zur Sanierung des Zugersees.

#### **3.2 Aktuelle Geschichte der trophischen Verhältnisse im Zugersee und im Einzugsgebiet**

In der oben zitierten Literatur sind schon früh limnologische Beobachtungen von gewässerökologischen Veränderungen aufgeführt, die auf eine Verschlechterung des Nährstoffzustandes im Zugersee schliessen lassen. Gemäss Jaag (1958, erwähnt in Züllig 1982) waren dies:

1898: Auftreten der Burgunderblutalge *Oscillatoria rubescens* [heute *Planktothrix rubescens* genannt] als erstes Anzeichen einer beginnenden Eutrophierung.

1903: Erste Klagen über den Rückgang der Rötel-Erträge.

1913: Erste Anzeichen von Schwefeleiseneinlagen (Eisensulfid) im Sediment und damit Sauerstoffdefizite an der tiefsten Stelle.

Seit dem Beginn der 1970er-Jahre wird die Wasserqualität im Zugersee monatlich untersucht. Untersuchungsparameter sind die wichtigen, im Wasser gelösten Stoffe, welche in allen grossen Schweizer Seen analysiert werden. Damit Masseninhalte berechnet werden können, wird über der tiefsten Stelle im Südbecken ein Seeprofil gemessen. Biologische Daten, welche Hinweise über den Trophiegrad geben, werden (mit Ausnahme der langjährigen Fischfangstatistik) nicht regelmässig erhoben. Die letzte Phase der Nährstoffanreicherung sowie der Rückgang der Nährstoffinhalte kann mit den vorhandenen Daten eindrücklich dargestellt werden.

Der in unseren Seen normalerweise das pflanzliche Wachstum limitierende Stoff ist Phosphor. Aus diesem Grund dient der Messparameter Phosphor als Leitgrösse für die Kontrolle der Rückführung des Zugersees in einen nährstoffärmeren Zustand. Während der Zugersee im Zenit seiner Eutrophierung in den frühen 1980er-Jahre rund 650 Tonnen Gesamtphosphor enthielt, hat sich der Inhalt in den vergangenen 20 Jahren um 40% auf rund 400 Tonnen verringert (Abb. 1). Heute beträgt die mittlere Phosphor-Konzentration, berechnet aus dem Quotienten des Phosphorinhalts und dem Seevolumen, rund 0.12 Milligramm pro Liter. Die Phosphorkonzentration während der Frühjahreszirkulation liegt wenig tiefer. Trotz des markanten Nährstoffrückganges stellt dieser Wert noch immer hoch eutrophe Verhältnisse dar.

Verantwortlich für die Eutrophierung in der Vergangenheit ist einerseits die starke Bevölkerungszunahme, andererseits die Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion im Einzugsgebiet des Zugersees (Abb. 2). Obwohl bereits vor 1977 die häuslichen Abwässer in kommunalen Kläranlagen gereinigt wurden, konnte der Zugersee erst mit der Inbetriebnahme der Kläranlage Schönau an der Unteren Lorze im Jahre 1977 von den Nährstoffbeiträgen der gereinigten Abwässer verschont werden. Zu diesem Zeitpunkt aber war das Kanalisationssystem (Ringleitung) um den Zugersee, welche die häuslichen Abwässer der Gemeinden sammelt und der Kläranlage Schönau zuführt, noch nicht fertig gestellt. Die Vollendung dieser Ringleitung erfolgte im Jahre 1991. Heute sind 15 Gemeinden an die Kläranlage Schönau angeschlossen. Der Endausbau der Kläranlage Schönau in den Jahren 1992-1998 erhöhte die Reinigungskapazität auf 145'000 Einwohnergleichwerte. Häusliches Abwasser gelangt heute praktisch nur noch bei jährlich wenigen Entlastungen der Schmutzwasserkanalisation sowie in geringen Mengen von einzelnen nicht angeschlossenen Häusern abseits der Kanalisation in den Zugersee (GVRZ 1998).

Nach dem 2. Weltkrieg bis in die 80er-Jahre des 20. Jahrhunderts wurde in der ganzen Schweiz die landwirtschaftliche Produktion sukzessive gesteigert. Dies zeigen sowohl die Zunahme der Tierbestände, als auch der Verbrauch von Mineräldünger (Abb. 2). Mit der Neuorientierung der Agrarpolitik in einem ersten Schritt ab 1993 zur integrierten Produktion (IP) und ab 1999 weitergehend zum ökologischen Leistungsnachweis (ÖLN) sind in den vergangenen 10 Jahren die Tierbestände und der Einsatz von Mineräldünger deutlich zurückgegangen.

Sowohl in der Siedlungsentwässerung als auch in der Landwirtschaft sind in den letzten Jahrzehnten wesentliche Voraussetzungen zur Rückführung des Zugersees in den wenig belasteten Zustand geschaffen worden.

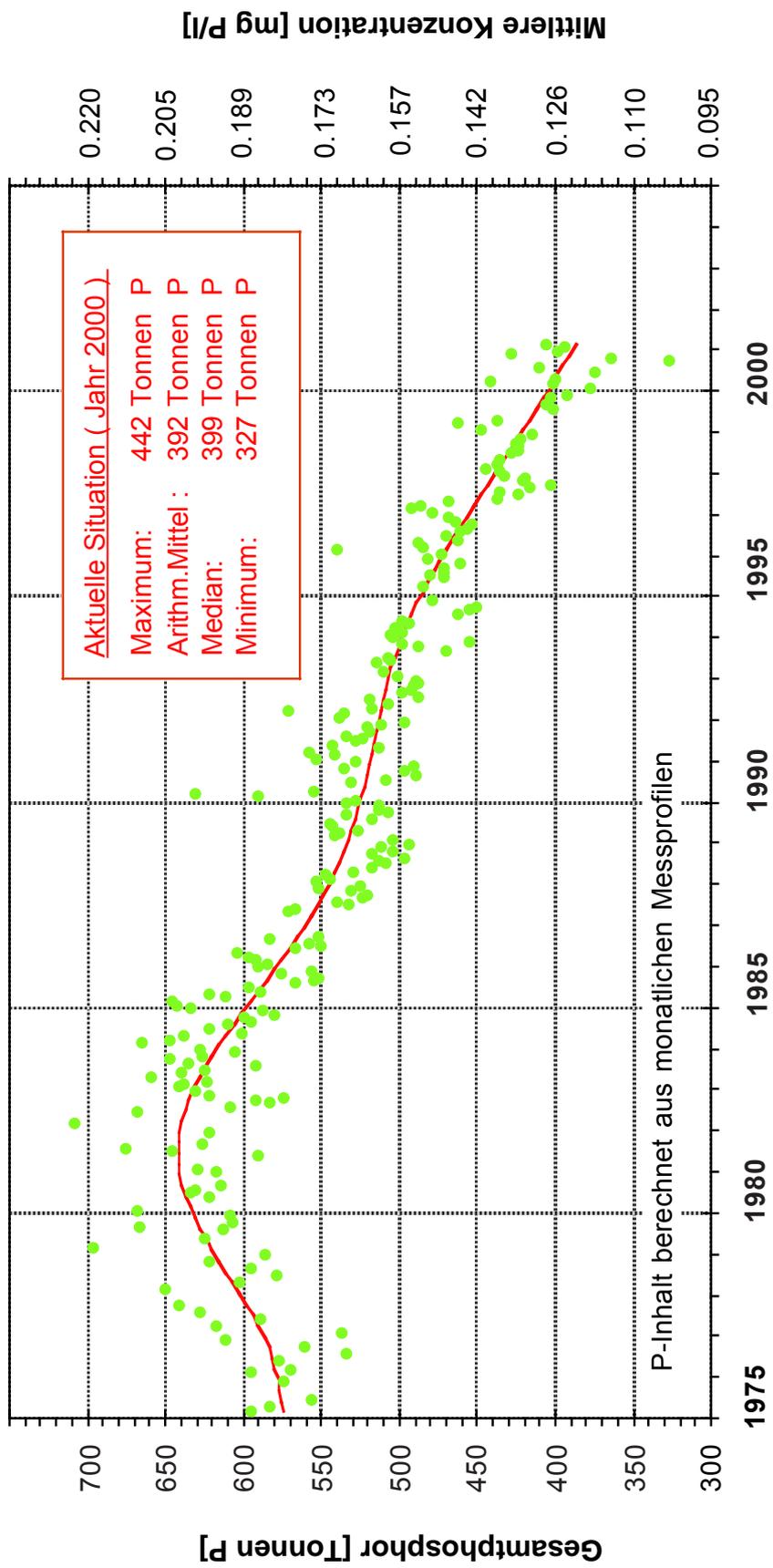


Abb. 1. Entwicklung des Gesamtposphors im Zugersee. Inhalt und mittlere Konzentrationen von 1975 bis 2000 gemäss Amt für Umweltschutz Zug.

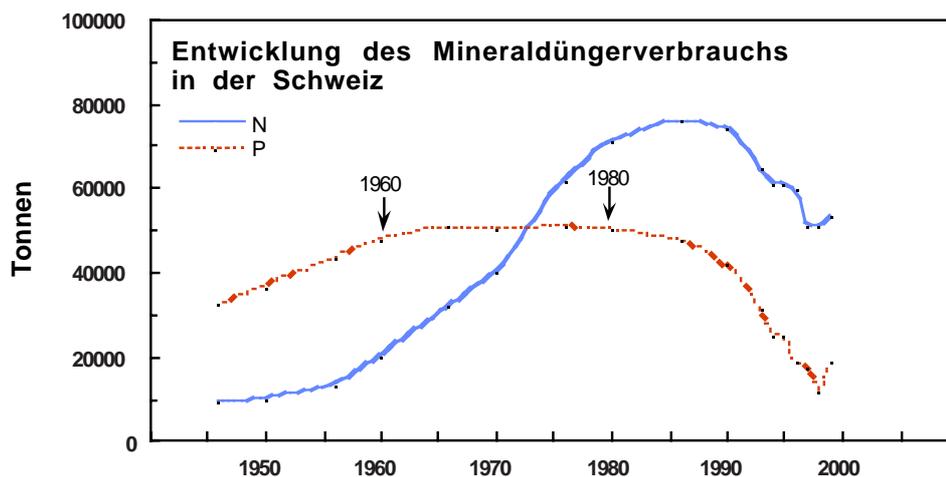
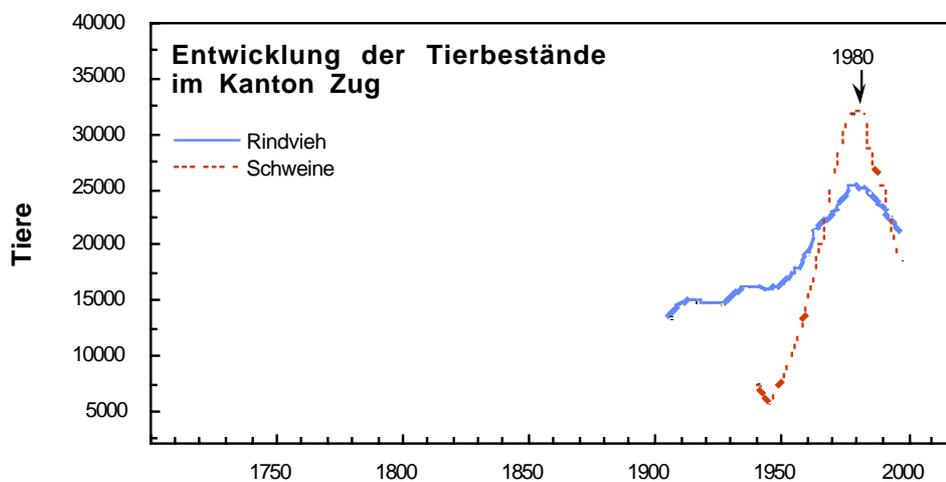
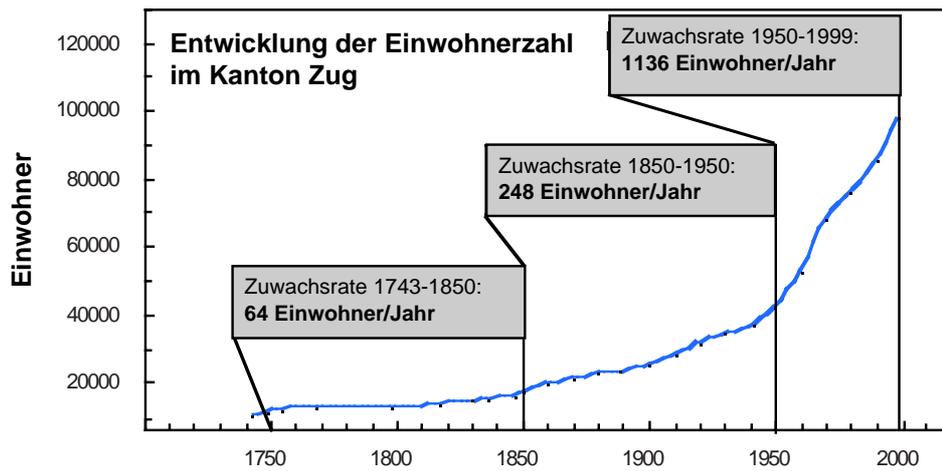


Abb. 2. Darstellung von verschiedenen Entwicklungen (Bevölkerung, Tierbestände, Mineraldüngerverbrauch) die an der Zunahme des Nährstoffgehaltes im Zugersee beteiligt waren (Angaben gemäss Amt für Umweltschutz Zug).

## 4. Grundlagen und verwendete Methoden

### 4.1 Sedimentkern ZG99-2 und Datierung

Am 25. November 1999 entnahmen Mitarbeiter der EAWAG unter Mithilfe von Eva Binderheim und Peter Keller im Südbecken des Zugersees (Obersee) aus einer Tiefe von 195 Metern (ca. Koordinaten tiefste Stelle: 680 000 / 217 000) mit dem Kurzkerngerät ("gravity corer") der EAWAG drei Sedimentkerne mit einem Durchmesser von 6.3 cm.

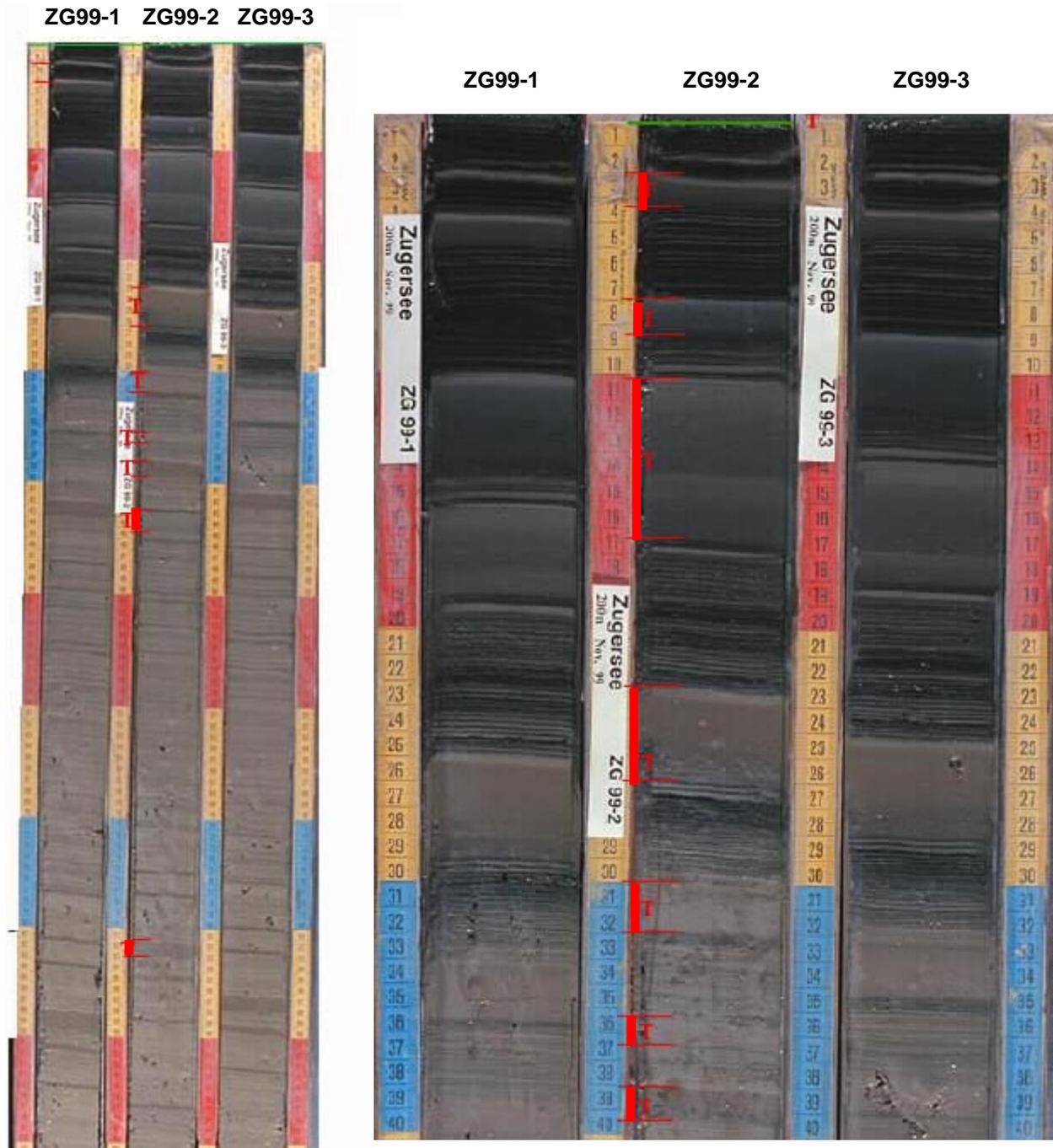
Die Kerne wiesen Längen von ca. 1 Meter auf, die Länge des für die Rekonstruktion verwendeten Kernes ZG99-2 betrug 104 cm. Die Kerne wurden im Sedimentlabor der EAWAG in Kastanienbaum der Länge nach aufgeschnitten und fotografiert (Abb. 3). Der Kern ZG99-2 wurde anschliessend von E. Binderheim in Intervallen von 1 cm Mächtigkeit (Probe 1: 0-1 cm, Probe 2: 1-2cm, etc.) beprobt. Die Proben wurden vor und nach der Gefriertrocknung gewogen und daraus der Wassergehalt bestimmt (Anhang C).

In der Regel nimmt der Wassergehalt (Porosität) der Sedimente gegen oben stark zu. Ein Vergleich des datierten Sedimentkerns ZG99-2 mit den beiden anderen Sedimentkernen (ZG99-1, ZG99-3) und dem Gefrierkern (ZG00-A) zeigt, dass die oberste Lage des datierten Kerns bei der Kernentnahme geringfügig komprimiert wurde. Diese Kompression erfolgte nach der Bergung des Kerns durch die Abdeckung der Sedimentoberfläche mit einem porösen Kunststoffmaterial ("Oasis") zur Stabilisierung. Dadurch ergibt sich in den obersten Lagen des Kerns gegenüber der natürlichen Zuwachsrate eine Verfälschung. Wie aus Abbildung 3 hervorgeht, beträgt die Stauchung im Kern ZG99-2 gegenüber den beiden anderen entnommenen Kernen ZG99-1 und ZG99-3 ca. 2 cm.

Auf Grund des steilen, geologisch wenig stabilen Einzugsgebietes des Zugersee-Südbeckens, der z.T. steilen Zuflüsse und der wannenartigen, tiefen Beckenmorphologie sind die Sedimente durch in den See eingeschwemmte Feststoffe beeinflusst. Bei starken Regenfällen im Einzugsgebiet kommt es von den Uferpartien zu massiven pulsartigen Feststoffverfrachtungen in die Seetiefe. Dies führt dazu, dass im Bereich der grossen Tiefebene des Südbeckens die im See selbst gebildeten, biogeochemischen Sedimentanteile (hauptsächlich Kalkausfällungen und organisches Material) immer wieder durch sandig-siltige Lagen von eingeschwemmten, anorganischem Material überdeckt werden. Die Ablagerung dieses Materials erfolgt in Form von Turbiditen, welche im Zugersee Mächtigkeiten von über 10 cm aufweisen und im Längsschnitt der Sedimentkerne als charakteristische Lagen erkennbar sind. Sie sind von den laminierten Schichten (Varven) unterscheidbar (Abb. 3).

Die Datierung des Kernes ZG99-2 erfolgte durch 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) unter Abzug der Turbidite.

Für die Datierung mit radioaktiven Markern wurden 41 Proben mit einem GeLi Bohrloch-Detektor gemessen. Die Messzeit pro Probe betrug mindestens 24 Stunden. Das  $^{137}\text{Cs}$ -Profil (Abb. B1, An-



**Abb. 3. Fotografische Darstellung der drei aufgeschnittenen Zugersee-Sedimentkerne. Links: Ganze Kernlänge, rechts: Jahresschichtung und Turbiditzonen (T) der obersten 40 cm des verwendeten Zugersee-Sedimentkernes ZG99-2. Kernentnahme am 25. November 1999.**

Fotos und Kernaufbereitung: Dr. Mike Sturm, EAWAG Dübendorf.  
 Turbidite entstehen durch Hochwasserereignisse und sind Sedimentstrukturen bestehend aus Sand, Silt und Ton.

hang B) zeigt ein erstes Maximum in 3.5 cm Tiefe (Probe 3-4 cm), das dem Tschernobyl-Fallout von 1986 zugeordnet wird. Ein weiteres Maximum, welches auf  $^{137}\text{Cs}$ -Fallout der Atombombenversuche von 1963 zurückzuführen ist, tritt in 18.5 cm Tiefe (Probe 18-19 cm) 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 liegt sie in einer Tiefe von 35 cm (Abb. B1, Anhang B).

**Tab. 1: Mit radiologischen Methoden bestimmte Zeitmarker im Kern ZG99-2**

Zeitmarker	Sedimenttiefe	Zeitraum der Sedimentierung
Maximum $^{137}\text{Cs}$ -Aktivität	3 cm bis 4 cm	1986
Maximum $^{137}\text{Cs}$ -Aktivität	18 cm bis 19 cm	1963
Erreichen der Hintergrundaktivität von $^{210}\text{Pb}$	ca. 35cm bis 36 cm	ca. 1905

Die Datierung der Sedimente des Zugersee-Südbeckens wird durch das unregelmässige Auftreten der erwähnten Turbidite wesentlich erschwert. Für die Feindatierung der Sedimentschichten zwischen radiologisch bestimmten Zeimarkern muss vorgängig die Mächtigkeit der Turbidite definiert werden. Die zwischen den Turbiditen abgelagerten Schichten können dann im oberen Teil der Sedimente über die jahreszeitliche Laminierung als Jahres-Zuwachslagen abgezählt werden. Als besonders hilfreich für die Zählung der Warven erwies sich die Entnahme eines Gefrierkernes aus dem Zugersee-Südbecken durch die EAWAG im Sommer 2000 (Abb. B2, Anhang B). Durch den optischen Vergleich von Schliffpräparaten dieses Kernes mit der Fotografie des Kernes ZG99-2 konnte bis in eine Tiefe von 45 cm die Anzahl der Jahresablagerungen bestimmt werden. Das Alter der tiefer liegenden Schichten, welche keine erkennbare Jahresschichtung aufweisen, wurde mit einer extrapolierten jährlichen Sedimentzuwachsrate von 1.6 mm abgeschätzt. Das auf diese Weise bestimmte Gesamtalter des Kernes beträgt rund 450 Jahre. Detailangaben zur Datierung des Kernes ZG99-2 sind im Anhang B aufgeführt.

## 4.2 Kieselalgen

Die Präparation der Kieselalgen in den 100 Sedimentproben wurde durch Frau Dr. Evi Binderheim-Bankay unter Anleitung von AquaPlus durchgeführt. Sie erfolgte indem die Proben bei 540 °C während 4 Stunden verascht und anschliessend mittels Salzsäure entkalkt und mit Hilfe von 30%-igem Wasserstoffperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) oxidiert wurden. 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.

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) sowie im Lichtmikroskop unter Mithilfe von Dr. François Straub, Laboratoire d'algologie, La

Chaux-de-Fonds). 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). Aufgrund der Zählresultate wurden die relativen Häufigkeiten (rH) der einzelnen Arten berechnet:

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

$rH_{ij}$  = 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.

Basierend auf einer Schnellzählung (= Anzahl Schalen pro Gesichtsfeld), mit welcher alle vorhandenen 100 Sedimentproben betrachtet wurden, wurde festgestellt, dass die obersten rund 50 cm Sediment mit einzelnen Ausnahmen viele Kieselalgen enthielten. Die tieferen Sedimentschichten wiesen demgegenüber mit wenigen Ausnahmen deutlich weniger Kieselalgenschalen auf (siehe Anhang A, relative Dichte der Kieselalgenschalen pro mikroskopisches Gesichtsfeld und 1-cm-Probe). Basierend auf dieser Kieselalgendichtevertellung, der ebenfalls aufgrund der Schnellzählung festgestellten groben Kieselalgentiefenverteilung sowie der provisorisch vorliegenden Resultate der Sedimentdatierung wurden 63 der insgesamt 100 1 cm-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 63 Proben verteilen sich auf den 100 cm langen Sedimentkern insofern regelmässig, indem in der oberen Hälfte (0-50 cm) 38 Proben und in der unteren Sedimenthälfte (51-100 cm) 25 Proben ausgezählt wurden, wobei von 0 bis 60 cm Tiefe mindestens jede zweite und von 60 bis 100 cm Tiefe mit einer Ausnahme 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. Nur die ausgezählten Sedimentproben Nr. 54, Nr. 68 und Nr. 86 enthielten sehr wenig bis fast keine Kieselalgen, so dass die Zähllisten dieser drei Proben trotz intensivem Suchen weniger als 200 Schalen enthalten. Alle anderen 60 Zählungen weisen aber zwischen 200 und 560 Schalen auf, wobei 35 Zählungen über 500 Schalen, respektive 54 Zählungen über den für die Rekonstruktion erwünschten 250 Schalen beinhalten. Die im tieferen Sedimentbereich festgestellte, teilweise geringe Kieselalgendichte dürfte neben der damals sowieso geringeren Primärproduktion im wesentlichen durch interne Rutschungen und allochthon abgelagertes Material (z.B. bedingt durch Hochwasserereignisse) zustande gekommen sein. Ein weiterer Grund dürfte auch bei der 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.

Die Auswertungen beruhen alle auf den relativen Häufigkeiten, welche in jeder Probe für jede gefundene Kieselalgenart aufgrund der Zählung gemäss Formel 1 berechnet wurden. Die Zählraten für die 63 Proben befinden sich in Anhang A.

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 4) sowie der **Taxazahl** und der **Diversität** (Abbildung 5). 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 ZUG-1 bis und mit ZUG-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 6, 7 und 8) 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 182 in den Zählungen vorhandenen Kieselalgentaxa sind 137 im Kalibrationsset vorhanden (= 74%). Von den fehlenden 45 Taxa, welche für die Rekonstruktion nicht benutzt wurden, haben jedoch nur ganz wenige Taxa relative Häufigkeiten, welche überhaupt einen Einfluss auf die Rekonstruktion haben könnten. Etliche davon sind Vertreter oligotrophen Milieus und würden daher bei ihrer Berücksichtigung die berechneten Gesamtphosphorkonzentrationen der tieferen Sedimentschichten tiefer ausfallen lassen. Auswirkungen auf die P-Rekonstruktion könnte am ehesten eine aufgrund der sehr kleinen Grösse und trotz REM-Betrachtung unbestimmbare Form der Gattung *Cyclotella* haben, welche wir *Cyclotella sp. <= 3µm* nannten. Dieses Taxon könnte eine Kümmerform von *Cyclotella cyclopuncta*, *C. comensis/pseudocomensis* oder *C. wuethrichiana* sein. Es trat regelmässig nur in älteren Sedimentschichten auf (unterhalb Probe 30, vor 1924), so dass angenommen werden kann, dass es sich auch um ein Vertreter mesotrophen oder oligotrophen Milieus handelt. Zudem wurde die Fehlerbreite der Rekonstruktion angegeben (TP Tief, TP Hoch).

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 Wasserchemismus 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 6 und 7). 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 keine guten 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

Da in den schweizerischen Fließ- und Stehgewässern in der Regel die Versorgung mit Phosphor der limitierende Faktor für das Pflanzenwachstum darstellt, wird die Phosphorkonzentration als Richtgrösse für die biologische Produktivität verwendet. Gemäss OECD-Studie (Lampert & Sommer 1993, Seite 375) werden die Produktivitätsstufen in Abhängigkeit der Konzentration an Gesamtphosphor ( $P_{\text{tot}}$ ) wie folgt voneinander abgegrenzt:

<b>Oligotroph:</b>	<b><math>P_{\text{tot}}</math></b>	<b>&lt;10 <math>\mu\text{g P/l}</math></b>	<b>geringe Produktion</b>
<b>mesotroph:</b>	<b><math>P_{\text{tot}}</math></b>	<b>10 - 30 <math>\mu\text{g P/l}</math></b>	<b>mittlere Produktion</b>
<b>eutroph:</b>	<b><math>P_{\text{tot}}</math></b>	<b>30 - 100 <math>\mu\text{g P/l}</math></b>	<b>hohe Produktion</b>
<b>hypereutroph:</b>	<b><math>P_{\text{tot}}</math></b>	<b>&gt;100 <math>\mu\text{g P/l}</math></b>	<b>sehr hohe Produktion</b>

Die Charakterisierung der biologischen Produktivität eines Sees bezüglich der  $P_{\text{tot}}$ -Konzentration während der Frühlingskonzentration – bei nicht vollständig mischenden Seen berechnet bezüglich der mittleren  $P_{\text{tot}}$ -Konzentration über die gesamte Seetiefe – ist eine praktische Vereinfachung. Gleiche  $P_{\text{tot}}$ -Konzentrationen und damit derselbe Trophiegrad können sich in verschiedenen Seen unterschiedlich auswirken. So ist die Morphometrie eines Sees (z. Bsp. das Volumenverhältnis des Epilimnions zum Hypolimnion) entscheidend für die Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwassers eines Sees und damit für die Abbauprozesse am Seegrund.

## 5. Resultate

### 5.1 Kieselalgen-Stratigraphie

Im 100 cm langen Sedimentkern ZG99-2 wurden 63 Sedimentproben mit einer Schichtdicke von 1 cm Mächtigkeit untersucht. Die Häufigkeiten der wichtigsten Kieselalgenarten sind in Abbildung 4 im Sedimentprofil graphisch dargestellt. Die zeitliche Abfolge der vorgefundenen Kieselalgen illustriert als Ganzes die zivilisationsbedingte Eutrophierung des Zugersees, welche im 19. Jahrhundert erst schwach begann und bis heute andauert.

Im Sedimentkern können vier deutlich unterscheidbare Kieselalgenzonen charakterisiert werden. Die unterste, d. h. älteste **Zone ZUG-1 (1550-1910)** umfasst die Sedimentschichten unterhalb 34 cm Sedimenttiefe bis zum Kernende in 100 cm Sedimenttiefe. Es gilt zu beachten, dass innerhalb der Zone ZUG-1 auch Rutschungen und Einschwemmungen von allochthonem Material auftraten (Abb. 3 und Anhang B). Dies führte zusammen mit einer allfälligen pH-bedingten selektiven Auflösung schwach verkieselter Schalen zu teilweise sehr geringen Kieselalgendichten (siehe auch Anhang A) sowie zu einem hohen Anteil an Aufwuchsarten der insbesondere unterhalb 90 cm Sedimenttiefe zeitweise sogar grösser war, als der Anteil der Plankter.

Die Kieselalgenzone ZUG-1 kann rein optisch in zwei Subzonen unterteilt werden, nämlich in die Zone ZUG-1<sub>100-55 cm</sub> (ca. 1550 bis ca. 1810) und in die Zone ZUG-1<sub>55-34 cm</sub> (ca. 1810 bis ca. 1910). Die untere Zone ZUG-1<sub>100-55 cm</sub> wird durch *Cyclotella*-Arten sowie durch mehrere Aufwuchsarten dominiert. Bei den *Cyclotella*-Arten handelt es sich dabei um meso- bis oligotraphente Vertreter: *Cyclotella cyclopuncta*, *C. distinguenda*, *C. comensis*, *C. radiosa/compta*, *C. praetermissa*, die kleine auch im REM nicht bestimmbare *C. sp.*  $\leq 3\mu\text{m}$  sowie *C. bodanica*. Bei der in der ganzen Zone ZUG-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*, *C. planctonica* 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.

Bei den Aufwuchsarten waren es weitgehend ebenfalls Formen die in oligo- bis höchstens mesotrophem Milieu vorkommen, wobei *Brachysira neoexilis*, *Mastogloia smithii* var. *lacustris* und *A. minutissima* var. *jackii* sowie *Cymbella*-, *Gomphonema*- und *Diploneis*-Arten als typische oligotraphente Arten gelten. Gehäuft traten in dieser Zone zusätzlich die folgenden Aufwuchsarten auf: *Fragilaria brevistriata*, *F. pinnata*, *Achnanthes lanceolata* ssp. *frequentissima*, *A. clevei*, *A. conspicua*, *Amphora libyca*, *A. pediculus* und *A. inariensis*.

Aufgrund dieser Artenzusammensetzung darf angenommen werden, dass im Zeitraum von 1550 bis 1810 **oligotrophe bis schwach mesotrophe Verhältnisse** den Zugersee charakterisierten.

Die obere Zone ZUG-1<sub>55-34 cm</sub> grenzt sich von der unteren Subzone im wesentlichen dadurch ab, dass bei vielen der oben besprochenen oligotraphenten Arten die relative Häufigkeit abnahm, insbesondere bei *Cyclotella bodanica*, *Fragilaria brevistriata*, *Brachysira neoexilis* und *Mastogloia smithii*

var. *lacustris*. Zudem hatten die noch heute im Zugersee häufig vorkommenden planktischen Formen *Tabellaria flocculosa*, *Fragilaria crotonensis* und *Stephanodiscus minutulus* ein erstes deutliches Auftreten. Die beiden erstgenannten Taxa sind bekannte Plankter mesotropher bis eutropher Seen, die bei hohen Silizium zu Phosphor-Verhältnissen (Si:P) konkurrenzfähig sind. Sie kommen somit bei tiefen Phosphorkonzentrationen noch vor, falls zugleich hohe Siliziumkonzentrationen vorherrschen. Das Vorhandensein der euträphenten Art *Stephanodiscus minutulus*, welche vermischt mit der ebenfalls euträphenten *S. parvus* sein dürfte, zeigt aber, dass der Zugersee in dieser Zeitperiode wahrscheinlich ein (schwach bis eher deutlich?) eutrophes Milieu aufgewiesen hat. Das Vorkommen von *Aulacoseira granulata* um 1885 (Probe 46) ist als gering zu bezeichnen und dauerte nur wenige Jahre während der damaligen maximalen Eutrophie. Ihr Auftreten bestätigt aber, dass mit grosser Sicherheit eutrophe Verhältnisse den Zugersee prägten. Da die relativen Häufigkeiten der drei genannten Taxa verhältnismässig gering waren und gleichzeitig die Gattung *Cyclotella* die Kieselalgencommunity prägte, dürfte es sich um eine mässige Eutrophie gehandelt haben. Zusammenfassend kann gefolgert werden, dass im Zugersee während der durch die Subzone ZUG-1<sub>100-55 cm</sub> repräsentierte Zeit **oligotrophe bis schwach mesotrophe** Verhältnisse vorherrschten. In der anschliessenden Subzone ZUG-1<sub>55-34 cm</sub> muss dann aber zum Zeitpunkt der Maximalbelastung von **schwach bis deutlich eutrophen** Verhältnissen ausgegangen werden. Dieser erste Eutrophierungsschub dauerte von ca. 1810 bis ca. 1910. Er erreichte sein Maximum um ca. 1885.

Die **Zone ZUG-2 (1910-1950)** umfasst die Sedimenttiefen 34-20cm. Sie wird nach wie vor durch *Cyclotella cyclopuncta* dominiert und durch *C. comensis/pseudocomensis* mitgeprägt, wenn auch mit stetig abnehmendem Anteil. Zusätzlich traten die in der Subzone ZUG-1<sub>50-34 cm</sub> bereits schon vorgekommenen euträphenten Taxa *Tabellaria flocculosa* und *Fragilaria crotonensis* mit beachtlichen Anteilen wieder auf. Demgegenüber erschienen in der Zone ZUG-2 *Cyclotella distinguenda*, *C. bodanica* und *C. sp. <math>\leq 3\mu\text{m}</math>* praktisch nicht mehr und *Stephanodiscus minutulus/parvus* nur mit sehr geringem Anteil. Das Ablösen der *Cyclotella*-Dominanz durch Arten der Gattungen *Tabellaria* und *Fragilaria* wurde auch im Rotsee (Lotter 1988) und im Baldeggersee (Lotter 1998) festgestellt und als Zeichen der Eutrophierung interpretiert.

In der Zone ZUG-2 veränderte sich somit die Kieselalgencommunity im Vergleich zur früheren Artenzusammensetzung in kurzer Zeit sehr stark. Diese Veränderungen sind eindeutig und entsprechen der in vielen Seen festgestellten Reaktion auf die Nährstoffanreicherung. In der Zeitperiode von ca. 1910 bis ca. 1950 wandelte sich der Zugersee **von einem mesotrophen in einen deutlich eutrophen Zustand**.

Die **Zone ZUG-3 (1950-1975)** beinhaltet die Sedimenttiefen 20-7cm. In dieser Zone dominieren die Taxa *Tabellaria flocculosa*, *Fragilaria crotonensis* und *Stephanodiscus minutulus/parvus*. Der Anteil der in der Zone ZUG-2 noch dominierende *Cyclotella cyclopuncta* ging bis auf einen kleinen Anteil zurück, und *Cyclotella comensis/pseudocomensis* verschwand gänzlich. Damit erreichte der Zugersee in den Jahren von ca. 1950 bis ca. 1975 den **hocheutrophen Zustand**. Dies kommt insbesondere durch das massenhafte Auftreten der kleinen für hypereutrophe Verhältnisse typischen *Stephanodiscus minutulus/parvus* zum Ausdruck. Diese planktische Kieselalge tritt v.a. im Frühjahresplankton in riesigen Massen (Zelldichten) auf und trägt damit einen Grossteil zum Total der pro Jahr sedimentierten Kieselalgeschalen bei.



Die jüngste **Zone ZUG-4 (1975-1999)** umfasst die obersten Sedimenttiefen 7-0 cm. In dieser Periode dominiert immer noch die für hypereutrophe Verhältnisse typische *Stephanodiscus minutulus/parvus* zusammen mit *Fragilaria crotonensis*. Ihre Anteile gingen aber in den letzten Zentimetern etwas zurück. Der Anteil an *Tabellaria flocculosa* ging deutlich zurück, und *Cyclotella cyclopuncta* trat bis auf den jüngsten Zentimeter nicht mehr auf. Demgegenüber gewann die in allen Zonen vorkommende *Asterionella formosa* an Bedeutung. Sie ist eine in eutrophen Seen häufig anzutreffende planktisch lebende Kieselalge. Ebenso aufgekommen sind *Aulacoseira granulata* und *Stephanodiscus vestibulis*. Alles in allem wird die Zone ZUG-4 durch Kieselalgen geprägt, die unter **eutrophen bis hypereutrophen Verhältnissen** ihr Optimum haben. In den jüngsten Sedimentschichten traten aber, wenn auch z.T. mit sehr geringem Anteil, Kieselalgen auf, die auf trophische Verbesserungen schliessen lassen. So erschienen *Stephanodiscus alpinus*, *Cyclotella radiosa/compta* und *C. pseudostelligera*. Sie alle tolerieren wohl eutrophe Verhältnisse, meiden aber hypereutrophe Zustände.

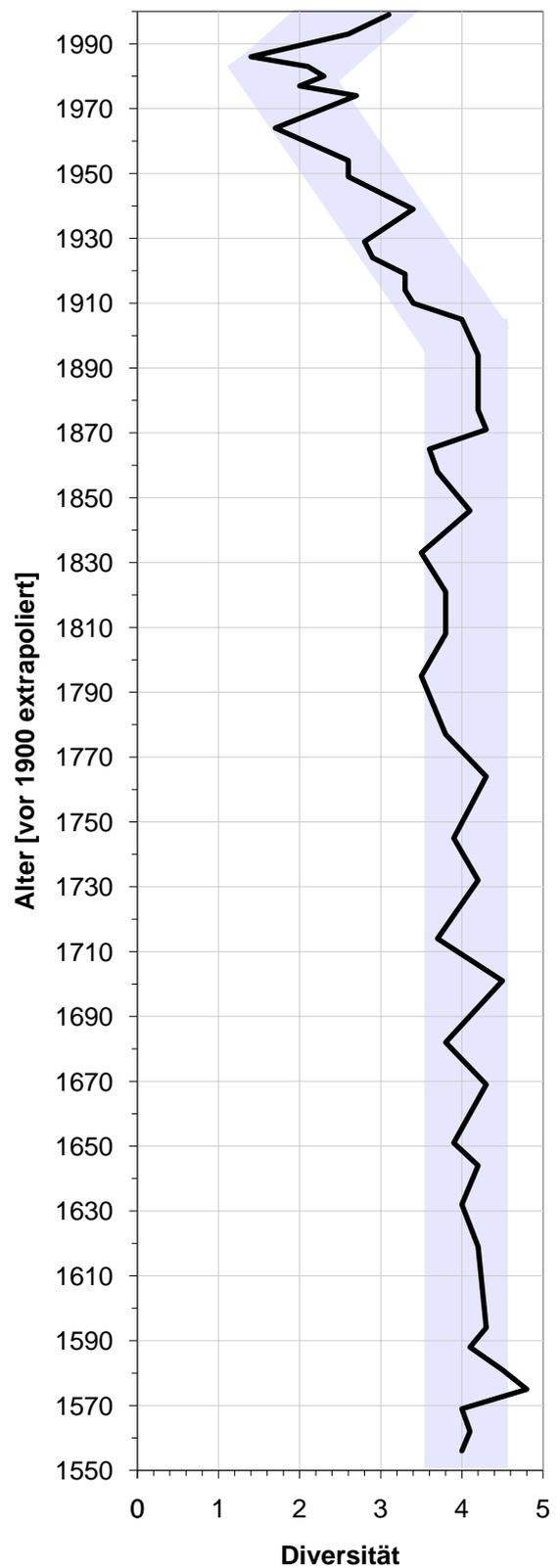
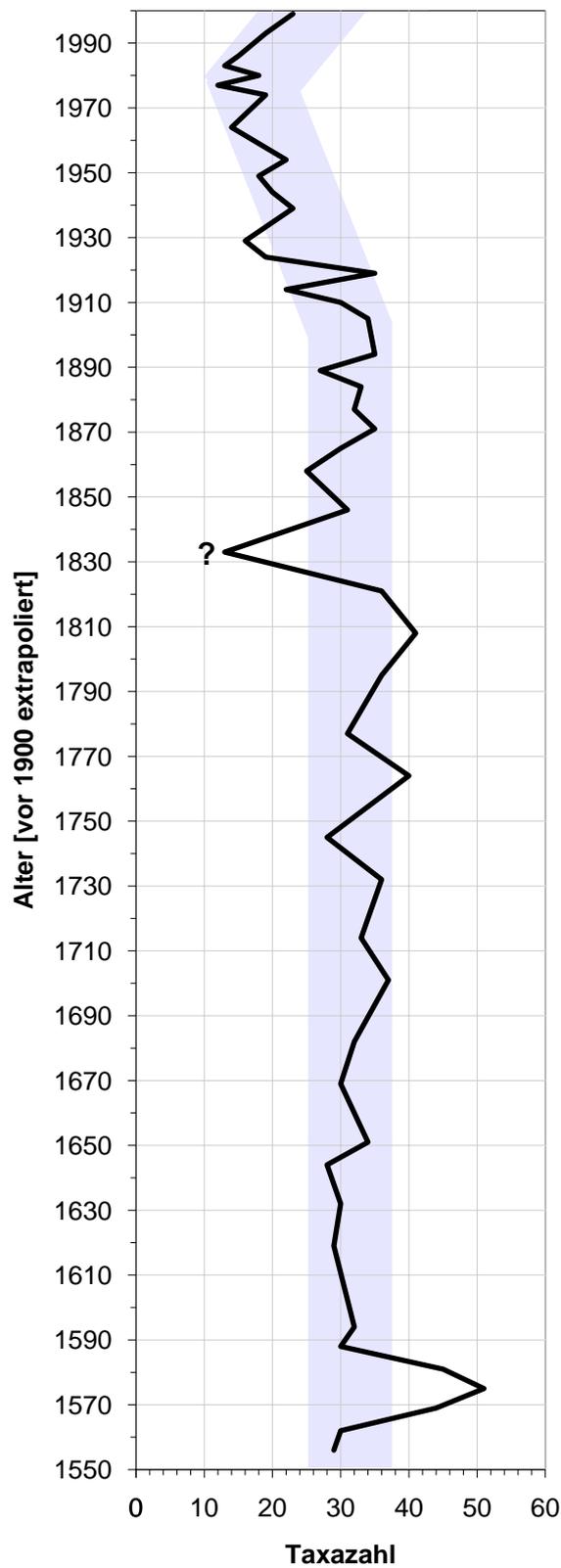
## 5.2 Taxazahl und Diversität

Die Taxazahl und die Diversität, berechnet nach Shannon & Weaver (1949) geben einen Eindruck über die Entwicklung der Biodiversität im Sinne der Artenvielfalt (Abb. 5). Während die Taxazahl die Zahl der Kieselalgenarten ausdrückt, ist die Diversität ein Mass für die Vielfältigkeit einer Lebensgemeinschaft hinsichtlich ihrer Arten und Häufigkeiten. Eine Kieselalgen-Lebensgemeinschaft mit vielen Arten aber keiner dominanten Art weist eine grössere Diversität auf als eine Lebensgemeinschaft mit wenigen und stark dominierenden Arten. Im Zugersee erwiesen sich beide Parameter über eine sehr lange Zeitdauer als stabil und hoch. So wies die Taxazahl von 1550 bis ca. 1900 einen Mittelwert von 33 Taxa (Maximalwert 51) und die Diversität einen solchen von 4.0 (Maximalwert 4.8) auf. Anschliessend verringerte sich sowohl die Taxazahl wie auch die Diversität kontinuierlich. Um 1980 erreichten die Taxazahl wie auch die Diversität noch etwa halb so grosse Werte wie im 19. Jahrhundert. Die in den folgenden Jahren festgestellten stetig steigenden Taxazahlen und Diversitäten dürften Zeichen für eine Verbesserung des gewässerökologischen Zustandes des Zugersees sein.

## 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 6 und 7 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 vor-



**Abb. 5. Entwicklung der Kieselalgen-Taxazahl und der Kieselalgen-Diversität im Zugersee (Sedimentkern ZG99-2) von 1550 bis 1999.**

Hellblaue Fläche = Trend.

? = Tiefe Taxazahl infolge sehr geringer Diatomeendichte.

sichtig 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.

### **Zeitabschnitt von ca. 1550 bis ca. 1810**

Für diesen Zeitabschnitt von rund 260 Jahren indizieren die Kieselalgen einen gleichbleibenden mittleren Gesamtphosphorgehalt von etwas über 20 µg P/l. Unter Berücksichtigung des oberen und unteren Fehlers ergibt sich ein Phosphorgehalt von etwas über 10 bis rund 40 µg P/l. Da im Kalibrationsdatenset etliche oligotrophente Taxa nicht berücksichtigt wurden, darf angenommen werden, dass im Zugersee der Gesamtphosphorgehalt in dieser Zeit eher unter oder um 20 µg P/l lag als darüber. **Der Zugersee dürfte damit von 1550 bis ca. 1810 ein schwach mesotropher See gewesen sein.**

### **Zeitabschnitt von ca. 1810 bis ca. 1880**

In den Jahren von 1810 bis ca. 1880 erhöhte sich die Gesamtphosphorkonzentration. Sie stieg zuerst nur langsam an und erreichte um ca. 1850 Werte die über 30 bis 40 µg P/l lagen. Anschliessend, nach einer kurzen Phase der Stagnation, nahm er nochmals deutlich zu. Um 1880 prägten dann für wahrscheinlich wenige Jahre deutlich eutrophe Verhältnisse den Zugersee. Der Gesamtphosphorwert betrug dazumal zwischen 50 und 70 µg P/l. **Damit erreichte der Zugersee um 1880 innerhalb der letzten 450 Jahren zum erstenmal den deutlich eutrophen Zustand.**

Als Ursachen dieser Eutrophierung kommen mehrere Ereignisse in Frage. Der Beginn der Eutrophierung um ca. 1810 könnte, neben anderen Ereignissen, auch durch den Goldauer Bergsturz mitverursacht worden sein. Der Eutrophierungsbeginn dürfte dabei weniger durch das Bergsturz-Ereignis selber als vielmehr durch anschliessende wahrscheinlich über lange Zeit andauernde Wiederherstellungsarbeiten (Ausschwemmungen, Eintrag von Trübstoffen) verursacht sein. Dabei ist uns allerdings die Linienführung der Bäche (Rigiaa) sowie die Dauer und Intensität der Wiederherstellungsarbeiten unbekannt. Weitere Ursachen für die beginnende Eutrophierung könnten der Tourismus sowie die, wenn auch langsam beginnende, Industrialisierung sein. In der Zeitperiode von 1830 bis 1860 entstanden die ersten Fabriken (Spinnereien, Baumwollweberei, Papierfabrikation, etc.) mit der dazu notwendigen Infrastruktur (Häuser, Strassen, etc.). Dies alles löste einen hohen Bedarf an Arbeitskräften aus (Bevölkerungswachstum von 1850-1860, Zuwanderung). Der starke Eutrophierungsschub ab 1870 dürfte dann durch die fortschreitende Industrialisierung und den stark zunehmenden Tourismus (Zug, Zugerberg, Rigi, Zugersee), welcher mit dem Bau der Eisenbahn stark begünstigt wurde, begründet sein. So nahm von 1864 (Eröffnung des Bahnhof Zug) bis 1873 die Zahl des jährlichen Personenverkehrs auf dem Bahnhof Zug von 30'000 auf 70'000 beförderte Personen zu. Im Jahre 1869, als das eidgenössische Schützenfest in Zug stattfand, waren es sogar über 90'000 Personen (Schalch 1997). Ähnlich beliebt war die Schifffahrt auf dem Zugersee (Hotz 1999). So beförderte die Dampfschiffahrts-Gesellschaft des Zugersees in den Jahren von 1856 bis 1875 jährlich 30'000 bis 60'000 Personen (Schalch 1997). Da im 19. Jahrhundert das Abwasser noch nicht gereinigt wurde, dürfte es weitgehend ungeklärt in die Bäche, Flüsse und Seen geleitet worden sein. Dies aber hatte mit der beobachteten Eutrophierung des Zugersees, insbesondere mit dem Maximalwert um 1880, offensichtliche Auswirkungen. Der durch die Industrialisierung und den Eisenbahnbau ausgelöste Boom im Raume Zug zeigte somit im Zugersee um ca. 1870 bis ca. 1885 seine maximalen negativen Auswirkungen in einem deutlich höheren Trophiegrad.

### **Zeitabschnitt von ca. 1880 bis ca. 1910**

In den Jahren nach 1880 verminderte sich der Gesamtphosphorgehalt des Zugersees sehr schnell wieder auf die Werte vor 1870. Lag er ca. 1880 noch bei 50 bis 70 µg P/l, so befand er sich um ca. 1890 bereits wieder unter 30 µg P/l. **Der Zugersee wechselte damit von einem deutlich eutrophen wieder in einen meso- bis höchstens schwach eutrophen See.**

Die Gesamtphosphorwerte während der Jahre 1890 bis 1910 repräsentieren somit eine Abwasser- und Nährstoffbelastung wie sie um ca. 1850 bis ca. 1870 im Zugersee bereits vorhanden war. Die Trophiegradverschlechterung um ca. 1870 bis ca. 1885 dürfte demnach infolge eines Industrialisierungs- und Tourismusbooms verursacht gewesen sein.

### **Zeitabschnitt von ca. 1910 bis ca. 1980**

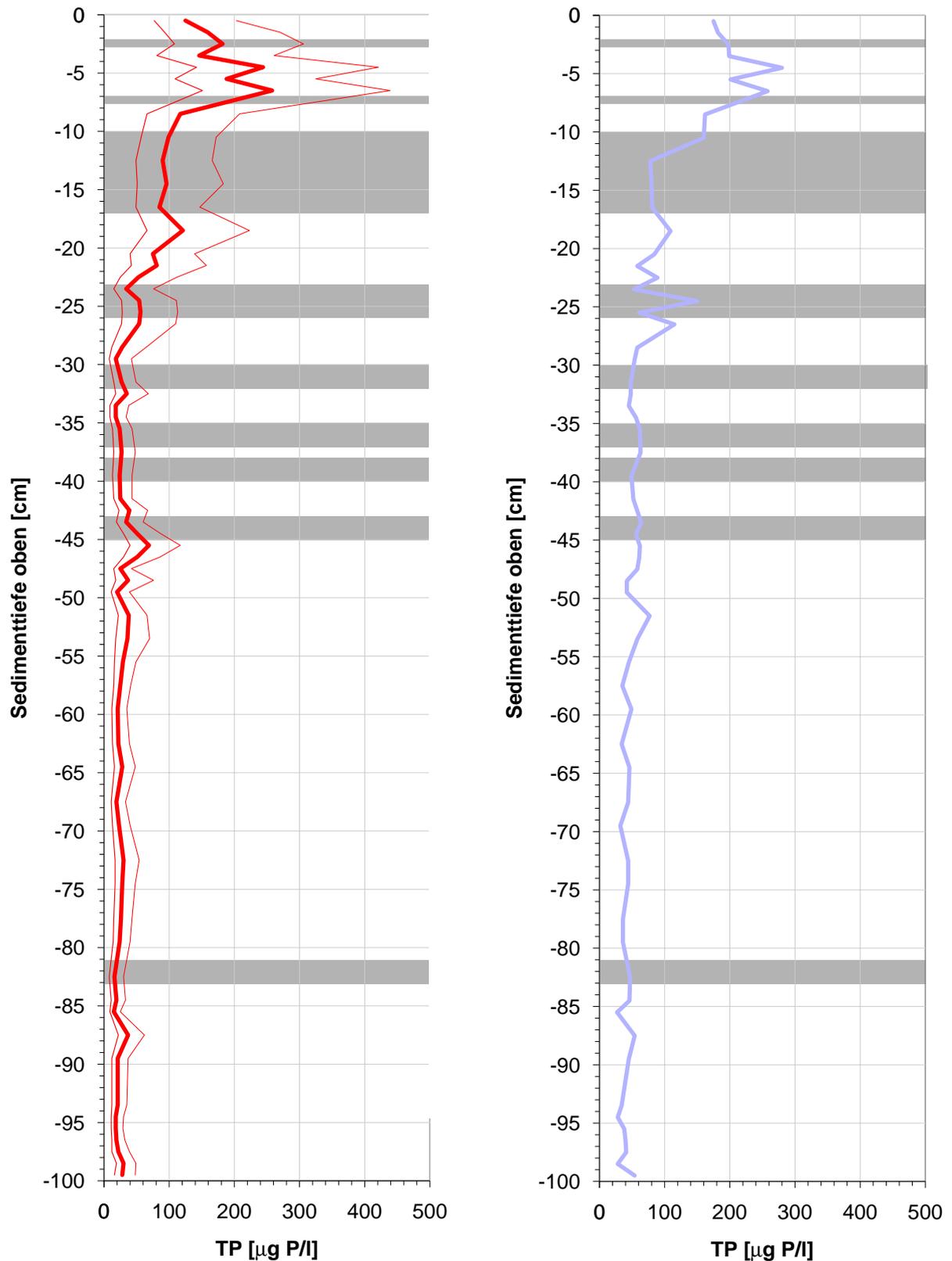
Ab ca. 1910 erfolgte dann eine kontinuierliche Verschlechterung des gewässerökologischen Zustandes. So stieg der Gesamtposphorwert, welcher 1930 noch bei etwa 30 µg P/l lag, aufgrund der Rekonstruktion bis ca. 1975-80 auf deutlich über 200 µg P/l (Maximalwerte über 400 µg P/l) an. Ende der 1970er bis anfangs 1980er Jahre blieb er dann mehr oder weniger konstant. **Der Zugersee wies somit ab ca. 1960 bis 1980 einen hypereutrophen Zustand auf.**

Die Ursachen für diese starke Eutrophierung liegen eindeutig in der Zunahme der Bevölkerung, der damals noch ungenügenden Abwasserreinigung sowie in der starken Intensivierung der Landwirtschaft ab den 1950er Jahren. Diesbezügliche Angaben und Erläuterungen befinden sich in Abbildung 2 und in Kapitel 3.2. Die seit 1975 regelmässig durchgeführten Messungen des Gesamtposphors sind in den Abbildungen 1, 7 und 8 aufgeführt. Sie bestätigen recht gut, die auch aufgrund der Rekonstruktion des Gesamtposphors ermittelten Verhältnisse.

### **Zeitabschnitt von ca. 1980 bis 1999**

Die letzte Periode von rund 20 Jahren entspricht auch dem Zeitabschnitt, in welchem externe Sanierungsmassnahmen wesentlich zur Verbesserung der Nährstoffbelastung beigetragen haben. So sank die Gesamtposphorkonzentration von über 200 µg P/l auf rund 130 µg P/l. **Damit liegen 1999 im Zugersee im Vergleich zu 1980 deutlich bessere Nährstoffverhältnisse vor; der Zustand muss aber immer noch als hocheutroph bezeichnet werden.**

Die konsequente Fernhaltung der Abwässer durch den Bau der Ringleitung um den Zugersee und die Erstellung sowie der Ausbau der Kläranlage Schönau, deren gereinigte Abwässer nicht in den Zugersee sondern in die Untere Lorze münden, sind in erster Linie für die Verbesserung des Trophiegrades im Zugersee verantwortlich. Ebenso zur Verbesserung der Nährstoffbelastung des Zugersees beigetragen haben aber die Sanierungsmassnahmen und Extensivierungen im Bereich der Landwirtschaft. So sind gemäss Abbildung 2 der Tierbestand im Kanton Zug sowohl bezüglich des Rindviehs wie auch bezüglich der Schweine deutlich zurückgegangen. Ebenso hat der Verbrauch an Mineraldünger gesamtschweizerisch massiv abgenommen (P-Dünger seit ca. 1980, N-Dünger seit ca. 1990). Zusätzliche Bemühungen und Investitionen zur Sanierung der Jauchegruben und eine Änderung in der Düngepraxis (Förderung des Bewusstseins, Einhalten des Gewässerabstandes, Menge und Zeitpunkt des Düngeraustrages, etc.) dürften weitere, nicht zu unterschätzende Beiträge zur Verbesserung des Nährstoffgehaltes des Zugersees gewesen sein.

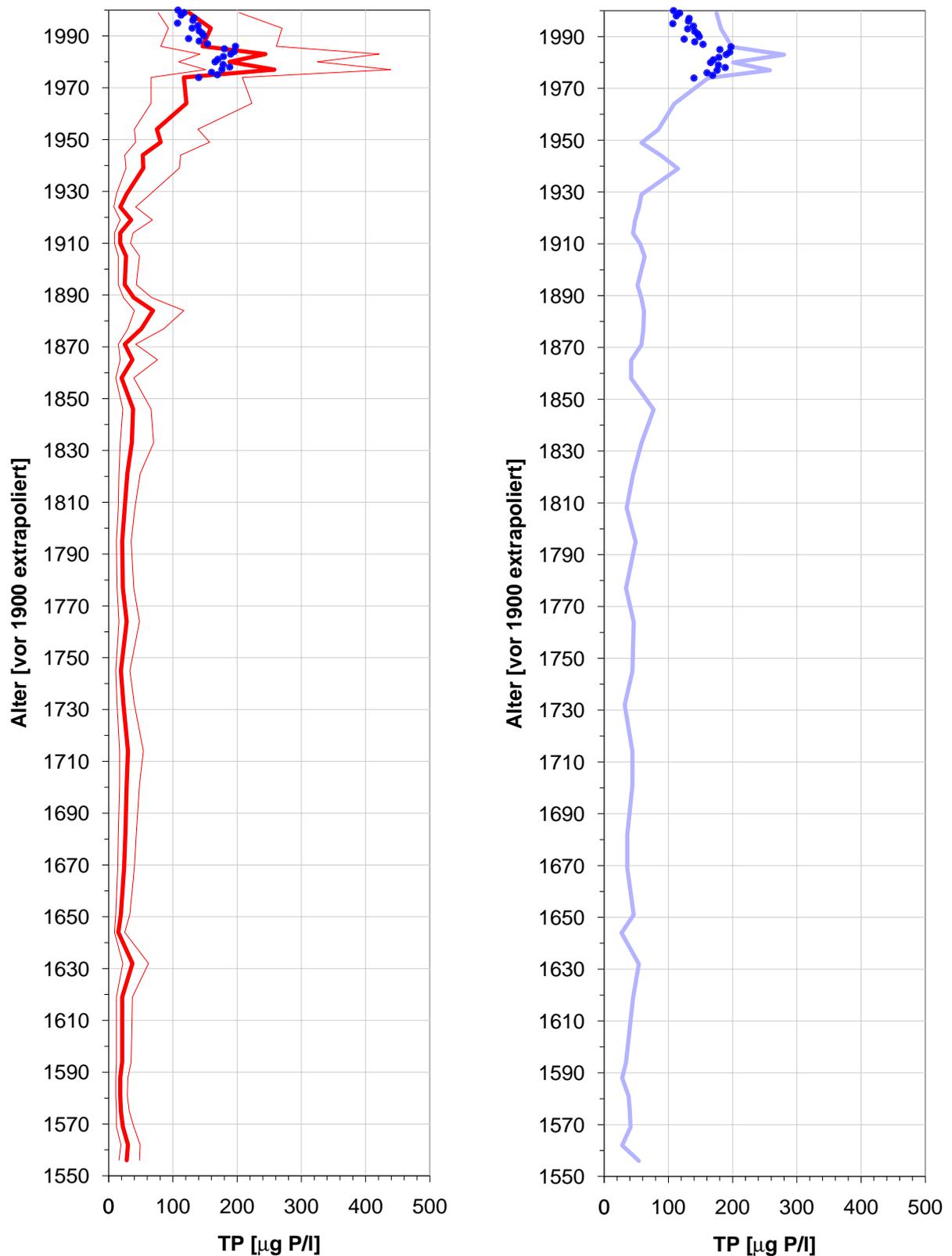


**Abb. 6. Rekonstruktion der Entwicklung des Gesamtphosphors (TP) im Zugersee mit Hilfe von Kieselalgen im Sedimentkern ZG99-2.**

Links: Rekonstruktion mittels Kalibrationsdatenset von Lotter et al. (1998); Mittelwert sowie oberen und unteren Fehler.

Rechts: Rekonstruktion mittels Analogetechnik MAT, die Rekonstruktion basiert nur auf schlechten Analoga; statistisch gesehen wurden keine guten Analoga gefunden.

Horizontale graue Zonen zeigen Turbiditlagen.

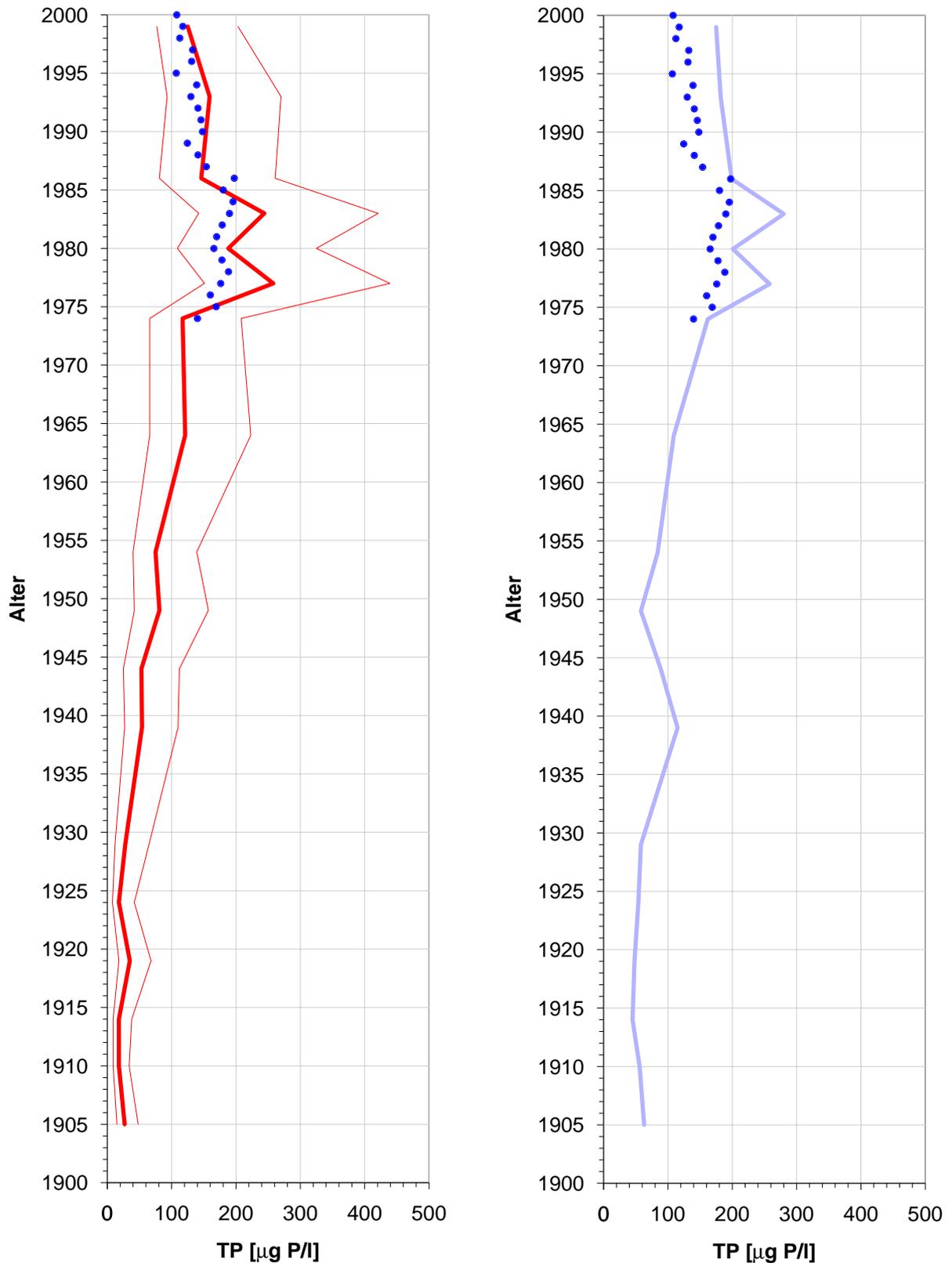


**Abb. 7. Rekonstruktion der Entwicklung des Gesamtphosphors (TP) im Zugersee (Sedimentkern ZG99-2) mit Hilfe von Kieselalgen von 1550 bis 1999 (nach Abzug der Turbiditlagen).**

Links: Rekonstruktion mittels Kalibrationsdatenset von Lotter et al. (1998); Mittelwert sowie oberer und unterer Fehler.

Rechts: Rekonstruktion mittels Analogatechnik MAT, die Rekonstruktion basiert nur auf schlechten Analoga; statistisch gesehen wurden keine guten Analoga gefunden.

Blaue Punkte: Gemessene mittlere Gesamtphosphorkonzentrationen (Mittelwert von 0-5 m Tiefe während der Frühjahrszirkulation).



**Abb. 8. Rekonstruktion der Entwicklung des Gesamtphosphors (TP) im Zugersee (Sedimentkern ZG99-2) mit Hilfe von Kieselalgen von 1900 bis 1999 (nach Abzug der Turbiditlagen).**

Links: Rekonstruktion mittels Kalibrationsdatenset von Lotter et al. (1998); Mittelwert sowie oberer und unterer Fehler.

Rechts: Rekonstruktion mittels Analogatechnik MAT, die Rekonstruktion basiert nur auf schlechten Analoga; statistisch gesehen wurden keine guten Analoga gefunden.

Blaue Punkte: Gemessene mittlere Gesamtphosphorkonzentrationen (Mittelwert von 0-5 m Tiefe während der Frühjahrszirkulation).

## 6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

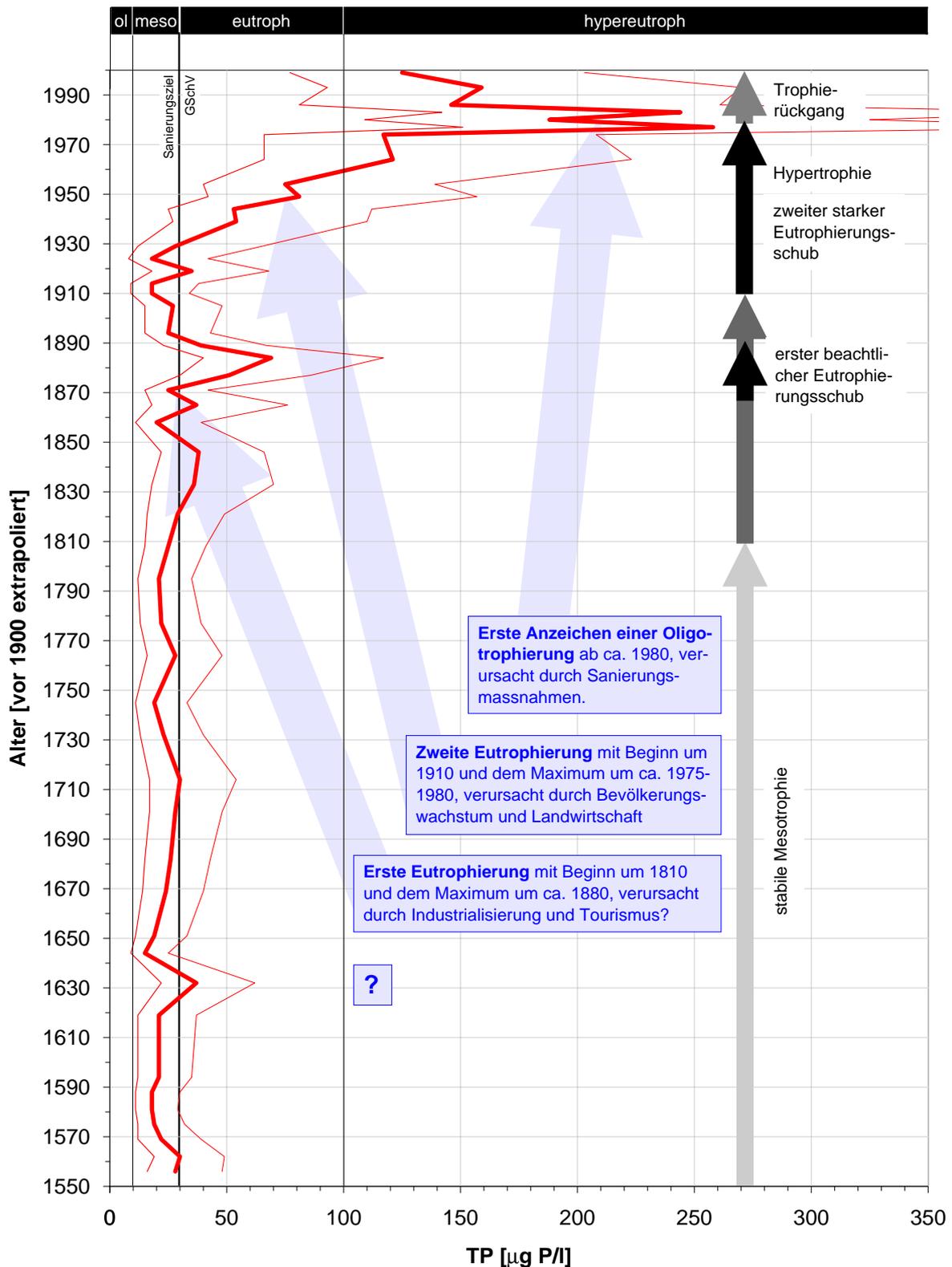
Die vorliegende Studie über die 'Rekonstruktion des früheren trophischen Zustandes im Zugersee mit im Sediment eingelagerten Schalen von Kieselalgen' hatte zum Ziel, die Trophiegrad- und die Gesamtposphor-Entwicklung des Zugersees mindestens bis ins 19. Jahrhundert zu ermitteln. Die Untersuchung ist von Interesse, weil der Zugersee im 20. Jahrhundert anthropogen bedingt eine bezüglich des Trophiegrades starke Veränderung durchgemacht hat und heute mittels externen Sanierungsmassnahmen erfolgreich versucht wird, den Trophiegrad zu verbessern. Neben diesem reinen Rekonstruktionsaspekt sollen mit den Untersuchungen chemische und biologische Sanierungsziele abgeleitet werden.

### Entwicklung der Gesamtposphor-Konzentration und des Trophiegrades (Abbildung 9)

Aufgrund der im Sediment vorgefundenen Kieselalgen kann abgeleitet werden, dass sich der Zugersee von ca. 1550 bis ca. 1810 in einer stabilen, eher schwachen Mesotrophie befand. Die rekonstruierten Gesamtposphorwerte zeigen für diese Zeitperiode von 260 Jahren unter oder um  $20 \mu\text{g P/l}$  gewesen sein. Anfangs des 19. Jahrhunderts erhöhte sich dann der Gesamtposphor langsam, so dass um ca. 1850 Konzentrationen um  $30$  bis  $40 \mu\text{g P/l}$  vorlagen, was auf eutrophe Verhältnisse schliessen lässt. Der Trophiegrad erreichte dann um 1880 mit einem beachtlichen Eutrophierungsschub einen ersten Maximalwert. Aufgrund der Rekonstruktion lagen Gesamtposphorwerte von  $50$  bis  $70 \mu\text{g P/l}$ , respektive deutlich eutrophe Verhältnisse vor. Dieser gewässerökologisch schlechte Zustand dürfte durch die Industrialisierung (Bevölkerungszunahme), die erhöhte Mobilität (Eisenbahnbau verursachte erhöhten Tourismus) und die fehlende Abwasserreinigung verursacht worden sein. Ab 1910 begann dann eine zweite Eutrophierungsphase, welche bis Ende der 1970er Jahre dauerte. Um ca. 1960 überschritten die Gesamtposphorwerte die Marke von  $100 \mu\text{g P/l}$ , was hypereutrophe Verhältnisse bedeutet. Diese massive Verschlechterung des Trophiegrades wurde einerseits durch die Bevölkerungszunahme und andererseits durch die Intensivierung der Landwirtschaft verursacht. Erst die Inbetriebnahme der Kläranlage Schönau im Jahre 1977, welche über eine Ringleitung (Vollendung 1991) um den Zugersee alle Abwässer des Zugersee-Einzugsgebietes sammelt und reinigt sowie Sanierungen und Extensivierungen im Bereich der Landwirtschaft, konnten eine Trendwende in der Phosphorbelastung des Zugersees einleiten. Die nun während rund 20 Jahren greifenden Sanierungsmassnahmen bewirkten aufgrund der Rekonstruktion eine deutliche Verminderung der Gesamtposphorkonzentration von über  $200 \mu\text{g P/l}$  auf rund  $130 \mu\text{g P/l}$  (rund  $120 \mu\text{g P/l}$  aufgrund der Messungen). Damit liegen heute im Vergleich zu 1980 deutlich bessere Nährstoffverhältnisse vor. Der Zustand muss aber immer noch als hocheutroph bezeichnet werden.

### Sanierungsziele

Der vor dem 19. Jahrhundert festgestellte schwach mesotrophe Zustand, charakterisiert durch oligotrophente Aufwuchsarten (z. B. *Mastogloia smithii* var. *lacustris*, *Brachysira neoexilis*) sowie durch mehrere oligo- bis mesotrophente *Cyclotella*-Arten (*Cyclotella distinguenda*, *C. comensis/pseudocomensis*, *C. bodanica* sowie *C. cyclopuncta*) stellen hinsichtlich der Kieselalgen ein anzustrebendes biologisches Ziel dar. Sofern mit den Sanierungsmassnahmen die mittlere Gesamtposphorkonzentration konstant auf unter  $30 \mu\text{g P/l}$  gesenkt werden kann, dürfte die heute vorhandene Dominanz der hypereutraphenten Frühlingsart *Stephanodiscus minutulus/parvus* entweder durch langschalige Formen der Gattungen *Asterionella*, *Fragilaria* und allenfalls *Tabellaria* und/oder durch einen grössere



**Abb. 9. Zusammenfassende Darstellung der trophischen Entwicklung im Zugersee.**

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 Eutrophierungsphasen (schwarze und graue Pfeile) beziehen sich nicht nur auf den Gesamtphosphor, sondern auch auf die im Sediment vorgefundenen Artenabfolgen der Kieselalgen.

ren Anteil von eher eutraphenten *Cyclotella*-Arten (z.B. *C. ocellata*, *C. radiosa/compta*) abgelöst werden. Damit die oben erwähnten **oligo- bis mesotraphenten *Cyclotella*-Arten** im Zugersee wieder dominieren, muss aber die mittlere Gesamtphosphorkonzentration auf **< 20 µg P/l** gesenkt werden können. Mit grosser Sicherheit wird sich der Erfolg der Sanierungsmassnahmen auch im **Uferbereich** äussern, indem dort vermehrt **mesotraphente Kieselalgenarten** an Bedeutung zunehmen werden.

Aufgrund der bis ca. 1900 vorhandenen beachtlich hohen Taxazahl und Diversität sowie der trotz grosser Entfernung zum Ufer (Kernentnahme bei der tiefsten Stelle, 200 m Wassertiefe) nicht zu vernachlässigenden Präsenz von oligo- bis mesotraphenten Aufwuchs-Kieselalgenarten kann angenommen werden, dass der **Uferzone** des Zugersees im 19. Jahrhundert noch eine deutlich grössere Bedeutung für die Primärproduktion zukam als heute. Ein wichtiges Indiz für diese Annahme liefert die Tatsache, dass damals die uferbewohnenden (periphytischen) Aufwuchsarten im Verhältnis zu den planktischen wesentlich mehr zur Artenvielfalt beitrugen. Daraus lässt sich ableiten, dass früher - bedingt durch geringe Nährstoffgehalte und entsprechend bessere Lichtverhältnisse - ein höherer Flächenanteil an durch pflanzliche Organismen besiedelbarem Substrat (grössere Tiefenausdehnung, ausgedehntere Flächen mit Wasserpflanzen und Aufwuchsarten) und mehr ökologische Nischen vorhanden waren. Die Flachwasserzonen dürften somit **ausgedehnte Wasserpflanzenfelder** aufgewiesen haben. Eine künftige Überwachung (Monitoring) sollte demnach neben den bisherigen chemischen auch biologische Parameter zur Überprüfung der oben erwähnten Sanierungsziele erfassen.

#### **Schlussbemerkung des Auftraggebers Amt für Umweltschutz Zug**

Die wissenschaftliche Begleitkommission zur Sanierung des Zugersees legte ein Sanierungsziel für den Zugersee von 40 µg P/l fest (mittlere Phosphorkonzentration über die Seetiefe). Das im Auftrag der Baudirektion durch die EAWAG im Jahre 1994 verfasste Gutachten 'Grundlagen für die Sanierung des Zugersees' kam zum Schluss, dass diese Konzentration bei einer anhaltenden jährlichen Phosphorzufuhr von 10 Tonnen in etwa 40 Jahren erreicht werden kann. Der Gewässerschutzvollzug im Rahmen der Vereinbarung der an den Zugersee anstossenden Kantone Zug, Schwyz und Luzern soll es möglich machen, dass dieses Ziel erreicht wird.

Die vorliegende Phosphor-Rekonstruktion zeigt, dass der Zugersee im wenig belasteten früheren Zustand vor 1820 und zwischen 1890 und 1920 eindeutig mesotrophe Verhältnisse (unter 30 µg P/l) aufgewiesen hat. Das Sanierungsziel der Begleitkommission liegt wenig über der Schwellenkonzentration zur Mesotrophie. Die Frage, ob eine Reduktion des aktuellen Sanierungszieles von 40 µg P/l auf 30 µg P/l, wie dies in Folge des Nachweises des mesotrophen Gewässertypus geltend gemacht werden kann, in der Praxis umsetzbar ist, muss zur Zeit noch nicht beantwortet werden. In den vergangenen 5 Jahren nahm der P-Inhalt im Zugersee jährlich um ca. 3% ab. Damit liegt die Abnahme im Rahmen der Berechnungen der EAWAG. Bei gleich gross bleibender Abnahmerate wird die mittlere P-Konzentration von 40 µg P/l in rund 35 bis 40 Jahren erreicht werden. Dannzumal wird zu beurteilen sein, ob eine weitere Reduktion der Phosphorkonzentration unter diese Konzentration möglich ist und angestrebt werden muss.

## 7. Literaturverzeichnis

- Aeschbach-Hertig, W. 1994: Helium und Tritium als Tracer für physikalische Prozesse in Seen. Diss. ETH Nr. 10714, 272 S.
- Ambühl, H. 1977: Überblick über den Zustand der Schweizerischen Oberflächengewässer. Gas, Wasser, Abwasser 57 (1): 27-32.
- Basler & Partner 1988: Sanierung und Regulierung des Zugersees und der Lorze. Vergleichende Beurteilung der Projektvarianten. Baudirektion des Kantons Zug / Zentralstelle für Umweltschutz.
- 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.
- Bloesch, J. & Sturm, M. 1986: Settling flux and sinking velocities of particulate phosphorus (PP) and particulate organic carbon (POC) in lake Zug, Switzerland. In: Sly, P.G. (ed.) Sediments and water interactions. Springer-Verlag, New York. 481-490.
- Brutschy, A. 1912: Monographische Studien am Zugersee. Arch. Hydr. 8: 43-108.
- EAWAG, 1984: Gutachten über die Sanierung des Zugersees mit besonderer Berücksichtigung des Projektes zur Seeregulierung. Im Auftrag der Baudirektion des Kantons Zug, Auftrag Nr. 4663.
- EAWAG, 1994: Grundlagen für die Sanierung des Zugersees. Im Auftrag der Baudirektion des Kantons Zug, Auftrag Nr. 37-4840.
- Fahrni, H.P. & Liechti, P. 1984: Der aktuelle Zustand des Zugersees. BUS-Bulletin 5, 3-8.
- Gloor, E. 1995: Methode der Temperaturmikrostruktur und deren Anwendung auf die Bodengrenzschicht in geschichteten Wasserkörpern. Diss. ETH Nr. 11336, 1-159.
- GVRZ (1998): Wohin fliesst unser Abwasser? Gewässerschutzverband der Region Zugersee-Küssnachersee-Ägerisee (GVRZ). 36 S.
- Hotz, B. 1999: Der Verkehr hinterlässt seine Spuren. In: Direktion für Bildung und Kultur des Kantons Zug: ZG Ein Heimatbuch, Balmer Verlag, Zug. 126-147.
- Imboden, D. 1984: Sanierung des Zugersees im Zusammenhang mit einem Projekt zur Seeregulierung. EAWAG Jahresbericht 1984, 77-78.
- Imboden, D.M., Stotz, B. & Wüest, A. 1988: Hypolimnic mixing in a deep alpine lake and the role of a storm event. Verh. Internat. Verein. Limnol., 23, 67-73.
- Iseli, Ch. 1997: Schilfschutzkonzept Zugersee. Schutz und Entwicklung der naturnahen Flachufer. Baudirektion des Kt. Zug / Amt für Raumplanung (Hrsg.). 1-105.
- Iten, A. 1933: Die Rötelfischerei im Zugersee. Festschrift zur Feier des 50. Jährigen Jubiläums des Schweizerischen Fischerei-Vereins: 1-15.
- Jaag, O. 1958: Probleme und Aufgaben des Gewässerschutzes im Einzugsgebiet der Reuss. Wasser- und Energiew. Zürich 8/9.
- J.A.M. 1990: Problembeladene Tiefenwasserableitung (TWA) Zugersee-Reuss. Schweiz. Fischereiz., 41 (2), S. 3.
- Jaquet, JM, Schanz, F., Bossard, P., Hanselmann, K. & Gendre, F. 1994: Measurements and significance of bio-optical parameters for remote sensing in two subalpine lakes of different trophic state. Aquatic Sciences 56: 3, 263-305.
- Keller, P. 1998: Die Wasserqualität in den Zuger Fliessgewässern und Seen. Blickpunkt Umwelt, Nr. 10: 4-19.

- Kelts, K. 1978: Geology and sedimentary history of Lakes Zug and Zurich, Switzerland. Dissertation ETH Zürich, 250 S.
- 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.
- Kunze, U. 1995: Die Nährstoffbelastung des Zugersees in den Jahren 1987/88 bis 1994. Amt für Umweltschutz des Kt. Zug (Hrsg.), 40 S.
- Lampert, W., Sommer, U., 1993: Limnökologie. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 1-440.
- Lantzsch, K. 1914: Studien über das Nannoplankton des Zugersees und seine Beziehung zum Zooplankton. Zool. Inst. Leipzig, 631-692.
- Livingstone, D.M. 1993: Temporal structure in the deep-water temperature of four Swiss lakes: A short-term climatic change indicator? In: Verhandlungen Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie, Sladeczkova, A. (ed.), Congress in Barcelona 1992, 25: 1, 75-81.
- Livingstone, D.M. 1997: An example of the simultaneous occurrence of climate-driven „sawtooth“ deep-water warming/cooling episodes in several Swiss lakes. Verh. Internat. Verein. Limnol. 26: 822-828.
- Locher & Cie AG 1988: Der Zugersee ist sanierbar. Ausstellung und Broschüre im Einkaufszentrum Zugerland zum 100 jährigen Jubiläum des Zuger Fischereiverbandes.
- 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.
- Märki, E., 1949: Die Limnologie der schweizerischen See und Flüsse. Zusammenstellung der Literatur seit 1900. Schweiz. Zeitschrift für Hydrologie 11 (3/4): 650-707.
- Mengis, M. 1996: Nitrogen elimination in lakes by N<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emission. Diss. ETH Nr. 11927, 1-95
- Mengis, M., Gächter, R. & Wehrli, B. 1997a: Stickstoff-Elimination in Schweizer Seen. Gas, Wasser, Abwasser 77 (3): 174-180.
- Mengis, M., Gächter, R., Wehrli, B. 1997b: Sources and sinks of nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) in deep lakes. Biogeochemistry 38: 281-301.
- Moor, Ch. 1995: Sinkende Bleibelastung im Zugerseesediment. EAWAG news 39 D: 10-12.
- Moor, Ch., Schaller, T. & Sturm, M. 1996: Recent changes in stable lead isotope ratios in sediments of lake Zug, Switzerland. Environmental Science & Technology 30: 10, 2928-2933.
- Nussbaumer, Th. 1909: Über die Verunreinigung von Seen durch Einleitung städtischer Abwässer mit spezieller Berücksichtigung des Zugersees. Dissertation Universität Zürich.
- 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.
- Regierungsrat Zug, 1949-1953: Kantonale Rechenschaftsberichte des Regierungsrates X. Fischerei- und Jagdwesen.
- Regierungsrat Zug 1990: Massnahmenpaket betreffend Sanierung und Regulierung des Zugersees. Bericht und Antrag des Regierungsrates vom 23. Januar 1990. Kanton Zug, Vorlage Nr. 6927, 91 S.
- Ruhlé, C. 1976: Die Bewirtschaftung des Seesaiblings (*Salvelinus alpinus salvelinus* L.) im Zugersee. Diss. ETH Zürich Nr. 5809, 221 S.
- Ruhlé, C. 1977: Biologie und Bewirtschaftung des Seesaiblings (*Salvelinus alpinus salvelinus* L.) im Zugersee. Schweiz. Z Hydrol., 39 (1), 12-45.

- Rupper E., Schramm T. & Brömstrup H. 1990: Sanierung des Zugersees. *Wasser, Energie, Luft* 82 (3/4): 57-59.
- Schalch, J. 1997: Zug kommt zum Zug. Umfeld, Baugeschichte und Auswirkungen der ersten Eisenbahnlinie im Kanton Zug. Verlag Victor Hotz AG, Steinhausen. 312 S.
- Scheffler, W., 1994: *Cyclotella pseudocomensis* nov. sp. (Bacillariophyceae) aus norddeutschen Seen. *Diatom Research* 9 (2): 355-369.
- Shannon, C. & Weaver, W. (1949): *The mathematical theory of communication*. Univ. Illinois Press. Urbana.
- Soracreppa, B. 1978: Jahreszeitliche Veränderungen von Wasserchemismus und Phykozöosen in zehn Seen der Umgebung von Zürich. *Vierteljahrsschr. Naturforsch. Ges. Zürich*, 123,161-235.
- Speck, J. 1984: Ur- und Frühgeschichte der Seenlandschaft der Innerschweiz. Der Vierwaldstättersee und die Seen der Zentralschweiz, 209-228. *Schriften des Kant. Museums für Urgeschichte in Zug*, 31.
- Steiner, H. 1944: Zur höheren Vegetation des Zugersees. *Zuger Neujaarsblatt*, 10-14.
- Steinert, H. 1982: Trübeströme als Erdgestalter. Uferrutschungen von Horgen und Zug untersucht. *Neue Zürcher Zeitung*, Nr. 286, 8. Dezember 1982, S. 65.
- 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., 1966-1973: Berichte an die Wasserversorgung der Stadt Zug über die biologische Untersuchung von Wasserproben aus dem Zugersee 1966-1973. Unveröffentlichte, interne Berichte.
- Thompson, R. & Kelts, K., 1974: Holocene sediments and magnetic stratigraphy from Lakes Zug and Zurich, Switzerland. *Sedimentology* 21, 577-596.
- Uttinger, A. 1900 (?): Frühere und heutige Zustände im Zugersee. Fang und Bestand der Uferfische betreffend. Buchdruckerei J. Kündig, Zug, 12 S.
- Wehrli, B., Wüest, A. & Imboden, D. 1995: Sind biogen meromiktische Seen intern sanierbar? Fallbeispiel Zugersee. In: *Verfahren zur Sanierung und Restaurierung stehender Gewässer; Jaeger/Koschel (Hrsg.), Limnologie aktuell* 8: 29-37.
- Wüest, A. & Gloor, M. 1998: Bottom boundary mixing: the role of near-sediment density stratification *Physical Processes in Lakes and Oceans. Coastal and Estuarine Studies* 54: 485-502.
- Ziegler, M. 1989: Wann kommt die Sanierung? *Schweiz. Fischereizeitung* 41 (1), 15.
- 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.

## **Anhang A**

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

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

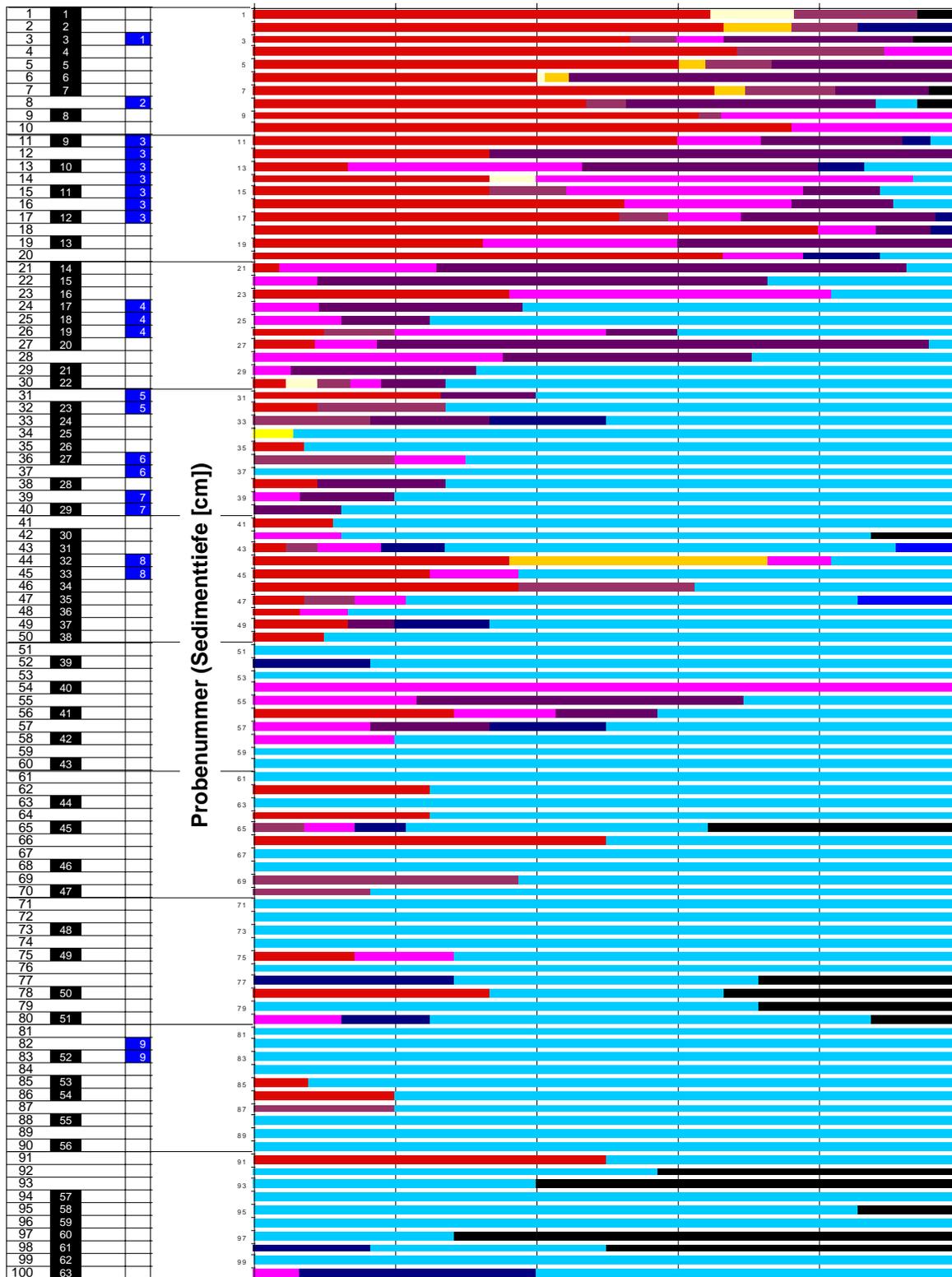
**Kieselalgen-Zählresultate**

# Zugersee

Probenummer  
63 Proben gezählt  
Turbidit gemäss Sturm

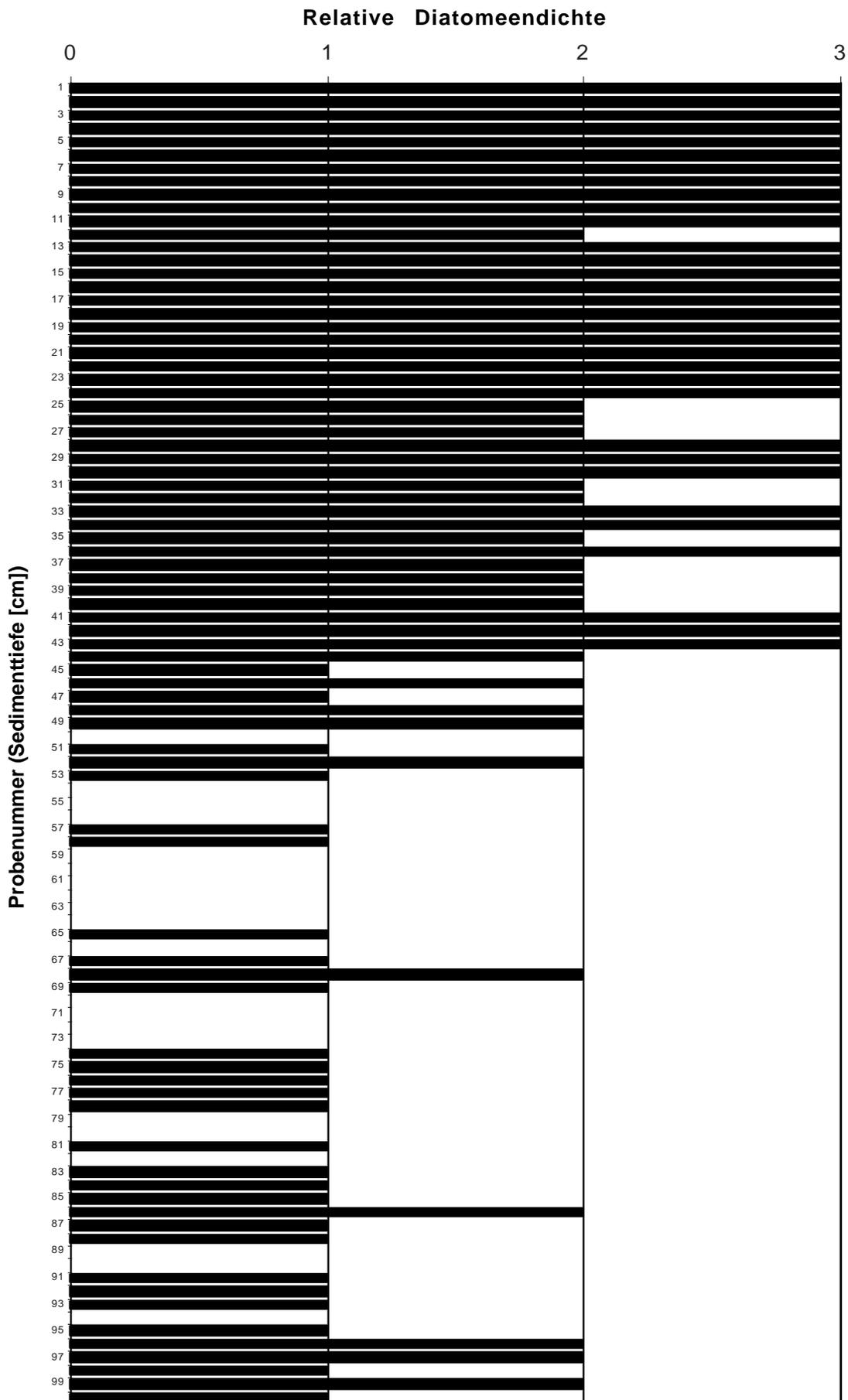
Relative Häufigkeit [%]

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



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

# Zugersee







# Zugersee, Sedimentkern ZG99-2

Kernentnahme: 25. November 1999

	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Probe 9	Probe 11	Probe 13	Probe 15	Probe 17	Probe 19	Probe 21	Probe 22	Probe 23	Probe 24	Probe 25	Probe 26	Probe 27	Probe 29	Probe 30	Probe 32	Probe 33	Probe 34	Probe 35	Probe 36	Probe 38	Probe 40	Probe 42	Probe 43	Probe 44	Probe 45				
Navicula scutelloides W.SMITH																																					
Navicula seminulum GRUNOW				0.4																																	
Navicula stroemii HUSTEDT																																					
Navicula subhamulata GRUNOW																																					
Navicula submuralis HUSTEDT																																					
Navicula subrotundata HUSTEDT																																					
Navicula tripunctata (O.F.MUELLER) BORY DE SAINT VINCENT					0.6		0.4					0.4																			0.6		0.8				
Navicula tuscula (EHRENBERG) GRUNOW																																					
Navicula utermoehlii HUSTEDT																																					
Navicula veneta KUETZING																0.8																					
Navicula vitabunda HUSTEDT																																					
Navicula wildii LANGE-BERTALOT																																					
Neidium dubium (EHRENBERG) CLEVE																																					
Nitzschia amphibia GRUNOW																																					
Nitzschia angustata (W.SMITH) GRUNOW																																					
Nitzschia archibaldii LANGE-BERTALOT																																					
Nitzschia bacillum HUSTEDT																																					
Nitzschia dissipata (KUETZING) GRUNOW																																					
Nitzschia fonticola GRUNOW			0.2																																		
Nitzschia graciliformis LANGE-BERTALOT et SIMONSEN				0.2																																	
Nitzschia HASSALL	1.6																																				
Nitzschia lacuum LANGE-BERTALOT																																					
Nitzschia liebetruthii RABENHORST																																					
Nitzschia modesta HUSTEDT																																					
Nitzschia paleacea GRUNOW																																					
Nitzschia pura HUSTEDT																																					
Nitzschia sinuata var. tabellaria (GRUNOW) GRUNOW																																					
Nitzschia supralittorea LANGE-BERTALOT																																					
Pinnularia borealis EHRENBERG																																					
Rhoicosphenia abbreviata (J.G.AGARDH) LANGE-BERTALOT																																					
Rhopalodia gibba (EHRENBERG) O.MUELLER																																					
Rhopalodia gibba var. parallela (GRUNOW) H.et M.PERAGALLO																																					
Stephanocostis chantaicus GENKAL et KUZMIN																																					
Stephanodiscus alpinus HUSTEDT	3.8	3.2	1.5		6.6	8.1	2.4	1.1	0.4		1.8	1.6	1.1	0.4	1.6	3.0	1.6		1.1		0.2	1.8		0.8	2.9	1.3	1.2	3.7	1.6	2.7	0.4	1.5	2.9	2.7	4.5		
Stephanodiscus hantzschii < 12um GRUNOW	1.2																																				
Stephanodiscus hantzschii = 12um gemäss Datensatz Lotter																																					
Stephanodiscus medius HAKANSSON																																					
Stephanodiscus minutulus (KUETZING) CLEVE et MOELLER	37.2	38.6	41.0	76.2	60.6	47.1	57.5	36.4	48.9	25.6	18.0	36.7	65.9	5.2	2.8	4.3	0.5	1.8	2.2	1.2																	
Stephanodiscus neoastraea HAKANSSON et HICKEL																																					
Stephanodiscus parvus STOERMER et HAKANSSON	4.8		3.4		1.9		1.8	8.3	21.8	7.2	2.4	1.5	2.6																								
Stephanodiscus vestibulis HAKANSSON, THERIOT & STOERMER	3.0	1.4	0.8	1.5	0.4	4.9																															
Surirella angusta KUETZING																																					
Surirella birostrata HUSTEDT																																					
Surirella linearis W.SMITH																																					
Tabellaria flocculosa (ROTH) KUETZING	0.4	6.6	9.0	1.7		1.3	3.7	28.8	11.8	39.6	41.4	22.7	20.1	56.7	31.2	17.1	14.5	36.1	34.8	19.3	6.3	0.8	6.4	4.5	2.0	2.1	6.2	1.4	0.4	2.3	7.4	2.7	5.8				
Thalassiosira pseudonana (= Cyclotella gordonensis Typ 1) gemäss Datensatz Lotter	0.6																																				
Anzahl gezählte Schalen	500	500	532	522	528	533	546	528	524	500	500	528	537	503	539	515	560	504	503	508	512	506	450	400	490	512	514	513	521	519	489	520	484				



# Zugersee, Sedimentkern ZG99-2

Kernentnahme: 25. November 1999

	Probe 46	Probe 47	Probe 48	Probe 49	Probe 50	Probe 52	Probe 54	Probe 56	Probe 58	Probe 60	Probe 63	Probe 65	Probe 68	Probe 70	Probe 73	Probe 75	Probe 78	Probe 80	Probe 83	Probe 85	Probe 86	Probe 88	Probe 90	Probe 94	Probe 95	Probe 96	Probe 97	Probe 98	Probe 99	Probe 100	
Cymbella pusilla GRUNOW																0.7															
Cymbella reinhardtii GRUNOW										0.4																					
Cymbella silesiaca BLEISCH								0.2	0.8																						
Cymbella sinuata GREGORY											0.3													0.8	0.5						
Cymbella subaequalis GRUNOW																								0.8	0.5		0.6				
Denticula kuetingii GRUNOW																	0.8						0.8	0.5			0.6	0.4			
Denticula tenuis KUETZING						0.8			0.5	0.8	1.2	0.5	1.1			1.2		1.8	0.3				2.5	1.4	0.9	0.6			1.4		
Diatoma ehrenbergii KUETZING					1.0		2.6								0.6					0.6											
Diatoma moniliformis KUETZING										0.2																					
Diatoma tenuis J.G.AGARDH		0.4						1.4													0.4	0.7									
Diatoma vulgare BORY DE SAINT VINCENT									0.5																						
Diploneis EHRENBERG																							0.8								
Diploneis elliptica (KUETZING) CLEVE															0.3						0.6			1.0		0.2		0.4	0.4	0.9	
Diploneis mauleri (BRUN) CLEVE																								0.5			1.3	0.4			
Diploneis modica HUSTEDT																														0.6	
Diploneis oblongella (NAEGELI) CLEVE-EULER		0.6	0.9						0.5			0.5	1.1						0.3	1.2	0.7	0.5				1.2	1.3				
Diploneis parva CLEVE			0.9	0.8				0.6																			0.2			0.6	
Epithemia adnata (KUETZING) BREBISSON																						0.5	0.8				0.2		0.7		
Epithemia smithii CARRUTHERS																							1.3								
Epithemia sores KUETZING												0.5	1.1									1.0									
Eunotia EHRENBERG														0.9							0.4		1.0							0.4	0.6
Fragilaria brevistriata GRUNOW								0.5	2.5	1.2	3.5				0.3		4.8	4.8	0.3		2.8			9.6	16.5	4.0	4.2	6.0	4.0		
Fragilaria capucina DESMAZIERES						1.5																									
Fragilaria capucina perminuta - Sippen KRAMMER et LANGE-BERTALOT										1.2				0.6																	
Fragilaria capucina var. amphi-cephala (GRUNOW) LANGE-BERTALOT																															
Fragilaria capucina var. austriaca (GRUNOW) LANGE-BERTALOT												1.2																			
Fragilaria capucina var. gracilis (OESTRUP) HUSTEDT				0.4																											
Fragilaria capucina var. rumpens (KUETZING) LANGE-BERTALOT									0.5																						
Fragilaria capucina var. vaucheriae (KUETZING) LANGE-BERTALOT		0.4																													
Fragilaria construens (EHRENBERG) GRUNOW																															
Fragilaria construens f. binodis (EHRENBERG) HUSTEDT										0.4																					
Fragilaria construens f. venter (EHRENBERG) HUSTEDT		1.9	4.3		1.2	1.1					2.4		5.6					2.6	0.3	1.0	5.6	0.5		7.2	4.7	4.0	1.7	2.0	7.6		
Fragilaria crotonensis KITTON	4.8	11.9			0.6	4.0	10.3	2.4			1.5	2.8	1.7									4.0		7.2	4.7	4.0	0.8	0.8	1.2		
Fragilaria LYNGBYE								2.0				1.9		7.7																	
Fragilaria nanana LANGE-BERTALOT		1.0	0.4	0.4				0.8																							
Fragilaria parasitica (W.SMITH) GRUNOW		0.4																													
Fragilaria pinnata EHRENBERG		0.6	1.1	1.0	4.1			1.0	4.7		1.5	1.4	2.2	7.4		2.3	1.2	1.3		1.0	5.6	6.0		10.0	6.1	5.0	7.4		3.6		
Fragilaria tenera (W.SMITH) LANGE-BERTALOT						1.1																					0.6	0.4	0.4		
Fragilaria ulna (NITZSCH) LANGE-BERTALOT		0.8				0.4		0.8	0.5	0.8												0.7	0.5				0.2		0.4		
Fragilaria ulna angustissima - Sippen KRAMMER et LANGE-BERTALOT																															
Fragilaria ulna var. acus (KUETZING) LANGE-BERTALOT								0.4	0.9	0.6			1.2																		
Gomphonema J.G.AGARDH		0.4							0.5	0.4	0.6																				
Gomphonema micropus KUETZING																						0.2					0.6				
Gomphonema olivaceum (HORNEMANN) BREBISSON									0.5																						
Gomphonema olivaceum var. olivaceoides (HUSTEDT) LANGE-BERTALOT et REICHARDT																															
Gomphonema parvulum (KUETZING) KUETZING																															
Gomphonema pumilum (GRUNOW) LANGE-BERTALOT et REICHARDT														0.2	0.6							0.5									
Gomphonema tergestinum FRICKE																															
Gyrosigma acuminatum (KUETZING) RABENHORST											0.3							0.4								0.5			0.4		
Gyrosigma attenuatum (KUETZING) RABENHORST																	0.8	1.3													
Gyrosigma HASSALL			0.4					0.2	0.2																		0.8				
Mastogloia smithii var. lacustris GRUNOW					0.8					0.4					0.3				1.3			3.5	2.0	3.0		0.9	0.6	2.1	0.2	0.9	
Melosira varians J.G.AGARDH		0.4																													
Meridion circulare (GREVILLE) J.G.AGARDH																															
Navicula BORY DE SAINT VINCENT		0.4																									0.2				
Navicula cincta (EHRENBERG) RALFS				0.8																											
Navicula cryptotenella LANGE-BERTALOT		0.4																							0.5		1.1	0.8			
Navicula cryptotenelloides LANGE-BERTALOT																															
Navicula densilineolata (LANGE-BERTALOT) LANGE-BERTALOT																															
Navicula elginensis (GREGORY) RALFS											0.6						0.4					0.5						0.4		0.7	
Navicula gottlandica GRUNOW																												0.4			
Navicula graciloides MAYER																			0.9												
Navicula lanceolata (J.G.AGARDH) EHRENBERG																											0.4				
Navicula lenzii HUSTEDT																															
Navicula menisculus SCHUMANN													0.6																		
Navicula oligotraphenta LANGE-BERTALOT et HOFMANN				0.8																											
Navicula placentula (EHRENBERG) GRUNOW									0.5																		0.6				
Navicula pseudoscutiformis HUSTEDT																															
Navicula pupula KUETZING			0.6											0.3														0.2			
Navicula reichardtiana LANGE-BERTALOT																															
Navicula rotunda HUSTEDT			0.9	0.8												0.9		1.3							0.5		0.8				

# Zugersee, Sedimentkern ZG99-2

Kernentnahme: 25. November 1999

	Probe 46	Probe 47	Probe 48	Probe 49	Probe 50	Probe 52	Probe 54	Probe 56	Probe 58	Probe 60	Probe 63	Probe 65	Probe 68	Probe 70	Probe 73	Probe 75	Probe 78	Probe 80	Probe 83	Probe 85	Probe 86	Probe 88	Probe 90	Probe 94	Probe 95	Probe 96	Probe 97	Probe 98	Probe 99	Probe 100
<i>Navicula scutelloides</i> W.SMITH																							1.9		1.0		0.6			
<i>Navicula seminulum</i> GRUNOW											0.6																			
<i>Navicula stroemii</i> HUSTEDT																														
<i>Navicula subhamulata</i> GRUNOW																														
<i>Navicula submuralis</i> HUSTEDT								0.6																						
<i>Navicula subrotundata</i> HUSTEDT														0.9				0.8						1.0	0.9	1.2	1.9		0.7	
<i>Navicula tripunctata</i> (O.F.MUELLER) BORY DE SAINT VINCENT	0.4																													
<i>Navicula tuscula</i> (EHRENBERG) GRUNOW											0.3		0.6	0.6				0.4	0.9								0.4			
<i>Navicula utermoehlii</i> HUSTEDT									0.5	0.6																			1.1	
<i>Navicula veneta</i> KUETZING																							0.8							
<i>Navicula vitabunda</i> HUSTEDT																														
<i>Navicula wildii</i> LANGE-BERTALOT																														
<i>Neidium dubium</i> (EHRENBERG) CLEVE						0.8																								
<i>Nitzschia amphibia</i> GRUNOW			1.1																											
<i>Nitzschia angustata</i> (W.SMITH) GRUNOW			0.4																							1.0			0.6	
<i>Nitzschia archibaldii</i> LANGE-BERTALOT																														
<i>Nitzschia bacillum</i> HUSTEDT									0.5																					
<i>Nitzschia dissipata</i> (KUETZING) GRUNOW																														
<i>Nitzschia fonticola</i> GRUNOW																														
<i>Nitzschia graciliformis</i> LANGE-BERTALOT et SIMONSEN																					0.4		1.7				0.6			
<i>Nitzschia HASSALL</i>																														
<i>Nitzschia lacuum</i> LANGE-BERTALOT																0.5												0.8		
<i>Nitzschia liebetruthii</i> RABENHORST																														
<i>Nitzschia modesta</i> HUSTEDT																0.7														
<i>Nitzschia paleacea</i> GRUNOW																														
<i>Nitzschia pura</i> HUSTEDT																														
<i>Nitzschia sinuata</i> var. <i>tabellaria</i> (GRUNOW) GRUNOW																								1.3						
<i>Nitzschia supralittorea</i> LANGE-BERTALOT		0.8																												
<i>Pinnularia borealis</i> EHRENBERG							0.4																							
<i>Rhoicosphenia abbreviata</i> (J.G.AGARDH) LANGE-BERTALOT												0.5																		
<i>Rhopalodia gibba</i> (EHRENBERG) O.MUELLER																														
<i>Rhopalodia gibba</i> var. <i>parallela</i> (GRUNOW) H.et M.PERAGALLO																									0.9					
<i>Stephanocostis chantaicus</i> GENKAL et KUZMIN			0.4				10.3	0.4		0.6	0.3																			
<i>Stephanodiscus alpinus</i> HUSTEDT	3.7	2.3	2.6	3.3	6.1	3.6	5.1	0.8	0.9	0.4	5.3	2.6	3.9	7.7	10.1	6.9	20.9	14.1	7.0	3.1	5.6	13.0	11.4	7.2	5.2	3.6	2.5	2.0	4.3	0.9
<i>Stephanodiscus hantzschii</i> < 12um GRUNOW						0.4																								
<i>Stephanodiscus hantzschii</i> = 12um gemäss Datensatz Lotter																														
<i>Stephanodiscus medius</i> HAKANSSON																														
<i>Stephanodiscus minutulus</i> (KUETZING) CLEVE et MOELLER	10.4	10.6	4.3	2.9	2.2	5.9		1.2	2.3	0.8		1.4																	2.6	
<i>Stephanodiscus neoastraea</i> HAKANSSON et HICKEL			0.9	0.4								2.1		1.2	1.3	2.3		1.8		1.4	0.7					0.4				
<i>Stephanodiscus parvus</i> STOERMER et HAKANSSON	10.8	12.5				0.8																								
<i>Stephanodiscus vestibulis</i> HAKANSSON, THERIOT & STOERMER			0.4		0.6																									
<i>Surirella angusta</i> KUETZING																														
<i>Surirella birostrata</i> HUSTEDT																					0.4						0.2			
<i>Surirella linearis</i> W.SMITH																													1.1	
<i>Tabellaria flocculosa</i> (ROTH) KUETZING	11.6		0.4	5.4	1.2	15.4	10.3	2.0	3.8	4.3	0.3	2.1		0.6	1.0	1.6		0.9											3.5	
<i>Thalassiosira pseudonana</i> (= <i>Cyclotella gordonensis</i> Typ 1) gemäss Datensatz Lotter																														
Anzahl gezählte Schalen	483	520	467	520	507	525	39	505	426	489	340	429	178	338	308	433	249	227	341	490	142	200	237	209	212	501	472	501	276	344

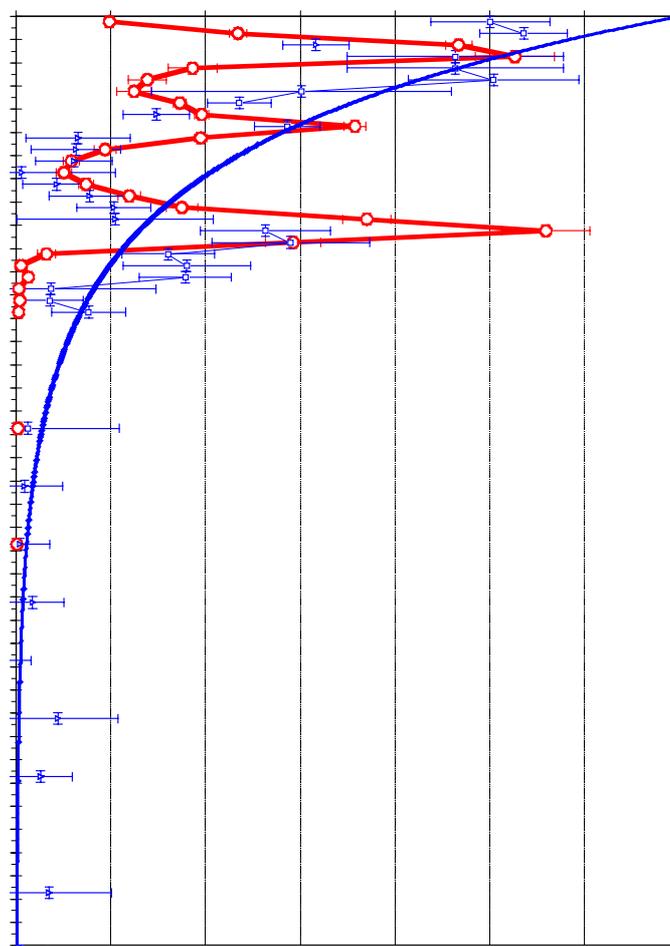
## **Anhang B**

**Unterlagen zur Datierung des Sedimentkernes ZG99-2  
Isotopenmessungen  
Gefrierkern ZG00-A**

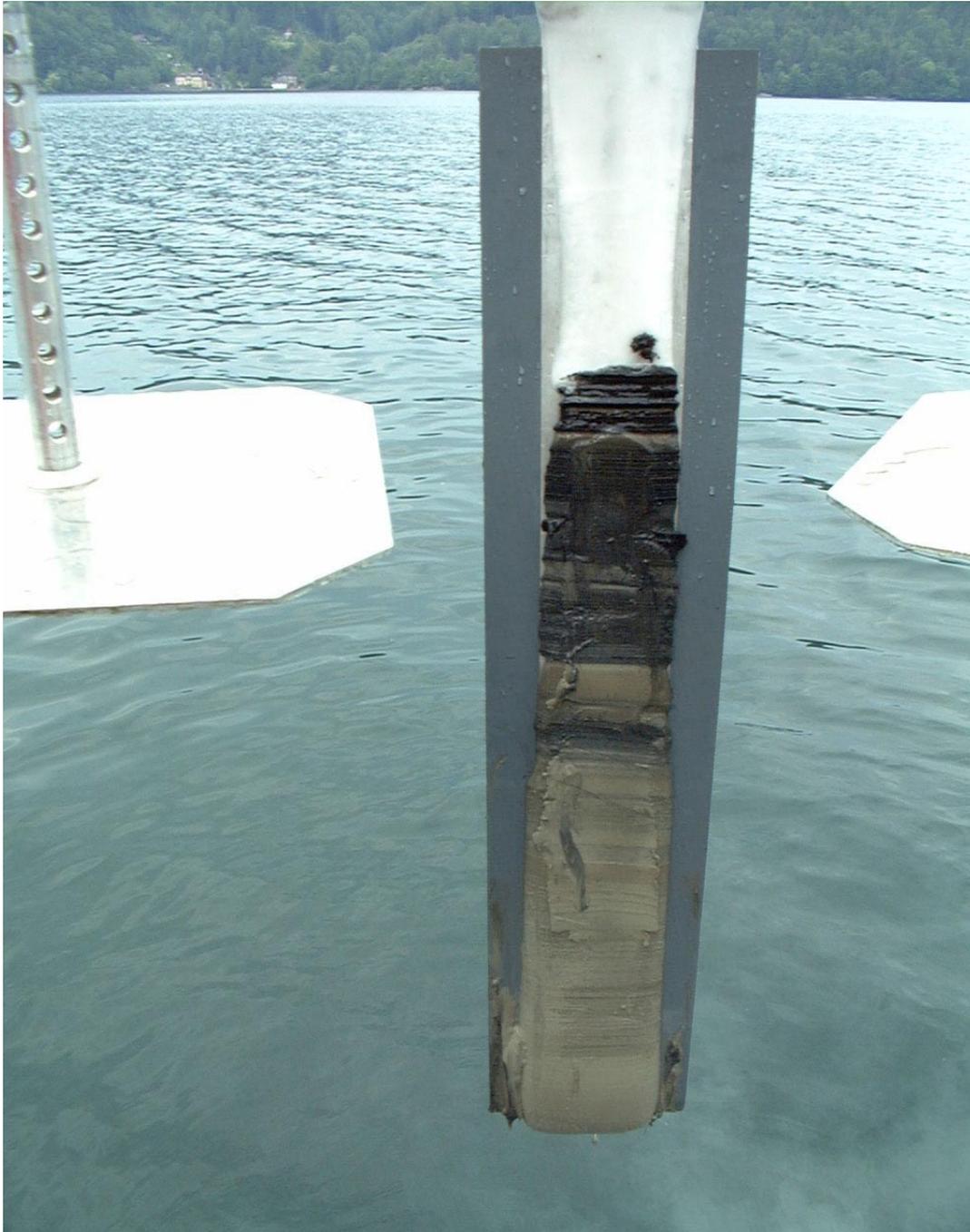
**Projekt :** Zugersee 1999  
**Station :** ZG99-2 Südbecken, tiefste Stelle  
**Wassertiefe:** 200 m  
**Probenahmedatum :** 25.11.1999  
**EAWAG corer Ø63mm:** A.Zwysig  
**Auswertung:** M.Sturm / 28.3.2001  
**Update der Datierung mit Ergebnissen freeze core 2000**

Probe-Nr.	Tiefe [cm]		Sedimentation		Alter		Turbidite	Bemerkungen * nach Zülig (1982)
	oben	unten	[mm/y]	[y/cm]	oben	unten		
99-2_00	1	0	1	1.7	6	1999	1993	Kompression des Kerns bei Probenahme!
99-2_00	2	1	2	1.4	7	1993	1986	
99-2_00	3	2	3	0	0	1986	1986 T-1	
<b>99-2_00</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>3.3</b>	<b>3</b>	<b>1986</b>	<b>1983</b>	<b>1986/137Cs "matching year"</b>
99-2_00	5	4	5	3.3	3	1983	1980	Kompression des Kerns bei Probenahme!
99-2_00	6	5	6	3.3	3	1980	1977	
99-2_00	7	6	7	3.3	3	1977	1974	
99-2_00	8	7	8	0	0	1974	1974 T-2	* Rutschung Walchwil 1971?
99-2_00	9	8	9	3.7	2.7	1974	1971	
99-2_01	0	9	10	3.7	2.7	1971	1969	
99-2_01	1	10	11	0	0	1969	1969 T-3	
99-2_01	2	11	12	0	0	1969	1969 T-3	
99-2_01	3	12	13	0	0	1969	1969 T-3	
99-2_01	4	13	14	0	0	1969	1969 T-3	
99-2_01	5	14	15	0	0	1969	1969 T-3	
99-2_01	6	15	16	0	0	1969	1969 T-3	
99-2_01	7	16	17	0	0	1969	1969 T-3	
99-2_01	8	17	18	2	4.9	1969	1964	
<b>99-2_01</b>	<b>9</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>2</b>	<b>4.9</b>	<b>1964</b>	<b>1959</b>	<b>1963/137Cs</b>
99-2_02	0	19	20	2	4.9	1959	1954	
99-2_02	1	20	21	2	4.9	1954	1949	
99-2_02	2	21	22	2	4.9	1949	1944	
99-2_02	3	22	23	2	4.9	1944	1939	
99-2_02	4	23	24	0	0	1939	1939 T-4	*Hochwasser von 1934?
99-2_02	5	24	25	0	0	1939	1939 T-4	*Hochwasser von 1934?
99-2_02	6	25	26	0	0	1939	1939 T-4	*Hochwasser von 1934?
99-2_02	7	26	27	2	5	1939	1934	
99-2_02	8	27	28	2	5	1934	1929	
99-2_02	9	28	29	2	5	1929	1924	
99-2_03	0	29	30	2	5	1924	1919	
99-2_03	1	30	31	0	0	1919	1919 T-5	
99-2_03	2	31	32	0	0	1919	1919 T-5	
99-2_03	3	32	33	2.1	4.8	1919	1914	
99-2_03	4	33	34	2.1	4.8	1914	1910	
99-2_03	5	34	35	2.1	4.8	1910	1905	
99-2_03	6	35	36	0	0	1905	1905 T-6	
99-2_03	7	36	37	0	0	1905	1905 T-6	
99-2_03	8	37	38	1.9	5.3	1905	1900	
99-2_03	9	38	39	0	0	1900	1900 T-7	
99-2_04	0	39	40	0	0	1900	1900 T-7	
99-2_04	1	40	41	1.9	5.3	1900	1894	
99-2_04	2	41	42	1.9	5.3	1894	1889	
99-2_04	3	42	43	1.9	5.3	1889	1884	
99-2_04	4	43	44	0	0	1884	1884 T-8	
99-2_04	5	44	45	0	0	1884	1884 T-8	
99-2_04	6	45	46	1.6	6.3	1884	1877	Alter extrapoliert
99-2_04	7	46	47	1.6	6.3	1877	1871	Alter extrapoliert
99-2_04	8	47	48	1.6	6.3	1871	1865	Alter extrapoliert
99-2_04	9	48	49	1.6	6.3	1865	1858	Alter extrapoliert
99-2_05	0	49	50	1.6	6.3	1858	1852	Alter extrapoliert

Probe-Nr.	Sedimentation		Alter		Turbidite	Bemerkungen		
	oben [cm]	unten [cm]	[mm/y]	[y/cm]			oben	unten
99-2_05	1	50	51	1.6	6.3	1852	1846	Alter extrapoliert
99-2_05	2	51	52	1.6	6.3	1846	1840	Alter extrapoliert
99-2_05	3	52	53	1.6	6.3	1840	1833	Alter extrapoliert
99-2_05	4	53	54	1.6	6.3	1833	1827	Alter extrapoliert
99-2_05	5	54	55	1.6	6.3	1827	1821	Alter extrapoliert
99-2_05	6	55	56	1.6	6.3	1821	1814	Alter extrapoliert
99-2_05	7	56	57	1.6	6.3	1814	1808	Alter extrapoliert
99-2_05	8	57	58	1.6	6.3	1808	1802	Alter extrapoliert
99-2_05	9	58	59	1.6	6.3	1802	1795	Alter extrapoliert
99-2_06	0	59	60	1.6	6.3	1795	1789	Alter extrapoliert
99-2_06	1	60	61	1.6	6.3	1789	1783	Alter extrapoliert
99-2_06	2	61	62	1.6	6.3	1783	1777	Alter extrapoliert
99-2_06	3	62	63	1.6	6.3	1777	1770	Alter extrapoliert
99-2_06	4	63	64	1.6	6.3	1770	1764	Alter extrapoliert
99-2_06	5	64	65	1.6	6.3	1764	1758	Alter extrapoliert
99-2_06	6	65	66	1.6	6.3	1758	1751	Alter extrapoliert
99-2_06	7	66	67	1.6	6.3	1751	1745	Alter extrapoliert
99-2_06	8	67	68	1.6	6.3	1745	1739	Alter extrapoliert
99-2_06	9	68	69	1.6	6.3	1739	1732	Alter extrapoliert
99-2_07	0	69	70	1.6	6.3	1732	1726	Alter extrapoliert
99-2_07	1	70	71	1.6	6.3	1726	1720	Alter extrapoliert
99-2_07	2	71	72	1.6	6.3	1720	1714	Alter extrapoliert
99-2_07	3	72	73	1.6	6.3	1714	1707	Alter extrapoliert
99-2_07	4	73	74	1.6	6.3	1707	1701	Alter extrapoliert
99-2_07	5	74	75	1.6	6.3	1701	1695	Alter extrapoliert
99-2_07	6	75	76	1.6	6.3	1695	1688	Alter extrapoliert
99-2_07	7	76	77	1.6	6.3	1688	1682	Alter extrapoliert
99-2_07	8	77	78	1.6	6.3	1682	1676	Alter extrapoliert
99-2_07	9	78	79	1.6	6.3	1676	1669	Alter extrapoliert
99-2_08	0	79	80	1.6	6.3	1669	1663	Alter extrapoliert
99-2_08	1	80	81	1.6	6.3	1663	1657	Alter extrapoliert
99-2_08	2	81	82	0	0	1657	1657	T-9 Alter extrapoliert
99-2_08	3	82	83	0	0	1657	1657	T-9 Alter extrapoliert
99-2_08	4	83	84	1.6	6.3	1657	1651	Alter extrapoliert
99-2_08	5	84	85	1.6	6.3	1651	1644	Alter extrapoliert
99-2_08	6	85	86	1.6	6.3	1644	1638	Alter extrapoliert
99-2_08	7	86	87	1.6	6.3	1638	1632	Alter extrapoliert
99-2_08	8	87	88	1.6	6.3	1632	1625	Alter extrapoliert
99-2_08	9	88	89	1.6	6.3	1625	1619	Alter extrapoliert
99-2_09	0	89	90	1.6	6.3	1619	1613	Alter extrapoliert
99-2_09	1	90	91	1.6	6.3	1613	1606	Alter extrapoliert
99-2_09	2	91	92	1.6	6.3	1606	1600	Alter extrapoliert
99-2_09	3	92	93	1.6	6.3	1600	1594	Alter extrapoliert
99-2_09	4	93	94	1.6	6.3	1594	1588	Alter extrapoliert
99-2_09	5	94	95	1.6	6.3	1588	1581	Alter extrapoliert
99-2_09	6	95	96	1.6	6.3	1581	1575	Alter extrapoliert
99-2_09	7	96	97	1.6	6.3	1575	1569	Alter extrapoliert
99-2_09	8	97	98	1.6	6.3	1569	1562	Alter extrapoliert
99-2_09	9	98	99	1.6	6.3	1562	1556	Alter extrapoliert
99-2_10	0	99	100	1.6	6.3	1556	1550	Alter extrapoliert
99-2_10	1	100	101	1.6	6.3	1550	1543	Alter extrapoliert
99-2_10	2	101	102	1.6	6.3	1543	1537	Alter extrapoliert
99-2_10	4	102	104	1.6	6.3	1537	1531	Alter extrapoliert



**Abb. B1: Isotopenmessungen Zugersee-Sedimentkern ZG99-2.**  
 Rote Kurve  $^{137}\text{Cs}$ ; blaue Kurve  $^{210}\text{Pb}$ .  
 Messungen durch Dr. Mike Sturm, EAWAG.



**Abb. B2: Gefrierkern ZG00-A aus dem Südbecken des Zugersees, welches eine Wassertiefe von 200 m aufweist. Dieser Kern wurde im Rahmen eines Tests mit dem Freeze Corer entnommen, der erstmals in Tiefen >100 m eingesetzt wurde. Da das Gerät nur für Wassertiefen <100 m entwickelt wurde, ist der obere Bereich des Gefrierkerns angetaut. Dieser Probenahmetest erfolgte durch die EAWAG in Zusammenarbeit mit dem GFZ-Potsdam und war nicht Bestandteil des Datierungsauftrages des Kt. Zug.**

## **Anhang C**

### **Wassergehalt des Sedimentkernes ZG99-2**

Tiefe oben [cm]	Tiefe unten [cm]	Schalen- gewicht [g]	Frisch- gewicht [g]	Trocken- gewicht [g]	Masse Wasser [g]	Masse Sediment [g]	Dichte Wa. Sed. [g/cm3]	Wasser- gehalt [%TS]	Porosi- tät [%]	Dichte Sedim. [g/cm3]
0	1	11.5158	21.6895	13.2101	8.4794	1.6943	1 2.5	83	93	0.1850
1	2	11.5744	23.4228	13.7356	9.6872	2.1612	1 2.5	82	92	0.2048
2	3	11.5739	21.9176	14.5818	7.3358	3.0079	1 2.5	71	86	0.3523
3	4	11.5165	25.0662	15.0759	9.9903	3.5594	1 2.5	74	88	0.3118
4	5	11.5458	21.6113	13.3782	8.2331	1.8324	1 2.5	82	92	0.2044
5	6	11.5443	22.2779	13.4958	8.7821	1.9515	1 2.5	82	92	0.2041
6	7	11.5495	22.1255	13.6279	8.4976	2.0784	1 2.5	80	91	0.2228
7	8	11.5744	22.0974	14.4307	7.6667	2.8563	1 2.5	73	87	0.3242
8	9	11.5466	25.0667	15.5576	9.5091	4.011	1 2.5	70	86	0.3609
9	10	11.5748	22.1423	14.457	7.6853	2.8822	1 2.5	73	87	0.3261
10	11	11.5484	23.2021	15.8586	7.3435	4.3102	1 2.5	63	81	0.4753
11	12	11.5767	26.8362	18.178	8.6582	6.6013	1 2.5	57	77	0.5843
12	13	11.5428	27.8711	18.4741	9.397	6.9313	1 2.5	58	77	0.5696
13	14	11.576	23.9697	16.6647	7.305	5.0887	1 2.5	59	78	0.5448
14	15	11.5432	27.7264	18.4439	9.2825	6.9007	1 2.5	57	77	0.5730
15	16	11.561	25.9818	17.8931	8.0887	6.3321	1 2.5	56	76	0.5962
16	17	11.5525	30.4399	19.1745	11.2654	7.622	1 2.5	60	79	0.5325
17	18	11.5355	25.5114	16.6789	8.8325	5.1434	1 2.5	63	81	0.4723
18	19	11.5781	24.1307	15.1106	9.0201	3.5325	1 2.5	72	86	0.3386
19	20	11.5767	23.4057	14.9427	8.463	3.366	1 2.5	72	86	0.3431
20	21	11.5772	23.3924	14.6154	8.777	3.0382	1 2.5	74	88	0.3041
21	22	11.5519	25.2218	15.6604	9.5614	4.1085	1 2.5	70	85	0.3667
22	23	11.5493	27.5865	16.7666	10.8199	5.2173	1 2.5	67	84	0.4042
23	24	11.5816	27.5299	18.04	9.4899	6.4584	1 2.5	60	79	0.5349
24	25	11.5782	28.6532	20.2918	8.3614	8.7136	1 2.5	49	71	0.7355
25	26	11.5755	30.1939	21.3044	8.8895	9.7289	1 2.5	48	70	0.7612
26	27	11.5124	28.9642	21.2544	7.7098	9.742	1 2.5	44	66	0.8394
27	28	11.5215	25.2597	16.2341	9.0256	4.7126	1 2.5	66	83	0.4319
28	29	11.5357	26.8074	16.1851	10.6223	4.6494	1 2.5	70	85	0.3725
29	30	11.5485	24.7144	15.9655	8.7489	4.417	1 2.5	66	83	0.4200
30	31	11.5495	27.9931	17.4394	10.5537	5.8899	1 2.5	64	82	0.4562
31	32	11.5513	27.5723	19.3727	8.1996	7.8214	1 2.5	51	72	0.6904
32	33	11.5752	29.6645	20.7883	8.8762	9.2131	1 2.5	49	71	0.7334
33	34	11.5747	28.2217	19.2078	9.0139	7.6331	1 2.5	54	75	0.6326
34	35	11.5779	26.4983	18.4426	8.0557	6.8647	1 2.5	54	75	0.6355
35	36	11.5161	29.7425	20.4455	9.297	8.9294	1 2.5	51	72	0.6939
36	37	11.5459	30.4204	20.449	9.9714	8.9031	1 2.5	53	74	0.6579
37	38	11.5505	25.5879	17.8669	7.721	6.3164	1 2.5	55	75	0.6164
38	39	11.5488	28.3648	19.0559	9.3089	7.5071	1 2.5	55	76	0.6098
39	40	11.5203	34.0364	24.2153	9.8211	12.695	1 2.5	44	66	0.8521
40	41	11.5348	24.8024	18.9923	5.8101	7.4575	1 2.5	44	66	0.8481
41	42	11.5812	32.2167	21.6819	10.5348	10.1007	1 2.5	51	72	0.6930
42	43	11.5475	26.232	18.7136	7.5184	7.1661	1 2.5	51	72	0.6901
43	44	11.5807	28.8636	20.2328	8.6308	8.6521	1 2.5	50	71	0.7155
44	45	11.5085	31.9314	21.845	10.0864	10.3365	1 2.5	49	71	0.7268
45	46	11.5758	33.8923	23.4535	10.4388	11.8777	1 2.5	47	69	0.7819
46	47	11.5475	31.0829	22.2465	8.8364	10.699	1 2.5	45	67	0.8157
47	48	11.5154	31.8008	23.2337	8.5671	11.7183	1 2.5	42	65	0.8841
48	49	11.5485	33.5139	26.3494	7.1645	14.8009	1 2.5	33	55	1.1311
49	50	11.5516	34.429	26.5328	7.8962	14.9812	1 2.5	35	57	1.0787
50	51	11.5497	32.6025	24.2209	8.3816	12.6712	1 2.5	40	62	0.9421
51	52	11.5079	31.3354	24.1466	7.1888	12.6387	1 2.5	36	59	1.0322
52	53	11.5459	34.4629	25.167	9.2959	13.6211	1 2.5	41	63	0.9238
53	54	11.5427	32.6637	26.4377	6.226	14.895	1 2.5	29	51	1.2225
54	55	11.5342	34.3043	27.6409	6.6634	16.1067	1 2.5	29	51	1.2289
55	56	11.5471	32.626	24.9447	7.6813	13.3976	1 2.5	36	59	1.0274
56	57	11.5193	33.0191	24.7667	8.2524	13.2474	1 2.5	38	61	0.9776

Tiefe oben [cm]	Tiefe unten [cm]	Schalen- gewicht [g]	Frisch- gewicht [g]	Trocken- gewicht [g]	Masse Wasser [g]	Masse Sediment [g]	Dichte Wa. Sed. [g/cm3]	Wasser- gehalt [%TS]	Porosi- tät [%]	Dichte Sedim. [g/cm3]
57	58	11.5493	33.653	26.7374	6.9156	15.1881	1 2.5	31	53	1.1691
58	59	11.5728	36.0983	28.7371	7.3612	17.1643	1 2.5	30	52	1.2065
59	60	11.548	37.4045	30.3321	7.0724	18.7841	1 2.5	27	48	1.2878
60	61	11.5522	35.7023	28.2895	7.4128	16.7373	1 2.5	31	53	1.1864
61	62	11.5203	31.1462	24.2813	6.8649	12.761	1 2.5	35	57	1.0661
62	63	11.5781	33.9033	25.9482	7.9551	14.3701	1 2.5	36	58	1.0487
63	64	11.5195	34.1453	24.8118	9.3335	13.2923	1 2.5	41	64	0.9073
64	65	11.5202	26.5327	19.1669	7.3658	7.6467	1 2.5	49	71	0.7335
65	66	11.5531	30.9256	21.9072	9.0184	10.3541	1 2.5	47	69	0.7868
66	67	11.5784	31.1752	22.8624	8.3128	11.284	1 2.5	42	65	0.8797
67	68	11.5168	33.5623	24.6143	8.948	13.0975	1 2.5	41	63	0.9232
68	69	11.5787	32.5046	23.9494	8.5552	12.3707	1 2.5	41	63	0.9161
69	70	11.5485	32.5724	23.2494	9.323	11.7009	1 2.5	44	67	0.8356
70	71	11.5154	31.3928	23.2599	8.1329	11.7445	1 2.5	41	63	0.9153
71	72	11.5405	30.3385	21.2545	9.084	9.714	1 2.5	48	70	0.7490
72	73	11.5498	29.2381	20.9168	8.3213	9.367	1 2.5	47	69	0.7762
73	74	11.5496	28.9457	20.4269	8.5188	8.8773	1 2.5	49	71	0.7355
74	75	11.5127	34.4821	23.2268	11.2553	11.7141	1 2.5	49	71	0.7348
75	76	11.535	31.0908	21.4658	9.625	9.9308	1 2.5	49	71	0.7303
76	77	11.5189	31.2126	21.9474	9.2652	10.4285	1 2.5	47	69	0.7761
77	78	11.5117	30.2941	20.9157	9.3784	9.404	1 2.5	50	71	0.7157
78	79	11.5464	26.8037	18.9096	7.8941	7.3632	1 2.5	52	73	0.6793
79	80	11.5761	27.0446	19.507	7.5376	7.9309	1 2.5	49	70	0.7405
80	81	11.5585	32.1989	22.349	9.8499	10.7905	1 2.5	48	70	0.7617
81	82	11.5757	32.9509	24.4074	8.5435	12.8317	1 2.5	40	62	0.9383
82	83	11.5427	32.3865	23.7926	8.5939	12.2499	1 2.5	41	64	0.9078
83	84	11.5745	28.3499	20.2441	8.1058	8.6696	1 2.5	48	70	0.7491
84	85	11.5494	31.3053	22.9907	8.3146	11.4413	1 2.5	42	64	0.8875
85	86	11.5751	35.918	23.7484	12.1696	12.1733	1 2.5	50	71	0.7144
86	87	11.5534	24.9554	18.2639	6.6915	6.7105	1 2.5	50	71	0.7157
87	88	11.5072	28.4717	20.3218	8.1499	8.8146	1 2.5	48	70	0.7550
88	89	11.5772	32.5686	22.8573	9.7113	11.2801	1 2.5	46	68	0.7931
89	90	11.5488	26.9556	19.7465	7.2091	8.1977	1 2.5	47	69	0.7816
90	91	11.5479	32.0228	21.9548	10.068	10.4069	1 2.5	49	71	0.7313
91	92	11.538	30.4334	20.9915	9.4419	9.4535	1 2.5	50	71	0.7149
92	93	11.549	29.7972	20.7168	9.0804	9.1678	1 2.5	50	71	0.7192
93	94	11.5184	26.489	18.7013	7.7877	7.1829	1 2.5	52	73	0.6738
94	95	11.5472	29.5407	19.8852	9.6555	8.338	1 2.5	54	74	0.6418
95	96	11.5164	29.427	20.0157	9.4113	8.4993	1 2.5	53	73	0.6634
96	98	11.5759	45.4223	29.7742	15.6481	18.1983	1 2.5	46	68	1.5875
98	100	11.5119	45.948	28.7824	17.1656	17.2705	1 2.5	50	71	1.4348
100	102	11.5801	50.5963	30.7991	19.7972	19.219	1 2.5	51	72	1.3985
102	104	11.549	47.3343	29.1113	18.223	17.5623	1 2.5	51	72	1.3912

