

# Abnahme des Phosphorgehalts im Zugersee - Stand 2010



**Alfred Wüest und Beat Müller**

Eawag –  
Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology  
Seestrasse 79, CH-6047 Kastanienbaum

Dezember 2010

# Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund	3
2	Aktuelle Phosphorbilanz	5
3	Entwicklung des künftigen Phosphorgehalts	15
4	Zusammenfassung und Beantwortung der Fragen	17
5	Referenzen	20
6	Anhang	21

## Dank

Rudolf Rüttimann und Peter Keller, AfU Zug, danken wir für die angenehme und speditive Zusammenarbeit und für das Überlassen aller notwendiger Daten. Bei Ruth Stierli, Eawag, bedanken wir uns für die P-Analysen der Sedimentkerne. Martin Schmid und Bernhard Wehrli haben den Bericht kritisch geprüft.

# 1 Hintergrund

Die Eutrophierung des Zugersees erreichte 1982 mit einem Phosphorgehalt von 635 t (200 mg-P m<sup>-3</sup>) den Höhepunkt. Seither nimmt der Phosphorinhalt stetig ab. Obwohl der Rückgang zur Zeit ~14 t-P yr<sup>-1</sup> beträgt (~5% yr<sup>-1</sup>), liegt die aktuelle mittlere Konzentration von Phosphor (P) im See noch immer bei ~85 mg-P m<sup>-3</sup>. Damit ist der Zugersee nach wie vor einer der nährstoffreichsten Seen der Schweiz, obwohl offensichtlich die Belastung in den letzten 30 Jahren deutlich abgenommen hat. Zwei Gründe sind für die hohe P-Konzentration verantwortlich: (1) Die hydraulische Aufenthaltszeit beträgt ~15 Jahre, so dass die enorme Menge von P aus den 1980-er Jahren nur langsam aus dem See gespült wird. (2) Zudem ist der See unterhalb von 100 m Tiefe praktisch permanent dichtgeschichtet. Auch während der Abkühlung im Winter wird das nährstoffhaltige Tiefenwasser kaum mit dem abgereicherten Oberflächenwasser vermischt. Das enorme P-Reservoir in der Tiefe kann somit weitgehend unbehelligt und „geschützt“ vor dem Kontakt mit dem Seeausfluss in der Tiefe langfristig verweilen. Aus diesem Grund, und trotz der zusätzlichen Senke für P welche die P-Nettosedimentation darstellt, beträgt die Aufenthaltszeit des P ~16 Jahre. Dass in einem See die P-Aufenthaltszeit und die hydraulische Aufenthaltszeit praktisch gleich sind, ist unüblich und eine spezielle Eigenschaft des Zugersees.

Seit Jahrzehnten werden bedeutende Anstrengungen unternommen, um die Belastung des Zugersees aus der Siedlungsentwässerung (Ringleitung um den Zugersee) und der Landwirtschaft (Vergrößerung Lagervolumen, ausgeglichene Nährstoffbilanz) zu reduzieren. Die geltenden gesetzlichen Vorgaben wurden umgesetzt. Seit 1991 wirken zusätzliche Massnahmen in der Landwirtschaft (Düngeverbot entlang der Gewässer, Aufstockungsverbot, etc.). Die Begleitkommission Zugersee hat 1994 das Sanierungsziel von 40 mg m<sup>-3</sup> Phosphor für den Zugersee festgelegt. Im Jahre 2002 wurden Abklärungen für die Sanierung des Zugersees mit einem Projekt nach Artikel 62a Gewässerschutzgesetz getroffen. Das Projekt wurde jedoch wegen ungünstigem Verhältnis von Kosten zu Nutzen sistiert.

Die EAWAG hat im Gutachten "*Phosphorhaushalt des Zugersees*" 2003 die Prognose erstellt, dass mit der im oben erwähnten Projekt anvisierten P-Reduktion das Sanierungsziel knapp erreicht werden könnte. Seit 2007 erarbeitet deshalb der Kanton Zug ein neues Projekt nach Artikel 62a GSchG. Das Projekt wurde 2010 beim BLW eingereicht. Zum neuen Projekt stellte sich die Frage, ob die Prognosen von 2003 immer noch gelten und mit welcher Genauigkeit die P-Konzentrationen in 30 Jahren vorausgesagt werden können. Diese Fragen sollen im Folgenden mit einer Erneuerung der P-Bilanz beantwortet werden.

**Tabelle 1: Charakteristik des Zugersees**

Oberfläche <sup>†</sup>	38.3 km <sup>2</sup>
Seevolumen total <sup>†</sup>	3.18 km <sup>3</sup>
Volumen Hypolimnion z > 25 m <sup>†</sup>	2.33 km <sup>3</sup>
Volumen Oberfläche z = 0 bis 25 m <sup>†</sup>	0.88 km <sup>3</sup>
Maximale / mittlere Tiefe <sup>†</sup>	199 / 84 m
Abfluss Frauenthal Q <sub>F</sub> <sup>*</sup>	7.70 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Abfluss Zwischeneinzugsgebiet plus Kläranlage <sup>*</sup>	0.65 + 0.39 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Seeabfluss Q <sub>Lorze</sub> <sup>*</sup>	6.66 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Hydraulische Aufenthaltszeit <sup>*</sup>	15.1 Jahre
Stratifikationsfaktor (2000-2009 / 2010) <sup>#</sup>	0.40 / 0.35

† Bathymetrie Zugersee (AfU Kt. Zug; unpublizierte Daten)

\* Messstation BafU; korrigiert für Zwischeneinzugsgebiet und ARA-Abfluss;  
Seeabfluss Q<sub>Lorze</sub> = 86% von Q<sub>F</sub> (siehe Text)

# Verhältnis von mittlerer Seeabflusskonzentration zu mittlerer Seekonzentration.

Die folgenden Fragen werden mit diesem Bericht beantwortet:

- Wie hat sich die P-Bilanz in den letzten 10 Jahren entwickelt (2000 bis 2009) und wie setzt sich die aktuelle (2010) P-Bilanz zusammen?
- Wie haben sich die P-Konzentration in der Oberflächenschicht und die Algenproduktion verändert?
- Wie gross ist die aktuelle P-Nettosedimentation?
- Hat die P-Konzentration im See gemäss den Prognosen 2003 abgenommen oder gibt es Gründe für allfällige Abweichungen?
- Wie wird sich der P-Seeinhalt (P-Konzentration) in den nächsten 30 Jahren weiterentwickeln?
- Von welchen Unsicherheiten ist bei der aktuellen Bilanz auszugehen und wie werden sich diese Unsicherheiten in der Projektion auf 30 Jahre auswirken?

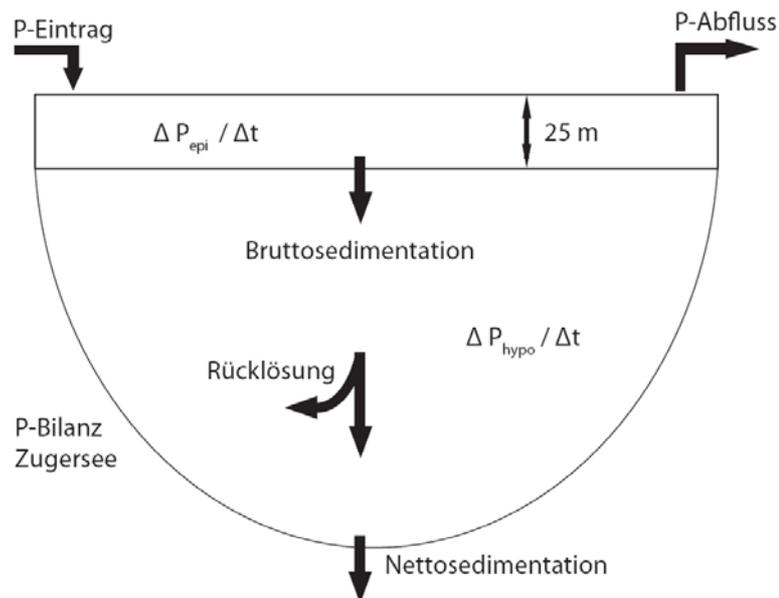
## 2 Aktuelle Phosphorbilanz

Im Folgenden werden die P-Frachten für die letzten zehn Jahre zusammengestellt, um die Beiträge zur aktuellen P-Bilanz möglichst genau zu bestimmen. Die P-Bilanz umfasst: (a) P-Eintrag, (b) Änderung des P-Inhaltes im See, (c) Austrag von P via Abfluss der Lorze, (d) Austrag via P-Nettosedimentation (Figur 1). Von diesen vier Termen sind zwei genau bekannt (Änderung des P-Inhaltes und P-Abfluss), während zwei Terme (P-Eintrag und P-Nettosedimentation) grosse Unsicherheiten aufweisen. Ebenfalls genau bekannt ist die Differenz zwischen P-Eintrag und P-Nettosedimentation.

Basierend auf der aktuellen Phosphorbilanz wird im Abschnitt 3 die zukünftige Entwicklung des P-Inhaltes des Sees prognostiziert. Um die Auswirkungen der genannten Unsicherheiten in der aktuellen P-Bilanz aufzuzeigen, werden die Prognosen für zwei Szenarien des P-Eintrages erstellt. Für ein Szenario dienen die Untersuchungen der P-Einträge, welche vom AfU des Kt. Zug kontinuierlich durchgeführt werden (Tabelle 2). Damit wird aus der Bilanz die P-Nettosedimentation berechnet. Wir werden zeigen, dass dieses Szenario eine Unterschätzung der künftigen P-Entwicklung darstellt. Für das zweite Szenario wird die P-Nettosedimentation anhand von Kurzkernen bestimmt und daraus der P-Eintrag berechnet. Dieses Szenario stellt eine Überschätzung der künftigen P-Entwicklung dar.

Zur Kontrolle der Konsistenz der P-Bilanz und der P-Nettosedimentation wird auch die see-interne P-Bruttosedimentation anhand der monatlich erhobenen Seeprofile bestimmt.

Da die hydraulische Aufenthaltszeit 15.1 Jahre beträgt, erstellen wir die Hochrechnungen für 30 Jahre (Abschnitt 3) im Bewusstsein, dass sich in dieser Zeit die Bedingungen der P-Bilanz möglicherweise deutlich verändern werden.



**Figur 1** - Schema für die see-interne und see-externe P-Bilanz. P-Abfluss und Änderung des P-Gehaltes ( $\Delta P/\Delta t = P_{Epi}/\Delta t + \Delta P_{Hypo}/\Delta t$ ) können genau bestimmt werden. Eine Unsicherheit im P-Eintrag wirkt sich jedoch in einer entsprechenden Unsicherheit in der P-Nettosedimentation aus (und umgekehrt). Aus diesem Grund wurde die P-Nettosedimentation zusätzlich neu auch mit Kurzkernen bestimmt.

### a) Einträge von Phosphor

Die P-Einträge der Flüsse werden vom AfU des Kantons Zug im grössten Zufluss Obere Lorze (101 km<sup>2</sup>) kontinuierlich mit einer abflussproportionalen Probenahme bei der hydrometrischen Station des BafU in Zug (Letzi) sowie in den beiden Zuflüssen Aabach (14.3 km<sup>2</sup>) und Rigiaa (17.1 km<sup>2</sup>) über eine Konzentrations-Abfluss-Beziehung (C/Q-Beziehung) erhoben. Die Hochrechnungen via C/Q-Beziehungen werden für P-total und Phosphat separat durchgeführt. Diese drei Zuflüsse decken 64% des Einzugsgebietes des Zugersees ab (132.7 km<sup>2</sup>). Für die verbleibenden 36% (73.6 km<sup>2</sup>) wird angenommen, dass die flächenspezifische P-Belastung gleich ist, sodass auf das gesamte Einzugsgebiet von 206 km<sup>2</sup> hochgerechnet werden kann (Tabelle 2). Anschliessend werden die Abschätzungen der P-Fracht aus Regenüberläufen und der atmosphärischen Deposition addiert. Die P-Einträge für die letzten fünf Jahre betragen somit (Tabelle 2): 14.1 t-P yr<sup>-1</sup> (P-total), 6.2 t-P yr<sup>-1</sup> (P-gesamt gelöst) und 5.4 t-P yr<sup>-1</sup> (anorganisches Phosphat).

**Tabelle 2: Phosphor Einträge Zugersee**

P Eintrag (verschiedene Fraktionen)	Fracht (t-P yr <sup>-1</sup> )	Referenz
P-total Zuflüsse 2005	13.81	AfU Zug
P-total Zuflüsse 2006	11.63	
P-total Zuflüsse 2007	12.72	
P-total Zuflüsse 2008	12.13	
P-total Zuflüsse 2009	10.33	
P-gesamt gelöst Zuflüsse 2005	4.19	AfU Zug
P-gesamt gelöst Zuflüsse 2006	3.61	
P-gesamt gelöst Zuflüsse 2007	4.50	
P-gesamt gelöst Zuflüsse 2008	4.41	
P-gesamt gelöst Zuflüsse 2009	4.08	
Phosphat Zuflüsse 2005	3.39	AfU Zug
Phosphat Zuflüsse 2006	2.98	
Phosphat Zuflüsse 2007	3.73	
Phosphat Zuflüsse 2008	3.62	
Phosphat Zuflüsse 2009	3.38	
Regenüberläufe	0.3 bis 0.9	AfU Zug
Einwohner ohne ARA	0.4	
Niederschlag (atm Deposition)	0.5 bis 1.5	
<b>Zusammenfassung</b>		
P-total, Eintrag 2005 bis 2009	14.1 ± 3 <sup>†</sup>	±20%
P-gesamt gelöst, Eintrag 2005 bis 2009	6.2 ± 1.3 <sup>#</sup>	±20%
Phosphat, Eintrag 2005 bis 2009	5.4 ± 1.1 <sup>*</sup>	±20%

Für die folgenden drei Mittelwerte wurde je ein Beitrag der Regenüberläufe, der Einwohner ohne ARA und des Niederschlags addiert:

<sup>†</sup> P-total:  $12.1 + 0.6 + 0.4 + 1.0 = 14.1 \text{ t-P yr}^{-1}$

<sup>#</sup> P-gesamt gelöst:  $4.2 + 0.6 + 0.4 + 1.0 = 6.2 \text{ t-P yr}^{-1}$

<sup>\*</sup> P-Phosphat:  $3.4 + 0.6 + 0.4 + 1.0 = 5.4 \text{ t-P yr}^{-1}$ .

In Anbetracht der grossen Unsicherheiten (wir gehen von ~20% aus; Abschnitt 4) sind diese Werte in guter Übereinstimmung mit den Modellrechnungen MODIFFUS von Prashun und Müller (2003), welche einen Gesamteintrag von 15.8 t-P yr<sup>-1</sup> ergab.

### b) Abnahme des Phosphors im See

Der P-Gehalt im Zugersee nimmt seit 1982, als mit 635 t-P der maximale Inhalt erreicht wurde, kontinuierlich ab. In den letzten zehn Jahren sank der Inhalt von 415 t-P (2000) auf 273 t-P (2010). Die jährliche Abnahme betrug somit  $\Delta P/\Delta t = -14.2 \text{ t-P yr}^{-1}$  (Anhang A1).

**Tabelle 3: Abfluss von Wasser und Phosphor aus dem Zugersee via Lorze**

Jahr	Abfluss Q <sub>F</sub> Frauenthal (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup>	Abfluss ARA + Entlastung (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) <sup>(2)</sup>	Zwischen - EZG (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) <sup>(3)</sup>	Seeabfluss Q <sub>Lorze</sub> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) <sup>(4)</sup>	Q <sub>Lorze</sub> / Q <sub>F</sub> (%)	P-Abfluss (t-P yr <sup>-1</sup> ) <sup>(5)</sup>
2000	8.21			7.10*		12.1*
2001	9.84			8.51*		15.4*
2002	9.18			7.94*		10.6*
2003	5.69			4.92*		8.49*
2004	6.67			5.77*		8.87*
2005	7.96	0.66	0.41	6.89	87	8.60
2006	7.32	0.66	0.38	6.29	86	7.89
2007	7.33	0.66	0.38	6.30	86	5.46
2008	7.86	0.66	0.41	6.81	86	6.76
2009	6.95	0.63	0.36	5.96	86	6.82
<b>Mittel</b>	<b>7.70</b>	<b>0.65</b>	<b>0.39</b>	<b>6.66</b>	<b>86</b>	<b>9.10</b>

<sup>(1)</sup> gemäss hydrologischer Messstation Frauenthal (www.hydrodaten.admin.ch)

<sup>(2)</sup> gemäss Messungen ARA-Abfluss einschl. Regenüberläufe (AfU Kt. ZG)

<sup>(3)</sup> geschätzt gemäss Flächenanteil Z-EZG (0.052 x Q<sub>F</sub>)

<sup>(4)</sup> berechnet aus Q<sub>F</sub> - Anteil ARA - Anteil Zwischen-EZG

<sup>(5)</sup> berechnet aus Seeabfluss mal P-total (partikuläres P im Seewasser ist bioverfügbar)

<sup>(\*)</sup> mit Q<sub>Lorze</sub> / Q<sub>F</sub> = 86 % abgeschätzt.

### c) Abfluss des Phosphors via Lorze

Der Abfluss von P aus dem See ergibt sich aus dem zeitlichen Integral der Oberflächen-Konzentration von P-total (aller partikuläre P im Seewasser ist bioverfügbar) mal Wasserabfluss aus dem See (Q<sub>Lorze</sub>). Der Seeabfluss Q<sub>Lorze</sub> (Tabelle 3) ergibt sich aus dem Abfluss der Lorze bei der BafU Messstation Frauenthal Q<sub>F</sub> abzüglich der Abflüsse des Zwischeneinzugsgebietes (zwischen Zugersee und Frauenthal, 13.50 km<sup>2</sup> = 5.2% des EZG Messstelle Frauenthal von 220 km<sup>2</sup>) und abzüglich der Kläranlage Cham (einschliesslich Regenüberläufe). Das AfU des Kt. Zug erhebt die Seeausflusskon-

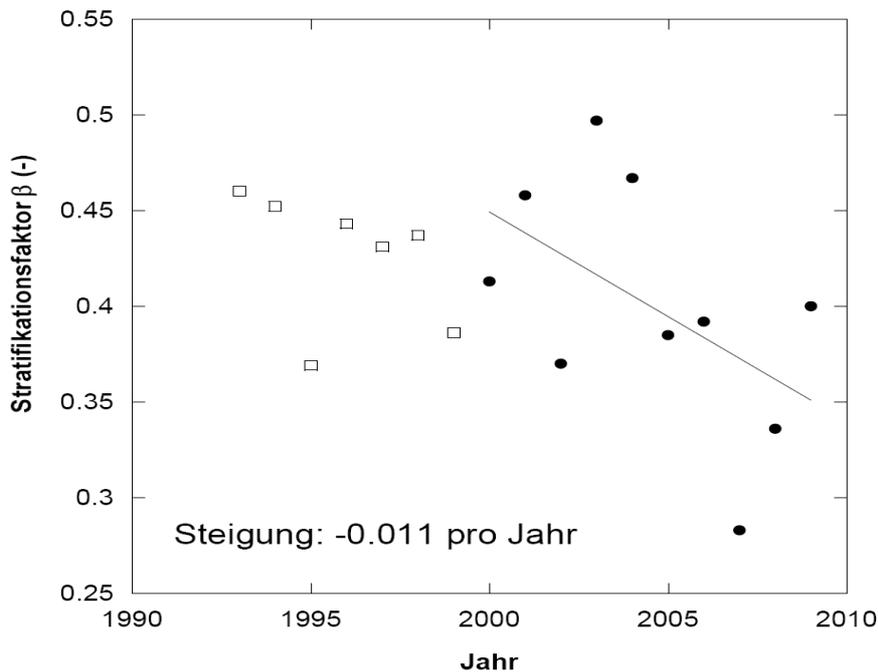
zentrationen monatlich, so dass für die letzten fünf Jahre der P-Abfluss aus dem See sehr genau bestimmt werden kann (Tabelle 3).

Der mittlere Seeabfluss  $Q_{Lorze}$  beträgt  $6.66 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Tabelle 3), was einer hydraulischen Aufenthaltszeit im Zugersee von 15.1 yr entspricht (Tabelle 1). Mit diesem Seeabfluss  $Q_{Lorze}$  wird im Abschnitt 4 der P-Abfluss in die Zukunft extrapoliert.

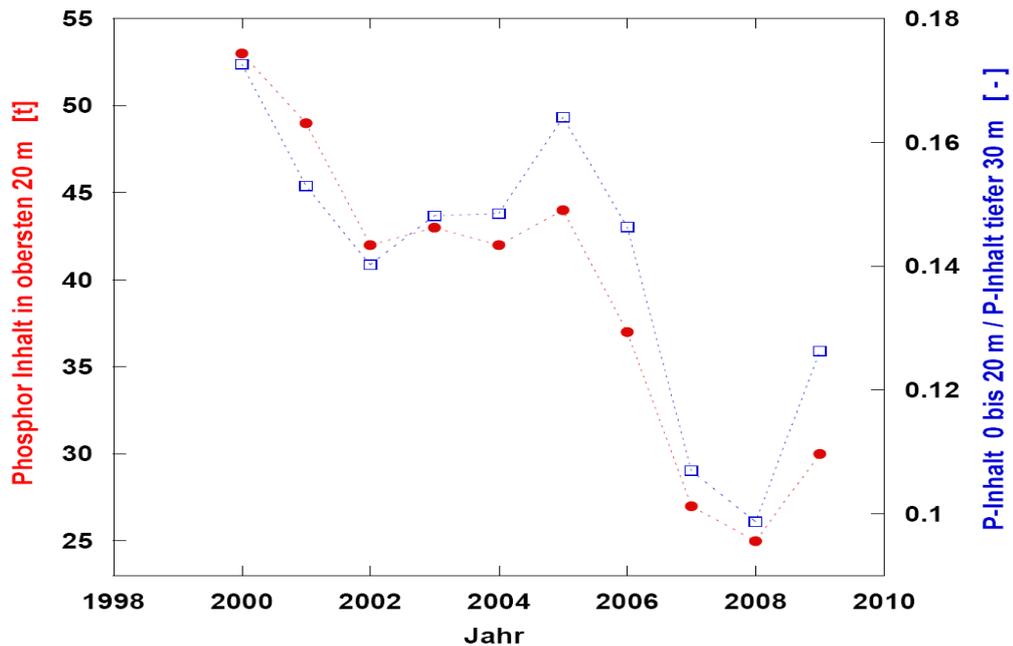
Für die Jahre 2000 bis 2004 wurde angenommen, dass  $Q_{Lorze}$  ebenfalls 86% des Abflusses  $Q_F$  bei Frauenthal beträgt. Somit konnte der P-Abfluss aus dem See für die letzten zehn Jahre (2000 bis 2009) bestimmt werden (Tabelle 3). Der mittlere P-Abfluss beträgt  $9.1 \text{ t-P yr}^{-1}$ , mit sinkendem Trend, wie dies aufgrund des abnehmenden P-Inhaltes zu erwarten ist.

Für jedes Jahr lässt sich aus dem P-Abfluss, aus  $Q_{Lorze}$  und aus dem Seeinhalt  $P_{See}$  sowie dem Seevolumen  $V$  der Stratifikationsfaktor

$$\beta = \text{P-Abfluss} / ((P_{See} / V) * Q_{Lorze}) = 0.40 \pm 0.06 \quad (\text{dimensionslos})$$



**Figur 2** - Stratifikationsfaktor  $\beta$  (dimensionslos) für die letzten zwei Jahrzehnte. Für die P-Abflussfrachten wurden die folgenden Daten verwendet: für 2005 bis 2009 integrierte Frachtberechnungen AfU Zug; für 2000 bis 2004 aus Monatsmittel des P-Abflusses (volle Kreise). Für die Zeit von 1993 bis 1999 wurde  $\beta$  aus Jahresmitteln des P-Abflusses gerechnet (offene Quadrate). Entsprechend ist die Unsicherheit für diesen Zeitraum grösser. Das Maximum von  $\beta$  im Jahr 2003 ergibt sich aus den geringen Abflüssen im Sommer (Hitzesommer ohne Niederschläge). Die zeitliche Abnahme von  $\beta$  ist deutlich erkennbar mit einem aktuellen Wert von  $\beta = 0.35$ . Für die Hochrechnung im Modell wird für  $\beta = 0.177 + 2.08 (P_{See}/V)$  angenommen, d.h. dass  $\beta$  mit sinkender P-Konzentration im Verlauf der Zeit weiterhin abnimmt.



**Figur 3** - Rückgang des P-Inhaltes in der Oberflächenschicht (rot), und Rückgang des relativen Anteils des P-Inhaltes in der Oberflächenschicht (blau) während der letzten 10 Jahre. Im letzten Jahrzehnt hat der P-Inhalt in der Oberflächenschicht relative zum Rest des Sees überdurchschnittlich abgenommen.

berechnen.  $\beta$  bezeichnet das Verhältnis von effektiver Abflusskonzentration zu Konzentration, welche (virtuell) vorläge, falls der See vollständig durchmischt wäre. Wie aus Figur 2 hervorgeht nahm der Stratifikationsfaktor  $\beta$  seit 1993 um  $\sim 0.005$  pro Jahr ab und beträgt zur Zeit  $\beta \cong 0.35$ . Dies bedeutet, dass der Abfluss von P via Lorze - proportional zu  $\beta$  - auch wegen der überdurchschnittlichen Abnahme der Oberflächen-Konzentration sinkt (Figur 3).

Ein Grund für den im Vergleich zu anderen Seen tiefen Wert von  $\beta$  liegt darin, dass das Tiefenwasser nur wenig mit dem Oberflächenwasser vermischt wird und somit der P-Abfluss im Vergleich zum P-Inhalt gering ist (typische Werte in anderen Seen für  $\beta$  betragen 0.6 bis 0.8; für einen homogenen See wäre  $\beta = 1$ ; bei extremer Stratifikation sinkt  $\beta \rightarrow 0$ ). Für die Extrapolation in die Zukunft im Abschnitt 3 verwenden wir die Korrelation mit der mittleren P-Konzentration im See ( $P_{\text{See}}/V$ ), entsprechend welcher  $\beta$  weiter abnimmt (Einheiten für  $P_{\text{See}}/V$ :  $\text{mg-P m}^{-3}$ ):

$$\beta = 0.117 + 2.08 \cdot (P_{\text{See}}/V).$$

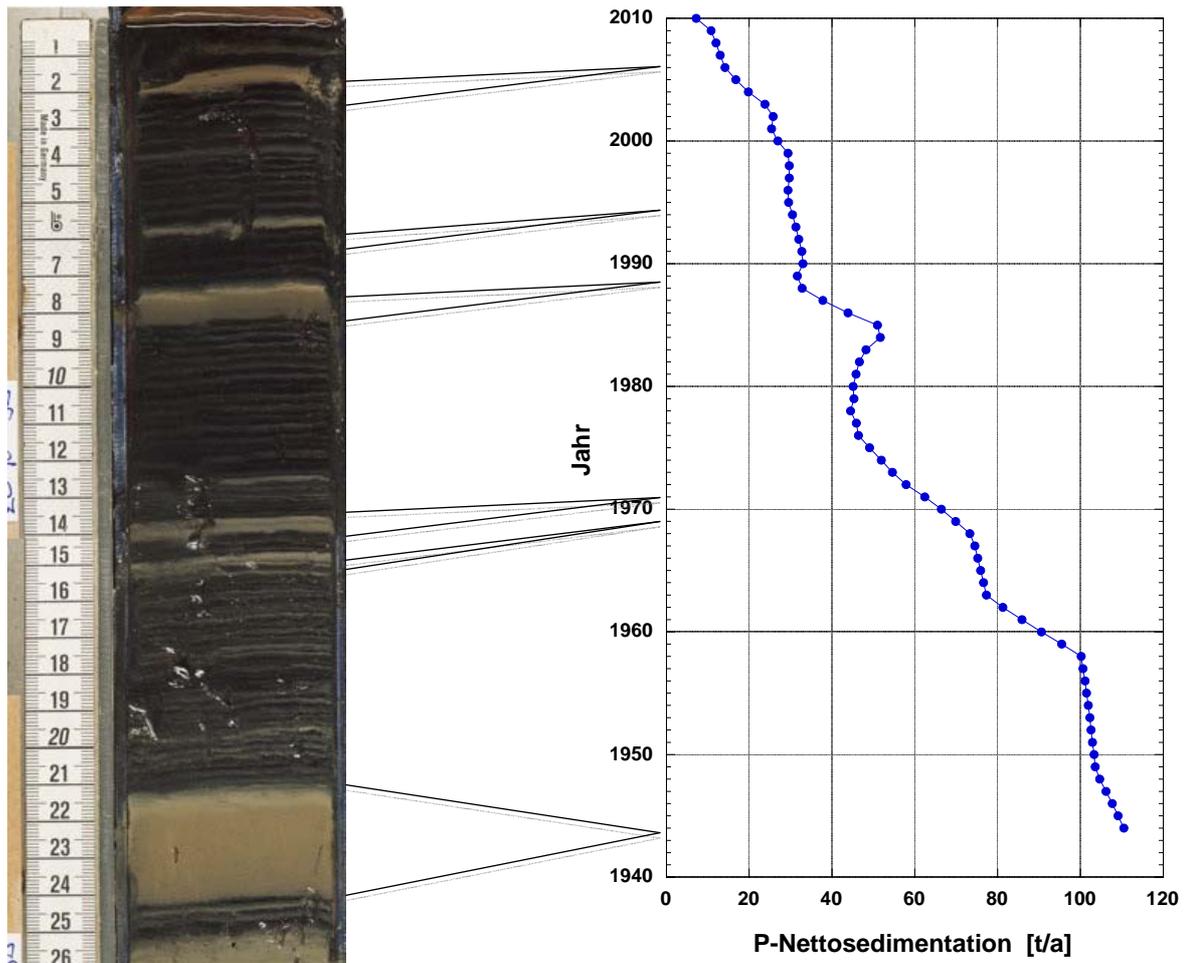
#### d) Nettosedimentation von Phosphor aus Sedimentkernen

Zur direkten Bestimmung der P-Nettosedimentation haben wir am 19. August 2010 im Zugersee drei Sedimentkerne entnommen (Anhang, Figur A2) und in Segmenten von 5 bis 10 mm beprobt.

Die Proben wurden gefriergetrocknet, der Wassergehalt durch Wägen vor und nach dem Trocknen gemessen, und die Konzentration von P-total nasschemisch mittels Aufschluss bestimmt. Die Jahreslagen sind beim Kern aus dem Südbecken (tiefste Stelle) gut zu erkennen (Figur 4 links). Dieser Kern wird als Master-Core ausgewählt, da Messungen aus diesem Kern am ehesten auch mit Messungen aus anderen Jahren vergleichbar sind. Das Alter der Schichten konnte ausgezählt und die Sediment-Akkumulation [ $\text{mm yr}^{-1}$ ] mit bestmöglicher Genauigkeit bestimmt werden (siehe Anhang). Turbidite sind dokumentiert und wurden bei der Zeit-Skalierung aus dem Datenprofil entfernt.

Aus der Sediment-Akkumulation, dem Wassergehalt und einer mittleren Dichte des Sediments von  $2.45 \text{ g cm}^{-3}$  wurde die Massen-Sedimentation des gesamten partikulären Materials berechnet. Durch Multiplikation mit der P-Konzentration wurde die P-Nettosedimentation berechnet und auf einzelne Jahre interpoliert (Figur 4 rechts). Bei der Interpretation des Verlaufes in Figur 4 (rechts) ist zu beachten, dass die Daten der letzten 2 bis 3 Jahre weniger zuverlässig gemessen werden können, da der Wassergehalt  $> 90\%$  beträgt und damit der experimentelle Fehler gross wird. Die Abnahme in den letzten 2 Jahren, wie dies in den Figuren 4/5 erscheint, interpretieren wir als Artefakt und berücksichtigen diese beiden Datenpunkte für die weitere Analyse nicht. Die Sedimentationsrate [ $\text{mm yr}^{-1}$ ] ist von Jahr zu Jahr unterschiedlich gross und schwierig zu bestimmen. Ihr Fehler überträgt sich proportional auf die Berechnung der P-Nettosedimentation. Sie sind die Ursache von (scheinbaren) kurzzeitigen Schwankungen. Die P-Nettosedimentation von 2000 bis 2009 betrug im Mittel somit  $17.2 \text{ t-P yr}^{-1}$  und für den aktuellen Wert (2010) gehen wir von  $12.0 \text{ t-P yr}^{-1}$  aus (Figur 4).

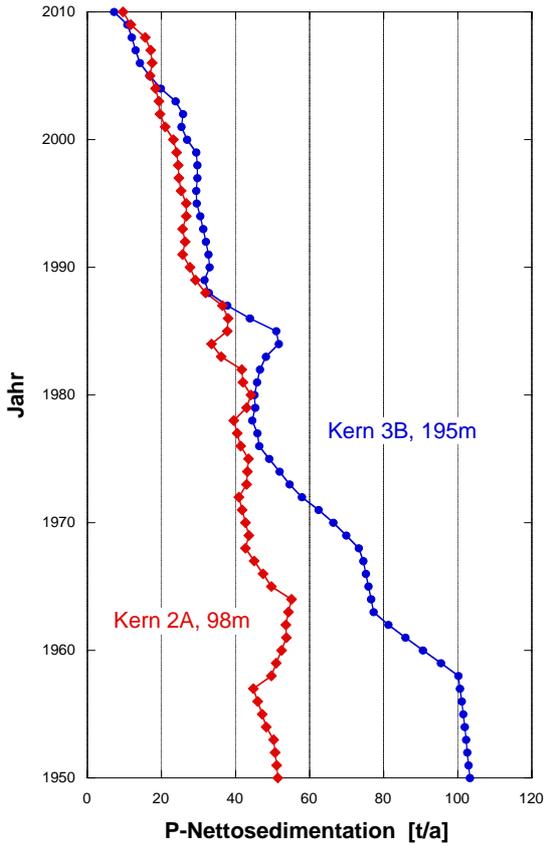
Die P-Nettosedimentation beim zweiten und dritten Kern (ZG10-1B, ZG10-2A; Anhang A3) sind noch schwieriger zu bestimmen, da das Sediment unter teilweise oxischen Bedingungen abgelagert wurde, wo Sedimentorganismen die Jahreslagen stören. Die obersten 5 Jahre im Kern 2A zeigen 3 bis 5 mm dicke Lagen, die darunterliegenden 10 Jahre sind noch gut abzählbar und ergeben eine Sedimentationsrate von  $2.7 \text{ mm yr}^{-1}$ . Weiter unten im Kern sind die Jahreslagen nicht mehr erkennbar. Wir verwenden deshalb hier ebenfalls die Sediment-Akkumulation von  $2.7 \text{ mm yr}^{-1}$ . In der vergleichenden Darstellung (Figur 5, blau und rot) erkennt man für die letzten 30 Jahre eine gute Übereinstimmung. Die Sedimentationsrate des dritten Kerns aus 80 m Tiefe (ZG10-1B) waren durch die Bioturbation oft verwischt und konnte nicht ausgewertet werden.



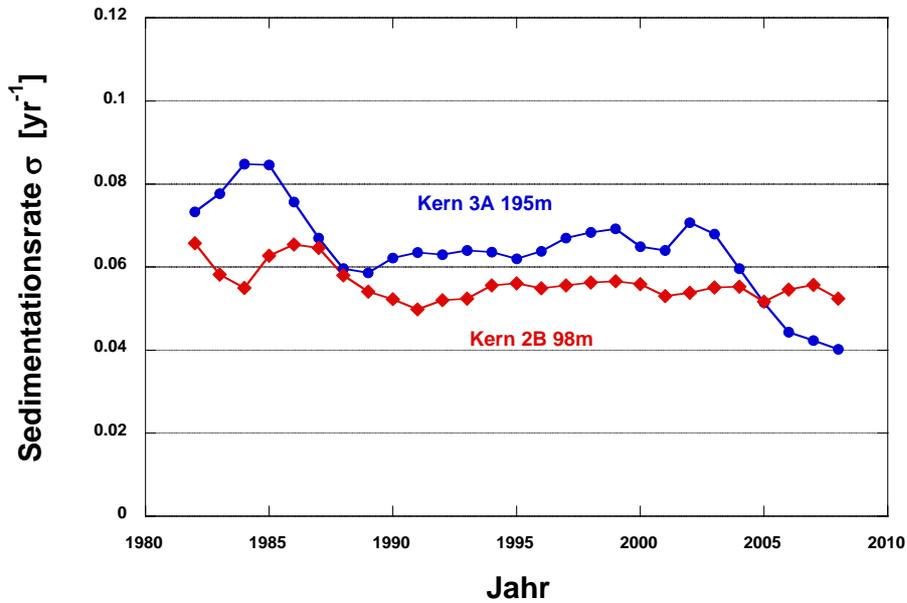
**Figur 4** - Bestimmung der P-Nettosedimentation aus dem Kern 3B (Südbecken, 195 m Tiefe). Links: geöffneter Sedimentkern mit gut erkennbaren Varven und Turbiditen. Rechts: nach Jahren interpolierte Rate der P-Nettosedimentation in  $t\ yr^{-1}$ . Die Turbiditlagen sind aus diesem Profil entfernt worden, um die zeitliche Kontinuität nicht zu unterbrechen.

**Zusammenfassend** - Die P-Nettosedimentation hat seit den 1990er Jahre von 20 bis 30  $t\ P\ yr^{-1}$  (Eawag 1994) parallel mit dem P-Seeinhalt abgenommen, betrug zwischen 2000 und 2009 im Mittel noch 17.2  $t\ P\ yr^{-1}$  und ist heute bei  $\sim 12.0\ t\ P\ yr^{-1}$  angelangt (Tabelle 5). Die P-Nettosedimentation von 2000 bis 2009 (17.2  $t\ P\ yr^{-1}$ ) stimmt gut mit der see-internen Bilanz (nächster Abschnitt) überein.

Sowohl die P-Nettosedimentation gemäss der Sedimentkerne als auch die Sedimentationsrate  $\sigma = P\text{-Nettosedimentation} / P\text{-Inhalt} [yr^{-1}]$  haben beide in den letzten 10 Jahren abgenommen. Dies würde man aufgrund des noch hohen P-Seeinhaltes nicht erwarten. Durch die hohen Temperaturen der letzten Jahre hat sich jedoch die Trennung zwischen der produktiven Oberflächenschicht und dem Tiefenwasser verstärkt (geringerer Tiefenwasseraustausch) und deshalb hat die P-Konzentration an der Oberfläche prozentual stärker abgenommen als der P-Inhalt im gesamten See (Figur 3).



**Figur 5** - Zusammenfassender Vergleich der P-Nettosedimentation: Kern 3B (blau, 195 m Tiefe), Kern 2A (rot, 98 m Tiefe). (Die zunehmenden P-Gehalte vor 1975 beim Kern der tiefsten Stelle sind aus den vorliegenden Daten nicht zu verstehen, wir nehmen aber an, dass es sich um einen Artefakt handelt.)



**Figur 6** - Sedimentationsrate  $\sigma = P\text{-Nettosedimentation} / P\text{-Inhalt} [\text{yr}^{-1}]$  für 1980 bis 2008 gemäss der P-Sedimentation aus Kernen 2 und 3. Die Abnahme von  $\sigma$  von  $\sim 0.06$  auf  $\sim 0.04$  an der tiefsten Stelle seit 2000 deutet auf eine Abnahme der P-Aufnahme hin (evt geringere Algenproduktion). Für die Modellrechnungen wurde der Mittelwert (letzte Jahre) von  $\sigma = 0.044 \text{ yr}^{-1}$  verwendet.

### e) Bruttosedimentation von Phosphor gemäss Seeprofilen

Während des Sommers nimmt der P-Gehalt an der Oberfläche eines Sees ab, da ein Teil davon in den Algen festgelegt wird ( $\Delta P_{\text{Epi}}/\Delta t$ ). Mit den absinkenden Algen wird somit P aus dem Epilimnion exportiert. Bis in welche Tiefe während des Sommers P aufgebraucht wird, hängt primär vom P-Gehalt im Epilimnion ab. In den letzten Jahren sank dieser Zehrungshorizont während der Sommerstratifikation bis in eine Tiefe von ~25 m ab. Unterhalb von 25 m Tiefe nimmt der P-Gehalt aufgrund der Rücklösung des Algenmaterials ( $\Delta P_{\text{Hypo}}/\Delta t$ ) über den gleichen Zeitraum entsprechend zu.

Aus den vom AfU des Kantons Zug monatlich erhobenen P-Profilen lässt sich somit die see-interne P-Bilanz abschätzen (Figur 1). Dabei verwenden wir P-total, da der partikuläre P im Zugersee grösstenteils in Form von Algen und organischen Partikel bioverfügbar ist. Dabei wird für jedes Profil der P-Inhalt im Epilimnion (< 25 m) und im Hypolimnion (> 25 m) berechnet und aus dem zeitlichen Trend von März bis Oktober  $\Delta P_{\text{Epi}}/\Delta t$  und  $\Delta P_{\text{Hypo}}/\Delta t$  berechnet. Aus der Zusammenfassung in Tabelle 4 ergibt sich für die Jahre 2002 bis 2009 eine mittlere P-Abnahme im Epilimnion während des Sommers (mit 210 Tagen Produktionsperiode gerechnet; Mitte März bis Mitte Oktober) von  $\Delta P_{\text{Epi}}/\Delta t = -45$  t-P. Davon werden  $\Delta P_{\text{Hypo}}/\Delta t = 32$  t-P  $\text{yr}^{-1}$  wiederum rückgelöst (es wurde angenommen, dass die Rücklösung während des ganzen Jahres konstant bleibt). Da nur der P-Abfluss genau bekannt ist, nicht jedoch der P-Eintrag, lässt sich die P-Bruttosedimentation nur bis auf die Unsicherheit des P-Eintrages bestimmen, denn die Bilanz im Epilimnion lautet:

$$\text{P-Bruttosedimentation} = \text{P-Eintrag} \text{ minus P-Abfluss} \text{ minus } \Delta P_{\text{Epi}}/\Delta t.$$

Aufgrund der Zusammenstellung in Tabelle 4 ergibt sich somit eine P-Bruttosedimentation von:

- P-Bruttosedimentation = 48 t-P  $\text{yr}^{-1}$ , für P-Eintrag von 12.1 t-P  $\text{yr}^{-1}$  (siehe Tabelle 5)
- P-Bruttosedimentation = 42 t-P  $\text{yr}^{-1}$ , für P-Eintrag von 6.2 t-P  $\text{yr}^{-1}$  (P-gelöst; Tabelle 2).

Ein Vergleich mit der Untersuchung von 1993 zeigt, dass sich die Bruttosedimentation seit den 1990er Jahren (damals ~80 bis 100 t  $\text{yr}^{-1}$ ; Eawag 1994) halbiert hat. Aufgrund der tieferen P-Konzentrationen steht heute der Algenproduktion somit eine deutlich geringere Menge an P zur Verfügung. Obwohl die Rücklösung eine Unsicherheit von fast 50% aufweist, stimmt erfreulicherweise diese see-interne Bilanz für die P-Nettosedimentation (= P-Bruttosedimentation minus Rücklösung) erstaunlich gut mit der see-externen Bilanz für die P-Nettosedimentation (= P-Eintrag minus P-Abfluss minus  $\Delta P_{\text{See}}/\Delta t$ ) überein.

**Tabelle 4: Seeinterne Bilanz des Phosphors**

<b>Jahr</b>	<b>P-Abnahme im Epilimnion</b> $\Delta P_{\text{Epi}}/\Delta t$ <b>(t-P Sommer<sup>-1</sup>)</b>	<b>P-Rücklösung im Hypolimnion</b> $\Delta P_{\text{Hypo}}/\Delta t$ <b>(t-P yr<sup>-1</sup>)</b>	<b>Abfluss Lorze</b> <b>(t-P yr<sup>-1</sup>)</b>
2002	- 42	30	11
2003	- 45	48	8
2004	- 48	57	9
2005	- 55	54	9
2006	- 53	22	8
2007	- 42	15	5
2008	- 42	19	7
2009	- 41	22	7
<b>Mittel</b>	<b>-45 (± 8%)</b>	<b>+32 (± 50%)</b>	<b>9.1*</b>

\* aus Tabelle 2.

#### **f) Zusammenfassung der P-Bilanz**

Es mag widersinnig wirken, dass alle Frachten und Bilanzterme auf 0.1 t-P yr<sup>-1</sup> genau angegeben sind, obwohl die Ungenauigkeit ~2 t-P yr<sup>-1</sup> beträgt. Mit dieser einheitlichen Angabe wollen wir jedoch die Zuordnung zwischen Tabellen und Text eindeutig machen und Unklarheiten vermeiden.

Mit der Kenntnis der P-Nettosedimentation (17.2 t-P yr<sup>-1</sup>), der Änderung im See (-14.2 t-P yr<sup>-1</sup>) und dem P-Abfluss (-9.1 t-P yr<sup>-1</sup>) ist die P-Bilanz des Zugersees geschlossen. Für dieses erste Szenario (Überschätzung des Eintrages) beträgt somit der P-Eintrag = 12.1 t-P yr<sup>-1</sup> (Tabelle 5).

Für ein zweites Szenario, gehen wir davon aus, dass wir mit den Zufluss-Messungen von P-gelöst, den P-Eintrag (6.2 t-P yr<sup>-1</sup>) kennen (Unterschätzung der Einträge). Bei gleichen Werten für die Änderung im See und für den P-Abfluss beträgt somit die P-Nettosedimentation = 11.3 t-P yr<sup>-1</sup> (Tabelle 5).

Für die Hochrechnung des Seeinhaltes von P bis zum Jahr 2040 verwenden wir im folgenden Abschnitt 3 diese beiden Szenarien.

### 3 Entwicklung des künftigen Phosphorgehaltes

In Tabelle 5 wird die aktuelle P-Bilanz für die beiden Einträge von 12.1 t-P yr<sup>-1</sup> und 6.2 t-P yr<sup>-1</sup> mit der P-Bilanz von 2003 (angenommener Eintrag 9.6 t-P yr<sup>-1</sup>) verglichen. Die Bilanz in Tabelle 5 bildet die Grundlage für die Hochrechnungen der zu erwartenden Entwicklung des P-Seeinhaltes in Figur 7. Um die obere und untere Grenze der Unsicherheit der Extrapolation aufzuzeigen, wurde die Hochrechnung für die beiden Einträge von 12.1 t-P yr<sup>-1</sup> (aufgrund der gemessenen P-Nettosedimentation, Überschätzung, blau) und 6.2 t-P yr<sup>-1</sup> (P-Eintrag, Unterschätzung, grün) durchgeführt.

Ebenfalls in Tabelle 5 sind die aktuellen (2010) Werte für die vier Beiträge der P-Bilanz aufgeführt (Startwerte der Extrapolation). Die Änderung im See wird berechnet aufgrund des P-Eintrages, des P-Abflusses und der P-Nettosedimentation. Der P-Abfluss wird gemäss

$$\text{P-Abfluss} = -(\beta/\tau) P_{\text{See}} \quad (\beta \text{ gemäss Formel in Figur 2 und } \tau = 15.1 \text{ yr})$$

berechnet und die P-Nettosedimentation gemäss

$$\text{P-Nettosedimentation} = -\sigma P_{\text{See}} \quad (\sigma = 0.044 \text{ yr}^{-1}).$$

**Tabelle 5:** P-Bilanz Zugersee aufgrund der Analysen a) bis e)

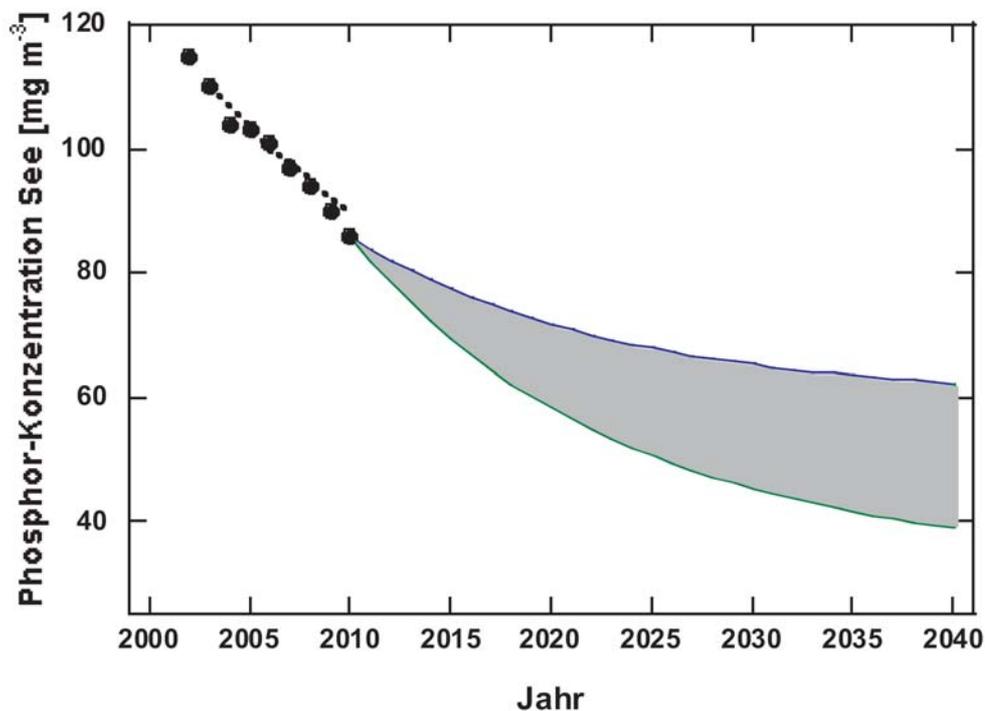
<b>Annahme P-Eintrag</b>	<b>P-Abnahme im See</b>	<b>P-Abfluss Lorze</b>	<b>P-Netto- sedimentation</b>	<b>Bemerkung</b>
t-P yr <sup>-1</sup>	t-P yr <sup>-1</sup>	t-P yr <sup>-1</sup>	t-P yr <sup>-1</sup>	
<b>Grundlagen 2003<sup>(1)</sup></b>				
9.6	-16.5	-15.5	-10.6	Kurve punktiert; Fig.6
<b>P-Eintrag (2005 - 2009; AfU Zug)</b>				
6.2	-14.2	-9.1	-11.3	kursiv = berechnet
<b>Sedimentanalysen (2000 - 2009, dieser Bericht)</b>				
12.1	-14.2	-9.1	-17.2	kursiv = berechnet
<b>2010 (Grundlage Modell)<sup>(2)</sup></b>				
12.1	-6.3	-6.4	-12.0	Kurve blau, Fig. 6
6.2	-12.2	-6.4	-12.0	Kurve grün, Fig. 6

<sup>(1)</sup> Abnahme und Abfluss sind Mittelwerte von 1998 -2002. Der P-Eintrag wurde basierend auf Messungen angenommen und P-Nettosedimentation berechnet

<sup>(2)</sup> P-Eintrag gemäss den beiden Szenarien; P-Abfluss gemäss Stratifikationsfaktor  $\beta$  (siehe Text) und P-Nettosedimentation gemäss  $\sigma = 0.044 \text{ yr}^{-1}$  (konstant).

Der Vergleich in Tabelle 5 zeigt, dass in 2003 von einer etwas geringeren P-Nettosedimentation ausgegangen wurde. Deshalb ergaben die Modellrechnungen von 2003 eine geringfügig langsamere Abnahme des P-Seeinhaltes.

Die Extrapolation bis 2040 ergibt (Figur 7), dass in 30 Jahren eine P-Konzentration von  $\sim 50 \text{ mg m}^{-3}$  erreicht sein wird, wobei wir realistischerweise von einer Unsicherheit von  $\sim 25\%$  ausgehen müssen (Abschnitt 4).



**Figur 7** - Konzentrationsverlauf (Jahresmittel) von 2000 bis 2010 (Kreise) und Prognosen von 2003 (punktiert) verglichen mit modelliertem Konzentrationsverlauf bis 2040 für einen P-Eintrag von  $12.1 \text{ t-P yr}^{-1}$  (blau; Überschätzung) und einem P-Eintrag:  $6.2 \text{ t-P yr}^{-1}$  (grün; Unterschätzung). Erklärungen im Text. Die wahrscheinlichste künftige Entwicklung des P-Gehaltes aufgrund des Bilanzmodells liegt im grauen Bereich.

## 4 Zusammenfassung und Beantwortung der Fragen

Die eingangs des Berichtes gestellten Fragen lassen sich wie folgt beantworten:

- Wie hat sich die P-Bilanz in den letzten 10 Jahren entwickelt (2000 bis 2009) und wie setzt sich die aktuelle (2010) P-Bilanz zusammen?

**Antwort:** Von 2000 bis 2009 nahm der P-Inhalt (von 415 auf 286 t-P) und der P-Abfluss (von 12 auf 7 t-P yr<sup>-1</sup>) ab. Die P-Nettosedimentation halbierte sich in diesem Zeitraum von ~25±5 auf 12±2 t-P yr<sup>-1</sup> (~20% Fehler). Im Mittel betrug die Bilanz für bioverfügbaren Phosphor in diesem Zeitraum:

P-Eintrag	~9±2 t-P yr <sup>-1</sup>
Abnahme P-Inhalt im Seevolumen	-14 t-P yr <sup>-1</sup>
P-Abfluss	-9 t-P yr <sup>-1</sup>
P-Nettosedimentation	-14±3 t-P yr <sup>-1</sup>

Die aktuelle Bilanz (2010) setzt sich wie folgt zusammen:

P-Inhalt 2010	273 t-P
P-Eintrag	~9±2 t-P yr <sup>-1</sup>
Abnahme von P im Seevolumen	-6.3 t-P yr <sup>-1</sup>
P-Abfluss	-6.4 t-P yr <sup>-1</sup>
P-Nettosedimentation	-12±2 t-P yr <sup>-1</sup>

Augrund dieser Bilanz erwarten wir, dass der Seeinhalt in den nächsten 10 Jahren auf ~210 t-P (Konzentration: ~65 mg m<sup>-3</sup>) abnehmen wird.

- Wie hat sich die P-Konzentration in der Oberflächenschicht verändert und hat die Algenproduktion abgenommen?

**Antwort:** Die P-Konzentration in der Oberflächenschicht (bis 20 m Tiefe) hat sich in den letzten 10 Jahren in etwa halbiert: von ~54 t-P im Jahr 2000 auf ~27 t-P im Jahre 2009 (Figur 3). Die P-Konzentration an der Oberfläche hat somit prozentual stärker abgenommen als der P-Inhalt im gesamten See (Figur 3). Der Grund liegt darin, dass sich die Trennung zwischen der produktiven Oberflächenschicht und dem Tiefenwasser verstärkt hat (geringerer Tiefenwasseraustausch)

Aus der P-Bilanz in der Oberflächenschicht lässt sich somit schliessen, dass der Export von P aus der Oberflächenschicht abgenommen hat. Dies zeigt sich auch bei der P-Bruttosedimentation welche sich seit den 1990er Jahren in etwa halbiert hat. Auch die P-Nettosedimentation und die P-

Sedimentationsrate haben abgenommen. Dies bedeutet, dass die Aufnahme von P durch die Algenproduktion abgenommen hat. Ob allerdings auch die Assimilation von Kohlenstoff durch die Algenproduktion abgenommen hat, lässt sich daraus nicht ableiten, da keine Messungen der Primärproduktion vorliegen. Aufgrund der Entwicklung der letzten Jahre ist jedoch damit zu rechnen, dass die Algenproduktion in naher Zukunft abnehmen wird.

- Wie gross ist die aktuelle P-Nettosedimentation?

**Antwort:** Die P-Nettosedimentation weist aufgrund der methodischen Schwierigkeiten und der Inhomogenität des Sediments naturgemäss einen deutlich höheren Fehler auf als der Abfluss oder die Änderung im See. Trotzdem lässt sich eine deutliche Abnahme in der P-Nettosedimentation erkennen. In den 1990er Jahren lag sie im Bereich von 25 bis 30 t-P yr<sup>-1</sup> (Figur 5). Aufgrund der Messungen gehen wir von einer aktuellen P-Nettosedimentation von 12 ± 2 t-P yr<sup>-1</sup> aus, was einer Halbierung relativ zu den 1990er Jahren entspricht.

- Hat die P-Konzentration im See gemäss den Prognosen 2003 abgenommen oder gibt es Gründe für allfällige Abweichungen?

**Antwort:** Bei den Prognosen in 2003 (Eawag 2003) sind wir von den folgenden Modellparametern ausgegangen: Input bioverfügbaren Phosphors = 9.6 t-P yr<sup>-1</sup>, Stratifikationsfaktor  $\beta = 0.44$ , hydraulische Aufenthaltszeit des Seewassers = 14.0 yr, Sedimentationsrate  $\sigma = 0.027$  yr<sup>-1</sup>. Mit diesen Annahmen ergibt sich eine Reduktion des P-Inhaltes von 350 t-P (2003) auf 286 t-P (2010), was erstaunlich gut der Realität entspricht (Figur 7). Diese gute Übereinstimmung ist Zufall, widerspiegelt jedoch, dass die getroffenen Annahmen in 2003 nahe bei der Realität lagen. Die neuen Modellrechnungen in diesem Bericht wurden mit neu bestimmten Parametern durchgeführt, welche die P-Daten seit 2003, sowie die Daten der neu gemessenen Sedimentkerne berücksichtigen.

- Wie wird sich der P-Inhalt (P-Konzentration) in den nächsten 30 Jahren weiterentwickeln?

**Antwort:** Bei den aktuellen Prognosen gehen wir von den folgenden Modellparametern aus: Input bioverfügbaren Phosphors von 6.2 t-P yr<sup>-1</sup> (Unterschätzung) bis 12.1 t-P yr<sup>-1</sup> (Überschätzung) mit dem wahrscheinlichsten P-Eintrag von ~9±2 t-P yr<sup>-1</sup>; weiter verwenden wir: Stratifikationsfaktor  $\beta = 0.35$  (abnehmend mit der Konzentration gemäss Figur 2), hydraulische Aufenthaltszeit des Seewassers = 15.1 yr, Sedimentationsrate  $\sigma = 0.044$  yr<sup>-1</sup>. Diese gegenüber 2003 neuen Werte ergaben sich aus der

Datenanalyse der P-Inhalte (Tabelle 4) im See und der gemessenen P-Nettosedimentation (Tabelle 5). Gemäss dieser Prognose wird sich die Abnahme des Seeinhaltes verlangsamen und über die nächsten 10 Jahren wird die Reduktion noch etwa -60 t-P ( $\pm 20\%$ ) betragen. In 30 Jahren (2040) gehen wir gemäss diesen Rechnungen von einem P-Inhalt von  $\sim 160$  t-P aus, was einer mittleren Konzentration von  $\sim 50 \pm 10$  mg m<sup>-3</sup>, entspricht. Diese Abnahme entspricht fast einer Halbierung des P-Seeinhaltes relativ zu heute, doch wird der Zugersee auch in 30 Jahren die Zielsetzung für einen mesotrophen See mit einer mittleren P-Konzentration = 30 mg m<sup>-3</sup> nicht erfüllen. Wie gross dann die Primärproduktion sein wird, lässt sich kaum voraussagen. Wird der See weiterhin, wie heute, permanent dichteschichtet sein (meromiktisch), so wird die Algenproduktion abnehmen. Wird jedoch aufgrund der geringeren Rücklösung die Dichteschichtung im Tiefenwasser aufgelöst, so kann es künftig im Zugersee während kalten Wintern zu fast vollständiger Tiefenmischung kommen. In diesem Falle würde die Algenproduktion relativ zu heute kaum abnehmen.

- Von welchen Unsicherheiten ist bei der aktuellen Bilanz auszugehen und wie werden sich diese Unsicherheiten in der Projektion auf 30 Jahre auswirken?

**Antwort:** Wir gehen davon aus, dass bei der Berechnung der aktuellen Bilanz die einzelnen Beiträge sehr uneinheitlich zum Gesamtfehler beitragen. Während die Abnahme im See und der Abfluss beinahe fehlerfrei zu bestimmen sind, beträgt der geschätzte Fehler bei der P-Nettosedimentation mindestens  $\sim 20\%$ . Dieser Wert wirkt sich 1:1 auf die Genauigkeit des P-Eintrages aus, sodass wir mit einem Input bioverfügbaren Phosphors von 6.2 bis 12.1 t-P yr<sup>-1</sup> ausgehen können ( $9 \pm 2$  t-P yr<sup>-1</sup>). Die Modellparameter (Stratifikationsfaktor  $\beta$  und Sedimentationsrate  $\sigma$ ) dürften eine Ungenauigkeit von je  $\sim 10\%$  aufweisen. Die Unsicherheit liegt vor allem darin, dass die künftige Entwicklung der Stratifikation sich nicht prognostizieren lässt. Auch die hydraulische Aufenthaltszeit könnte sich beispielsweise unter starken klimatischen Entwicklungen verändern. In Anbetracht dieser drei Unsicherheiten müssen wir von einem Gesamtfehler von  $\sim 25\%$  ausgehen, was die Genauigkeit des stationären Zustandes in 30 Jahren betrifft ( $\sim 50 \pm 10$  mg m<sup>-3</sup>). Konkret bedeute dies, dass die Konzentration im Bereich zwischen 40 und 60 mg m<sup>-3</sup> liegen wird (Figur 7).

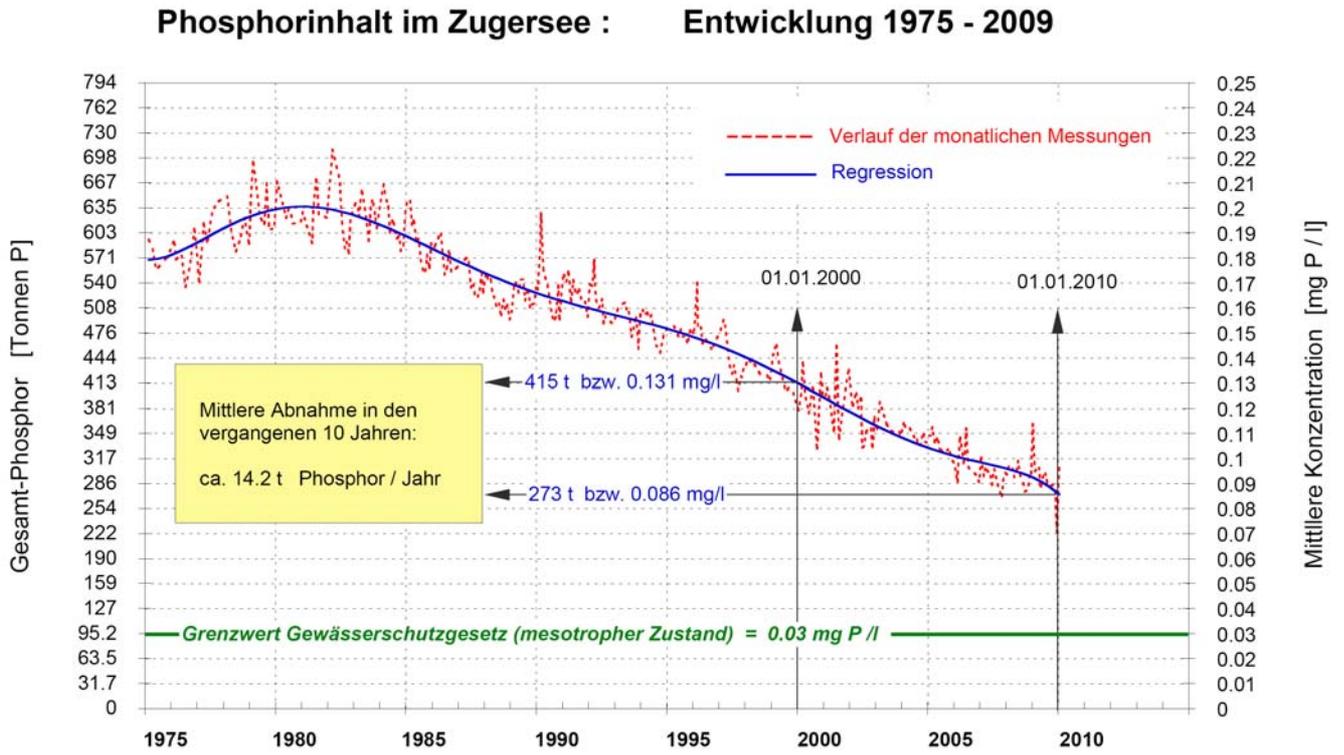
Zur Erinnerung sei nochmals betont, dass die Prognose bis 2040 darauf basiert, dass der P-Eintrag gegenüber heute sich nicht wesentlich ändert. Da sich jedoch im Bereich der Landwirtschaft neue Entwicklungen ergeben werden, können wir nicht von Konstanz ausgehen und deshalb erscheint es uns sinnvoll, die P-Bilanz in  $\sim 15$  Jahren wiederum neu zu erstellen. Idealweise würde bei dieser Gelegenheit auch die Primärproduktion der Algen erhoben.

## 5 Referenzen

- BUWAL (1994). Der Zustand der Seen in der Schweiz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 237. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern.
- EAWAG (1984). Imboden et al. 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). Wüest, A., B. Wehrli, und D.M. Imboden. Grundlagen für die Sanierung des Zugersees - Untersuchungen des Stoffhaushaltes von Tiefenwasser und Sediment. Gutachten im Auftrag der Baudirektion des Kantons Zug, Auftrag Nr. 37-4840.
- EAWAG (2003). Moosmann, L., M. Sturm, B. Müller, und A. Wüest. Phosphorhaushalt des Greifensees: Belastung und seeinterne Umsätze. Zusammenhang zwischen Belastung und Seezustand. *Bericht im Auftrag der Baudirektion Kanton Zürich (AWEL)*, Eawag, 32 S., Kastanienbaum, Schweiz.
- EAWAG (2004). Moosmann L und A. Wüest. Phosphor Haushalt des Zugersees. Kurzbericht Eawag and AfU ZG. 5 p. August 2003.
- EAWAG (2008). Matzinger, A., B. Müller, M. Schmid, J. Little, R. Stierli, A. Zwysig and A. Wüest. Zirkulationsunterstützung im Türlensee und Pfäffikersee. Evaluation von Betrieb und Messprogramm. Eawag Bericht 2008, 70 S., Eawag, Kastanienbaum, Schweiz.
- Fricke, H. (1980). OECD Eutrophication Program. Regional Project 'Alpine Lakes'. BUWAL, Bern, p. 234.
- Kunze, U. 1995: Die Nährstoffbelastung des Zugersees in den Jahren 1987/88 bis 1994. Amt für Umweltschutz des Kt. Zug (Hrsg.), 40 S.
- Matzinger, A., B. Müller, P. Niederhauser, M. Schmid, and A. Wüest (2010). Hypolimnetic oxygen consumption by sediment-based reduced substances in former eutrophic lakes. *Limnology and Oceanography* 55(5), 2073–2084.
- Moosmann, L., B. Müller, R. Gächter, and A. Wüest (2005). Trend-oriented sampling strategy and estimation of soluble reactive phosphorus loads in streams. *Water Resources Res.* 41, W01020, doi:10.1029/2004WR003539.
- Wehrli, B. and A. Wüest (1996). Zehn Jahre Seenbelüftung: Erfahrungen und Optionen. *Schriftenreihe der Eawag* Nr. 9.

# Anhang

## Anhang A1) Phosphor Inhalt Zugersee 1975 bis 2010



**Figur A1** - P- Inhalt und P-Konzentration von 1975 bis 2010. Quelle. AfU Zug.

Anhang A2)

Koordinaten der Sedimentkerne von 2010



**Figur A2** - Am 19. August 2010 wurden an drei Stellen im Zugersee jeweils zwei Sedimentkerne von ca. 1 m Länge entnommen. Analysen der Kerne 2A und 3B sind in Anhang A3 und A4 gegeben. Koordinaten der drei Sedimentkerne: ZG10-1B 80 m: Pos. 679'836 N / 222'318 E; ZG10-2A 98 m: Pos. 679'661 N / 221'532 E; ZG10-3B 195 m: Pos. 679'376 N / 217'115 E.

**Anhang A3) Sedimentdaten Kern 2A (Nordbecken, 98 m)**  
 Pos. 679'661 N / 221'532 E

Mittlere Tiefe	TP	TN	N : P	Sedim. Akk. Rate	Wassergehalt	Sedim. Rate	P-Netto-sedim.	P-Netto-sedim.
cm	mg-P/g	mg-N/g	mol:mol	mm/yr	%	g/(m <sup>2</sup> yr)	g-P/(m <sup>2</sup> yr)	t/yr
0.25	0.81	5.47	15.0	5	97.5	310	0.25	9.6
0.75	0.72	4.19	12.9	4.5	96.1	426	0.31	11.8
1.25	0.85	5.15	13.4	4	94.8	507	0.43	16.6
1.75	0.83	5.48	14.7	3.5	93.5	553	0.46	17.5
2.25	0.80	5.14	14.3	3	92.3	566	0.45	17.3
2.75	0.77	4.74	13.6	3	91.1	656	0.51	19.4
3.25	0.82	5.41	14.6	2.7	89.9	670	0.55	21.1
3.75	0.83	5.15	13.8	2.7	88.7	747	0.62	23.7
4.25	0.79	4.64	13.1	2.7	87.6	823	0.65	24.8
4.75	0.75	4.63	13.8	2.7	86.4	896	0.67	25.6
5.25	0.72	4.50	13.9	2.7	85.4	968	0.70	26.7
5.75	0.67	4.38	14.5	2.7	84.3	1039	0.69	26.6
6.25	0.66	3.93	13.2	2.7	83.3	1108	0.73	28.0
6.75	0.71	3.83	12.0	2.7	82.2	1175	0.83	31.9
7.25	0.78	4.04	11.5	2.7	81.3	1240	0.96	36.9
7.75	0.70	4.14	13.2	2.9	80.3	1415	0.98	37.7
8.25	0.66	4.10	13.8	2.9	79.3	1483	0.98	37.4
8.75	0.71	4.31	13.4	2.9	78.4	1548	1.10	42.1
9.25	0.69	4.00	12.8	2.9	77.5	1612	1.11	42.7
9.75	0.63	3.53	12.4	2.9	76.7	1675	1.06	40.6
10.5	0.64	3.64	12.6	2.9	75.4	1765	1.13	43.3
11.5	0.59	2.99	11.3	2.9	73.8	1880	1.11	42.4
12.5	0.60	2.74	10.1	2.9	72.3	1989	1.19	45.7
13.5	0.68	2.84	9.3	2.9	70.9	2092	1.42	54.3
14.5	0.61	3.14	11.3	2.9	69.5	2188	1.34	51.5
15.5	0.53	2.90	12.1	2.9	68.2	2279	1.21	46.5
16.5	0.56	2.12	8.4	2.9	67.1	2365	1.32	50.7
17.5	0.56	1.94	7.7	2.9	65.9	2444	1.36	52.1
18.5	0.52	1.73	7.4	2.9	64.9	2519	1.30	49.9
19.5	0.53	1.71	7.1	2.9	63.9	2588	1.38	53.0
20.5	0.56	1.99	7.9	2.9	63.0	2653	1.48	56.9
21.5	0.49	1.49	6.8	2.9	62.2	2713	1.32	50.5
22.5	0.46	1.48	7.1	2.9	61.4	2768	1.27	48.7
23.5	0.44	1.16	5.8	2.9	60.7	2819	1.24	47.6
24.5	0.46	1.21	5.9	2.9	60.1	2866	1.31	50.2

\* Messungen für den Wassergehalt wurden mit der Funktion  $y = -1.52 \times 10^{-3} Z^3 + 1.02 \times 10^{-1} Z^2 - 3.247 Z + 99.4$  geglättet.

**Anhang A4) Sedimentdaten Kern 3B (Südbecken, 195 m)**  
 Pos. 679°376 N / 217°115 E

Mittlere Tiefe Z cm	TP mgP/g	TN mgN/g	N : P mol:mol	Sedim. Rate mm/yr	Wassergehalt* %	Sedim. Rate g/(m <sup>2</sup> yr)	P-Netto-sedim. gP/(m <sup>2</sup> yr)	P-Netto-sedim. t/yr
0.25	0.95	6.72	15.7	4.0	97.5	248	0.24	9.0
0.75	0.79	4.99	13.9	4.0	96.1	379	0.30	11.5
1.25	0.64	2.93	10.1	4.0	94.8	507	0.32	12.4
1.75	0.69	4.08	13.0	2.8	92.3	534	0.37	14.2
2.25	0.80	5.63	15.6	2.8	91.1	619	0.49	19.0
2.75	0.97	5.49	12.6	2.8	89.9	702	0.68	26.0
3.25	0.84	5.36	14.1	2.8	88.7	783	0.66	25.3
3.75	0.90	6.45	15.9	2.8	87.6	862	0.77	29.7
4.25	0.83	5.85	15.7	2.8	86.4	940	0.78	29.8
4.75	0.75	4.83	14.3	2.8	85.4	1015	0.76	29.1
5.25	0.67	3.74	12.4	2.9	83.3	1206	0.81	30.9
5.75	0.65	4.97	16.8	2.9	82.2	1279	0.84	32.1
6.25	0.60	2.90	10.7	2.9	79.3	1488	0.90	34.3
6.75	0.76	3.87	11.3	2.6	78.4	1395	1.06	40.4
7.25	0.97	5.35	12.2	2.6	77.5	1453	1.41	53.9
7.75	0.81	4.66	12.7	2.6	76.7	1509	1.23	47.1
8.5	0.74	5.11	15.3	2.6	75.4	1591	1.17	45.0
9.5	0.71	4.60	14.3	2.6	73.8	1694	1.20	46.2
10.5	0.82	4.19	11.3	2.6	72.3	1792	1.48	56.6
11.5	1.30	2.89	4.9	2.0	68.2	1556	2.02	77.5
12.5	1.51	3.37	4.9	1.9	67.1	1533	2.32	89.0
13.5	1.49	3.54	5.3	2.1	65.9	1752	2.62	100.2
14.5	1.47	3.21	4.8	2.1	64.9	1840	2.71	103.7
15.5	1.53	2.88	4.2	2.1	63.9	1890	2.89	110.6

\* Messungen für den Wassergehalt wurden mit der Funktion  $y = -4.04 \times 10^{-4} Z^3 + 5.79 \times 10^{-2} Z^2 - 2.729 Z + 98.2$  geglättet.