

**EAWAG**

Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung,  
Abwasserreinigung und Gewässerschutz  
6047 Kastanienbaum

**Lorenz Moosmann und Alfred Wüest**  
Juli 2003

---

# **Phosphorbilanz von Sempachersee und Baldeggersee**

## **Teil II: Phosphorbilanzen während der künstlichen Belüftung des Sempacher- und Baldeggersees**

---



## Inhalt

1. Einführung und Fragestellung .....	5
2. Jährliche Bilanz des Phosphors .....	6
2.1 Die Beiträge zur seeinternen Bilanz.....	6
2.2 Tabellarischer Überblick .....	7
2.3 Entwicklung der seeinternen Bilanz .....	8
2.4 Variation der Nettosedimentation.....	14
3. Phosphor-Konzentrationen im Stationärzustand .....	19
3.1. Baldeggersee .....	19
3.2. Sempachersee .....	20
3.3. Weitere Szenarien .....	21
4. Rolle der Belüftung .....	23
5. Überlegungen zur genaueren Bestimmung der Nettosedimentation.....	26
6. Zusammenfassung .....	27
Quellenangaben .....	30
Anhang .....	31



## 1. Einführung und Fragestellung

Der Baldeggersee und der Sempachersee, zwei bislang eutrophe Mittellandseen, werden seit ca. 20 Jahren belüftet. Seit den 1970er-Jahren konnte der Phosphoreintrag, insbesondere aus Abwässern, reduziert werden. Dank der Seenbelüftung konnte eine Sauerstoffkonzentration von mindestens  $4 \text{ mg L}^{-1}$  (GSchG, 1991) weitgehend eingehalten werden; die Zielvorgabe eines mesotrophen Zustandes („mittlere Algenproduktion“) konnte jedoch bisher noch nicht erreicht werden.

Als messbare Vorgabe für den mesotrophen Zustand wird eine mittlere Konzentration an Gesamtphosphor im Frühjahr von maximal  $30 \text{ mg-P m}^{-3}$  angestrebt. Ob und wann dieses Ziel erreicht werden kann, hängt insbesondere vom P-Eintrag in den See, vom aktuellen Phosphorinhalt, von der Sedimentationsrate, der mittleren Aufenthaltszeit des Wassers und der Charakteristik des Einzugsgebietes ab. So ist bei einem See mit relativ grossem Volumen und kleinem Einzugsgebiet, wie dem Sempachersee, ein grösserer Eintrag pro Fläche Einzugsgebiet tolerierbar. Aufgrund der längeren Aufenthaltszeit reagiert dieser See allerdings langsamer auf Veränderungen in der P-Zufuhr.

Der Phosphorhaushalt von Baldeggersee und Sempachersee wird seit den 1980er-Jahren detailliert untersucht (Stadelmann et al., 2002; Gächter und Stadelmann, 1993). Nachdem die Art der Belüftung im Sempachersee angepasst wurde (feinblasiger Lufteintrag statt Sauerstoffeintrag), und nachdem die Phosphorinhalte in den letzten Jahren erfreulich rasch abnahmen, stellen sich neue Fragen, welche in diesem Bericht behandelt werden sollen:

- Mit Hilfe der aktuellen Daten soll eine Phosphorbilanz des Baldegger- und des Sempachersees erstellt werden. Es soll bestimmt werden, welchem Stationärzustand sich der Phosphorinhalt der beiden Seen nähert, und mit welcher Phosphorzufuhr eine stationäre Konzentration von  $30 \text{ mg-P m}^{-3}$  (mesotropher Zustand) erreicht werden kann.
- Es soll der Einfluss der Zwangszirkulation bzw. der Tiefenwasserbelüftung auf die Sedimentation und den Phosphorrückhalt untersucht werden.
- Die Bestimmung der Nettosedimentation (jährliche Ablagerung von Phosphor im Sediment) mit Hilfe einer Phosphorbilanz ist mit grossen Unsicherheiten verbunden. Es sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, die Nettosedimentation zuverlässiger zu bestimmen.

Der Bericht ist folgendermassen aufgebaut: In Kapitel 2 wird die jährliche Phosphorbilanz der beiden Seen erstellt, und es werden Netto- und Bruttosedimentation bestimmt. Da die einzelnen Werte der jährlichen Bilanz stark streuen, wird eine Bilanz mit gemittelten monatlichen Werten erstellt, und es werden die verschiedenen Faktoren, welche die Nettosedimentation beeinflussen, erläutert.

In Kapitel 3 wird mit Hilfe eines Ein-Box-Modells bestimmt, welchem Stationärzustand sich die beiden Seen unter verschiedenen Randbedingungen nähern. Es werden die Zeitkonstanten der Veränderung ermittelt, sowie die maximal tolerierbare Belastung zum Erreichen eines mesotrophen Zustands hergeleitet.

In Kapitel 4 wird der Einfluss der Seenbelüftung auf den Phosphorhaushalt erörtert, und in Kapitel 5 wird ein Vorschlag gemacht, die Nettosedimentation genauer zu bestimmen. Der damit verbundene Aufwand wird angegeben.

Schliesslich werden in Kapitel 6 die Resultate zusammengefasst.

## 2. Jährliche Bilanz des Phosphors

### 2.1 Die Beiträge zur seeinternen Bilanz

Die jährliche Phosphorbilanz setzt sich aus den folgenden Grössen zusammen:

#### Seeinhalt

Der Inhalt  $P$  [t] des Gesamtphosphors im See wird aus gemittelten Profilen der P-Konzentration und unter Berücksichtigung des Volumens der unterschiedlichen Schichten für die Zeit der Frühjahrszirkulation (Februar bis April) berechnet. Zur Bestimmung der mittleren Konzentration wurde der Inhalt  $P$  durch das gesamte Seevolumen dividiert. Die Änderung des Seeinhalts wurde jeweils über ein Jahr (von Frühjahr zu Frühjahr) bestimmt:  $\Delta P/\Delta t = P_{i+1} - P_i$  (Tab. 1 und 2).

#### Input

Der Input setzt sich aus der gelösten Phosphorfracht der Zuflüsse sowie dem Gesamtphosphor aus Niederschlag und ARA-Einleitungen zusammen. Für die Frachten aus Niederschlag und Kläranlagen sind jährliche Daten vorhanden; die Fracht der Zuflüsse wurde aus täglichen Abflussdaten (jeweils Anfang April bis Ende März des folgenden Jahres) und Abflusskonzentrations-Beziehungen (so genannte Q-C-Beziehungen) für die einzelnen Jahre bestimmt. Die Berechnung des Inputs aus den Zuflüssen ist im Teil I des vorliegenden Berichts detailliert beschrieben. Die jährlichen Daten sind in Tab. 1 und Tab. 2 zusammengefasst.

#### Export

Der Export über den Abfluss der Seen wurde aus monatlichen Konzentrationsmessungen an der Seeoberfläche und täglichen Abflussmessungen, ebenfalls für die Periode Anfang April bis Ende März des folgenden Jahres, aufsummiert (Tab. 1 und Tab. 2).

#### Nettosedimentation

Die Nettosedimentation  $NS$  (jährlicher Fluss von Phosphor, welcher definitiv im Sediment verbleibt [ $t a^{-1}$ ]) wird folgendermassen berechnet:

$$NS = (P_i - P_{i+1})/(1a) + P_{in} - P_{out} \quad (1)$$

$P_i$  P-Inhalt im gesamten See am Ende der Mischungsperiode  $i$  (Mittel der Monate Februar bis April) [ $t P_{tot}$ ]

$P_{i+1}$  P-Inhalt im gesamten See am Ende der Mischungsperiode  $i+1$  des folgenden Jahres [ $t P_{tot}$ ]

$P_{in}$  Jährlicher Input an bioverfügbarem P aus Zuflüssen, Niederschlag und ARA [ $t P_{gel} a^{-1}$ ]

$P_{out}$  Jährlicher Output an Gesamt-P durch den Abfluss [ $t P_{tot} a^{-1}$ ]

Neben der Nettosedimentation  $NS$  wird im folgenden die Nettosedimentationsrate  $\sigma$  verwendet. Diese ist der Quotient aus  $NS$  [ $t a^{-1}$ ] und  $P$  [t]) und setzt die Nettosedimentation zum Seeinhalt in Beziehung:

$$\sigma = NS / P \quad (2)$$

$\sigma$  hat die Dimension [ $a^{-1}$ ] (Tab. 1 und 2).

### Bruttosedimentation

Die Bruttosedimentation B (Fluss von P, welcher während der Stagnationsperiode vom Epilimnion ins Hypolimnion absinkt) wird folgendermassen bestimmt:

$$B = P_A - P_N + P_{in,Stag.} - P_{out,Stag.} \quad [t] \quad (3)$$

$P_A$  P-Inhalt im Epilimnion (0 - 15 m) im April [ $t P_{tot}$ ]

$P_N$  P-Inhalt im Epilimnion im November [ $t P_{tot}$ ]

$P_{in, Stag.}$  Input von Anfang April bis Ende Oktober [ $t P_{gel}$ ]

$P_{out, Stag.}$  Abfluss von Gesamt-P von Anfang April bis Ende Oktober [ $t P_{tot}$ ] (Tab. 1, 2).

### 2.2 Tabellarischer Überblick

In Tab. 1 und Tab. 2 sind die jährlichen Werte von Inhalt, Input, Export sowie Netto- und Bruttosedimentation im Baldeggersee und Sempachersee dargestellt.

**Tab. 1: Jährliche Phosphorbilanz für Baldeggersee. Quelle: Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern (Herzog, 2001; unveröffentlichte Daten); eigene Berechnungen. Die Bestimmung der einzelnen Grössen ist in Abschnitt 2.1 beschrieben. Die Fehlerbereiche ( $2\sigma$ ) der Zuflussdaten wurden wie in Teil I dieses Berichts bestimmt; die Fehler in den restlichen Eingangsgrössen sind Schätzwerte<sup>1</sup>. Der Fehler in Netto- und Bruttosedimentation wurde durch quadratische Addition der einzelnen Fehler bestimmt.**

Baldeggersee									
Jahr	Mittlere Konz. [mg/m <sup>3</sup> P <sub>tot</sub> ]	Inhalt [t P <sub>tot</sub> ]	Inh.Änderung [t P <sub>tot</sub> a <sup>-1</sup> ]	Input [t P <sub>gel/tot</sub> a <sup>-1</sup> ]	Davon Zufl. gel. [t P <sub>gel</sub> a <sup>-1</sup> ]	Export [t P <sub>tot</sub> a <sup>-1</sup> ]	Netto-Sed. [t P a <sup>-1</sup> ]	Sed.-Rate [a <sup>-1</sup> ]	Brutto-Sed. [t P]
1986	199 ± 20	34.5 ± 3.5	-3.6 ± 4.6	5.9 ± 1.0	5.0 ± 0.9	7.3 ± 1.5	2.2 ± 5.0	0.06 ± 0.14	8.1 ± 1.4
1987	179 ± 18	30.9 ± 3.1	-5.2 ± 4.0	7.3 ± 0.9	6.3 ± 0.9	5.3 ± 1.1	7.2 ± 4.3	0.23 ± 0.14	9.2 ± 1.3
1988	149 ± 15	25.7 ± 2.6	-2.9 ± 3.4	5.1 ± 1.1	4.1 ± 1.1	3.6 ± 0.7	4.4 ± 3.7	0.17 ± 0.14	7.1 ± 1.0
1989	132 ± 13	22.8 ± 2.3	-4.9 ± 2.9	5.0 ± 0.7	4.0 ± 0.7	2.3 ± 0.5	7.5 ± 3.0	0.33 ± 0.13	8.1 ± 1.0
1990	104 ± 10	17.9 ± 1.8	1.7 ± 2.7	6.3 ± 1.0	5.3 ± 1.0	3.1 ± 0.6	1.5 ± 2.9	0.09 ± 0.16	5.8 ± 0.7
1991	114 ± 11	19.7 ± 2.0	-1.3 ± 2.7	5.7 ± 0.9	4.7 ± 0.9	2.7 ± 0.5	4.3 ± 2.9	0.22 ± 0.15	7.8 ± 1.0
1992	106 ± 11	18.4 ± 1.8	-1.6 ± 2.5	6.7 ± 1.3	5.6 ± 1.3	3.2 ± 0.6	5.1 ± 2.9	0.28 ± 0.16	6.1 ± 0.8
1993	97 ± 10	16.8 ± 1.7	-0.3 ± 2.4	7.0 ± 1.1	6.1 ± 1.1	2.5 ± 0.5	4.8 ± 2.6	0.29 ± 0.16	7.4 ± 0.9
1994	95 ± 10	16.5 ± 1.6	-2.0 ± 2.2	8.1 ± 1.4	7.0 ± 1.3	3.3 ± 0.7	6.8 ± 2.7	0.41 ± 0.16	7.5 ± 1.0
1995	84 ± 8	14.5 ± 1.4	1.2 ± 2.1	5.8 ± 1.2	4.9 ± 1.2	2.6 ± 0.5	2.0 ± 2.5	0.14 ± 0.17	4.8 ± 0.7
1996	91 ± 9	15.7 ± 1.6	0.1 ± 2.2	3.4 ± 0.7	2.6 ± 0.6	1.9 ± 0.4	1.5 ± 2.3	0.10 ± 0.15	6.3 ± 0.8
1997	91 ± 9	15.7 ± 1.6	0.7 ± 2.3	2.3 ± 0.3	1.5 ± 0.3	1.6 ± 0.3	0.0 ± 2.3	0.00 ± 0.15	4.2 ± 0.5
1998	95 ± 9	16.4 ± 1.6	0.5 ± 2.4	5.1 ± 0.5	4.5 ± 0.5	2.6 ± 0.5	2.0 ± 2.5	0.12 ± 0.15	5.3 ± 0.6
1999	98 ± 10	16.9 ± 1.7	-2.2 ± 2.2	6.4 ± 1.1	4.8 ± 1.0	4.1 ± 0.8	4.6 ± 2.6	0.27 ± 0.15	5.0 ± 0.8
2000	85 ± 8	14.7 ± 1.5	-5.0 ± 1.8	4.3 ± 0.5	3.6 ± 0.5	1.7 ± 0.3	7.7 ± 1.9	0.52 ± 0.13	4.4 ± 0.6
2001	56 ± 6	9.6 ± 1.0	-0.3 ± 1.4	5.8 ± 1.0	4.6 ± 1.0	1.5 ± 0.3	4.7 ± 1.7	0.48 ± 0.18	3.8 ± 0.6
Mittel	111 ± 11	19.2 ± 1.9	-1.6 ± 2.6	5.6 ± 0.9	4.7 ± 0.9	3.1 ± 0.6	4.1 ± 2.9	0.23 ± 0.15	6.3 ± 0.9
Trend	-5.7 % / a	-5.7 % / a				-6.5 % / a			-5.0 % / a

<sup>1</sup> Fehler im gemessenen Inhalt: 10 %. Fehlerquellen: Analyse, Seevolumen, Interpolation über die Tiefe. Fehler in der Inhaltsänderung: wird durch quadratische Addition der Fehler von je zwei Inhalten bestimmt. Fehler im Input aus den ARAs: 10 %. Fehler im Input aus Niederschlag: 50 % (Die Fracht aus dem Niederschlag ist jedoch gering, 0.2 – 0.5 t a<sup>-1</sup>). Fehler in Export: 20 %, da nur monatliche Messwerte.

**Tab. 2: Jährliche Phosphorbilanz des Sempachersees. Quelle: Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern; eigene Berechnungen. Die Bestimmung der einzelnen Grössen ist in Abschnitt 2.1 beschrieben.**

Sempachersee									
Jahr	Mittlere Konz. [mg/m <sup>3</sup> P <sub>tot</sub> ]	Inhalt [t P <sub>tot</sub> ]	Inh.Änderung [t P <sub>tot</sub> a <sup>-1</sup> ]	Input [t P <sub>gel/tot</sub> a <sup>-1</sup> ]	Davon Zufl. gel. [t P <sub>gel</sub> a <sup>-1</sup> ]	Export [t P <sub>tot</sub> a <sup>-1</sup> ]	Netto-Sed. [t P a <sup>-1</sup> ]	Sed.-Rate [a <sup>-1</sup> ]	Brutto-Sed. [t P]
1986	158.3 ± 15.8	101.2 ± 10.1	-13.9 ± 13.4	10.0 ± 1.3	7.9 ± 1.1	4.7 ± 0.9	19.2 ± 13.5	0.19 ± 0.13	25.1 ± 3.3
1987	136.6 ± 13.7	87.3 ± 8.7	-1.9 ± 12.2	9.7 ± 1.3	7.6 ± 1.1	5.1 ± 1.0	6.5 ± 12.3	0.07 ± 0.14	21.8 ± 3.0
1988	133.6 ± 13.4	85.4 ± 8.5	-10.1 ± 11.4	7.1 ± 1.2	5.0 ± 0.9	3.0 ± 0.6	14.2 ± 11.5	0.17 ± 0.13	18.9 ± 2.5
1989	117.9 ± 11.8	75.3 ± 7.5	-6.1 ± 10.2	5.0 ± 0.7	3.5 ± 0.5	2.0 ± 0.4	9.1 ± 10.3	0.12 ± 0.14	16.1 ± 2.1
1990	108.4 ± 10.8	69.2 ± 6.9	1.2 ± 9.9	7.6 ± 1.2	5.6 ± 0.9	3.2 ± 0.6	3.2 ± 10.0	0.05 ± 0.14	13.1 ± 1.7
1991	110.3 ± 11.0	70.5 ± 7.0	-6.9 ± 9.5	5.6 ± 1.1	3.9 ± 1.0	2.0 ± 0.4	10.4 ± 9.6	0.15 ± 0.14	17.0 ± 2.3
1992	99.5 ± 10.0	63.6 ± 6.4	-8.3 ± 8.4	7.4 ± 1.0	5.6 ± 0.8	2.6 ± 0.5	13.1 ± 8.5	0.21 ± 0.13	14.1 ± 1.8
1993	86.6 ± 8.7	55.3 ± 5.5	1.4 ± 7.9	8.8 ± 1.8	7.0 ± 1.6	2.4 ± 0.5	4.9 ± 8.1	0.09 ± 0.15	13.1 ± 1.6
1994	88.8 ± 8.9	56.8 ± 5.7	-4.9 ± 7.7	8.4 ± 2.3	6.6 ± 2.1	2.7 ± 0.5	10.6 ± 8.0	0.19 ± 0.14	14.8 ± 2.0
1995	81.1 ± 8.1	51.8 ± 5.2	-0.3 ± 7.3	8.6 ± 1.9	6.5 ± 1.7	2.5 ± 0.5	6.3 ± 7.6	0.12 ± 0.15	13.4 ± 1.8
1996	80.7 ± 8.1	51.5 ± 5.2	-10.8 ± 6.6	5.1 ± 0.9	3.3 ± 0.6	1.4 ± 0.3	14.4 ± 6.6	0.28 ± 0.13	11.5 ± 1.5
1997	63.8 ± 6.4	40.8 ± 4.1	-6.2 ± 5.3	4.3 ± 0.8	2.7 ± 0.6	0.9 ± 0.2	9.7 ± 5.4	0.24 ± 0.13	10.8 ± 1.4
1998	54.0 ± 5.4	34.5 ± 3.5	-5.5 ± 4.5	4.6 ± 0.6	2.9 ± 0.3	1.3 ± 0.3	8.8 ± 4.6	0.25 ± 0.13	7.6 ± 1.0
1999	45.5 ± 4.5	29.1 ± 2.9	-4.5 ± 3.8	8.0 ± 1.4	5.8 ± 1.1	<b>2.1 ± 0.4</b>	10.4 ± 4.1	0.36 ± 0.14	6.7 ± 0.9
2000	38.4 ± 3.8	24.6 ± 2.5	<b>9.9 ± 6.3</b>	5.2 ± 0.7	3.5 ± 0.4	1.1 ± 0.2	<b>-5.8 ± 6.4</b>	<b>-0.24 ± 0.26</b>	3.5 ± 0.4
2001	53.9 ± 5.4	34.4 ± 3.4	-7.5 ± 4.9	7.0 ± 0.7	4.8 ± 0.4	1.2 ± 0.2	13.3 ± 4.9	0.39 ± 0.14	9.3 ± 1.1
Mittel	<b>91.1 ± 9.1</b>	<b>58.2 ± 5.8</b>	<b>-4.6 ± 8.1</b>	<b>7.0 ± 1.2</b>	<b>5.1 ± 0.9</b>	<b>2.4 ± 0.5</b>	<b>9.3 ± 8.2</b>	<b>0.16 ± 0.15</b>	<b>13.5 ± 1.8</b>
Trend	-7.7 % / a	-7.7 % / a				-8.5 % / a			-8.3 % / a

In Tab. 1 und Tab. 2 fallen vor allem die deutliche Abnahme der mittleren Phosphorkonzentration und der Bruttosedimentation im Lauf der letzten 15 Jahre sowie die grosse jährliche Variation der Nettosedimentation (siehe Abschnitt 2.4) auf. Ausserdem ist zu sehen, dass im Jahr 1999 mit extremem Abfluss und hohem Input auch der Export höher war (fett dargestellte Werte in den Tabellen). Von Frühjahr 2000 bis Frühjahr 2001 wurde im Sempachersee eine starke Zunahme des Phosphorinhalts gemessen, welcher in der Bilanz zu einer Umkehrung des Vorzeichens bei der Nettosedimentation führt (fett dargestellte Werte in Tab. 2). Gründe für dieses Phänomen werden ebenfalls in Abschnitt 2.4 diskutiert.

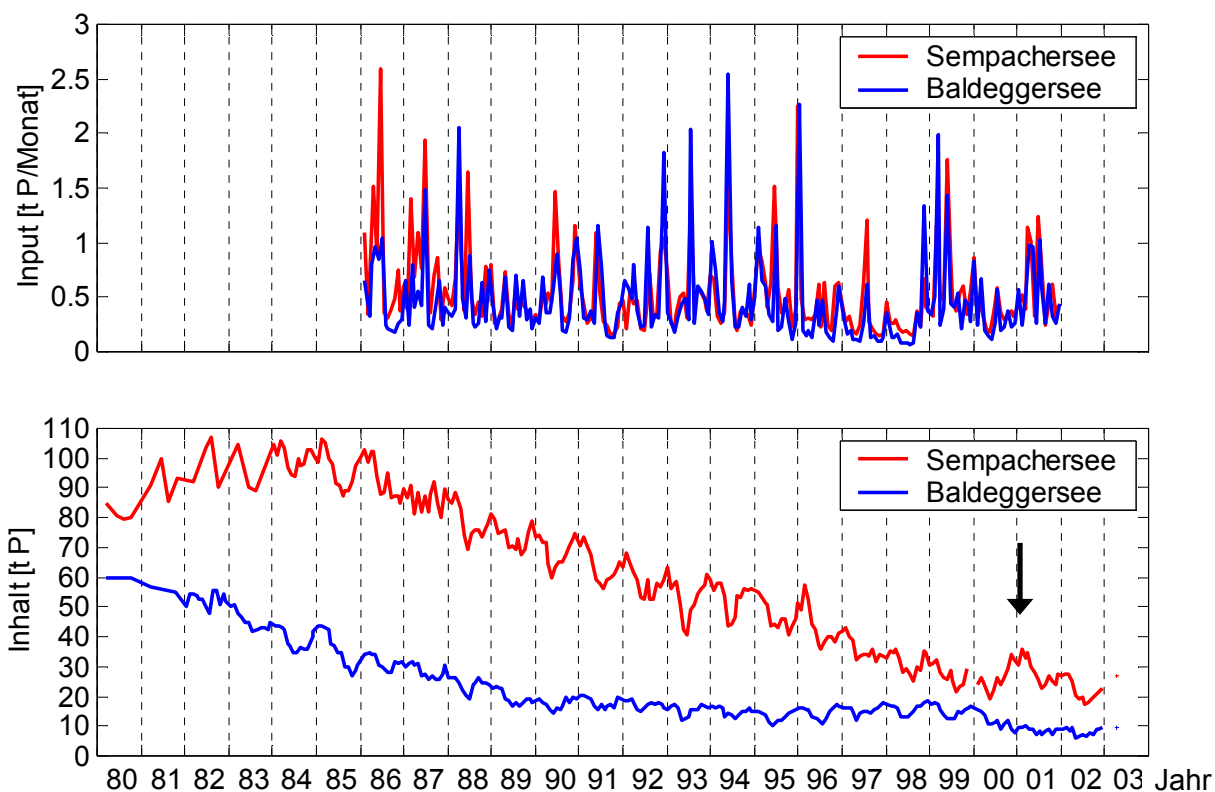
### 2.3 Entwicklung der seeinternen Bilanz

Die Eingangsgrössen und Resultate der Bilanz werden in diesem Abschnitt graphisch dargestellt.

#### Input und Seeinhalt

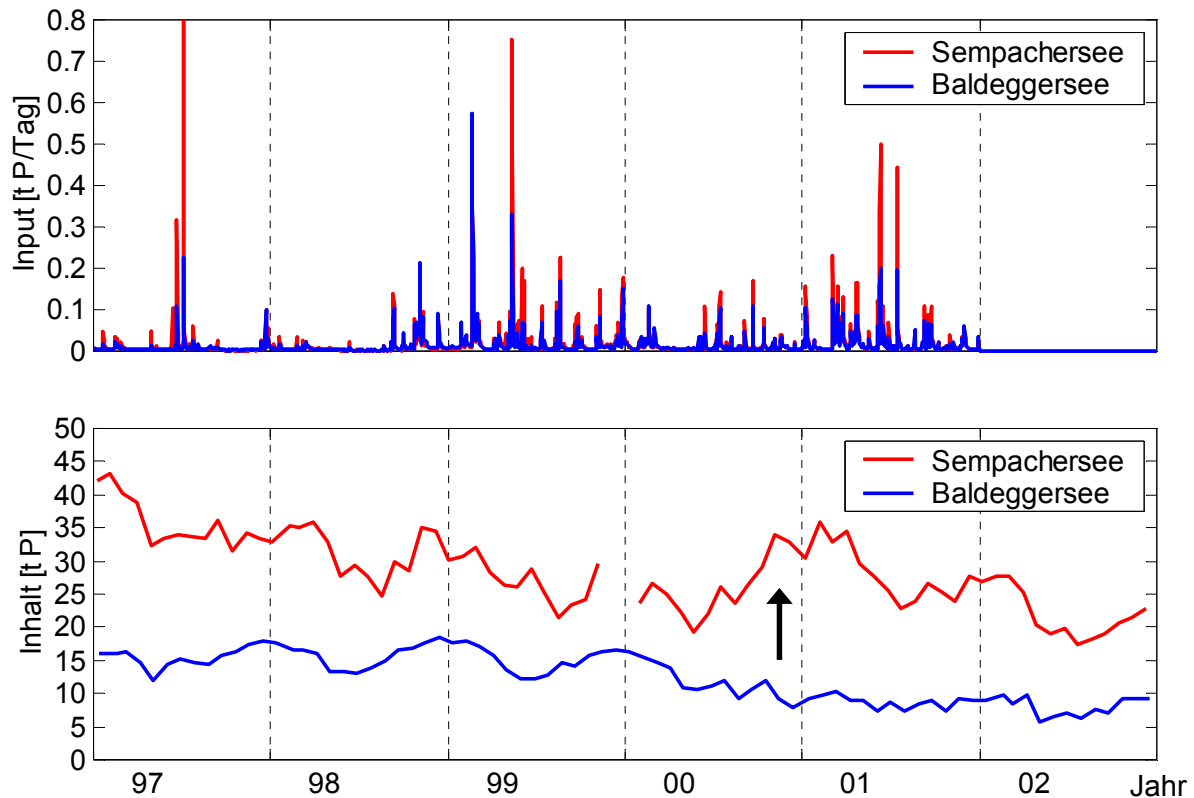
Der Input in den Sempachersee (Abb. 1, oben) liegt im Mittel bei  $P_{\text{ein}} = 7.0 \text{ t a}^{-1}$  und ist im Durchschnitt um 25 % grösser als der Input in den Baldeggersee ( $P_{\text{ein}} = 5.6 \text{ t a}^{-1}$ ), obwohl das Einzugsgebiet um ca. 10 % kleiner ist. Dies ist auf die intensivere landwirtschaftliche Nutzung (2.6 DGVE / ha) zurückzuführen. Allerdings sind im Baldeggersee einzelne Spitzen der Frachten bei Hochwasser ausgeprägter (vergleiche auch Teil I dieses Berichtes). Der Phosphorinhalt (Abb. 1, unten) nahm im Sempachersee im Durchschnitt um 7.7 % pro Jahr ab (entspricht  $4.6 \text{ t-P a}^{-1}$ ), im Baldeggersee um 5.7 % pro Jahr (entspricht  $1.6 \text{ t-P a}^{-1}$ ), wobei von 1993 bis 1999 eine annähernd stationäre Phase durchlaufen wurde (siehe auch Kapitel 4).





**Abb. 1:** Zeitlicher Verlauf des Phosphor-Inputs (monatliche Mittelwerte) und -Inhalts (ca. monatliche Messwerte) im Sempachersee (rot) und Baldeggersee (blau). Seit 1986 nahm der P-Inhalt im Sempachersee um durchschnittlich 7.7 % pro Jahr ab, im Baldeggersee um 5.7 % pro Jahr.

Wird die Situation in den vergangenen sechs Jahren betrachtet (Abb. 2), so fällt vor allem der hohen Input in den Hochwasserjahren 1999 und 2001 auf. Die oben erwähnte kurzfristige Zunahme des Phosphorinhalts im Sempachersee Ende 2001 ist deutlich zu erkennen.



**Abb. 2:** Zeitlicher Verlauf des Phosphor-Inputs (tägliche Mittelwerte, oben) und -Inhalts (ca. monatliche Messwerte, unten) für Sempachersee (rot) und Baldeggersee (blau). (Beim Sempachersee besteht eine Datenlücke von Dezember 1999 bis Januar 2000).

### Nettosedimentation und Bruttosedimentation

In Abb. 3 ist der zeitliche Verlauf der Nettosedimentation dargestellt. Obwohl die Phosphorinhalte über jeweils drei Monate gemittelt wurden, treten insbesondere beim Sempachersee grosse Fluktuationen auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Sempachersee der Phosphorinhalt im Frühjahr von Jahr zu Jahr aus unbekanntem Gründen schwankt (siehe Abb. 1). Um längerfristige Trends aufzuzeigen, kann folgendermassen vorgegangen werden: Es kann eine monatliche Bilanz erstellt und die Werte über ein Jahr gemittelt werden (Abschnitt 2.4), und die Nettosedimentation kann anstatt aus der Phosphorbilanz aus Sedimentdaten bestimmt werden (Kapitel 5).

Die oben erwähnte Zunahme des Phosphorinhalts im Sempachersee zwischen 2000 und 2001 täuscht bei der Anwendung von Gleichung 1 eine negative Nettosedimentation (mehr Rücklösung als Ablagerung) im Sempachersee vor. Umgekehrt nahm in diesem Jahr der Seeinhalt im Baldeggersee stark ab, was rechnerisch in einer hohen Nettosedimentation resultiert. Aus diesen Gründen überrascht nicht, dass der Fehler der Nettosedimentation über den kurzen Zeitraum von einem Jahr in etwa gleichviel wie die Nettosedimentation selbst beträgt (Tab. 1, Tab. 2).

Im Durchschnitt von 1986 bis 2001 betrug die Nettosedimentation im Baldeggersee  $4.1 \text{ t a}^{-1}$  ( $0.79 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ), im Sempachersee  $9.3 \text{ t a}^{-1}$  ( $0.65 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ). Die über einen Zeitraum von einem Jahr bestimmte Nettosedimentation weist interessanterweise in beiden Seen eine Streuung von 60% auf. Diese Streuung setzt sich zur Hälfte aus der Streuung des Eintrags (ca. 25 – 30%) und zur andern Hälfte aus der Streuung der P-Inhalte im Frühjahr zusammen. Warum diese Werte im Frühling so stark streuen ist unklar.

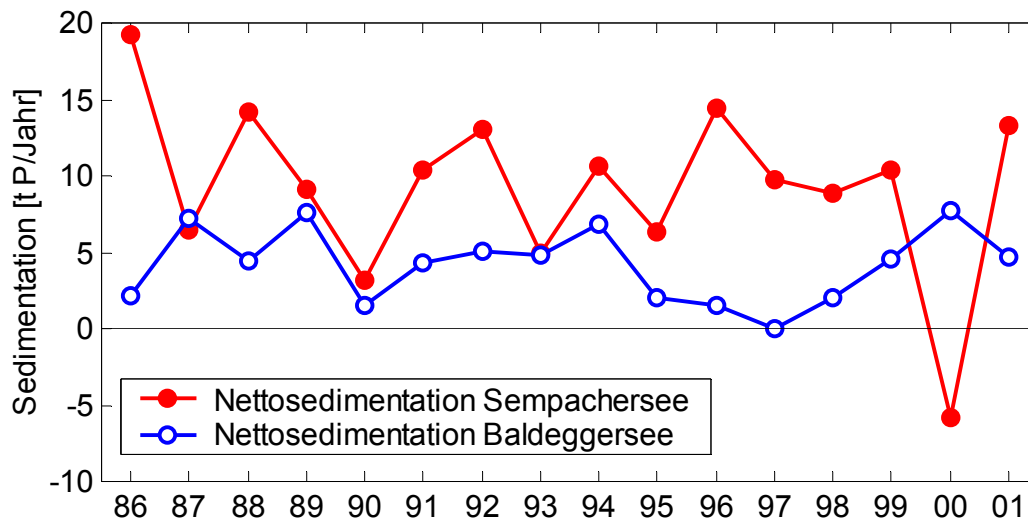


Abb. 3: Nettosedimentation von Phosphor im Baldeggersee und Sempachersee, aus der jährlichen Bilanz.

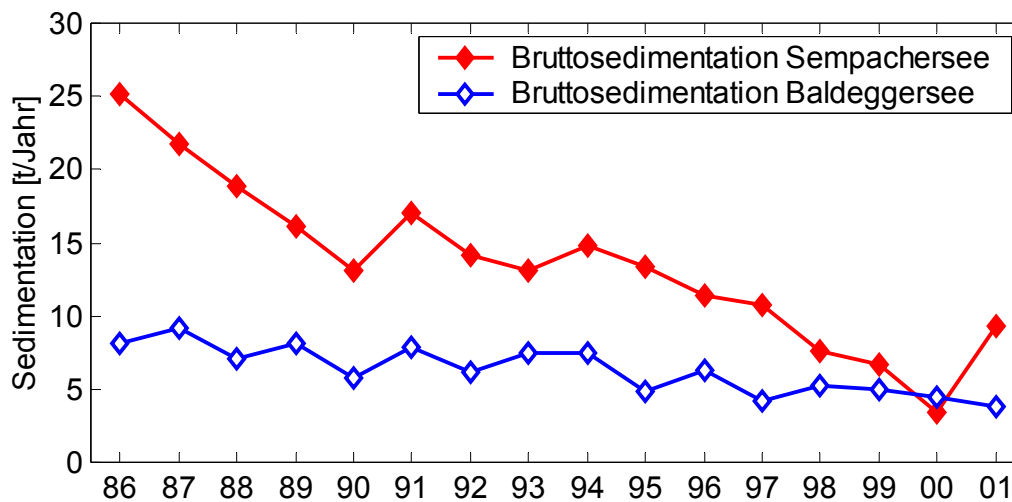
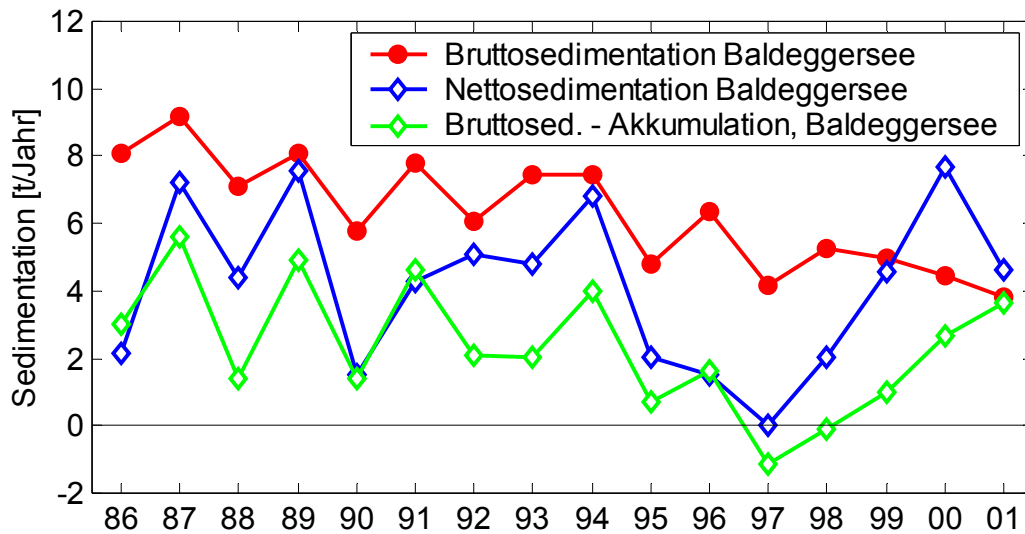


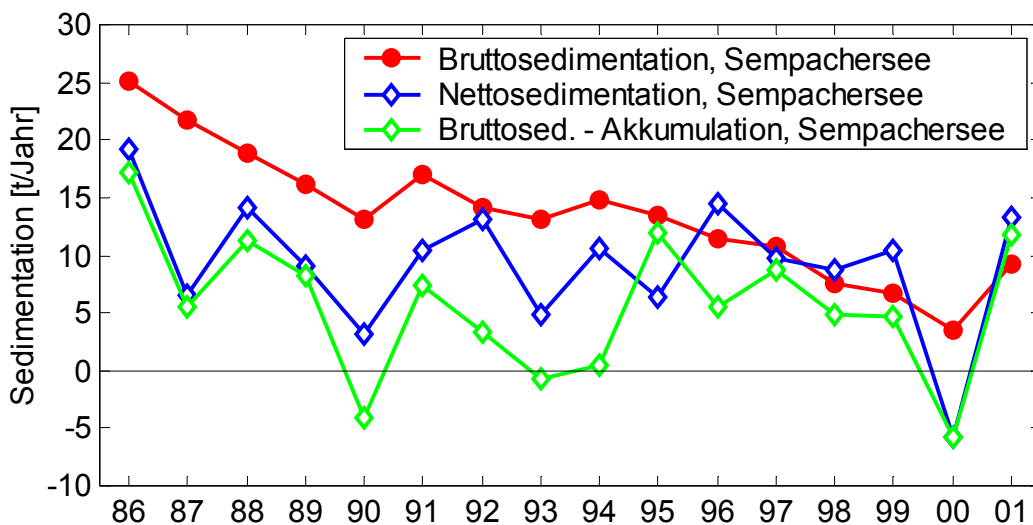
Abb. 4: Bruttosedimentation von Phosphor im Baldeggersee und Sempachersee, aus der jährlichen Bilanz.

Bei der Bruttosedimentation sind die Fluktuationen von Jahr zu Jahr wesentlich geringer, und es ist eine deutliche und kontinuierliche Abnahme seit 1986 zu erkennen. Die Bruttosedimentation nahm in Baldeggersee im Durchschnitt um 5.0 % pro Jahr ab; im Sempachersee um 8.3 % pro Jahr. Dies ist vergleichbar mit der Abnahme der Phosphor-Inhalts (Baldeggersee: 5.7 % pro Jahr; Sempachersee: 7.7 % pro Jahr). Die abnehmende Bruttosedimentation deutet darauf hin, dass möglicherweise die Algenproduktion ebenfalls abgenommen hat.

Jener Anteil der Nettosedimentation, welcher während der Stagnationsphase (April - November) abgelagert wird, kann auch aus der Differenz zwischen Bruttosedimentation und Akkumulation im Hypolimnion bestimmt werden (Die Akkumulation im Hypolimnion ist die Differenz aus dem Inhalt im Herbst und dem Inhalt im Frühjahr). Diese Sedimentation während der Stagnationsphase ist in Abb. 5 und Abb. 6 dargestellt.



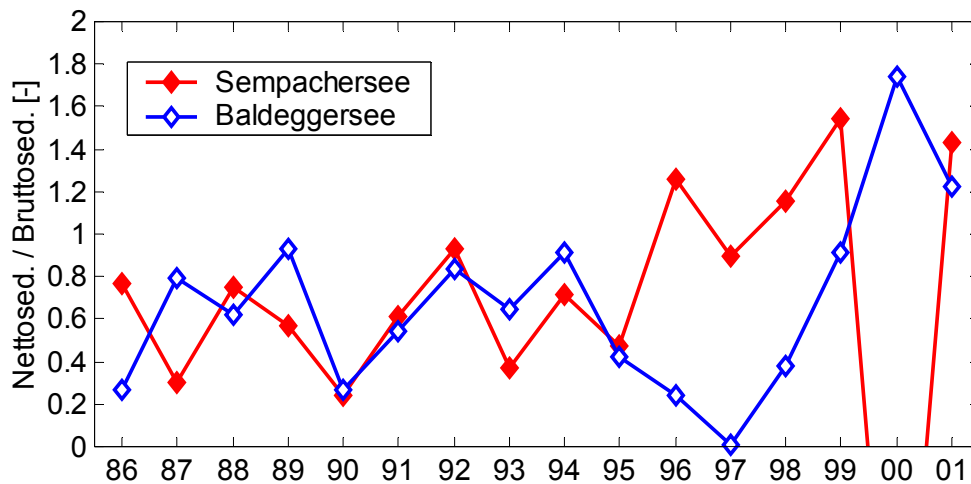
**Abb. 5: Baldeggersee: Bruttosedimentation und Nettosedimentation aus der jährlichen Bilanz, sowie Bruttosedimentation – Akkumulation im Hypolimnion von April bis November. Mittlere Akkumulation im Hypolimnion: 4.0 t.  
Mittelwert von Bruttosedimentation – Akkumulation: 2.3 t.**



**Abb. 6: Sempachersee: Bruttosedimentation und Nettosedimentation aus der jährlichen Bilanz, sowie Bruttosedimentation – Akkumulation im Hypolimnion von April bis November. Mittlere Akkumulation im Hypolimnion: 7.9 t.  
Mittelwert von Bruttosedimentation – Akkumulation: 5.6 t.**

In Abb. 5 und Abb. 6 ist zu erkennen, dass die aus Bruttosedimentation und Akkumulation bestimmten Werte dem Verlauf der Nettosedimentation folgen. In den meisten Jahren sind diese Werte kleiner als die jährliche Nettosedimentation. Ein bedeutender Anteil der Nettosedimentation (44 % im Baldeggersee, 39 % im Sempachersee) findet deshalb während der Zirkulationsphase statt. Interessanterweise stimmen diese prozentualen Anteile mit den Zeitanteilen (5 Monate Zirkulationsphase entspricht 42% des Jahres) überein. Auch dies ist ein

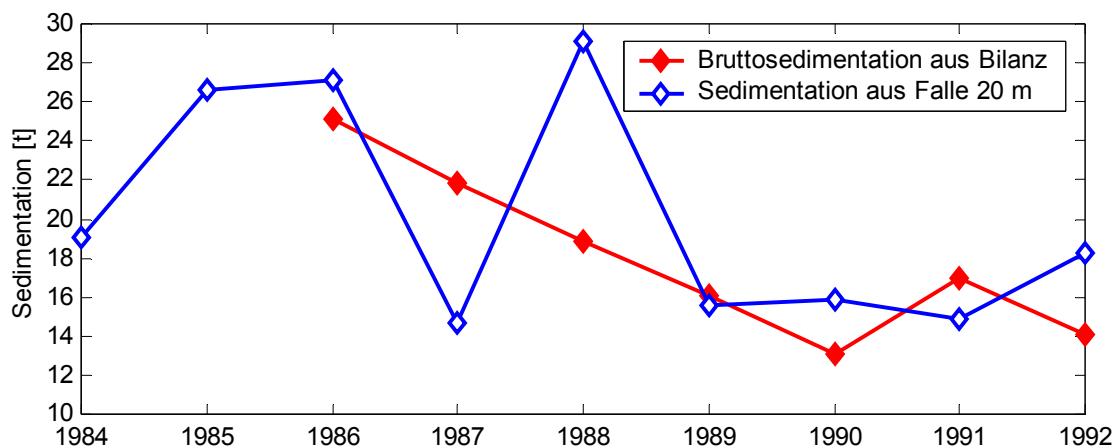
Hinweis darauf, dass die Nettosedimentation nicht stark vom Sauerstoffgehalt des überstehenden Wassers geprägt ist.



**Abb. 7: Verhältnis von Nettosedimentation zu Bruttosedimentation im Baldeggersee und Sempachersee.**

Das Verhältnis von Nettosedimentation zu Bruttosedimentation ist in Abb. 7 dargestellt. Der Wert für den Sempachersee im Jahr 2000 ist negativ, da in diesem Jahr die Nettosedimentation aus der Bilanz negativ war. Werden die Mittelwerte von Nettosedimentation und Bruttosedimentation betrachtet, so beträgt das Verhältnis im Baldeggersee 0.67, im Sempachersee 0.69. d. h. rund 70 % der Bruttosedimentation kann als Nettosedimentation bezeichnet werden.

Zur Kontrolle der berechneten Bruttosedimentation kann diese mit dem Phosphorflux aus Sedimentfallen verglichen werden (Abb. 8). In den Jahren 1984 bis 1993 waren im Sempachersee Sedimentfallen in verschiedenen Tiefen eingesetzt (R. Gächter, unveröffentlichte Daten, EAWAG Kastanienbaum). Die Fluxe aus den Sedimentfallen in 20 m Tiefe im Zeitraum von Anfang April bis Ende Oktober stimmen gut mit der Bruttosedimentation aus der Bilanz (Tab. 2) überein: Der Mittelwert von 1986 bis 1992 beträgt  $20.3 \text{ t a}^{-1}$  (Sedimentfallen) bzw.  $18.0 \text{ t a}^{-1}$  (Bilanz). Die Differenz bleibt damit innerhalb des Fehlerbereichs und bestätigt, dass die berechnete Bruttosedimentation innerhalb der angegebenen Fehler zuverlässig ist.



**Abb. 8: Nettosedimentation im Sempachersee, bestimmt aus der jährlichen Bilanz (rot) und mittels Sedimentfallen (blau).**

## 2.4 Variation der Nettosedimentation

Wie aus Tab. 1 und Tab. 2 ersichtlich, schwankt die Nettosedimentation in der Jahresbilanz beträchtlich. Um die zeitliche Entwicklung der Nettosedimentation besser auflösen zu können, wurde eine monatliche Bilanz erstellt. Auch diese weist grosse Schwankungen auf. Wird jedoch die monatliche Nettosedimentation über den Zeitraum eines Jahres gemittelt, so werden langfristige Trends erkennbar (Abb. 9), welche interessanterweise in beiden Seen gleichzeitig auftreten. In beiden Seen ist eine deutliche Abnahme der Nettosedimentation um 1990 und 1996 zu erkennen (im Sempachersee ca. 1 Jahr später als im Baldeggersee), und ab 1998 nahm die Nettosedimentation in beiden Seen wieder zu.

Für die Erklärung dieser langfristigen Trends kommen verschiedene Hypothesen in Frage, da die Nettosedimentation von verschiedenen Faktoren abhängt, welche jährlichen bzw. mehrjährigen Schwankungen unterworfen sind:

- **Abfluss im Seeinzugsgebiet:** (a) Bei hohen Jahresfrachten von P, welche in Jahren mit hohem Abfluss auftreten, wird mehr Phosphor via Algenwachstum in die Biomasse eingebaut und schliesslich aussedimentiert.
  - (b) Bei extremen Hochwasserereignissen kann das Sediment mit anorganischem Material bedeckt werden, was die Rücklösung vermindern und somit die Nettosedimentation erhöhen würde. Dieser Hypothese wird wenig Gewicht gegeben, da solche Ereignisse höchstens lokal im Deltabereich eine Rolle spielen dürften.
  - (c) Die Jahresfracht von P bei hohen Abflüssen (die an sich schon einen Grossteil der Jahresfracht ausmacht) ist mit grossen Unsicherheiten verbunden. Eine Überschätzung beim Input, würde gemäss Gleichung (1) die Nettosedimentation ebenfalls überschätzen.

Abb. 9 vergleicht den zeitlichen Verlauf von Sauerstoffinhalt im Hypolimnion und Zufluss zum See mit dem Verlauf der Nettosedimentation. In dieser Abbildung hat der Verlauf der Nettosedimentation Ähnlichkeiten mit der Entwicklung des Abflusses (Teil I des Berichtes), was darauf hinweist, dass bei hohem Abfluss mehr Phosphor eingetragen, in die Biomasse eingebaut und schlussendlich aussedimentiert wird. Wird der Abfluss direkt gegenüber der Nettosedimentation aufgetragen, so ist jedoch keine signifikante Korrelation zwischen den beiden Grössen zu erkennen.

Um zu überprüfen, ob die Variation in der Nettosedimentation zum Teil durch Überschätzen der Fracht entsteht, wurde die Bilanz neu gerechnet, wobei sämtliche Abflussdaten um 20 % verringert wurden. Dies resultiert zwar in kleineren Frachten und damit in einer geringeren Nettosedimentation, die allgemeine Entwicklung der Nettosedimentation bleibt aber erhalten (Abb. 14 im Anhang).

- **Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser:** Bei oxischen Bedingungen in der obersten Sedimentschicht (Bereich: mm) wird die Rücklösung kurzfristig vermindert. Dieser Effekt konnte aber in den belüfteten Schweizer Mittellandseen höchstens kurzfristig, nicht jedoch langfristig beobachtet werden (Gächter und Müller, 2003).

In Abb. 9 ist zu sehen, dass seit Inbetriebnahme der Belüftung die Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser weitgehend konstant gehalten wurde, mit Ausnahme der Jahre 1989 bis 1991, als die Diffusoren im Baldeggersee durch Ablagerungen von Bakterien belegt waren. Auch nach der Umstellung von Reinsauerstoff auf den Betrieb mit feinblasiger Luft im Sempachersee (1997) änderte sich der Verlauf der Sauerstoffkonzentration praktisch nicht.

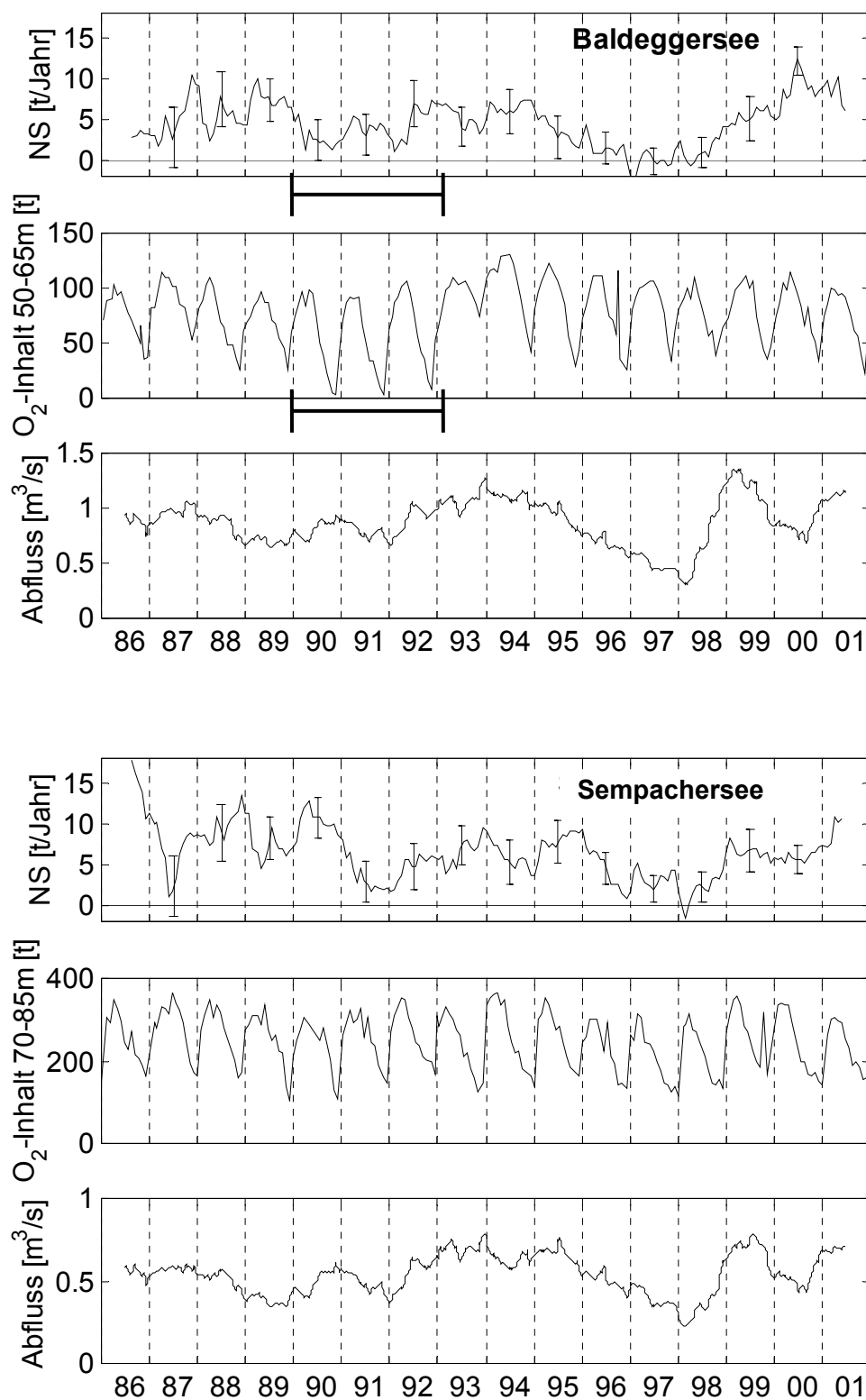
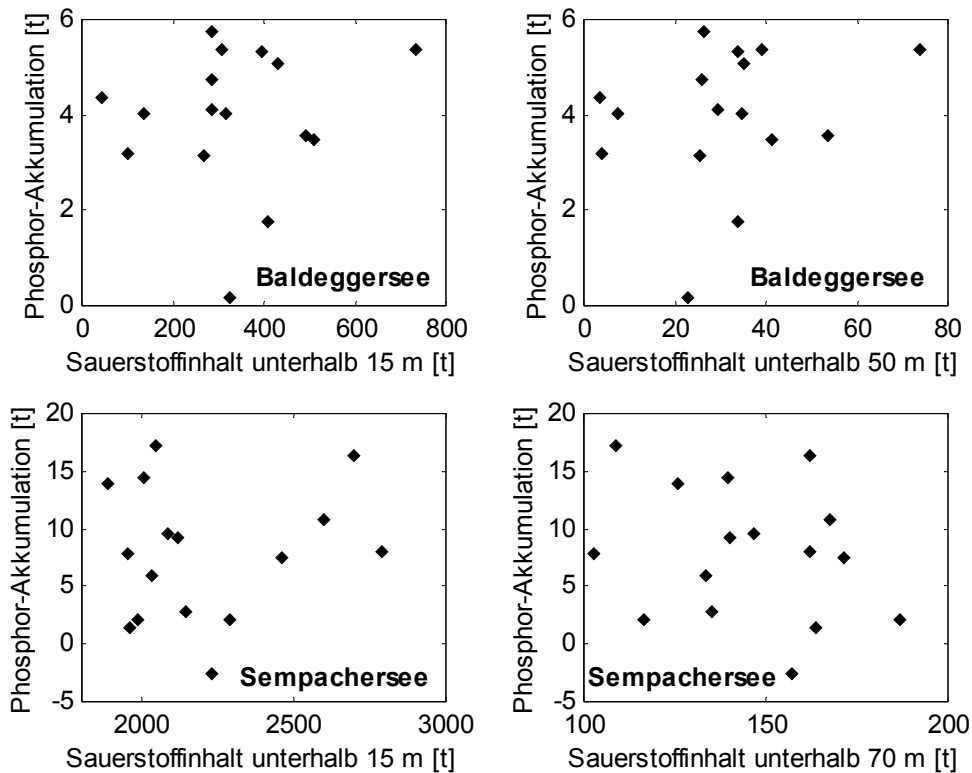


Abb. 9: Nettosedimentation (NS), Sauerstoffinhalt in den untersten 15 m, und Zufluss zum See. Alle Daten wurden einem gleitendem Mittel über 365 Tage unterworfen. Es wurde nur der Abfluss in jenen Zuflüssen berücksichtigt, für welche im gesamten Beobachtungszeitraum Daten vorhanden sind. Oben: Baldeggersee. Unten: Sempachersee.



**Abb. 10: Phosphor-Akkumulation von April bis Oktober und minimaler Sauerstoffinhalt im Hypolimnion (15 m – Grund, links) sowie P-Akkumulation und minimaler Sauerstoffinhalt in den untersten 15 m des Hypolimnions (Baldeggersee: 50 – 65 m, Sempachersee: 70 – 85 m; rechts). Oben: Baldeggersee. Unten: Sempachersee. Die Sterne (rot) stellen Daten vor Beginn der Belüftung (1978 – 1981) dar.**

Von 1990 bis 1992, als im Baldeggersee der Sauerstoffinhalt im Tiefenwasser stark abnahm (siehe Markierung in Abb. 9, oben), war auch die Nettosedimentation relativ gering. Es kann aber von keinem signifikanten Zusammenhang zwischen dem Sauerstoffinhalt und der Nettosedimentation gesprochen werden, da die Veränderung im Bereich der Fehler bleibt (Fehlerbalken in Abb. 9, oben), und insbesondere im Herbst 1992 die Nettosedimentation wieder zunahm. Auch war die Nettosedimentation von 1996 bis 98 deutlich geringer, ohne dass die Sauerstoffbedingungen in diesem Zeitraum ungünstiger gewesen wären.

In Abb. 10 wird der Sauerstoffinhalt (Minimum im Herbst, unterhalb 15 m sowie in den untersten 15 m) der Phosphor-Akkumulation (während der Stagnationsphase) gegenübergestellt. Auch wenn für die Rücklösung die Sauerstoffkonzentration direkt an der Sediment/Wasser-Kontaktzone relevant ist, so wird hier der Inhalt unterhalb einer bestimmten Tiefe als repräsentatives Mass verwendet. Auch hier ist kein signifikanter Zusammenhang zwischen Sauerstoffinhalt und Akkumulation zu sehen.

- **Veränderte Algenzusammensetzung:** Durch die Änderung der Zusammensetzung des Phytoplanktons (z.B. höherer Anteil von Kieselalgen) kann die Nettosedimentation grösser werden. Im Sempachersee nahm im Jahr 2001 die Biomasse der Kieselalgen (Diatomeen) im Vergleich zu den Vorjahren tatsächlich zu; im Baldeggersee fand im Jahr 1999 eine bedeutende Zunahme statt (Abb. 11). Die Veränderung in der Biomasse ist jedoch klein im Vergleich zur gesamten Algenbiomasse, sodass auch der Einfluss auf die Nettosedimentation als gering anzusehen ist.



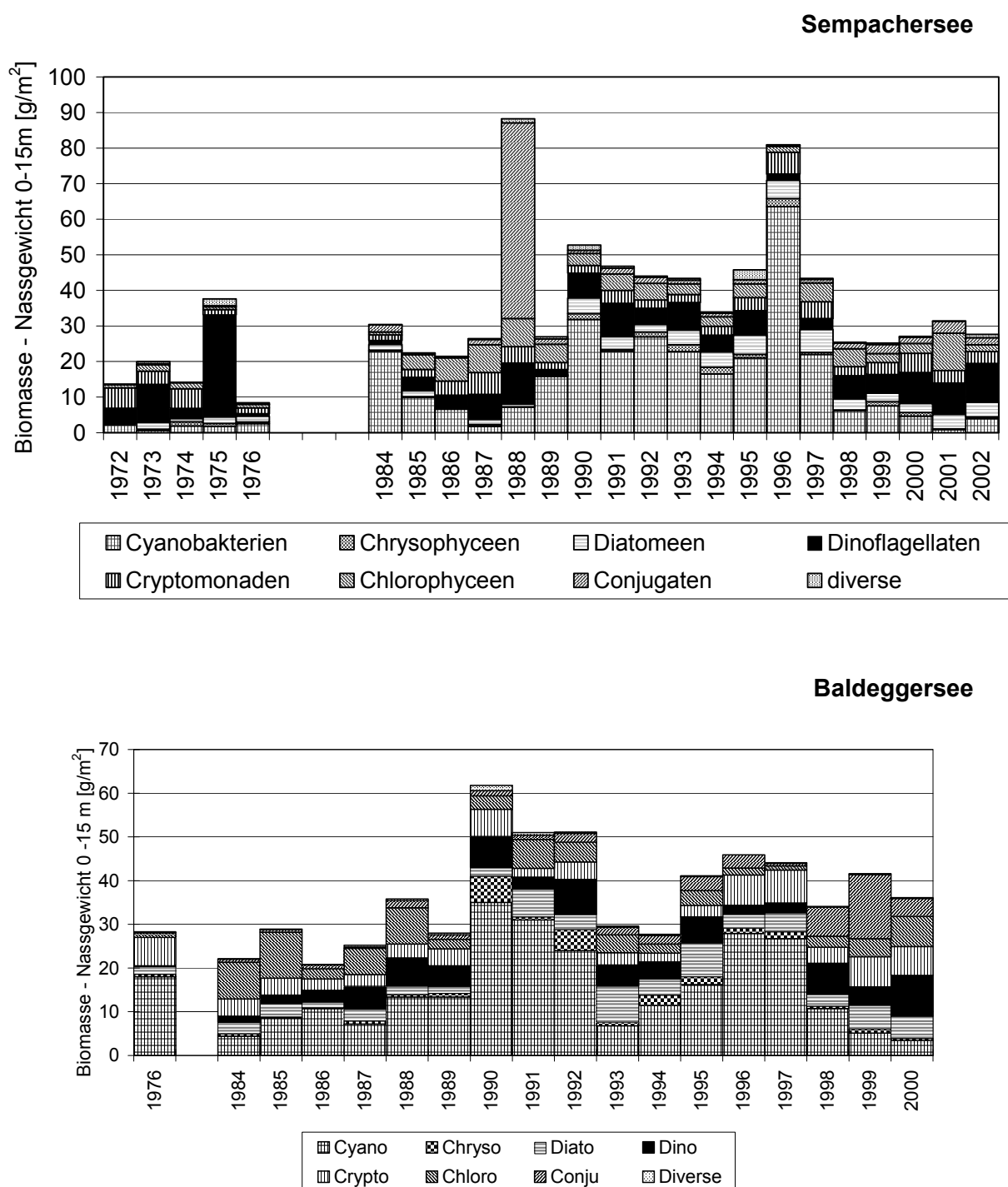


Abb. 11: Zusammensetzung des Phytoplanktons im Sempachersee (oben) und Baldeggersee (unten), jährliche Durchschnittswerte (H. R. Bürgi, unveröffentlichte Daten, EAWAG Dübendorf).

- **Bioturbation:** Je nach Aktivität der Bodenorganismen kann ein Anteil des Phosphorreservoirs in den obersten Zentimetern des Sediments freigesetzt werden. Entsprechend den bodennahen Sauerstoffbedingungen ändert sich die Aktivität der Bodenorganismen und damit der Austrag von Phosphor aus den obersten Zentimetern des Sediments.

Spengeler (1994) zeigte, dass das Benthal des Baldeggersees bis 1994 praktisch vollständig durch Oligochaeten besiedelt war, während 1989 die Besiedlung noch nicht abgeschlossen war. Die Abnahme der Nettosedimentation in den 1990er Jahren kann möglicherweise zum Teil dadurch erklärt werden, dass in dieser Zeit die Seen in grösseren Tiefen von Bodenorganismen besiedelt wurden, welche durch Bioturbation den in den obersten Sedimentschichten vorhandenen Phosphor teilweise freisetzen. Ist dieser Prozess abgeschlossen, nimmt die Nettosedimentation wieder zu. Dies könnte eventuell in den letzten Jahren der Fall gewesen sein. Untersuchungen der Nettosedimentation mittels Sedimentkernen könnten hier Klarheit schaffen.

- Als weitere mögliche Ursache für Schwankungen in der Bilanz kommt das sich ändernde **Volumen der Seen** in Frage: Der Wasserstand im Baldeggersee schwankt in einem Hochwasserjahr wie 1999 um ca. 1 m (Abb. 15 im Anhang). Bei einer Seeoberfläche von 5.2 km<sup>2</sup> entspricht dies einem Volumen von  $5.2 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>, bzw. 3.0 % des Gesamtvolumens. Der Fehler aufgrund der Volumenänderung ist damit klein im Vergleich zu den restlichen Fehlern der Bilanz. Im Sempachersee, der ein grösseres Volumen aufweist und deshalb weniger stark auf Änderungen in den Zuflüssen reagiert, ist die maximale Schwankung nur 0.7 % des Gesamtvolumens (0.3 m bei einer mittleren Tiefe von 44 m).

Damit bleibt als plausibelste Erklärung für Veränderungen in der Nettosedimentation, dass in Jahren mit geringen Abflüssen weniger Phosphor in die Biomasse eingebaut wird, und in der Folge weniger aussedimentiert. Ausserdem wird bei hohen Abflüssen mehr Feinmaterial eingetragen, an welchem sich gelöster Phosphor vermehrt adsorbieren kann und welches die Sedimente lokal abdecken kann. Die Variation der Nettosedimentation ist deshalb eher auf äussere Einflüsse, und kaum auf seeinterne Veränderungen zurückzuführen.

Die Schwierigkeit, einzelne Einflüsse zuverlässig bestimmen zu können, ist vor allem darin begründet, dass die Nettosedimentation aufgrund der Berechnungsart mit sehr grossen Fehlern verbunden ist (Tab. 1, Tab. 2; 60% Streuung bei einer jährlichen Bilanz). Effekte, welche zu einer Variation innerhalb des Fehlerbereichs führen, können deshalb nicht eindeutig zugeordnet werden. Falls es als wichtig betrachtet würde, die kurzfristigen Änderungen verlässlich zu bestimmen, so müssten Untersuchungen an Sedimentkernen durchgeführt werden.

### 3. Phosphor-Konzentrationen im Stationärzustand

Um zu bestimmen, welchem Stationärzustand sich der Phosphorinhalt der beiden Seen aufgrund der aktuellen Daten nähert, wurde analog zu Wehrli und Wüest (1996) ein Ein-Box-Modell, beruhend auf Input, Output und Inhaltsänderung, erstellt. Wie in Kap. 2 beschrieben, setzt sich der Input aus der gelösten Phosphorfracht der Zuflüsse sowie dem Gesamtphosphor aus Niederschlag und ARA zusammen. Es wurde angenommen, dass der partikuläre Phosphor aus den Zuflüssen nicht bioverfügbar ist (Anteil  $\alpha = 0$ ). In Wehrli und Wüest (1996) wurde für den Baldeggersee ebenfalls  $\alpha = 0$  gesetzt, für den Sempachersee  $\alpha = 0.07$ . Wie unten gezeigt wird, ist diese Annahme gerechtfertigt.

Zunächst wurde bestimmt, welcher Gleichgewichtskonzentration sich der See nähert (Stationärzustand), und mit welcher Zeitkonstante dies geschieht (Reaktionszeit). Die einzelnen Schritte der Berechnung werden in den Fussnoten zu Tab. 3 erklärt. Schliesslich wurde berechnet, wie gross der Input maximal sein darf, damit ein Stationärzustand erreicht wird, der dem Sanierungsziel, einer Konzentration von  $30 \text{ mg m}^{-3}$ , entspricht.

Weiter wurde angenommen, dass der P-Abfluss direkt proportional zum P-Inhalt ist (Verhältnis der Konzentration im Ausfluss zur mittleren Konzentration im See:  $\beta = \text{konst.}$ ) und dass die Nettosedimentation linear mit dem P-Inhalt abnimmt (Sedimentationsrate;  $\sigma = \text{konst.}$ ).

Im Sempachersee nahm der P-Inhalt im Beobachtungszeitraum stark ab (Abb. 1), während bei der Nettosedimentation kein deutlicher Trend zu erkennen ist (Abb. 3). Dies deutet darauf hin, dass die Sedimentationsrate  $\sigma$  im Lauf der Zeit eher weiter zunimmt und der tatsächliche Stationärzustand deshalb leicht unter dem berechneten Stationärzustand liegt. Auch deutet das Verhältnis von Nettosedimentation zu Bruttosedimentation (Abb. 7) darauf hin, dass der „relative“ Rückhalt von P im Sediment leicht zugenommen hat – jedenfalls nahm die Nettosedimentation über den betrachteten Zeitraum deutlich weniger ab als die Bruttosedimentation.

Die Berechnungen wurden mit Mittelwerten über 5 bzw. 10 Jahre durchgeführt. Der berechnete Stationärzustand wird mit der Konzentration im See ( $\text{Konz}_{\text{See}}$ ) verglichen (Tab. 3).

#### 3.1. Baldeggersee

Die für den Baldeggersee berechneten Stationärzustände sowie Reaktionszeiten sind in Tab. 3 angegeben.

**Tab. 3: Resultate des Ein-Box-Modells, Baldeggersee. Es werden zwei Szenarien unter Verwendung von Mittelwerten über 5 Jahre angegeben.**

	Anteil des bioverfügbaren $P_{\text{part}}$	Konz <sub>Abfl.</sub> / Konz <sub>See</sub> <sup>(1)</sup>	Netto-Sed.-Rate <sup>(2)</sup>	Aufenthaltszeit <sup>(3)</sup>	Volumen	P-Input	P-Input für Sanierungsziel <sup>(4)</sup>	Konz. im Stationärzustand <sup>(5)</sup>	Konz <sub>See</sub> <sup>(6)</sup>	Reaktionszeit <sup>(7)</sup>
Szenario	$\alpha$	$\beta$	$\sigma$	$\tau$	$V$	$P_{\text{ein}}$	<b>Pziel</b>	<b><math>P_{\text{stat}}</math></b>	$P$	<b><math>t^*</math></b>
	[-]	[-]	$\text{a}^{-1}$	$a$	$10^6 \text{ m}^3$	$\text{t a}^{-1}$	$\text{t a}^{-1}$	$\text{mg m}^{-3}$	$\text{mg m}^{-3}$	$a$
Mittel 1992 - 1996	0	0.67	0.25	4.1	173	6.2	<b>2.2 ± 0.5</b>	<b>86 ± 22</b>	91	2.4 ± 0.6
Mittel 1997 - 2001	0	0.67	0.25	3.9	173	4.8	<b>2.2 ± 0.5</b>	<b>66 ± 17</b>	48	2.4 ± 0.6

<sup>(1)</sup> Das Verhältnis der Konzentrationen im See und im Ausfluss  $\beta$  wurde aus dem Mittelwert der monatlichen Messwerte bestimmt.

<sup>(2)</sup> Die Nettosedimentation wurde wie in Kapitel 2.1. beschrieben bestimmt.

<sup>(3)</sup> Die hydraulische Aufenthaltszeit ergibt sich aus dem Verhältnis von Seevolumen und dem mittleren jährlichen Abfluss während der Untersuchungsperiode.

- <sup>(4)</sup> Der Input, bei dem sich im See ein Stationärzustand von  $30 \text{ mg m}^{-3}$  (Sanierungsziel) einstellt, lässt sich wie folgt berechnen:

$$P_{Ziel} = [(\beta / \tau) + \sigma] \cdot (30 \text{ mg m}^{-3}) \cdot V$$

Entscheidend für den Fehler in  $P_{Ziel}$  ist der Term  $[\beta / \tau + \sigma]$ . Einzelne Werte von  $\sigma$  sind mit einem sehr grossen Fehler verbunden (Tab. 1 und Tab. 2). Unter Berücksichtigung, dass die Fehler in  $\beta$  und  $\tau$  klein sind, und dass jeweils Mittelwerte über 5 Jahre verwendet werden, verkleinert sich der Fehler entsprechend. Es wird deshalb einheitlich ein Fehler von 25 % angegeben. Wehrli und Wüest (1996) bestimmten einen vergleichbaren Fehler (28 %).

- <sup>(5)</sup> Die Konzentration im Stationärzustand wird nach folgender Formel bestimmt:

$$P_{Stat} = \frac{1}{(\beta / \tau) + \sigma} \cdot \frac{P_{ein}}{V}$$

Auch hier macht die Nettosedimentationsrate (neben  $P_{ein}$ ) den Grossteil des Fehlers aus. Es wird ebenfalls ein Fehler von 25 % angegeben.

- <sup>(6)</sup> Zum Vergleich mit der Konzentration im Stationärzustand wird die gemessene Konzentration am Ende der ersten betrachteten Periode (April 1997) bzw. die aktuelle Konzentration (April 2003) angegeben.

- <sup>(7)</sup> Die Reaktionszeit wird folgendermassen bestimmt:  $\tau^* = \frac{1}{(\beta / \tau) + \sigma}$

Auch bei der Reaktionszeit wird ein Fehler von 25 % angegeben.

Für den Baldeggersee resultiert im aktuellen Szenario ein Stationärzustand mit einer Konzentration von  $66 \pm 17 \text{ mg m}^{-3}$  welche scheinbar über der heute gemessenen Konzentration von  $48 \text{ mg m}^{-3}$  liegt. In den 1990er-Jahren lagen die gemessenen Konzentrationen im Bereich des berechneten Stationärzustands und blieben über mehrere Jahre annähernd konstant (vergleiche Tab. 1 und Abb. 1). Auffallend ist die starke Abnahme der Konzentration in den vergangenen drei Jahren. Dies deutet darauf hin, dass in diesem Zeitraum der Input leicht überschätzt wurde. Ein Stationärzustand von  $48 \text{ mg m}^{-3}$  würde aufgrund des Modells einem Input von  $3.5 \text{ t a}^{-1}$  (27 % geringer als gemäss der in Tab. 1 ausgewiesenen Werte) entsprechen.

Der dem Sanierungsziel entsprechende maximale Eintrag hat sich im Lauf der Zeit nicht verändert und liegt bei  $2.2 \text{ t a}^{-1}$ .

### 3.2. Sempachersee

Analoge Berechnungen des Stationärzustands wurden für den Sempachersee durchgeführt (Tab. 4). Auch hier liegt die derzeitige Konzentration leicht unter dem berechneten Stationärzustand von  $37 \pm 9 \text{ mg m}^{-3}$ , jedoch klar innerhalb des Fehlerbereichs.

Der P-Input für das Sanierungsziel,  $4.7 \text{ t a}^{-1}$  (aufgrund der Daten der letzten fünf Jahre) liegt unter dem von Gächter und Stadelmann (1993) bestimmten Wert von  $5 - 7.5 \text{ t a}^{-1}$ . Dieser Wert beruhte auf der Annahme, dass die Nettosedimentation bei den damaligen P-Konzentrationen unabhängig vom P-Inhalt war. Bei den derzeitigen Konzentrationen ist jedoch zu erwarten, dass die Nettosedimentation bei weiter abnehmendem Inhalt ebenfalls kleiner wird (Gächter und Wehrli, 1999).

**Tab. 4. Resultate des 1-Box-Modells, Sempachersee. Es werden zwei Szenarien unter Verwendung von Mittelwerten über 5 Jahre angegeben.**

	Anteil des bioverfügbaren $P_{part}$	Konz <sub>Abfl.</sub> / Konz <sub>See</sub> <sup>(1)</sup>	Netto-Sed.-Rate <sup>(2)</sup>	Aufent-haltszeit <sup>(3)</sup>	Volumen	P-Input	P-Input für Sanierungsziel <sup>(4)</sup>	Konz. im Stationär-zustand <sup>(5)</sup>	Konz <sub>See</sub> <sup>(6)</sup>	Reaktionszeit <sup>(7)</sup>
Szenario	$\alpha$	$\beta$	$\sigma$	$\tau$	V	$P_{ein}$	<b>Pziel</b>	<b>P<sub>stat</sub></b>	P	<b>t*</b>
	[-]	[-]	$a^{-1}$	a	$10^6 m^3$	$t a^{-1}$	$t a^{-1}$	$mg m^{-3}$	$mg m^{-3}$	a
Mittel 1992 - 1996	0	0.68	0.18	14.7	639	7.6	<b>4.3 ± 1.1</b>	<b>53 ± 13</b>	81	4.4 ± 1.1
Mittel 1997 - 2001	0	0.73	0.20	15.9	639	5.8	<b>4.7 ± 1.2</b>	<b>37 ± 9</b>	31	4.1 ± 1.0

### 3.3. Weitere Szenarien

Neben den aktuellen Daten wurden Berechnungen mit Daten des Sempachersees und Baldeggersees aus der Zeit vor Beginn der Sanierungsmassnahmen durchgeführt (Tab. 5). Da aus diesen Jahren keine lückenlosen Input- und Outputdaten vorhanden sind, wurde die Sedimentationsrate gemäss Gächter & Wehrli (1998, 1999) bestimmt: Es wurde für P-Inhalte grösser als 25 t (Baldeggersee) bzw. 30 t (Sempachersee) eine konstante Nettosedimentation von  $6 t a^{-1}$  (Baldeggersee) bzw.  $10 t a^{-1}$  (Sempachersee) angenommen.

Der Input setzt sich aus dem gesamten Phosphor aus dem Abwasser und dem Niederschlag, sowie dem gelösten P-Anteil der Bäche zusammen. Für den Input in den Baldeggersee von 1958 stand nur die Fracht aus den Zuflüssen zur Verfügung. Die Bestimmung des Inputs in den früheren Studien basiert auf unterschiedlichen Methoden und unterschiedlich detaillierten Messkampagnen (Bachofen, 1960; Lohri 1977). Es ist zu beachten, dass in den 1970-er Jahren kein linearer Zusammenhang zwischen P-Inhalt und Nettosedimentation gegeben war und der für das Sanierungsziel benötigte Input deshalb für die damalige Situation nicht bestimmt werden kann. Deshalb sind in der Spalte „P-Input für das Sanierungsziel“ nur die aktuellen Werte in Klammern angegeben.

Im Jahr 1958 stand für den Baldeggersee nur ein Profil von Phosphorkonzentrationen zur Verfügung. Dies ermöglicht keine eigene Berechnung des Verhältnisses Konz<sub>Abfl.</sub>/Konz<sub>See</sub>. Es wurde stattdessen der aktuelle Wert von 0.67 eingesetzt. Für die restlichen Jahre standen Daten aus mindestens 3 Profilen zu unterschiedlichen Jahreszeiten zur Verfügung.

**Tab. 5. Resultate des 1-Box-Modells für Baldeggersee, Sempachersee und Zugersee. Quellen: Bachofen (1960); Lohri (1977); Imboden et al. (1995); Greifensee: unveröffentlichte Daten, P. Niederhauser, AWEL Zürich, M. Sturm, EAWAG; Zugersee: unveröffentlichte Daten, P. Keller, AfU Zug. Die in der Spalte „P-Input für das Sanierungsziel“ eingesetzten Werte wurden aus Tab. 3 bzw. Tab. 4 übernommen und beziehen sich auf den aktuellen Zustand.**

	Anteil des bioverfügbaren $P_{part}$	Konz <sub>Abfl.</sub> / Konz <sub>See</sub>	NS-Rate	Aufent-haltszeit	Volumen	P-Input	P-Input für Sanierungsziel	Konz. im Stationär-zustand	Konz <sub>See</sub>	Reaktionszeit
Szenario	$\alpha$	$\beta$	$\sigma$	$\tau$	V	$P_{ein}$	<b>Pziel</b>	<b>P<sub>stat</sub></b>	P	<b>t*</b>
	[-]	[-]	$a^{-1}$	a	$10^6 m^3$	$t a^{-1}$	$t a^{-1}$	$mg m^{-3}$	$mg m^{-3}$	a
Baldeggersee 1958	0	0.67	0.20	4.1	173	9.6	(2.2)	153.0	173.0	2.8
Baldeggersee 1975/76	0	0.64	0.09	4.1	173	11.5	(2.2)	270.3	417.0	4.1
Greifensee	0	0.64	0.30	1.2	149	7.0	3.76	55.9	90.0	1.2
Sempachersee 1954	0	0.97	0.36	15	639	4.4	(4.7)	16.4	19.2	2.4
Sempachersee 1967	0	0.86	0.36	15	639	10.3	(4.7)	38.9	33.0	2.4
Sempachersee 1976/77	0	0.65	0.20	15	639	13.8	(4.7)	89.7	78.8	4.2
Zugersee 1997 - 2001	0	0.59	0.04	14	3180	15.0	7.44	60.5	110.0	12.8

Im Baldeggersee war in den 1970er-Jahren aufgrund des grossen P-Inhalts die Nettosedimentationsrate etwa halb so gross wie 1958 und in den 1990er-Jahren. Die Reaktionszeit war in der Folge länger, und der Stationärzustand bei damaligem Input hätte  $270 \text{ mg m}^{-3}$  betragen. In den folgenden Jahren wurde einerseits der Input reduziert, andererseits erhöhte sich die Nettosedimentationsrate. Diese beiden Effekte führten zu einer raschen Abnahme des Seeinhalts bis in die 1990er-Jahre.

Der Greifensee, ein nicht belüfteter Mittellandsee, ist bezüglich Volumen mit dem Baldeggersee vergleichbar, allerdings ist die Aufenthaltszeit kleiner. Im Gegensatz zum Baldeggersee liegt der berechnete Stationärzustand unterhalb der derzeit gemessenen Konzentration. Dies deutet darauf hin, dass entweder der Input unterschätzt oder die Nettosedimentation überschätzt wird. Eine verbesserte Bilanz des Greifensees mit aktuellen Daten wird derzeit an der EAWAG erstellt.

Im Sempachersee lag die gemessene Konzentration 1976/77 im Bereich des damaligen Stationärzustandes. Aus diesem Grund änderte sich die Phosphorkonzentration Ende der 1970er-Jahre wenig und nahm erst im Lauf der 1980er-Jahre ab, als der P-Input reduziert werden konnte.

In Tab. 5 unten sind die analogen Berechnungen für den aktuellen Zustand des Zugersees dargestellt. Aufgrund des derzeitigen Inputs ist ein Stationärzustand zu erwarten, der etwa der Hälfte der momentanen Konzentration entspricht. Allerdings ist die Reaktionszeit sehr lang, und der Stationärzustand liegt immer noch im eutrophen Bereich.

## 4. Rolle der Belüftung

Der Baldeggersee wird seit 1982 künstlich belüftet, der Sempachersee seit 1984. Im Winter wird jeweils grobblasig Luft eingebracht (Zwangszirkulation), während im Sommer reiner Sauerstoff feinblasig eingetragen und aufgelöst wird, um die Sauerstoffzehrung im Hypolimnion teilweise zu kompensieren. Auch der Hallwilersee wird in analoger Weise belüftet. (siehe Zusammenstellung in Wehrli und Wüest, 1996).

1997 wurde im Sempachersee während des Sommers auf Lufteintrag (feinblasig) umgestellt. Da Luft mit in etwa derselben Rate wie zuvor Sauerstoff eingetragen wird ( $30 \text{ kg h}^{-1}$ ), ist der Sauerstoffeintrag heute auf nur 20 % des früheren Eintrags reduziert. Trotzdem genügt dieser Luftdurchsatz offensichtlich, um das Tiefenwasser im Verlauf des Sommers oxisch zu halten (vgl. Verlauf des Sauerstoffs in Abb. 9). Da der Sempachersee ein grosses oxisches Hypolimnion aufweist, steht der Eintrag von reinem Sauerstoff nicht mehr zur Diskussion. Der regelmässige Eintrag einer geringen Menge feinblasiger Luft erscheint sinnvoll, um die tiefsten Bereiche nicht anoxisch werden zu lassen. Wie gering dieser Lufteintrag sein kann wird am besten empirisch festgestellt, indem  $\text{O}_2$ -Profile vom Herbst regelmässig zur Kontrolle herangezogen werden. Die P-Profile (vom Oktober) in Abb. 12 deuten darauf hin, dass die P-Konzentrationen durch den Lufteintrag gleichmässig verteilt werden.

Beim Baldeggersee sind aufgrund des weniger mächtigen Hypolimnions und der hohen Sauerstoffzehrung die  $\text{O}_2$ -Bedingungen nach wie vor unbefriedigend. Ohne Eintrag von reinem Sauerstoff würde das Hypolimnion im Herbst anoxisch, wodurch das Hypolimnion als Lebensraum für Fische und Bodenorganismen verloren geht (Wehrli und Wüest, 1996). Die Berechnungen für den Hallwilersee belegen (Moosmann et al., 2002), dass der notwendige Eintrag von Sauerstoff durch feinblasige Luft heute noch nicht realisiert werden kann, ohne dass dadurch der Blasenschleier ins Epilimnion aufsteigen, Nährstoffe an die Oberfläche transportieren und das Tiefenwasser deutlich erwärmen würde. In dieser Studie (Moosmann et al., 2002) wurde der Einfluss von verschiedenen Belüftungsvarianten auf den Phosphorhaushalt charakterisiert. Auf den Betrieb durch Eintrag mit feinblasiger Luft kann erst umgestellt werden, wenn die  $\text{O}_2$ -Zehrung während der Produktionsperiode (Frühling bis Sommer) abnimmt.

Die berechneten  $\text{O}_2$ -Zehrungen der letzten Jahre geben leider noch keinen Hinweis darauf (Tab. 6), denn die beobachtete Abnahme von  $0.6 \% \text{ a}^{-1}$  auf heute rund  $1100 \text{ t O}_2$  ist statistisch nicht signifikant.

**Tab. 6: Sauerstoff-Zehrung [t] im Hypolimnion des Baldeggersees, bestimmt aus der Differenz zwischen maximalem Sauerstoffinhalt im Frühjahr und minimalem Sauerstoffinhalt im Herbst, unter Einbezug des eingetragenen Sauerstoffs.**

Jahr	Max. Inhalt [t-O <sub>2</sub> ]	Min. Inhalt [t-O <sub>2</sub> ]	Eintrag [t-O <sub>2</sub> ]	<b>Zehrung</b> <b>[t-O<sub>2</sub>]</b>
1987	1087	490	469	<b>1065</b>
1988	1034	286	465	<b>1212</b>
1989	895	268	547	<b>1174</b>
1990	907	44	495	<b>1358</b>
1991	929	103	361	<b>1187</b>
1992	975	135	370	<b>1209</b>
1993	1102	685	530	<b>947</b>
1994	1168	509	404	<b>1063</b>
1995	1112	284	420	<b>1248</b>
1996	1076	284	434	<b>1226</b>
1997	1060	396	520	<b>1184</b>
1998	1009	447	553	<b>1115</b>
1999	989	318	402	<b>1073</b>
2000	1129	411	343	<b>1061</b>
2001	953	233	353	<b>1073</b>
2002	1056	324	357	<b>1089</b>

Wie in früheren Arbeiten festgestellt wurde (Wehrli und Wüest, 1996; Gächter und Wehrli, 1998; Gächter und Müller, 2003) hat das Sauerstoffniveau keinen Einfluss auf die Rücklösung und die Nettosedimentation von Phosphor in einem längerfristigen Sinne. Diese Schlussfolgerungen decken sich mit der zeitlichen Entwicklung der Nettosedimentation und den Vergleichen von Nettosedimentation und Sauerstoffgehalt (Abschnitt 2). Zwar können Eisenoxide kurzfristig Phosphor in einem dünnen Depot unmittelbar an der Sedimentoberfläche zwischenlagern, doch erfolgt die definitive Sedimentbildung unabhängig von den Bedingungen in der überstehenden Wassersäule im anoxischen Milieu des Sedimentes. Diese kurzfristige Zwischenlagerung von P an der Sedimentoberfläche mag auch für die beobachteten Variationen des P-Gehaltes im Frühling in Frage kommen.

Für das Produktionsniveau im See ist wichtig, dass durch den Betrieb der Belüftung keine Nährstoffe in die produktive Oberflächenschicht transportiert werden (siehe Überlegungen dazu in Moosmann et al., 2002). Wie Abb. 12 zeigt, ist dieser Punkt im Sempachersee unter den heutigen Betriebsbedingungen unproblematisch: Die Zone, in welcher Phosphor durchmischt ist, befindet sich unterhalb einer Tiefe von 30 m.

Im Baldeggersee (Abb. 13) reichte die Zone mit hohen P-Konzentrationen in einigen Jahren bis in Tiefen um 10 m. In den letzten Jahren war dies nicht mehr der Fall (blaue Linien in Abb. 13), die Zone mit höheren Phosphorkonzentrationen reicht aber immer noch in eine geringere Tiefe als im Sempachersee. Dieser Aspekt sollte deshalb kritisch verfolgt werden, solange die Belüftungsanlage im Betrieb ist.

Abb. 12 und 13 zeigen, dass das Hypolimnion im Sempachersee und im Baldeggersee durch die Belüftung durchmischt wird und dass die bodennahen P-Konzentrationen nach Beginn



der Belüftung abnehmen. Profile mit hohen Konzentrationen nach Inbetriebnahme der Belüftung deuten aber darauf hin, dass der P-Inhalt vor allem eine Funktion des Eintrags ist, und dass Effekte der Belüftung auf die P-Konzentration davon überlagert sind und in den vorhandenen Daten nicht sichtbar werden. Dazu gehört auch der in Kläranlagen beobachtete Effekt, dass durch erhöhte Turbulenz Partikel vermehrt koagulieren und die neu entstandenen grösseren Partikel und Flocken rascher absinken.

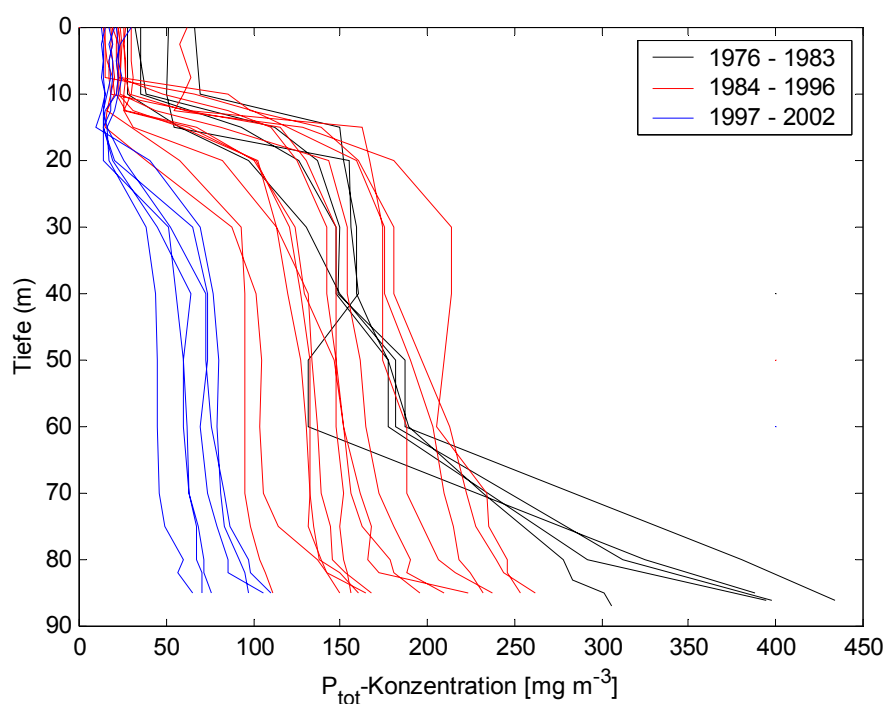


Abb. 12: Gesamtphosphor-Profile, jeweils im Oktober. Sempachersee.

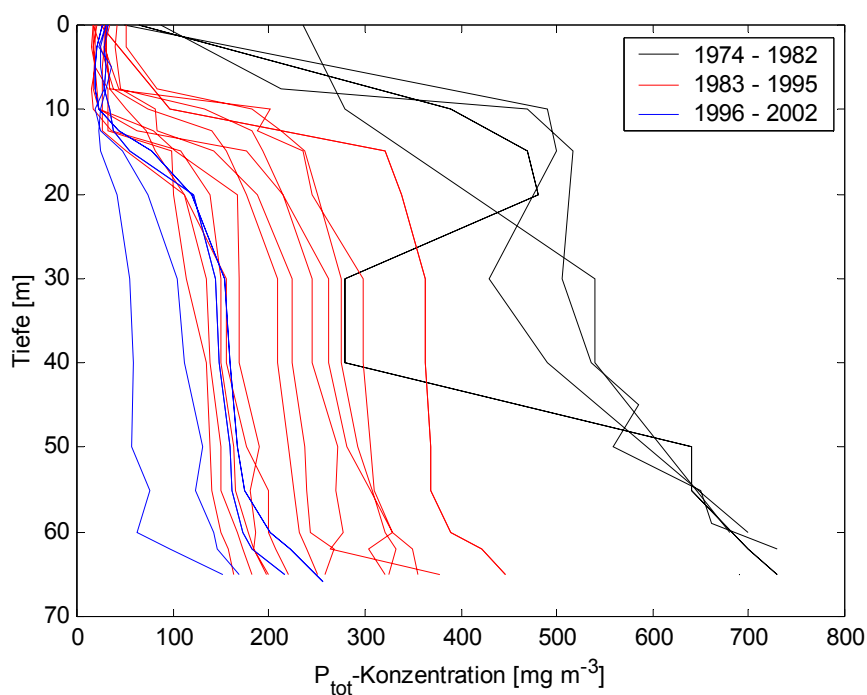


Abb. 13: Gesamtphosphor-Profile, jeweils im Oktober. Baldeggersee.

## 5. Überlegungen zur genaueren Bestimmung der Nettosedimentation

Wie in Kapitel 2 gezeigt, ist die aus der Bilanz bestimmte Nettosedimentation mit grossen Fluktuationen verbunden, welche sich aus den Fehlern von Input, Export und Inhalt zusammensetzen. Bei einer Auflösung von einem Jahr beträgt die Streuung 60% der Nettosedimentation (siehe Tab. 1 und Tab. 2), die sich jedoch bei Mittelung über mehrere Jahre reduzieren lässt.

Alternativ kann die jährliche Ablagerung von Phosphor aus einem datierten Sedimentkern bestimmt werden. Aus einem in 5-mm-Abschnitte aufgeteilten Sedimentkern lässt sich die Nettosedimentation ca. alle 2 Jahre bestimmen (Die Ablagerungsrate im aktuellen Sedimentkern beträgt ca.  $0.25$  bis  $0.35 \text{ cm a}^{-1}$ ).

Bei der Bestimmung der Nettosedimentation aus Sedimentkernen sind ebenfalls verschiedene Fehler zu erwarten:

- Fehler in der chemischen Analyse: Fehler in der Bestimmung des Nass- und Trockengewichts; Fehler in der P-Analytik (ca. 5 %).
- Fehler aufgrund der Datierung.
- Fehler aufgrund der räumlichen (lateralen) Variation: In Proben, welche an verschiedenen Stellen im Sempachersee entnommen wurden (Sturm, 1993) beträgt die Variation ca. 20 %, der Verlauf der oberflächennahen Phosphorkonzentrationen folgt jedoch weitgehend dem Tiefenprofil (grössere Konzentrationen in grösseren Tiefen).

Für eine zuverlässige Bestimmung der Nettosedimentation sollten deshalb mehrere Sedimentkerne entnommen werden. Damit könnte der Fehler aufgrund der räumlichen Variation reduziert werden, und die Nettosedimentation könnte mit grösserer Genauigkeit (realistischerweise nicht zuverlässiger als 10%) bestimmt werden. Dies würde es erlauben,

- den aus den Zuflüssen berechneten Input zu überprüfen, und
- Stationärzustände mit grösserer Genauigkeit zu bestimmen.

Die Erfahrung mit den Sedimentuntersuchungen im Baldeggersee (Wehrli und Wüest, 1996) zeigte jedoch, dass in den Sedimentdaten keine kleinräumigen Variationen im Zeitraum von wenigen Jahren zu erkennen sind. Es ist folglich nicht zu erwarten, dass kleine Änderungen im Input, Effekte der Belüftung oder der Umstellung der Belüftungsweise sich in den Sedimentdaten niederschlagen.

Im Rahmen eines separaten Auftrags wurde im Sempachersee ein Sedimentkern entnommen. Die aus einem einzelnen Sedimentkern bestimmte Nettosedimentation kann dazu dienen, Zuflussberechnungen grob zu überprüfen. Die Fehlerbereiche der Bilanz und damit die Fehler der berechneten Stationärzustände lassen sich damit jedoch nicht reduzieren, da die mit einem einzelnen Sedimentkern verbundene Unsicherheit in etwa gleich dem Fehler des Mittelwertes der Nettosedimentation beträgt.

Für den genannten Sedimentkern sind die Datierung sowie die Messung von Trocken- und Nassgewicht vorhanden. Um die Nettosedimentation zu bestimmen, müsste in den Proben lediglich die Phosphorkonzentration gemessen werden. Die Kosten für die Messung von 40 Proben belaufen sich auf ca. Fr. 3000.--.

## 6. Zusammenfassung

Es wurde – ausgehend von den Frachtberechnungen im Teil 1 dieses Berichtes – die seeinterne Phosphorbilanz für den Baldeggersee und den Sempachersee für die Zeit seit 1986 erstellt. Die beobachteten Variationen wurden unter Einbezug der Fehlerabschätzungen, welche für den Eintrag ebenfalls im ersten Teil durchgeführt wurden, kritisch interpretiert. Die wichtigsten Resultate und Schlussfolgerungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Phosphorbilanz im Mittel**

Für die Zeitperiode von 1986 bis 2001 ergeben sich die folgenden mittleren Frachten und Flüsse (die Fehlerangaben beziehen sich auf die Bilanz über den Zeitraum von einem Jahr):

	Baldeggersee	Sempachersee
Eintrag $P_{\text{gel}}$	$5.6 \pm 0.9 \text{ t-P a}^{-1}$	$7.0 \pm 1.2 \text{ t-P a}^{-1}$
Änderung im See $\Delta P/\Delta t$	$-1.6 \pm 2.6 \text{ t-P a}^{-1}$	$-4.6 \pm 8.1 \text{ t-P a}^{-1}$
Abfluss aus dem See	$3.1 \pm 0.9 \text{ t-P a}^{-1}$	$2.4 \pm 0.7 \text{ t-P a}^{-1}$
Nettosedimentation	$4.1 \pm 2.9 \text{ t-P a}^{-1}$	$9.3 \pm 8.2 \text{ t-P a}^{-1}$
Bruttosedimentation	$6.3 \pm 0.9 \text{ t-P a}^{-1}$	$13.5 \pm 1.7 \text{ t-P a}^{-1}$

- **Zeitliche Phosphor-Entwicklung**

Die meisten Grössen weisen eine zeitliche Entwicklung auf, am deutlichsten beim Inhalt, bei der Bruttosedimentation und beim Abfluss. Auch der Eintrag muss in diesem Zeitraum abgenommen haben – wenn auch die Daten nur eine Abnahme von 1.7 % und 2.5 %  $\text{a}^{-1}$  belegen. Statistisch klarer belegt ist die Abnahme des „abflussbereinigten“ Eintrags der Zuflüsse von ca. 3 %  $\text{a}^{-1}$  (siehe Teil I des Berichts).

	Baldeggersee	Sempachersee
Änderung im See $\Delta P/\Delta t$	- 5.7 % $\text{a}^{-1}$	- 7.7 % $\text{a}^{-1}$
Abfluss aus dem See	- 6.5 % $\text{a}^{-1}$	- 8.5 % $\text{a}^{-1}$
Bruttosedimentation	- 5.0 % $\text{a}^{-1}$	- 8.3 % $\text{a}^{-1}$
Eintrag	- 1.7 % $\text{a}^{-1}$	- 2.5 % $\text{a}^{-1}$

- **Genauigkeit der seeinternen Bilanz**

Der P-Eintrag in beiden Seen weist im Mittel einen Fehler von ca. 20 % auf (siehe Teil I des Berichts). Dieser Fehler pflanzt sich auf die Berechnung der Nettosedimentation weiter fort, wobei er durch Fehler in der Änderung  $\Delta P/\Delta t$  und im Abfluss noch vergrössert wird. Aus den einjährigen Bilanzen ergibt sich somit bei der Nettosedimentation ein Fehler von ca. 75 % (Baldeggersee) und 90 % (Sempachersee). Über 16 Jahre gemittelt erniedrigt sich der statistische Fehler um einen Faktor 4 ( $=\sqrt{16}$ ). Der Mittelwert weist somit einen Fehler von ca. 20 % auf. Damit Veränderungen in den vorliegenden Daten sichtbar werden, müssen sie grösser als der genannte Fehler von ca. 20 % sein.

- **Interpretation der Nettosedimentation**

Wie aus diesen Überlegungen zur Fehleranalyse folgt, können Schwankungen der Nettosedimentation nicht auf einer Zeitskala von einem Jahr interpretiert werden, da die jährlichen Fehler aufgrund von Input, Inhaltsänderung und Export viel zu gross

sind. Dies erklärt, warum keine signifikanten Korrelationen zum Abfluss, zum bodennahen Sauerstoffgehalt, zur Algenzusammensetzung und zu weiteren seeinternen Prozessen gefunden wurden. Wenn man bedenkt, dass die Änderungen im See in etwa 5 bis 8 % pro Jahr betragen, so wird unmittelbar klar, dass Änderungen der Nettosedimentation nur über einen Zeitraum von vielen Jahren erkennbar werden (siehe Ausführungen zum Eintrag in Teil I dieses Berichts).

- **Genauere Bestimmung der Nettosedimentation**

Durch die Entnahme von mehreren Sedimentkernen könnte die Nettosedimentation genauer bestimmt, und die Zuflussdaten könnten überprüft werden. Die Messung der Phosphorkonzentrationen im bereits entnommenen Sedimentkern des Sempachersees ist mit geringen Kosten verbunden, allerdings lässt sich der Fehler in berechneten Stationärzuständen / tolerierbaren Frachten durch einen einzelnen Sedimentkern nicht reduzieren.

Durch eine Beprobung des Sedimentes mit mehreren Kernen (die genaue Zahl müsste noch bestimmt werden) könnte der Fehler realistischerweise auf etwa 10% genau bestimmt – und somit etwa halbiert werden. Dieser Gewinn an Zuverlässigkeit ist jedoch mit einem beträchtlichen Aufwand verbunden.

- **Interpretation des Rückhaltes:** Das Verhältnis von Nettosedimentation zu Bruttosedimentation (NS/BS) ist im Durchschnitt mit rund 70 % in beiden Seen beinahe identisch. Der Umstand, dass dieses Verhältnis für beide Seen identisch ist, obwohl die O<sub>2</sub>-Bedingungen im Sempachersee günstiger sind, ist ein weiterer Hinweis, dass für die definitive Einlagerung von P im Sediment, der Sauerstoffgehalt im überstehenden Wasser nicht von grosser Bedeutung sein kann.

Aufgrund der grossen Variation von Jahr zu Jahr ist ein Trend nur schwer zu erkennen. Vergleicht man jedoch die ersten 8 Jahre (1986-93) mit den zweiten 8 Jahren (1994 -2001) so steigt der Prozentsatz des Rückhaltes tatsächlich an: von NS/BS = 62 auf 71 % (Baldeggersee) und 58 auf 87 % (Sempachersee). Vor allem der deutliche Anstieg beim Sempachersee deutet auf eine Abnahme der Produktion hin. In einem nährstoffarmen See tendiert das Verhältnis von Nettosedimentation zu Bruttosedimentation gegen 1.

- **Reaktion auf unterschiedliche Phosphorbelastungen und Vergleich mit der tolerierbaren Belastung**

Unter Verwendung eines Ein-Box-Modells wurden jene Stationärzustände bestimmt, welchen sich die Seen aufgrund der aktuellen Phosphor-Belastung nähern. In beiden Seen liegen die Konzentrationen im Stationärzustand aufgrund der Daten der letzten 5 Jahre über den derzeit gemessenen Werten, aber nur knapp ausserhalb des Fehlerbereichs. Um das Ziel von 30 mg-P m<sup>-3</sup> zu erreichen, muss der Input an gelöstem Phosphor jedoch weiter reduziert werden.

Beim Baldeggersee handelt es sich um eine Reduktion von durchschnittlich 5.6 t a<sup>-1</sup> auf 2.2 t a<sup>-1</sup>, beim Sempachersee von durchschnittlich 7.0 t a<sup>-1</sup> auf 4.7 t a<sup>-1</sup>. Beim Baldeggersee ist also eine stärkere Verringerung der Fracht an gelöstem Phosphor nötig als beim Sempachersee.

- **Einfluss der Belüftungsweise und Möglichkeiten für Optimierung:** Der P-Haushalt konnte durch die Belüftungsanlage leider nicht positiv beeinflusst werden. Umgekehrt wirkt sich der Betrieb auch nicht negativ aus, solange der Blasenschleier nicht in die Oberflächenschicht gelangt. Phosphorprofile zeigen, dass sowohl im Sempachersee als auch im Baldeggersee der Blasenschleier in einer ausreichenden Tiefe bleibt.

Alle weiteren Einflüsse der Belüftungsanlage haben sich als unkritisch für den P-Haushalt im See erwiesen. Es existieren auch keine Einwände gegen eine Belüftung mit Unterbrechungen, wie sie im Sempachersee geplant ist. Im Baldeggersee ist der Betrieb mit feinblasiger Luft erst gerechtfertigt, wenn die Sauerstoffzehrung abzunehmen beginnt.

## Quellenangaben

Bachofen, R. (1960). Stoffhaushalt und Sedimentation im Baldegger- und Hallwilersee. Dissertation Universität Zürich. Juris-Verlag, Zürich.

Bürgi, H. R. und P. Stadelmann (2000). Change of phytoplankton diversity during long-term restoration of Lake Baldegg (Switzerland). *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 27, 574-581.

BWG (2003). Hydrologische Daten des Bundesamts für Wasser und Geologie, Bern. [www.bwg.admin.ch](http://www.bwg.admin.ch).

Gächter, R. und P. Stadelmann (1993). Gewässerschutz und Seenforschung. In E. Ruoss (Hrsg.): Der Sempachersee. *Mitt. Naturforsch. Ges. Luzern* 33, 343-377.

Gächter, R. und B. Wehrli (1998). Ten years of artificial mixing and oxygenation: No effect on the internal P loading of two lakes. *Environ. Sci. Technol.* 32: 3659-3665.

Gächter, R. und B. Wehrli (1999). Expertenfragen Sempachersee und Baldeggersee. Mitteilung an das Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern. EAWAG, Kastanienbaum.

Gächter, R., and Müller, B. (2003). Why the phosphorus retention of lakes does not necessarily depend on the oxygen supply of their sediment surface. *Limnol. Oceanogr.* 48(2), 929-933.

GSchG (1991). Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer vom 24. 1. 1991.

Herzog, P. (2001). Baldeggersee – Auswertung der Zuflussuntersuchungen 1995 bis 1999. Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern.

Imboden, D. M., B. Wehrli und A. Wüest (1994). Grundlagen für die Sanierung des Zugersees. Untersuchungen des Stoffhaushaltes von Tiefenwasser und Sediment. Gutachten im Auftrag des Amt für Umweltschutz des Kantons Zug. EAWAG, Dübendorf.

Lohri, F. (1977). Untersuchung der Zuflüsse des Baldeggersees. Schweiz. Bund für Naturschutz, Kant. Amt für Gewässerschutz, Luzern.

Marti, D. (1987). Sanierung des Sempachersees: Auswertung der Zuflussuntersuchungen. Messperiode Mai 1984 bis April 1986. EAWAG, Dübendorf.

Mathis B. (1999). Zufuss-Untersuchungen Sempachersee 1992/97. Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern.

Spengeler, S. (1994). Die Sanierung des Baldeggersees: Besiedlung des Benthals durch Oligochaeten und Chironomiden 12 Jahre nach Beginn der seeinternen Massnahmen. Diplomarbeit. EAWAG, Dübendorf.

Stadelmann, P., R. Lovas und E. Butscher (2002). 20 Jahre Sanierung und Überwachung des Baldeggersees. *Mitt. Naturforsch. Ges. Luzern* 37, 113-202.

Sturm, M. (1993). Sedimente als Zeugen der See-Entwicklung. In E. Ruoss (Hrsg.): Der Sempachersee. *Mitt. Naturforsch. Ges. Luzern* 33, 343-377.

Wehrli, B. und A. Wüest (1996). Zehn Jahre Seenbelüftung: Erfahrungen und Optionen. Schriftenreihe der EAWAG Nr. 9. EAWAG, Dübendorf.

## Anhang

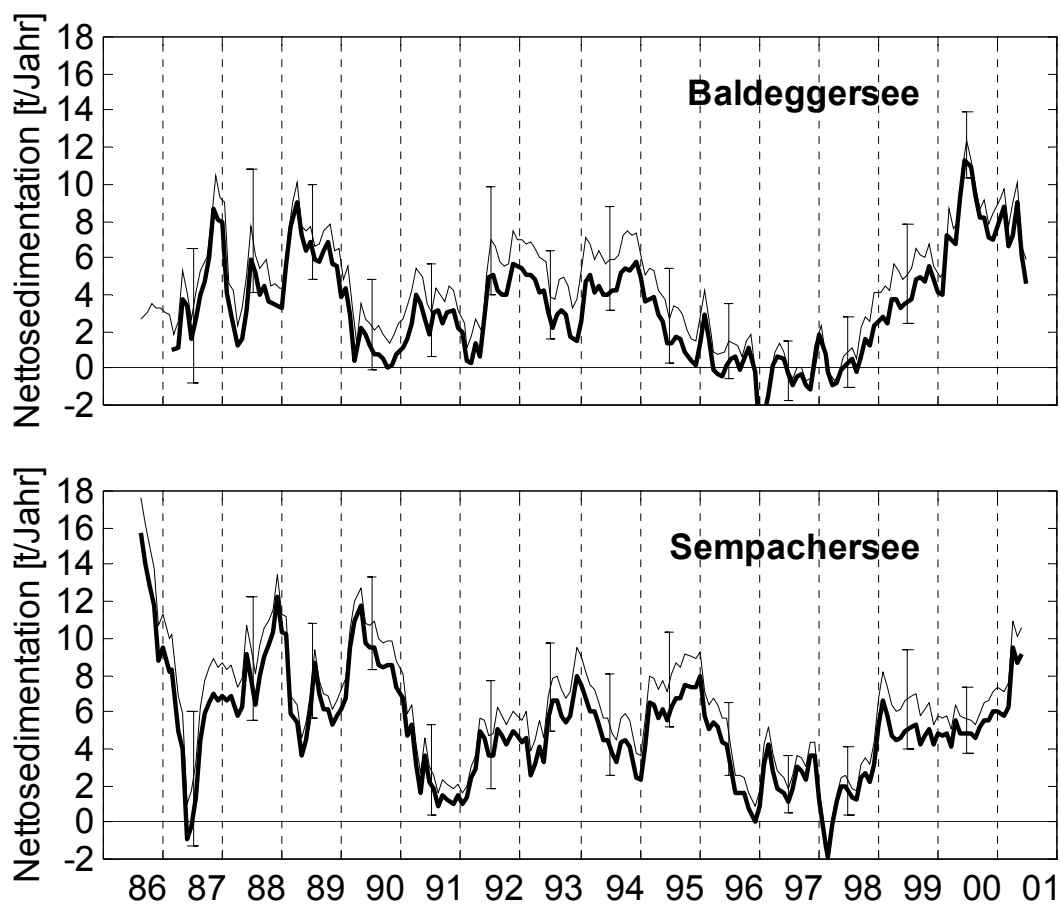
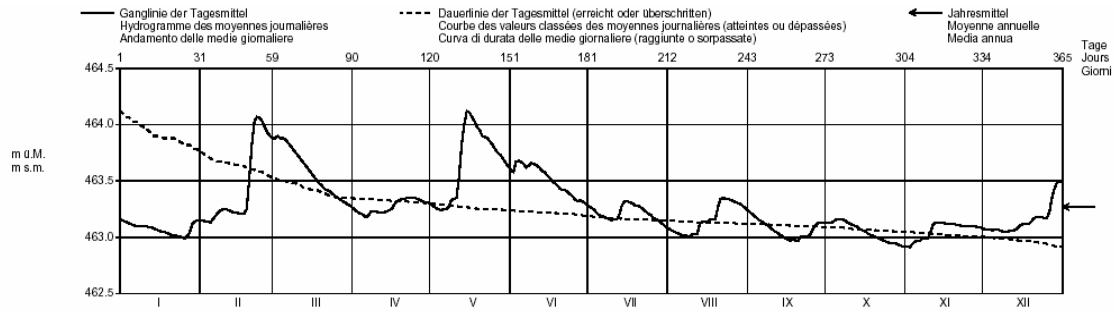
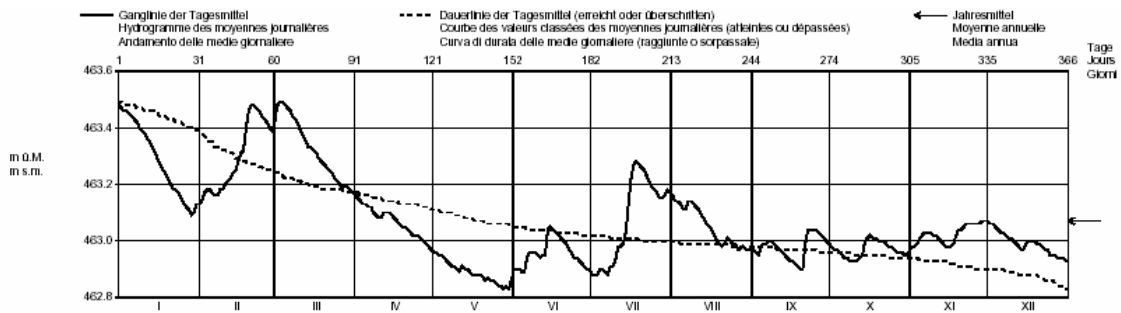


Abb. 14: Nettosedimentation im Baldeggersee und Sempachersee aus der monatlichen Bilanz, berechnet mit gleitendem Mittel über 365 Tage. Dünne Linien: Berechnung analog zu Abb. 9. Fette Linien: Berechnung unter der Annahme eines um 20 % verringerten Abflusses und daraus resultierendem geringeren Input aus den Zuflüssen.

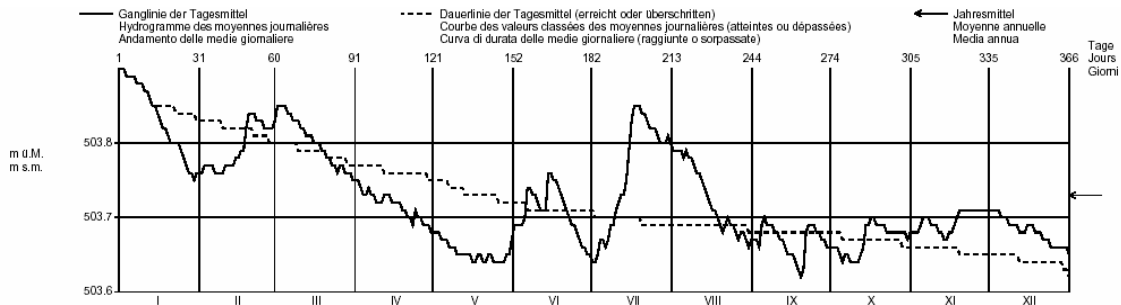
## Baldeggersee 1999:



## Baldeggersee 2000:



## Sempachersee 1999:



## Sempachersee 2000:

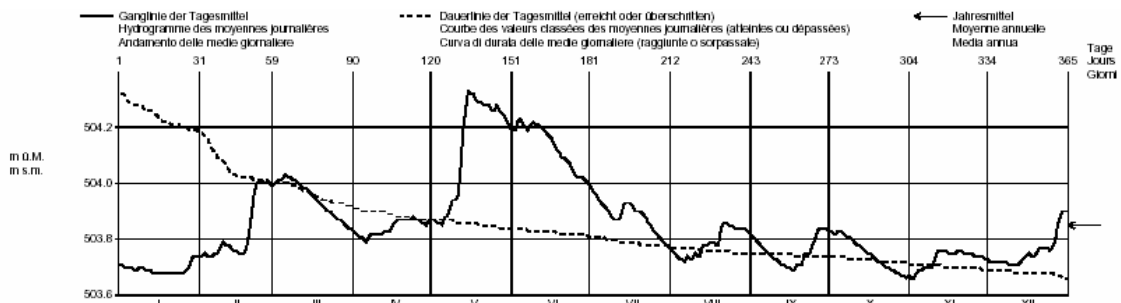


Abb. 15: Jahresverlauf des Wasserstands im Baldeggersee und Sempachersee, 1999 und 2000. Aus BWG (2003).