

Belüftung Greifensee im Sommer 2009



Alfred Wüest

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

Juni 2010

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund	3
2	Belüftungsbetrieb und Datenmaterial	5
3	Sauerstoff-Abnahme im Metalimnion	7
4	Wirkung der Belüftung	10
5	Beantwortung der Fragen	17
6	Fazit	19
7	Referenzen	20
8	Anhang	21

Dank

Ich bedanke mich bei Pius Niederhauser und Walo Meier für die stets angenehme Zusammenarbeit mit dem AWEL Zürich. Bei Beat Müller und Martin Schmid bedanke ich mich für die sorgfältige Durchsicht und bei Eliane Scharmin für die Unterstützung beim Erstellen des Berichtes.

1 Hintergrund

Während den heissen Sommermonaten besteht im Greifensee die Gefahr eines Fischsterbens. Zur wärmsten Zeit des Jahres ist der Lebensraum der Felchen stark eingeschränkt: Einerseits wird das sauerstoffhaltige Oberflächenwasser für Felchen zu warm ($> \sim 21$ °C), während das kühle Tiefenwasser - wegen der hohen Algenproduktion - ab Mitte Sommer sauerstofffrei ist. In der Folge kann die - für das Überleben der Felchen notwendige - Schicht zwischen dem (zu) warmen Oberflächenwasser und dem sauerstofflosen Tiefenwasser unter ungünstigen Umständen zu weniger als 1 m Mächtigkeit schrumpfen.

Zwar hat sich die Konzentration von gelöstem anorganischen Phosphat im Greifensee in den letzten 20 Jahren von über ~ 120 auf ~ 40 mg m⁻³ zurückgebildet (Moosmann et al. 2003; Matzinger et al. 2008; Matzinger et al. 2010), doch ist der See nach wie vor eutroph. Aufgrund der geringen Tiefe des Sees weitet sich die sauerstofffreie Zone im Spätsommer (August) vom Seegrund bis in ~ 5 m Tiefe nach oben aus. Daher kommt es trotz dem Rückgang des Phosphatgehaltes zu Zeiten maximaler Erwärmung auch heute noch zu kritischen Lebensbedingungen für Felchen.

Aus diesem Grund hatte die Baudirektion des Kantons Zürich die Möglichkeit einer O₂-Anreicherung für diese kritische Zone erwogen und das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) gab eine entsprechende Machbarkeitsstudie in Auftrag (Moosmann et al. 2004). Von den möglichen evaluierten Optionen wurde das Diffusorsystem Tanytarsus (Ingenieurbüro Jungo AG: www.jungo-eng.ch/Tanytarsus_de.htm) ausgewählt und im Frühjahr 2009 installiert (Figur 1). Damit soll die kritische Schicht von 5 bis 10 m Tiefe (Metalimnion) während des Hochsommers auf einer Fläche von rund einem Quadratkilometer mit Luft-O₂ angereichert werden. Die Belüftungsanlage wurde erstmals vom 25. Mai bis 1. Oktober 2009 betrieben. Erste (nicht systematische) Beobachtungen deuten darauf hin, dass die Fische den Bereich der Diffusoren – insbesondere im August – als Rückzugsnische nutzen.

Das Belüftungssystem funktioniert wie folgt: In 12.5 m Tiefe eingetragene Luft treibt Seewasser (Blasenschleier) zur Oberfläche. Das Wasser des Blasenschleiers behält seine ursprüngliche Dichte weitgehend bei (kühler und höhere Ionenkonzentration) und schichtet sich wiederum im Metalimnion (5 bis 10 m Tiefe) ein. Dabei wird O₂ von der Oberfläche als auch von den aufgelösten Blasen ins Metalimnion eingetragen. Dieses Diffusorsystem Tanytarsus wurde zwar als eleganteste Lösung mit geringem Eingriff ins Ökosystem See beurteilt, jedoch besteht die Gefahr (i) von zu wenig effektiver O₂-Anreicherung (Moosmann et al. 2005) und (ii) von zusätzlicher Erwärmung des Metalimnions.

Tabelle 1: Charakteristik des Greifensees

Oberfläche *	8.45 km ²
Seefläche in z = 5 m †	7.72 km ²
Seefläche in z = 10 m †	6.44 km ²
Seevolumen total *	149 x 10 ⁶ m ³
Volumen Hypolimnion z > 10 m †	74.3 x 10 ⁶ m ³
Volumen Oberfläche z = 0 bis 10 m †	75.8 x 10 ⁶ m ³
Volumen Metalimnion, z = 5 bis 10 m †	35.8 x 10 ⁶ m ³
Maximale / mittlere Tiefe *	32.3 / 17.6 m
Seeabfluss *	4.08 m ³ s ⁻¹
Hydraulische Aufenthaltszeit *	420 Tage

* Niederhauser et al. (2006)

† Bathymetrie (AWEL; unpublizierte Daten).

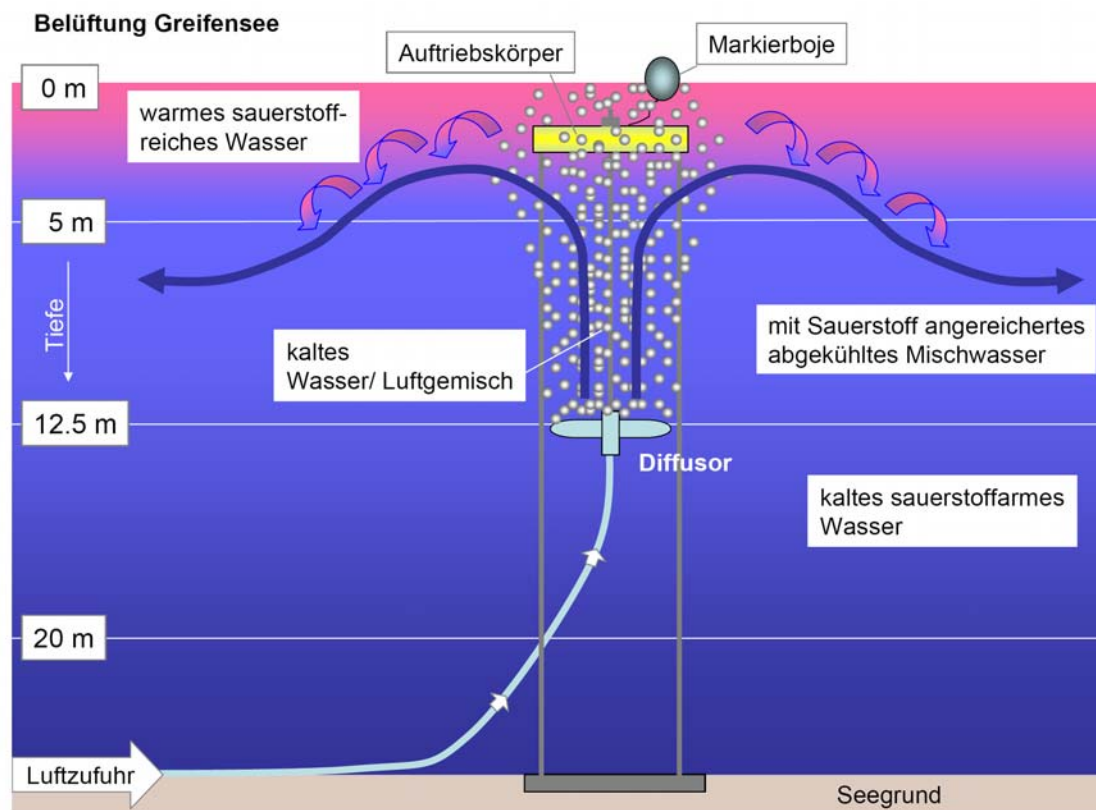
Aus diesem Grund sollen die Beobachtungen nach Ablauf des ersten Betriebssommers kritisch beurteilt werden. In diesem Kurzbericht wird ein Teil der Messdaten des Monitorings evaluiert, die Wirksamkeit der Anlage überprüft und es werden allfällige Optimierungen vorgeschlagen. Eine detaillierte Evaluation verschiedener möglicher Veränderungen und Optimierungen ist jedoch nicht Gegenstand dieser Analyse.

Die folgenden Fragen sollen mit diesem Kurzbericht beantwortet werden:

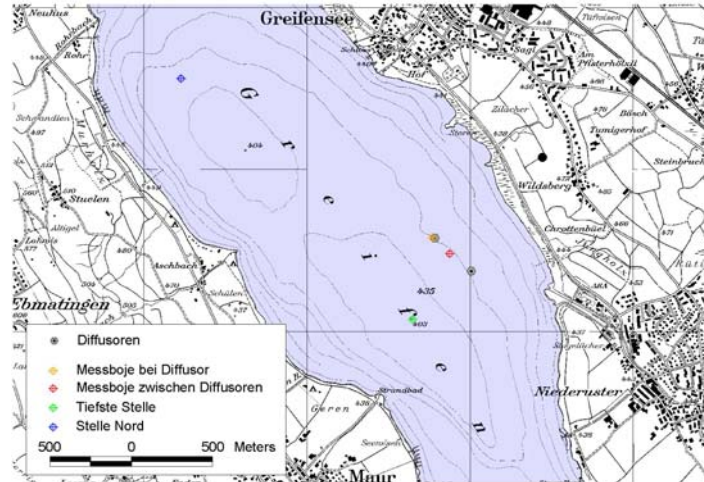
- Wie vergleicht sich die Sauerstoff-Abnahme im Metalimnion während des Sommers 2009 mit den entsprechenden O₂-Abnahmen im vergangenen Jahrzehnt?
- Wie gross ist der Sauerstoff-Eintrag durch die eingeblasene Luft im Verhältnis zum Eintrag durch Einmischung von Sauerstoff in ~5 m Tiefe?
- Wie lautet die Sauerstoff-Bilanz für die Schicht von 5 bis 10 m Tiefe (Zehrung, Eintrag Blasen-schleier)?
- Erlaubt die Interpretation der Messwerte vom Betriebssommer 2009 die Auswirkungen der Belüftungsanlage und der damit verknüpften Vorgänge zu verstehen?
- Welche betrieblichen Verbesserungen bestehen (Leistung, Tiefenbereich, Zeitraum des Betriebes, weitere Überlegungen)?
- Ab welchem Zeitpunkt im Jahr sollen die Diffusoren betrieben werden?

2 Belüftungsbetrieb und Datenmaterial

Die Belüftungsanlage (Figur 1) funktionierte im Sommer 2009 wie folgt: Luftblasen wurden in 12.5 m Tiefe freigesetzt (Anhang Figur A1) und erzeugen einen Blasenschleier, welcher Metalimnionwasser und Hypolimnionwasser zur Oberfläche treibt. Von der Oberfläche sinkt der (dichtere = schwerere) Schleier wiederum zurück ins Metalimnion (Figur 1). Durch Auflösung der Luftblasen und durch Einmischung von Oberflächenwasser gelangt O₂ ins Metalimnionwasser. Als unerwünschter Nebeneffekt wird das Metalimnionwasser - zusätzlich zur natürlichen Temperaturzunahme während des Sommers - erwärmt. Im ersten Betriebsommer waren zwei Diffusoreinheiten im Einsatz (Figur 2) mit einem Luftdurchsatz von je 8 L s⁻¹ (total 16 L s⁻¹). Betrieb und Funktion der Belüftungsanlage sind in Kapitel 4 im Detail dargestellt.



Figur 1 - Funktion des verwendeten Systems Tanytarsus: Freisetzung von Luft in 12.5 m Tiefe (Diffusor-schlauch siehe Figur A1), Blasenschleier bis zur Oberfläche, Einschichtung von sauerstoffhaltigerem Metalimnionwasser. In kurzem Abstand (wenige 10 m) vom Blasenschleier sind an der Oberfläche weder Blasen, noch Wasser aus der Tiefe noch Strömungen zu beobachten. Positionen der zwei Diffusoreinheiten in Figur 2. Figur gemäss AWEL 2000 (www.zh.ch).



Figur 2 - Positionen der zwei Diffusoren und der zwei Messbojen; zudem die vier Positionen, an denen Profile für O₂ erhoben wurden. Figur gemäss AWEL 2009.

Im Rahmen der Überwachung des Sees und der Funktion der Belüftungsanlage wurden während dem ersten Betriebsommer die folgenden Daten vom AWEL erhoben:

- je 12 O₂- und Temperatur-Profile an vier Positionen (Tabelle 2 und Figur 2).
- Kontinuierliche Temperaturmessung mit Thermistoren in Tiefen von 1, 2, 3, .. bis 15 m an zwei Positionen (beim Diffusor Nord; und zwischen den Diffusoren; Figur 2).

Zudem wurden die Daten des regulären Seemonitorings (monatlich ab 2000) für die Analyse in diesem Bericht verwendet.

Tabelle 2: Probenahmen während der Betriebsperiode 2009 (4 Positionen)⁽¹⁾

Probe- nahme	Datum 2009	Tiefste Stelle	Mess- Boje Nord	Mess- Boje (Di) ⁽³⁾	Stelle Nord
1	03. Juni	x	x	x	-
2	10. Juni	x	x	-	x
3	15. Juni	x	x	-	x
4	25. Juni	x	x	x	x
5	03. Juli	x	x	x	-
6	13. Juli	x	x	-	x
7	23. Juli	x	x	x	x
8	30. Juli	x (unvollst.)	x	-	-
9	10. August	x	x	-	x
10	20. August	x	x	x	x
11 ⁽²⁾	27. August ⁽²⁾	x	x	x	x ⁽²⁾
12	07. September	x	x	x	x

⁽¹⁾ Positionen der vier Messstellen für Profile, siehe Figur 2

⁽²⁾ zusätzliche Profile an mehreren Stellen erhoben (Süd- und Niederuster)

⁽³⁾ Messboje (Di) = zwischen Diffusoren; Messboje Nord = 15 m westlich von Diffusor Nord.

3 Sauerstoff-Abnahme im Metalimnion

Aufgrund des grossen Phosphatgehaltes und des entsprechenden Algenwachstums liegt die O₂-Zehrung im Greifensee seit Jahrzehnten auf hohem Niveau (Matzinger et al. 2008; Matzinger et al. 2010). Die Zehrung im gesamten Hypolimnion ist für die letzten Jahrzehnte im Anhang F dargestellt (Figur A3).

Die „Sauerstoff-Abnahmen“ im Metalimnion (5 bis 10 m Tiefe) sind für die letzten 10 Jahre in Tabelle 3 mit dem Betriebssommer 2009 verglichen. Wir verwenden hier bewusst den Begriff „Sauerstoff-Abnahme“, da sich die Änderung der O₂-Konzentration nicht nur durch die O₂-Zehrung ergibt sondern auch durch den Austausch mit der Oberfläche (0 bis 5 m) und den darunterliegenden Schichten im Hypolimnion (z.B. durch den Blasenschleier).

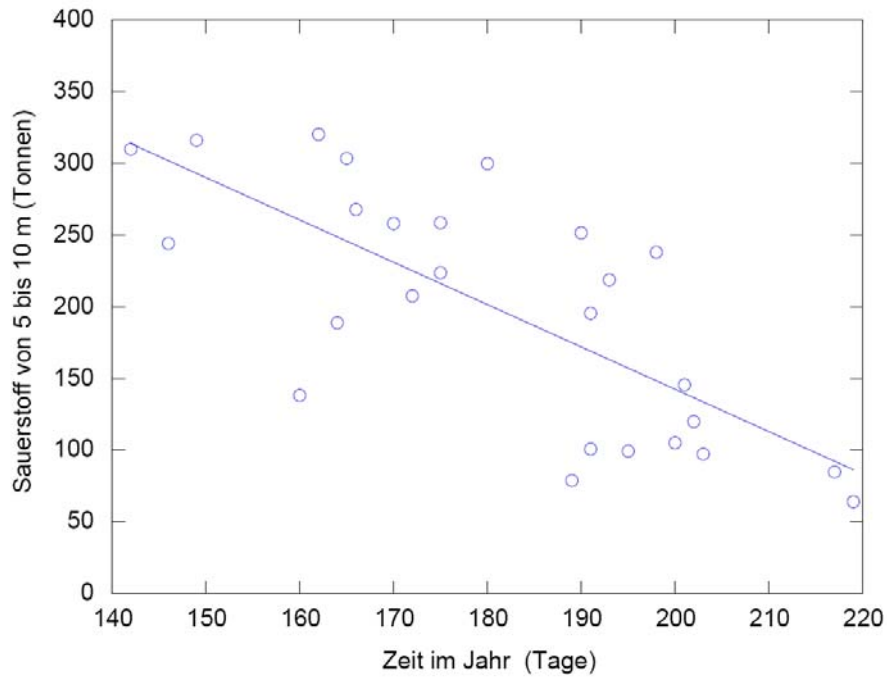
Sauerstoff-Abnahme 2000 bis 2008 - Die O₂-Abnahme variierte während des Sommers (Ende März bis August) von 2.6 bis 3.4 t d⁻¹ (Tabelle 3) und betrug im Mittel 3.0 ± 0.3 t d⁻¹ (± 0.3 t d⁻¹ = Standardabweichung). Betrachtet man nur die für den Belüftungsbetrieb relevante Zeitspanne (nach 25. Mai), so bleibt die O₂-Abnahme gleich bei 3.0 ± 0.5 t d⁻¹ (Figur 3). Die grössere Standardabweichung (± 0.5 versus ± 0.3 t d⁻¹) ergibt sich aus der kürzeren Beobachtungsdauer. Der O₂-Gehalt in der oberen Zone des Metalimnions weist eine stark witterungsbedingte natürliche Variation auf. Konsistent mit der O₂-Zehrung im Hypolimnion (Anhang F) besteht auch im Metalimnion ein schwacher zeitlicher Trend von ~1% yr⁻¹ zu geringerer O₂-Abnahme (Tabelle 3).

Tabelle 3: Sauerstoff-Abnahme im Metalimnion

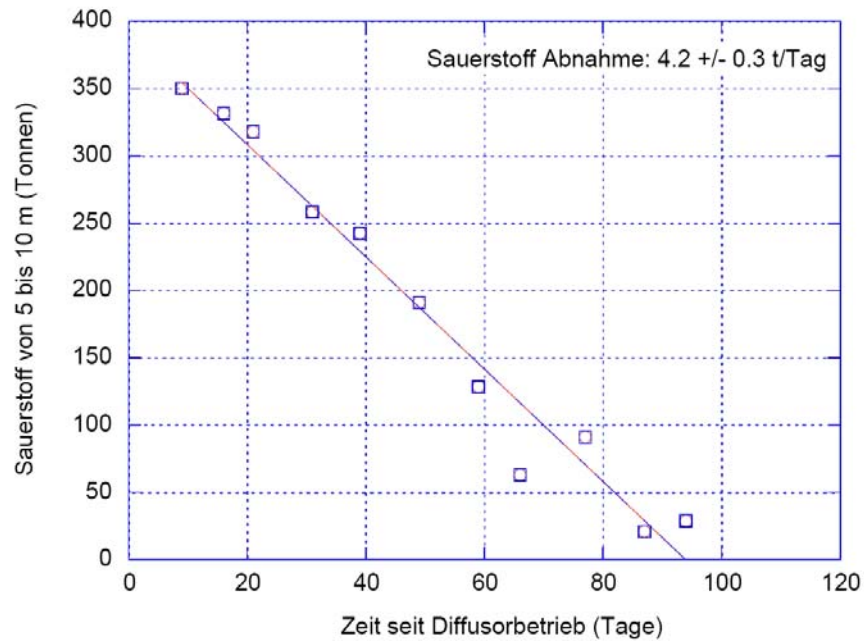
Jahr	Linearer Trend	Max - Min / Zeit
2000 *	3.41 t d ⁻¹	3.59 t d ⁻¹
2001 *	3.16 t d ⁻¹	2.99 t d ⁻¹
2002 *	2.56 t d ⁻¹	2.51 t d ⁻¹
2003 *	2.86 t d ⁻¹	3.04 t d ⁻¹
2004 *	3.25 t d ⁻¹	3.15 t d ⁻¹
2005 *	2.59 t d ⁻¹	2.86 t d ⁻¹
2006 *	2.89 t d ⁻¹	3.21 t d ⁻¹
2007 *	2.80 t d ⁻¹	2.87 t d ⁻¹
2008 *	3.02 t d ⁻¹	3.17 t d ⁻¹
Mittel 2000 bis 2008	2.98 ± 0.30 t d⁻¹	3.08 ± 0.30 t d⁻¹
Mittel 2000 bis 2008 (nur Juni/Juli)	3.0 ± 0.5 t d⁻¹	
2009 *	3.22 t d ⁻¹	3.37 t d ⁻¹
2009 „Tiefste Stelle“ und „Stelle Nord“ (nur Juni/Juli) †	4.2 t d ⁻¹	5.0 t d ⁻¹
2009 zwischen Diffusoren †	4.1 t d ⁻¹	4.5 t d ⁻¹
2009 Diffusor Nord †	3.5 t d ⁻¹	3.3 t d ⁻¹

* von Ende März (Maximum) bis anfangs August (Minimum); Daten monatlicher Probenahme.

† Daten nur von Juni/Juli.



Figur 3 - O_2 -Inhalt im Metalimnion von 2000 bis 2008 während der Zeitspanne des Belüftungsbetriebs. Beginn (25. Mai 2009) entspricht Tag = 145. Die Figur dokumentiert die grossen Variationen des O_2 -Inhalts im Metalimnion von Jahr zu Jahr. Die Linie zeigt den linearen Trend von $-3.0 \pm 0.5 \text{ t d}^{-1}$, welcher gleichzeitig der mittleren O_2 -Abnahme gemäss Tabelle 3 entspricht (ebenfalls -3.0 t d^{-1}). Für O_2 -Abnahme in 2009, siehe Figur 4.



Figur 4 - O_2 -Abnahme im Metalimnion während des Belüftungsbetriebs im Jahr 2009 (Tag 0 = 25. Mai 2009). Berücksichtigt sind nur die Profile von „Tiefste Stelle“ und „Stelle Nord“. Die O_2 -Abnahme war in den 100 Tagen nach Beginn der Belüftung mit 4.2 t d^{-1} grösser als in den vorangegangenen 9 Jahren (Figur 3; Tabelle 3).

Sauerstoff-Abnahme während Belüftung 2009 - Mit $3.3 \pm 0.3 \text{ t d}^{-1}$ war die O_2 -Abnahme im Sommer 2009 (Ende März bis August, Tabelle 3) nicht verschieden zum vorangegangenen Jahrzehnt. Betrachtet man jedoch nur den Zeitraum nach Inbetriebnahme der Belüftung, so war die Abnahme mit $4.2 \pm 0.3 \text{ t d}^{-1}$ deutlich grösser (Figur 4). Die folgenden drei Gründe erscheinen als die wahrscheinlichsten: (i) Im Sommer 2009 könnte die Algenproduktion während den betrachteten drei Monaten überdurchschnittlich gross gewesen sein (mündliche Mitteilung P. Niederhauser); (ii) durch die Erwärmung des Metalimnions wurde dort der Abbau des Algenmaterials erhöht und somit die O_2 -Zehrung erhöht; (iii) durch den Betrieb des Blasenschleiers wurde die O_2 -Bilanz im Metalimnion ungünstig verändert. Da es mit den vorliegenden Daten nicht möglich ist die drei Gründe auseinander zu halten, empfehlen wir künftig die O_2 -Abnahme im Metalimnion, während die Diffusoranlage betrieben wird, im Auge zu behalten.

4 Wirkung der Belüftung

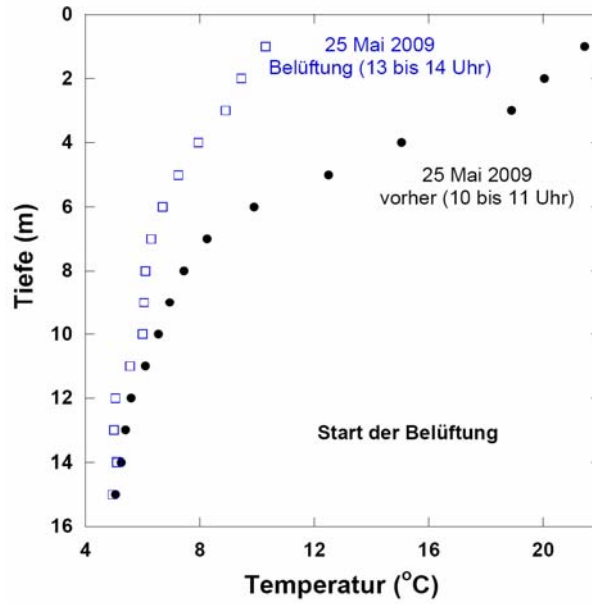
Die Blasenschleier - Luftblasen und Seewasser - stiegen während der gesamten Betriebsdauer bis zur Oberfläche auf. Da das Wasser des Blasenschleiers aus grösserer Tiefe stammt, und somit die Dichte des Wassers höher ist, taucht es unmittelbar wiederum ins Metalimnion ab. Wenige Meter neben dem Blasenfeld ist die Temperatur an der Oberfläche nahezu gleich wie im restlichen See (Beobachtung P. Niederhauser) und Strömungen sind keine zu erkennen. Die Belüftung wirkt sich sowohl auf den Wärmehaushalt (Figuren 5 und 6; Tabelle 4) als auch auf den O₂-Haushalt (Tabelle 5) des Metalimnions aus. Durch den Betrieb der Belüftungsanlage gelangt somit sauerstoffreicheres, aber auch wärmeres Wasser ins Metalimnion.

Für die O₂-Bilanz im Metalimnion wurde ein Blasenschleiermodell (Wüest et al. 1992) verwendet. Als Modellgrössen gehen die Fläche des Diffusors (durch Schläuche horizontal abgedeckte Fläche), der Luftdurchsatz und die Blasengrösse ein. Für die Berechnung des Wasserflusses und der Einschichtung werden die Seeprofile von Temperatur und Salzgehalt verwendet. Für die O₂-Bilanz im Blasenschleier werden die O₂-Profile im See und die Auflösung der Blasen berücksichtigt. Letzteres hängt stark von der unbekanntem Blasengrösse ab. Diese wurde mittels des bekannten Blasenschleierstroms (aus Temperaturmessungen) in 10 bis 15 m Tiefe abgeschätzt.

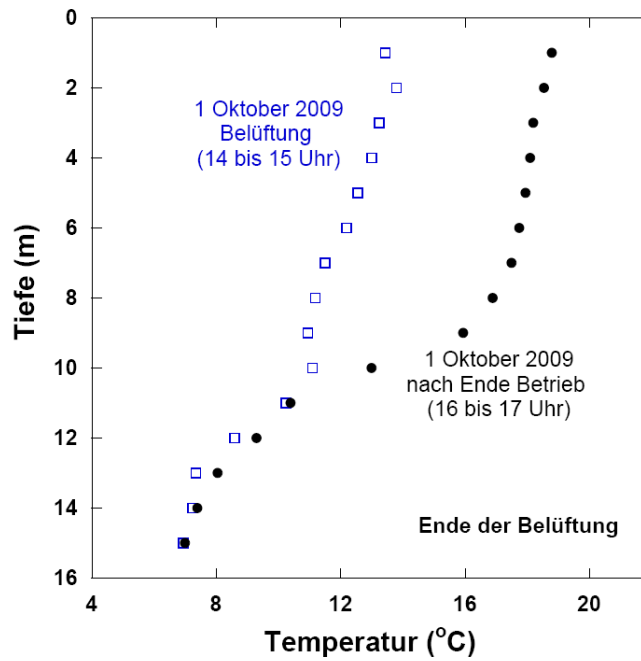
a) Temperatur - Im Bereich der Diffusoren wird durch die Blasenschleier kaltes Wasser aus der Tiefe nachgeliefert. Die Temperatur ist deshalb dort deutlich tiefer. Beim Einschalten der Belüftung am 25. Mai (Figur 5) und beim Ausschalten am 1. Oktober (Figur 6) ist dieser Effekt sehr gut erkennbar. Die Temperatur steigt, respektive sinkt, innerhalb einer Stunde um mehr als 2 °C.

Ohne Belüftungsbetrieb (2000 bis 2008) beträgt die Erwärmung im Metalimnion im Juni / Juli (Tabelle 4) natürlicherweise 0.02 °C d⁻¹ (10 m Tiefe) bis 0.1 °C d⁻¹ (5 m Tiefe). Im Sommer 2009 wurde durch den Betrieb der Belüftungsanlage (Ende Mai bis Ende September) das Metalimnion (5 bis 10 m Tiefe) im Mittel um 0.048 °C d⁻¹ erwärmt (Tabelle 4). Über die 130 Tage Belüftungsdauer entspricht dies einer Temperaturzunahme von ~6 °C. In den Jahren 2000 bis 2008 betrug diese Erwärmung ~5 °C. Der Vergleich zeigt, dass die Erwärmung im Metalimnion gesamthaft leicht angestiegen ist (Zunahme ~20%); die vertikale Struktur hat sich jedoch stark geändert hat.

Die Veränderung des Temperaturhaushalts im Metalimnion entsteht vor allem durch die veränderten Wasserflüsse durch den Blasenschleier. Unterhalb des Metalimnions (10 bis 15 m Tiefe) wird durch den Blasenschleier (12.5 m Tiefe) Seewasser nach oben transportiert und im Fernfeld wärmeres Wasser abgesenkt. Dadurch ergibt sich dort eine massive Erwärmung, welche mit 28 mK d⁻¹ (~3.6 °C) dreimal so hoch ist wie die natürliche Erwärmung von 9 mK d⁻¹ (~1.2 °C; Tabelle 4). In diesem Tiefenbereich (oberes Hypolimnion 10 bis 15 m Tiefe) wird das Wasser somit im Vergleich zum natürlichen Zustand bis Ende der Belüftungsperiode um zusätzlich ~2.5 °C erwärmt. In der oberen Zone (5 m Tiefe) ist die Zunahme der Erwärmung nur gering.



Figur 5 - Veränderung des Temperaturprofils beim Diffusor „Nord“ durch den Blasenschleier. Temperatur unmittelbar vor Beginn des Belüftungsbetriebs (schwarz) und unmittelbar nach Belüftungsbeginn (blau).



Figur 6 - Veränderung des Temperaturprofils beim Diffusor „Nord“ beim Ausschalten des Blasenschleiers. Temperatur während des Belüftungsbetriebs (blau) und unmittelbar nach Betriebsende (schwarz).

Tabelle 4: Erwärmung des Metalimnions (natürlich und Belüftungsbetrieb)

Tiefe	Erwärmung			
	Juni / Juli 2000 bis 2008, na- türlich (mK d ⁻¹)*	Juni / Juli 2009, Belüf- tung (mK d ⁻¹) [†]	25. Mai - 1. Okt 2000 bis 2008 natürlich (mK d ⁻¹)*	Belüftungs- periode 2009 (mK d ⁻¹) [†]
5 m	110 ± 40	17	35 ± 19	16
6 m				31
7 m				49
7.5 m	52 ± 27	85	53 ± 14	56
8 m				63
9 m				72
10 m	18 ± 12	59	22 ± 7	58
11 m				44
12 m				32
12.5 m	8 ± 8	25	9 ± 7	27
13 m				24
14 m				19
15 m	5 ± 5	17	6 ± 2	17
20 m				13
25 m				7

* aus monatlichen Temperatur-Profilen

[†] aus Thermistoren von 1 m bis 15 m Tiefe.

b) Sauerstoffhaushalt - Der O₂-Haushalt im Metalimnion wird durch den Blasenschleier deutlich, jedoch saisonal unterschiedlich beeinflusst. In 10 m Tiefe erzeugen die Diffusoren einen Volumenstrom von ~1.5 m³ s⁻¹ nach oben (Tabelle 6; aus gemessenen Temperaturprofilen berechnet), womit ein O₂-Fluss von ~0.1 t d⁻¹ verbunden ist (Tabelle 5). Zur Kompensation dieses Volumenstroms wird das Metalimnion im Fernfeld abgesenkt. Während des Aufsteigens der Blasen löst sich ~30 bis 60% (Tabelle 6) des O₂ der Blasen im Schleier auf und erzeugt einen Eintrag von ~0.2 t d⁻¹ (26 t, Tabelle 5). Die saisonale Variation der Blasenauflösung von 30% (Frühsommer) bis 60% (Spätsommer) ergibt sich aufgrund des unterschiedlichen O₂-Gehaltes im Schleier. Zudem wird beim Einschichten sauerstoffreicherer Epilimnionwasser ins Metalimnion eingemischt (~0.2 bis 1.2 t d⁻¹, Tabelle 5), wobei die Menge aufgrund der saisonalen Änderungen der Konzentration stark variiert (Tabelle 6). Wiederum wird zur Kompensation Metalimnionwasser zur Oberfläche verdrängt. Gemäss Nettobilanz in Tabelle 5 ergibt sich somit über die 130 Tage Belüftungsbetrieb ein Nettoeintrag von 45 t.

Tabelle 5: Kennzahlen des Belüftungsbetriebes Sommer 2009

Betrieb Belüftungsanlage	
Beginn Lufteintrag	25. Mai 2009
Ende Lufteintrag	01. Okt 2009
Dauer *	130 Tage (3120 Std)
Durchsatz Luft Diffusor 1	$\sim 0.5 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} = \sim 8 \text{ L s}^{-1}$
Durchsatz Luft Diffusor 2	$\sim 0.5 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} = \sim 8 \text{ L s}^{-1}$
Tiefe Lufteintrag	12.5 m Tiefe
Blasengrösse	unbekannt
Metalimnion über 130 Tage (Zusammenfassung Tabellen 6 bis 8)	
O ₂ Lösung Blasenschleier	$\sim 30\%$ (Frühsommer) $\sim 60\%$ (Hochsommer)
Sauerstoffeintrag via Blasen in Schleier	$\sim 0.2 \text{ t d}^{-1} \times 130 \text{ d} = \mathbf{26 \text{ t}}$
Einmischung O ₂ von Epi- ins Metalimnion	~ 0.2 bis 1.2 t d^{-1} (Tabellen 6,7)
Einmischung O ₂ von Hypo- ins Metalimnion †	$\sim 0.1 \text{ t/d}$
Nettoeintrag O ₂ ins Metalimnion während 130 Tagen Belüftungsbetrieb ††	0.3 t d^{-1} für 70 d (21 t) 0.3 bis 1.3 t d^{-1} Anstieg für 30 d (24 t) Eintrag im September (nutzlos)

- * Einen Unterbruch gab es am 16.7.09; jedoch nur für wenige Stunden
 † Wasserfluss des Blasenschleiers nach oben, berechnet aus Wärmebilanz zwischen 10 und 15 m Tiefe
 †† Wasserfluss des Blasenschleiers an Oberfläche; aus Modellrechnungen.

Tabelle 6: Sauerstoffbilanz Metalimnion für Blasenschleier im Mai und August 2009

Blasenschleier am 25. Mai 2009	
Strömung Blasenschleier Q ₁₀ (10 m Tiefe) †	$2 \times 0.75 = 1.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
Strömung Blasenschleier Q ₀ (Oberfläche) ††	$2 \times \sim 3.4 = 6.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
Lufteintrag beide Diffusoren	$2 \times 8 \text{ L s}^{-1} = 16 \text{ L s}^{-1}$
Sauerstoffeintrag Blasen (nominell)	$3.2 \text{ L s}^{-1} = 4.8 \text{ g s}^{-1} = 415 \text{ kg d}^{-1}$
davon in Lösung Blasenschleier	32% (140 kg d^{-1})
Eintrag aus Oberflächenschicht (einschliesslich Blasen)	410 kg d^{-1}
Verlust an Hypolimnion	-20 kg d^{-1}
Nettogewinn O ₂ Metalimnion	390 kg d^{-1}
Max Konzentration im sich einschichtenden Blasenschleier (Metalimnion)	11.8 mg L^{-1}
Blasenschleier am 20. August 2009	
Strömung Blasenschleier Q ₁₀ (10 m Tiefe) †	$2 \times 0.75 = 1.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
Strömung Blasenschleier Q ₀ (Oberfläche) ††	$2 \times \sim 2.7 = 5.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
Lufteintrag beide Diffusoren	$2 \times 8 \text{ L s}^{-1} = 16 \text{ L s}^{-1}$
Sauerstoffeintrag Blasen (nominell)	$3.2 \text{ L s}^{-1} = 4.8 \text{ g s}^{-1} = 415 \text{ kg d}^{-1}$
davon in Lösung Blasenschleier	59% (250 kg d^{-1})
Eintrag aus Oberflächenschicht (einschliesslich Blasen)	1250 kg d^{-1}
Eintrag aus Hypolimnion	$+95 \text{ kg d}^{-1}$
Nettogewinn O ₂ Metalimnion	1350 kg d^{-1}
Max Konzentration im sich einschichtenden Blasenschleier (Metalimnion)	$3.7 \text{ mg L}^{-1} (*)$

- † Wasserfluss des Blasenschleiers nach oben, berechnet aus Wärmebilanz zwischen 10 und 15 m Tiefe
 †† Wasserfluss des Blasenschleiers an Oberfläche; aus Modellrechnungen.

Die O₂-Nettobilanz im Metalimnion variiert saisonal deutlich: Während der Nettoeintrag am 25. Mai nur ~0.4 t d⁻¹ betrug, gelangte am 20. August ~1.4 t d⁻¹ O₂ zusätzlich ins Metalimnion (Tabelle 6). Zeitlich besser aufgelöste Rechnungen zeigen (Tabelle 7), dass der Nettoeintrag bis Ende Juli wenig effektiv ist und der Nutzen der Diffusoranlage nur im August zur Geltung kommt (Tabelle 7). Der Grund liegt an den tiefen Konzentrationen, bei denen leichter O₂ eingebracht werden kann.

c) Sauerstoffeintrag als Funktion von Luftdurchsatz und Diffusortiefe - In Tabelle 8 sind die O₂-Bilanzen für drei Diffusortiefen (10, 12.5 und 15 m) sowie für zwei Luftdurchsätze (8 und 16 L s⁻¹) miteinander verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass mit höherem Luftdurchsatz der Eintrag von O₂ wesentlich verbessert werden kann. Die Tiefenlage der Diffusoren hat dagegen wenig Einfluss, solange sich das Schleierwasser im Metalimnion einschichtet.

Tabelle 7: Sauerstoffbilanz für Blasenschleier während Belüftungsperiode 2009

Blasenschleier am 25. Mai 2009	
Nettoeintrag O ₂ Metalimnion	390 kg d⁻¹
Max O ₂ Konzentration im Eintrag Metalimnion	11.8 mg L ⁻¹
Effizienz Lösung Blasenschleier	32% (140 kg d ⁻¹)
Blasenschleier am 30. Juli 2009	
Nettoeintrag O ₂ Metalimnion	330 kg d⁻¹
Max O ₂ Konzentration im Eintrag Metalimnion	5.4 mg L ⁻¹
Effizienz Lösung Blasenschleier	32% (140 kg d ⁻¹)
Blasenschleier am 10. August 2009	
Nettoeintrag O ₂ Metalimnion	890 kg d⁻¹
Max O ₂ Konzentration im Eintrag Metalimnion	4.8 mg L ⁻¹ (*)
Effizienz Lösung Blasenschleier	59% (250 kg d ⁻¹)
Blasenschleier am 20. August 2009	
Nettoeintrag O ₂ Metalimnion	1350 kg d⁻¹
Max O ₂ Konzentration im Eintrag Metalimnion	3.7 mg L ⁻¹ (*)
Effizienz Lösung Blasenschleier	59% (250 kg d ⁻¹)
Zusammenfassung Metalimnion über 130 Tage	
O ₂ Lösung Blasenschleier	~30% (Frühsommer) ~60% (Hochsommer)
Nettoeintrag O ₂ ins Metalimnion während 130 Tagen Belüftungsbetrieb (Tabelle 5)	0.3 t d ⁻¹ für 70 d (21 t) 0.3 bis 1.3 t d ⁻¹ Anstieg für 30 d (24 t) Eintrag im September (nutzlos)

Tabelle 8: Funktion Blasenschleier für unterschiedliche Tiefen und Luftdurchsätze
Vergleichsbasis 10. August 2009 ($Q_{\text{Luft}} = 8 \text{ L s}^{-1}$ pro Diffusor)

Basis 10. August 2009 (Luftdurchsatz $Q_{\text{Luft}} = 2 \times 8 \text{ L s}^{-1}$; Tiefe = 12.5 m)	
Nettogewinn O_2	890 kg d⁻¹
Max Konzentration im Eintrag	4.8 mg L ⁻¹ (*)
Einschichtung Blasenschleier	7.3 m Tiefe
Effizienz Lösung Blasenschleier	59% (250 kg d ⁻¹)
Luftdurchsatz: $Q_{\text{Luft}} = 2 \times 8 \text{ L s}^{-1}$; Tiefe = 10 m	
Nettogewinn O_2	1300 kg d⁻¹
Max Konzentration im Eintrag	6.7 mg L ⁻¹
Einschichtung Blasenschleier	6.4 m Tiefe
Effizienz Lösung Blasenschleier	40 % (170 kg d ⁻¹)
Luftdurchsatz: $Q_{\text{Luft}} = 2 \times 8 \text{ L s}^{-1}$; Tiefe = 15 m	
Nettogewinn O_2	320 kg d⁻¹
Max Konzentration im Eintrag	2.5 mg L ⁻¹ (*)
Einschichtung Blasenschleier	8.9 m Tiefe
Effizienz Lösung Blasenschleier	64% (270 kg d ⁻¹)
Luftdurchsatz: $Q_{\text{Luft}} = 2 \times 16 \text{ L s}^{-1}$; Tiefe = 12.5 m)	
Nettogewinn O_2	1990 kg d⁻¹
Max Konzentration im Eintrag	6.5 mg L ⁻¹
Einschichtung Blasenschleier	7.1 m Tiefe
Effizienz Lösung Blasenschleier	48% (400 kg d ⁻¹)
Luftdurchsatz $Q_{\text{Luft}} = 2 \times 16 \text{ L s}^{-1}$; Tiefe = 10 m)	
Nettogewinn O_2	1800 kg d⁻¹
Max Konzentration im Eintrag	7.1 mg L ⁻¹ (*)
Einschichtung Blasenschleier	6.4 m Tiefe
Effizienz Lösung Blasenschleier	34% (280 kg d ⁻¹)
Luftdurchsatz $Q_{\text{Luft}} = 2 \times 16 \text{ L s}^{-1}$; Tiefe = 15 m)	
Nettogewinn O_2	1900 kg d⁻¹
Max Konzentration im Eintrag	5.2 mg L ⁻¹ (*)
Einschichtung Blasenschleier	7.7 m Tiefe
Effizienz Lösung Blasenschleier	60% (500 kg d ⁻¹)

d) Schlussfolgerungen aus den Modellrechnungen - Die in den Tabellen 5 bis 8 dokumentierten Modellrechnungen lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

1) Im Mai, Juni und Juli beträgt der Eintrag von O_2 ins Metalimnion nur $\sim 0.3 \text{ t d}^{-1}$. Zu diesem Zeitpunkt wird relativ sauerstoffhaltiges Wasser aus dem Metalimnion verdrängt. Deshalb ist der Nettoeffekt der Belüftung gering (es wird Wasser mit hohen O_2 -Gehalten in Bewegung gehalten ohne grossen Nettogewinn). Der O_2 -Eintrag in den ersten 70 Tagen (bis Ende Juli) ist deshalb mit gesamt 21 t gering (Tabellen 5 und 7). Diese Menge macht nur $\sim 5\%$ des O_2 -Inhaltes im Frühling aus (Figuren 3 und 4).

(2) Der Blasenschleier ist daher vor allem im August wirkungsvoll, weil dann sauerstoffloses Wasser aus dem Metalimnion verdrängt wird. Der O_2 -Eintrag erreicht im Monat August ~ 25 t. Während dieser Zeit werden ~ 90 t gezehrt, so dass es auch dann nur im Bereich der Diffusoren und nicht im gesamten Metalimnion zu einer O_2 -Anreicherung kommen kann. Es ist im Bereich der Diffusoren mit maximalen O_2 -Konzentrationen von ~ 3 bis 5 mg L^{-1} zu rechnen (Tabelle 7). Der Lebensraum für die Felchen wird dadurch erhöht - jedoch können gewünschte Konzentrationen von 4 bis 5 mg L^{-1} nur in bescheidenem und lokal beschränktem Umfang erreicht werden. Der positive Effekt der O_2 -Anreicherung ist im Spätsommer (grösster O_2 -Mangel) im erwarteten Tiefenbereich (6 bis 8 m Tiefe) mit O_2 -Konzentrationen von $\sim 2 \text{ mg L}^{-1}$ gut erkennbar.

(3) Die Belüftung ist im September weitgehend ohne Bedeutung. Zwar wird dann noch immer $\sim 1 \text{ t d}^{-1}$ O_2 eingetragen, doch ist die natürliche Konvektion von der Oberfläche viel bedeutender. So nahm der O_2 -Gehalt in der erste Woche September 2009 um fast 100 t zu. Der Betrieb der Belüftungsanlage während des Sommers begünstigt die Nachlieferung von O_2 im September „indirekt“: Durch die Erwärmung des Metalimnions kommt es jahreszeitlich zu einem früheren Zeitpunkt (d.h. bei einer höheren Oberflächentemperatur) zu einer Vermischung (Konvektion von der Oberfläche).

(4) Der Betrieb der Diffusoranlage ist deshalb nur im Zeitraum von Ende Juli bis Anfang September nutzbringend. Da durch diese zeitliche Einschränkung das Metalimnion über einen viel kürzern Zeitraum erwärmt würde, könnte als Kompensation ein höherer Luftdurchsatz angelegt werden. Bei einer Verdopplung des Luftdurchsatzes von 8 auf 16 L s^{-1} würde der Volumenstrom von Wasser um $\sim 50\%$ und die O_2 Konzentration im Blasenschleier um $\sim 20\%$ erhöht. Der O_2 -Eintrag könnte somit maximal bis $\sim 2 \text{ t d}^{-1}$ erreichen. Die Einschichtungstiefe würde allerdings um ~ 1 m nach oben verschoben.

(5) Die Lage der Diffusortiefe ist nicht kritisch: Bei einer Tiefe von 10 , 12.5 oder 15 m variiert die Einschichtung von 6 bis 8 m Tiefe.

5 Beantwortung der Fragen

Die eingangs gestellten Fragen werden wie folgt beantwortet:

(a) Wie vergleicht sich die Sauerstoff-Abnahme im Metalimnion während des Sommers 2009 mit der entsprechenden Sauerstoff-Abnahmen im vergangenen Jahrzehnt?

Die O₂-Abnahme von April bis August 2009 war mit 3.3 t d⁻¹ nur um 10% über dem Mittelwert des letzten Jahrzehntes von 3.0 t d⁻¹ und somit innerhalb der natürlichen Variabilität gleich. Vergleicht man die Daten nur während der Belüftungsperiode, so war die O₂-Abnahme im Sommer 2009 mit 4.2 t d⁻¹ deutlich über dem Mittelwert (3.0 t d⁻¹) der letzten Jahre. Da durch den Belüftungsbetrieb im Sommer 2009 netto O₂ ins Metalimnion eingetragen wird, ist die direkte Wirkung der Blasenschleier kaum der Grund für die erhöhte O₂-Abnahme. Jedoch könnten sich die Blasenschleier indirekt negativ auf die O₂-Abnahme auswirken, indem Nährstoffe an die Oberfläche gebracht werden und die Temperaturzunahme im Metalimnions die O₂-Zehrung erhöhen könnte. Obwohl wir diese Gründe als unwahrscheinlich einschätzen, sollte die O₂-Bilanz künftig im Auge behalten werden, wenn die Diffusoranlage betrieben wird.

(b) Wie gross ist der Sauerstoffeintrag durch die eingeblasene Luft im Verhältnis zum Eintrag durch Einmischung von Sauerstoff in ~5 m Tiefe?

Bei einem Luftdurchsatz von 2 x 8 L s⁻¹ ergibt sich ein nomineller O₂-Eintrag von 0.42 t d⁻¹ (Tabelle 6). Gemäss Modellrechnungen können wir mit einer Effizienz der Blasenauflösung von 30 bis 60% rechnen. Somit ergibt sich über die 130 Tage der Belüftung ein Eintrag via Blasen von ~26 t. Der wichtigste O₂-Eintrag ins Metalimnion erfolgt in ~5 m Tiefe durch Einmischung von der Oberfläche. Im August wird mit einem Eintrag von ~1.3 t d⁻¹ das Maximum erreicht.

(c) Wie lautet die Sauerstoffbilanz für die Schicht von 5 bis 10 m Tiefe (Zehrung, Eintrag Blasenschleier)?

Die Bilanzgleichung für das Metalimnion (5 bis 10 m Tiefe) lautet wie folgt:

	Pro Tag	in 130 Tagen
O ₂ -Inhalt im Frühling		360 t
O ₂ -Zehrung	-3.0 t d ⁻¹	-390 t
Netto O ₂ -Eintrag Blasenschleier	0.3 bis 1.3 t d ⁻¹	+45 t
O ₂ -Inhalt Ende Sommer		~0 t.

Daraus folgt, dass der O₂-Eintrag nur einen geringen Einfluss auf die O₂-Bilanz hat. Zudem kann die eingetragene Menge an O₂ den O₂-Schwund nicht verhindern.

Die Analyse der Daten erlaubt nicht zwischen dem Nahfeld ($\sim 1 \text{ km}^2$) und der gesamten Metalimnionfläche ($\sim 7 \text{ km}^2$) zu unterscheiden. Aufgrund der hohen O_2 -Zehrung und des geringen O_2 -Eintrags können wir jedoch schliessen, dass der eingetragene O_2 im Nahfeld aufgezehrt wird.

(d) Erlaubt die Interpretation der Messwerte vom Betriebssommer 2009 die Auswirkung der Belüftungsanlage und der damit verknüpften Vorgänge zu verstehen?

Die Beobachtungen sind ausreichend und es können drei klare Schlüsse gezogen werden:

(1) Über den Diffusoren sind die Wassertemperaturen deutlich tiefer. Damit wissen wir, dass sich das Wasser des Blasenschleiers ins Metalimnion einschichtet. Ein Teil des Schleierwassers stammt aus dem Hypolimnion von unterhalb 12.5 m Tiefe (Menge bestimmt aus der Erwärmung des Seewassers).

(2) Durch den Betrieb der Diffusoranlage wird das Metalimnion erwärmt. Die Daten erlauben abzuschätzen, wie diese Erwärmung limitiert werden kann.

(3) Die Beobachtungen erlauben Schlüsse, wann die Belüftung effektiv und wann sie unwirksam ist und bloss zu unerwünschter Erwärmung des Metalimnions beiträgt.

(e) Welche betrieblichen Verbesserungen bestehen (Leistung, Tiefenbereich, Zeitraum des Betriebes, weitere Überlegungen)?

Der O_2 -Eintrag ins Metalimnion ist nicht besonders sensitiv auf die Tiefenlage der Diffusoren, solange ein Bereich von 10 bis 15 m Tiefe eingehalten wird. Vor Mitte Juli und nach Anfang September ist der Betrieb praktisch wirkungslos (siehe f). Da die Blasenschleier das Metalimnion erwärmen, sollte in diesem Zeitraum die Anlage nicht betrieben werden. Dafür kann im August, wenn der Eintrag viel effektiver ist, mit der doppelten Luftmenge $\sim 50\%$ mehr O_2 eingetragen werden.

(f) Ab welchem Zeitpunkt im Jahr sollen die Diffusoren betrieben werden?

Die Wirkung der Belüftung ist dann gross, wenn im Metalimnion der O_2 -Gehalt gering ist. Wie die Tabellen 6 und 7 zeigen, ist der Betrieb vor dem 15. Juli und nach Anfang September weitgehend wirkungslos. Ab 10. September 2009 war die Belüftung unnötig, da ab diesem Zeitpunkt genügend O_2 durch Konvektion von oben ins Metalimnion eingemischt wurde.

Da durch einen höheren Luftdurchsatz deutlich mehr O_2 -Eintrag erreicht wird, empfehlen wir, falls die Anlage weiter betrieben wird, sich auf die Zeit von Mitte Juli bis Anfang September zu beschränken und dafür mit einem höheren Durchsatz zu fahren.

6 Fazit

(1) Der erste Betriebssommer wurde hervorragend dokumentiert und die Entwicklung der Schichtung, einschliesslich des O_2 , detailliert überwacht. Mit diesen Informationen sind klare Aussagen möglich.

(2) Der O_2 -Eintrag ins Metalimnion durch die Diffusoranlage ist nur im Monat August effizient. Vor Mitte Juli und nach Anfang September ist die Diffusoranlage für dieses Ziel weitgehend wirkungslos.

(3) Der Betrieb der Diffusoranlage führt zu einer Erwärmung des Metalimnions. Zusammen mit (2) sollte deshalb der Schluss gezogen werden, die Belüftung vor Mitte Juli nicht zu betreiben.

(4) Der O_2 -Eintrag vermag die hohe O_2 -Zehrung im Metalimnion nicht zu kompensieren. Aus diesem Grund ist die Anreicherung mit O_2 weitgehend auf den Bereich nahe der Diffusoranlage und auf den Monat August beschränkt.

(5) Die Wahl des Tiefenbereichs für die Diffusoren ist nicht besonders kritisch. Es ist nicht nötig, die gewählte Tiefe von 12.5 m zu ändern.

(6) Falls die Diffusoranlage erlaubt, den Luftdurchsatz zu erhöhen, so kann damit der O_2 -Eintrag im August deutlich gesteigert werden.

(7) Es werden keine wesentlichen ökologischen Veränderungen erwartet; umgekehrt jedoch ist der ökologische Gesamtnutzen der Anlage limitiert. Da die O_2 -Abnahme im Juni/Juli 2009 besonders gross war, sollte die O_2 -Bilanz auch künftig während dem Betrieb der Diffusoranlage kritisch im Auge behalten werden.

7 Referenzen

- BUWAL (1994)*. Der Zustand der Seen in der Schweiz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 237. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern.
- Matzinger, A., B. Müller, M. Schmid, J. Little, R. Stierli, A. Zwysig and A. Wüest (2008)*. Zirkulationsunterstützung im Türlensee und Pfäffikersee. Evaluation von Betrieb und Messprogramm. Eawag Bericht 2008, 70 S., Eawag, Kastanienbaum, Schweiz.
- Matzinger, A., B. Müller, P. Niederhauser, M. Schmid, and A. Wüest (2010)*. Hypolimnetic oxygen consumption by sediment-based reduced substances in former eutrophic lakes. *Limnol. Oceanogr.* im Druck
- Moosmann, L., M. Sturm, B. Müller, and A. Wüest (2003)*. 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.
- Moosmann, L., D. F. McGinnis, H. R. Bürgi, R. Müller, and A. Wüest (2004)*. Machbarkeitsstudie zur Erweiterung des Lebensraums für Felchen im Greifensee. Bericht im Auftrag der Baudirektion Kanton Zürich (AWEL), Eawag, 53 S., Kastanienbaum, Schweiz.
- Moosmann, L., D. F. McGinnis, and A. Wüest (2005)*. Beurteilung der Projektidee: Belüftungsanlage im Metalimnion des Greifensees. Bericht im Auftrag der Baudirektion Kanton Zürich (AWEL), Eawag, 9 S., Kastanienbaum, Schweiz.
- Niederhauser, P., B. Känel, W. Meier, W. Labhart, K. Nyffenegger und C. Balsiger (2006)*. Wasserqualität der Seen, Fließgewässer und des Grundwassers im Kanton Zürich. Statusbericht 2006, AWEL Zürich.
- Wüest, A., N.H. Brooks and D.M. Imboden (1992). Bubble plume modeling for lake restoration. *Water Resources Res.* **28**: 3235-3250.

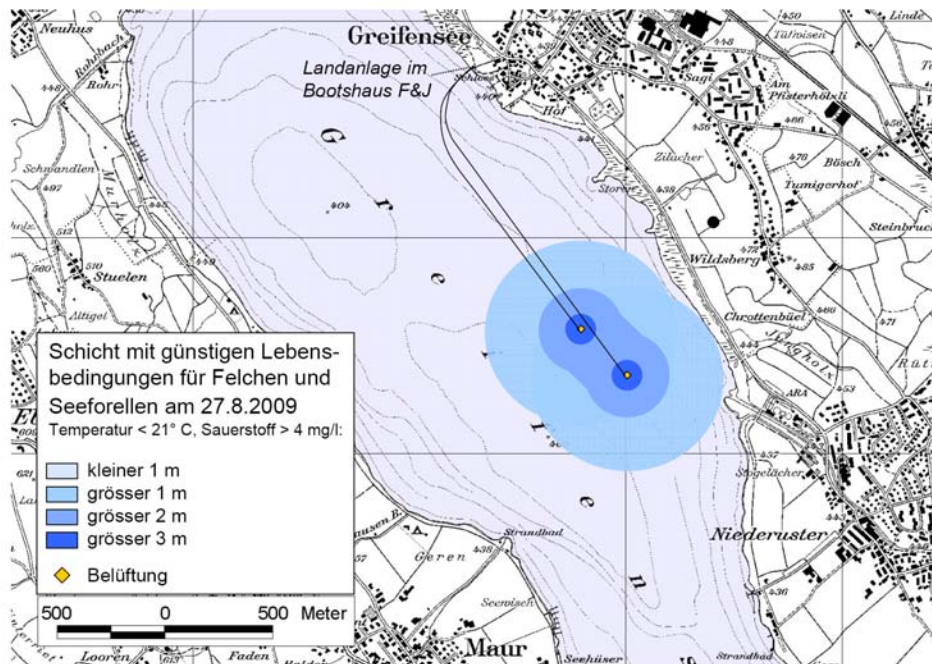
8 Anhang

A) Diffusorschlauch zur Freisetzung der Luftblasen in 12.5 m Tiefe



Figur A1 - Montage des Diffusorschlauches an der Diffusoreinheit Tanytarsus. Tiefe = 12.5 m. Eigenschaften des Schlauches: 40 m Länge, 3000 Poren/m. Durchmesser des Kreuzes: ~5 m. <http://www.hans-grassl.com>.

B) Position der beiden Diffusoreinheiten



Figur A2 - Position der Belüftungsschleier (gelbe Vierecke) im Greifensee. Figur gemäss Awel 2009.

C) 49 in Seemitte gemessen Vergleichsprofile der Temperatur in 2009

(Vergleichsprofile der Thermistoren (Diffusoren) mit den gemessenen Profilen an der tiefsten Stelle)

Mai 2009 (5 Profile)	Juni 2009 (12 Profile)	Juli 2009 (15 Profile)	August 2009 (12 Profile)	September 2009 (5 Profile)
25.05.2009	03.06.2009	01.07.2009	03.08.2009	02.09.2009
26.05.2009	05.06.2009	03.07.2009	05.08.2009	04.09.2009
27.05.2009	08.06.2009	06.07.2009	07.08.2009	07.09.2009
28.05.2009	10.06.2009	08.07.2009	10.08.2009	10.09.2009
29.05.2009	12.06.2009	09.07.2009	12.08.2009	15.09.2009
	15.06.2009	10.07.2009	14.08.2009	
	17.06.2009	14.07.2009	17.08.2009	
	19.06.2009	16.07.2009	19.08.2009	
	23.06.2009	17.07.2009	21.08.2009	
	25.06.2009	20.07.2009	24.08.2009	
	29.06.2009	21.07.2009	26.08.2009	
	30.06.2009	23.07.2009	31.08.2009	
		24.07.2009		
		28.07.2009		
		30.07.2009		

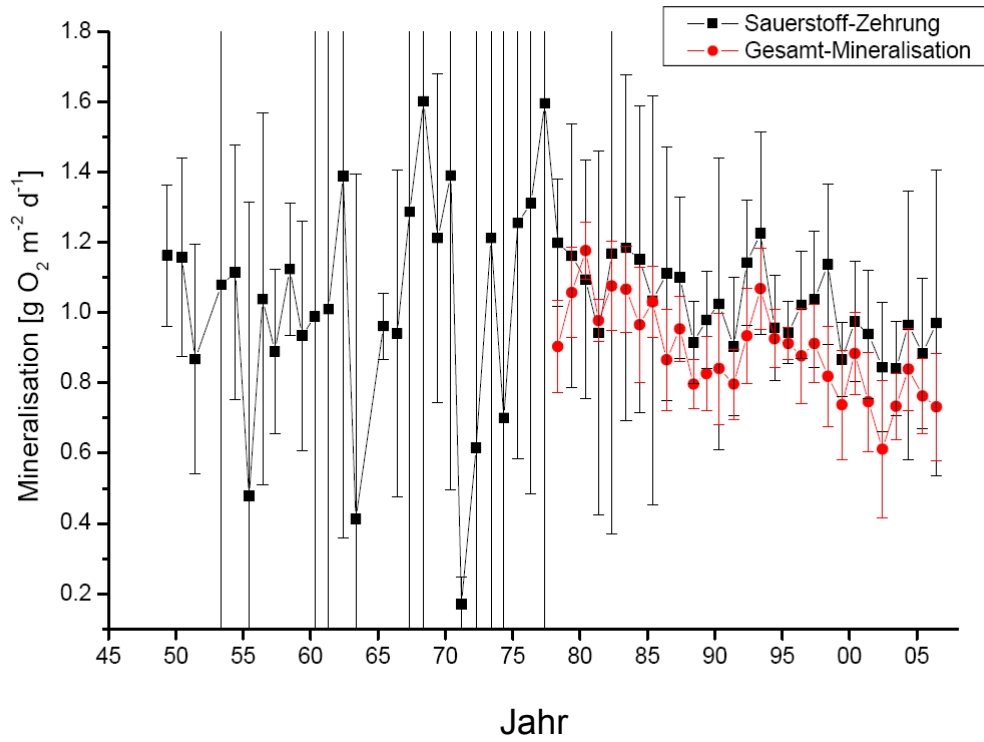
D) Temperaturänderung beim Einschalten der Diffusoren am 25. Mai 2009

vorher (bis 11 Uhr)	5 m	6 m	7 m	8 m	9 m	10 m	11 m	12 m	13 m	14 m	15 m
Temp (°C)	12.6	10.4	8.5	7.7	7.2	6.7	6.2	5.7	5.5	5.3	5.1
nachher (ab 12 Uhr)											
Temp (°C)	7.6	7.2	7.1	6.8	6.7	6.6	6.3	5.3	5.2	5.2	5.0

E) Temperaturänderung beim Ausschalten der Diffusoren am 1. Oktober 2009

vorher (bis 15 Uhr)	5 m	6 m	7 m	8 m	9 m	10 m	11 m	12 m	13 m	14 m	15 m
Temp (°C)	12.2	11.9	11.4	11.1	10.8	11.3	10.4	8.5	7.3	7.2	6.9
nachher (ab 16 Uhr)											
Temp (°C)	18.0	17.8	17.5	16.8	16.0	13.2	10.4	9.1	7.8	7.3	6.9

F) Sauerstoff Zehrung Hypolimnion Greifensee 1950 bis 2007

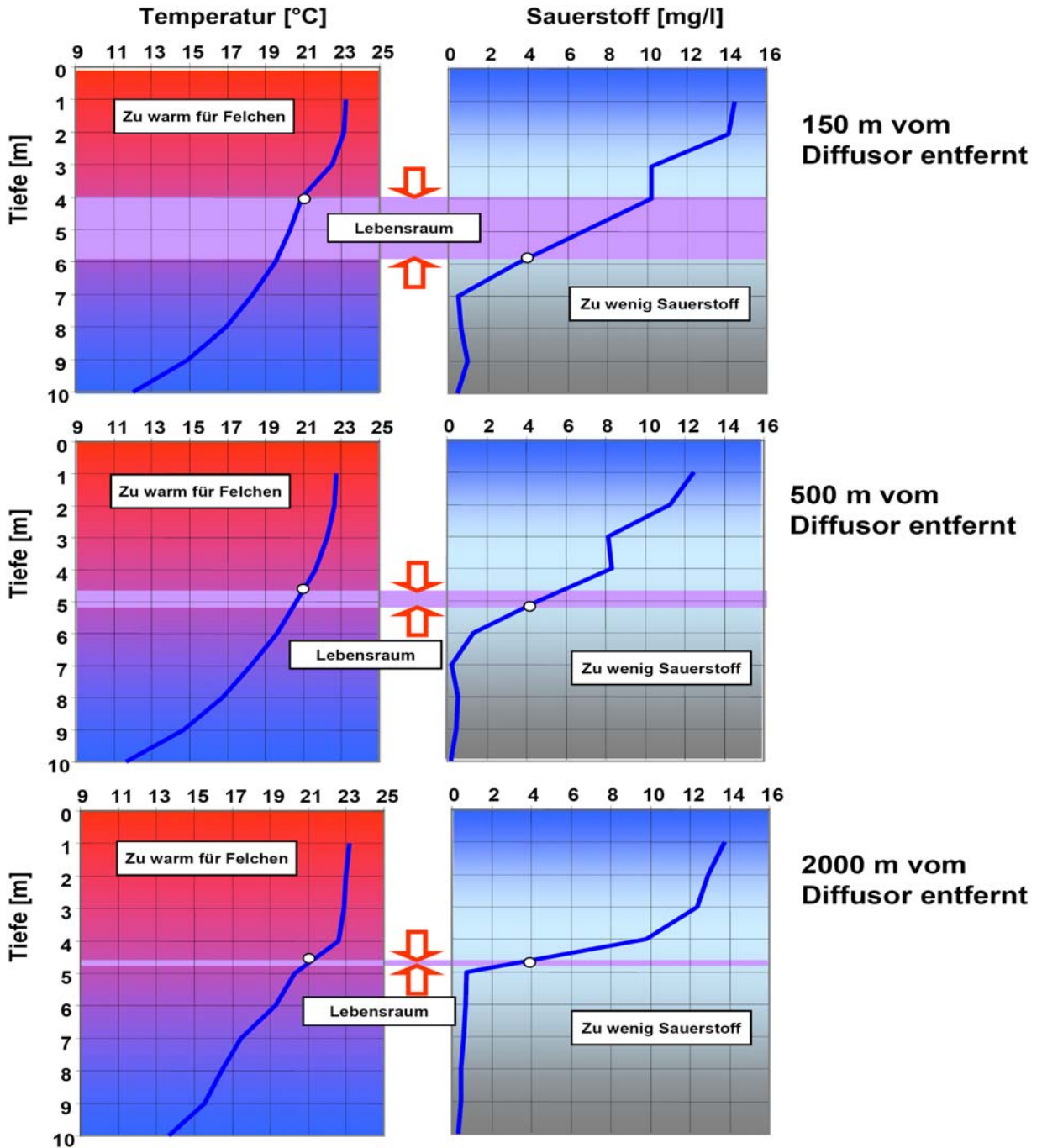


Figur A3 - O₂-Zehrung (schwarz) und Gesamtmineralisation (rot; als O_{2,theor}) von Frühjahr bis Herbst im Tiefenwasser (10 bis 32 m) des Greifensees. Der Grund für Mineralisation < Zehrung von 1978 bis heute liegt bei unterschiedlichen Zeiträumen für die lineare Regression (geringfügiger Artefakt).

G) Ereignisprotokoll Belüftung Greifensee

Datum	Zeit	Leistung [Nm ³ /min ⁻¹]		Druck [bar]		Betriebs- stunden Kompressor	Ereignis / Arbeit
		Diffusor 1	Diffusor 2	Diffusor 1	Diffusor 2		
25.05.09		0.20	0.20				Abnahme und Inbetriebnahme
28.05.09	09:00	0.20	0.20	2.5	2.2	97.7	Werte vor Probenahme abgelesen
28.05.09	13:35	0.30	0.30	3.2	2.7		neue Einstellung
03.06.09	13:00	0.30	0.30	3.0	2.5		Werte vor Probenahme abgelesen
03.06.09		0.40	0.40	3.0	2.5		neue Einstellung; 15:20 Uhr
08.06.09	08:50						Tel E. Jungo: Verbindung bei Ölfilter war leck; sollte bereits behoben sein
10.06.09	08:45	0.37	0.37	3.4	2.8	404.3	Werte vor Probenahme abgelesen
10.06.09	09:00	0.40	0.40	3.4	2.8		Korrektur auf gewünschte Leistung; Leitung bei Ölfilter i.O.
15.06.09	09:15	0.40	0.40	3.6	2.8		Markierungsboje bei Diffusor 2 verliert Luft; Info Jungo
25.06.09	09:30	0.35	0.40	3.7	2.9		Markierungsboje bei Diffusor 2 wurde ausgewechselt. Diffusor 1 konnte Leistung nicht halten
25.06.09	12:00	0.45	0.50	3.8	3.2	767.1	Diffusor 1 bringt keine höhere Leistung!
26.06.09	12:45	0.42	0.50	3.9	3.2		
26.06.09	13:30	0.42	0.60	3.8	3.2		
03.07.09	08:00	0.42	0.56	3.8	3.3	958.3	
03.07.09	11:45	0.45	0.60	3.7	3.2		
13.07.09	08:30	0.41	0.58	3.9	3.4		Diffusor 1 bringt keine höhere Leistung!
13.07.09	12:05	0.41	0.58	3.8	3.4	1199	Beim Kompressor 4.7 Bar; 83° C Kompressor hat abgestellt; Neustart 10:10;
16.07.09	10:40	0.42	0.60	3.7	3.4		Tel. Jungo; Längle hat Leistung des Kompressors erhöht und Anlage neu auf 0.6/0.6 eingestellt
21.07.09	10:00	0.60	0.60				
23.07.09	08:00	0.58	0.62	4.2	3.5		
23.07.09	10:35	0.45	0.45	3.8	3.0	1435	Kompressor 5.6 Bar; 83° C; 73%
30.07.09	08:15	0.45	0.45	3.8	3.0		
20.08.09	08:25	0.45	0.45	3.9	3.2	2112	Kompressor 5.6 Bar; 85° C; 67%; "Oelfilter wechseln"
28.08.09	11:40	0.45	0.45	3.9	3.2	2276	Kompressor 5.5 Bar; 83° C; 67%; "Oelfilter wechseln"
01.10.09	14:15	0.45	0.45	4.0	3.2	3119	Kompressor 5.5 Bar; 82° C; 65%; "Oelfilter wechseln"; Anlage abgestellt!

H) Sauerstoffverteilung im Greifensee am 27. August 2009



Figur A4 - Lokale Wirkung der Belüftungsschleier im Greifensee. Figur gemäss AWEL 2009.