



Kürzere Phasen der Zirkulation verzögern die Gesundung des Greifensees

Die Wassertemperaturen im Greifensee steigen an. Die Zirkulationsphase im Winter wird immer kürzer. Dadurch erhöht sich die Rücklösung von Phosphor aus dem Sediment, was die Eigendüngung verstärkt.

Steigende Phosphorbelastung von 2014 bis 2017

Zwischen 2014 und 2017 wurde der langjährige Trend hin zu tieferen Phosphorkonzentrationen mehrere Jahre in Folge deutlich unterbrochen. Die mittlere Konzentration von Gesamtphosphor nahm von 52 auf 80 µg P/I zu und war damit ähnlich hoch wie Mitte der 1990er-Jahre. Untersuchungen zeigten, dass es in diesem Zeitraum zu keinem erhöhten Phosphoreintrag aus ARA in den See gekommen ist. Auch aus den Einzugsgebieten der beiden wichtigsten Zuflüsse, der Ustermer Aa und dem Aabach Mönchaltorf, wurde nicht mehr Phosphor eingetragen. Woher also stammt der zusätzliche Phosphor? Eine weitere mögliche Phosphorquelle befindet sich im See selbst. Durch den Abbau von absterbenden Algen wird Phosphat freigesetzt. Solange am Seegrund Sauerstoff vorhanden ist, reagiert das Phosphat mit Eisenverbindungen zu schwerlöslichem Eisenphosphat. Ist der Sauerstoff am Seegrund aufgebraucht, löst sich das Eisenphosphat auf, und Phosphat gelangt vom Sediment zurück ins Wasser. Zusätzlich wird aus der auf den Seegrund absinkenden Biomasse Phosphat freigesetzt. Dies bedeutet, dass trotz Reduktion des Eintrags in den See Phosphor im Überschuss vorhanden ist. Je länger die Phase der Rücklösung ist, desto höher wird deshalb die Phosphatkonzentration im Tiefenwasser, bis sie, nach erfolgter Vollzirkulation, im gesamten See wieder ausgeglichen ist.

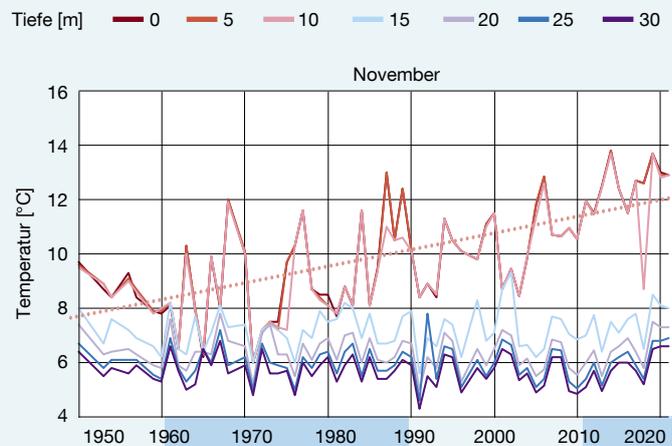
Start der Zirkulation im Winter verzögert sich

Der beobachtete Anstieg zwischen 2014 und 2017 dürfte die Folge kurzer Zirkulations- und langer Stagnationsphasen gewesen sein. Aufgrund der monatlichen Probenahmen kann die jeweilige Dauer nicht genau ermittelt, aber aufgrund der Temperaturprofile ihre relative Länge abgeschätzt werden. Die Dauer der Stagnationsphase ist umso länger, je grösser der Temperaturunterschied zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser ist.

Temperaturen an der Oberfläche steigen markant an

Die Temperatur im Oberflächenwasser ist im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990 deutlich angestiegen, während sie sich im Tiefenwasser kaum veränderte. Die deutlichste Erwärmung wurde dabei im November gemessen. Die erhöhte Temperatur des Oberflächenwassers im Herbst dürfte dazu geführt haben, dass die Zirkulationsphase in den letzten Jahren deutlich später eingesetzt hat als in früheren Jahrzehnten und folglich länger Phosphor aus dem Sediment rückgelöst werden konnte. Die Trendumkehr der Phosphorkonzentrationen im Winter 2017/2018 ist auf mehrere Stürme mit Orkanstärke zurückzuführen, welche die Zirkulation stark begünstigten.

Monatlich gemessene Wassertemperaturen in verschiedenen Tiefenstufen



1961 bis 1990

Tiefe [m]	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
0	3.4	3.4	4.6	8.6	14.4	19.8	22.1	22.0	18.5	14.1	9.1	5.6
5	3.5	3.5	4.2	7.1	11.5	15.4	17.5	19.0	17.3	13.8	9.1	5.6
10	3.6	3.5	4.1	5.9	7.5	8.6	9.2	9.7	10.0	11.0	8.9	5.6
15	3.7	3.6	4.0	5.3	6.2	6.7	7.0	7.2	7.3	7.3	7.2	5.6
20	3.9	3.6	4.0	5.0	5.5	6.0	6.3	6.4	6.6	6.4	6.5	5.5
25	4.0	3.7	3.9	4.8	5.3	5.7	5.9	6.1	6.1	6.1	6.0	5.4
30	4.0	3.8	3.9	4.7	5.0	5.4	5.6	5.8	5.8	5.8	5.8	5.4

2011 bis 2021

Tiefe [m]	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
0	5.3	4.3	4.3	9.4	12.9	19.1	23.0	23.6	20.6	16.8	12.6	7.9
5	5.3	4.3	4.3	7.0	11.6	15.9	20.1	20.7	19.6	16.8	12.6	7.9
10	5.3	4.3	4.3	6.0	7.9	8.7	9.4	9.8	11.8	13.0	12.2	7.9
15	5.3	4.3	4.2	5.5	6.1	6.3	6.7	6.9	7.2	7.3	7.5	7.5
20	5.3	4.4	4.2	5.2	5.6	5.8	6.0	6.1	6.4	6.5	6.6	6.7
25	5.3	4.4	4.3	5.0	5.3	5.5	5.7	5.8	6.0	6.1	6.1	6.2
30	5.3	4.5	4.4	4.9	5.1	5.3	5.5	5.6	5.8	5.8	5.8	5.9

Differenz der Monatsmittelwerte 2011–2021 zur Periode 1961–1990

Tiefe [m]	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
0	1.9	0.9	-0.2	0.9	-1.5	-0.7	0.9	1.6	2.1	2.8	3.5	2.3
5	1.7	0.8	0.1	-0.1	0.1	0.5	2.6	1.8	2.3	3.1	3.5	2.3
10	1.7	0.8	0.2	0.1	0.4	0.1	0.1	0.1	1.9	2.0	3.3	2.3
15	1.6	0.8	0.2	0.2	-0.1	-0.4	-0.3	-0.4	-0.1	0.1	0.3	1.8
20	1.4	0.7	0.2	0.2	0.0	-0.2	-0.2	-0.3	-0.2	0.0	0.1	1.2
25	1.4	0.7	0.3	0.2	0.0	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	0.0	0.0	0.8
30	1.3	0.7	0.5	0.2	0.1	-0.1	-0.2	-0.2	0.0	0.0	0.1	0.5

Durch die erhöhte Temperatur des Oberflächenwassers im Herbst setzt die Zirkulationsphase deutlich später ein als in früheren Jahrzehnten.

Die Dauer und Intensität der Zirkulationsphase ist von verschiedenen Faktoren abhängig, die in komplexer Weise zusammenwirken.

Faktoren, welche die Zirkulation im See begünstigen (+) oder behindern (-)

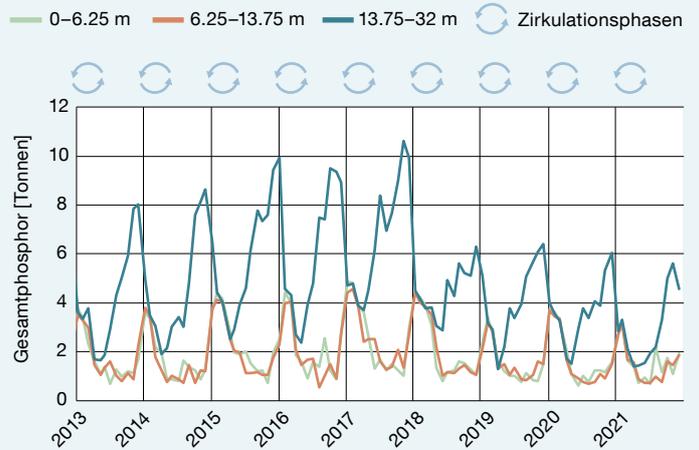
- +** starke Winde zu Beginn und während der Zirkulationsphase
- +** später Frühlingsbeginn mit kühlem, unbeständigem Wetter
- +** früher Herbsteinbruch mit kühlen Temperaturen
- früher Frühlingsbeginn mit hohen, stabilen Temperaturen
- langer Spätsommer mit hohen Temperaturen
- Eisdecke im Winter

Sedimente verzögern die Gesundung des Sees

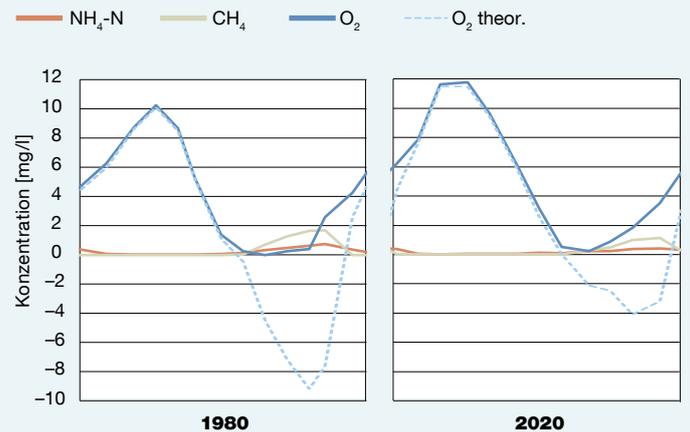
Wie bereits erwähnt, wird während der Stagnationsphase im Tiefenwasser und am Seegrund durch den Abbau von abgestorbener Biomasse im Wasser der Sauerstoff aufgezehrt. Wenn kein Sauerstoff mehr vorhanden ist, verwenden die Mikroorganismen für den Abbau andere Oxidationsmittel wie Nitrat oder Sulfat, und es kommt zur Bildung von Nitrit, Ammonium, Schwefelwasserstoff und Methan. Sobald mit einsetzender Zirkulation Sauerstoff zugeführt wird, werden diese reduzierten Stoffe wiederum oxidiert. Aus den gemessenen Sauerstoffwerten und den Konzentrationen der reduzierten Verbindungen lässt sich die theoretische Sauerstoffkonzentration berechnen, die auch negative Werte annehmen kann. Zwischen April und Oktober zeigt diese Grösse meist eine lineare Abnahme. Berücksichtigt man noch das Volumen des Tiefenwassers, kann man aus der Abnahme pro Zeiteinheit die Sauerstoffzehrung pro Flächeneinheit berechnen.

Die Chlorophyllwerte haben gezeigt, dass die jährliche Algenbiomasse in den letzten 40 Jahren knapp halbiert wurde. Die Sauerstoffzehrung zeigt für den gleichen Zeitraum zwar auch eine abnehmende Tendenz, jedoch in wesentlich geringerem Ausmass. Grund dafür sind die Ablagerungen von Biomasse im Sediment, die durch fortschreitende Abbauprozesse weiterhin Sauerstoff zehren respektive reduzierte Verbindungen freisetzen. Eine neue Studie der EAWAG hat gezeigt, dass eine deutliche Abnahme der Sedimentzehrung erst bei Gesamtphosphorwerten unter 18 µg P/l zu erwarten ist [7].

Gesamtphosphormenge in verschiedenen Tiefenbereichen



Mittlere Konzentrationen von Ammonium, Methan, Sauerstoff und berechnete theoretische Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser für die Jahre 1980 und 2020



Entwicklung der Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser

