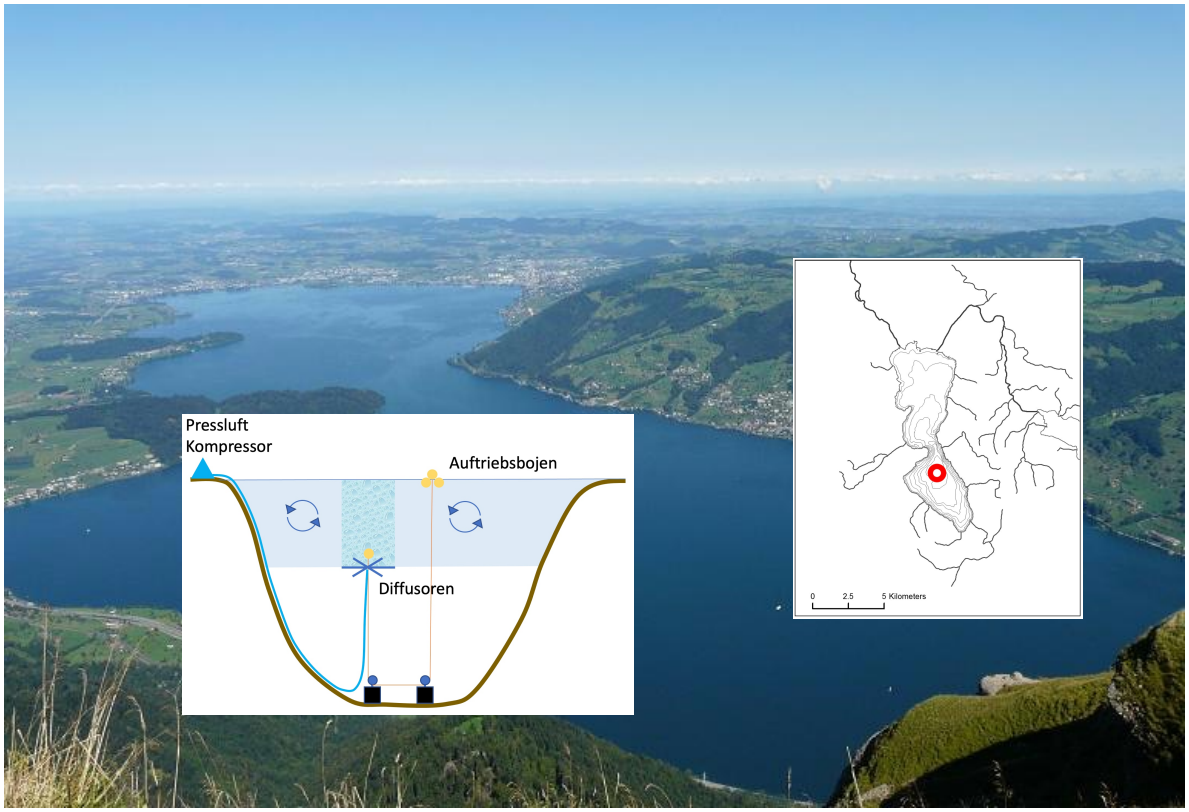
Auswirkungen der Zirkulationsunterstützung

(Beurteilung see-interner Massnahmen zur beschleunigten Sanierung des Zugersees)



Beat Müller, Alfred Wüest, Martin Schmid,

David Janssen und Nicola Sperlich

Eawag – Das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs

Kastanienbaum, April 2022

1 Anlass und Ziel dieses Berichts

Im Bericht '*Beurteilung see-interner Massnahmen zur beschleunigten Sanierung des Zugersees*' (Müller, Gaudard und Wüest, 2019) haben wir verschiedene Vorschläge unterbreitet, mit welchen technischen Massnahmen der hohe Phosphor (P)-Gehalt im See herabgesetzt werden könnte. Dabei resultierte die winterliche Zirkulationsunterstützung (ZU) als empfohlene Variante, weil sie den P-Gehalt im See effektiv vermindern und gleichzeitig den Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser verbessern kann, und im Vergleich zu einer Tiefenwasserableitung die Temperatur in der Lorze nicht verändert und einen deutlich geringeren technischen und Kosten-Aufwand verursacht.

In der Beantwortung des Postulats der Fraktion 'Alternative - die Grünen', betreffend nachhaltige Gesundung des Zugersees, legte das Amt für Umwelt (AFU) dar, dass zur Erreichung dieses Ziels neben see-externen auch see-interne Massnahmen erforderlich sind und verwies auf die von Eawag und AFU favorisierte ZU. Im Mitbericht zur Beantwortung des Postulats äusserten das Tiefbauamt Abt. Wasserbau (TBA), das Amt für Raum und Verkehr (ARV) sowie das Amt für Wald und Wild (AFW) folgende Bedenken zur winterlichen ZU:

- Die durch den Betrieb der ZU ausgelöste Steigerung der biologischen Produktion im Epilimnion ('Algenwachstum') könnte die Schilfschutz- und Schilfansiedlungsprojekte am Zugersee gefährden.

- Die durch den Betrieb der ZU ausgelöste Nährstoffmobilisierung könnte zur Nährstoffanreicherung der Böden in den Naturschutzgebieten entlang des Zugersees und entlang der Lorze führen.

- Die durch den Betrieb der ZU geförderte Mischung im Winterhalbjahr könnte den Fischbestand (insb. Felchen als Speisefisch) beeinträchtigen.

Am 30. März 2022 fand am AfU in Zug eine gemeinsame Aussprache und Diskussion aller Beteiligten statt. Die vorliegende Stellungnahme gibt ergänzende Erklärungen zum Projekt der winterlichen ZU, beschreibt die prinzipielle Vorgehensweise und fasst die Veränderungen des Lebensraums See sowie die zu erwartenden Veränderungen der P-Konzentrationen im See und in der Lorze zusammen.

2 Winterliche Zirkulationsunterstützung des Zugersee Südbeckens

Das Tiefenwasser im Südbecken des Zugersees ist heute permanent dichtegeschichtet, d.h. die winterliche Mischung und der damit verbundene Austausch mit der Atmosphäre findet nicht bis in maximale Tiefe statt. Das hat zur Folge, dass sich Nährstoffe und gelöste Salze im Tiefenwasser anreichern und eine während besonders kalten Wintern mögliche Durchmischung zusätzlich erschweren. Das Tiefenwasser ist deshalb sauerstofffrei und erlaubt keine höheren Organismen.

Die winterliche Mischung durch Abkühlen des Oberflächenwassers fand in den letzten Jahrzehnten – je nach Lufttemperaturen – meist nur bis in Tiefen von 40-80 m statt (Schwefel et al., 2019). Dabei wird entsprechend der Mischungstiefe P aus dem grossen Reservoir des Tiefenwassers in die produktive Zone (oberste 15 m) hinaufgemischt. Der Phosphor in der Oberflächenschicht stammt hauptsächlich aus dem Tiefenwasser und nur zu einem kleineren Teil aus Zuflüssen und Atmosphäre. Obwohl die P-Konzentration im See seit Beginn der 1980er Jahre um ca. 60 % abgenommen hat, wird der grosse Vorrat im Tiefenwasser nur langsam eliminiert und stagniert heute wegen der ungenügenden winterlichen Mischung fast vollständig.

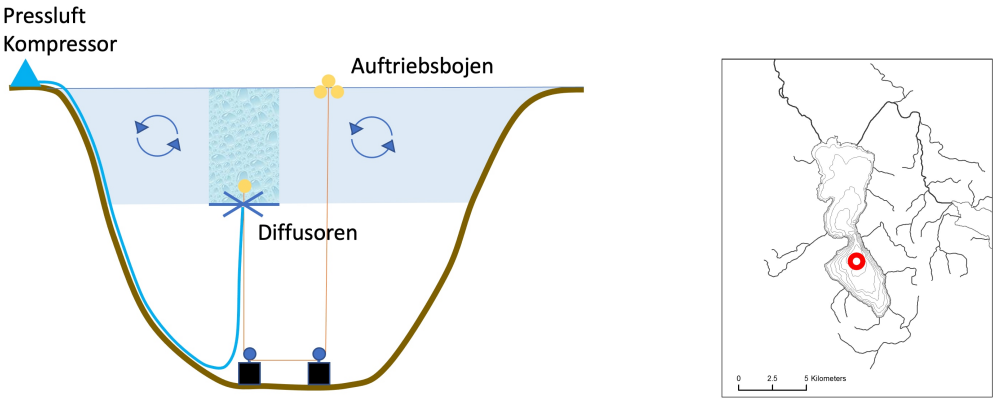
Durch Erzwingen einer stufenweise jährlich zunehmenden Mischungstiefe könnte der Phosphor-Vorrat im Tiefenwasser über einen längeren Zeitraum in die Oberflächenzone gemischt und durch den Abfluss der Lorze aus dem See entfernt werden. Das hätte zur Folge, dass nach einigen Jahren mit - im Vergleich zu heute - leicht erhöhter P-Konzentration diese anschliessend in der produktiven Zone und im Abfluss abnimmt. Langfristig und in Kombination mit see-externen Massnahmen könnte der See zu einer mittleren Produktion geführt werden, welche den Vorgaben der Gewässerschutzgesetzgebung des Bundes genügt.

Charakterisierung der Prozesse, detaillierte Zahlen und weiterführende Literatur sind in den beiden Eawag-Gutachten von 2016 und 2019 angegeben.

3 Prinzipielle Realisation der Zirkulationsunterstützung

Wie oben erwähnt, wird das Oberflächenwasser des Sees aktuell während des Winters nur bis in eine Tiefe von 40-80 m gemischt. Durch den Einsatz von Blasenschleiern kann die Mischung der Oberflächenschicht unterstützt und verstärkt werden. Dabei wird durch Diffusoren, die in einer bestimmten Tiefe im See positioniert sind, mit Hilfe von Kompressoren grobblasig Luft gepresst (siehe Figur 1, links). Die aufsteigenden Luftblasen erzeugen eine Strömung bis zur Oberfläche des Sees, welche die Zirkulation im Winter unterstützt. Vom Wind angetriebene horizontale Diffusion und Strömungen stellen sicher, dass der aus dem Tiefenwasser in die Oberflächenschicht beförderte Phosphor über den gesamten See verteilt wird.

Die Diffusoren werden im Bereich der tiefsten Stelle des Südbeckens angebracht (Figur 1 rechts, mit einem roten Ring markiert). Die Wassersäule des Südbeckens wird in den Wintermonaten durch geeignete Tiefen-Positionierung der Diffusoren kontrolliert gemischt (Figur 1, links): Im ersten Jahr z.B. die obersten 80 m, was keinen relevanten Unterschied zur aktuellen Mischung macht, anschliessend jeden Winter 10 bis 20 m tiefer, so dass nach 6 bis 12 Jahren die ganze Wassersäule durchmischt wird. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass die resultierende P-Konzentration in der gemischten Oberflächenschicht vorausberechnet und ggf. angepasst werden kann. Eine Anpassung kann nötigenfalls auch kurzfristig während eines Winters vorgenommen werden. Die Wirkung der ZU entspricht dem Effekt von zunehmend kälteren Wintern, die in ihrer Wirkungsweise ebenfalls die Mischungstiefe erhöhen würden. Während unter natürlichen Wetterbedingungen die Mischungstiefe von Winter zu Winter variiert, erzeugt die ZU eine voraussehbare (bekannte) Vermischung bis hin zur vollständigen Mischung des Sees nach einigen Jahren des ZU-Betriebs.



Figur 1: ***Links:*** *Prinzip der Positionierung der Diffusoren. Die Mischungstiefe wird jeden Winter um 10 bis 20 m abgesenkt, bis die maximale Tiefe erreicht ist.* ***Rechts:*** *Lage der Diffusoren im Bereich der tiefsten Stelle im Südbecken.*

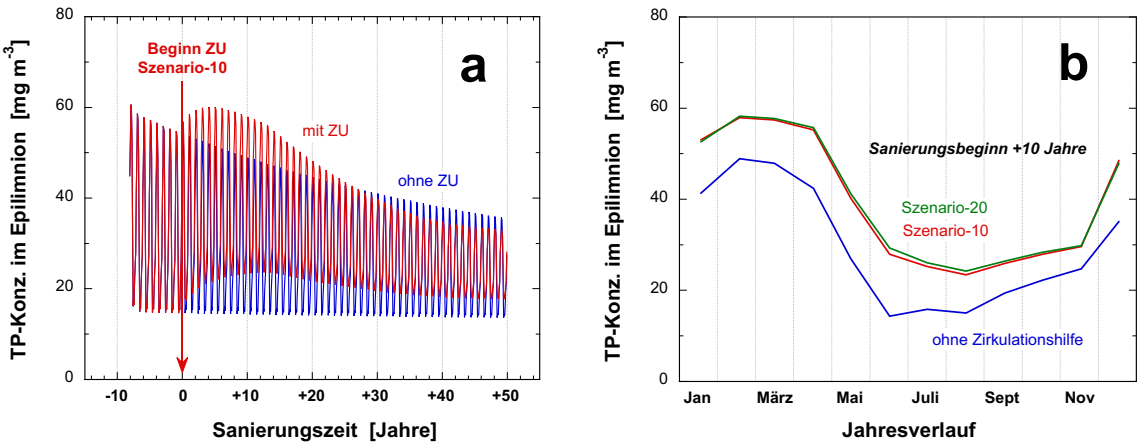
Sichtbare Auswirkungen der Wintermischung mit grobblasiger Luft an der Seeoberfläche kann man sich vorstellen anhand der Bilder (Figur 2) von Baldegger- und Hallwilersee. Im Betrieb und Unterhalt von Diffusoren und Mischung der Wassersäule von Seen mit Blasenschleiern weisen die Kantone Luzern (Baldegger- und Sempachersee) und Aargau (Hallwilersee) 40 Jahre Erfahrung auf.

Figur 2: *Aufsteigende Luftblasen während der winterlichen ZU beim Baldeggersee (links) und Hallwilersee (rechts). Aufgrund der geringen Konzentration von Blasen entsteht kein Sicherheitsrisiko, wie dies von ARAs bekannt ist.*

4 Auswirkung der Zirkulationsunterstützung auf die Phosphor-Konzentration

Durch den Betrieb der ZU wird sich ganzjährig die P-Konzentration in der produktiven Oberflächenschicht und damit auch im Abfluss der Lorze leicht erhöhen. Diese Auswirkung ist ein Nachteil gegenüber der Tiefenwasserableitung (TWA), welche nur den Abfluss der Lorze beeinflussen würde. Die Erhöhung kann aber genau vorausberechnet werden, da die sich im Tiefenwasser nur langsam verändernden P-Konzentrationen bekannt sind. Dabei kann die Mischungstiefe jederzeit geändert und neuen Bedingungen angepasst werden.

Im Gutachten von 2019 haben wir die Veränderungen der P-Konzentration für zwei Szenarien berechnet, bei denen die Mischungstiefe jährlich um 10 m (Szenario-10) bzw. um 20 m abgetieft wird (Szenario-20). In beiden Fällen wird die P-Eintragsfracht von 12.1 t a^{-1} als konstant angenommen. Die rote Kurve in Figur 3a zeigt den Konzentrationsverlauf von Phosphor in der produktiven Oberflächenzone – diese Konzentration entspricht gleichzeitig auch jener im Abfluss der Lorze. Die blaue Kurve zeigt die Konzentration in der Oberflächenzone ohne ZU. Ab Beginn der ZU nimmt die P-Konzentration in der Oberflächenschicht während längerer Zeit leicht zu und bleibt während ca. 25 Jahren (Szenario-10) bis zu 15 mg m^{-3} erhöht, bevor sie unter die hypothetische Konzentration ohne ZU sinkt und dem neuen Stationärzustand zustrebt, der nach ca. 40 Jahren erreicht wird. Mit der Figur 3b wird gezeigt, wie im zehnten Jahr der Sanierung die P-Konzentrationen mit bzw. ohne ZU verlaufen: Die Konzentration erhöht sich ganzjährig um ca. 15 mg m^{-3}. Das entspricht einer Erhöhung der massgeblichen Frühlingskonzentration von ca. 20%.



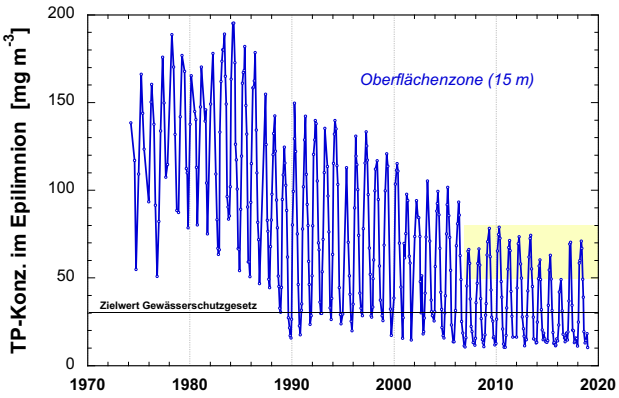
Figur 3: *Auswirkungen der ZU auf die P-Konzentration bei Absenkung der Diffusoren um 10 m pro Jahr. (Konstante Eintragsfracht von 12.1 t P a^{-1}).*
a) *Rote Kurve: TP-Konzentration in der Oberflächenzone (15 m) und im Abfluss der Lorze bei ZU. Blaue Kurve: TP-Konzentration ohne ZU.*
b) *Saisonaler Verlauf der TP-Konzentration in der Oberflächenschicht exemplarisch für das Jahr 10 der Sanierung.*

Diese durch den Betrieb der ZU erhöhte P-Konzentration in der Oberflächenschicht entspricht dem Zustand im letzten Jahrzehnt und liegt im Bereich der natürlichen Variationen, die seit ca. 2006 von Jahr zu Jahr aufgetreten sind (siehe gelbes Band in Figur 4 für die in der Oberflächenzone (Epilimnion, 15 m) gemessenen P-Konzentrationen). Eine wesentliche Erhöhung der Algenproduktion im See ist nicht zu erwarten, weil die Primärproduktion bei diesen hohen Nährstoffkonzentrationen vor allem durch das Licht limitiert ist. Das Algenwachstum dürfte sich tendenziell etwas stärker auf die obersten Meter des Sees konzentrieren, weshalb die Sichttiefe im Frühjahr im Mittel leicht abnehmen kann.

Ein ausserordentliches Auftreten von schädlichen Algenblüten wird durch diverse Faktoren gesteuert und ist auch bei den aktuellen P-Konzentrationen prinzipiell jederzeit möglich. Grundsätzlich dürfte sich mit der Erhöhung der TP-Konzentration um 20% das Risiko für Blaualgenblüten leicht erhöhen. Möglicherweise kann sich die Zusammensetzung des Phytoplanktons (schwebende Algen) etwas verändern, diese weist allerdings auch natürlicherweise von Jahr zu Jahr deutliche Schwankungen auf.

Diese genannten Veränderungen sind nicht genau vorhersagbar, da die Konzentrationsveränderungen nur relativ gering sind und andere Faktoren, zum Beispiel die Wetterbedingungen, einen mindestens ebenso grossen Einfluss haben. **Es ist zudem wichtig festzuhalten, dass die zu erwartende erhöhte TP-Konzentration für den See nicht ungewöhnlich ist. Sie wird sich im oberen Bereich der natürlichen Variationen der letzten 15 Jahre bewegen und weiterhin deutlich unterhalb der Werte liegen, welche im See noch im Zeitraum von 1990 bis 2005 vorherrschten**. Es ist deshalb nicht zu erwarten, dass sich die Algenproduktion und das Risiko für das

Auftreten von Algenblüten wesentlich vom Zustand unterscheiden wird, der im See in den letzten zwei Jahrzehnten zu beobachten war.



Figur 4: *Monitoringdaten Zugersee: Mittlere P-Konzentration in den obersten 15 m der Wassersäule seit 1974. Im letzten Jahrzehnt variierte die Frühlingskonzentration (jährliches Maximum) zwischen 50 und 80 mg m^{-3}.*

Die Modellberechnungen im Bericht von 2019 unter der Annahme gemacht wurden, dass die Eintragsfracht von 12.1 t P a^{-1} langfristig konstant bleibt. Die Entwicklung in den letzten Jahren lässt befürchten, dass die frühere Abnahme der Fracht tatsächlich stagniert oder gar im Zunehmen begriffen ist – der Seeinhalt hat sich in den letzten Jahren nicht mehr signifikant verändert. Mit der Wintermischung alleine kann der mesotrophe Zustand nicht erreicht werden (der berechnete Stationärzustand ohne Reduktion der Fracht liegt bei 36 mg P m^{-3}). Es ist daher von entscheidender Bedeutung, dass auch die see-externen Massnahmen wirksam werden. Zwar reagieren die Böden auf Änderungen der Düngepraxis bzw. Bewirtschaftungsform nur langsam – da jedoch auch die see-interne Sanierung mehrere Jahrzehnte in Anspruch nehmen wird, sind beiderlei Massnahmen essentiell für ein Gelingen der Sanierung.

5 Weitere Auswirkungen der Zirkulationsunterstützung

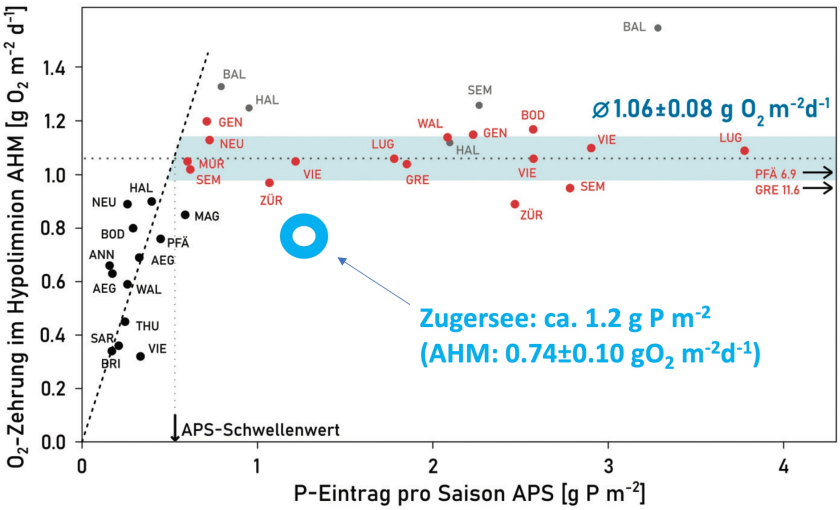
Eintrag von Sauerstoff

Aufgrund der permanenten Schichtung des Südbeckens ist ein grosser Teil des Tiefenwassers sauerstofffrei und damit lebensfeindlich. Die winterliche ZU bewirkt nicht nur ein Hinaufmischen von Nährstoffen, sondern durch den geförderten Austausch mit der Atmosphäre auch eine verstärkte Aufnahme von Sauerstoff im gemischten Wasserkörper. Die Aufnahme von Sauerstoff ist sehr effizient, und die Erfahrung bei anderen Seen mit ZU zeigt, dass die Konzentration nach der winterlichen Mischung im Frühling nahe der Sättigung ist (ca. 10 bis 11 mg O_2 L^{-1}). Die Versorgung des Sees mit ausreichend Sauerstoff

i. gewährleistet ***Lebensraum für höhere Organismen*** *und eine* ***vielfältigere Nahrungskette,***

ii. ermöglicht eine verbesserte ***Mineralisation von absinkendem org. Material*** und der Sedimentoberfläche und damit eine geringere Freisetzung von reduzierten Substanzen wie Methan und Ammonium. Falls dies nicht oder nur unvollständig geschieht, werden die Sedimente noch über lange Zeit sauerstoffzehrende Substanzen ins Tiefenwasser abgeben.

Aufgrund der hohen P-Konzentration wird der See in den nächsten Jahrzehnten jedoch nahezu maximal produktiv bleiben, so dass trotz ZU der Sauerstoff im Tiefenwasser jedes Jahr aufgebraucht werden wird. Durch die verstärkte Mischung wird die Sauerstoffzehrung erwartungsgemäss etwas zunehmen, da durch die ZU mehr Sauerstoff zum Abbau von organischem Material zur Verfügung steht. Die Entwicklung, die man für den Zugersee bei abnehmender P-Konzentration erwarten kann, lässt sich aus Figur 5 herleiten (Kiefer et al., 2021): Aufgrund des sauerstofflosen, permanent geschichteten Südbeckens ist die Sauerstoffzehrungsrate geringer als bei anderen Seen mit entsprechend hoher P-Konzentration. Bei abnehmender P-Konzentration wird die Sauerstoffzehrung unverändert bleiben, bis eine bestimmte Schwelle unterschritten wird. Diese beträgt für den Zugersee ca. 28 mg P m^{-3} (Kiefer et al., 2021). Der berechnete Stationärzustand, der mit Hilfe der ZU voraussichtlich erreicht werden kann, liegt bei 36 mgP m^{-3} (ohne zusätzliche see-externe Massnahmen). Um die kritische Schwelle unterschreiten zu können und eine tiefere Sauerstoffzehrung im See zu erreichen, wird deshalb neben der ZU auf jeden Fall auch eine weitere Reduktion der see-externen P-Frachten notwendig sein.



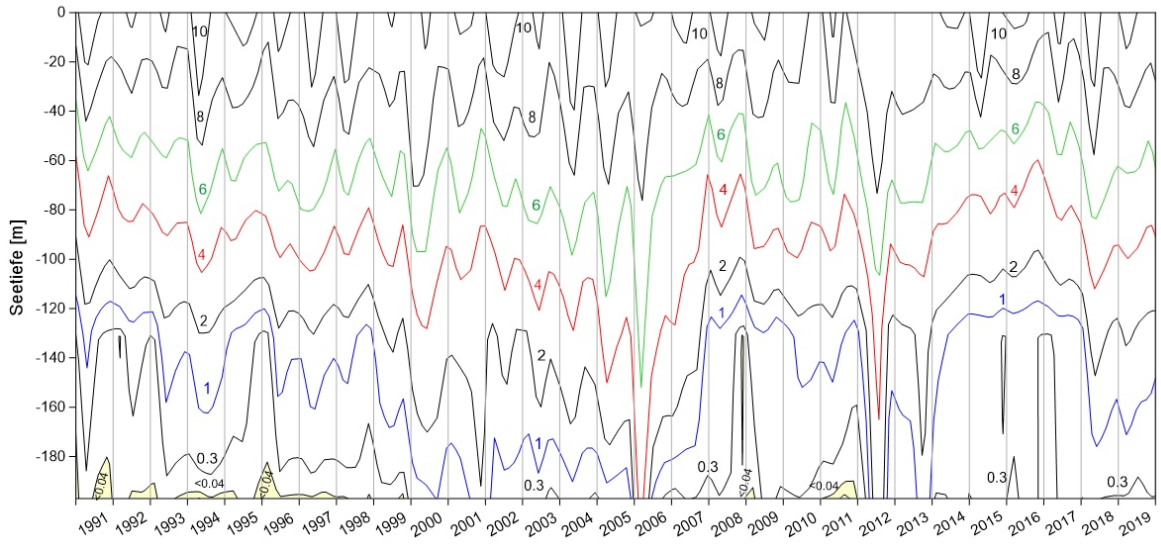
Figur 5: *Abhängigkeit der Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser vom für das Algenwachstum zur Verfügung stehenden Phosphor. Durch den Betrieb der ZU wird die AHM bis ~1.06 g O_2 $m^{-2}d^{-1}$ zunehmen. Wenn die APS durch die Wirkung der see-internen wie -externen Massnahmen unter die Schwelle von 0.6 g P m^{-2} sinkt, wird auch die AHM abnehmen. (aus Kiefer et al., 2021).*

Erschwerte Mischung durch Klimaerwärmung

Die Wintertemperaturen nehmen im Zuge der Klimaerwärmung im Durchschnitt weiterhin zu und erschweren dadurch generell die winterliche Mischung der meisten Seen. Für den Zugersee haben wir gezeigt (Schwefel et al., 2019), dass die Mischungstiefe von den herbstlichen Wassertemperaturen abhängt. Da der Beitrag von Phosphor, welcher durch die Mischung aus dem Tiefenwasser in der Oberflächenzone eingebracht wird, bis zu 10-mal grösser ist als die Fracht aus dem Einzugsgebiet, ist die Mischungstiefe entscheidend für die P-Konzentration in der Oberflächenschicht und damit auch für den Austrag aus dem See. Das Modell von Schwefel et al. (2019) prognostiziert, dass durch die Klimaerwärmung die mittlere Mischungstiefe von heute 78 m bis im Jahr 2085 nur noch 65 m betragen wird. Mit dem Betrieb der ZU wird dieser Effekt überwunden und die winterliche Tiefenmischung ist fortan unabhängig von den jeweiligen meteorologischen Bedingungen und erfasst das gesamte Tiefenwasser.

Der in Figur 6 dargestellte Verlauf der Sauerstoffkonzentrationen (Isoplethen) der Jahre 1991 bis 2019 zeigt, dass der Sturm Lothar im Dezember 1999 die Meromixis im Tiefenwasser reduzierte und erstmals seit vielen Jahren in 180 bis 200 m Seetiefe zu einem Sauerstoffgehalt von über 1 mg L^{-1} führte. Mit dem sehr kalten Winter 2005/06 führte dann die natürliche Mischung im Februar und März 2006 zu einem Sauerstoffgehalt am Seegrund von über 4 mg L^{-1}.

Mit der Anwendung der ZU wird der See nach einer Übergangsphase von 6-12 Jahren zunehmender Tiefenstufen jeden Winter vollständig gemischt werden können, so dass auch der grosse Vorrat von P im Tiefenwasser langsam entfernt wird.



Figur 6: Sauerstoffverteilung im Zugersee von 1991 bis 2019 in mg L^{-1} *(AFU Zug).*

6 Zusammenfassung

Zusammenfassend bewerten wir die erwarteten Auswirkungen der Zirkulationsunterstützung folgendermassen:

- Die Zirkulationsunterstützung (ZU) führt - insbesondere in den ersten Wintern - zu einer geringen Veränderung gegenüber einem natürlichen Verlauf der Mischung. Die Mischungstiefe der ZU kann jederzeit angepasst und damit die Erhöhung der P-Konzentration in der Oberflächenschicht kontrolliert werden. Ein unerwünschter hoher Anstieg der P-Konzentration in der Oberflächenschicht ist deshalb ausgeschlossen. Die schrittweise Verstärkung der Tiefenmischung hat den gleichen Effekt wie kühlere Winter. Die ZU fördert die Mischung im See, wie dies bei einer klimatischen Abkühlung natürlicherweise erfolgen würde.

- Die durch die ZU verursachte vorübergehende geringe Zunahme der P-Konzentration in der Oberflächenschicht des Zugersees wird in der Zeit, da erstmals die grösste Tiefe erreicht ist, ein Maximum durchlaufen, welches um ca. 15 mg P m^{-3} oder rund ca. 20% höher liegt als die P-Konzentration ohne ZU. Das entspricht in etwa der Variation der jährlichen Frühlingskonzentrationen im letzten Jahrzehnt.

- Das Risiko für intensive Algenblüten wird mit der Zunahme der TP-Konzentration durch die ZU tendenziell ansteigen, kann jedoch nicht vorhergesagt oder quantifiziert werden.

- Die ZU ermöglicht die Aufnahme von ***Luft-Sauerstoff durch Mischung im Winter*** bis in die kontrollierte Mischungstiefe. Die erhöhte Sauerstoffkonzentration hat zwei positive Effekte:
  - sie gewährleistet zunehmenden ***oxischen Lebensraum für höhere Organismen***
  - sie ermöglicht oxische ***Mineralisation von absinkendem org. Material*** und von der Sedimentoberfläche.

- Die ZU überwindet verstärkte Dichteschichtung, welche künftig durch die ***Klimaerwärmung*** bewirkt wird, besonders während warmen Wintern.

- Die ZU beeinflusst die Lorze nur wenig und kann unabhängig vom hydrologischen Abfluss der Lorze betrieben werden. Im Gegensatz zur Tiefenwasserableitung (TWA) wird die Lorze nicht unnatürlich stark abgekühlt.

- Meromixis und sauerstofffreies Tiefenwasser kann mit TWA zwar reduziert, jedoch nicht verhindert werden.

- Die ZU ist jahrzehntelang erprobt (Baldegger-, Sempacher-, Hallwilersee, etc.) und mit geringerem Unterhalt machbar als die TWA. Die ZU benötigt keine grossen Bauten und kann jederzeit ohne grossen Aufwand wieder zurückgebaut werden.

- Die ZU ist wesentlich kostengünstiger als eine TWA.

- Bei der TWA werden durch die Ableitung der tiefsten Wasserschichten die darüber liegenden wärmeren Schichten in grössere Tiefen verschoben. Dadurch wird kälteres Wasser aus dem See exportiert und wärmeres Wasser zurückbehalten. Damit wird im Gesamteffekt der Seekörper leicht erwärmt. Im Gegensatz dazu kann die ZU während eines kalten Winters auch das Tiefenwasser abkühlen, was bei der aktuell permanenten chemischen Schichtung (Meromixis) nicht der Fall ist.

- Weder durch die ZU noch durch die TWA werden Nährstoffe aus dem Sediment mobilisiert.

Zu den Bedenken der Auswirkungen der ZU auf die Schilfbestände, Naturschutzgebiete (Flachmoore) und Felchenerträge lassen sich folgende Überlegungen anführen:

- Die P-Konzentration in der Oberflächenschicht und daher auch in der Lorze wird durch die ZU vorübergehend für etwa zwei Jahrzehnte (für 'Szenario-10') um 15 mg m^{-3} (rund ca. 20% im Vergleich zur Situation ohne ZU) erhöht. Die Oberflächenschicht des Sees wird P-Konzentrationen erreichen, welche den Höchstwerten der letzten 15 Jahren entsprechen, also einer Situation, welche der See vor kurzem durchlaufen hat. Dadurch ist kein überraschendes Auftreten von fädigen Algen, Ansammlung von Algenmatten, welche den Schilfbeständen schaden könnten, oder negative Einfluss auf die Felchenerträge zu erwarten, obwohl das Risiko von Algenblüten mit zunehmender TP-Konzentration tendenziell steigt.

- Ein Auftreten schädlicher Algen wird durch diverse Faktoren gesteuert, die jeweils nicht eindeutig zugeordnet werden können. Die P-Konzentration im Zugersee ist auch ohne ZU hoch, so dass Algenblüten je nach Witterungsbedingungen im Prinzip jedes Jahr auftreten könnten. Diese sind nicht vorhersagbar. Die Erhöhung der P-Konzentration durch die ZU um 20% würde nicht zu unvorhergesehenen Nährstoffbedingungen im See führen, sondern zu Konzentrationen, welche in den letzten 15 Jahren gelegentlich auftraten und weiterhin deutlich unter den Werten liegen, die noch bis 2005 regelmässig im See beobachtet wurden.

- Die P-Konzentration in der Oberflächenschicht des Sees und damit auch im Lorze-Abfluss hat sich in den letzten 20 Jahren massiv verbessert (Figur 4). Da Flachmoore jedoch eine sehr langsame Umsetzungsrate für Nährstoffe haben, kann es durchaus sein, dass die heute erhöhten P-Gehalte in den Moorböden noch auf die Zeit der Eutrophierung zurückzuführen sind, also noch bevor sich die Wasserqualität der Lorze verbesserte. Bei Überschwemmungen werden in der Lorze grosse Mengen von Nährstoffen aus resuspendierten Sedimenten und Böden des Einzugsgebiets mobilisiert und eingeschwemmt. Demgegenüber fallen die ursprünglich im Wasser vorhandenen Konzentrationen nicht mehr ins Gewicht (siehe z.B. Pacini und Gächter, 1999). Es ist daher durchaus möglich, dass Überschwemmungen zur Nährstoffakkumulation in den Mooren beitragen, jedoch nur zu einem geringen Teil aufgrund der durchschnittlichen

Konzentration im See und zu einem noch geringeren Anteil aufgrund einer Erhöhung dieser Konzentration um 20%.

- Die Fischpopulationen werden durch die zusätzliche Versorgung mit Sauerstoff an Lebensraum gewinnen. Eine Schädigung von Biodiversität, Fangertrag oder Vielfalt ist nicht zu erwarten. Die Statistik der Fischerei-Fangerträge im Zugersee (Kanton Zug, 2022) zeigt bisher keinen Zusammenhang mit der P-Konzentration. Daher ist bei einer kurzzeitigen Erhöhung um 20% keine spürbare Auswirkung zu erwarten.

Verdankung

Wir bedanken uns bei Martina Brennecke (Amt für Raum und Verkehr, ARV), Andres Bucher (Tiefbauamt Abt. Wasserbau, TBA), Roman Keller (Amt für Wald und Wild, AFW), Ulrich Graf (Biodiversität und Naturschutzbiologie, WSL) Peter Keller und Bruno Mathis (AFU ZG) für die konstruktive Diskussion.

7 Literatur

Kanton Zug (2022). Fischerei-Fangerträge Zugersee 2021. Amt für Wald und Wild, Direktion des Innern, Kanton Zug. https://www.zg.ch/behoerden/direktion-des-innern/wald-und-wild/b-fischerei/aktuelle-mitteilungen/downloads/Fangertraege%20Zugersee.pdf/@@download/file/Fischereibericht%20Zugersee%20Fischereijahr%202021.pdf

Kiefer I., Müller B. und Wüest A.: Anleitung zur Analyse von Sauerstoffzehrung und Netto-Ökosystemproduktion in Seen. EPFL und Eawag, 2021. https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag:21995

Müller B. und Wüest A.: Abnahme des Phosphorgehalts im Zugersee, Stand 2016. Gutachten zHd. des Kt. Zug, November 2016. https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag:17900

Müller B., Gaudard A. und Wüest A.: Beurteilung see-interner Massnahmen zur beschleunigten Sanierung des Zugersees (inkl. Kostenschätzungen Bau und Betrieb). Gutachten zHd. des Kt. Zug, April 2019. https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag:18793

Pacini N. und Gächter R.: Speciation of riverine particulate phosphorus during rain events. Biogeochem. 47, 87-109 (1999). https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag:8507

Schwefel R., Müller B., Boisgontier H., and Wüest A.: Global warming affects nutrient upwelling in deep lakes. Aquatic Sci. 81:50 (2019). Doi: 10.1007/s00027-019-0637-0. https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag:18651