



Die Sanierung des Zugersees ist eine Generationenaufgabe

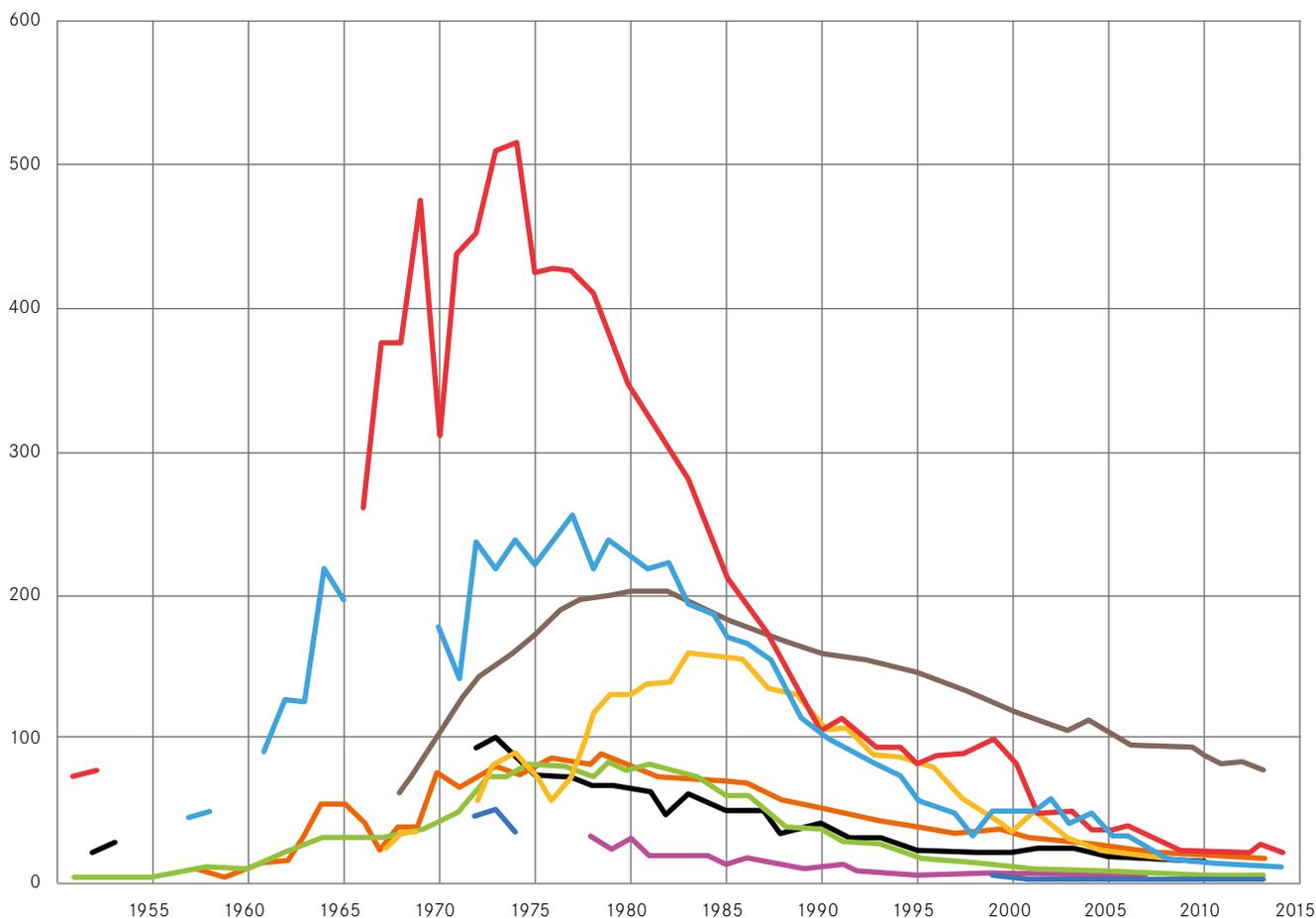
Spitzenplatz des Zugersees

Unter allen grossen Schweizer Seen leidet der Zugersee am stärksten an den Folgen des früheren, übermässigen Nährstoffeintrags. Dieser stammt aus der Siedlungsentwässerung und aus der Landwirtschaft. Heute weist der See einen Phosphor-Gehalt (P-Gehalt) von rund 80 mg/m^3 auf; mit diesem Wert liegt er an der Spitze der nährstoffreichen Seen (vgl. Grafik S. 11). Die Analyse archivierter Kieselalgenschalen im Seeboden zeigt, dass der Zugersee bis zu Beginn des 19. Jahrhunderts einen stabilen mittelnährstoffreichen (mesotrophen) Zustand aufwies (vgl. Bericht in Umwelt Zug 2012-2). Der Weg zurück zu diesem Zustand erfolgt über die Fortführung der eingeleiteten Massnahmen und benötigt grosse Beharrlichkeit und Geduld. Nur so lässt sich die Nährstoffbelastung weiter minimieren.

Der Nährstoffgehalt eines Sees darf höchstens eine mittlere Produktion von Biomasse zulassen; das schreibt die eidgenössische Gewässerschutzverordnung (GSchV) vor. Dieser mittel-nährstoffreiche Zielzustand ist bei einem P-Gehalt von $\leq 30 \text{ mg/m}^3$ erreicht. Der viel langsamere Rückgang des P-Gehalts im Zugersee im Vergleich zu den meisten anderen Schweizer Seen ist auffällig; man hat ihn eingehend untersucht. Gründe dafür sind die lange hydraulische Aufenthaltszeit des Seewassers von rund 14 Jahren, die grossen Nährstoffdepots und die chemische Dichteschichtung im Tiefenwasser des 200 Meter tiefen Südbeckens. Dazu kommt die geografische Nähe des

grössten Zuflusses Obere Lorze in Zug und des Seeabflusses in Cham. Aufgrund der chemischen Dichteschichtung im Südbecken findet dort im Winterhalbjahr meistens keine vollständige Mischung des Seewassers statt; die Sauerstoffanreicherung in der Seetiefe ist dadurch gering. Gemäss Gewässerschutzverordnung soll die Sauerstoffkonzentration im Seewasser – unter Vorbehalt besonderer natürlicher Verhältnisse – zu keiner Zeit und in keiner Tiefe weniger als 4 g/m^3 betragen. Aufgrund der chemischen Dichteschichtung ist diese Vorgabe in der Seetiefe des Zugersees ganzjährig nicht erfüllt; die Grenze von 4 Gramm Sauerstoff pro Kubikmeter liegt – jahreszeitlich schwankend – zwischen 80 und 120 m Tiefe.

Verschiedene physikalische, chemische und biologische Vorgänge beeinflussen die Veränderung des Nährstoffgehalts in Seen. Von besonderer Bedeutung ist der Nährstoff Phosphor; er steuert die biologische Produktion. Die Zuflussfracht der Fliessgewässer und die Abflussfracht aus dem See erfolgen an der Seeoberfläche (Oberflächenschicht, sogenanntes Epilimnion). An der Seeoberfläche geschieht auch das Algenwachstum; dabei werden die Nährstoffe in die pflanzliche Biomasse eingebaut. Mit dem Absterben der Algen und des tierischen Planktons sinken sie in die Seetiefe (Tiefenwasserschicht, sogenanntes Hypolimnion). So akkumulieren im Hypolimnion grosse Mengen an toter Biomasse, die dort mineralisiert wird. Die gelösten und ungelösten Stoffe lagern sich am Seegrund ab und werden teilweise ins Sediment eingebaut. Bei einer voll-



Veränderung des Phosphor-Gehalts in Schweizer Seen in mg/m³

— Zugersee — Baldeggersee — Bodensee — Genfersee — Hallwilersee
— Langensee — Sempachersee — Vierwaldstättersee — Zürichsee

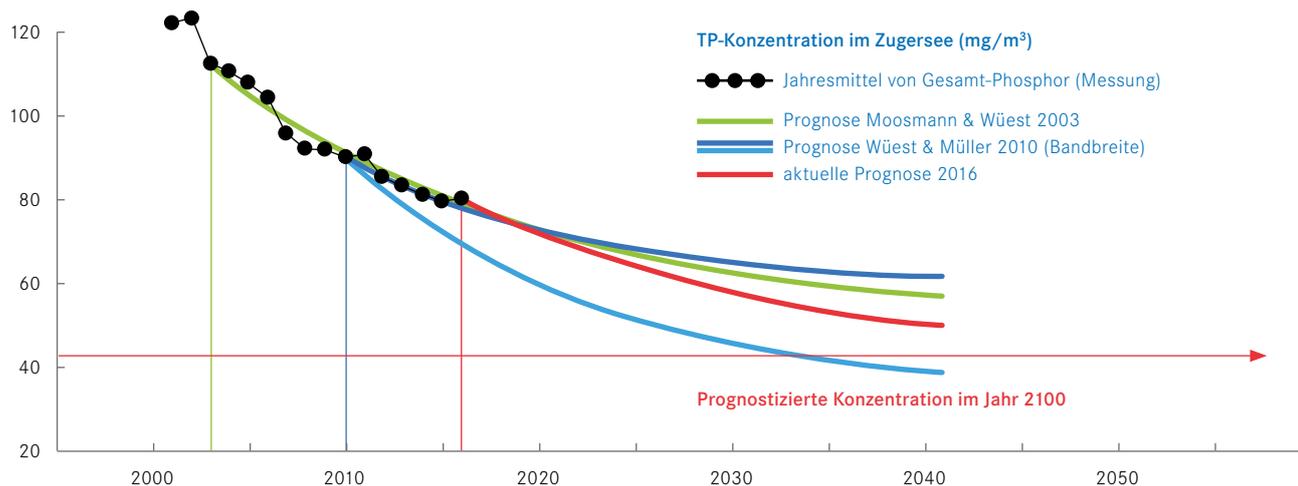
ständigen winterlichen Mischung eines Sees von der Seeoberfläche bis zum Seegrund werden die Stoffe, die im Sommerhalbjahr im Hypolimnion angereichert wurden, wieder gleichmässig im See verteilt. Im Zugersee geschieht im Winterhalbjahr aber keine vollständige Mischung. Aufgrund der grossen Seetiefe und der chemischen Dichteschichtung verbleibt der überwiegende Teil des Phosphors im Hypolimnion.

Eingeleitete Sanierungsmassnahmen und Monitoring

Der Zuger Regierungsrat beschloss, die Nährstoffsanierung des Zugersees mittels seeexterner Massnahmen umzusetzen. Die früher ebenfalls diskutierten seeinternen Sanierungsmassnahmen (Wasserüberleitung aus dem Vierwaldstättersee, Tiefenwasserableitung in die Reuss und Seebelüftung) stehen heute nicht mehr zur Debatte. Massnahmen erfolgten vor allem in der Siedlungsentswässerung und in der Landwirtschaft. Die nachhaltigste lag im Bau der ARA Schönau 1977. Sie reinigt heute das gesamte Siedlungsabwasser aus dem Einzugsgebiet des Zugersees und leitet es anschliessend in die Untere Lorze unterhalb des Zugersees. Die ARA Schönau löste eine Vielzahl kleiner Kläranlagen mit ungenügender Leistung im Einzugsgebiet des Zugersees ab. Die eingeleiteten Massnahmen zur Reduktion der Nährstoffeinträge in den Zugersee zeitigten Folgen: Seit den 1980er-Jahren ist der P-Gehalt rückläufig.

Ein Überwachungsprogramm (Monitoring) begleitet die Seesanie rung. Den Nährstoffgehalt eines Sees kann man recht ge

nau über die Aufsummerung der Gehalte in den beprobten Schichten ermitteln. Im Auftrag des Amtes für Umweltschutz (AfU) misst das kantonale Labor die Wasserqualität im See und in den grossen Zuflüssen. Aufgrund dieser Daten berechnet das AfU den Nährstoffgehalt und die Nährstofffrachten in den Zugersee. Die Bestimmung der gesamten Zuflussfracht an Phosphor ist aufwendig. Aus den Zuflüssen erfolgt der grösste Anteil. Die Lorze bringt am meisten Wasser; hier wird die Fracht möglichst genau und mit grossem technisch-analytischem Aufwand abflussmengenproportional gemessen. Bei den beiden nächstgrösseren Zuflüssen Rigiaa und Aabach erfolgt die Abschätzung der P-Frachten über die mathematische Phosphor/Abfluss-Beziehung, was modellbedingt mit einem grösseren Fehler als bei der abflussmengenproportionalen Probenahme behaftet ist. Für diese Methode der Frachtberechnung werden alle zwei Wochen Wasserproben entnommen sowie zusätzliche Messkampagnen zur Ermittlung des Hochwassereinflusses auf die Frachten durchgeführt. Mit der Frachtbestimmung in Lorze, Rigiaa und Aabach können rund zwei Drittel des gesamten Einzugsgebiets mit Messungen erfasst werden. Für das restliche Einzugsgebiet wird die gleiche flächenbezogene Phosphorbelastung wie im untersuchten Einzugsgebiet angenommen und die Gesamtfracht für alle Fliessgewässer proportional auf das gesamte Einzugsgebiet hochgerechnet. Weiter werden die geschätzten Frachtanteile an Phosphor aus den Regenüberläufen der Siedlungsentswässerung und die direkte Deposition aus der Atmosphäre auf den See dazu gerechnet.



Wie entwickelt sich der P-Gehalt im Zugersee in der Zukunft?

Das neue Eawag-Gutachten 2016 prognostiziert bei gleichbleibender P-Belastung für das Jahr 2100 einen P-Gehalt von 42 mg/m³.

Aktuelles Gutachten der Eawag zur Standortbestimmung

Die Eawag, das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs, hat in den vergangenen Jahren im Auftrag des AfU die Zugersee-Sanierung mit zusätzlichen Untersuchungen und Gutachten begleitet; sie erstellte auch Prognosen zur Entwicklung des Nährstoffgehalts des Sees. Die Eawag-Gutachten dienen den Behörden als Erfolgskontrolle wie auch als Grundlage für die Planung weiterer Massnahmen zur Reduktion der Nährstoffbelastung. Das Gutachten von 2010 kam zum Schluss, dass mit der momentanen Nährstoffbelastung aus dem gesamten See-Einzugsgebiet bis 2040 ein P-Gehalt zwischen 30 und 50 mg/m³ resultiere. Die prognostizierte Bandbreite des künftigen P-Gehalts liegt weit über dem Beitrag der Frachtreduktion des für das Einzugsgebiet des Zugersees diskutierten Phosphorprojekts (Art. 62a Gewässerschutzgesetz) zur Reduktion der Nährstoffabschwemmung aus der Landwirtschaft. Aufgrund des ungünstigen Verhältnisses von Aufwand und Nutzen wurde 2011 der Start eines 62a-Projekts sistiert; es hätte Entschädigungskosten von über 13 Mio. Franken für die landwirtschaftlichen Nutzungseinschränkungen im Einzugsgebiet des Zugersees zur Folge gehabt.

Aufgrund einer erweiterten Datenerhebung im Zugersee hat das Amt für Umweltschutz die Eawag 2016 mit einem weiteren Gutachten zur Nährstoffsanierung beauftragt. Damit kann die im früheren Gutachten bestimmte P-Bilanz und die daraus resultierende Prognose für den P-Gehalt, der zukünftig im Gleich-

gewichtszustand des Zugersees erreicht sein wird, verifiziert werden. Die jährliche P-Abnahme im See berechnet sich aus der Differenz von Zuflussfracht, Abflussfracht und Nettosedimentation. Für die genauere Bestimmung der aktuellen Nettosedimentation hat die Eawag 2016 zwei Sedimentkerne aus 60 und 148 Metern Seetiefe entnommen und den P-Gehalt in den Kernen untersucht. Für die neue Prognose der Entwicklung des P-Gehalts im Zugersee wird die heute bestehende und künftig gleich hoch bleibende Fracht von bioverfügbarem Phosphor angenommen und mit der verifizierten Nettosedimentationsrate gerechnet; letztere wurde etwa in derselben Grösse auch im Eawag-Gutachten von 2003 verwendet. Basierend auf dem aktuellen jährlichen Eintrag von 5.9 Tonnen bioverfügbarem Phosphor und einem Austrag von 7.6 Tonnen Gesamtphosphor, prognostiziert das aktuelle Eawag-Gutachten von 2016 – ausgehend vom heutigen mittleren Gehalt an Gesamtphosphor von rund 80 mg/m³ – für die nächsten Jahrzehnte folgende Entwicklung der P-Gehalte im Zugersee: ~70 mg/m³ im Jahr 2020, ~60 mg/m³ im Jahr 2028, ~50 mg/m³ im Jahr 2040. Die weitere Abnahme wird dann nur noch sehr langsam vor sich gehen. Ende dieses Jahrhunderts wird der P-Gehalt im Zugersee bei ~42 mg/m³ liegen.

Klima hat Einfluss auf den Nährstoffgehalt

Das Eawag-Gutachten 2016 zeigt auch die Bedeutung der Klimaerwärmung auf die Mischung und die Nährstoffentwicklung auf. Im Zugersee befindet sich der grösste Teil des Phos-



Die Schönheit der Landschaft spiegelt sich im Zugersee.
Auch seine Wasserqualität soll so rasch als möglich wieder naturnah werden.

phors im Tiefenwasser. Im Sommer reichert sich das Tiefenwasser jeweils durch die Mineralisierung abgesunkener toter Biomasse mit Phosphor an; im Winter gelangt ein Teil des Phosphors durch die Mischung wieder ins Epilimnion zurück. Gemäss dem Eawag-Bericht 2016 gelangen im Winter aus der Seetiefe 40 Tonnen Phosphor ins Epilimnion – gegenüber 6 Tonnen Phosphor durch die Zuflüsse. Wiederum 40 Tonnen Phosphor sedimentieren im Sommer vom Epilimnion zurück ins Tiefenwasser und 7 Tonnen fliessen via Lorze in Cham aus dem Zugersee. Somit vermindert sich der P-Inhalt des Epilimnions jährlich um 1 Tonne. Diese Bilanz wird sich in den nächsten Jahren kaum ändern.

Das aktuelle Eawag-Gutachten zeigt im Weiteren, dass die maximale Mischungstiefe im Winter im Mittel der vergangenen 30 Jahre ca. 77 Meter betrug. In den vergangenen 10 Jahren mit mehreren warmen Wintern hat die Mischungstiefe deutlich abgenommen. Gemäss einem Klima-Modell wird die Oberflächentemperatur des Zugersees bis ins Jahr 2060 als Folge der Klimaerwärmung um rund 2 °C ansteigen. Bei einer Erwärmung der Atmosphäre im Winter um 1 °C wird die Mischungstiefe in dieser Jahreszeit um ca. 11 Meter abnehmen. Die Folgen für den Zugersee sind eine verstärkte thermische Schichtung des Sees, eine geringere Mischungstiefe im Winter und als Folge eine geringere P-Anreicherung des Epilimnions. Dies führt dazu, dass das Oberflächenwasser klimaänderungsbedingt eine Abnahme des P-Gehalts aufweisen wird und die Algen-

produktion dadurch abnimmt. Parallel dazu wird aber auch weniger Phosphor aus der Seetiefe mobilisiert, der über die Lorze abfließt. Die Eawag erwartet, dass durch die Klimaerwärmung der Rückgang des P-Gehalts im Zugersee langsamer als ohne Klimaerwärmung verläuft und dass klimaänderungsbedingt der P-Gehalt des Seewassers im Gleichgewichtszustand einen um etwa 10% höheren Gehalt aufweisen wird.

Sanierung des Zugersees braucht Zeit

Die Rückführung des Zugersees in den mesotrophen Zustand dauert sehr lange. Der Grund liegt im hohen Tiefenwasser-Nährstoffgehalt und in der ungenügenden Mischung. Gemäss dem Eawag-Gutachten 2016 wird das Sanierungsziel (P-Gehalt $\leq 30 \text{ mg/m}^3$) mit der heutigen P-Bilanz voraussichtlich auch Ende dieses Jahrhunderts noch nicht vollständig erreicht sein. Während Generationen wurde der Zugersee übermässig mit Nährstoffen belastet; die Rückführung in den naturnahen Zustand bleibt ebenfalls eine Generationenaufgabe. Dazu arbeitet das Amt für Umweltschutz des Kantons Zug mit den Gewässerschutzfachstellen von Schwyz und Luzern zusammen, mit dem gemeinsamen Ziel, die bisherigen Massnahmen in der Siedlungsentwässerung und in der Landwirtschaft fortzuführen, die stoffliche Belastung weiter zu vermindern und so im schönen Zugersee langfristig den naturnahen Zustand für die Wasserqualität wiederherzustellen.

Bruno Mathis und Peter Keller