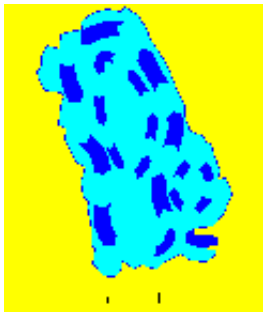


Geschwindigkeit der Seesanieung

Nur Dünger, der den See verlassen hat, kann nicht mehr wirken; aber wie geht das?

In Seen existiert die generelle Wirkungskette: Physik → Chemie → Biologie; wobei kleine Rückwirkungen möglich sind. Daher wird hier die See-Physik diskutiert, der sich der Rest unterordnet.

Unter Zirkulation kann man Verschiedenes verstehen. Ein Teil, die **horizontale Zirkulation** des Wassers, beschreibt im horizontalen Muster, wie das Wasser in den See strömt und ihn wieder verlässt.



Seeströmung (theoretisch)

Theoretische zufluss-getriebene Seeströmung im Pfäffikersee, 6000-facher Zeitraffer. Daneben treibt der Wind weitere Strömungen an, welche überlagert werden. Das wirkliche Muster ändert daher häufig.

Was Spezialisten meist mehr interessiert, ist die **vertikale Zirkulation**. Ob dies nun Advektion (Auf- und Abströmungen) oder Wirbelmischung (Eddydiffusion) sei, ist nur eine Frage des Massstabs. In einem genügend kleinen Wasser-Volumen bestehen alle vertikalen Bewegungen nur noch aus Advektion. Bei der echten Diffusion bewegen sich nur die Teilchen (Moleküle und Ionen) und das Wasser steht quasi still. Sie schafft zwar einen Ausgleich der Konzentrationen, aber für Becken wie den Pfäffikersee, würde das Jahrhunderte dauern. Bei der Wirbeldiffusion bewegt sich hauptsächlich das Wasser. Sie wird trotzdem so genannt, weil sie mit den Diffusionsgesetzen beschrieben werden kann. Das Wasser in einem See steht nie

still. Es bewegt sich sogar noch in einem Becken ohne Zuflüsse, das für Monate unter Eis liegt.

Wenn im Frühling die Luft-Temperatur steigt, erwärmt sich auch der See. Weil warmes Wasser leichter ist als kaltes Wasser, legt es sich wie ein Deckel über den See. Damit ist der tiefere Teil des Wassers gut gegen äussere Einflüsse geschützt und die Wärme kann nur noch schlecht in die Tiefe dringen. Das Wasser kann in der Nacht an der Oberfläche abkühlen und den obersten Teil des Sees mischen. Darunter befindet sich die Sprungschicht. Dies ist die Schicht, in der die Temperatur sprunghaft sinkt (üblicherweise mit mehr als 0.5°C pro Meter). In dieser Schicht ist auch der vertikale Dichtegradient am höchsten und damit die Wirbeldiffusion am kleinsten. Sie bildet eine beinahe undurchdringliche Barriere gegen die aufsteigenden Nährstoffe. In grossen Seen mit gutem Windzugriff ist der Wärmegradient kleiner als in kleinen Seen. Im Zürichsee wurde die Thermokline (die Schicht mit dem steilsten Wärmegradienten) durch Kutschke mit $1^{\circ}/\text{m}$ definiert. Im Greifensee muss dieser Wert auf $1.5^{\circ}/\text{m}$ und im Pfäffikersee auf über $2^{\circ}\text{C}/\text{m}$ angehoben werden.

Wird eine **Wärmerückgabe** ohne Vorsichtsmassnahmen gemacht, so greift sie in diesen Gradienten ein, indem Bewegungsenergie unkontrolliert eingetragen wird. Damit wird der See empfindlich gestört.

Im Herbst kühlt sich die Luft und damit auch der See ab. Wenn die Temperatur an der Oberfläche auf die Temperatur in der grössten Tiefe sinkt, so kommt eine Vollzirkulation näher. Der genaue Termin und die Art und Weise hängen von Einzelheiten ab. Zum Beispiel kühlt das Wasser an Flachufeln schneller aus. Da dort auch die biologische Aktivität gross ist, sind grössere Mengen gelöster Salze (Calcium Bikarbonat) vorhanden, die das Wasser zusätzlich beschweren (gezeigt am Baikalsee und Bodensee). Dies führt dazu, dass von den Flachufeln her eine Strömung in Richtung der tiefsten Stelle entsteht (Advektion). Nun muss das Wasser dort (dies ist das Wasser mit dem höchsten Phosphorgehalt im See) ausweichen und die einzig mögliche Richtung zeigt nach oben. Man liegt meist richtig mit der Annahme, dass sich Wasser kaum mit Wasser mischt, mindestens nicht freiwillig. Was hier bedeutet, dass sich die Wasserkörper innerhalb des Sees verschieben und kaum mischen. Kommt nun eine Wolke dieses nährstoffreichen Wassers in der Nähe des Auslaufs an die Oberfläche, so ist die Chance gut, dass sie den See verlässt. Eine interne **Zirkulationshilfe** kann die Sanierung bremsen, indem sie dieses Wasser verdünnt, weil sie das konzentrierte Tiefenwasser mit dünnerem Wasser mischt, bevor es den See verlässt. Da der Ansaug des Abflusses (es fliesst nicht nur die Schicht von Null Meter Tiefe ab, sondern auch von grösserer Tiefe) auch vom Abflussregime (**Regulierreglement**) abhängt, kann auch dieses Auswirkungen auf das Tempo der Sanierung zeigen.

Wie sich das Anfahren der Vollzirkulation im Detail abspielt, dürfte von Jahr zu Jahr verschieden sein, da es auch von Wind und Wetter abhängt. Es ist prinzipiell möglich diese physikalischen Vorgänge im See mit dem Computer zu simulieren - aber dazu werden dreidimensionale Modelle gebraucht, welche zudem an den Einzelfall angepasst werden müssen. Zudem geht es hier um recht kleinskalige Vorgänge, welche ein hochaufgelöstes Netz brauchen - was zugleich lange Rechenzeiten bedeutet. Am Lake Erie ist ein grosses Team von Wissenschaftlern seit etwa 1997 dran, etwas Ähnliches zu versuchen. Die Wetterprognose, Satelliten und Höchstleistungscomputer sind dort nur ein kleiner Teil des Ganzen. Was zeigt, dass ein solches Modell die Mittel der Vereinigung hoffnungslos überfordert. Selbst wenn wir dieses Modell hätten, können kaum genaue Prognosen gemacht werden. Wie beim Wetter können nur

Wahrscheinlichkeiten und Bandbreiten angegeben werden. Für den Pfäffikersee bleibt uns vorläufig nur die Möglichkeit, aus vergangenen Jahren und Beobachtungen auf die Zukunft zu schliessen.

Momentan funktioniert es recht gut - ob es ohne Zirkulationshilfe besser wäre, könnte nur mit einer verzögerten Betriebsaufnahme geprüft werden. Dadurch würde aber auch Zeit verschenkt, in der der See den dringend benötigten Sauerstoff aufnehmen kann. Ob und wieviel ein anderes Wehrreglement ändert, kann ohne Computer - Modell höchstens vermutet werden. Nur muss man sich bewusst sein, dass hier an einem sehr heiklen Punkt eingegriffen wird.

Auf den ersten Blick scheint es sich hier um eine St. Florianpolitik zu handeln, welche den Pfäffikersee auf Kosten des Greifensees saniert. Das stimmt nur auf den ersten Blick. Der Phosphorschub aus dem Pfäffikersee verlässt ihn in dem Zeitraum, in dem der Greifensee am unempfindlichsten ist. Er dürfte im Greifensee durch den gleichen Vorgang angereichert werden und ihn dann verlassen. Wirklich davon betroffen wäre nur das nächste stehende Gewässer, die Nordsee (welche sich grundlegend anders verhält).

[Nach oben](#)

Für Leute, die es genauer wissen wollen:

Der Eddy-Diffusionskoeffizient wird üblicherweise aus der Temperatur oder einem anderen konservativen Parameter berechnet. Die Grundgleichung ist: Der vertikale Flux ist gleich dem vertikalen Gradienten mal der Transportkonstanten mal Fläche. Wobei diese Konstante den Eddydiffusionskoeffizienten (k_z) bedeutet. Zur Berechnung wird demnach der Wärmeinhalt und die Flächen der einzelnen Schichten sowie die erste Ableitung der Temperatur nach der Tiefe (der vertikale Temperaturgradient) gebraucht. Den Gradienten bestimmt man am einfachsten mit einem Polynom zweiten Grades und die Inhalte mit der Kepler'schen Fassregel. Diese Konstanten verändern sich im Lauf des Jahres. In Zeiten, in denen sich die Temperatur kaum ändert und damit $k_z(T)$ zu unsicher wird, werden Rückgriffe auf andere Parameter (Leitfähigkeit, Chlorid, Silikat) gemacht, wobei das Sediment als Quelle geschätzt werden muss.

Typische Werte von k_z sind im Epilimnion etwa 20 cm²/s, im Hypolimnion zirka 1-2 cm²/s und im Metalimnion können sie bis unter 0.01 cm²/s sinken.

© Vereinigung pro Pfäffikersee