

## Pfäffikersee 2012

Heinrich Bührer, Juni 2013

Die Daten<sup>1</sup> stammen wie immer vom AWEL (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft), besten Dank!

In diesem Winter lief zum ersten Mal die Zirkulationshilfe nicht mehr.<sup>2</sup> Aus dem Verlauf und dem Vergleich mit den Vorjahren kann demnach abgeleitet werden, wie gross der Effekt der internen Massnahme war.

Das Spannendste zuerst, der „Lebensraum“ für Felchen: (Oekogramm<sup>3</sup>)

Grün ist für die Fische (Salmoniden) im „grünen“ Bereich. Bei gelb wird's kritisch und bei Rot tödlich.

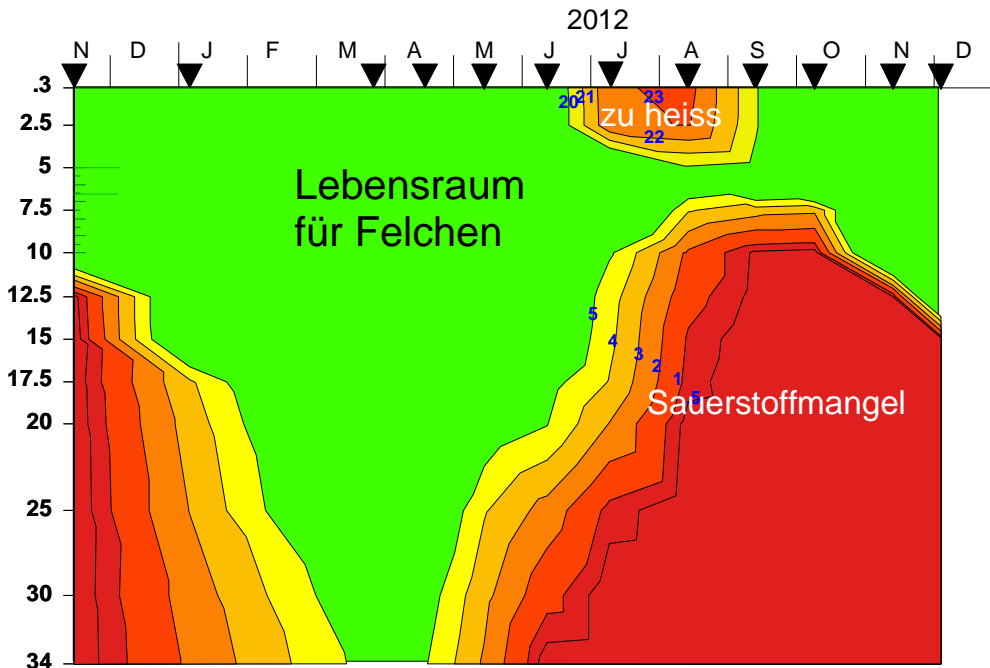


Abb. 1.: Oekogramm von Felchen [°C, O<sub>2</sub> mg/l]

Verglichen mit dem vorigen Jahr ist es schlechter geworden. Die grüne Lücke betrug im Jahre 2012 während eines Monats (2 Wochen länger als 2011) etwa 1.6 m (statt etwa 2.8 m im 2011). Salmoniden (Forellen, Saiblinge und Felchen) stellen recht hohe Ansprüche an ihre Umgebung. Die Temperatur muss relativ tief sein. Bei 20°C Dauertemperatur fressen Sandfelchen nicht mehr. Bei 21 Grad ist Schluss, wobei die grossen Felchen<sup>4</sup> früher sterben, als die kleinen; wahrscheinlich, weil die Kerntemperatur<sup>5</sup> bei grossen Fischen höher ist als bei kleinen. Forellen sind etwas toleranter als die Felchen. Der Sauerstoffbedarf ist hoch: auch mit langer Gewöhnung darf der Sauerstoff nicht unter 4 mg pro Liter sinken<sup>6</sup>. Dieser Wert stammt von sorgfältig angewöhnten Bachforellen aus der ARA Hergiswil von Hr. Kaiser. Normale Forellen ertragen nicht adaptiert nur etwa 6 mg/l. Regenbogenforellen sollen etwas weniger empfindlich sein als Bachforellen. Im Hochsommer verschlechtert sich die Situation regelmässig. In der Tiefe wäre das Wasser zwar genügend kalt, aber der Sauerstoff fehlt und von der Oberfläche her stösst das zu warme Wasser in die Tiefe vor. Damit bleibt den Felchen nur noch eine dünne Schicht zum Überleben. Die Sauerstoffzehrung war etwas rascher als im Vorjahr. Dementsprechend dauerte die kritische Situation länger und die Schicht wurde dünner. Dies ist kritisch, weil sich diese Schicht in Reichweite der Kormorane befindet. Diese Vögel finden einen reich gedeckten Tisch. Übliche Schwebnetz-

<sup>1</sup> Das letzte Profil von 2011, vom 14. November 2011 ergänzt die Darstellungen vorne.

<sup>2</sup> Abgestellt im Frühling 2011

<sup>3</sup> Dieses Oekogramm umfasst nur die Begrenzung des Lebensraums durch die Temperatur und den Sauerstoff.

<sup>4</sup> Mündl. Mitt. H.R. Bürgi vom Greifensee (1999).

<sup>5</sup> d.h. Temperatur in der Körpermitte; beim Menschen Temperatur in der Leber

<sup>6</sup> Die „Todeszone“ für Menschen beginnt bei etwa 7000 müM, in den Alveolen mit 40-47hPa O<sub>2</sub>-Partialdruck.

fischerei<sup>7</sup> macht in dieser Zeit keinen Sinn: es braucht nur ein kleines Hin- und Herschwappen des Wassers und alle Fische können nur noch tot und mit weissen Kiemen aus dem Netz geholt werden; sie wären unverkäuflich. Aus diesen Ausführungen könnte nun gefolgert werden, dass sich bei einer Überlappung von 20°C und weniger als 4 mg Sauerstoff pro Liter, also ohne „grüne“ Fläche, kein Felchen überleben kann. In der Nähe von Zuflüssen sind die Verhältnisse weniger kritisch, daher ist die Vermutung falsch, weiteres siehe im Anhang beim Sauerstoffanspruch von Fischen auf Seite 22 .

Der See dient aber auch den Menschen zum Baden. Im Frühsommer, wenn die Oberflächentemperatur bereits genügend warm zu sein scheint, friert man an die Füße. Das war im Jahre 2012 kaum der Fall.

In jedem See dominiert die Physik, wobei darunter hauptsächlich Temperatur und Transportvorgänge verstanden werden. Bei diesen geht es nicht nur um die Durchströmung mit Wasser aus Regen und den Zuflüssen, sondern auch um interne Transporte. Diese lassen sich in horizontale und vertikale Komponenten aufteilen, wobei die horizontalen Transporte üblicherweise um den Faktor hundert grösser sind als die vertikalen, also wie das Verhältnis von Breite zu Tiefe des Sees. Die vertikalen Strömungen werden als Eddydiffusion (Wirbeldiffusion) behandelt. Eddydiffusion wird der Transport genannt, der auf Konzentrationsunterschiede zurückzuführen ist und formal mit Diffusionsgesetzen beschrieben werden kann. Nur sind diese Prozesse um Zehner Potenzen wirksamer als die wirkliche, die molekulare Diffusion, da sie mit Wassertransport verknüpft sind.

Die Chemie hat kaum Rückwirkungen auf die Physik. Allerdings, wenn es um Feinheiten geht, wie bei der lateralen Mischung, kommen auch kleine Unterschiede, vor allem bei grossen tiefen Seen, zum Tragen. Die vertikale Mischung des Baikalsees kommt kaum zu Stande ohne die Dichteströmungen, welche durch die Lösung des Litoralkalkes entstehen. Auch beim Bodensee ist dies ein wichtiger Vorgang.

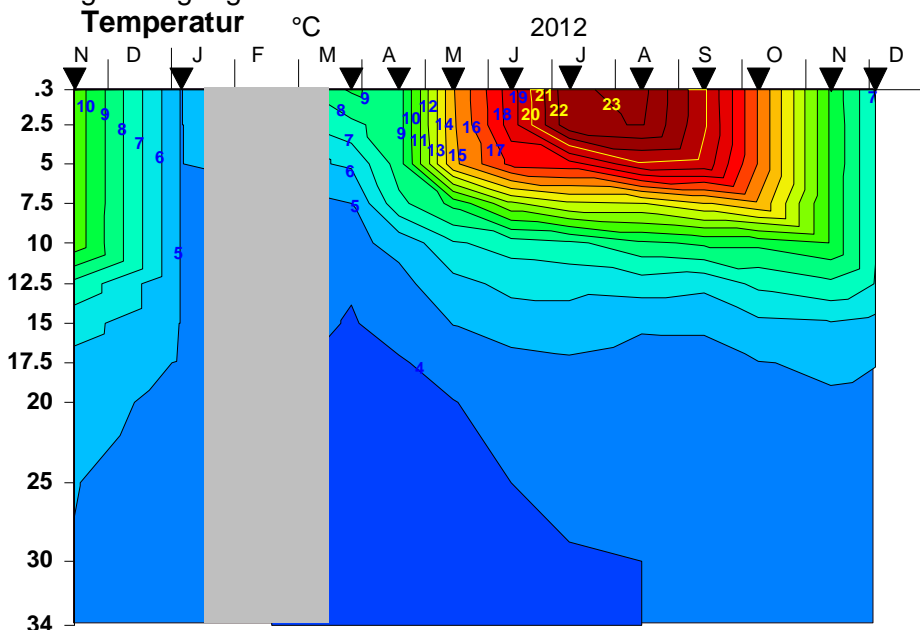


Abb. 2.: Temperatur °C

Die Diskussion der Daten beginnt wie immer mit der Temperatur. Am 4. Januar war die Oberflächentemperatur noch etwa 5°C und am 26. März bereits wieder über 9°C und die Temperatur über Grund war 3.6°C. Die tiefste Oberflächentemperatur muss also im Winter tiefer als 3.6 °C gelegen haben. Am 11.2.2012 wurde der See zum Eislaufen freigegeben (Wikipedia Artikel Pfäffikersee, abgerufen 30.Mai 2013).

Die Temperatur maximaler Dichte ist beim Pfäffikersee 3.838 °C mit 1.000420 kg pro Kubikdezimeter (in der Tiefe), dasselbe Wasser hätte an der Oberfläche eine Dichte von 1.000244 t/m<sup>3</sup>. Der reduzierte Luftdruck auf der Höhe über Meer von 537m entspricht einer Entlastung der Wassersäule um 65 cm. Die Temperatur von 3.838°C muss an der Oberfläche erreicht werden, wenn eine

<sup>7</sup> Netzfischerei wird im Greifensee in solchen Zeiten (August) für maximal eine Stunde betrieben. Im Normalfall hängen Schwebnetze (Kiemennetze) über Nacht im See.

Vollzirkulation<sup>8</sup> stattfinden soll. Mit der Temperatur wird üblicherweise diskutiert, ob der Wasserkörper mischen konnte, weil dies die wichtigste Veränderliche der Dichte ist. Zwischen Februar und März muss Mischung, d.h. Totalzirkulation möglich gewesen sein. Ob diese auch vollständig war, sieht man nicht bei der Temperatur, sondern bei der Leitfähigkeit. In Abbildung 9 wäre dies an senkrechten<sup>9</sup> Isoplethen erkennbar.

Am 9. Juli hatte die Oberfläche schon über 22°C, was bis gegen Ende August dauerte. Als grosser Unterschied zu früheren Jahren dauerte es bis in den August, bis die Temperatur in der grössten Tiefe wieder über 4°C stieg. Die Zirkulationshilfe erledigte dies früher schon bis zum April. Im Dezember betrug diese Temperatur 4.27 °, im Vorjahr waren es schon im November 4.95°. Dies beeinflusst die Schichtungsstabilität, respektive die Wahrscheinlichkeit zu einer folgenden Totalzirkulation. (siehe Brunt-Väisälä-Periode auf Seite 25) . Wenn die Temperatur in der grössten Tiefe zu wenig steigt, so kann im folgenden Frühling eine Totalzirkulation ausbleiben. Dies war beim Bodensee nach der Seegröfni 1963 für mehr als 2 Jahre der Fall.

Die 5°C Linie zeigt von Juli bis September eine kleine Unregelmässigkeit, indem sich das Wasser in 15-17 m Tiefe abkühlen soll. Ohne horizontale Bewegungen des Wassers (interne Seiches)<sup>10</sup>, die kühleres Wasser an diese Stelle schieben, könnte dies nicht erklärt werden.

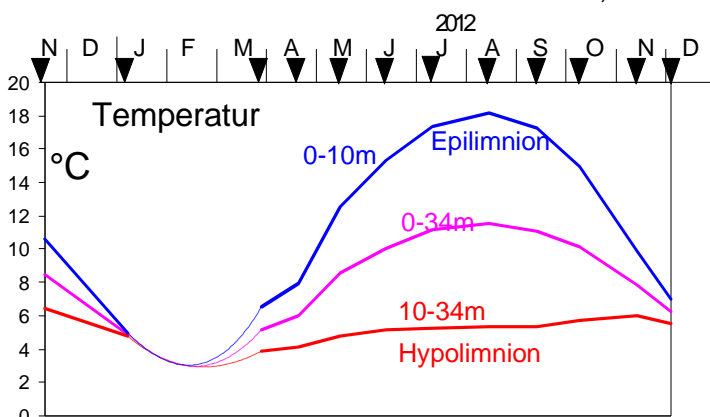


Abb. 3.: mittlere Temperatur

Abbildung 3 zeigt den volumengewichteten<sup>11</sup> Temperaturverlauf in zwei verschiedenen Schichten. Die gestrichelten Linien zeigen einen möglichen Verlauf im Winter. Eine gerade Verbindung wäre sicher falsch. Zur Zeit der Mischung fallen die drei Kurven zusammen.

Der Temperaturverlauf folgt der Sonne. Der grösste Teil des Wärmegewinns kommt über die Oberfläche in den See und stammt aus der direkten Einstrahlung, resp. der Strahlungsbilanz. Mit Bächen und

auch den Zuflüssen aus Kühlwasserrückgaben läuft nur ein kleiner Teil der Wärme tiefer in den See. Ein noch kleinerer Teil fliesst von unten in den See, wobei die Geowärme (aus dem Zerfall radioaktiver Stoffe im Erdkern und Mantel) und der Heizwert der sedimentierten Algen etwa gleich viel beitragen. (im Kreuztrichter des Vierwaldstättersees). Weil der Pfäffikersee flacher ist und die Messreihen kürzer sind, dürfte es schwierig werden, diese Werte auch für den Pfäffikersee zu bestimmen. Die weitere Auswertung der Temperatur auf Eddydiffusion und Schichtungsstabilität ist im Anhang S. 24. zu finden. Die Temperatur verschiebt nicht nur chemische Gleichgewichte, sondern hat auch Einfluss auf die Kinetik (RGT-, van't Hoff-Regel). Wobei es um Umhüllende von Enzymgruppen und Lebensgemeinschaften<sup>12</sup> geht.

<sup>8</sup> Wind hilft die Mischung anzustossen; zusätzlich sind lösliche Komponenten im Litoral hilfreich, die das Wasser beschweren.

<sup>9</sup> Siehe auch den senkrechten Verlauf der Isothermen in Abb. 2 im Epilimnion von September bis Dezember

<sup>10</sup> Eigentlich kommt der Ausdruck Seiche vom französischen sec (trocken), dem Trockenfallen der Ufer beim Schwappen des Oberflächenwassers

<sup>11</sup> Siehe Anhang. Seite 25

<sup>12</sup> Die Michaelis-Menten-Kinetik bezieht sich auf einzelne Enzyme. Arten sind stenöker und zeigen grössere Gradienten. Statt einer Verdoppelung der Geschwindigkeit für 10°C nur pro 20 bis 30°C.

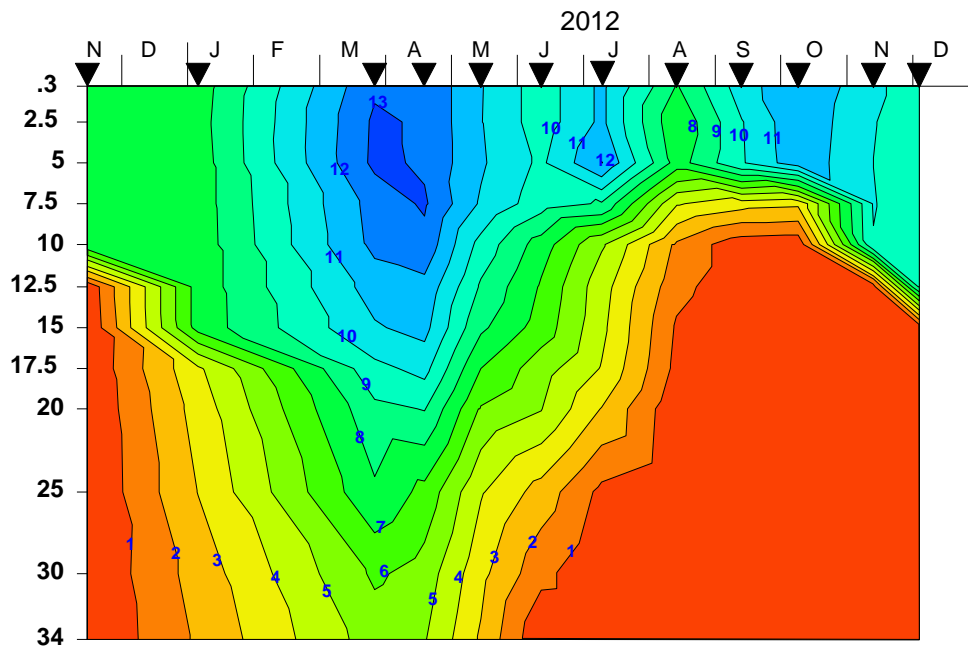


Abb. 4.: Sauerstoff [mg/l]

Der Sauerstoff zeigt das übliche Bild einer Anreicherung über den Winter<sup>13</sup> und einer Zehrung im Sommer, sowie das bisher für den Pfäffikersee in der Tiefe unübliche Bild, dass die Anreicherung nicht mehr beinahe bis zur Sättigung reichte. Dies ist die Folge, dass die Zirkulationshilfe abgestellt wurde. In der Tiefe reichte es nur noch zu 5.5 mg/l statt mehr als 10 mg/l im Frühling 2011, dafür waren die Konzentrationen in weniger tiefen Schichten etwa höher. Die grosse rote Fläche zeigt, dass dort zwar der Sauerstoff keine Ausschläge machen kann, da nicht mehr vorhanden, dafür werden die Redoxprozesse mit anderen Parametern ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ )) fortgesetzt. Vergleich der Sauerstoffzehrungen 2011 und 2012 siehe Rest- $\text{O}_2$ .

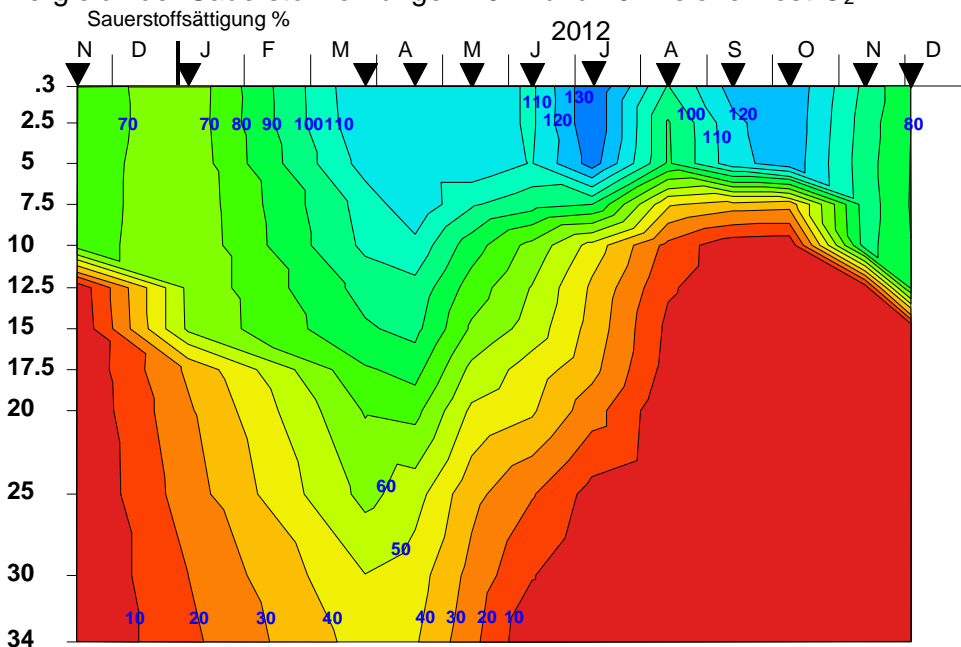


Abb. 5.: Sauerstoffsättigung %

Die Sauerstoffsättigung<sup>14</sup> zeigt keine grossen Unterschiede zur Konzentration. Es wird höchstens klar, dass im Juli an der Oberfläche Übersättigungen vorhanden waren. Dies kann zu Schwierigkeiten bei Fischen führen. Wenn wirkliche Gas-Übersättigungen inklusive dem hydrostatischen Druck vorhanden sind, kann dies zur Gasblasenkrankheit<sup>15</sup> führen. Ich habe vor Jahrzehnten von

<sup>13</sup> Kaltes Wasser löst mehr Sauerstoff als warmes.

<sup>14</sup> Die Sauerstoffsättigung bezieht sich auf die Seeoberfläche und den mittleren Luftdruck der betreffenden Meereshöhe nach der vereinfachten Formel von Schmassmann.

<sup>15</sup> Die Gasblasenkrankheit betrifft üblicherweise den Stickstoff, der langsamer ins Blut geht als der Sauerstoff.

einem solchen Fall am Sempachersee erfahren, aber damals waren die Jungfische eingesperrt und konnten nicht in die Tiefe ausweichen. Schuld am Massensterben war also nicht die Übersättigung, sondern der Berufsfischer, der gebastelt hatte. Übersättigungen mit Sauerstoff habe ich im Greifensee vor Jahren gesehen. Das Wasser wird dann weiss vor lauter kleinster Sauerstoffbläschen. Die Bestimmung mit einer Sauerstoffsonde wird dann unmöglich. Die Elektrodenfläche wird von Gasblasen besetzt und damit für die Messung „verstopft“. Die einzige vernünftige Variante ist die Winkler-Methode, aber auch diese macht Schwierigkeiten, in dem sich die Flaschen weigern, ganz gefüllt zu werden. Übrigens braucht die Blasenbildung ausser einer happigen Übersättigung<sup>16</sup> noch einen Auslöser; bei einem Bierglas kann dies ein Kratzer im Glas sein, im See wirken Algen als Kondensationskeime.

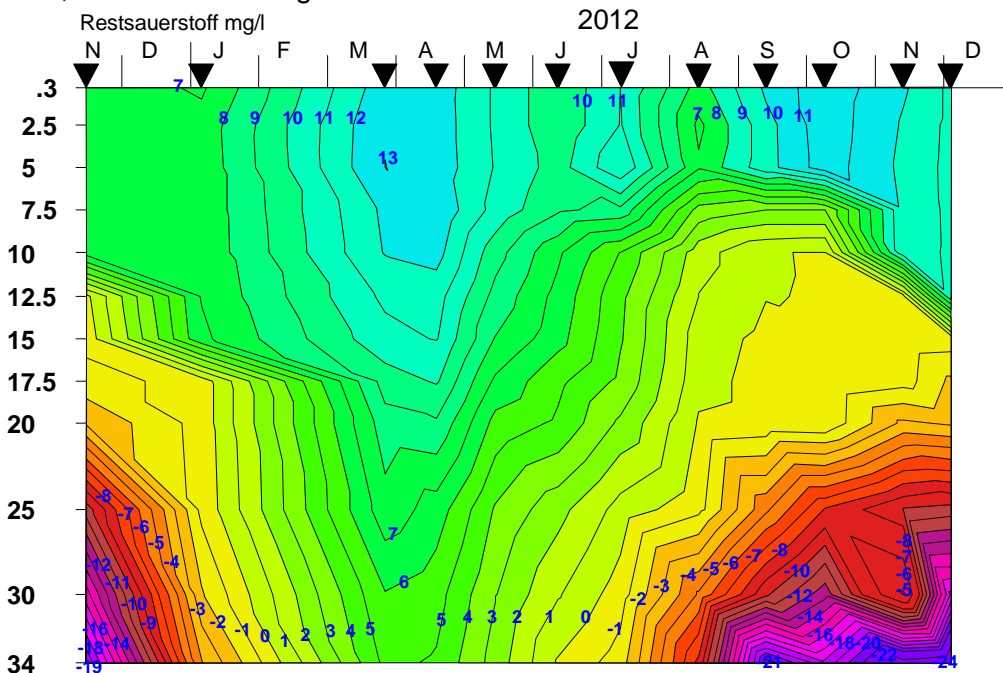


Abb. 6.: Restsauerstoff [mg/l]

Die grosse Sauerstoffdynamik, die die Folge einer grossen Kohlenstoffdynamik<sup>17</sup> ist, zeigt, dass die Sanierung des Pfäffikersees noch weit entfernt ist.

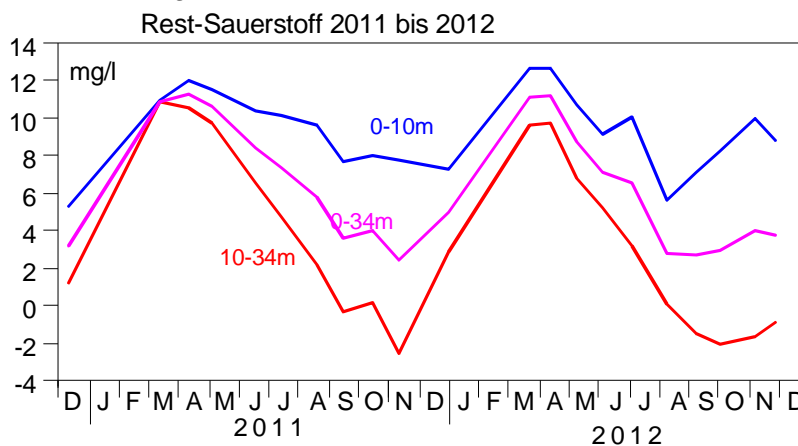


Abb. 7.: volumengewichteter Rest-Sauerstoff

Ein möglicher Zielzustand wären mindestens 6 mg Sauerstoff<sup>18</sup> jederzeit und überall, aber das Kriterium der Naturverlaidung der Felchen ist umfassender. Es umfasst zusätzliche Anforderungen ans Seesediment: die Sauerstoffzehrung, hauptsächlich der Schwefelwasserstoffgehalt, darf nur so gross sein, dass die natürliche Nachlieferung von Sauerstoff aus dem Wasser für die Kompensation reicht.

Der Restsauerstoff ist der Sauerstoff abzüglich aller reduzierter Verbindungen ( $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,

$\text{H}_2\text{S}$  und Methan). Beim Pfäffikersee umfasst dieser Parameter maximal ein Bereich von 13.65 mg/l (Sättigung bei 0°C und 537 müM) bis zu weniger als -45 mg/l (schlechteste Möglichkeit: aller Stickstoff und aller Schwefel vollständig reduziert und zusätzlich 8 mg/l Methan<sup>19</sup> vorhanden). Der

<sup>16</sup> 200% und mehr

<sup>17</sup> Algendynamik

<sup>18</sup> Resp. 4 mg pro Liter, wie es in der Gewässerschutzverordnung gefordert wird.

<sup>19</sup> Dieser Wert kann sehr hoch werden, wenn ältere Sedimentschichten aktiviert werden. Allerdings ist dieser Vorrat endlich. In früheren Jahren wurde er durch die Zirkulationshilfe in die Luft geblasen.



Unterschied zu 2011 ist statt mehr als 10 mg/l, nur etwas mehr als 5 mg/l im März über Grund. Das ist die Folge der eingestellten Zirkulationsunterstützung. Im Oktober war die Zehrung in 15 m Tiefe etwas langsamer.

Die Zunahme des Sauerstoffs war in beiden Wintern gleich. Aber 2011 wurde eine Mischung erreicht und 2012 nicht. Die weiteren Unterschiede sind marginal. Für das Hypolimnion war der Startwert im März 2012 etwas tiefer und die Abnahmerate im Lauf des Sommers war exakt dieselbe. Der einzige Unterschied ist der Knick im Oktober 2011, der aber nicht real sein muss. Man könnte auch mit Hilfe dieser reduzierten Substanzen die Auslenkung vom chemischen Gleichgewicht berechnen.

Beim Rest-Sauerstoff könnte man auch noch Sulfat und Nitrat als Sauerstoffäquivalente addieren und käme dann auf die Summe der veratembaren Moleküle (ausgedrückt als Sauerstoff) im Wasser. Allerdings beträfe dies nur die Bakterien ohne höhere Organismen.

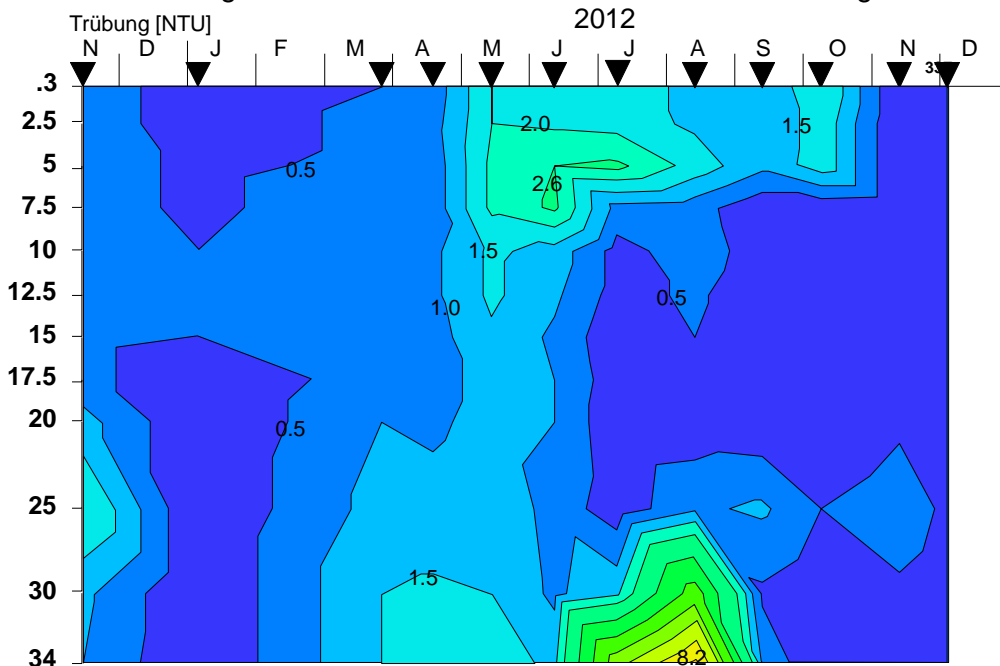
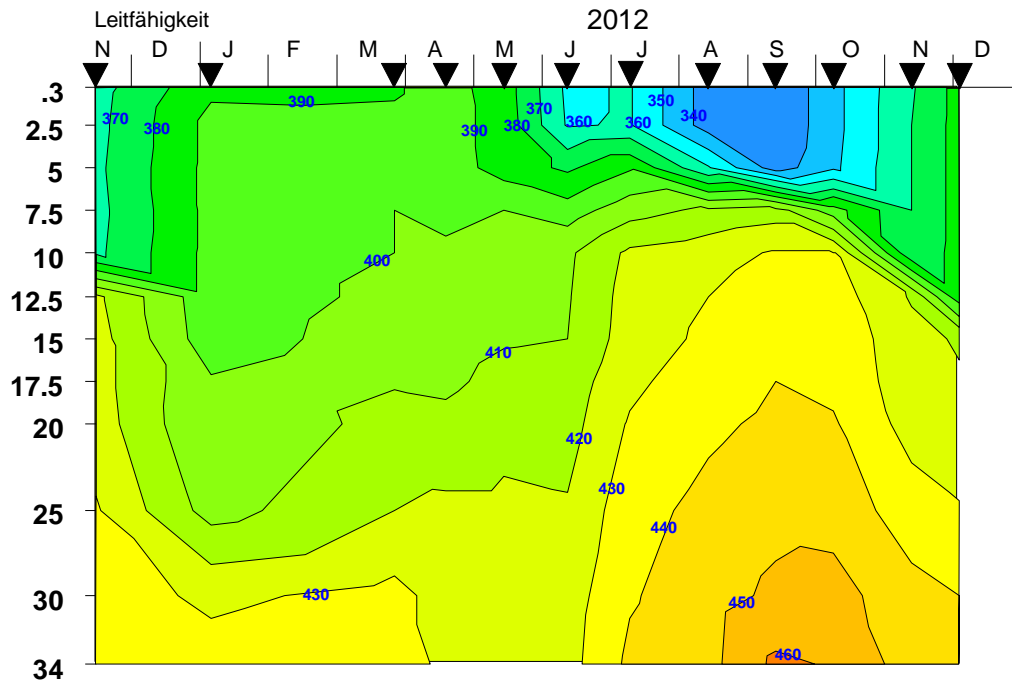


Abb. 8.: Trübung [NTU]

Trübung in Nephelometric turbidity unit (NTU). Gemessen wird die Streustrahlung quer zur Einfallsrichtung des Lichts. Der Messwert ist nicht linear abhängig von der Menge und Grössenverteilung suspendierter Stoffe. Ein Liter Wasser mit einem 5 g schweren Fisch ist durchsichtig, was bei 5 Gramm püriertem Fisch nicht stimmt. Die grössten Trübungen fanden sich in der Schicht der grössten Algendichte (im tieferen Epilimnion) 2.6 NTU und im tiefen Hypolimnion 8.2 NTU statt. Was wirklich sehr trübe ist. Wenn nur die unterste Probe so trübe wäre, käme der Verdacht auf, dass da im Schlamm gewühlt worden sei. Nun ist aus Messungen mit Sedimentationsfallen bekannt, dass ein „Trichtereffekt“ wirken kann. Damit wird die Fokussierung von sedimentierendem Material an der Stelle der grössten Tiefe beschrieben. Im August befand sich in 30 m Tiefe das Nitritmaximum. Hätte man auch Messungen bei tauender Eisdecke gemacht (die Probenentnahme ist lebensgefährlich), so wären dort noch wesentlich höhere Trübungswerte erwartet worden. Dort wird die Schichtung auf kleinem Raum extrem stabilisiert<sup>20</sup>. Die Werte lagen mehrheitlich tiefer als Eins. Trübung ist nach Werner Stumm ein aktueller Parameter. Zur Definition siehe Stummologie im Anhang S. 26.

<sup>20</sup> In der Arktis ist dies der Teil-Lebensraum („soft ice“), von dem zeitweise der ganze Rest lebt. Er ist an der Untergrenze des Packeises und besteht teilweise aus Brackwasser.

Abb. 9.: Leitfähigkeit  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 

Die elektrolytische Leitfähigkeit<sup>21</sup> wird verursacht durch die Beweglichkeit der gelösten Ionen im Wasser. Weil die Viskosität (Zähigkeit) des Wassers mit steigender Temperatur abnimmt, steigt auch die Leitfähigkeit. Diese Abhängigkeit ist seit langem bekannt und wird kompensiert, indem man die Leitfähigkeit bei einer normierten Temperatur von 25°C angibt. Bei einer annähernd bekannten Zusammensetzung der Ionen kann auf deren Konzentration geschlossen werden. Der Pfäffikersee gehört zu den Hydrogenkarbonat Gewässern. Die Kationen sind in absteigender Reihenfolge: Calcium, Magnesium, Natrium und Kalium. Schwermetalle wie Eisen und Mangan sind nur in speziellen Fällen in wesentlichen Mengen beteiligt. Ammonium tritt im anoxischen (Sauerstofffreien) Wasser auf. Bei den Anionen spielt das  $\text{HCO}_3^-$ -Ion die Hauptrolle. Die anderen Anionen sind: Sulfat, Chlorid (Strassensalz, Ionentauscher) Borat (Düngung, Waschmittel), Nitrat, Nitrit, Phosphat, etc. Unter Vorbehalt<sup>22</sup>, kann aus der Leitfähigkeit auf den Kohlenstoffwechsel im See zurückgeschlossen werden. Wenn die Algen  $\text{CO}_2$  aus dem Wasser holen, verschiebt sich das chemische Gleichgewicht so, dass gleichzeitig pro Mol assimilierten  $\text{CO}_2$  ein Mol Kalk ausfällt, der in die Tiefe sinkt und unten teilweise aufgelöst wird. Der Lücke der Leitfähigkeit von 32  $\mu\text{S}/\text{cm}$  im Epilimnion entspricht demnach nach einer kurzen Verzögerung (der Sedimentationszeit) einer Anreicherung im Hypolimnion von 40.5. Bei den volumengewichteten Mittelwerten fehlen oben 25  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , die unten einen Zuwachs von zirka 40  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ergeben<sup>23</sup>. Dies kann nur erklärt werden, indem im Hypolimnion auch ältere Sedimente betroffen sind. Dies ist ein Indiz für eine fortschreitende Sanierung.

Aus den Leitfähigkeitsisoplethen wird ersichtlich, dass die Frühlingszirkulation offensichtlich keine vollständige Mischung erzielte. Das Wasser wurde zwar zwischen oben und unten vollständig getauscht, aber Lösungsprozesse müssen schneller gewesen sein. Die Leitfähigkeit ist ein integrierender<sup>24</sup> Parameter.

<sup>21</sup> Gemessen in Mikro-Siemens pro Zentimeter (Siemens = reziproke Ohm)

<sup>22</sup> Das Verhältnis von Leitfähigkeit zu Bikarbonat ändert langfristig.- siehe Kreuztrichter und Greifensee.

<sup>23</sup> Die Leitfähigkeit ist eine linear additive Grösse; auch wenn man dies erst auf den zweiten Blick versteht.

<sup>24</sup> Siehe Stummologie im Anhang

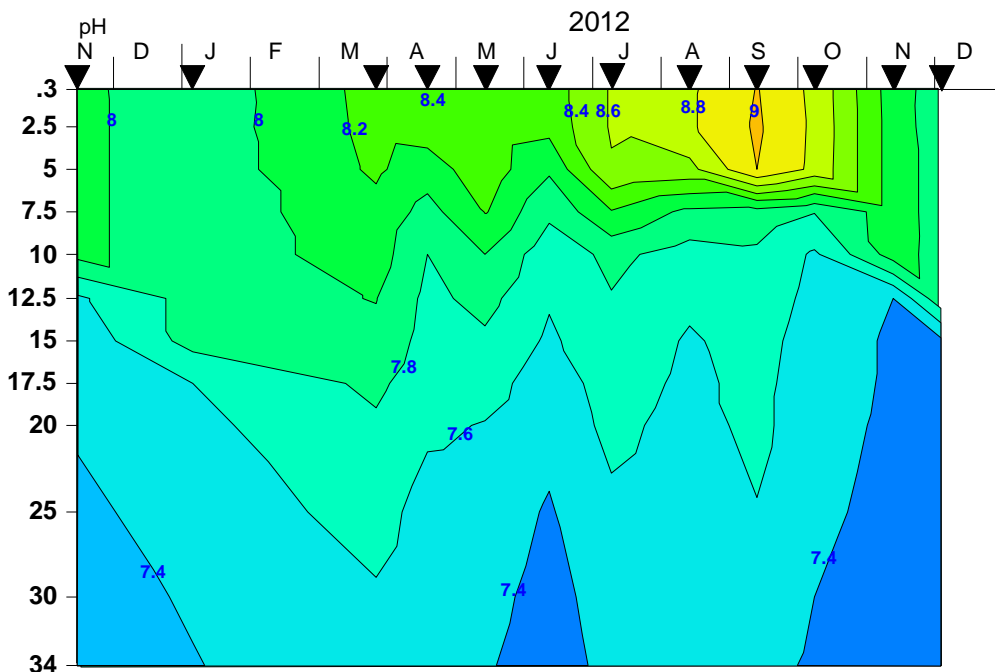


Abb. 11.: pH

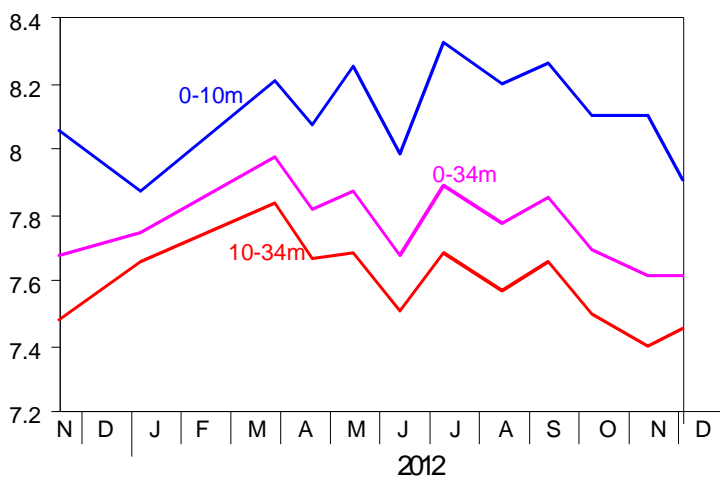


Abb. 10.: volumengewichtete pH-Mittelwerte

Der pH-Wert ist der negative dekadische Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration, also ein Mass für die Säure. Er bleibt das ganze Jahr geschichtet. Die Mittelwerte des pHs wurden über die Konzentration berechnet. Genau genommen handelt es sich allerdings um Aktivitäten. Arithmetische Mittelwerte über den pH wären geometrische Mittel der Konzentration. Der pH variierte an der Oberfläche zwischen 7.86 im Winter bis 9.01 im September. Dies ist ein recht hoher Wert. Viel höhere Werte werden nur noch von einigen Blaualgen (Cyanobakterien)<sup>25</sup> ertragen, respektive durch sie gemacht. Erfahrungsgemäss

sind dies *Microcystis aeruginosa*<sup>26</sup> oder *Anabaena flos-aquae* oder *Aphanizomenon flos-aquae*, alles „blüten“-bildende Organismen, wobei *Anabaena* eher für eine Vegetationsfärbung, als für eine Blüte verantwortlich ist. Die beiden letzten können zudem in ihren Heterozysten gasförmigen Stickstoff fixieren. In der Tiefe sank der pH Wert von 7.83 im März auf 7.4 im November.

Erwartet wird im Lauf des Sommers ein langsames Sinken (beim Abbau entsteht Kohlensäure), das durch Lösen des Kalks äusserst effizient gepuffert wird. Grosse Ausschläge sind also nicht zu erwarten. Die grossen Zacken im Hypolimnion im Sommer können von Temperaturdifferenzen<sup>27</sup> zwischen der pH-Sonde<sup>28</sup> und dem zu messenden Wasser stammen. pH-Elektroden sind recht gross und haben eine dementsprechend grosse Wärmekapazität, die bei Messungen in der Tiefe erst ausgeglichen werden muss. Die Höhe der Zacken sieht grösser aus, als sie wirklich ist (0.1). Trotz der ausgleichenden Wirkung von Mittelwerten bleiben die Zacken erhalten.

<sup>25</sup> Die Gattung *Planktothrix* (alt *Oscillatoria*) gehört nicht dazu.

<sup>26</sup> Ich vermute, dass *M.aeruginosa* auch Stickstoff fixieren kann. An den Orten, wo die Massenentwicklungen stattfinden, hat es dafür zu wenig fixierten Stickstoff. Sie schafft es offenbar ohne Heterozysten.

<sup>27</sup> Nach Werner Stumm kann die Differenz zwischen ausgeglichener und nicht ausgeglichener Temperatur bis zu 0.3 pH Einheiten ausmachen. Thermostatisierte Labormessungen zeigen diese Unart nicht. Sie haben dafür andere Mängel.

<sup>28</sup> pH-Elektroden sind Elektroden aus ionenselektivem Glas.



## Nährstoffe

Hier handelt es sich um Pflanzennährstoffe im Sinn von Freiherr Justus von Liebig<sup>29</sup>. Üblicherweise sind dies NPK<sup>30</sup> (S, Si, Ca, Mg, B, Fe, Mn, V, Mo, etc.). Wegen der guten Löslichkeit des Kaliums in Wasser, ist dieses nur an Land ein Problem. Mangelnde Nährstoffe (Dünger) werden auf den Feldern rasch erkannt (z.B. Bor<sup>31</sup> bei Zuckerrüben) und dann prompt nachgereicht. Nach Redfield 1963 gibt es eine „Stöchiometrie“ der marinen Algen-Biomasse  $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P_1(S_1Fe_{0.05})$  (Diatomeen  $Si_{15}$ ). Das bedeutet, dass bei einem molaren Verhältnis von Stickstoff zu Phosphor von 16 : 1 die Algen optimal wachsen. Weiteres siehe limitierender Nährstoff S.20.

## Stickstoff

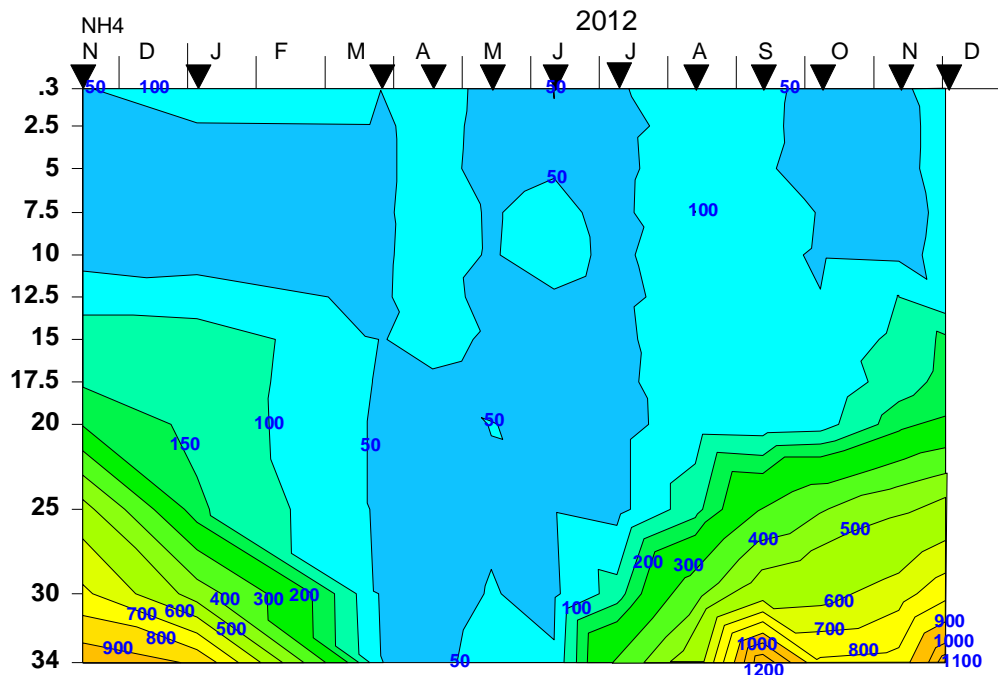


Abb. 12.: Ammonium-Stickstoff [ $\mu\text{g/l}$ ]

Ammonium ist neben den Aminen die tiefste Oxydationsstufe der Stickstoffverbindungen. Eigentlich würde man erwarten, dass Ammonium als bevorzugter Nährstoff gilt, was nicht stimmt. Nitrat wird durch die meisten Pflanzen (auch Algen) bevorzugt aufgenommen. Darauf beruht die Giftigkeit von Chlorat<sup>32</sup>. Die Ammoniumkonzentration zeigt zwei Maxima. Das grössere Maximum entsteht durch die Thermodynamik respektive mit Bakterien bei sehr tiefen Sauerstoffwerten. Das kleinere Maximum bei Sauerstoffübersättigung entsteht aus der Kinetik. Es ist andeutungsweise in den Isoplethen zu erkennen. Kinetisch heisst, dass bei viel Sauerstoff auch viele Algen vorhanden sind, von denen einige wegen hohen Alters sterben und abgebaut werden. Thermodynamisch bedeutet, dass zwar die Thermodynamik die Voraussetzung liefert; aber dann könnte man sehr lang warten<sup>33</sup>, bis die Prozesse wirklich ablaufen. Mit Bakterien geht's wesentlich rascher.

Als Stickstoffverbindungen kommen folgende Oxydationsstufen vor:  $\text{NH}_2\text{-R}$ ,  $\text{NH}_4\text{OH/NH}_3$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$  und  $\text{NO}_2$ , wobei die letzten zwei Stickoxyde mit Wasser Säuren bilden, die die Ionen Nitrit und Nitrat bilden. Lachgas und molekularer Stickstoff lösen sich als Gas im Wasser. Sauerstoff ist etwa doppelt so gut löslich wie Stickstoff.  $\text{N}_2$ -gesättigt mit Luft ist das Wasser bei 20° mit 14.5 mg/l, bei 10° 17.35 und bei 0° 21.7mg/l. Lachgas ist etwa 70 mal besser löslich als Stickstoff und Helium ist molar etwa zwei mal schlechter löslich als Stickstoff. Der Vollständigkeit halber wurde auch

<sup>29</sup> dem Erfinder der Fleischbrühe und dem Einführer der Mathematik in die Chemie(1803-1873).

<sup>30</sup> Also Stickstoff, Phosphor und Kalium

<sup>31</sup> Bei den Bodenseezuflussuntersuchungen (1985/86) hatte Walter Schnegg vom AfU-TG die Idee, Bor als Tracer für Waschmittel (Perborat als Bleichmittel) zu verwenden. Zugleich wurde es im Bodensee und Greifensee untersucht. Zudem eignet sich die Synthese des Reagens (Azomethin H) auf Bor als Übungsstück für Chemielaborantenlehrlinge. Ergebnis: Bor stammt mindestens so viel von Äckern wie aus Haushalten.

<sup>32</sup> Chlorat wird durch die Pflanzen mit Nitrat verwechselt.

<sup>33</sup> Bei Metalloxidationen bis zu Jahren.

Methan<sup>34</sup> in die Tabelle aufgenommen. Die Zahlen<sup>35</sup> der Tabelle sind angegeben in mg/l für den mittleren Luftdruck auf Meereshöhe (1013.25 hPa) für das jeweilige Reingas.

	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	NO	He	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	
20 °C	44.4	19.8	1238	63.06	1.560	1.628	24.99	mg/l
10 °C	54.2	23.7	1726	77.04	1.608	1.739	31.31	mg/l
0 °C	70.1	29.6	2535	98.36	1.685	1.964	41.41	mg/l

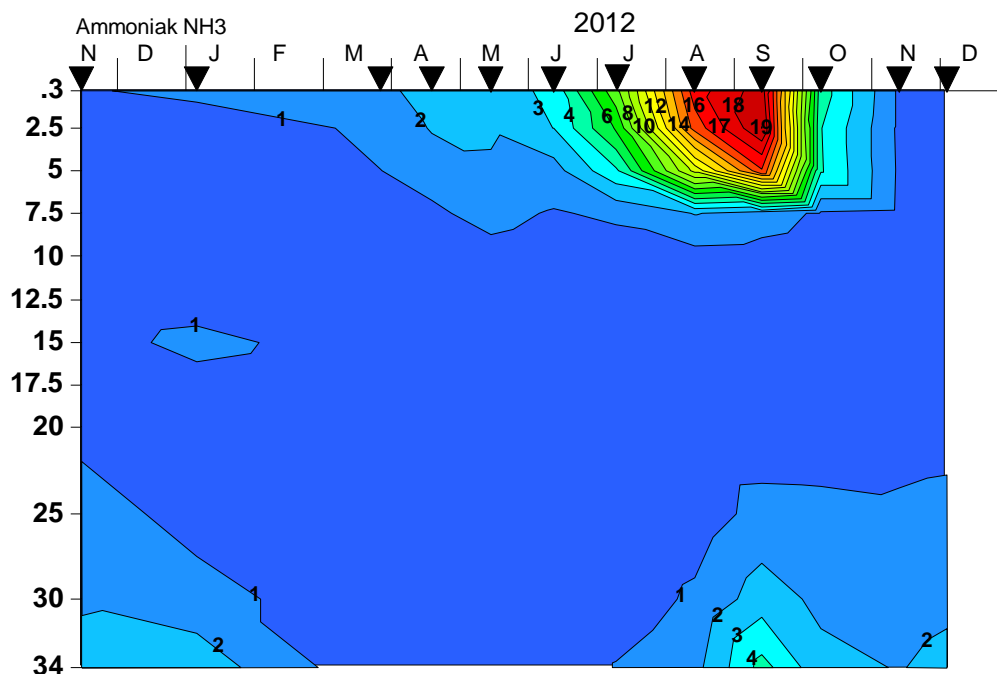


Abb. 13.: Ammoniak-Stickstoff (NH<sub>3</sub>-N µg/l)

Das Ammonium-Ammoniak-Gleichgewicht:  $\text{NH}_4\text{OH} \leftrightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$  ist abhängig vom pH (und der Temperatur). Je basischer, d.h. je höher der pH-Wert (und je höher die Temperatur) ist, desto weiter rechts, in Richtung Ammoniak, liegt das Gleichgewicht. Ammoniak ist ein potentes Fischgift (Wuhrmann und Woker 1953), während Ammonium kaum eine Rolle spielt. Das rote Gebiet bei den Isoplethen ist wirklich kritisch. Ungeladene Stoffe (Gase wie NH<sub>3</sub>) gehen wesentlich rascher durch Kiemen<sup>36</sup> ins Blut als Ionen. Darauf beruht mindestens teilweise die Giftigkeit von Ammoniak für Fische. Akut toxische Schwierigkeiten können sich beim Pfäffikersee nur im Herbst, bei beginnender Zirkulation ergeben, wenn sich Oberflächenwasser mit hohem pH mit Tiefenwasser mit viel Ammonium mischt<sup>37</sup>. Der EU Richtwert von 1978 liegt bei 4.1 µg/l NH<sub>3</sub>-N. Er berücksichtigt auch chronische Schäden. Mit 19 µg/l wurde er somit um das 4.6 fache überschritten. Da dies an einem Ort geschah, wo die Temperaturen für die Fische zu hoch waren, haben sich die Schäden in Grenzen gehalten. Berechnung siehe <http://www.hbuehrer.ch/Rechner/Ammonia.html> (d.h. von mir, Javascript aktivieren!, Datenbasis nach österreichischem Umweltbundesamt 1996).

<sup>34</sup> Als Faustregel bei der Methananalytik gilt: Helium ist in Wasser kaum löslich, hingegen Methan im Heliumkopfgas unendlich gut. Daraus resultiert im Kopfgas ein Überdruck.

<sup>35</sup> [www.hbuehrer.ch/Rechner/GasSaett.html](http://www.hbuehrer.ch/Rechner/GasSaett.html) CRC-Handbook for Physics and Chemistry

<sup>36</sup> Schliesslich ist der Gastransport der Zweck der Kiemen.

<sup>37</sup> Was in der Glatt schon zu Fischsterben führte, als der Greifensee sich so mischte (Thomas E.A.)

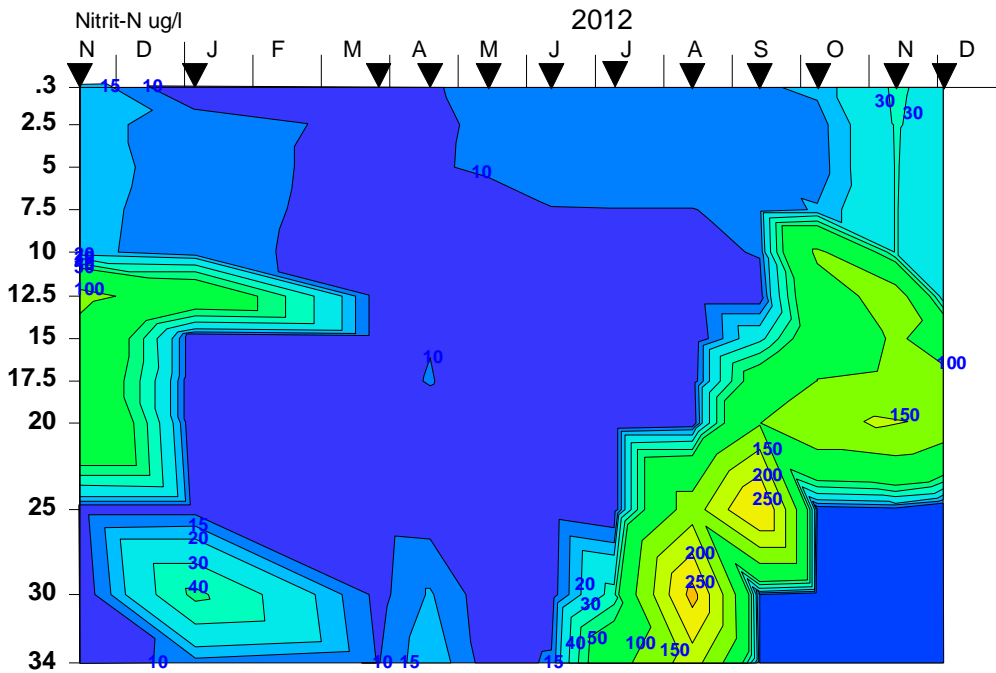


Abb. 14.: Nitrit-Stickstoff µg/l

Nitrit ist eine Zwischenstufe der Reduktion von Nitrat zu Ammonium, also der erste Schritt der Denitrifikation, der mit Nitrat-Reduktase katalysiert wird. Dieses Enzym<sup>38</sup> ist weit verbreitet. Im See führt das zu einer Nitritanreicherung im Hypolimnion, bevor das Nitrit weiter zu Lachgas, Stickstoff und Ammonium reduziert wird. Die Anreicherung findet man im Herbst in der Tiefe. Sie erreichte Werte von über 250 µg/l NO<sub>2</sub>-N (eidg. Abwasser-Richtwert 3000 µg/l, Deutscher Trinkwasser Grenzwert 150 µg/l). Am Ende der sauerstofflosen Zeit, wenn der See gemischt wird und wieder Sauerstoff in die Tiefe vordringt, findet der umgekehrte Prozess statt: aus Ammonium wird wieder Nitrat. Wobei aber andere Bakterienarten diese Prozesse katalysieren und kein molekularer Stickstoff entsteht. Das zugehörige Maximum findet man nur noch in 30 m Tiefe im Januar. Nitrit ist giftig. Dies spielt aber kaum eine Rolle, weil sich dort wegen Sauerstoffmangels keine höheren Organismen aufhalten. Es hat dort auch kaum Futter für Schleien<sup>39</sup>. Die beliebtesten Stellen bei Schleien waren Einleitungen von Rohabwasser. Aber diese Zeiten sind längst vorbei. Ein Fischer am Husermersee hat noch 1995 beklagt, dass der Dorfmetzger das Blut und die Schlachtabfälle nicht mehr in den Dorfbach schützte, seither habe er keine Krebse mehr im See. (Sprach's und ging die Reuse am Ende der Bootshabe heben, worin sich etwa 20 „keine Krebse“ befanden. Krebse sind offenbar erst dann Krebse, wenn sie das Fangmass erreicht haben.)

<sup>38</sup> Chemoautotrophe Bakterien, die diesen Prozess nutzen, gibt es zwar, aber sie spielen eine untergeordnete Rolle.

<sup>39</sup> Schleien können einige Zeit ohne Sauerstoff überleben.

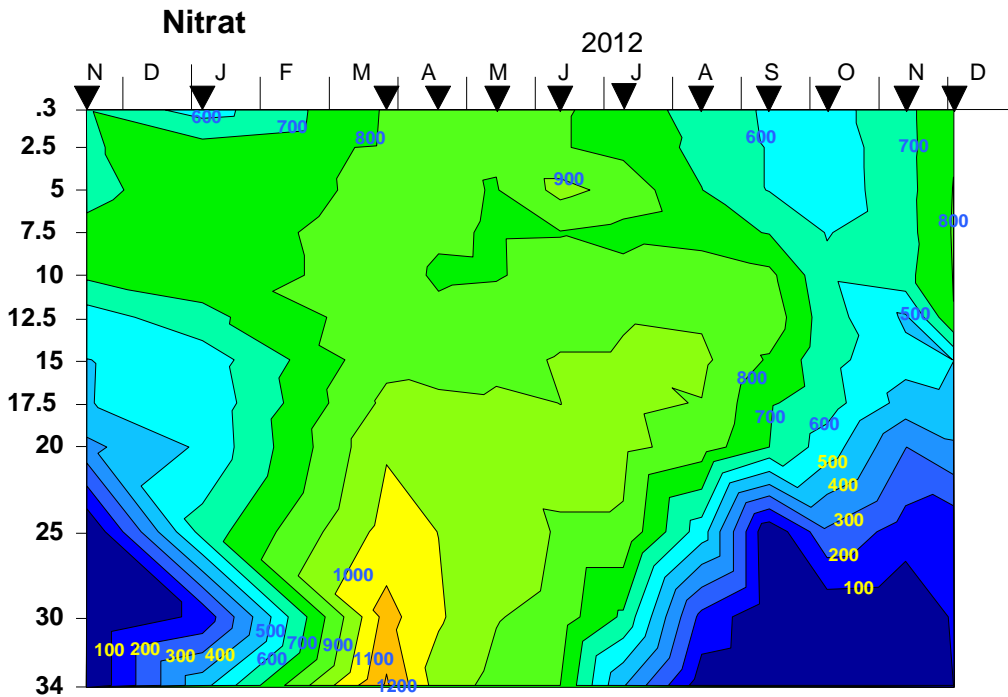


Abb. 15.: Nitrat-Stickstoff µg/l

Nitrat ist die höchste Oxydationsstufe des Stickstoffs; und damit die thermodynamisch stabile Komponente in Gegenwart von Sauerstoff. Nitratisoplethen zeigen zwei Typen von Löchern: das erste entsteht an der Nähe der Oberfläche durch Nährstoffassimilation der Algen. Das zweite in der Tiefe durch die Denitrifikation. Auch Nitratatmung führt zur Reduktion des Nitrats. Dabei wird Nitrat statt Sauerstoff als Elektronenakzeptor genommen. Verblüffenderweise läuft dies auch in Gegenwart von Sauerstoff. Dies ist zwar thermodynamisch möglich, aber energetisch schlechter.

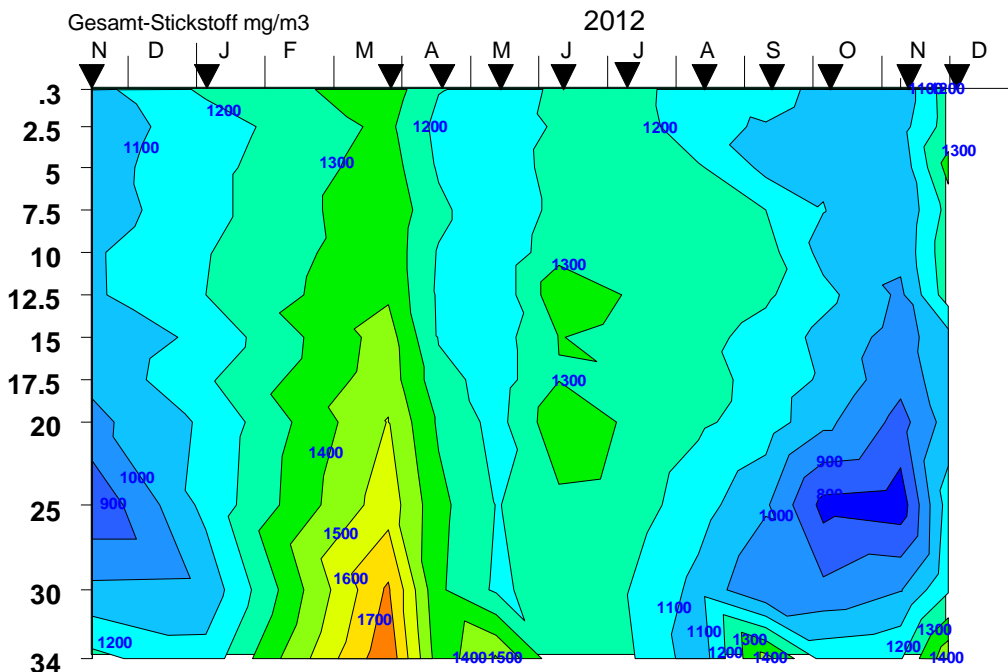


Abb. 16.: Summe der anorganischen Stickstoffverbindungen µg/l

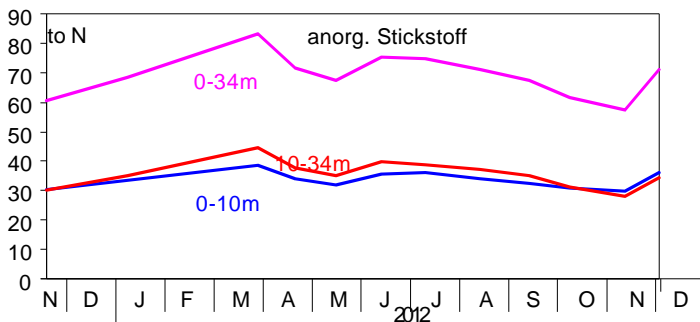


Abb. 17.: Summe der anorganischen Stickstoffverbindungen im See [to/See]

Um von diesen Redoxvorgängen unabhängig zu werden können Ammonium, Nitrit und Nitrat zur Summe der anorganischen Stickstoffverbindungen addiert werden und zeigen dann nur noch die Nährstoffaufnahme und die Produktion von N-Gasen. In der Darstellung der Isoplethen zeigt sich im März 2012 ein Zuwachs von zirka 22 t Stickstoff, der mindestens teilweise aus dem Sediment zu stammen scheint und sich im Laufe des Jahres mit Denitrifikation wieder verliert. Die

Denitrifikation ist in einem eutrophen<sup>40</sup> See mindestens so effizient wie in einer ARA.

Früher verliessen der überschüssige Stickstoff und Lachgas den See mit dem Blasenstrom der Zirkulationsunterstützung. Dieser Vorgang dürfte heute noch stattfinden, aber wesentlich langsamer sein. (Vergleiche mit der alten Bemerkung „der See rülpst wie 2000 Kühe“, ProPfäffikersee Tätigkeitsbericht 2004) Im See findet zwar eine Fixierung von gasförmigem Stickstoff statt (es sind immer entsprechende Bakterien vorhanden), verglichen mit der Denitrifikation spielen sie kaum eine Rolle. Seit der Erfindung der chemischen Fixierung des Luftstickstoffs, des Haber-Bosch-Verfahrens, steigen die Stickstoffkonzentrationen in unseren Seen. Als unterstes Element der Landschaft zeigen sie alle „Sünden“ im Einzugsgebiet. Stickstoffmangelsituationen sind wesentlich seltener<sup>41</sup> als früher. Im Jahre 2012 war das molare Verhältnis von Stickstoff zu Phosphor meist über Hundert, das heisst, dass Stickstoff nie das Wachstum limitierte.

## Phosphor

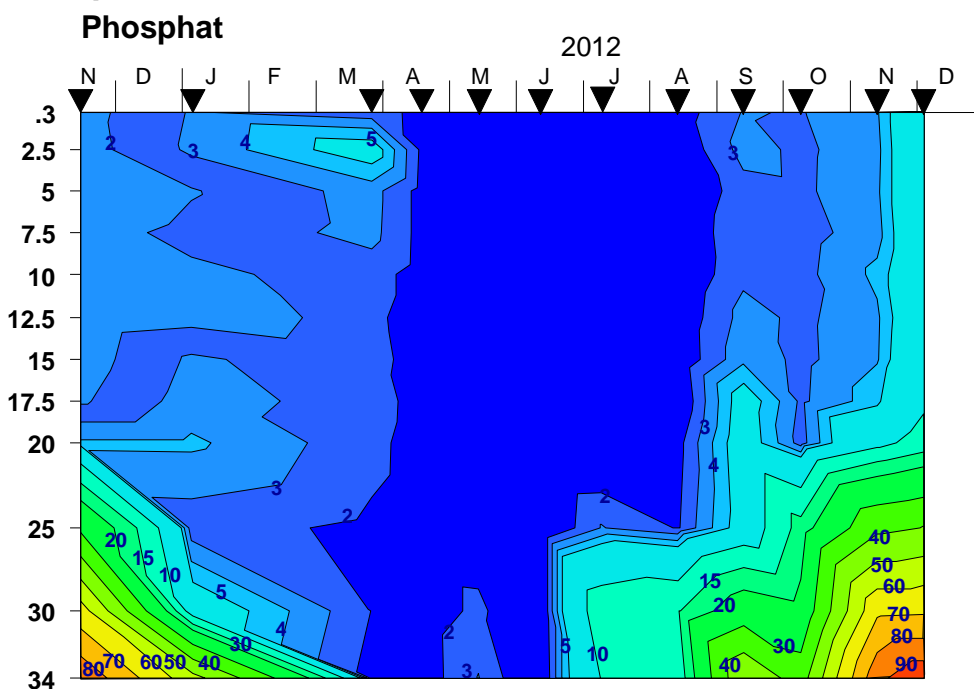


Abb. 18.: Phosphat-Phosphor (SRP) µg/l

Der See wurde durch Algen leer gefressen. Phosphat-P<sup>42</sup> ist in einem Fließgleichgewicht, das durch die Zehrung durch die Algen und durch die Freisetzung aus dem „bacterial loop“ entsteht.

<sup>40</sup> Je eutropher desto besser.

<sup>41</sup> Der oligotrophe Grundzustand (im vierzehnten Jahrhundert) hatte in jedem Herbst eine Stickstoffmangelsituation, bei der Nitratmangel die Stickstofffixierung triggert. Stickstoff wird in Seen schlechter rezirkuliert als Phosphor, daher gab es einen Stickstoffmangel.

<sup>42</sup> respektive genauer SRP: soluble reactive phosphorous, denn an der Molybdänblau-Reaktion, dem chemischen Nachweis, sind ausser dem ortho-Phosphat noch andere Phosphorverbindungen beteiligt

Theoretisch sind Werte von weniger als 0.01 mgP/m<sup>3</sup> möglich. Werte von mehr als Eins zeigen, dass die Algendichte nicht allzu gross gewesen sein kann.

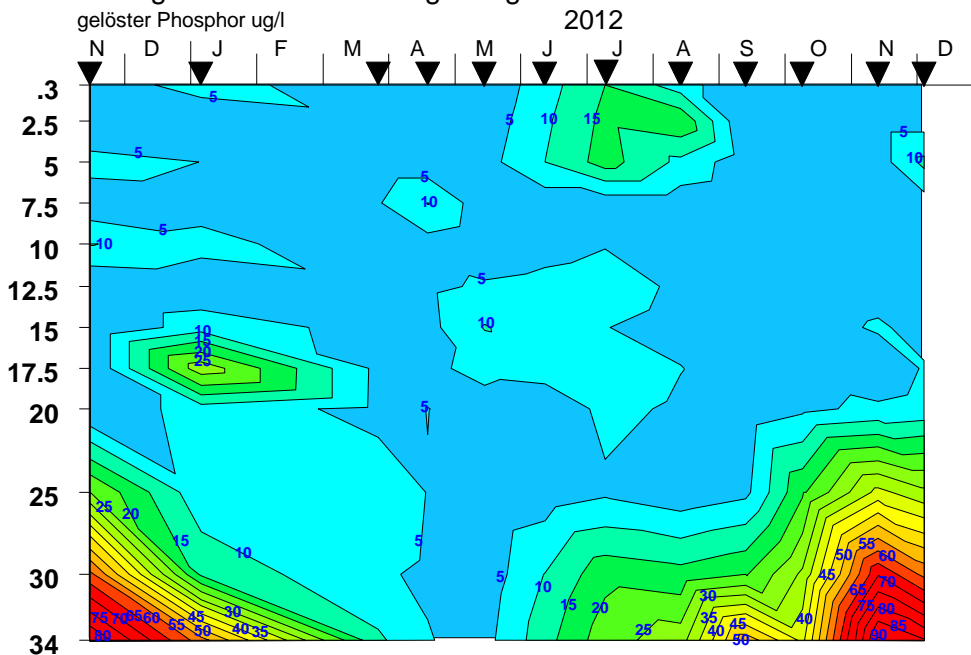


Abb. 19.: gelöster Phosphor [ $\mu\text{g/l}$ ]

Als Dünger ist der Phosphor im Filtrat eine zuverlässigere Grundlage als SRP. Zwar sind einige organische Phosphate, Polyphosphate oder Phosphonate nur indirekt verfügbar. Aber innerhalb kurzer Zeit ist dem abgeholfen. Einige Algen scheiden extrazelluläre Phosphatase aus. Wenn von Phosphor die Rede ist, handelt es sich immer um Phosphate oder Phosphonate und nie um Phosphor anderer Oxydationsstufen, wie Phosphorpentoxyd oder Phosphine (resp. Phosphane) oder reinen Phosphor (weisser, roter oder schwarzer). All diese Substanzen sind mehr oder weniger giftig. Phosphonate<sup>43</sup> sind keine Erfindung der Waschmittelindustrie. Auch Bakterien stellen Phosphonate her (etwa 1% des gesamten Bakterien-P). Phosphin (Monophosphan  $\text{PH}_3$ ) wird als Ursache von Irrlichtern in Sümpfen vermutet. Es ist selbstentzündlich<sup>44</sup>. Methan hat eine Zündtemperatur von 595°C.

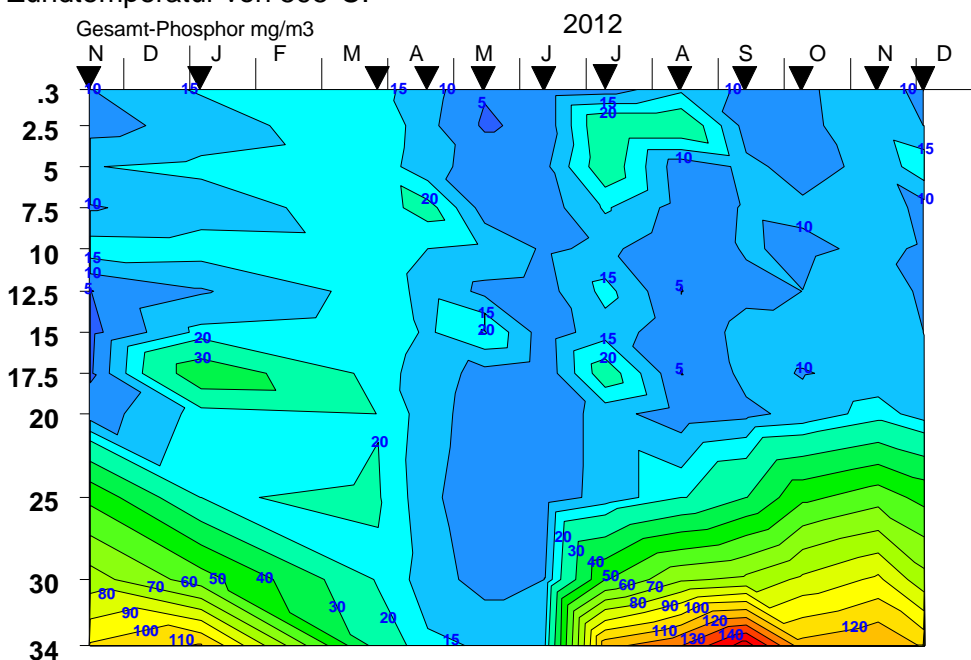


Abb. 20.: Gesamt- Phosphor  $\mu\text{g/l}$

<sup>43</sup> Phosphonate sind Phosphorverbindungen, in denen Phosphor-Atome direkte Bindungen mit Kohlenstoff-Atomen haben. (ohne Sauerstoff als Zwischenglied).

<sup>44</sup> Nach Sicherheitsdatenblatt 38°C, aber nur reinst, sonst schon tiefer. Phosphane sind giftig.



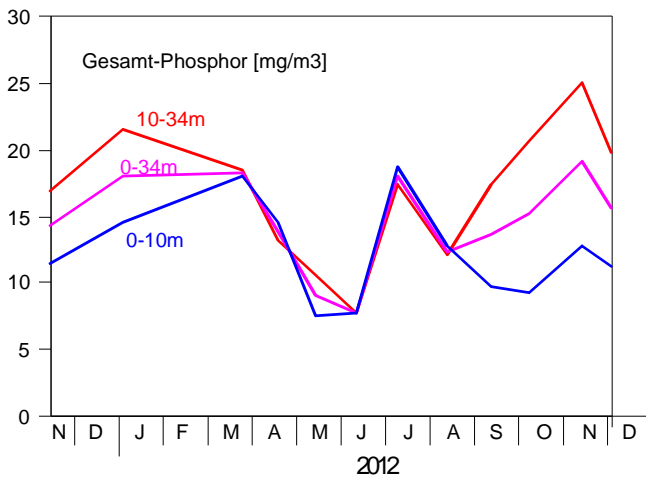


Abb. 21.: Mittelwerte Gesamt- Phosphor  $\mu\text{g/l}$

Das Sanierungsziel ist die Naturverlaichung der Felchen. Die aktuelle Minimal-Konzentration des Gesamtphosphors liegt nun unter  $10 \text{ mg/m}^3$ , d.h. etwas tiefer als 2011, womit aber offensichtlich das Sanierungsziel bei weitem noch nicht erreicht ist. Eine Übersetzung des Verlaichungskriteriums in eine Phosphorkonzentration ist nur mit einer dynamischen Modellierung des Pfäffikesees möglich; aber mit Sicherheit wesentlich tiefer als  $10 \text{ }\mu\text{g/l}$ . Die Anreicherung in den tiefen Schichten durch das „Ausbluten“ des Sediments ist etwas höher als letztes Jahr. Was vom Juni auf den Juli geschehen ist, ist fraglich. In diesem Monat kamen offenbar  $605 \text{ Kilogramm}^{45}$  Phosphor in den See, von denen

$330 \text{ kg}$  bis im August wieder verschwunden waren. Zur Sanierung ist zu bemerken, dass nur der Phosphor, der den See verlassen hat, nicht wieder wirken kann. Besonders kritisch ist hier das Anfahren der Zirkulation im Winter. Die Jahre vor der Zirkulationsunterstützung haben gezeigt, dass es der See recht gut schafft, den Phosphor im Winter loszuwerden.

Wie man aus den gewichteten Mittelwerten sieht, ist es schwierig „den“ Zirkulationswert des Phosphors anzugeben. Das ist eine Zahl zwischen  $18$  und  $7.6 \text{ mg/m}^3$ . Der Anstieg vom Juni zum Juli könnte mit lokalen Wolken erklärt werden.

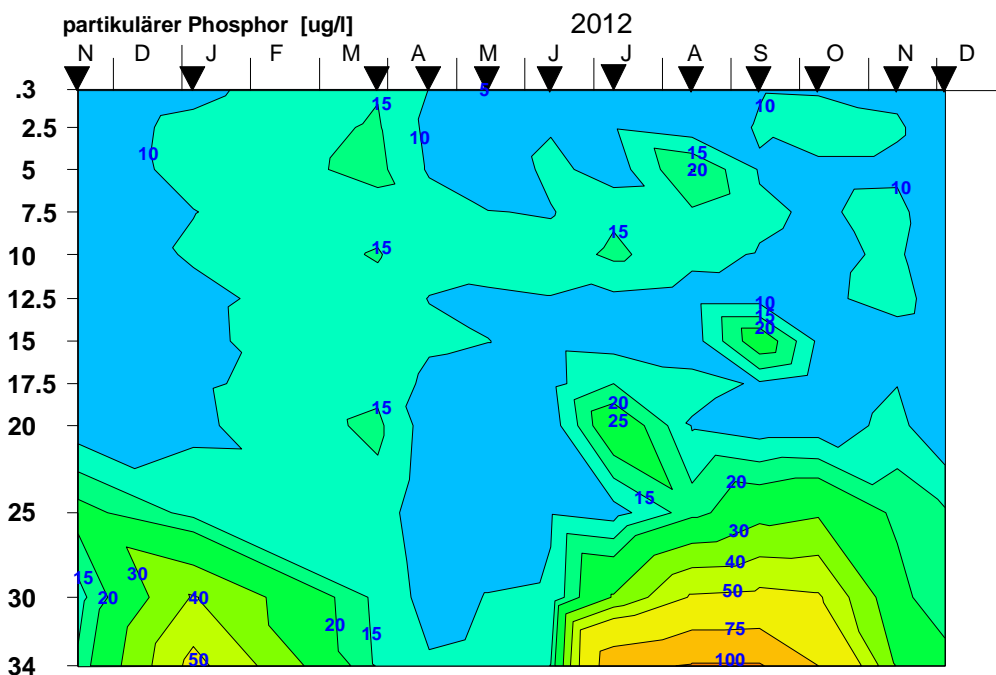


Abb. 22.: Partikulärer Phosphor  $\mu\text{g/l}$

Diese Komponente wird üblicherweise als Mass für Plankton verwendet. In der Nähe der Oberfläche zeigt sich im März ein Maximum, das gut mit dem Chlorophyll übereinstimmt, wie auch die späteren Werte bis im November. Die Januarspitze über Grund stammt wahrscheinlich aus dem Sediment. Was verblüfft, ist die gute Mischung im Märzprofil. In Trübstoffen kann Phosphor enthalten sein, was den Wert im August über Grund erklärt. Die Erhöhung des Gesamtphosphors im Juli findet sich auch hier.

<sup>45</sup> Annahmen: die See sei horizontal homogen und das vertikale Profil dürfe linear interpoliert werden.

## Chlorophyll

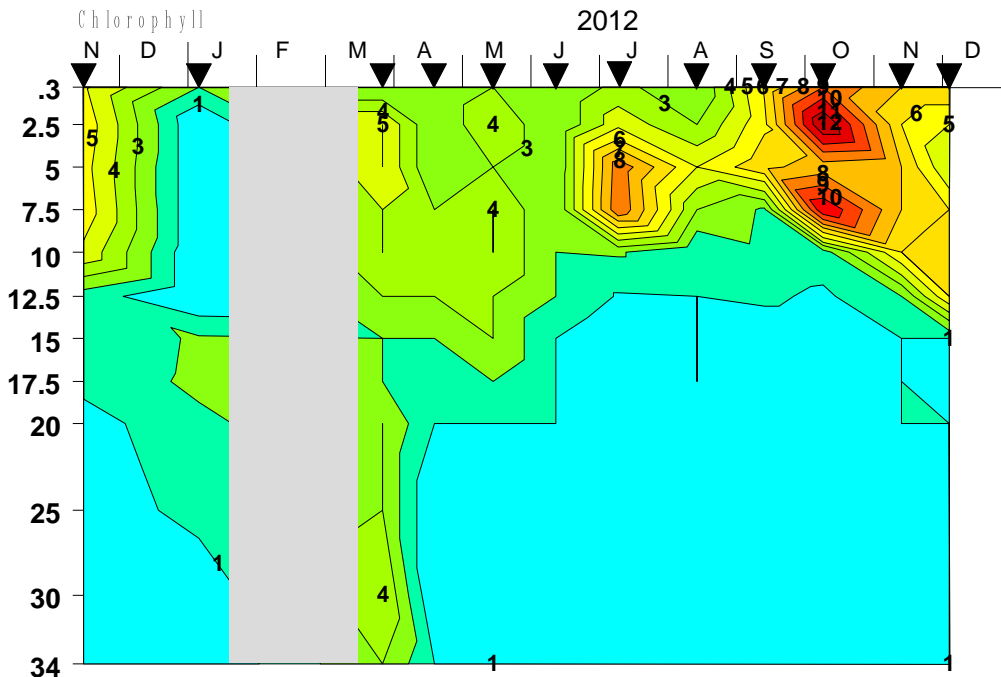


Abb. 23.: Chlorophyll k

Bemerkungen zum Chlorophyll, welches für das „Phäophytin“ korrigiert ist, vergleiche „Wanted for Invention of Pheophytine“<sup>46</sup>, was auch die absurde Lücke in 5m Tiefe im Oktoberprofil erklärt. Der Pfäffikersee gehört nicht zu den Schwarzwasserseen mit schwimmenden Inseln, wo nennenswerte Konzentrationen von Phäophytin erwartet werden. Die Original-Methodik wurde nur für solche Fälle beschrieben. An einigen Stellen im Robenhauserried mit unterirdischem freiem Wasserkörper wäre diese Methodik vernünftig.

Offenbar war im März eine intensive Zirkulation (auch ohne die Zirkulationshilfe) im Gange, welche die Algen bis in die grösste Tiefe verschleppte. Der Winter ist unbekannt (grau). Unter dem Eis können sich Werte bilden, welche die Sommermaxima um ein Vielfaches übertreffen. Die Algendynamik eines Sees kann mit nur einer Probe pro Monat und unvollständigen Tiefenprofilen nur lückenhaft erfasst werden. Minimale Verdopplungsraten können bei zentrischen Kieselalgen weniger als 4 Stunden<sup>47</sup> sein; wobei die Zell-Teilungen der Algen durch den Tag/Nacht-Rhythmus synchronisiert werden. Die langsamen werden auf eine Teilung pro Tag oder pro zwei<sup>48</sup> Tage kommen. Zudem ist bekannt, dass sich Planktonwolken bilden, deren Zusammenleben allerdings sehr kompliziert sein dürfte.

## Schwefel

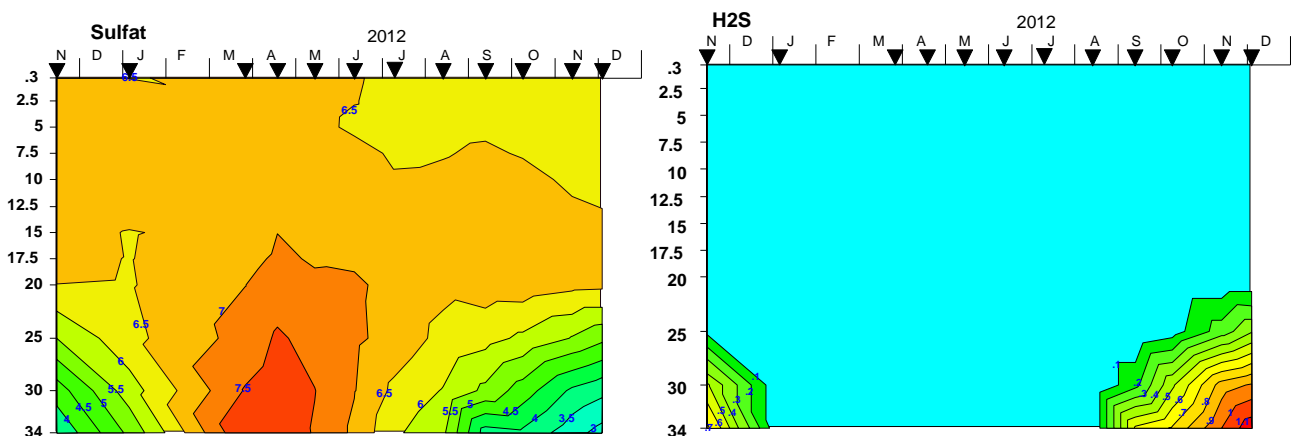
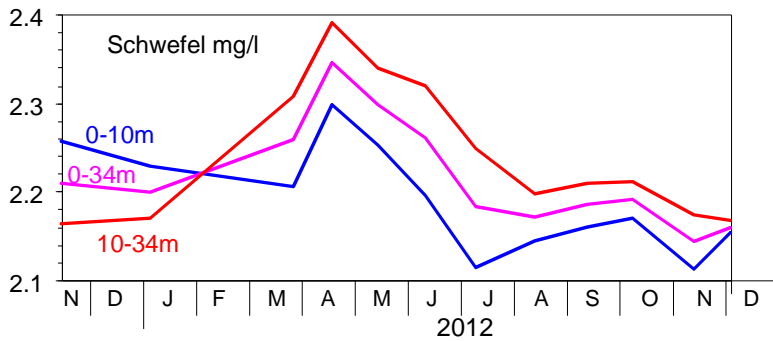


Abb. 24.: Schwefel (Sulfat und Schwefelwasserstoff, je mg/l)

<sup>46</sup> <http://homepages.eawag.ch/~buehrer/Pheophytin.html>

<sup>47</sup> HR. Bürgi und H. Bührer unveröffentlicht.

<sup>48</sup> Entweder reicht es für die Teilung in der ersten Nacht, oder dann wird wieder ein Teil der Biomasse veratmet und dann reicht es erst in der zweiten Nacht. Dieser Vorgang ist also quasi gequantelt.

Abb. 25.: Mittelwerte Schwefel (Summe Sulfat und H<sub>2</sub>S)

Schwefel ist bezüglich Oxydationsstufen mit SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, SO<sub>3</sub><sup>-49</sup>, S und H<sub>2</sub>S resp. S<sup>-</sup> etwas harmloser als der Stickstoff. Die chemischen Verbindungen mit Thiosulfat, Dithionit, S<sub>8</sub>, γS etc. sind es nicht, da ist die vollständige Stufenleiter von 6+ (SO<sub>3</sub>) bis 2- („Thioäther“ und H<sub>2</sub>S) vorhanden. In den Zellen ist er als Sulfat und Organo-Sulfid und Disulfid vorhanden (Schwefelbrücken). Schwefelbakterien leben

von den Oxydationsstufen und häufen elementaren Schwefel als Energie-Reserve an (z.B. *Beggiatoa alba*<sup>50</sup>). Beim Vergleich von Sulfat mit Schwefelwasserstoff fällt ins Auge, dass dort, wo im Sulfat die Minima, beim Schwefelwasserstoff die Maxima sind. Wenn Sauerstoff und Nitrat nicht mehr vorhanden sind, wird Sauerstoff aus dem Sulfat als Oxidationmittel gebraucht. Viele dieser Organismen bilden hübsche Farben: (Schwefelpurpurbakterien, *Lamprocystis roseo persicina*) und sind dann auch makroskopisch sichtbar. Sulfat stammt zur Hauptsache aus den Böden, das heisst aus Gips, welcher etwa 300-mal besser in Wasser löslich ist als Kalk. Die „dicksten“ Mineralwässer sind immer Gipswässer. Schwefelwasserstoff ist für höhere Organismen etwa gleich giftig wie Blausäure.

Bei der Summe von SO<sub>4</sub><sup>-</sup> und H<sub>2</sub>S als Schwefel ist zu sehen, dass sie kaum ändert; die Nulllinie liegt weit ausserhalb. Bemerkenswert ist, dass im 2011 die Epilimnionkonzentration über der Hypolimnionkonzentration lag und dass sie im letzten Jahr die Plätze tauschten. Zustände wie im Ritomsee mit eingeschichteten Bakterien dürfen im Pfäffikersee nicht erwartet werden.

Im Sediment spielt möglicherweise Schwefel eine wichtige Rolle im Rückhalt des Phosphors. Das erste Fällungsprodukt von Eisen mit Schwefel ist schwarzes amorphes FeS. Mit genügend Überschuss von Schwefel entsteht daraus kristalliner Pyrit<sup>51</sup> (FeS<sub>2</sub>), der das Eisen dauerhaft im Sediment blockiert. Damit fehlt nach der Zirkulation ein Teil des Eisens, das wieder zur Fällung des Phosphors gebraucht würde. Mindestens waren statistische Daten von Seen in den Appalachen mit und ohne Gips im Einzugsgebiet so zu interpretieren (SIL-Tagung).

## Methan

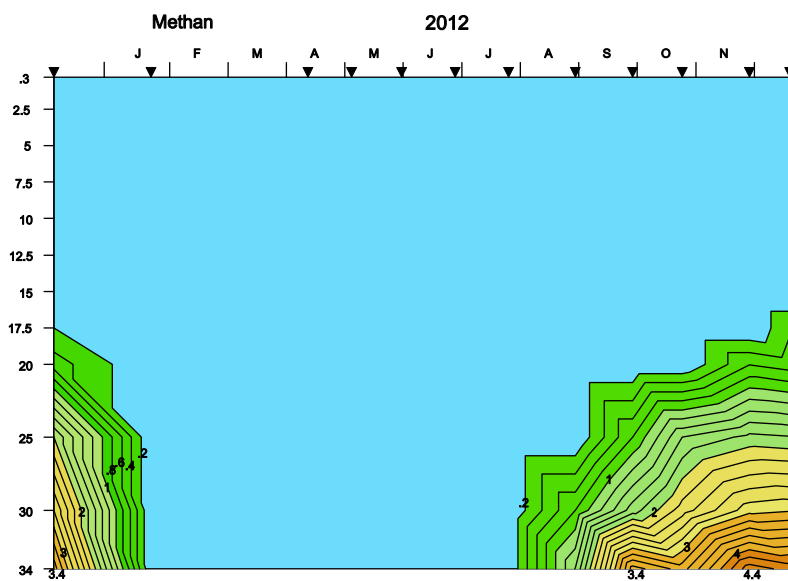


Abb. 26.: Methan [mg/l]

<sup>49</sup> Die schweflige Säure, das Hydrolyseprodukt von SO<sub>2</sub>, dem Verbrennungsprodukt von Schwefel.

<sup>50</sup> *Beggiatoa* kommt auch in oligotrophen Seen vor. Im Bodenseesediment, auf über 200 m Tiefe, sind kleine Gräben vorhanden in denen *Beggiatoa*matten beobachtet wurden. In Sedimentkernen wurden diese Organismen im Sediment beobachtet. Sie können kriechen und folgen der Sauerstoffgrenze. In kleinen Gräben lag diese Grenze nicht mehr im Sediment, sondern im Wasser. Der Sauerstoff war in dieser Zeit das ganze Jahr überall über 6mg/l.

<sup>51</sup> Ein Sedimentkern wird dadurch heller, ähnlich als ob dort Sauerstoff vorhanden wäre.

Zur Methananalytik siehe Tabelle beim Ammoniak S.10 . Beim anoxischen Abbau von organischer Materie bilden sich Methan und CO<sub>2</sub> zu gleichen Teilen als thermodynamisches Ziel. In früheren Jahren wurde das Methan mit dem Luft-Stickstoff der Zirkulationshilfe in die Atmosphäre „gestrippt“; wo es dann als „Klimagas“ wirken konnte. Nun wird das Methan zum grössten Teil im Wasserkörper abgebaut und braucht Sauerstoff in 20 – 34 m Tiefe. Dieser Verbrauch ist in der Komponente Rest-Sauerstoff (Seite 5) enthalten. Theoretisch könnte eine grosse Menge des organischen Kohlenstoffs im Sediment zu Methan und CO<sub>2</sub> disproportionieren, nur geschieht dies auch in geologischen Zeiträumen nur teilweise.

## Bakterien

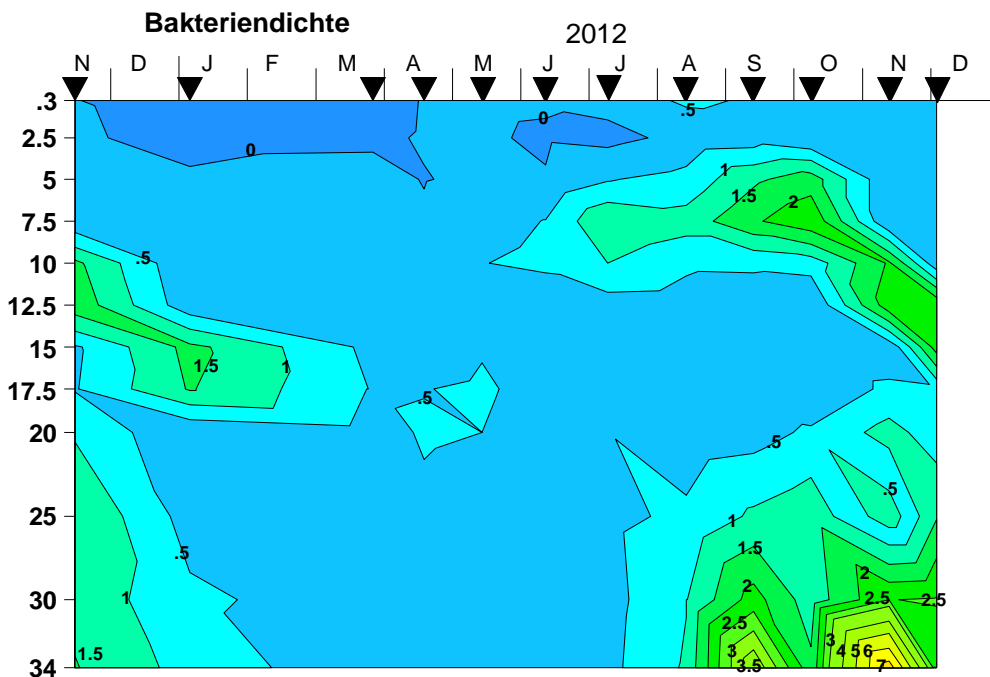


Abb. 27.: Bakteriendichte (mgO<sub>2</sub>/ld) oder in etwa 5 Millionen Bakterien pro ml.

Um einen alten Gedanken zu reaktivieren: Die Bakteriendichte lässt sich aus der Redoxdynamik herleiten. Bakterien sind in einem See immer vorhanden, wobei es Millionen pro Milliliter sind. Davon sind üblicherweise etwa 0.1% bis 5% züchtbar<sup>52</sup>. Ob sich der riesige Rest durch irgendwelche Vorbehandlungen reaktivieren lässt, ist unklar. Die Masse der einzelnen Zellen variieren von Kügelchen<sup>53</sup> mit 0.3 µm Durchmesser bis zu ausgewachsenen Stäbchen mit 0.7 µm Durchmesser und 2 µm Länge, wobei auch Flocken mit 100-300 Zellen vorhanden sind. Soviel zu Direktzählungen<sup>54</sup>. Die Dynamik lässt sich aus dem Restsauerstoff<sup>55</sup> herleiten: Wenn der Restsauerstoff nach dem Sedimentationsweg<sup>56</sup> abgeleitet wird, entsteht eine Darstellung der Umgebung der Bakterien, die auf toten Planktern sitzen, welche in die Tiefe sinken. Wenn man naheliegender Weise annimmt, dass sie daran beteiligt sind, kann man auf sie rückschliessen. Frei schwebende Bakterien sind seltener als diejenigen, die mitten in ihrem Futter leben.

Mathematisch heisst dies:  $B = k \cdot \left( g_1 \frac{\partial O'}{\partial z} \cdot \frac{z}{t} + g_2 \left| \frac{\partial O'}{\partial t} \right| \right)$ , also die partielle Ableitung vom Rest-

sauerstoff nach der Tiefe, mal die Sedimentationsgeschwindigkeit + den Absolutwert der partiellen Ableitung des Restsauerstoffs nach der Zeit. Die Gewichte  $g_1$  und  $g_2$  wurden je mit 1 gewählt. Das

<sup>52</sup> Je oligotropher, desto weniger wachsen davon auf hoch konzentrierten Nährböden.

<sup>53</sup> Solche Kleinst-Bakterien sind nicht irgendwelche Exoten, sondern meist Hungerformen von z.B. ordinären Pseudomonaden. Noch kleinere Bakterien sind intrazelluläre Parasiten. Die Minimalgrösse braucht das Kernäquivalent und einen Minimalsatz von Organellen und Enzymen, welche von Parasiten ausgelagert werden können..

<sup>54</sup> Ich bevorzuge immer noch meine Acridinorange-Methode bei pH 4.1 oder Sergei I. Kusnezow modif. Heinz Bachmann: Färbung mit Phenol/Eosin auf dem Filter, Entfärbung mit Durchflusszelle, trocknen, Filter aufhellen mit Immersionsöl

<sup>55</sup> O' = anorganischer, restlicher Sauerstoff; d.h. ohne den Anteil partikulär organischer Komponenten

<sup>56</sup> Der Sedimentationsweg ist in der Zeit/Tiefen-darstellung eine gekrümmte Linie: im Epi- und Hypolimnion steil, im Metalimnion flacher, vgl. Brunt-Väisälä-Frequenz. Sedimentierende Partikel werden durch das Metalimnion teilweise reflektiert.

heisst, dass Plankton in einem Tag nur 1 Meter sinkt. Dies stimmt mit den üblichen Modellannahmen<sup>57</sup> überein. Die Ableitung nach der Zeit wird absolut genommen, weil es hier<sup>58</sup> keine Rolle spielt, ob nun nitrifiziert oder denitrifiziert wird. Der erste Term hat zwar eine Tiefe als Mass, gemeint ist aber via Sedimentationsgeschwindigkeit auch eine Zeit. Also ist das Mass mg O<sub>2</sub> pro Liter und Tag.

Über den Umsatz pro Oberfläche<sup>59</sup> kann auf die Bakterienmasse geschlossen werden. Mit  $k = 3$  Millionen Zellen pro mg O<sub>2</sub> und Tag ( $\varnothing$  0.6  $\mu\text{m}$ , Länge 1.5  $\mu\text{m}$ ) oder mit 9 Millionen kleinen ( $\varnothing$  0.5  $\mu\text{m}$  Kokken) können die Bakterien berechnet werden. Für die kleinsten Bakterien kann keine Angabe gemacht werden, da es sich bei diesen meist um Ruhephasen handelt, die am Umsatz kaum beteiligt sind. Wenn die Bakterienbiomasse etwa denselben Umsatz aufweist wie das Phytoplankton, so ist ihre Biomassenmenge etwa ein Zehntel. Die Bakterien können auch direkt nach Kusnezow berechnet werden: pro 1mgO<sub>2</sub> pro Liter und Tag ist mit zirka 5 Millionen Zellen pro Milliliter zu rechnen.

Ein weiterer Ansatz ist: aus den Zahlen von Ammonium, Lachgas, Nitrit, Nitrat, pH, Temperatur und Sauerstoff lässt sich berechnen, um wie viel das chemische Gleichgewicht verfehlt wird. Dies wäre eine Angabe über mögliche Stickstoffumsetzer, aber leider nicht wann und wie viele. Ähnliches wäre auch für den Schwefelkreislauf möglich.

## Chlorid

Chlorid ist das Anion von Kochsalz. Es stammt aus Urin<sup>60</sup>, Strassensalz, Ionentauschern, Böden, Waschmittelhilfssubstanzen, Speisesalz etc. Das uralte Totalherbizid Chlorat<sup>61</sup> landete auch als Chlorid im Wasser. Chlorid wird von Organismen als Elektrolyt gebraucht. Aber die gebrauchten Mengen sind im Vergleich zur vorhandenen Menge so klein, dass Chlorid als konservative Komponente angesprochen werden kann. Die Ausschläge sind somit zum grössten Teil auf Durchströmungen zurückzuführen. Die Herkunft der Chloridspitze im März über Grund kann nur vermutet werden, da eine grosse Messlücke existiert. Das wahrscheinlichste sind 100 Tonnen Strassensalz<sup>62</sup> aus dem Chämtnerbach oder einem anderen Zufluss z.B. der ARA Pfäffikon, das mit zirkulierendem Wasser während dem Winter nach unten gelangte.

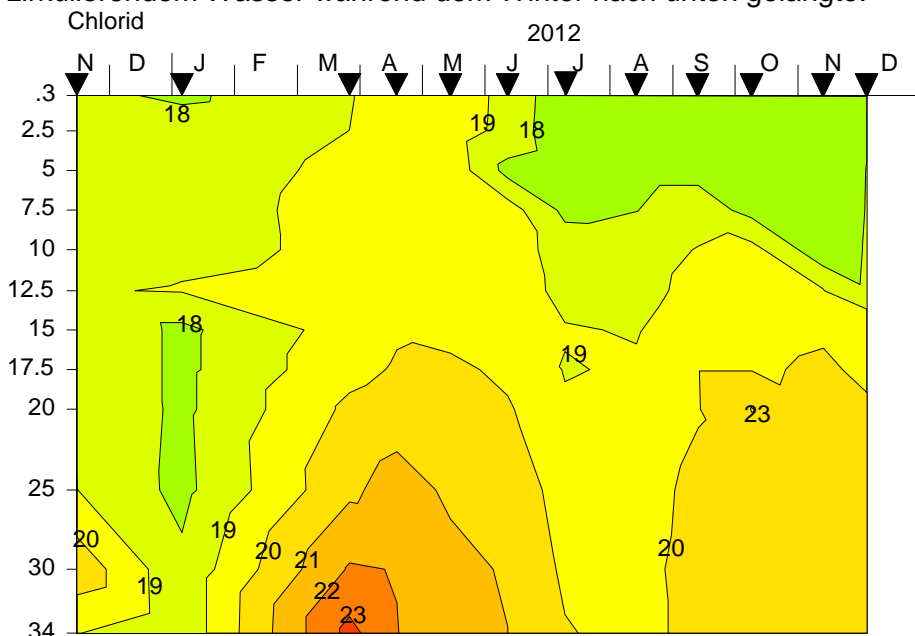


Abb. 28.: Chlorid [mg/l]

<sup>57</sup> 0.5 bis 0.8 m/d sind dort üblich. Gemessen wurden aber schon mehrere Meter pro Tag. Wobei nicht klar ist, worum es sich handelt. Sind es Gruppengeschwindigkeiten, oder einzelne Partikel oder ist es der so genannte „Lake Snow“, also sinkende Aggregate?

<sup>58</sup> Die Bakterienarten sind nicht dieselben.

<sup>59</sup> Oder via Gewicht<sup>0.75</sup>, dem Kleiber'schen Gesetz (statt Gewicht<sup>(2/3)</sup>, der Oberfläche)

<sup>60</sup> Urin enthält das meiste Chlorid aus dem menschlichen Stoffwechsel. Es wird in einer normalen ARA nicht entfernt und stört im Vorfluter kaum. Ein anderer Teil des Chlorids wird zum Schwitzen gebraucht.

<sup>61</sup> Chlorat ist seit längerem nicht mehr frei im Handel, weil Totalherbizide mit weit besserer Wirksamkeit vorhanden sind und weil böse Buben damit Sprengstoff fabrizierten.

<sup>62</sup> Als Natriumchlorid, zu einem Gehalt von 1100 Tonnen Chlorid, resp. zirka 1800 Tonnen Kochsalz

Ein erhöhter Wert<sup>63</sup> im Oktober in 20 m Tiefe hätte auch in der Leitfähigkeit erscheinen müssen, ist also obsolet. Chlorid wird üblicherweise nicht jahresweise, sondern jahrzehnteweise<sup>64</sup> kommentiert. Veränderungen zeigen allgemeine Trends im Einzugsgebiet. Dichte

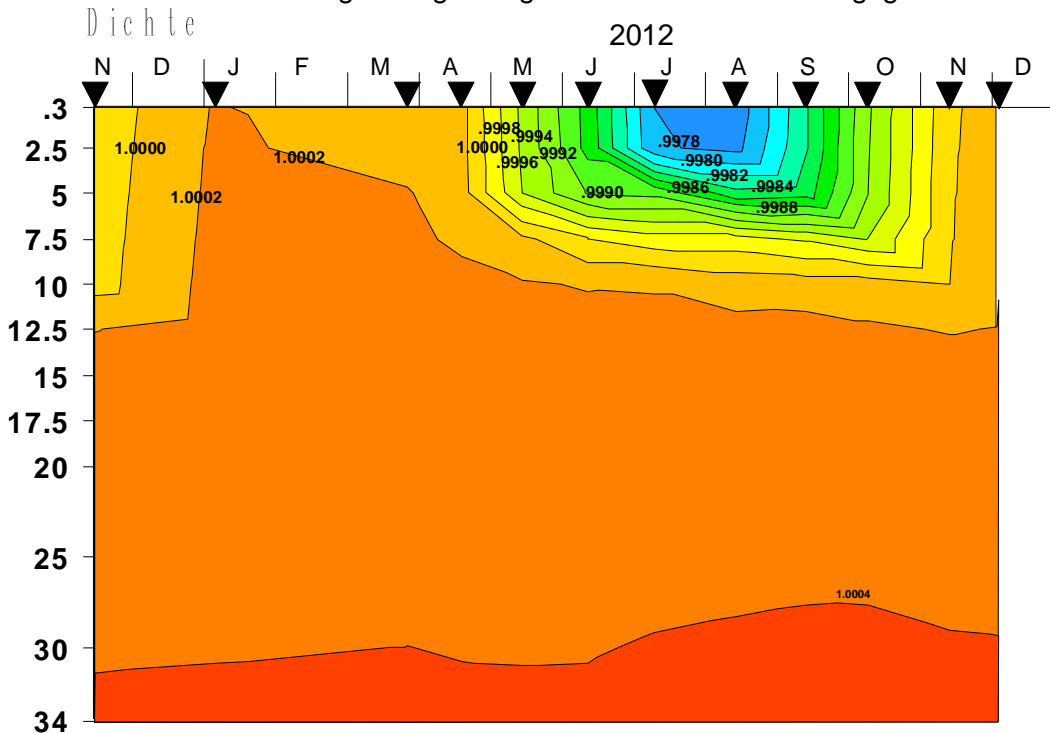


Abb. 29.: Dichte [g/cm<sup>3</sup>]

Die Dichte des Wassers lässt sich aus der Temperatur, der Leitfähigkeit<sup>65</sup> und dem Druck berechnen. Eigentlich liesse sie sich auch mit einem Pyknometer oder speziellen Geräten bestimmen. Dichtemessgeräte auf der Basis von Schallgeschwindigkeiten oder ähnlichem liefern meist etwa 4 Stellen. Für Modellrechnungen und praktische Anwendungen werden aber mindestens 6 Stellen gebraucht, also bleibt nur die Rechnung. Differenzen an der 5. Stelle hinter dem Komma resultieren mit Sicherheit in Strömungen auch an schwach geneigten Stellen im See (vgl. Ursee unter Eis Vortrag in Falkau im Elster-Institut). Aus der Dichte lässt sich die Schichtungsstabilität berechnen (Brunt-Väisälä). Die Dichte nach Chen und Millero 1977 eignet sich nur bedingt, um Aussagen über Mischvorgänge zu machen, da die Kompression berücksichtigt ist.

## Anhang

### Isopleten

Isopleten sind Linien gleicher Werte. Die Darstellungen haben alle als horizontalen Massstab (Abszisse) die Zeit (Monate) und als vertikalen Maßstab (Ordinate) die Tiefe in Meter. Beim Beispiel der Temperatur dienen als dritte Dimension die Isothermen. Bei der Farbgebung wurde darauf geachtet, dass Rot für einen unerwünschten oder potentiell gefährlichen Zustand steht. Die Farben gehen dabei von (violett) blau über grün und gelb zu rot. An sich ist durch die Messwerte erst festgelegt, wie hoch die dreidimensionale Fläche bei den Gitterpunkten ist. Für die Werte daneben werden noch Zusatzannahmen gebraucht. Die konservativste Annahme sind lineare Interpolationen, wobei im Rechteck zwischen vier Punkten noch eine weitere Annahme nötig ist, da es auf zwei Arten in zwei Dreiecke unterteilt werden kann. Die Sedimentation hat als recht rascher Vorgang immer Vorrang. Daher wird zwischen links oben und rechts unten interpoliert. Daraus können aber eventuelle Spitzen entstehen, welche nach links oben ragen, die nicht real sein müssen. Den Algorithmus der Isopleten habe ich vor Jahren erfunden, er besteht nur aus Suchen und linearen Interpolationen. Eine Linie muss am Rand oder auf dem Gitter beginnen. Dort gibt es zwei

<sup>63</sup> Hochgerechnet würde es sich um 20 Tonnen Chlorid in der Schicht zwischen 17,5 und 25 m Tiefe handeln, relativ sind es nur maximal 15,5%.

<sup>64</sup> Ältere Chloridbestimmungen waren häufig mit Fehlern behaftet, da trickreiche Methoden gebraucht wurden.

<sup>65</sup> Die Leitfähigkeit liefert eine vollständige Summe der Anionen und Kationen. Was zur Dichte fehlt sind feine suspendierte Stoffe.



mögliche rhombische Umgebungen, entweder mit einer horizontalen oder einer vertikalen Diagonale. Nun werden alle vier Seiten überprüft, ob dort die Linie weiterläuft, wobei die Rückrichtung gesperrt wird. Nun wird noch eine dritte Umgebung möglich, ein Rechteck mit der Diagonale von links oben nach rechts unten. Bei jedem Durchgang durch einen möglichen Neuanfang, also einer waagrechten oder senkrechten Linie, wird dieser gestrichen. So geht es weiter durch die drei Umgebungen, bis die Linie entweder am Rand landet, oder wieder zurück an ihrem Anfang ist. Nun wird nach einem Neuanfang gesucht. Wenn keiner mehr vorhanden ist, so ist das betreffende Niveau vollständig gezeichnet. Nun sollen aus den Linien noch Flächen gemacht werden. Dies wird erreicht, indem eventuell noch fehlende Eck-Punkte nachgeliefert werden. Die Isoplethen, die so entstehen sind Streckenzüge, die der Natur sicher nicht exakt entsprechen, aber eine brauchbare Näherung bedeuten. Problematisch werden die Darstellungen dann, wenn sie sich in der Nähe der Bestimmungs-(Nachweis)-Grenzen bewegen. Dort ist limnologisches Wissen von Vorteil.

Das Programm<sup>66</sup> wurde ursprünglich für den Hewlett Packard-Pen-Plotter 7550<sup>67</sup> resp. den HP 7475 geschrieben<sup>68</sup> und schreibt dementsprechend HPGL2-Code. Der wurde mit einem Importfilter ins Programm Word übernommen und von dort ging die Umwandlung in Vektorcode (teilweise CGM) weiter. Überarbeitet wurden die Graphiken mit Designer von Micrographx, einer Firma, die schon vor Jahren (2001) durch Corel aufgekauft wurde.

Ab Windows Vista funktioniert dies nicht mehr und von meinem Isoplethen-Programm existiert neu eine Version die SVG<sup>69</sup>-Code produziert, ein Subset von XML<sup>70</sup>, ein Code, der eigentlich zusammen mit der Open Source Freeware Inkscape zukunftssicher sein sollte. Eine kleinere Schwierigkeit war, dass Inkscape nur Pfade modifizieren will und ich eigentlich Polygone habe. Beim Umwandeln in ein PDF-File bleiben die Vektorgraphiken erhalten, welche sich angenehm von Pixelgrafiken unterscheiden.

## Volumengewichtete Mittelwerte

Volumengewichtete Temperatur meint: mit integrieren, z.B. mit Hilfe der Keplerschen Fassregel, wird der Wärmehalt des Sees schichtweise (Probenahmetiefen und Topographieerhebungstiefen) berechnet und summiert; dann wird durch das Volumen dividiert. Wenn man hier nicht penibel exakt vorgeht, variieren plötzlich die Volumina von Probenahme zu Probenahme, ohne dass sich am Seespiegel etwas verändert hätte.

Die Volumina der verschiedenen summierten Schichten<sup>71</sup> sind 0-34m: 59.122 Millionen m<sup>3</sup>, 0 – 10 m: 28.788 Mio m<sup>3</sup>, 10-34m: 30.334 Mio m<sup>3</sup>: Bei den Summen werden aus [g/m<sup>3</sup>] [Tonnen pro See] oder aus [µg/l] = [mg/m<sup>3</sup>] [kg pro See], resp. [kg pro Schicht]. Und bei der Temperatur werden aus kcal pro Liter Tera Kalorien pro See.

Annahmen: Die Konzentration sei linear abhängig von der Tiefe:  $C_z = C_u + z \cdot (C_o - C_u) / (z_o - z_u)$

Mit den Indizes o für oben und u für unten, sowie z für die Tiefe (die dritte Raumkoordinate).

Die Falllinie der Topographie sei eine Gerade:  $\sqrt{A_z} = \sqrt{A_u} + z \cdot (\sqrt{A_e} - \sqrt{A_u}) / (z_o - z_u)$

Der Inhalt einer Schicht ist:  $I = \int_{z_u}^{z_o} A_z C_z dz$ ; also Fläche \* Konzentration und integriert über die Tiefe.

$$I = \int_{z_u}^{z_o} \left( \sqrt{A_u} + z \frac{\sqrt{A_e} - \sqrt{A_u}}{z_o - z_u} \right)^2 \left( C_u + z \frac{C_o - C_u}{z_o - z_u} \right) dz$$

resp.

exakte Herleitung siehe Nachtrag zum Nachtrag

Dazwischen muss man auf die Idee kommen, den mittleren Wert (auf halber Höhe) einzuführen.

Klug gekürzt ergibt die ganze Gleichung:

<sup>66</sup> Das Programm war ursprünglich in DEC-Basic geschrieben und wurde dann auf Fortran IV übertragen; die letzte Version war Microsoft Visual-Basic 6 und nun MS Visual Basic 2010.

<sup>67</sup> Markteinführung 1984

<sup>68</sup> Der Plotterdriver wurde für das DEC-System (Midi-Computer der Eawag) von HR.Rhein geschrieben.

<sup>69</sup> Skalable Vektor Graphik

<sup>70</sup> Vom WWW-Konsortium W3C

<sup>71</sup> Einzelwerte siehe Literaturverzeichnis: Topographie Pfäffikersee

$$I = \frac{z_o - z_u}{6} \left( C_o A_o + \frac{(C_o + C_u) (\sqrt{A_o} + \sqrt{A_u})^2}{2} + C_u A_u \right)$$

Was identisch ist mit:  $I = \frac{\Delta z}{6} (\text{Wert}_{\text{oben}} + 4 \times \text{Wert}_{\text{Mitte}} + \text{Wert}_{\text{unten}})$ , d.h. die Kepler'sche Fassregel, die

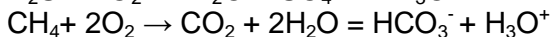
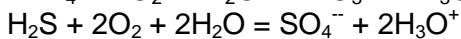
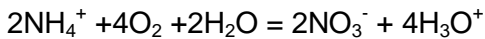
Kepler in Linz für die Volumenberechnung von Wein-Fässern erfand. Sie stimmt exakt bis zu Polynomen dritten Grades (siehe oben) und legt den Gedanken nahe, dass Kepler integrieren konnte (obwohl diese Kunst Leibnitz und Newton zugeschrieben wird). Keplers Fassregel geht

weiter als Simpsons Regel (oder Runge-Kutta)  $I = \frac{\Delta z}{4} (\text{Wert}_{\text{oben}} + 2 \times \text{Wert}_{\text{Mitte}} + \text{Wert}_{\text{unten}})$ , die nur

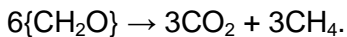
Polynome zweiten Grades schafft aber numerisch etwas besser konditioniert ist als die Fassregel.

## pH und pEpsilon

pH und pε (Elektronendruck) (vgl. Rest-Sauerstoff) sind kausal miteinander verknüpft. Bei vielen Redoxvorgängen sind auch Wasserstoffionen beteiligt.



Aber der anoxische Abbau von Kohlehydraten ist eine reine Disproportionierung:



rO2i mg/l

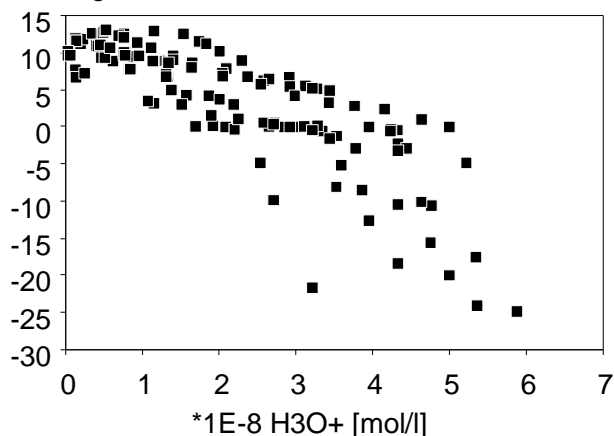


Abb. 30. Rest-Sauerstoff vs. Wasserstoffionen

durch Calzit zurückzuführen ist.

Der oxische Abbau:  $\{\text{CH}_2\text{O}\} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ . Beide reagieren aber weiter zu  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (Kohlensäure), welche bei üblichen pH Werten als  $\text{H}_3\text{O}^+$  und  $\text{HCO}_3^-$  vorliegt.

Ähnliches geschieht bei den Metalloxidationen zu Lewissäuren.

In Abbildung 30 ist die lineare Beziehung zwischen dem Restsauerstoff, das ein Mass für Epsilon beinhaltet und den Wasserstoffionen (entlogarithmierter pH) dargestellt. Man sieht annähernd zwei Gerade eine im oxischen Bereich mit einer Steigung von  $-22\ 000$  mol/mol und eine im anoxischen Bereich mit einer Steigung von zirka  $16 \cdot -5\text{E}7$ . ( $-47\ 000$  mol/mol); was mindestens teilweise auf die drastische pH-Pufferung

## Sauerstoffanspruch von Fischen und Rettung von Fischen

Regenbogenforellen sind weniger anspruchsvoll als Bachforellen. Aber erstens sind sie Fremdlinge (Pazifiklachse *Oncorhynchus mykiss*), zweitens schädigen sie Seeforellen (*Salmo trutta trutta*) beim Laichen (sie laichen später und zerstören dann beim Gruben graben den Laich der Seeforellen) und drittens<sup>72</sup> sind sie in der Schweiz nur unter Auflagen erlaubt bis verboten. (siehe Anhang 2 der Verordnung zum Bundesgesetz über die Fischerei).

Blau- und Sandfelchen haben eine kleine Temperaturtoleranz. Unsere Forellen ertragen höhere Temperaturen. Für Bach- und Seeforellen scheinen 24°C kein grosses Problem zu sein. Es existieren auch nicht einheimische Felchenarten mit höherer Toleranz. Die Temperaturtoleranz der Äschen (Escher, M. : Laborwert 26.2°C) ist nach oben so begrenzt, dass der Kanton Zürich ein Fang-Moratorium aussprechen musste, die Seeausläufe wurden zu warm. Die Rötel (*Salvelinus alpinus*) scheinen noch heikler zu sein als Sandfelchen (wegen Krankheiten)  $\leq 20^\circ$  (P. Haffray 2008).

Vor Jahren ging's um die Sanierung des **Inkwilersees**. Im heiteren Beruferaten bei R. Lembke war schon Jahre vorher ein „professioneller“ Gewässerbelüfter, der den See mit Aquariumpumpen

<sup>72</sup> Und viertens werden sie in Vorarlberg immer noch ohne Auflagen ausgesetzt.

belüftete (ein Tropfen auf den heissen Stein<sup>73</sup>). Dann trat in einer kritischen Situation der Zivilschutz in Aktion. Er belüftete den See, indem Wasser in hohem Strahl über den See gespritzt wurde. Nach einigen Tagen war der See einigermassen versorgt und die Pumpe fertig „getestet“.<sup>74</sup> Ein Jahr später war ein Atlas-Belüfter<sup>75</sup> vorhanden. Aber auch der war zu klein (aber schon bezahlt), um den See zu versorgen. Die Sauerstoffzehrung war so gross, dass das belüftete Wasser den Belüfter mit weniger als 1 mg O<sub>2</sub> pro Liter verliess. Dann wurde der Belüfter zum Zufluss, ins flache Wasser verschoben, sog weniger vorbelastetes Wasser an und diente als „Rettungsring“ für die Fische (Idee aus einer Besprechung von Bühler mit Heinz Marrer). Vorher war 1 Tonne tote Fische pro Jahr ein „Normalzustand“, nota bene aus Naturverlaichung. Dieses erfolgreiche Verfahren wurde am **Greifensee** 2009 (durch Walo Meier, auf Zureden von mir) kopiert. Es geht dabei nicht um die Sanierung des Sees, sondern nur um das Überleben der Fische.

Ich habe auch während meiner Dissertation (1969?) eine Situation am **Rotsee** erlebt, in welcher der Sauerstoff auch an der Oberfläche weniger als 1mg/l war. Im Rest der Wassersäule war nichts mehr vorhanden. Es war aber kein toter Fisch zu sehen. Diese müssen sich im Zulauf auf den Flossen gestanden sein. Kurz, Fische sind nicht blöd, sie wissen, wo die besten Verhältnisse zu finden sind. Daher reichen kleine Überlebensinseln für eine verblüffend grosse Fläche. Ob es sinnvoll ist, das Fischen bei diesen Inseln in kritische Situationen zu erlauben, sei dahingestellt. Aber dies war schon im **Pfäffikersee** zur Zeit der Müllerschen Belüftung (1958 bis 62) ein „heiliger“ Brauch (mündl. Mitteilung von Dr. Heinz Ambühl, der den Versuch zum Missfallen von Dr. Eugen A. Thomas begleitete). Die Bojen des Belüfters waren ein beliebter Anlegeplatz. Ein anderes Verhalten von Felchen wurde im **Luganersee** beobachtet: im Metalimnion war die Sauerstoffzehrung so gross, dass der Gehalt auf Null sank. Nun bestand der See aus vier Schichten: 300 bis 100 m Null, 90 bis 20 m fast gesättigt, 20 bis 7 m sehr wenig, 7 m bis Oberfläche: genügend Sauerstoff. Im oberen Hypolimnion und an der Oberfläche befanden sich Felchen, von denen vermutet (Rudolf Müller) wurde, dass sie eine einzige Population bildeten. Also Nase zu und durch. Es konnte aber nicht ausgeschlossen werden, dass irgendwo im Litoral, an einem Zufluss, ein durchgängiger Weg vorhanden war.

Bei näherer Betrachtung der Warmwasserfahne des **KKW-Beznau** (etwa 1973) zeigte sich ein ähnliches Phänomen: in der Fahne entwickelten sich Insektenlarven sehr gut. Die Bachforellen „standen“ aber auf der linken Seite der Aare im kalten Wasser und ernteten die Insekten, indem sie sich nur sehr kurz ins zu warme Wasser >30°C „stürzten“ (Beobachtung und mündl. Mitt. Wolfgang Geiger). Im Gegensatz dazu hat sich in einem See in Oberbayern (**Ammersee**?) vor 30 Jahren eine Tiefenpopulation von Felchen entwickelt, welche nur aus Kümmerlingen bestand, die sich weigerte vom Zooplankton an der Oberfläche zu fressen (und dadurch ein sehr hohes Alter erreichten). War das *Coregonus bavaricus*? (Hofer 1909), Maximallänge 24 cm nach Fishbase.

Aus dem zürcherischen Jagd und Fischereiverwaltungs-Konzept: „Nach dem Aussterben der Felchen in Greifen- und Pfäffikersee wurden in diesen Gewässern ab Mitte der 1970er Jahre Wiederansiedlungsversuche mit Sandfelchen aus dem Zürichsee gemacht; diese zeitigten ab den 1980er Jahren mit dem Einhergehen der verbesserten Wasserqualität durchschlagenden Erfolg.“

Was immer auch Sandfelchen sein mögen. Darunter werden am Bodensee und Thunersee Uferlaicher verstanden, die kaum im Pelagial zu finden sind. In Fishbase.org findet man 4 verschiedene *Coregonus* Arten als Sandfelchen: *C. nasus*, *C. arenicolus*, in Deutschland: *C. lavaretus* und *C. fera* (mit der Bemerkung, wahrscheinlich ausgestorben). Ob es sich hier um Rassen oder Arten oder Grossarten mit variabler Chromosomenzahl handelt, ist ein Streit unter Systematikern, der schon mindestens 70 Jahre dauert. Gustav Schoch<sup>76</sup> verstand unter Sandfelchen *C. fera*.

Forellen werden als Beweis der Verträglichkeit in Becken von Trinkwasserwerken und Abläufen von Abwasserreinigungsanlagen gehalten. Versuche haben aber gezeigt, dass dies nur mit Einschränkungen ein taugliches Mittel ist. Bachforellen gewöhnen sich im Laufe der Zeit an vieles; unter anderem an mangelnden Sauerstoff, oder auch an Gifte bei Bally in Schönenwerd, sie reagieren auch nicht auf Psychopharmaka wie Menschen. Sie sollten, wenn sie als Alarm dienen sollen, häufig ausgetauscht werden.

<sup>73</sup> Von René Gächter existiert aus dieser Zeit ein EAWAG internes Papier.

<sup>74</sup> Habe ich von Martin Würsten, vom Solothurnischen Gewässerschutz erfahren.

<sup>75</sup> Dies sind Kammern, die unter der Wasseroberfläche bleiben, mit Druckluftzufuhr und Wasserzu- und abfuhr und einem Entlüftungsschlauch. Der Luft-Kompressor steht am Ufer. Atlas Copco stellt Luft-Kompressoren her.

<sup>76</sup> Kantonaler Fischereiaufseher 1880 und Mittelschullehrer.

## Eddydiffusion und Schichtungsstabilität

Wenn man alle tiefen Wärmezufüsse vernachlässigt, kann man die Eddydiffusion einfach berechnen<sup>77</sup> (Li, 1973). Benutzt werden dabei die Fick'schen Gesetze. Einzelne Jahrgänge sind dabei allerdings kaum brauchbar, weil sie zu grosse Lücken aufweisen. Als Grundlage für Modellrechnungen sind Mittelwerte über mindestens zehn Jahre erforderlich.<sup>78</sup> Ein weiterer Grund ist rein statistisch, mathematischer Natur: es muss differenziert werden und Differentiationen<sup>79</sup> sind von Hause aus Rauschverstärker, was nur durch eine vorherige Dämpfung mit Mittelwerten<sup>80</sup> kompensiert werden kann. Eine Alternative sind zeitlich und örtlich feinmaschige Messserien, die aber logistisch und finanziell<sup>81</sup> sehr aufwändig wären. Interessanter ist die Mischungsstabilität, die als Brunt-Väisälä Periode ausgedrückt werden kann. Sie hat die Froude-Ähnlichkeit<sup>82</sup> als Basis und berechnet sich aus dem Dichtegradienten nach der Tiefe. Auch sie gibt Anhaltspunkte, wie gross

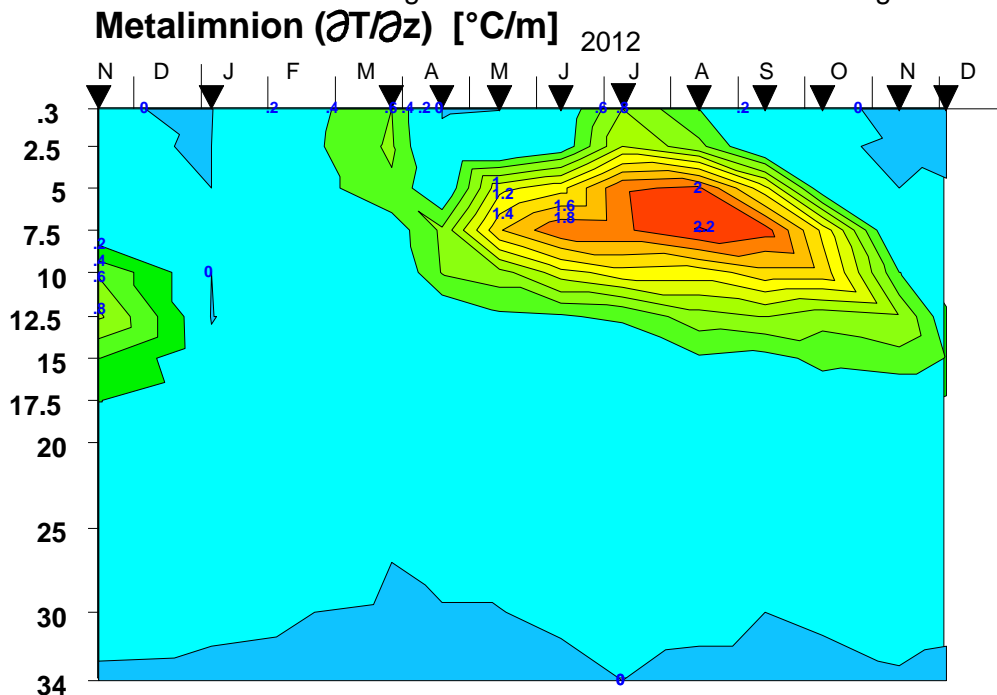


Abb. 31.: Metalimnion  $^{\circ}\text{C}/\text{m}$

die Nährstoffzufuhr im Sommer aus der Tiefe ins Epilimnion sein kann. Die einfachste Analyse der Temperaturdaten ist die Berechnung des vertikalen Gradienten (Inge Kutschke 1966). Daraus kann auf die Dicke des Metalimnions geschlossen werden. Der Wert der als Mass dafür genommen wird, variiert mit der Grösse des Sees. Für den Zürichsee wurde  $1^{\circ}\text{C}$  pro Meter (Kutschke 1966) genommen. Für kleinere Seen, wie der Pfäffikersee, steigt dieser Wert auf 1.5 bis 2 und für grössere Seen (Bodensee) sinkt er auf etwa  $0.5^{\circ}\text{C}/\text{m}$ .

Alle Messungen des AWELs stammen aus Seemitte und dem Vormittag. Der Tagesverlauf und die örtlichen Unterschiede sind damit weitgehend ausgeblendet. Temperaturen, welche in Strandbädern gemessen werden, sind üblicherweise etwas höher und dies nicht, weil geschönt würde, sondern weil sich das Flachwasser schneller erwärmt als die Seemitte. Dies ist vom Lake Erie seit Jahrzehnten als „Thermal Bar“ bekannt. An anderen Orten können die Temperaturen noch viel höher steigen. Im Greifensee wurden im flachen Wasser, im Schilfgürtel im August schon Temperaturen über  $40^{\circ}\text{C}$  gemessen (mündl. Mitt. Fred Stössel am Nachmittag der Messung). Der Wärmeverlust des Pfäffikersees durch das Abfließen vom Oberflächenwasser wird kompliziert durch das Abflussregime. Um die Kraftgewinnung zu optimieren wird der Abfluss übers Wochenende und Nachts abgestellt. Dies führte zu einer vertikalen Temperaturschichtung im Aabach

<sup>77</sup> Eddydiffusion  $k_z = \text{vertikaler Wärmeflux}/(\partial T/\partial z)$

<sup>78</sup> Um unabhängig vom Wetter zu werden.

<sup>79</sup> Als numerische Differentiation wird ein Polynom dritten Grades durch die Punkte gelegt und davon die erste Ableitung berechnet.

<sup>80</sup> Mittelwerte „verschmieren“ aber Jahreszeiten. Aus einem schnellen Anstieg bei einer Schönwetterphase wird ein schleichender Anstieg, da dieser Zeitraum mit einer Schlechtwetterphase aus einem anderen Jahr gemittelt werden kann.

<sup>81</sup> Der Betrag geht schnell in die Hunderttausender.

<sup>82</sup> Auftriebsähnlichkeit (im Gegensatz zur Reynoldsähnlichkeit, dem Verhältnis von Trägheit zu Zähigkeit)

(Diplomarbeit Hj. Fricker et al.), die an Werktagen wieder verschwand. In der Nacht kann sich kaum ein Gradient aufbauen<sup>83</sup>. Bis zu welcher Tiefe Wasser angesaugt wird, lässt sich nur durch Mischungsrechnungen ermitteln, wobei viele Lösungen möglich sind.

Eine Totalzirkulation kann nun nicht mehr künstlich erzeugt werden, daher ist der Temperaturgang in der grössten Tiefe wieder wichtig. Ein See kann nur dann zirkulieren, wenn der unterste Wasserkörper leichter ist als das Oberflächenwasser. Dies kommt zustande, indem sich während des Sommers auch das tiefste Wasser langsam erwärmt. Dies geschah mit der Zirkulationshilfe schneller, aber auch im letzten Jahr stieg die Temperatur auf 4.27 Grad, was für eine Totalzirkulation reicht. Der Auftrieb ist 5.1 g pro Kubikmeter. Bei tieferen Temperaturen könnte es kritisch werden.

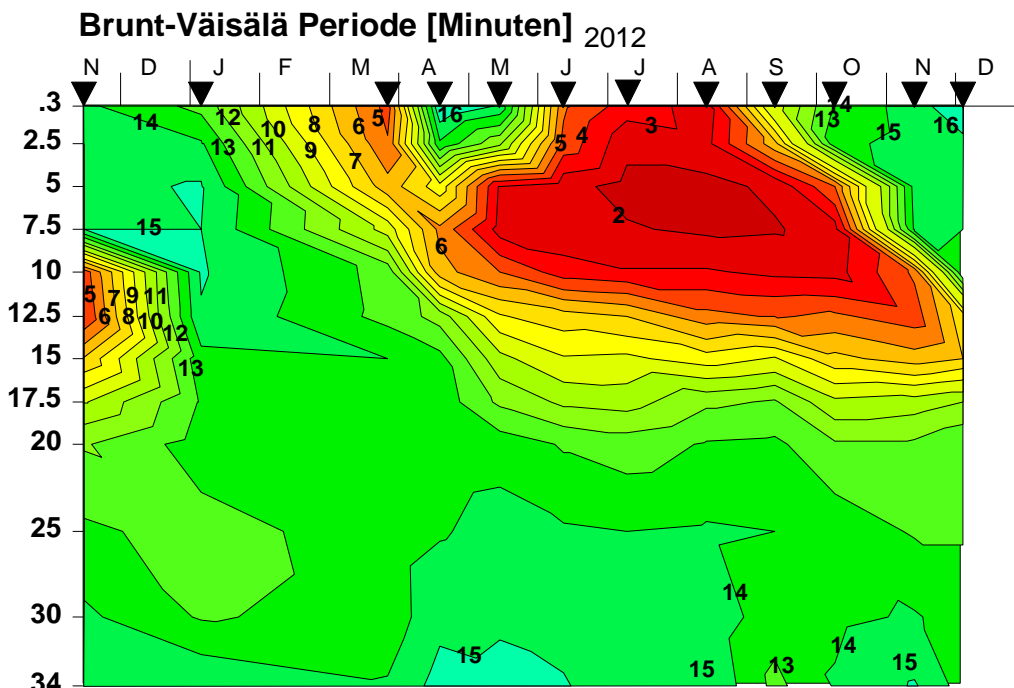


Abb. 32.: Schichtungsstabilität [Minuten]

Die Dichte des Wassers ist vor allem abhängig von der Temperatur; mit einem Dichtemaximum bei etwa 4°C (Süsswasser). Weitere Parameter, die die Dichte erhöhen sind der Druck (Wasser lässt sich etwas komprimieren) und die gelösten (Kochsalz im Meerwasser), sowie die suspendierten Stoffe. Gelöste Gase vermindern die Dichte. Die Stabilität ist minimal, wenn der Wasserkörper homogen gemischt ist, sie steigt mit steigendem Dichtegradienten. Auf die Abbildung des Dichtegradienten des Wassers ( $\partial \text{Dichte} / \partial z$ , in  $\text{g/m}^4$ ) wird zu Gunsten der Brunt Väisälä Periode verzichtet. Sie liefert ein ähnliches Bild, nur mit anderen Zahlen. Die Dichte wurde nach Chen und Millero 1977 (inkl. Kompressibilität) berechnet.

Die Brunt-Väisälä Frequenz berechnet sich als  $N = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}}$ ,  $g$  = Erdbeschleunigung<sup>84</sup> 9.81 [ $\text{m/s}^2$ ],

$\rho$  = Dichte des Wassers [ $\text{t/m}^3$ ],  $z$  = Tiefe in m, nach unten zunehmend.  $N$  = Hertz [ $1/\text{s}$ ]. Da  $g$  und  $\rho$  annähernd konstant sind, ist die Frequenz proportional zur Quadratwurzel der Werte von  $\partial \text{Dichte} / \partial z$ . Die Perioden errechnen sich als  $P = \frac{2\pi}{N \cdot 60}$ . Sie betragen minimal 2010 1.55, 2011

1.73 und 2012 1.70 Minuten. Das heisst, dass das Wasser im August in 7.5 m Tiefe in 1.7 Minuten pendelt, wenn es vertikal ausgelenkt wird. Beim Vergleich mit den beiden Vorjahren kann ich keine wesentlichen Unterschiede sehen.

### Limitierender Nährstoff

Von Liebig stammt das „Gesetz“ des Minimums (etwa 1840 ff), d.h. der Abhängigkeit der Ernte von dem Nährstoff, der das Wachstum begrenzt. Es wurde 1934 ff durch Alfred C. Redfield für Meeres-

<sup>83</sup> Viele Gartenteiche, Klein- und Kleinstseen zirkulieren nachts. Besonders häufig ist dies ab Mitte Juli zu sehen (Fred Stössel, Eva Binderheim-Bankay).

<sup>84</sup> Wetzikon 9.80632  $\text{m/s}^2$  (Zürich 9.80665  $\text{m/s}^2$ , Winterthur: 9.80687  $\text{m/s}^2$ ) Bauhandbuch

Plankton bestätigt. Es muss sich um ein chemisches Element handeln, das für den Aufbau der Biomasse notwendig ist. Diskutiert wurden Phosphor, Stickstoff und für Ozeane in letzter Zeit Eisen, Stoffe, die ungleich verteilt sind. Die Algen wachsen im See auch in der Tiefe, was bedeutet, dass auch die Mischung eine wichtige Rolle spielt und die Limitierung nicht linear wird. Eine weitere Rolle spielt auch das Rezyklieren, das bei Phosphor recht rasch geht. Vor vierzig<sup>85</sup> Jahren wurde diskutiert, mit welchem Minimumstoff man die Algenproduktion am einfachsten beschränken könne – und kam auf den Phosphor. Diese Literatur füllt ganze Zeitschriften. (Wenn Stickstoff fehlt, kann er aus der Luft nachgeliefert werden.) Die Abwasserreinigungsanlagen mussten nun nicht mehr nur den Sauerstoffbedarf<sup>86</sup> des Abwassers decken, sondern helfen, den Minimumsstoff Phosphor möglichst gut aus dem Wasser zu holen. Dafür wurden die Simultanfällung, die Nachfällung und später die Flockungsfiltration erfunden, wobei bei der ARA Pfäffikon ein Spezialverfahren zur Anwendung kam. Als weitere flankierende Massnahme wurden die Polyphosphate in Waschmitteln verboten. Nun nimmt der Phosphorgehalt des Sees ab, wobei aber der grosse Gehalt im Sediment die Sanierung bremst. Der Umrechnungsfaktor von Phosphor auf Biomasse beträgt etwa 500 (etwa 100<sup>87</sup> bis 200 für das Trockengewicht).

Auch Stickstoff kann das Wachstum des Planktons begrenzen; was man mit Denitrifikation in ARAs unterstützen will, der selbe Prozess im See ist gratis. Andere Gewässer<sup>88</sup> sind im Wachstum durch Mischungsintensitäten begrenzt, das heisst durch das Rezyklieren des Minimumnährstoffs.

Der ursprünglich oligotrophe Zustand des Pfäffikersees war charakterisiert durch eine Abfolge von Begrenzungen: im Winter war es das Licht, im Frühling folgten der Phosphor und Mischung und im Herbst war es der Stickstoff. Das Liebig'sche Konzept war nur kurzfristig gültig.

## Stummologie

Exkurs Stummologie (nach Werner Stumm, ehemaliger Direktor der Eawag): die verschiedenen chemischen Komponenten in einem See lassen sich in 3 Klassen aufteilen. 1. die konservativen, 2. die aktuellen und 3. die integrierenden. Wobei die Leitfähigkeit offensichtlich den Jahresverlauf integriert. Die konservativen Parameter (Temperatur, Chlorid) sind entweder biologisch inaktiv, oder in so grossen Mengen vorhanden, dass kein biologisches Jahressignal erkennbar ist. In einem Tiefenverlauf zeigen integrierende Komponenten untereinander meist lineare Zusammenhänge. (Beim oben besprochenen Beispiel des Luganersees entstand allerdings eine hübsche Schleife, was zeigt, dass verschiedene Jahre gemischt wurden.) Zu den aktuellen Parametern gehören Chlorophyll oder ATP, also Komponenten mit kurzer bis sehr kurzer Zerfallsrate. Zum Konzept gehört auch die Stumm'sche Butterbrotstöchiometrie nach Redfield<sup>89</sup>. Algen bedienen sich mit Phosphor und Stickstoff, wie mit Butter und Konfitüre, d.h. in einem mehr oder weniger fixen Verhältnis, wobei der Kohlenstoff das Brot bedeutet. Diese Stöchiometrie bezieht sich auf ein eutrophes Stadium, d.h. weder Stickstoff, noch Phosphor ist Mangelware. Die Algen können aber wesentlich mehr Kohlenstoff pro Nährstoff assimilieren.

## Zielzustand

Ein Zielzustand soll möglichst nahe an den natürlichen Zustand zurückführen. Dazu muss aber dieser natürliche Zustand bekannt sein; was nicht so einfach ist, wie es auf den ersten Blick aussieht. Sedimentanalysen sind hilfreich. Jeder See hat eine „Lebensgeschichte“ und wird schliesslich verlanden. Wenn es um Details geht, ist jeder See als Individuum zu behandeln.

Als möglicher Zielzustand wurde jahrelang 30 mg Phosphor pro Kubikmeter Wasser im zirkulierenden See genannt. Es war aber bald auch René Gächter, dem Erfinder der 30, klar, dass dieser Wert zu hoch war; er reduzierte den Wert später auf 10. (Mitgeteilt im AudiMax der ETHZ anlässlich der Eawag Veranstaltung 199?). Leider hat sich die Korrektur nicht herumgesprochen. Für den Bodensee ergab sich aus dynamischer Simulation ein Wert von etwa 10 (IGKB Bericht Nr. 54, 2002), was sich als richtig erwies. Die Toleranz für Phosphor hängt ab von Verhältnis vom Volumen des Hypolimnions zum Volumen des Epilimnions, das beim 35 m tiefen Pfäffikersee

<sup>85</sup> Begonnen hat bereits Leo Minder mit „Der Zürichsee im Lichte der Seentypenlehre“ 1943.

<sup>86</sup> Das erste Ärgernis beim Einleiten von Abwasser in Bäche waren sauerstofflose Strecken ohne Fische, dafür mit *Saprolegnia*, dem Abwasserpilz, die stanken.

<sup>87</sup> 115 nach Redfield

<sup>88</sup> Vermutlich grosse Teile der Nordsee

<sup>89</sup> Siehe Kapitel Nährstoffe Seite 9



wesentlich kleiner ist, als beim 252 m tiefen Bodensee. Das heisst, dass der Wert zwischen 1 und 3 liegen könnte. (2.2 wenn wirklich nur das Verhältnis eine Rolle spielt; was mit Sicherheit nicht stimmt.) Eigentlich geht es aber nicht um den Phosphor, der nur Mittel zum Zweck ist, als vielmehr um die Primärproduktion, die 150 g Kohlenstoff pro Quadratmeter und Jahr nicht überschreiten sollte, um die Mesotrophie nicht wesentlich zu überschreiten. (Das war auch der ursprüngliche Gächter'sche Ansatz, der fälschlicherweise erst zur 30 führte.)

Etwas weiter gedacht, reicht auch die Primärproduktion nicht als Kriterium. (Nebenbei: die Messung der Primärproduktion verursacht die gleichen Kosten, wie der ganze Rest der Chemie und braucht zusätzlich eine lückenlose Messung des Lichts.) Ein See dient vor allem als Lebensraum für Organismen und muss als solcher erhalten werden. Wenn sich die Zusammensetzung der Lebewesen wesentlich ändert, haben wir etwas falsch gemacht. Nun könnten wir uns auf Libellen oder Würmer, z.B. *Tubifex* oder Pilze beschränken, was aber kaum Sinn macht. Einfacher ist es, wenn man sich auf höhere Lebewesen, wie Fische beschränkt, wobei Moderlieschen und Stichlinge ausscheiden. Das vernünftigste Einzel-Kriterium, das ich kenne, ist die Naturverlaichung der Felchen. (Der Zielzustand des Bodensees geht weit über dieses Kriterium hinaus. IGKB 2004, Kapitel 4.3) Künstliche Fischeinsätze sind nicht nachhaltig, denn sie führen langfristig zu einer Klonung der Art, siehe „Fischzucht, Retter und Gefahr Natur und Mensch 1-2003, Bühner“. Klone sind empfindlich auf alle Veränderungen des Lebensraums. Wenn nur ein Fisch krank wird, sind es bald alle. Also müssen die Einsätze langfristig durch Naturverlaichung ersetzt werden. Die Schwierigkeiten der Laichentwicklung auf Pelagialsediment (Blaufelchen) sind bei Rudolf Müller (Hallwilersee Bericht z.H. Kanton Aargau, Sempachersee) nachzulesen: Genügend Sauerstoff über dem Sediment ist erst dann vorhanden, wenn die Eier von unten keinen Schwefelwasserstoff mehr erhalten. Dies zielt auf die Dynamik von Bakterien im Sediment und die Kinetik der Grenzschicht. Die Naturverlaichung deckt also viele Zusatzkriterien ab. Aus diesem Kriterium kann nachträglich der dafür notwendige Phosphorgehalt abgelesen werden und eventuell für den Greifensee dienen. Der Pfäffikersee lässt sich schneller sanieren als der Greifensee.

Eine Diskussion der Schweizer Limnologen in den 1980ziger Jahren führte auf den minimal vorhandenen Sauerstoff als Kriterium, wobei sich die Zahl 4 mg/l als vernünftig<sup>90</sup> erwies. So kam es dann auch in die „Gewässerschutzverordnung 814.201 (GSchV) vom 28. Oktober 1998 (Stand am 1. August 2011) § 13 zusätzliche Anforderungen an stehende Gewässer, lit 3, Abschnitt b.“ Nur führte dies dazu, dass Schlaumeier mit künstlich zugeführtem Sauerstoff diese Zahl erreichten und dann behaupteten, das eidgenössische Ziel sei erreicht und der See saniert. Weiter wurde ein oligotropher Bündner See (Silsensee), der bisher in einem grossartigen Zustand war, so weit verschmutzt, dass das Sauerstoffkriterium noch knapp erfüllt war. Beides war nicht im Geiste der Erfinder der 4 mg/l. Die mehr als 4 mg/l Sauerstoff überall und jederzeit sind nur dann ein taugliches Ziel, wenn von unten her und ohne künstliche Zutaten erreicht. Wie man am Beispiel des Pfäffikersees sieht, ist zwischen 4 und 6 mg/l nur ein kleiner Unterschied (siehe Abbildung 4). Sowohl das Sauerstoffkriterium als auch die Felchenverlaichung sind untaugliche Ziele für natürlich eutrophe Kleinseen, was der Grund für die Dissertation Evi Binderheim-Bankay war. Sie postuliert für diese Seen die Verlandungsgeschwindigkeit als Kriterium.

Es ist **kein** Sanierungsziel, den Fischertrag zu maximieren. Der Pfäffikersee ist weder ein Fischhälterbecken noch ein Fischmaststation. Diese Ziele sind nicht vereinbar mit der Naturverlaichung und auch nicht nachhaltig.

## Literatur:

Anonym: Fischerei- und Jagdverwaltung des Kantons Zürich, 8090 Zürich, [www.fjv.zh.ch](http://www.fjv.zh.ch) Juni 2009 (abgerufen Juni 2013)

Anonym: [www.zh.ch/.../Bewirtschaftungskonzept\\_2010-2018.pdf](http://www.zh.ch/.../Bewirtschaftungskonzept_2010-2018.pdf). Management der Fischbestände der zürcherischen Gewässer in der Pachtperiode 2010-2018 (abgerufen Juni 2013)

Binderheim-Bankay, Eva Anna (1998): Sanierungsziel für natürlich eutrophe Kleinseen des Schweizer Mittellandes, 149 Seiten, Diss. Naturwiss. ETH Zürich, Nr. 12784, (Auch Husemersee)

Bühner, H.: [Die Berechnung der totalen Menge gelöster Stoffe in Seen](#). Schweiz. Z. Hydrol. 41/2, 418-420 (1979).

<sup>90</sup> Er stammt aus einer Statistik, die zeigt, dass die Rücklösung von Phosphor aus dem Sediment erst unter 4 mg O<sub>2</sub> pro Liter in nennenswertem Ausmass beginnt; wobei der Sauerstoff 1 m über dem Sediment gemessen wird.

- Bührer, H.: Computerprogramm zur Bekanntgabe aktueller Seedaten. (Dichteformel) Schweiz. Z. Hydrol. 37, 332-346 (1975).
- Bührer, H. und G. Wagner: Die Belastung des Bodensees mit Phosphor- und Stickstoffverbindungen, organisch gebundenem Kohlenstoff und Borat im Abflußjahr 1985/86 (1989); IGKB 40, ISSN 1011-1263
- Bührer, H. (2003) pheophytin the "never ending story", Stop acidification! <http://homepages.eawag.ch/~buehrer/Pheophytin.html> (abgerufen Juni 2013)
- Bührer, H.: Heisser Sommer 2003: <http://bisher.propfaeffikersee.ch/Pfaeffikersee2003.pdf>, gekürzt erschienen im Tätigkeitsbericht: <http://bisher.propfaeffikersee.ch/PDF/VP2004.pdf> (abgerufen Juni 2013)
- Buhmann, Dietmar 2004: Der Bodensee Zustand – Fakten – Perspektiven, IGKB 2004, 177 Seiten, Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee. Bearbeitung, Layout etc. Büro Rey Konstanz.
- Chen, Chen-Tung und Frank J. Millero: (Density of Water) Precise equation of state of seawater for oceanic ranges of salinity, temperature and pressure. Deep-Sea Research 1977, Vol.24, 365-369
- Geiger, Wolfgang: Untersuchung der Warmwasserfahne von Beznau II, kurz nach Inbetriebnahme.
- Geiger, Wolfgang: Schadensregulierung Jungfischsterben Sempachersee.
- Haffray, Pierrick (SYSAAF, France); January 2008: zit. Charrs (Salvelinus alpinus and Salvelinus fontinalis) – Aquabreeding; [www.aquabreeding.eu/LinkClick.aspx?..](http://www.aquabreeding.eu/LinkClick.aspx?..); Pierrick Haffray (SYSAAF, France); January 2008 (abgerufen Juni 2013)
- Imboden, Dieter (2000): Vorlesung über Systemanalyse.
- Kusnezow, S. I. Die Rolle der Mikroorganismen im Stoffkreislauf der Seen 1959 (mit Hilfe von Waldemar Ohle)
- Кузнецов, Сергей Иванович und Институт Биологии Внутренних Вод: Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность: Изд. Наука, 1970 439 Seiten
- Kutschke, Inge, (Dissertation bei E.A.Thomas Uni ZH) Die thermischen Verhältnisse im Zürichsee zwischen 1937 und 1963 und ihre Beeinflussung durch meteorologische Faktoren. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, 1966 (111) 47-124
- Li, Y.-H.: Vertical eddy diffusion coefficient in Lake Zürich. Schweiz. Z. Hydrol.35, 1–7 (1973)
- Wüest, Alfred, Dissertation über das Schichtungsverhalten des Gersauerbeckens bei Dieter Imboden (ETH-Z Nr. 8350, 1987)
- Wuhrmann, Karl und H. Woker (1953): Über die Giftwirkungen von Ammoniak- und Zyanidlösungen mit verschiedener Sauerstoffspannung und Temperatur auf Fische. Schweiz. Z. Hydrol. 1953, Band 15, S. 235-260
- Topographie Pfäffikersee <http://homepages.eawag.ch/~buehrer/PDF/Seetopo.pdf> B. Ribi, H.Bührer et al.

Und viele andere alte Geschichten, die ich hier erwähnte um sie vor dem Vergessen zu bewahren. Das Fischerlatein hält sich in glaubhaften Grenzen.

## Nachtrag zum Nachtrag

### Zur Fassregel

$$I = \int_{z_u}^{z_o} \left( \sqrt{A_u} + z \frac{\sqrt{A_u} - \sqrt{A_u}}{z_o - z_u} \right)^2 \left( C_u + z \frac{C_o - C_u}{z_o - z_u} \right) dz$$

$$\text{mit } D = \sqrt{A_u}; C = \frac{\sqrt{A_u} - \sqrt{A_u}}{\Delta z}; E = C_u; F = \frac{C_o - C_u}{\Delta z}$$

substituiert lautet es so:  $I = \int_a^b (D + zC)^2 (E + zF) dz$  und ausmultipliziert

$$I = \int_a^b (D^2 E + zD(2CE + DF) + z^2 C(CE + 2DF) + z^3 C^2 F) dz$$

so:

Zwischen den Grenzen a und b integriert ergibt:

$$I = \Delta z D^2 E + \Delta z \frac{a+b}{2} D(2CE + DF) + \frac{a^3 - b^3}{3} C(CE + 2DF) + \frac{a^4 - b^4}{4} C^2 F$$

Bei der Rücksubstitution wird die Formel lang.

$$I = \Delta z A_u C_u + \Delta z \frac{a+b}{2} \sqrt{A_u} \left( 2 \frac{\sqrt{A_u} - \sqrt{A_u}}{\Delta z} C_u + \sqrt{A_u} \frac{C_o - C_u}{\Delta z} \right) +$$

$$\frac{a^3 - b^3}{3} \frac{\sqrt{A_u} - \sqrt{A_u}}{\Delta z} \left( \frac{\sqrt{A_u} - \sqrt{A_u}}{\Delta z} C_u + 2 \sqrt{A_u} \frac{C_o - C_u}{\Delta z} \right) + \frac{a^4 - b^4}{4} \left( \frac{\sqrt{A_u} - \sqrt{A_u}}{\Delta z} \right)^2 \frac{C_o - C_u}{\Delta z}$$

Respektive

$$I = \Delta z A_u C_u + (a+b) \left( (\sqrt{A_o} - \sqrt{A_u}) \sqrt{A_u} C_u + A_u \frac{C_o - C_u}{2} \right) +$$

$$\frac{a^3 - b^3}{3 \Delta z^2} \left( (\sqrt{A_o} - \sqrt{A_u})^2 C_u + 2 (\sqrt{A_o} - \sqrt{A_u}) \sqrt{A_u} (C_o - C_u) \right) + \frac{a^4 - b^4}{4 \Delta z^3} (\sqrt{A_o} - \sqrt{A_u}) (C_o - C_u)$$

Nun muss man auf die Idee kommen den mittleren Wert einzuführen, die Konzentration auf halber Höhe ist:

$$C_m = \frac{C_o + C_u}{2}; \text{ und die Fläche: } A_m = \left( \frac{\sqrt{A_o} + \sqrt{A_u}}{2} \right)^2, \text{ womit der mittlere Wert } Wert_{Mitte} = C_m \times A_m$$

Zurück substituiert und klug gekürzt ergibt die ganze Gleichung:

$$I = \frac{z_o - z_u}{6} \left( C_o A_o + \frac{(C_o + C_u) (\sqrt{A_o} + \sqrt{A_u})^2}{2} + C_u A_u \right), \text{ was nichts anderes als die Fassregel ist.}$$

An sich ist die Fassregel ein mathematisches Unikum<sup>91</sup>: für die Beschreibung eines Polynoms dritten Grades werden vier Punkte gebraucht, Kepler kommt mit nur 3 Punkten aus, allerdings zusammen mit dem Wert in der Mitte, ein Doppelwert.

<sup>91</sup> Ein Verstoß gegen den Fundamentalsatz der Algebra: Jede Gleichung n-ten Grades hat n komplexe Lösungen (bewiesen durch C.F.Gauss 1799).