

Der Zustand des Pfäffikersees im heissen Sommer 2003

Heinrich Bührer, Gewässerschutzgruppe VPP

Vertreter der Naturforschende Gesellschaft in Zürich (www.ngzh.ch)

Eingereicht: Sommer 2004, überarbeitet: Herbst 2004.

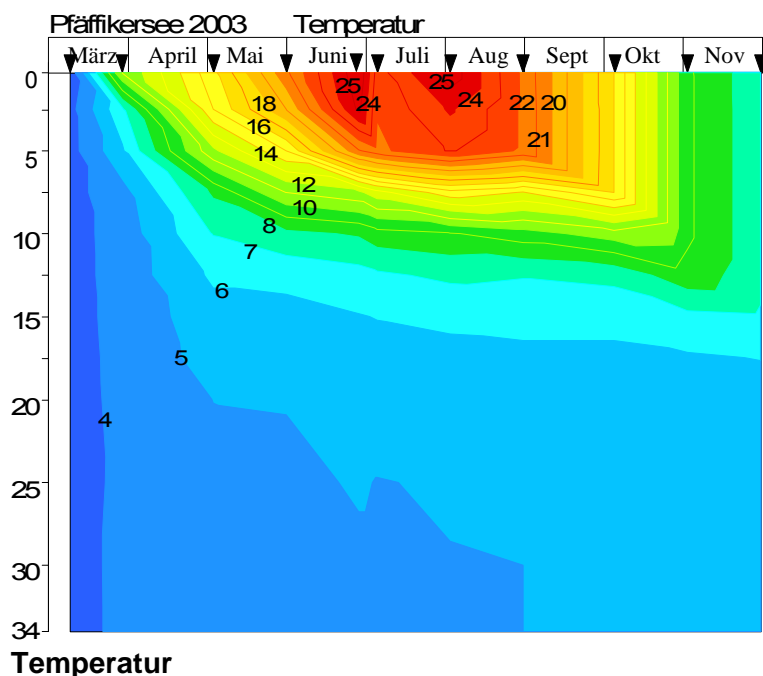
Dieser Artikel behandelt „nur“ den limnologischen Zustand des Sees. Limnologie ist das Spezialgebiet der Gewässerkunde, ein Studienfach an der Universität und an der ETH. Seen haben viele gemeinsame Eigenschaften, aber jedes Mal, wenn es um Einzelheiten geht, zeigt ein See Eigenschaften, welche nur für ihn zutreffen und es wird wieder von neuem klar, dass jeder See als Individuum zu behandeln ist.

Die Arbeit der Vereinigung Pro Pfäffikersee wird in verschiedenen Arbeitsgruppen erledigt. In diesem Fall von der Gruppe Gewässerschutz, welche von unserem Ehrenmitglied, Peter Pleisch gegründet und jahrelang geführt wurde. Mir ist die Aufgabe zugefallen, wie es mein Vorgänger während Jahren machte, den limnologischen Zustand des Sees zu erläutern. Ein See ist ein kompliziertes Ökosystem. Die Basis wird immer durch das physikalische Geschehen gelegt: das heisst den Temperaturgang, die Strömungen, die Mischung und das Sonnenlicht. Weil sich das Wetter von Jahr zu Jahr unterscheidet, ändert sich damit auch diese Basis. Eine weitere Grundlage liefert die Geologie, d.h. die Art der Böden und der Grundwasserträger im Einzugsgebiet und damit die Zusammensetzung mit anorganischen Inhaltsstoffen des Wassers in den Zuflüssen.

Der Beitrag der Menschen zum Pfäffikersee ist eine weitere endlose¹ Geschichte.

Biologische Untersuchungen des Sees sind äusserst aufwändig². Man sucht sie daher nach Möglichkeit zu vermeiden. Aussagen über die Biologie sind mit Hilfe von chemischen Komponenten dennoch möglich. Schon eine einfache Untersuchung des Sees würde den Kostenrahmen der Vereinigung hoffnungslos überfordern. Wir sind dankbar, dass diese Aufgabe durch den Kanton Zürich kompetent erledigt wird.

Das AWEL untersucht im Pfäffikersee regelmässig chemische, physikalische und biologische Proben. Je Probenahme entstehen dabei Profile, welche sich in einer Jahres-Darstellung zusammenfassen lassen.

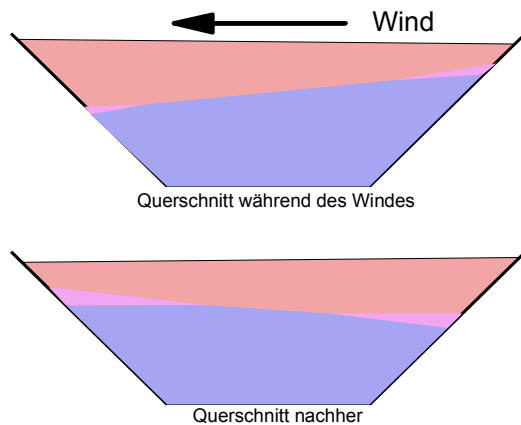


¹ Die Sanierung des Pfäffikersees ist eine Daueraufgabe. Solange sich so viele Menschen und soviel Vieh im Einzugsgebiet aufhalten, muss deren Wirkung dauernd begrenzt werden. Dies geschieht mit der Regionalplanung, der Siedlungsentwässerung, dem Kanalisationssystem, mit den Abwasserreinigungsanlagen und mit Massnahmen der Landwirte.

² Minimal gemacht, verdoppeln sie die Kosten einer Untersuchung.

Die Darstellung beginnt im März, als die Zirkulationsunterstützung noch in Betrieb war, mit Temperaturen von weniger als 4°C. Anfangs April waren an der Oberfläche schon 11°C überschritten. Wie allgemein bekannt ist, war der Sommer 2003 nicht warm, sondern heiss. Die Temperatur stieg sogar in Seemitte zweimal über 25°C. Am Ufer, in der Badi, war die Temperatur noch höher. Die über 20°C warme Schicht reichte bis in eine Tiefe von 5.5 m. Gewisse fremdländische Fische (z.B. Graskarpfen) schätzen solche Verhältnisse; manchen einheimischen Fischen³ bereiten sie allerdings grosse Probleme. Ab August kühlte der See wieder ab und erreichte Anfangs Dezember wieder Temperaturen von 7°C.

Eine genaue Betrachtung der 5°C Kurve zeigt Ungereimtheiten. Die Temperatur soll sich zwischen Ende Juni und Anfangs Juli in 25 m Tiefe abgekühlt haben. In der Tiefe des Sees kann das Wasser während dieser Zeit nur wärmer, aber nie kälter werden. Daher ist dies entweder mit einer Messungenauigkeit oder mit einer „internen Seiche“ zu erklären.

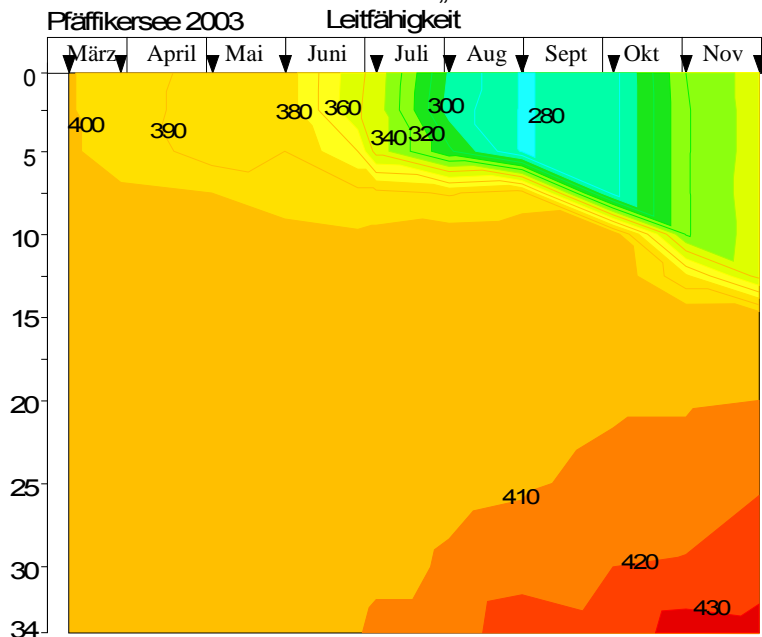


Schema einer internen Seiche

Eine Seiche (gesprochen „Säsch“, abgeleitet aus dem französischen „sec“ = trocken) entsteht, wenn der Wind die warme Oberflächenschicht an ein Ende des Sees schiebt. Dadurch muss das Tiefenwasser ans andere Ende ausweichen. Nun ist der See aus dem physikalischen Gleichgewicht und beginnt zu pendeln. d.h. das Wasser schwappt einige Male hin und her⁴, verliert durch innere Reibung und Reibung am Boden Energie. Die Bewegung endet schliesslich in einer Kreisströmung gegen den Uhrzeigersinn, mit einem Wasserkörper der nicht mehr so streng geschichtet ist, wie zuvor.

Ein See hat nur einen Punkt mit grösster Tiefe. Dort werden die Wasserproben genommen. Dieser Punkt ist selten gleichzeitig auch der Schwingungsknoten. Dies zeigt sich im Pendeln der Temperatur in derselben Tiefe.

Diese Erklärung wird unterstützt durch den senkrechten Abfall der 5°C Linie zwischen 30 m und 34 m Tiefe Mitte August, was wahrscheinlich eine Auswirkung der nächsten Seiche war. Der Normalfall ist ein langsamer Abfall der Temperatur in den bodennahen Schichten, der verursacht wird durch eine dicke „Grenzschicht“.



elektrische Leitfähigkeit in $\mu\text{S}/\text{cm}$ bei 20°C (Daten AWEL)

³ hauptsächlich den lachsartigen (Salmoniden)

⁴ Eine interne Seiche ist immer gekoppelt mit einer Schwankung des Wasserspiegels um wenige Zentimeter, das Ufer fällt dann trocken; daher der Name. Im See drin kann die vertikale Auslenkung einige Meter betragen. Im Bodensee ist ein Fall von mehr als 40 m bekannt, welcher der Bodenseewasserversorgung Schwierigkeiten bereitete.

Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit des Wassers ist einfach zu messen. Zwei Elektroden werden unter Wechsel-Spannung gesetzt und ins Wasser getaucht. Nun kann man den fließenden elektrischen Strom am Messgerät ablesen und in Leitfähigkeit (Mikro-Siemens pro Zentimeter) umrechnen⁵. Auch die Messung in der Tiefe ist kein Problem: man kann das Elektrodenpaar von einem Boot aus, an einem Kabel, in die Tiefe lassen.

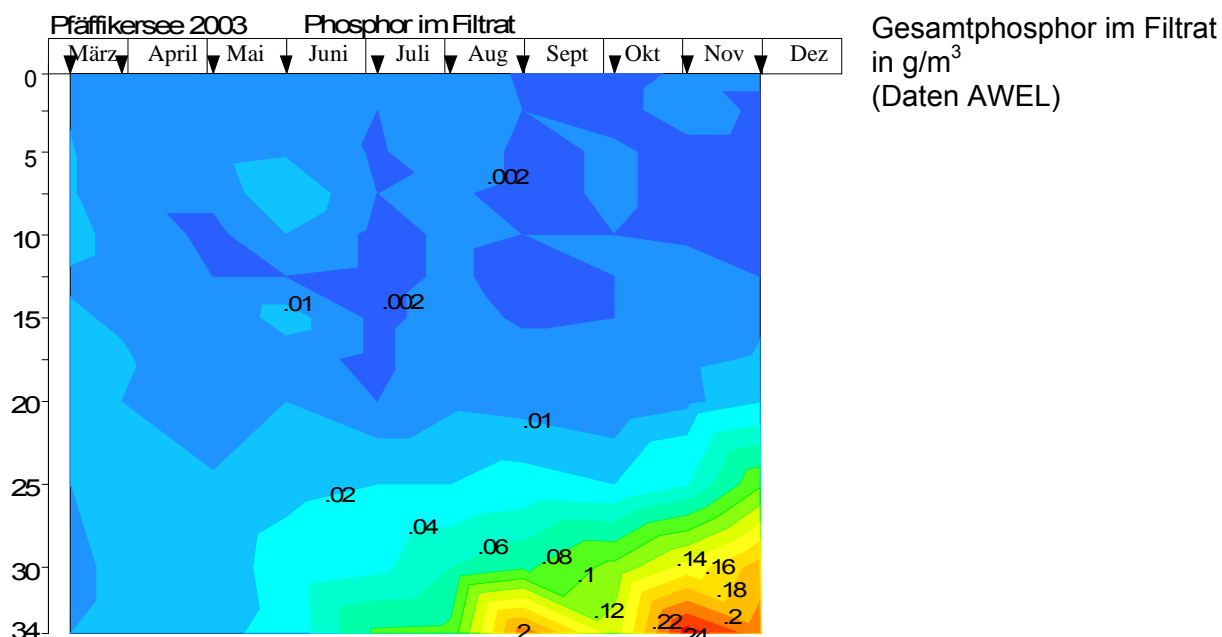
Die Leitfähigkeit entsteht durch die Zahl der elektrischen Ladungsträger (Ionen) und deren Beweglichkeit. Die Beweglichkeit ist abhängig von der Zähigkeit (Viskosität) des Wassers. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Zähigkeit, womit die Beweglichkeit zunimmt. Um mehr Klarheit zu schaffen, wird die Temperaturabhängigkeit rechnerisch entfernt, womit die Abhängigkeit von der Konzentration der Ionen erhalten bleibt.

Im Detail ist es, wie immer, etwas komplizierter, Ionen schwimmen nie nackt im Wasser. In den Wassermolekülen führt eine Verschiebung der elektrischen Ladungen zu einem positiven und einem negativ geladenen „Ende“, wobei es sich um die Breitseiten des Moleküls handelt. Diese Dipole umhüllen die Ionen und sie können nur noch mitsamt ihrer Hülle bewegt werden, was ihre Beweglichkeit einschränkt. Man spricht von „aquatisierten“ („gewässerten“) Ionen.

Die elektrische Leitfähigkeit des Wassers beschreibt ausser dem geringen Anteil des reinen Wassers ($1.9 \mu\text{g/l H}_3\text{O}^+$, $1.7 \mu\text{g/l OH}^-$) hauptsächlich die Summe der Inhaltsstoffe, wobei das „Kalziumbikarbonat“ den grössten Anteil hat. Kalziumbikarbonat tönt nach Mineral. Dieses hat den Schönheitsfehler, dass es als solches nicht existiert⁶. Was man damit meint, sind Kalzium-Ionen und doppelt soviel Bikarbonat-Ionen.

Die Algen brauchen für ihr Wachstum Kohlenstoff, welches sie als Kohlensäure⁷ aufnehmen. Weil die Kohlensäure fehlt, fällt Kalk (Kalziumkarbonat) aus, um das Gleichgewicht wieder zu erreichen. Damit werden Ionen aus dem Wasser entfernt, womit die Leitfähigkeit sinkt. Daher können umgekehrt mit der Leitfähigkeit die Algen und deren Wachstum gemessen werden.

Die Leitfähigkeit zeigt einen Abfall von $50 \mu\text{S/cm}$ bis in den Juli. Bis September folgten dann noch weitere $75 \mu\text{S/cm}$. Diese beiden Zehrungen lassen auf die Menge der inzwischen produzierten Algen schliessen⁸.



Beim Sinken in tiefere Schichten werden die Algen teilweise abgebaut und die sinkenden Kalkpartikel angelöst, was die Leitfähigkeit erhöht. In den tiefen Schichten zeigte sich nur

⁵ Leitfähigkeit = Strom dividiert durch Spannung (beides effektiv, weil Wechselstrom). Das Elektrodenpaar (Messzelle) hat zudem eine stabile Geometrie, welche die Elektrodenkonstante gibt. Weil man die Spannung konstant hält, kann die Leitfähigkeit direkt an einer entsprechend unterteilten Skala abgelesen werden; respektive nach AD-Wandlung am Display ablesen.

⁶ Es ist aber nicht so, dass es keine Bikarbonat-Salze gäbe: z.B. Backpulver (Natrium-Bikarbonat)

⁷ Es gibt auch die Ansicht, dass gewisse Algen Bikarbonat-Ionen bevorzugt aufnehmen und den Ladungsüberschuss kompensieren. In Anbetracht des raschen Gleichgewichts ist dies allerdings egal.

⁸ Die Rechnung wird aber durch den Durchfluss des Wassers verfälscht. Es wäre nur dann einfach, wenn der Pfäffikersee weder Zuflüsse noch einen Ausfluss hätte.

eine Anreicherung um 30 $\mu\text{S/cm}$. Die Bilanz des Verlusts der Leitfähigkeit an der Oberfläche und der Anreicherung im Tiefenwasser zeigt, dass ein grosser Teil als Kalk und organisches Material am Seeboden abgelagert wurde. Der Kalkanteil stört nicht, hingegen kann der organische Anteil die Sanierung des Sees stark verzögern. Der andere Teil des Algenkohlenstoffs wird am Seeboden in Methan (Erdgas) und Kohlensäure⁹ umgewandelt, beides Gase, welche die Leitfähigkeit nicht erhöhen. Diese Kohlensäure sollte eigentlich zusätzlichen Kalk lösen, was im Pfäffikersee offenbar kaum geschieht.

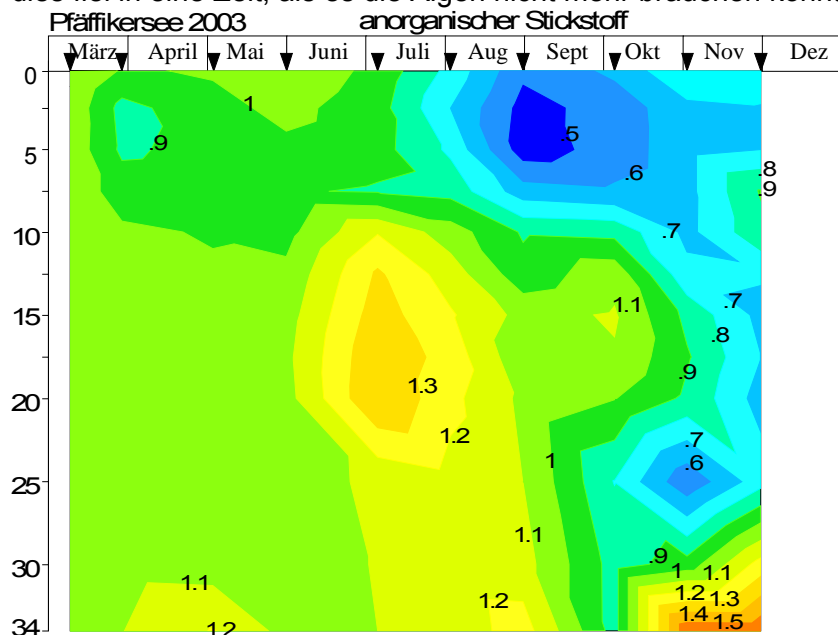
Den Leitfähigkeitszahlen von 286, 401 und 435 $\mu\text{S/cm}$ entsprechen etwa¹⁰ 2.0, 3.6 und 4.7 mg/l C (Kohlenstoff).

Anorganische Nährstoffe

Phosphor und Stickstoff sind anorganische Algennährstoffe (Dünger). Das grösste Gewicht wird seit Jahren zu Recht auf das Fernhalten des Phosphors gelegt, denn wenn der Stickstoff ins Minimum kommt, holen sich die spezialisierte Algen (Cyanobakterien) das gelöste Stickstoffgas aus dem Wasser, wovon immer genügend vorhanden ist.

Ein einstweiliges Sanierungsziel für den Pfäffikersee¹¹ sind 30 mg/m³ Phosphor im Frühling. Der Gesamtphosphor hat im März 2003 zirka 32 mg/m³ erreicht. Als Darstellung wird hier aber der Phosphor im Filtrat gezeigt, d.h. der Phosphor, welcher den Algen als Nährstoff zur Verfügung steht. Dieser war während der grössten Zeit aufgebraucht. Nur im Mai zeigte sich unterhalb von 5 m Tiefe noch eine nennenswerte Menge von mehr als 10 mg/m³. Dies entspricht einer zusätzlichen Algenkonzentration von zirka 4 g/m³ (ein Würfelzucker¹² auf 30 Badewannen) und dies ist immer noch recht grün.

In der restlichen Zeit leben die Algen vom Umbau der Biomasse, dem ständigen Nährstoffnachschub aus den Zuflüssen (inkl. Kläranlagenablauf) und eventuell dem sehr langsamen Nachschub aus der Tiefe. Dieser letzte und geringste Teil wird durch die Schichtung auf ein Minimum reduziert. Am Boden findet eine Anreicherung statt, welche auch langsam ins Wasser austritt. Im Jahre 2003 wurden 240 mg/m³ Phosphor kurzfristig überschritten, aber dies fiel in eine Zeit, als es die Algen nicht mehr brauchen konnten.



Anorganischer Stickstoff in g/m³
Summe von Ammonium-, Nitrit- und Nitrat-Stickstoff (Daten AWEL)

Neben diesem anorganischen Stickstoff sind auch organisch gelöste Verbindungen (Huminstoffe) vorhanden, wovon aber der grösste Teil schwer abbaubar ist. Deren Vorstufen kommen meist aus dem Einzugsgebiet. Die endgültige Form entsteht aber meist im See. Sie verändern die Giftigkeit von Schwermetallen im Wasser.

Der **Stickstoff** zeigt ein ähnliches Bild wie der Phosphor, aber auf weit höherem Niveau. In den oberen Schichten des Sees ist eine Zehrung, in den unteren Schichten eine Anreicherung zu sehen. Durch die Zehrung unterschritt der Stickstoffgehalt nie 0.4 g/m³. Eine Unterschreitung von 0.03 g/m³ Nitrat-Stickstoff kann kritisch werden, weil dann unerwünschte Blaualgen (Cyanobakterien) gefördert würden. Die erste Anreicherung in 34 m Tiefe dürfte

⁹ CO₂ und H₂CO₃ werden der Einfachheit halber gleichgesetzt.

¹⁰ Die Beziehung ist nicht linear. Leitfähigkeitsänderungen sind mit pH-Änderungen gekoppelt. Die Umrechnungsfaktoren wurden mit Greifensee Wasser geeicht, da das AWEL keine entsprechenden Zahlen im Pfäffikersee erhob.

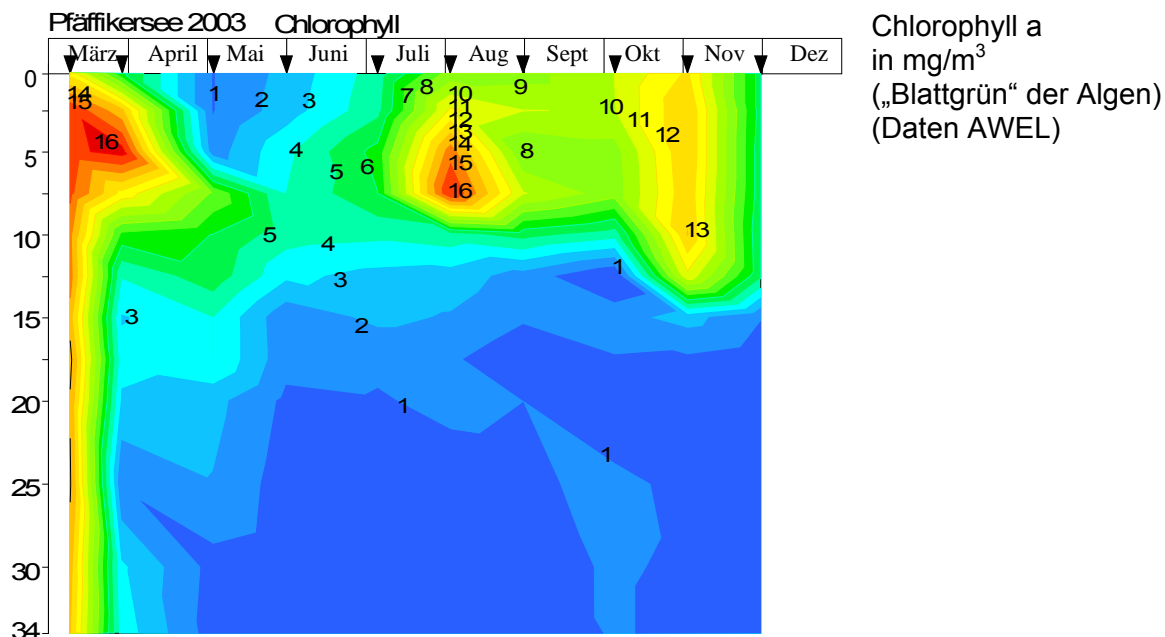
¹¹ Als Nährsalz (K₂HPO₄) entspricht dies dem Gewicht von zwei kleinen Süsstoff-Tabletten (Assugrin-Gold) auf eine Tonne Wasser und dies ist schon zuviel.

¹² 1kg Würfelzucker aus Rupperswil sind 3 Schichten à 5 Reihen à 15 Stück = 225 Stück à 4.44g

die Folge des Abbaus des Märzplanktons sein. Die zweite Anreicherung fand in einer Tiefe von 15 m statt, was auf Abbauvorgänge im flacheren Teil des Seebeckens schliessen lässt. In 25 m Tiefe im November zeigte sich ein weiteres Zehrungsloch. Diesmal sind aber keine Algen, sondern Bakterien dafür verantwortlich. Da zu dieser Zeit in dieser Tiefe kein Sauerstoff vorhanden ist, brauchen die Bakterien den Sauerstoff des Nitrats für ihre Atmung. Der Vorgang ist bekannt als „Denitrifikation“ und dient in ARA's der Entfernung von anorganischem Stickstoff, welcher in N_2 (Stickstoffgas) umgewandelt wird. Dies kann im See eine Gefahr für die Fische sein (Blasen-, Caisson- oder Taucherkrankheit). Der Vergleich der 0.7 mg/l freigesetzten Stickstoff mit den 19 mg/l ohnehin vorhandenen gelösten Luftstickstoff zeigt aber, dass diese Gefahr nicht allzu gross sein kann, ganz abgesehen davon, dass sich dort Fische, wegen Sauerstoffmangels, nicht langfristig aufhalten können. Die Aufnahme und Abgabe von Stickstoff durch die Fische geschieht wesentlich langsamer als von Sauerstoff. Wenn sich die Fische nur kurzfristig dort aufhalten, ist die Gefahr für Caissonkrankheit¹³ gering. Mir sind nur Schäden bekannt, welche in einem Gehege im Flachwasser auftraten und Schuld war dort die Sauerstoffübersättigung, welche durch eine starke Algenentwicklung erzeugt wurde, sowie die Dummheit des Menschen¹⁴, welcher mit seinem Gehege ein Tauchen der Fische in Tiefen, wo die Gasblasen verschwunden wären, verhinderte. Bei der Konstruktion und dem Bau von Zirkulationshilfen zur Seesänerung, wird dieses Problem jedes Mal speziell behandelt.

Im November war der Gesamtgasdruck in 25 m Tiefe zirka 837 hPa, was 88% des Oberflächenwerts bedeutet. Dies heisst, dass dieses Wasser Luft aufnehmen wird, wenn man es an die Oberfläche befördert.

Das Seewasser in 2.5m Tiefe war Ende März und Anfangs August mit einem Druck von 1022 resp. 1034 hPa weniger sicher, eine Blasenbildung wäre bei Entlastung möglich gewesen. Ob sich die Blasen dann auch wirklich bilden, hängt von vielen Einzelheiten ab, vergleiche das Öffnen einer Champagnerflasche.



Chlorophyll und Restsauerstoff

Chlorophyll ist der grüne Farbstoff der Pflanzen. Genau genommen sind vom aktiven Farbstoff fünf verschiedene Modifikationen bekannt, welche sich durch die Anhängsel unterscheiden. Die Vorstufen und die Abbauprodukte sind auch teilweise schon oder noch grün, womit sich die Liste verlängert. Daneben sind noch gelbe bis rote Farbstoffe vorhanden, welche die Wellenlänge des Lichts so verändern, dass auch diese Anteile genutzt werden können. Den grössten Anteil der grünen Farbstoffe stellt Chlorophyll a.

¹³ Allerdings werden die Tauchertabellen von Ausgabe zu Ausgabe immer vorsichtiger mit den Dekompressionszeiten.

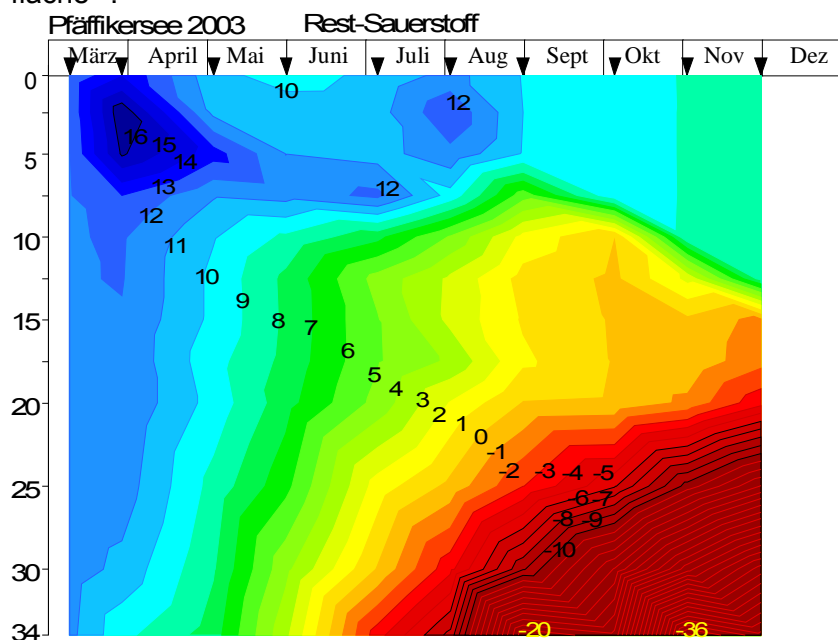
¹⁴ Der Name ist dem Autor bekannt.

Der Jahresverlauf beginnt mit einer hohen Konzentration welche bis in die grösste Tiefe reicht. Es war noch Vollzirkulation mit künstlicher Nachhilfe. Im April/Mai entwickelte sich Zooplankton, welches diese Algen frass. Das Loch dauerte bis zum Juli. In früheren Jahren kamen nicht fressbare Algen schneller auf. Das Augustmaximum war von kurzer Dauer und die Algen blieben ständig auf einem mittleren Niveau, bis sich Ende Oktober noch ein Herbstmaximum entwickelte, welches durch die einsetzende Zirkulation bald verteilt wurde.

Bei einem sehr stark gedüngten (hypereutrophen) See lösen sich die Algen-Maxima und Minima in rascher Folge ab. Ein monatlicher Proben-Turnus reicht in solchen Fällen nicht, um die Entwicklung vollständig zu erfassen. Der Pfäffikersee hat zum Glück dieses Stadium auch in seinen schlimmsten Zeiten nie erreicht.

In der Tiefe blieb die Konzentration, abgesehen von Frühlingsmaximum dauernd auf einem tiefen Niveau. Die Erklärung ist die Dunkelheit in diesen Tiefen, die unter anderem auch durch die Algen in den oberen Schichten erzeugt wird. Wenn die Algen nicht regelmässig Licht bekommen, so verhungern sie. Die Algen benötigen, wie andere Pflanzen, Licht als Energielieferant (und auch hier bestätigt die Ausnahme die Regel).

Die Auswirkung dieser Planktonentwicklung wird durch den **Restsauerstoff** gezeigt. Dieser ist eine theoretische Grösse, welche sich aus dem vorhandenen gelösten Sauerstoff abzüglich der reduzierten Substanzen errechnet. Ende März und Anfangs August wurde die Sättigung überschritten. In der Tiefe zeigt sich eine ständige Zehrung, startend bei 95 % Sättigung. Null wurde Mitte Juni unterschritten und erreichte im November ein Minimum von $-36\text{g/m}^3 \text{O}_2$, woran das gelöste Methan mit zirka $28\text{g/m}^3 \text{O}_2$ beteiligt war. Ohne Zirkulationsunterstützung wird dieses Gas im Wasser abgebaut und erscheint sehr selten an der Oberfläche¹⁵.



In tiefen Seen wachsen zwei „Löcher“: eins hat sein Zentrum in 15m und das andere in der grössten Tiefe. Beim Pfäffikersee ist nur eine Tendenz dazu erkennbar (Delle in 17 m Tiefe, Juli bis August).

Die Spitzengehalte des Sauerstoffs sind nie direkt an der Oberfläche zu finden, weil er dort in die Luft geht. Tiefer bleibt er eine Weile im Wasser gefangen. Der Tagesgang in der Oberflächenschicht wurde durch die Art der Probenahme unterdrückt.

Da Nichts von Nichts kommt, und auch nichts im Nirgendwo verschwindet, (alle Stoffkreisläufe sind geschlossen, wenn die Systemgrenzen gross genug sind), wird klar, dass der Sauerstoff, der im Herbst in der Tiefe des Sees fehlt, während dem Frühling und Sommer aus dem See, an der Oberfläche entwichen sein muss. Leider bleibt dann dieses Gas nicht über dem See stehen, sondern wird rasch durch Winde verteilt.

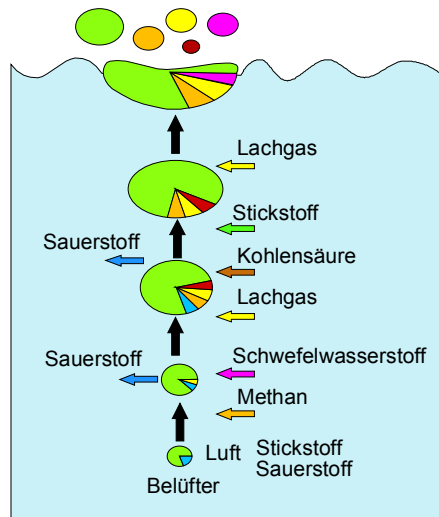
Der Pfäffikersee rülpst wie 2000 Kühe

Die Zirkulationsunterstützung funktioniert mit aufsteigenden Luftblasen. Der Inhalt dieser Blasen ändert während dem Aufstieg. Der Sauerstoff geht aus den Blasen ins Wasser und aus dem Wasser lösen sich andere Gase in der Blase. Es ist wahrscheinlich, dass die Zirkulationsunterstützung mit ihren Blasen den Sauerstoffbedarf des Methans nicht deckt,

¹⁵ In Mooren und flachen Tümpeln, sowie an einem moorigen Ufer können Gasblasen austreten, welche Methan enthalten. Von diesen Orten wird auch das Auftreten von Irrlichtern erwähnt.

sondern das Methan strippt. So nennt man den Vorgang, wenn das im Wasser gelöste Methan in die Luftblasen hinein diffundiert und mit diesen an die Oberfläche steigt, wo das Methan in die Atmosphäre entlassen wird. Für den See ist dies gut, für den Klimaschutz aber von Nachteil.

Schema der aufsteigenden Gasblasen



Es ist vergleichbar mit dem Rülpsen von Rindvieh, wobei die 26 t Methan etwa 2000 Kühe¹⁶ bedeuten. Alles Rindvieh im Einzugsgebiet umgerechnet auf Kühe entspricht etwa dieser Zahl. Es kommt also aufs Gleiche hinaus, wenn die Viehzahl für einen Monat verdoppelt wäre. Wenn der Vorgang im See ablaufen würde, ist zwar das Methan verschwunden, aber eine kleinere Bakterienbiomasse entstanden, welche auch noch abgebaut werden muss, was den Anstieg des Sauerstoffgehalts weiter verzögert. Die Vorteile der Luftblasen für den See sollten also nicht unterschätzt werden. Der Hauptteil des Sauerstoffeintrags durch die Zirkulationshilfe erfolgt indirekt durch den Kontakt von sauerstoffarmem Tiefenwasser mit Luft an der Oberfläche und nicht direkt aus den aufsteigenden Blasen.

Ein physikalischer Vorgang ist dem ganzen Bild überlagert. Warmes Wasser löst weniger Sauerstoff als kaltes Wasser. Dies erklärt den generell tieferen Gehalt im Sommer in der warmen Schicht.

Kein Fischsterben im heißen Sommer 2003

Kritisch kann die Situation für Felchen im See dann werden, wenn in der zu warmen Oberflächenschicht zu wenig Sauerstoff vorhanden ist. Was zu warm ist für Fische ist recht unterschiedlich. Forellen fühlen sich bei 18°C sehr wohl, 22° werden kritisch und 25°C werden nur kurzfristig ertragen. Die entsprechenden Zahlen sind für Hechte einiges höher. Warmwasserfische brauchen mehr als 20°C um geschlechtsreif zu werden.

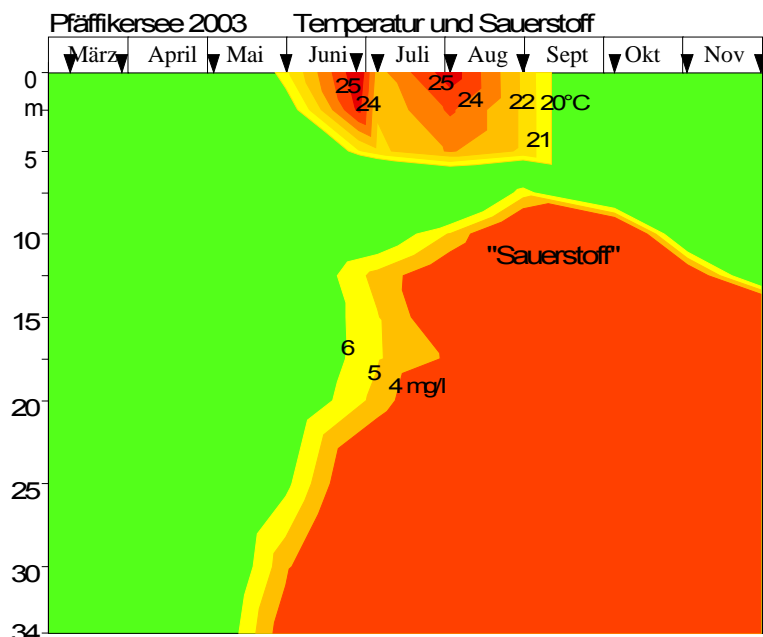
Auch scheiden sich die Geister (resp. die Fische), was zu wenig Sauerstoff sein soll. Hier ist wieder die Bachforelle mit >6 mg/l anspruchsvoll (mit sorgfältiger Gewöhnung überlebt sie im Kläranlagenablauf auch 4 mg/l während Wochen). Andere Fische wie Schleien¹⁷ können auch 0 mg/l recht lang überleben. Im September war die Schicht im Pfäffikersee mit mehr als 6 mg/l (<7.4m) und weniger als 20°C (> 5.6 m) noch 1.8 m dick (im August war die Schicht noch doppelt so dick). Die Fische haben also Glück gehabt.

Allerdings muss dies nicht heissen, dass bei einer Dicke von Null Metern ein Fischsterben tatsächlich stattgefunden hätte. In der Nähe eines Zuflusses wäre selbst dann noch die Möglichkeit zum Überleben gewesen. Der Sauerstoffbedarf ist ein Aspekt, der Schwefelwasserstoffgehalt ein anderer. Bei der Gärung am Seeboden entsteht regelmässig Schwefelwasserstoff (auch in sehr sauberen Seen). Wenn der Sauerstoffgehalt des Wassers hoch ist, kommt dieses sehr giftige Gas nicht weit. Es ist das Lieblingsfutter von Schwefelbakterien. Wenn der Sauerstoffgehalt aber tief ist, kann es weit aufsteigen und dort eventuell höhere Lebewesen wie Fische (oder im Gartenbiotop Frösche) vergiften. Im Dezember konnten in 25m Tiefe 0.4 mg/l H₂S nachgewiesen werden (tiefer hatte es mehr). Die Nachweisgrenze der menschlichen Nase liegt bei zirka 2 ml/m³ was etwa 0.01 mg/l H₂S entspricht. Daher wird erst die Nase gebraucht, bevor die Flasche für die Schwefelwasserstoffbestimmung gefüllt wird. Wenn man nichts riechen¹⁸ kann, kann man mit der Standardmethode auch nichts nachweisen.

¹⁶ Annahmen 600l Methan pro Kuh und Tag (McGill),(ca. 90% sei Rülpsen und 10% Furzen: aus anderer Quelle), Strippdauer ca. 1 Monat und Strippmenge: Alles.

¹⁷ Trütschen habe ich im Verdacht für ein ähnliches Verhalten. Bekannt ist nur, dass sie im See nicht mehr gefangen werden können – mit der Vermutung, sie seien in die Zufluss-Bäche verschwunden, wo sie eigentlich nichts zu suchen haben. Der Sauerstoffverbrauch von Trütschen ist im Normalfall kleiner als der von Schleien. Bei Sauerstoffmangel wird auch das Fressen auf ein Minimum eingeschränkt. Damit können sie auch nicht mehr gefangen werden.

¹⁸ Geruch nach faulen Eiern



Überlebensbereich von Felchen im heissen Sommer 2003
 Abgeleitet aus der Temperatur und dem Sauerstoff.
 Im grünen Bereich können Felchen leben. Im gelben Bereich wird es "ungemütlich" und im roten Bereich tödlich.
 Erklärung siehe Text.

Hier wäre noch zu erwähnen, dass sich die Felchendichte in Reichweite der Kormorane, stark erhöhte. Mit einer so dünnen Schicht ist die Schwebnetz-Fischerei auf Felchen nicht empfehlenswert. Interne Seiches können die Felchen im Netz vorzeitig ersticken, was an den weissen Kiemen zu sehen ist. Ich bezweifle dann ihre Verkäuflichkeit.

Das Gewässerschutzgesetz verlangt vom Pfäffikersee mindesten 4 mg/l O₂ überall und jederzeit. Dies wird ab Mitte Juni in der grössten Tiefe und im September ab einer Tiefe von 8.6 m nicht erfüllt. Die Reduktion von heute 32 auf 30 mg/m³ P wird mit Sicherheit nicht den lang ersehnten Erfolg bringen.

Der natürliche Zustand (zur Pfahlbauerzeit) des Pfäffikersees war sauber¹⁹. Die Ausnahme-klausel bei der Sanierung von Seen ist für Teiche, Klein- und Flachseen gedacht, nicht aber für den Pfäffikersee.

Die Schlussfolgerung ist, dass ein Zielwert²⁰ von 30 mg/m³ P für eine Sanierung viel zu hoch ist. Dies weiss die Gewässerschutzgruppe der Vereinigung Pro Pfäffikersee schon seit Jahren und es ist gelegentlich an der Zeit, dass auch das AWEL sein Ziel revidiert²¹.

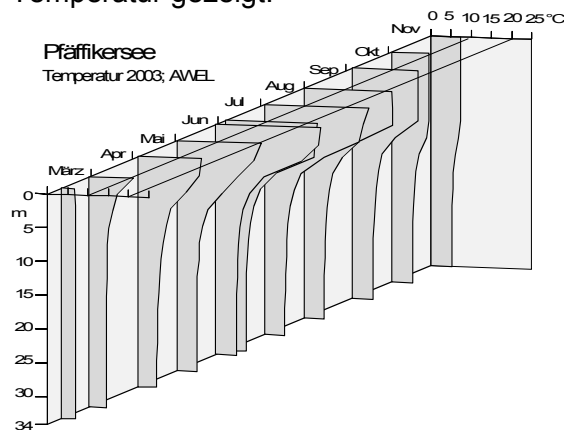
¹⁹ Der Pfäffikersee war bei seiner Entstehung war nicht mit klarem Wasser gefüllt. Als sich der Rhein-Linthgletscher zurückzog und das Seebecken freigab, war der See durch Gletschermilch getrübt.

²⁰ Die Zielvorstellung von 150g/m² und Jahr Kohlenstoff-Primärproduktion stimmt, aber deren direkte Messung ist für den Vollzug zu teuer. Die Individualität der Seen verhindert einen exakten Zusammenhang zwischen dem Phosphor und der Produktion, daher ist der P-Zielwert so lang zu verändern, bis die Produktion (und Zehrung) annehmbar ist.

²¹ Der Erfinder der "30mg" hat diese Senkung schon vor Jahren an einer EAWAG-Veranstaltung vorgetragen; wurde aber offenbar nicht gehört.

Anhang Darstellung von Seedaten:

Es gibt verschiedene Möglichkeiten Seedaten darzustellen. Sie werden am Beispiel der Temperatur gezeigt.

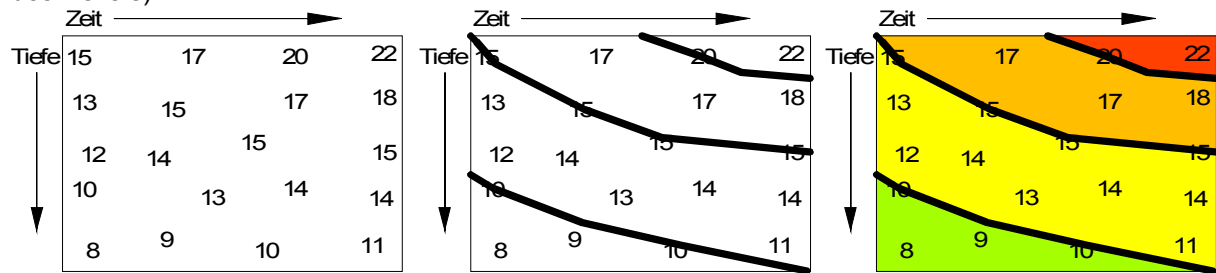


Temperatur des Pfäffikersees als Kulissendarstellung.

Nach rechts läuft die Temperatur, nach unten die Tiefe und nach hinten die Zeit.

Offensichtlich erwärmt sich der See nur nahe der Oberfläche und bleibt unten drin recht kühl. Bei einer genauen Betrachtung erwärmt sich der See auch in der Tiefe. Dies ist nicht viel, schafft aber die Voraussetzung, dass sich der See im Winter besser mischen lässt.

Ein allgemein bekanntes Beispiel einer dreidimensional gewölbten Fläche²², ist die Landschaft. Wenn man Verdeckungen vermeiden will (ein Berg im Vordergrund verdeckt alles dahinter) bleibt als einzige Möglichkeit der Blick senkrecht nach unten. Nun wirkt aber die Landschaft flach und die Darstellung der Hügel und Berge wird ein Problem. Diese Modellierung wird in Landkarten realisiert mit Höhenlinien und Schichtfarben (sowie Schraffen und Schummerung, d.h. mit einer Schrägbeleuchtung des Reliefs).



Zeichnen einer Isopletendarstellung:

Links sind die Messwerte als Zahlen eingetragen, wobei die Zahlen dort stehen, wo der Messwert ist. Dies entspricht nicht der üblichen Konvention. Auf einer Landkarte gehört zu jeder Schrift (Zahl) eine zugehörige Signatur. Bei Höhen ist dies ein Punkt, der üblicherweise zum Vermessungsnetz gehört.

In der Mitte wurden die fünfzehner Werte durch eine möglichst einfache Linie verbunden. Dasselbe wurde mit den Zwanziger- und den Zehner-Werten gemacht, wobei bei diesen bereits gewisse Freiheiten in der exakten Lage der Linie vorhanden sind.

Bei der rechten Darstellung wurden die Flächen zwischen den Linien eingefärbt, um die Zusammenhänge klarer zu machen.

In den Darstellungen sind die Höhenlinien ersetzt durch die Linien gleicher Werte (Isolinien). Zusätzlich wurden die Darstellungen mit Schichtfarben eingefärbt, welche die Farben des Regenbogens überstreichen. Dieselbe Manier wird auch bei Landkarten verwendet und nennt sich Luftperspektive, je weiter weg, desto blauer und blasser, und je näher desto roter und satter.

Das Zusammenfügen der Profile zu einem Gesamtbild benötigt Kenntnisse über das Verhalten des Sees. Zwischen allen Messpunkten werden Zusatzwerte so eingefügt, dass sie das Gesamtbild vernünftig ergänzen. Die Automatisierung dieser Zeichnung braucht eine einzige Annahme: Das Sinken der Algen prägte das ganze Geschehen im See. Dies ist ein relativ rascher Vorgang²³ im Gegensatz zum Aufsteigen der gelösten Substanzen aus dem Seeboden. Langsame Vorgänge werden durch mehrere Profile abgedeckt, rasche Vorgänge hingegen nicht. Aus dieser Annahme entsteht eine bevorzugte Richtung der Darstellung, welche von links oben nach rechts unten geht, also mit der Zeit in die Tiefe.

Landkartenzeichner haben den Vorteil, die Kleinstrukturen der Landschaft sehen zu können um dann von Hand in die glatte Vorgabe des Computers zu korrigieren. Bei limnologischen Daten sind auch Feinstrukturen bekannt. So ist bei der Temperatur und beim Sauerstoff ein Tagesgang vorhanden, welcher bei monatlichen Probenahmen fehlt, weil das AWEL seine Wasserproben nur am Morgen (bei Tageslicht) aus dem See holt.

²² Eine echt dreidimensionale Sicht von Objekten ist recht selten, d.h. Objekte, in denen wir auch den Raum sehen. Es sind Wolken, Rauch, Glasmurmeln, Schneetreiben, ein Vogelschwarm oder als profane Beispiele Tee mit Creme oder die aufsteigenden Gasblasen in einem Bierglas. Ihre Seltenheit trägt möglicherweise zur Faszination dieser Objekte bei. Alle diese Objekte machen dem Fotografen besondere Schwierigkeiten.

²³ typische Sinkgeschwindigkeiten sind einige Meter pro Tag. Die Verlustraten sind einige Dezimeter pro Tag. Der Aufstieg ist keine Geschwindigkeit, sondern eine „Diffusion“ mit weniger als 0.1 Quadratmeter pro Tag.