

Interpretation der AWEL-Daten des Pfäffikersees 2011

Heinrich Bührer

Die Daten stammen, wie immer, vom AWEL. Herzlichen Dank!

Die Zirkulationsunterstützung wurde am 4.4.2011 eingestellt, womit die Wirkungen erst im Jahre 2012 erwartet werden können.

Das Wichtigste zuerst, der **Lebensraum für Felchen:**

In Abbildung 1 läuft die Zeit nach rechts und die Tiefe nach unten. Es handelt sich um die übliche Kombination von den Isoplethen der Temperatur (°C) mit den Isoplethen des Sauerstoffs (mg/l), wobei je nur die kritischen Werte gewählt wurden. Grün ist für die Fische (Salmoniden) im „grünen“ Bereich. Bei gelb wird's kritisch und bei rot tödlich.

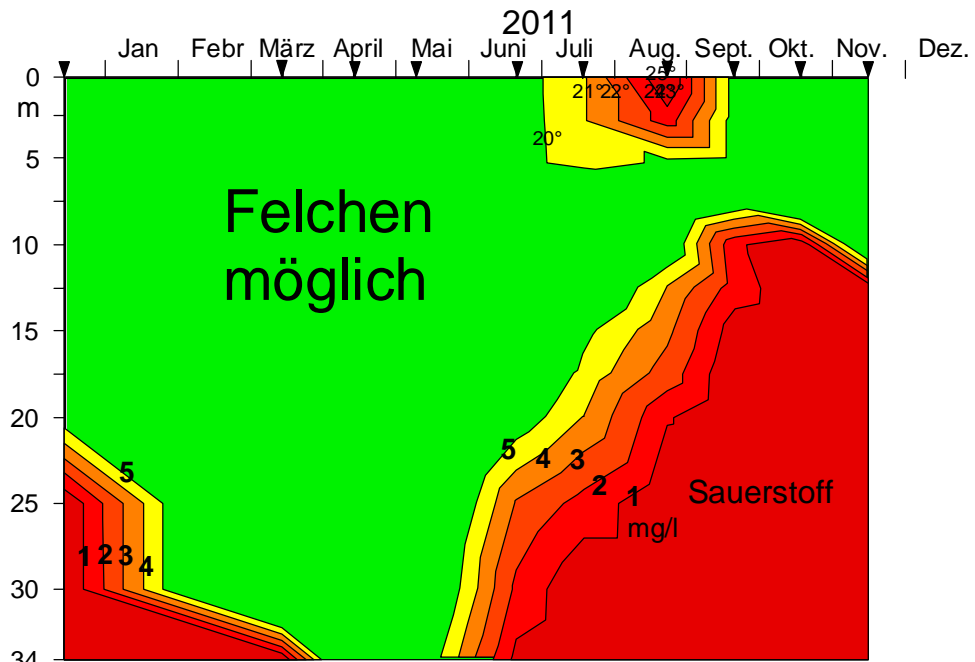


Abb. 1: Lebensraum von Felchen

Mitte September 2011 war es etwas kritischer als im Vorjahr, indem die Sauerstoffzehrung die minimale Tiefe erreichte während der See noch über 20°C warm war.

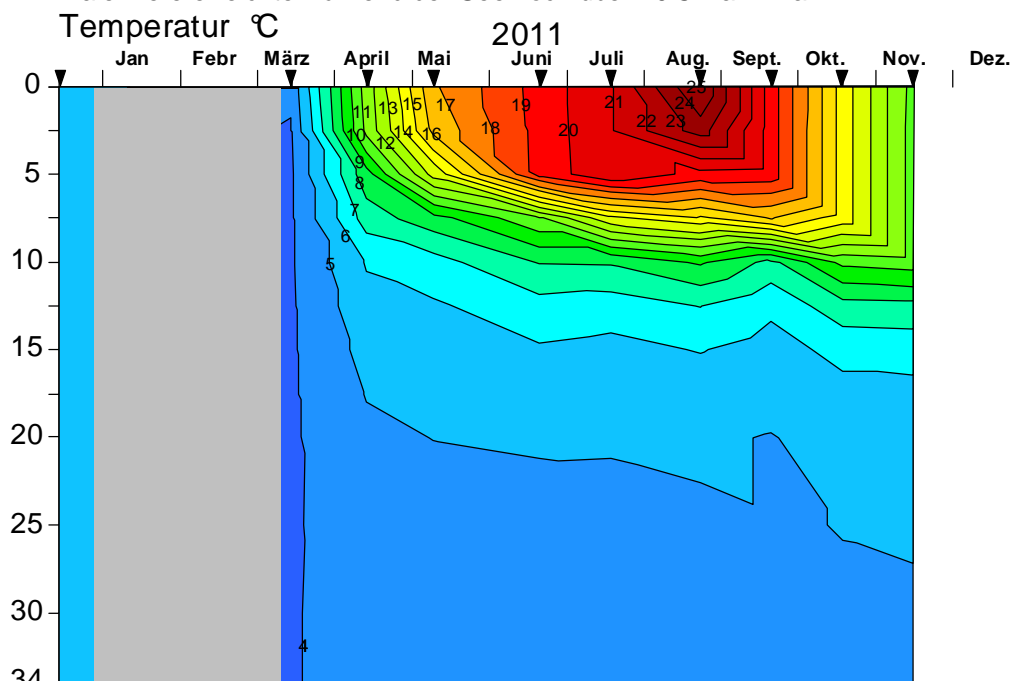


Abb. 2: Temperaturisoplethen

Im Februar waren die Temperaturen mit Sicherheit tiefer als 4°C. Die Datenlücke ist grau abgedeckt. Für die Delle im September im Tiefenwasser dürfte eine interne Welle (Seiche) verantwortlich sein, denn zu dieser Zeit kann das Wasser in der Tiefe nur wärmer werden. Der Wind an der Oberfläche ist die Ursache für solche interne Wellen. Er schiebt das warme Oberflächenwasser an ein Ende des Sees, womit das Tiefenwasser ans andere Ende ausweichen muss. Der See reagiert darauf wie jedes physikalische Pendel: er schwingt und pendelt dann langsam aus, wobei die Bewegung wegen der Erdrotation in einer Kreisströmung endet. Der Sommer 2011 war etwas wärmer als 2010, siehe Abb.3.

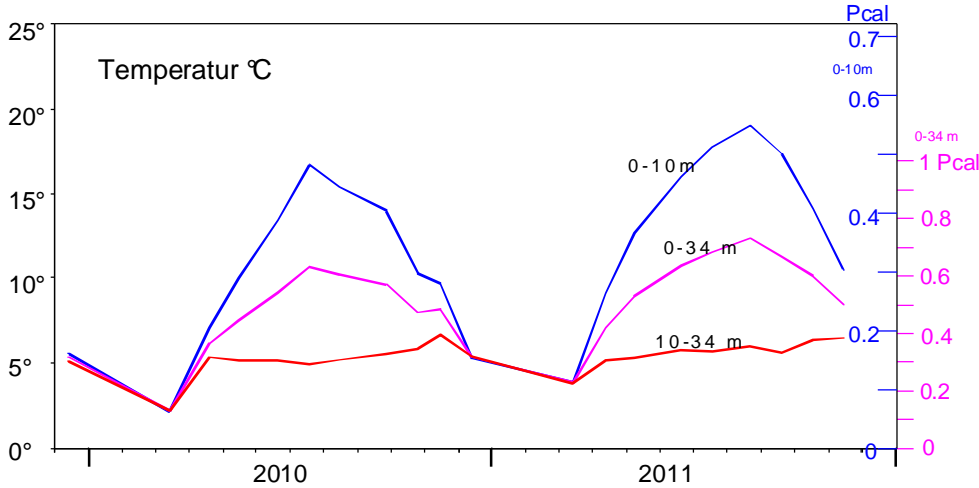


Abb. 3: Verlauf der Temperatur in den Jahren 2010 und 2011.

In dieser Abbildung sind die volumengewichteten mittleren Temperaturen dargestellt. Dies ist gleichbedeutend mit den Wärmemengen im See, siehe Masstäbe rechts in Petacalorien (mit der Verschiebung des Nullpunktes auf 273.15 Kelvin = 0°Celsius). Die jährliche Wärmeaufnahme entsprach etwa dem Heizwert von je 49 000 Tonnen Heizöl EL.

Künstliche Wärmeeinleitungen beeinflussen nicht nur den Wärmeinhalt, sondern auch die Schichtungsintensität; besonders dann, wenn sie als Freistrahler eingeleitet werden. Ihre kinetische Energie trägt zur vertikalen Mischung bei und verflacht die Dichtegradienten. Dies ist nicht unproblematisch, weil die Sprungschicht das Aufsteigen von Phosphor stark bremst. Zur Analyse der Daten muss die erste Ableitung¹ der Temperatur nach der Tiefe berechnet werden. Am Resultat zeigt sich, dass jeder See als Individuum betrachtet werden muss. Grosse Seen (Seen mit einer grossen Ausdehnung in Hauptwindrichtung) zeigen dabei tendenziell kleinere Werte². Unterschiede zwischen 2010 und 2011 sind kaum zu sehen. Daraus lässt sich schliessen, dass künstliche Einleitungen mit Eintrag von kinetischer Energie keine grosse Wirkung zeigten.

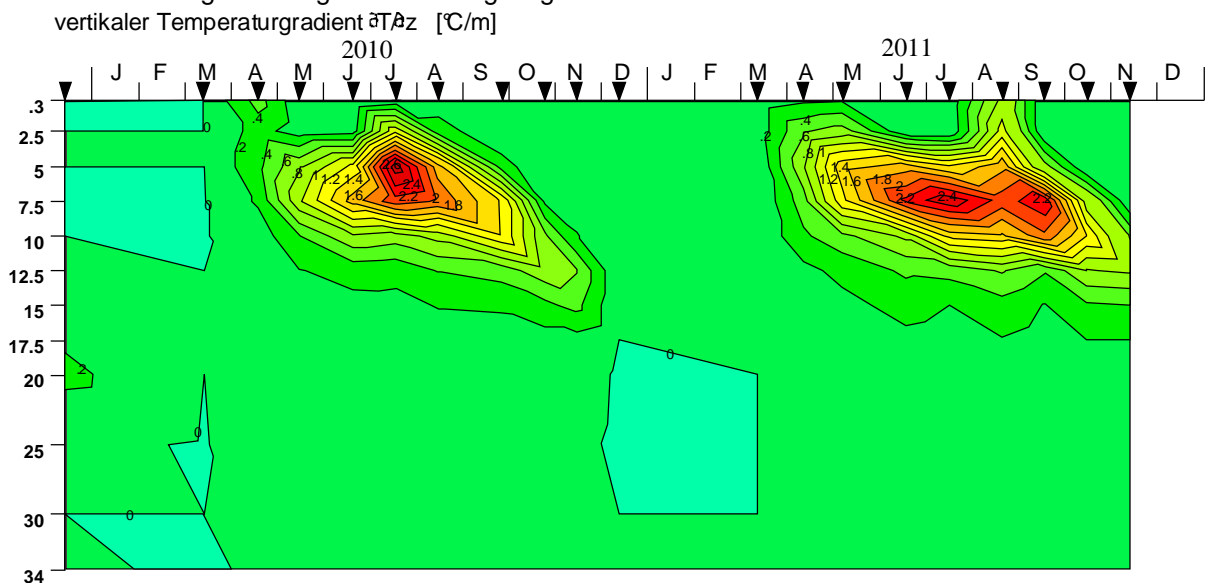


Abb. 4: vertikaler Temperaturgradient $\partial T/\partial z$ [°C/m]

¹ siehe Anhang

² Zürichsee ca. 1, Bodensee 0.5, Greifensee >1, Pfäffikersee >2°/m.

Genau genommen sollte für die Intensität des Metalimnions statt der Temperatur die Dichte betrachtet werden (vgl. Abb. 17) aber für das Sommerhalbjahr ist diese Darstellung beim Pfäffikersee brauchbar. Beim Ritomsee oder Lago di Cadagno mit ihren subaquatischen Gipsquellen wäre diese Vereinfachung auch im Sommer nicht zulässig.

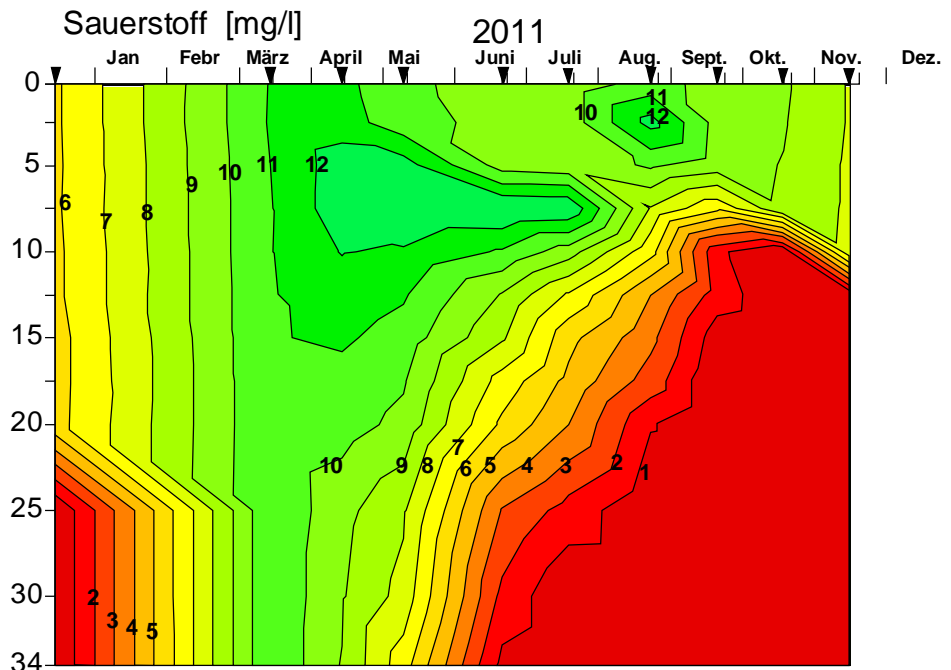


Abb. 5: Sauerstoff [mg/l]

Die Sauerstoffsättigung hat sich von 50 % (Oberfläche) im Dezember 2010 bis im März 2011 auf zirka 90% erhöht, die bis in die grösste Tiefe reichte. Vom April bis in den Oktober war die Oberfläche übersättigt. Für die Biologie spielt die aktuelle Sauerstoffkonzentration die wichtigste Rolle, während es bei der Physik (Thermodynamik) eher die Sauerstoffsättigung ist. Auch ein ultraoligotropher oder vergifteter See ist wegen des Temperaturgangs an der Oberfläche im Winter untersättigt und im Sommer übersättigt.

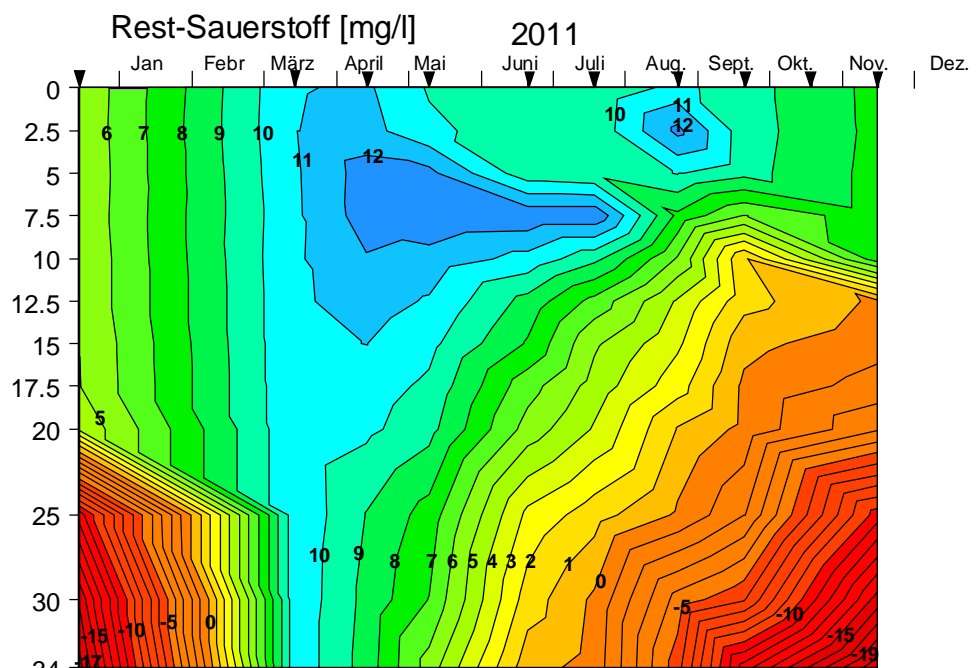


Abb. 6: Rest-Sauerstoff³

³ Rest-Sauerstoff: Sauerstoff, der vorhanden wäre, wenn die leicht oxydierbaren gelösten Verbindungen (NH_4^+ , NO_2^- , H_2S , CH_4) oxydiert wären.

Der Rest-Sauerstoff zeigt beinahe das gleiche Bild wie der Sauerstoff, nur sind die Nullerplateaus ersetzt durch Löcher. Für Felchen spielt der Sauerstoff die wichtigste Rolle. Die potenziell giftigen Chemikalien Ammonium, Nitrit und Schwefelwasserstoff kommen in nennenswerten Mengen im See⁴ erst dann vor, wenn der Sauerstoff ohnehin nicht mehr reicht.

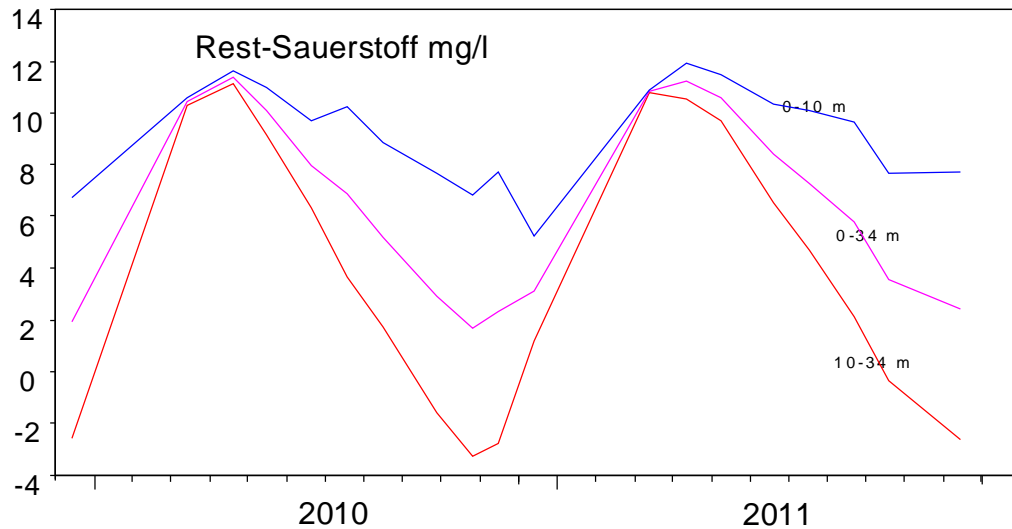


Abb. 7: Verlauf des Rest-Sauerstoffs in den Jahren 2010 und 2011

Volumengewichtete Mittel⁵ des Rest-Sauerstoffs. Die beiden Jahre sind vergleichbar. Bei der Belüftung des Sees (Zunahme des Sauerstoffs) in den beiden Frühjahren sind kaum Unterschiede sichtbar. Auch die Zehrung im Hypolimnion (Abnahme des Sauerstoffs) ist in den beiden Jahren vergleichbar. Es handelt sich jeweils um zirka 900 Tonnen Sauerstoff. Die Zunahme wird durch die Physik gegeben (Mischung, Gasaustausch an der Oberfläche). Bei der Abnahme könnte es sich prinzipiell um reine Chemie handeln, was aber viel zu langsam wäre. Diese Vorgänge werden durch Enzyme katalysiert und von Organismen für ihren Energiestoffwechsel benutzt. Da beide Jahre ähnlich verliefen, darf daraus geschlossen werden, dass die Biologie keine Sprünge gemacht hat.

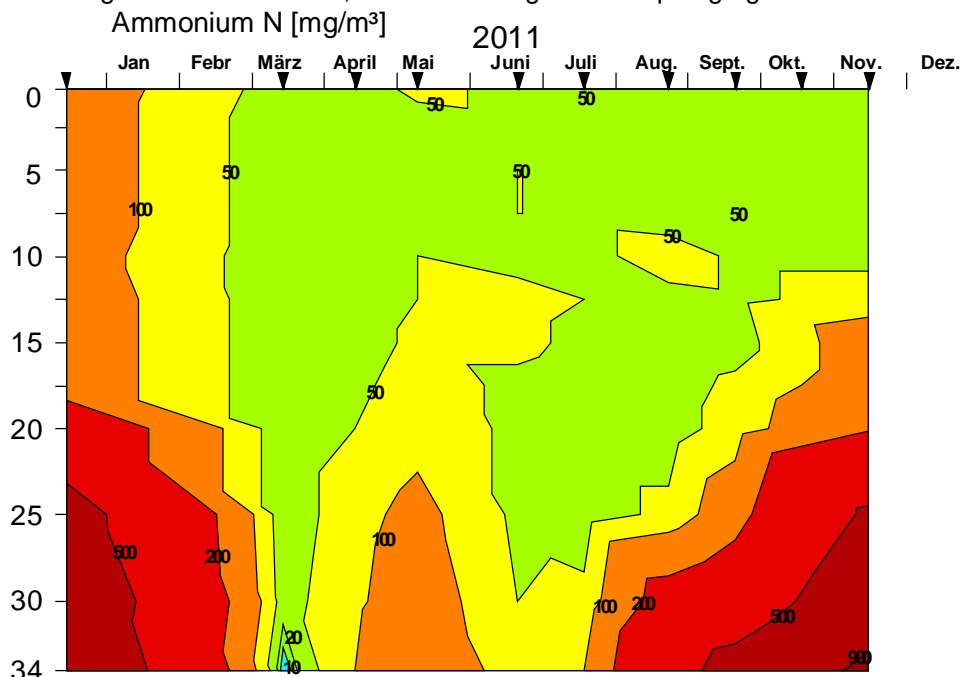


Abb. 8: Ammonium-Stickstoff

Ammonium-Stickstoff wird in Gegenwart von Sauerstoff durch Bakterien über die Zwischenstufe Nitrit in Nitrat⁶ umgewandelt. Es wäre auch ein beliebter Stickstoffdünger für Algen, wenn sie vorhanden wären. Ammonium wird durch den Abbau von organischen Stickstoffverbindungen (Proteine etc.)

⁴ In Bächen kann es anders sein.

⁵ Volumengewichtetes Mittel = Inhalt des Sees an einer Substanz dividiert durch das Volumen des Sees.

⁶ wobei Nitrosomonas und Nitrobacter nur die chemoautotrophen Gattungen sind.

gebildet. Die Hauptquelle im Päffikersee ist das Sediment mit den Altlasten vergangener Jahre. Das kleine Zwischenmaximum von April und Mai ist auf frisch sedimentierte Algen (vgl. Abb. 15) zurückzuführen, was auch prompt zu Nitrit (siehe Abb. 9, Nitrit-Isoplethen) und dann evtl. zu Nitrat oxydiert wurde. Ammoniak wäre toxisch für Fische, aber spielt erst im basischen Bereich eine Rolle. Die betreffenden pH-Werte werden schon seit Jahren nicht mehr erreicht. Diese Werte waren regelmässig mit potenziell giftigen Cyanophyten („Blualgen“) gekoppelt.

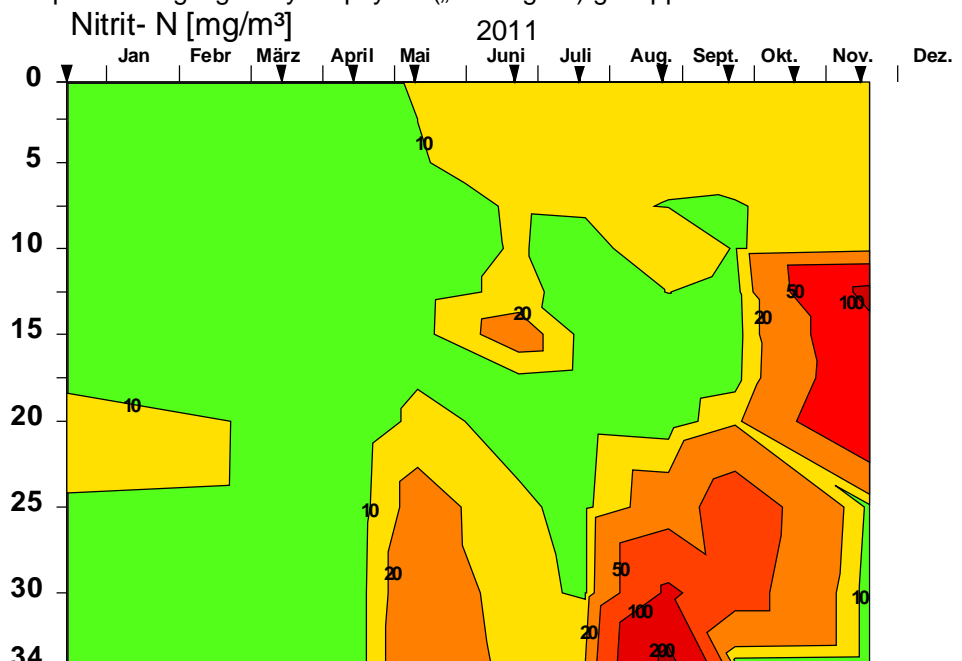
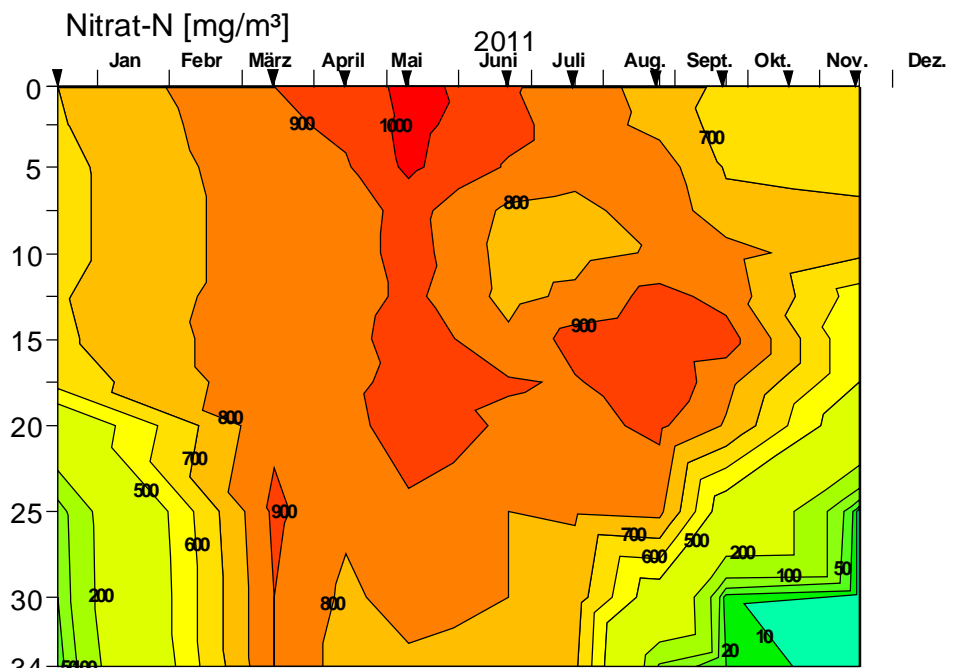
Abb. 9: Nitrit-Stickstoff⁷

Abb. 10: Nitrat-Stickstoff

Nitrat ist ein beliebter Algennährstoff. Die normalen Stickstoffverbindungen in Organismen sind Amine, d.h. Stickstoff mit derselben Oxydationszahl wie Ammonium. Nitrat scheint daher die ungeeignetste Stickstoffquelle zu sein, was verblüffenderweise falsch ist. (Wahrscheinlich, weil Nitrat die häufigste Quelle von gebundenem Stickstoff ist). Pflanzen lassen sich mit Chlorat vergiften, weil ihre Transportenzyme diese Verbindung mit Nitrat verwechseln. Weil kleine bösen Buben damit spielen und man im Gegensatz zu modernen Herbiziden, sehr grosse Mengen davon braucht, wurde Chlorat vom Markt genommen.

⁷ Richtwert der Verordnung für eingeleitetes Abwasser <300 mg NO₂-N/m³

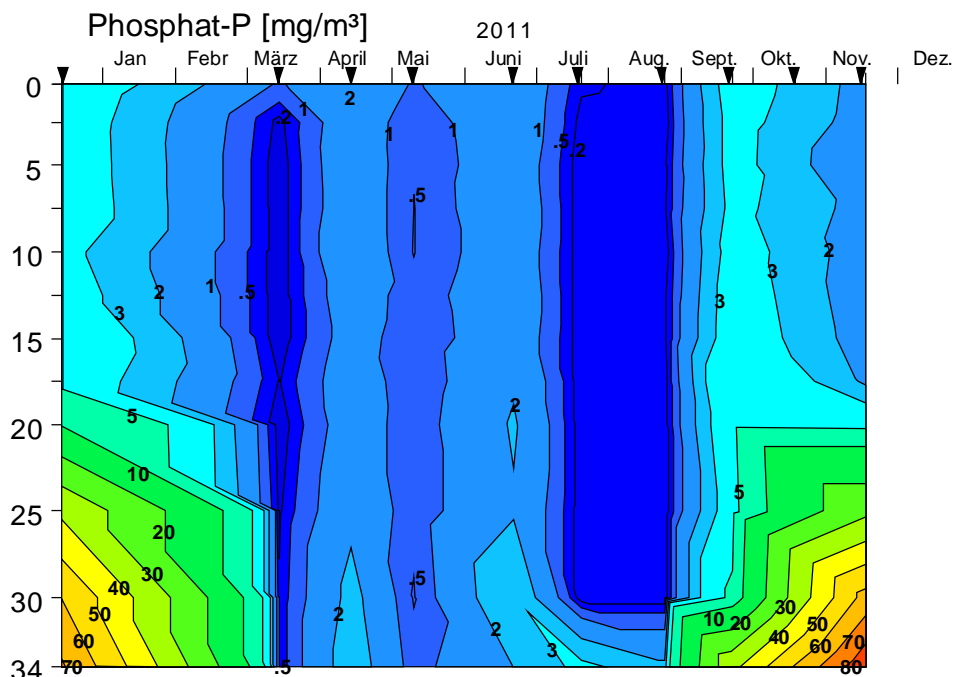


Abb. 11: Phosphat-Phosphor

Der See wurde durch Algen leer gefressen. Phosphat-P (respektive genauer SRP: soluble reactive phosphorus, denn an der Molybdänblau-Reaktion, dem chemischen Nachweis, sind ausser dem ortho-Phosphat noch andere Phosphorverbindungen beteiligt) ist in einem Fließgleichgewicht, das durch die Zehrung durch die Algen und durch die Freisetzung aus dem „bacterial loop“ entsteht. Theoretisch sind Werte von weniger als 0.01 mgP/m³ möglich. Werte von >1 zeigen, dass die Algendichte nicht allzu gross gewesen sein kann.

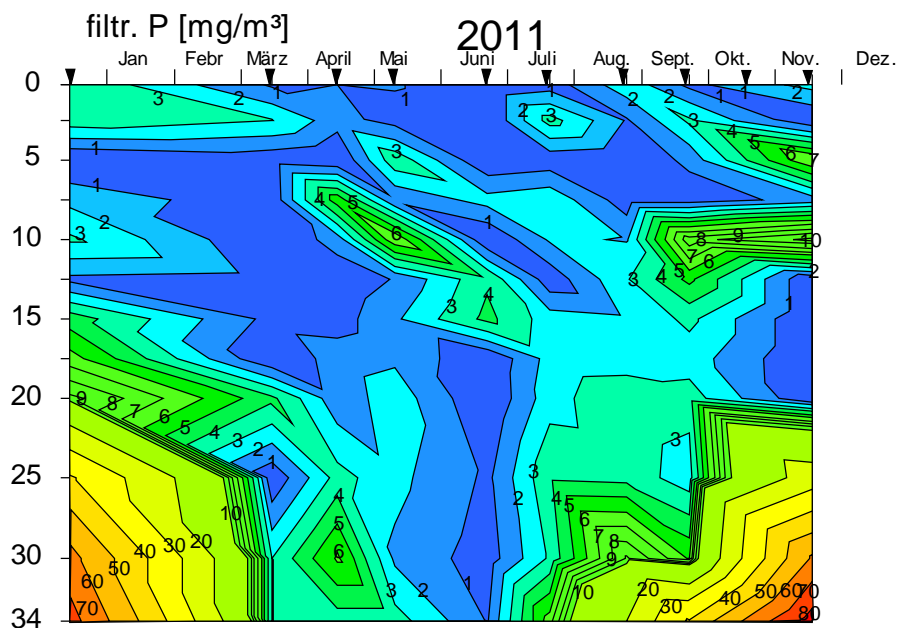


Abb. 12: Phosphor im Filtrat

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 oder reiner Phosphor (weisser, roter oder schwarzer). All diese Substanzen sind mehr oder weniger giftig. Phosphonate⁸ sind keine Erfindung

⁸ Phosphonate sind Phosphorverbindungen, in denen Phosphor-Atome direkte Bindungen mit Kohlenstoff-Atomen haben. (ohne Sauerstoff als Zwischenglied).

der Waschmittelindustrie. Auch Bakterien stellen Phosphonate her (etwa 1% des gesamten Bakterien-P).

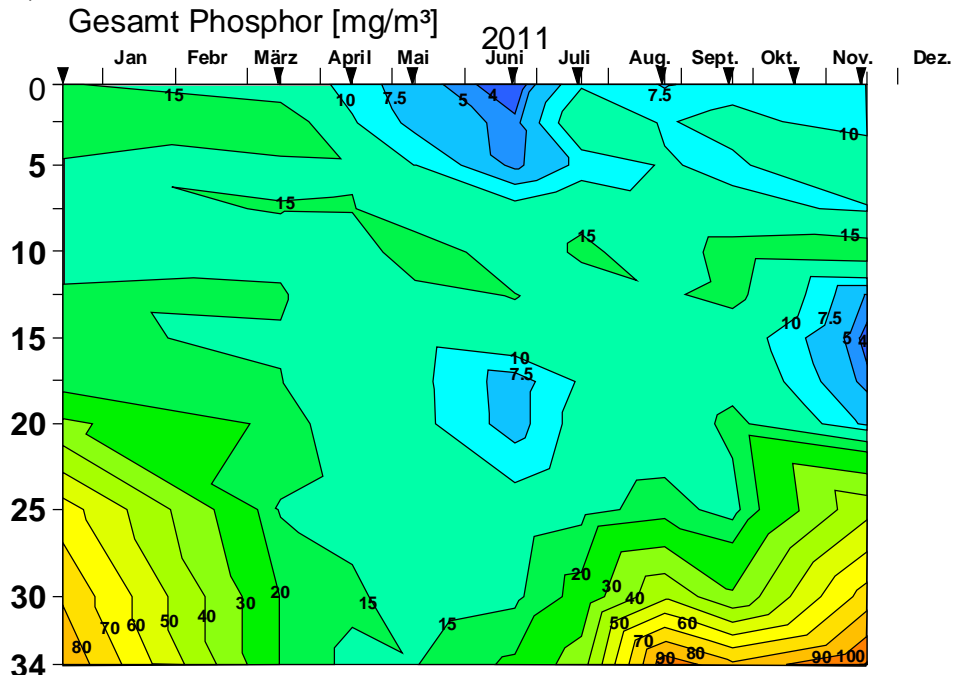


Abb. 13: Gesamt-Phosphor

Der Gewässerschutzgruppe ist schon seit langem bekannt, dass die tolerierbare Phosphorkonzentration des Pfäffikersees unterhalb von 10 mg/m³ liegt. Das Sanierungsziel ist die Naturverleimung der Felchen. Die aktuelle Konzentration liegt nun bei zirka⁹ 11 mg/m³, d.h. etwas höher als 2010. Die Anreicherung in den tiefen Schichten durch das „Ausbluten“ des Sediments ist nicht mehr so hoch wie früher. Daran wesentlich beteiligt ist nur noch etwa ein Drittel der Sedimentfläche.

Ich kann keine einfache Erklärung liefern, welche das Loch im Juni auf 17.5 - 20 m Tiefe betrifft. Für eine Einschichtung von Flusswasser liegt es zu tief im Hypolimnion (siehe Abb.4 Schichtungsintensität) und *Planktotrix (Oscillatoria) rubescens* war nicht vorhanden. Zudem sind in der Leitfähigkeit (Abb.16) keine Sprünge vorhanden, was auch ein Indiz für eingeschichtetes Fremdwasser wäre. Ein Analysen- oder Übertragungsfehler ist auch kaum vorhanden, da der Wert von 6.2 doppelt gefunden wurde. Ähnliches gilt für die Novemberwerte um 15m Tiefe, die aber mitten im Metalimnion lagen.

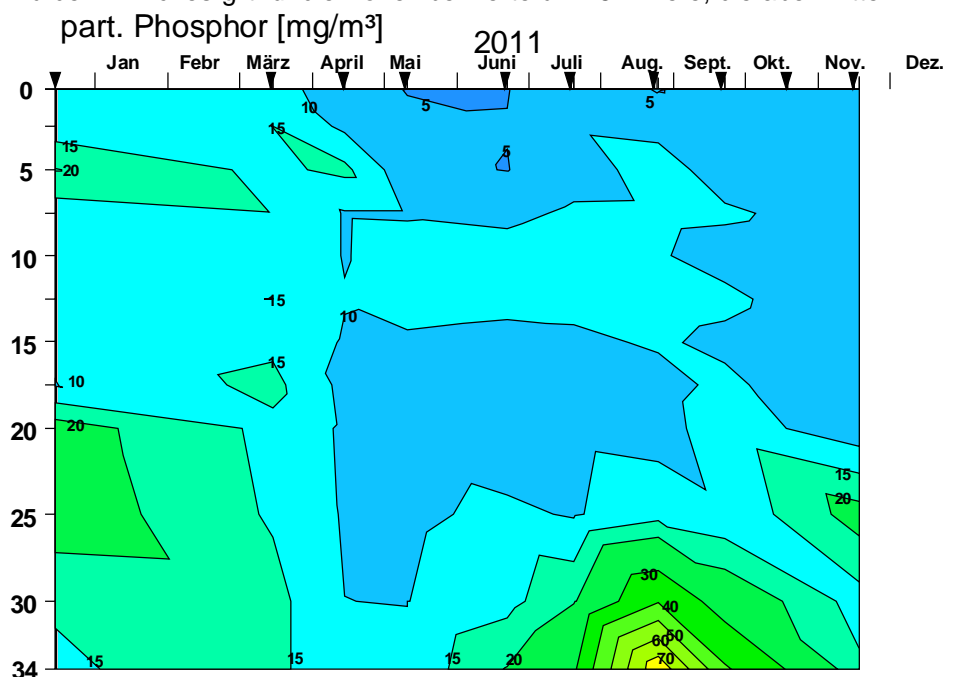


Abb. 14: partikulärer Phosphor

⁹ Mai 11.8, Juni 11.1, Juli 8.8, August 12.4 mg/m³

Partikuläre Komponenten werden normalerweise als Indiz für Plankton verwendet. Was aber im August in grosser Tiefe fraglich ist. Solche Spitzenwerte können Bakterien anzeigen.

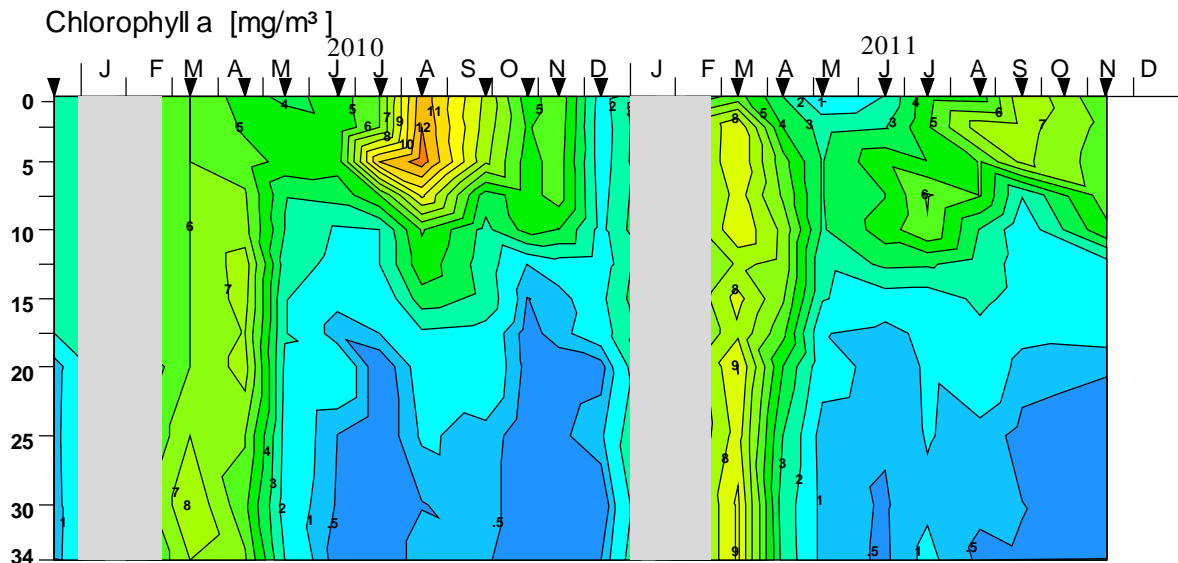


Abb. 15: Chlorophyll a

Offenbar war jeweils im März eine intensive Totalzirkulation (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 Sommer-Maximalkonzentrationen waren moderat und im Jahre 2011 weniger hoch, was aber auch ein Zufall sein könnte. Die Algendynamik eines Sees kann mit einer Probe pro Monat und ohne lückenlose Tiefenprofile nur lückenhaft erfasst werden. Die Zusammenfassung durch den Restsauerstoff in Abb. 7 liefert zuverlässigere Werte zur Beantwortung dieser Frage, weil sie zeitlich integriert (sie erfasst auch etwaige Maxima zwischen den Messdaten).

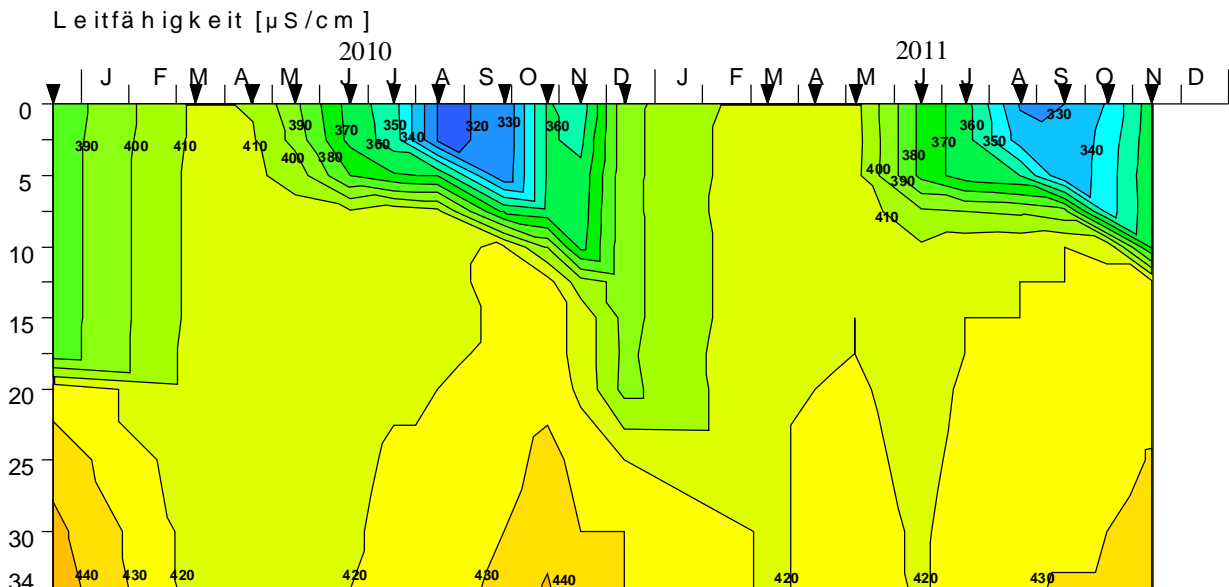


Abb. 16: elektrische Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]

Die elektrische Leitfähigkeit zeigt die gelösten Ionen im Wasser. Da die Hauptionen Calcium und Bikarbonat sind, kann aus der Leitfähigkeit, mindestens näherungsweise, die Kohlenstoffzehrung und -Anreicherung berechnet werden; daraus liess sich auch die Brutto-Primärproduktion schätzen. Die Leitfähigkeit dient auch, zusammen mit der Temperatur, der Berechnung der Dichte des Wassers und der Schichtungsstabilität.

Schichtungsstabilität

Die Dichte des Wassers ist vor allem abhängig von der Temperatur; bei Süsswasser mit einem Dichtemaximum bei etwa 4°C. Weitere Parameter, die die Dichte erhöhen sind der Druck (Wasser

lässt sich etwas komprimieren) und die gelösten, 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 g/m^4) wird zu Gunsten der Brunt Väisälä Frequenz verzichtet. Sie liefert ein ähnliches Bild, nur mit anderen Zahlen. Die Dichte wurde nach Chen und Millero (inkl. Kompressibilität) berechnet.

Die Brunt-Väisälä Frequenz berechnet sich als $N = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}}$, $g = \text{Erdbeschleunigung}^{10} 9.81 [\text{m/s}^2]$,

$\rho = \text{Dichte des Wassers} [\text{t/m}^3]$, $z = \text{Tiefe in m}$, nach unten zunehmend. $N = \text{Hertz} [1/\text{s}]$. Da g und ρ 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 Minuten und 2011 1.73 Minuten.

Für die Berechnung von wirklichen Schwingungen von Wasser im See müsste nun auch die Seebecken-Geometrie berücksichtigt werden.

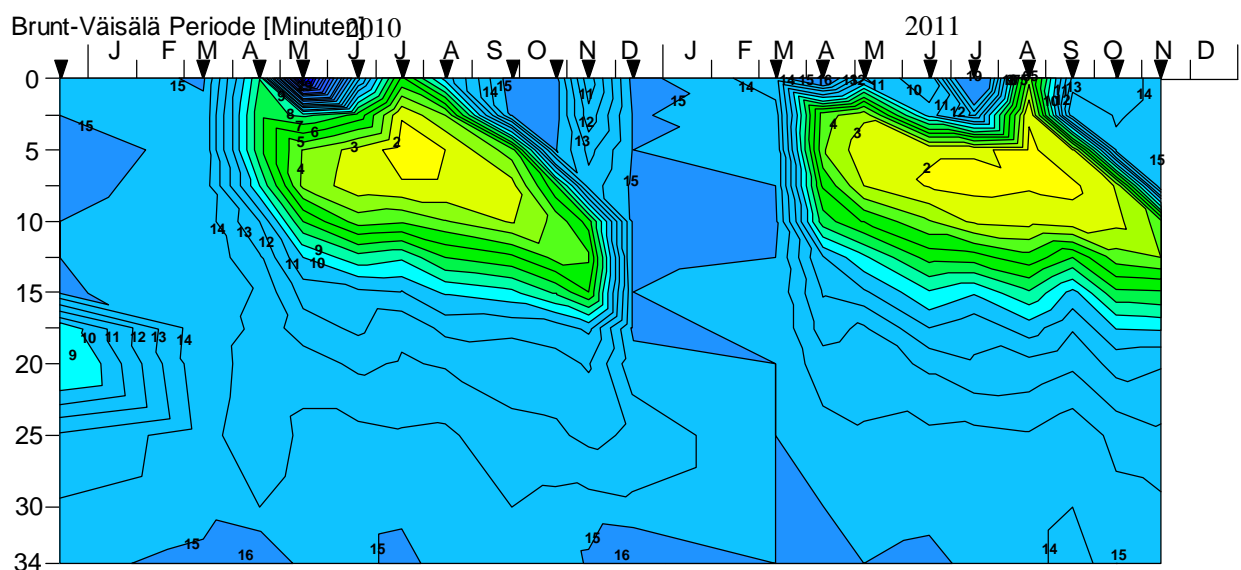


Abb. 17: Brunt-Väisälä Perioden [Minuten]

Die Perioden in Abbildung 17 sind typisch für einen relativ kleinen See ohne intensive Windexposition. Siehe Fussnote 2. Das Maximum an der Oberfläche im Mai 2010 ist ein bedeutungsloses Artefakt, das aus der Unsicherheit der partiellen Ableitung der Dichte nach der Tiefe stammt; also einem nicht manierlichen Verlauf der Kurve, um die Wortwahl aus dem Anhang zu benutzen.

Anhang:

Die volumengewichteten Mittel wurden mit der Schlund'schen Topographie, Bestimmung der Flächen durch Bruno Ribí und der Keplerschen Fassregel (Bührer Z.Hydrol.) berechnet. Die Annahmen dabei sind, dass die Konzentrationen linear mit der Tiefe zu- oder abnehmen und dass die Falllinie der Topographie zwischen den gemessenen Tiefen eine Gerade sei. Genauer geht's nur mit zusätzlicher Information.

Ableitungen:

Die numerische Differentiation wurde mit einem Ausgleichs-Polynom zweiten Grades berechnet. An Rändern kann dies wegen Ueberschiessens in Interpolationen problematisch werden. Dies kann nur mit zusätzlichen Stützpunkten (Handkorrekturen) vermieden werden. Prinzipiell wäre auch ein Abgriff des Polynoms am Rand möglich. Dies liefert aber nur bei manierlichen Kurven ein vernünftiges Resultat. Differentiationen verstärken prinzipiell das Rauschen der Daten, während Integrationen (Mittel) glättend wirken. Dementsprechend dürfen nach Ableitungen nur noch die grossen Linien beurteilt werden, da Details unsicher werden.

¹⁰ Wetzikon 9.80632 (Zürich 9.80665, W'thur: 9.80687)

Literatur:

Inge Kutschke, Dissertation über die Temperatur des Zürichsees bei E.A.Thomas (Uni ZH)

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, 1966 (111) 47-124

Alfred (Jonny) Wüest, Dissertation über das Schichtungsverhalten des Gersauerbeckens bei Dieter Imboden (ETH-Z Nr. 8350, 1987)

Dieter Imboden Vorlesung über Systemanalyse.

Heinrich Bührer Dichteformel, Berechnung des Inhalts von Seen. Schweiz. Z. Hydrol.

Topographie Pfäffikersee <http://homepages.eawag.ch/~buehrer/PDF/Seetopo.pdf>

Chen und Millero: Deep-Sea Research 1977, Vol.24, 365-369