



Marcus Thome, *2001
Katharina Thome, *2003

Marienschule, Krefeld,
Maria-Sibylla-Merian-Gymnasium, Krefeld

Eingang der Arbeit:
April 2016

Zur Veröffentlichung angenommen:
Juli 2016

Geheimnisse aus den Tiefen des Elfrather Sees

Limnologische Untersuchungen am Elfrather Wassersportsee

Von Mitte 2014 bis Anfang 2016 untersuchten wir den Elfrather See. Wir stellten fest, dass es nur während der Sommerstagnation deutliche Temperaturunterschiede zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser gab. In den untersuchten Wintern gab es keine Winterschichtung, so dass die Herbstzirkulation direkt in die Frühjahrszirkulation überging. Dies kann als Zeichen für den Klimawandel gedeutet werden.

Hinweis: Für die Erklärung der Fachwörter beachten Sie bitte das Glossar auf Seite 59.

1 Einleitung

Der Elfrather Wassersportsee ist ein über 40 Jahre alter Baggersee, an dem zahlreiche Wasservögel leben (siehe Abb. 1 und 2). In der Mitte des Sees gibt es eine unter Naturschutz stehende Vogelinsel, die von Menschen nicht betreten werden darf und als Rückzugsraum für Vögel dient [8], [14].

Wir untersuchten den Elfrather See von Herbst 2014 bis Winter 2015/2016. Insbesondere erstellten wir Tiefenprofile und verglichen das Oberflächenwasser mit dem Tiefenwasser. Die Schichtung und Zirkulation des Wassers im Elfrather Wassersportsee bilden den

Schwerpunkt unserer Arbeit (Kapitel 2 und 3.1). Daneben dokumentierten wir noch die Nährstoffbelastung des Sees anhand der Makrophyten und der Sichttiefe (Kapitel 2.1 und 3.2).

2 Messmethoden

2.1 Gewinnung und Vermessung von Wasserproben

Wir fuhren mit einem Schlauchboot über den See und gewannen mithilfe einer selbst gebauten Schöpfflasche Wasserproben aus der Tiefe. Die tiefste Stelle des Sees hatten wir zuvor im Rahmen einer Tiefenkartierung mit einem Senklot identifiziert. Unsere Schöpf-

flasche hatten wir aus einer Sektflasche gebaut. Damit die Flasche unterging, wurde sie durch einen mit Kieselsteinen gefüllten Kartoffelsack beschwert. An den Hals der Flasche hatten wir ein Seil gebunden, mit dessen Hilfe wir die Flasche herunter ließen. Damit wir sehen konnten, in welcher Tiefe sich die Flasche befindet, hatten wir das Seil mit Tiefenmarkierungen versehen. Ein zweites Seil war am Verschluss der Sektflasche befestigt. Wenn sich unsere Flasche in der gewünschten Tiefe befand, zogen wir mit diesem Seil den Verschluss ab, so dass das Wasser in die Flasche einströmen konnte.

Zur Erstellung der Tiefenprofile wurden folgende Werte mit Hilfe eines Photometers der Firma WINLAB gemessen: Ammonium, Eisen, Phosphat, Nitrat, pH-Wert. Der Sauerstoffgehalt und die Temperatur wurden direkt durch ein Sauerstoffmessgerät mit entsprechend langem Sensorkabel der Firma WTW gemessen.

2.2. Messung der Lufttemperaturen

Die zum Vergleich herangezogenen Lufttemperaturen von Januar 2016 wurden in unserer eigenen Wetterstation, welche wir im Garten aufgebaut haben, gemessen. Das Maximum- Minimumthermometer befindet sich in einer Thermometerhütte (siehe Abb. 3).

2.3 Methoden zur Untersuchung der Nährstoffbelastung

Für die Beurteilung der Nährstoffbelastung führten wir einen sogenannten Linientransekt durch [2], [3], [6], [9], [10]. Mithilfe eines Rechen gewannen wir hierbei die Makrophyten vom Boden des Sees. Den Rechen zogen wir vom Boot aus über den Grund des Sees. Damit der Rechen unterging, wurde ein mit Kieselsteinen gefüllter Kartoffsack an ihm befestigt. Hatte der Rechen den Boden erreicht, zogen wir ihn einige Meter über den Boden und holten ihn anschließend wieder hoch, um die daran hängenden Pflanzen zu sammeln (siehe Abb. 4). Anhand der gefundenen Zeigerpflanzen wurde dann der Makrophytenindex berechnet. Das Linientransekt war so ausgewählt, dass es über die tiefste Stelle des Sees führte, um sicherzustellen, dass wir Pflanzen aus allen Tiefen des Sees gewinnen.

Zusätzlich ermittelten wir die Nährstoffbelastung anhand der Sichttiefe mithilfe einer Secchi-Scheibe. Eine Secchi-Scheibe ist kreisrund und in vier Sektoren (zwei schwarze und zwei weiße) unterteilt, auf ihrer Unterseite befindet sich ein Gewicht (siehe. Abb. 5, Seite 56) [12]. Wir maßen die Sichttiefe von April bis September 2015 an drei verschiedenen Stellen und berechneten hieraus die mittlere Sichttiefe [4].

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1. Schichtungs- und Zirkulationsphänomene

Abb. 6 und 7 zeigen verschiedene Tiefenprofile im Elfrather See: die Tem-



Abb. 1: Der Elfrather See in der kalten Jahreszeit. Wenn keine Wassersportler das Wasser nutzen, verteilen sich die Vögel gerne über die gesamte Wasserfläche



Abb. 2: Im Sommer, wenn der See von Wassersportlern genutzt wird, halten sich die Wasservögel in erster Linie an der Vogelinsel auf.



Abb. 3: Die Thermometerhütte in unserem Garten.



Abb. 4: Gewinnung von Makrophyten vom Grund des Sees.

peratur, den Sauerstoffgehalt und den pH-Wert. Die Oberflächenwerte unterschieden sich im Spätsommer 2015 deutlich von den Tiefenwerten (siehe Abb. 7), während im Winter, Herbst und im Frühjahr kaum Unterschiede zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser existierten (vgl. Abb. 6 vom Frühjahr 2015).

Im Sommer gab es eine deutliche Schichtung des Wassers. Im Frühsommer begann die Sprungschicht in einer Tiefe von 4 Meter, im Spätsommer dehnte sich die obere warme Wasserschicht (Epilimnion) nach unten aus, so dass die Sprungschicht um 2 Meter absank.

Die Sprungschicht fungiert als eine Art Sperrschicht, welche verhindert, dass sich das kältere Wasser vom Grund des Sees mit dem wärmeren Oberflächenwasser des Epilimnions mischt [1][12][13]. Im Elfrather See bildete sich aufgrund zu geringer Tiefe kein Hypolimnion aus, so dass die Sprungschicht bis zum Boden reichte.

Aufgrund der fehlenden Sauerstoffzufuhr von der Oberfläche entstand im Laufe des Sommers Sauerstoffmangel in der Tiefe. Im Spätsommer war zu beobachten, dass der Sauerstoffgehalt bis zu einer Tiefe von 4 Meter nur geringfügig abnahm und darunter deutlich abfiel (siehe Abb. 7). Am Grund des Sees war so gut wie kein Sauerstoff mehr vorhanden.

Weitere Unterschiede zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser gab es bei den chemischen Messwerten. Wie in Abb. 8 zu erkennen, stieg der Ammoniumgehalt im Sommer in der Tiefe deutlich an. Dies ist durch den bereits erwähnten Sauerstoffmangel am Boden zu erklären. Denn bei Sauerstoffmangel läuft die ansonsten bei Anwesenheit von Sauerstoff übliche Abbaureaktion von Ammonium über Nitrit zu Nitrat nun in die umgekehrte Richtung ab. Aus Nitrat wird also zunächst Nitrit und dann Ammonium, wodurch sich Ammonium am Grund des Sees anhäuft [5][12][13].

Im Oberflächenwasser war der Ammoniumgehalt gering, da erstens die an der Oberfläche vorhandenen Pflanzen den



Abb. 5: Bestimmung der Sichttiefe mit der Secchi-Scheibe.

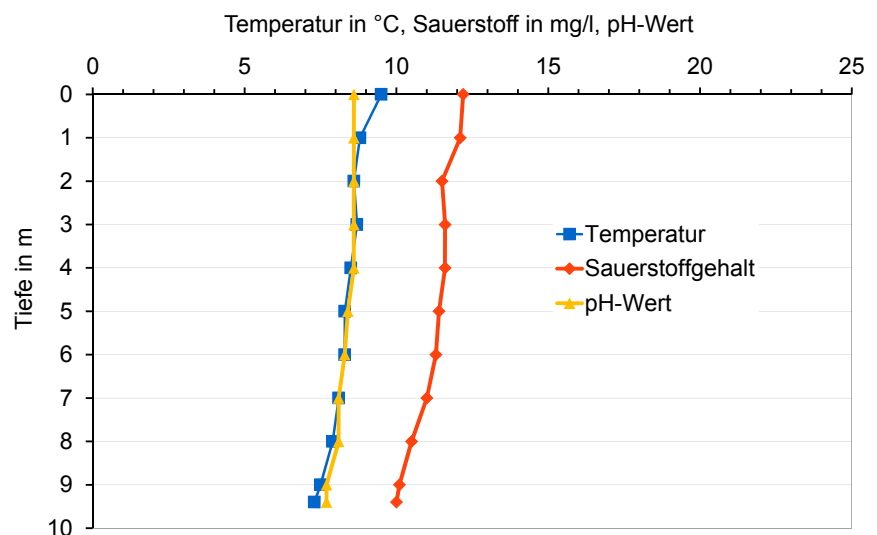


Abb. 6: Tiefenprofile des Elfrather Sees im Frühjahr 2015 (Temperatur, Sauerstoff und pH-Wert).

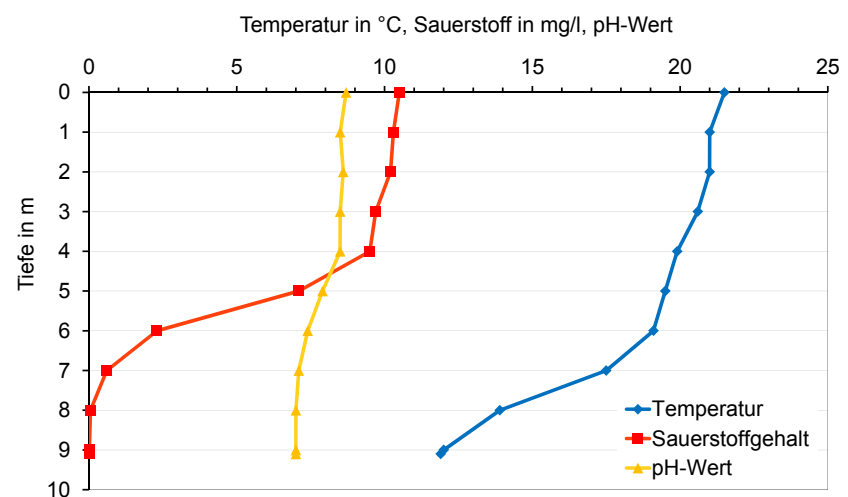


Abb. 7: Tiefenprofile des Elfrather Sees im Spätsommer 2015 (Temperatur, Sauerstoff und pH-Wert).

Pflanzennährstoff Ammonium direkt aufnehmen und somit den Gehalt an Ammonium im Wasser reduzierten und zweitens aufgrund der Anwesenheit von Sauerstoff Ammonium über Nitrit zu Nitrat abgebaut wurde [5], [12], [13].

Der Nitratgehalt war am Grund des Sees gering. Das lag daran, dass Nitrat aufgrund des Sauerstoffmangels in der Tiefe zu Ammonium abgebaut wird. An der Oberfläche war der Nitratgehalt ebenfalls gering, weil Nitrat genau wie Ammonium einen Nährstoff darstellt, der von den Pflanzen direkt aufgenommen werden kann und damit aus dem Wasser entfernt wird [5], [12], [13].

In der Tiefe konnte man einen deutlichen Anstieg des Eisengehaltes beobachten. Dies ist wie folgt zu erklären: Eisen lagert sich in Anwesenheit von Sauerstoff am Grund des Sees ab und geht wiederum bei Sauerstoffmangel in Lösung [12], [13]. Da am Boden des Elfrather Sees im Spätsommer Sauerstoffmangel herrschte, löste sich das Eisen und reicherte sich im Tiefenwasser an. Ähnliches gilt für Phosphat, auch der Phosphatgehalt stieg in der Tiefe an, was dadurch zu erklären ist, dass Phosphat sich bei Sauerstoffmangel im Wasser löst und sich in Anwesenheit vom Sauerstoff im Boden ablagert.

Durch Lösung von Phosphat im Wasser wird das Sauerstoffproblem noch vergrößert, weil Phosphat ein Pflanzennährstoff ist und bei seinem Abbau weiterer Sauerstoff verbraucht wird und die Eutrophierungstendenz zunimmt [5], [12], [13].

Die Abnahme des pH-Wertes in der Tiefe liegt vermutlich am Sauerstoffmangel am Boden des Sees. Die atmenden Lebewesen verbrauchen den Sauerstoff und atmen Kohlendioxid aus, das sich deshalb anreichert. Dieses Kohlendioxid reagiert mit Wasser zu Kohlensäure. Durch die zunehmende Freisetzung von Kohlensäure sinkt der pH-Wert. Dieser Vorgang wird dadurch begünstigt, dass aufgrund der Lichtverhältnisse in der Tiefe keine oder nur sehr wenig Fotosynthese stattfinden kann. Somit wird auch kein (wenig) Kohlendioxid mehr durch die Fotosynthese verbraucht und kein (wenig) Sauerstoff durch die Fotosynthese produziert [5], [12], [13].

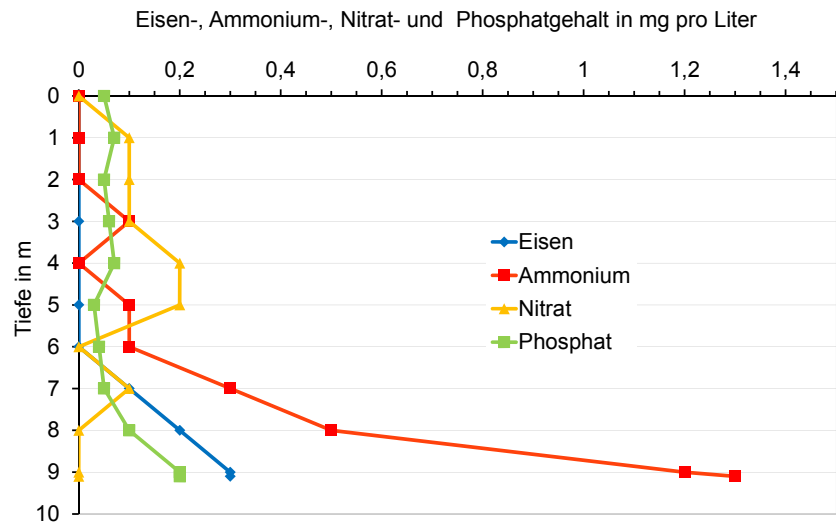


Abb. 8: Tiefenprofile für den Ammonium-, Eisen-, Nitrat- und Phosphatgehalt im Spätsommer 2015.

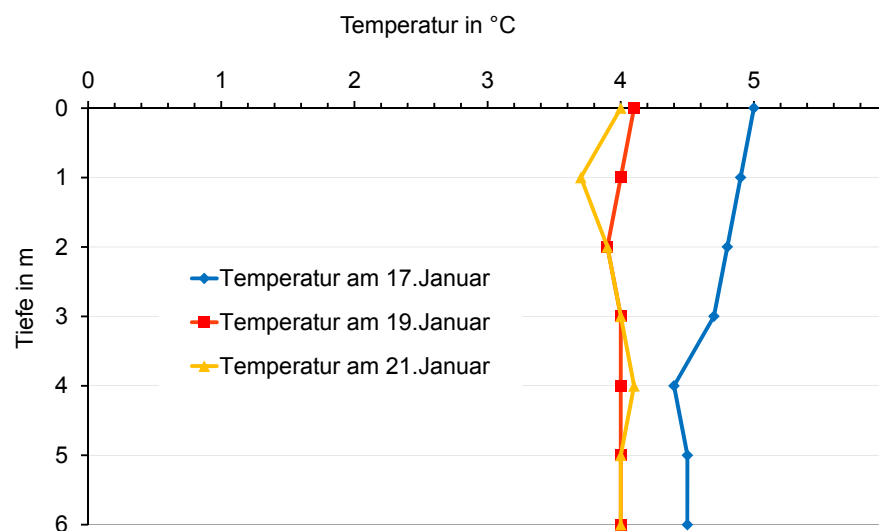


Abb. 9: Temperaturprofile an den Frosttagen im Januar 2016. In den kalten Frosttagen bildete sich keine typische Winterschichtung: (Aufgrund der sehr kalten Temperaturen wurde aus Sicherheitsgründen nicht an der tiefsten Stelle, sondern vom Steg aus gemessen).

	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016
Frosttage	22	6	17	14
Eistage	13	0	0	3
Summe Frost- und Eistage	35	6	17	17

Tab. 1: Anzahl der Frost- und Eistage in den Wintern 2012 bis 2016 gemäß den Daten unserer Wetterstation. (Frosttag = Tiefsttemperatur liegt an diesem Tag unter 0°C, Eistag = Tiefst- und Höchsttemperatur liegen an diesem Tag unter 0°C).

Wenn sich im Herbst die Temperaturen zwischen Oberflächenwasser und Tiefenwasser wieder angleichen, vermischt sich das Tiefenwasser mit dem Oberflächenwasser. Wie wir feststellen

konnten, wurden damit auch die Unterschiede zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser wieder abgebaut [1], [5], [12], [13]].

Gefundene Pflanzen	Note der gefundenen Pflanzen	Häufigkeit	Note der gefundenen Pflanze * Häufigkeit
Sternarmleuchteralge	3	4	3*4 = 12
Kammförmiges Laichkraut	4	2	4*2 = 8
Quirlblättriges Tausendblatt	3	2	3*2 = 6
Zerbrechliche Armleuchteralge	2	3	2*3 = 6
Gemeines Hornblatt	5	1	1*5 = 5
		Summe: 12	Summe: 37

Tab. 2: Im Elfrather See gefundene Makrophyten mit Berechnung der Nährstoffbelastung.

3.2 Das Schichtungs- und Zirkulationsverhalten als Indiz für den Klimawandel

In den Wintern 2014/2015 und 2015/2016 stellte sich im Elfrather See aufgrund der verhältnismäßig warmen Temperaturen nicht die in unseren Breiten übliche Winterschichtung ein. Das galt auch für den kurzen Winter einbruch im Januar 2016 (siehe Abb. 9 und 10). Die wenigen Frosttage reichten nicht dazu aus, den Elfrather See so stark abzukühlen, dass sich eine stabile Schichtung gebildet hätte. Somit ging die Herbstzirkulation direkt in die Frühjahrszirkulation über. Die fehlende Winterstagnation ist möglicherweise eine Folge der Klimaerwärmung [1], [11], [15]. Aufgrund steigender Temperaturen im Winter werden Seen in unseren Breitengraden seltener von Eis bedeckt, wodurch ursprünglich dimiktische Seen mit zwei Zirkulationsphasen (Frühjahr und Herbst) zu monomiktischen Seen werden, in welchen die Herbstzirkulation ohne Winterstagnation in die Frühjahrszirkulation übergeht [1]. Wir erinnern uns in diesem Zusammenhang an den Winter 2012/2013, als der Elfrather See zugefroren war und es dementsprechend unterhalb der Eisdecke sicherlich eine entsprechende Temperaturschichtung gegeben hat (wir hatten damals jedoch keine entsprechenden Messungen durchgeführt).

Seitdem hat es keinen kalten Winter mehr am Niederrhein gegeben und es folgten Jahre mit neuen Temperaturrekorden [15]. Auch an den Daten unserer eigenen Wetterstation ist dieser Trend der letzten Jahre erkennbar (siehe Tab. 1, Seite 59). In den letzten drei Jahren gab es vergleichsweise wenige Frost- und Eistage. Es bleibt abzuwarten, ob dieser Trend sich auch in den nächsten Jahren fortsetzt.

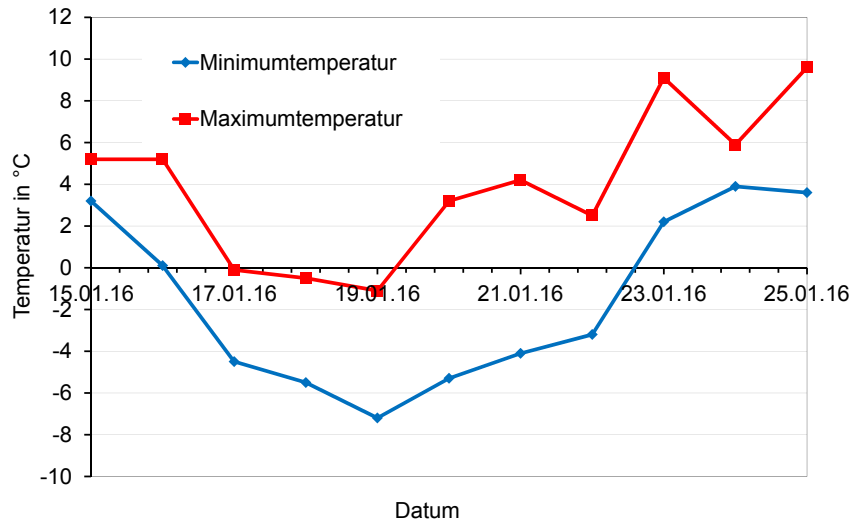


Abb. 10: Die Frosttage im Januar 2016: Maximum- und Minimumtemperaturen - Daten von unserer Wetterstation.

Ergebnis (berechneter Wert)	Nährstoffbelastung
1,0 – 1,9	nährstoffarm = oligotroph
2,0 – 2,6 (Zwischenstufe)	geringe Nährstoffbelastung
2,7 – 3,3	mäßige Nährstoffbelastung = mesotroph
3,4 – 3,9 (Zwischenstufe)	nährstoffreicher
4,0 – 5,0	nährstoffreich = eutroph

Tab. 3: Nährstoffbelastungen von Seen, die anhand von Makrophyten ermittelt werden (Vergleichswerte zur Einstufung der Ergebnisse).

3.3 Ergänzende Untersuchungen - Nährstoffbelastung des Elfrather Sees

Bei unserer Fahrt über das gewählte Linientranssekt fanden wir fünf verschiedene sogenannte Zeigerpflanzen in unterschiedlicher Häufigkeit, anhand derer wir die Wasserqualität berechneten (siehe Tab. 2). Makrophytenindex= (Noten * Häufigkeiten) : Summe der Häufigkeiten = 37 : 12 = 3,1.

Die Nährstoffbelastung ist nach Tab. 3 also mit mesotroph (mäßige Nährstoffbelastung) zu beurteilen [2], [3].

Der Pflanzenbewuchs in der Tiefe reicht bis in eine Tiefe von ungefähr

7 Meter, darunter konnten wir keine Makrophyten mehr gewinnen, was vermutlich durch Lichtmangel in der Tiefe zu erklären ist [2][3].

Die Sichttiefenbestimmung über sechs Monate ergab eine mittlere Sichttiefe von 3,7 m, wonach der Elfrather See als eutroph (nährstoffreich) einzustufen ist (siehe Tab. 4 und 5). Allerdings liegt die mittlere Sichttiefe von 3,7 m nicht weit von der Belastungsstufe mesotroph (ab 4 m mittlere Sichttiefe) entfernt.

Aus den beiden Methoden zur Bestimmung der Nährstoffbelastung ergibt sich also, dass der Elfrather See als mesotroph bis eutroph zu beurteilen ist [4].

4 Zusammenfassung

In unserem Untersuchungszeitraum von Herbst 2014 bis Winter 2015/2016 zeigte der Elfrather Wassersportsee im Sommer eine Schichtung des Wassers, in der sich das Oberflächenwasser deutlich von dem Tiefenwasser unterschied. Grund war die Sprungschicht, welche sich aufgrund von Temperaturunterschieden gebildet hatte. Die Sprungschicht wirkt wie eine Sperrschicht und verhindert, dass Oberflächen- und Tiefenwasser sich vermischen. Im Tiefenwasser entstand damit im Sommer Sauerstoffmangel und es reicherten sich insbesondere Eisen und Ammonium an.

Für Fische gefährlicher Sauerstoffmangel von weniger als 4 mg/l [7] herrschte im Frühsommer ab einer Tiefe von 6 m und im Spätsommer schon ab einer Tiefe von 5 m. Die Unterschiede lösten sich im Herbst wieder langsam auf, als sich die Temperaturdifferenz zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser abbauete und sich demzufolge eine vertikale Zirkulation entwickeln konnte. Normalerweise wäre bei einem See unserer

Monat	Gemessene Sichttiefe in Meter (Mittelwert aus jeweils 3 Messungen an verschiedenen Stellen)
April	5,1
Mai	4,6
Juni	3,9
Juli	3,2
August	2,6
September	2,9
Mittlere Sichttiefe:	3,7

Tab. 4: Die gemessenen Sichttiefen. Für die Berechnung der mittleren Sichttiefe wurden alle sechs Messwerte addiert und durch die Anzahl der Monate (6) dividiert.

Sichttiefe	Belastungsstufe
größer gleich 6 m	oligotroph, nährstoffarm
4 - 6 m	mesotroph, mäßige Nährstoffbelastung
1 - 4 m	eutroph, nährstoffreich

Tab. 5: Einteilung der Sichttiefe in folgende Nährstoffbelastungen (Vergleichswerte).

Breiten auch im Winter eine Schichtung unter einer Eisdecke zu erwarten. Die Winter im Untersuchungszeitraum (2014/2015 und 2015/2016) waren allerdings zu warm und wiesen nur wenige Frost- und Eistage auf, so dass sich keine Schichtung des Wassers ausbilde-

te. Dies ist möglicherweise eine Folge der zunehmenden Klimaerwärmung auf der Erde. Es ist interessant, die weitere Entwicklung genau zu beobachten und zu sehen, ob der Elfrather Wassersportsee auch in den nächsten Jahren ein monomiktischer See bleiben wird.

Glossar

Fachbegriff	Erklärung
Epilimnion	obere warme und bewegte Schicht eines geschichteten Gewässers, unterhalb des Epilimnions folgen die Sprungschicht (Metalimnion) und darunter das Hypolimnion
Eutrophierung	Eine zu hohe Menge an Nährstoffen kann zu einer unkontrollierten Vermehrung der Lebewesen im Gewässer führen und infolgedessen zu Sauerstoffmangel und zum Absterben der Lebewesen im Wasser.
dimiktischer See	Ein See, bei dem im Frühjahr und im Herbst das gesamte Wasser durchmischt wird.
Hypolimnion	untere kalte Wasserschicht (ca. 4 °C) in einem geschichteten See. Das Hypolimnion wird durch das Metalimnion (Sprungschicht) vom Epilimnion abgetrennt. Ein Hypolimnion bildet sich nur in sehr tiefen Seen, in flacheren Seen kann auch die Sprungschicht bis zum Boden reichen.
Limnologie	Wissenschaft der Binnengewässer (Süßwasser)
Linientranspekt	Eine bestimmte Linie, auf der man z. B. die vorhandenen Zeigerpflanzen ermittelt, bei Wasserpflanzen ist es wichtig, das Linientranspekt so zu wählen, dass man Pflanzen aus allen Tiefen des Sees berücksichtigt.
Makrophyten	Makrophyten sind höhere Pflanzen, die in Gewässern wachsen. Einige dieser Pflanzen sind gleichzeitig Zeigerpflanzen.
Makrophytenindex	Mit dem Makrophytenindex kann man die Wasserqualität bzw. die Nährstoffbelastung von stehenden Gewässern berechnen. Berücksichtigt werden die gefundenen Zeigerpflanzen und ihre Häufigkeit.
monomiktischer See	Ein See, bei dem nur einmal im Jahr das gesamte Wasser durchmischt wird.
Sprungschicht (Metalimnion)	folgt in erwärmten und geschichteten Seen unterhalb des Epilimnions. Innerhalb der Sprungschicht fällt die Temperatur deutlich ab (im Durchschnitt beträgt der Temperaturabfall mehr als 1 °C pro Meter.
Tiefenprofil	Zur Erstellung eines Tiefenprofils werden Messwerte aus verschiedenen Tiefen des Gewässers erhoben.
Zeigerpflanze	Zeigerpflanzen können nur in einer bestimmten Wasserqualität leben und geben damit Hinweise auf die vorherrschende Wasserqualität bzw. die Nährstoffbelastung eines Gewässers.

Quellenverzeichnis

- [1] Geller, W., & Hupfer, M. (2012). Seeökosysteme I: Verbreitung, Entstehung und die physikalisch-chemische Struktur von Seen. Handbuch Angewandte Limnologie: Grundlagen-Gewässerbelastung-Restaurierung-Aquatische Ökotoxikologie-Bewertung- Gewässerschutz, Wiley-VCH, Weinheim
- [2] Humberg, B. (1994): Unterwasserführer für europäische Binnengewässer. Nagelschmid, Stuttgart
- [3] Humberg, B. und Melzer, A. und Nagelschmid, S. (ohne Jahresangabe): Bestimmungsschlüssel für stehende Gewässer. Nagelschmid, Stuttgart
- [4] Klapper, Helmut (1992): Eutrophierung und Gewässerschutz. – Gustav Fischer, Stuttgart
- [5] Klee, Otto (1991): Angewandte Hydrobiologie. Trinkwasser – Abwasser –Gewässerschutz. – Thieme, Stuttgart
- [6] Krausch, Hans-Dieter (1996): Farbatlas Wasser- und Uferpflanzen. - Ulmer, Stuttgart
- [7] Krause, Hanns.-J. (1998): Handbuch Aquarienwasser. – bede-Verlag, Ruhmannsfelden
- [8] Kremers, E. (2002): Vom Boulevard zum Biotop – Die Geschichte des Städtischen Grüns in Krefeld (Ausstellungskatalog), Herausgeber: Stadt Krefeld,
- [9] LUGV (Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz) (2011): Bestimmungsschlüssel für die aquatischen Makrophyten (Gefäßpflanzen, Armleuchteralgen und Moose) in Deutschland, Band 1: Bestimmungsschlüssel. Landesamt, Potsdam
- [10] LUGV (Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz) (2011): Bestimmungsschlüssel für die aquatischen Makrophyten (Gefäßpflanzen, Armleuchteralgen und Moose) in Deutschland, Band 2: Abbildungen. Landesamt, Potsdam
- [11] Rahmsdorf, Stefan und Schellnhuber, Hans Joachim (2012): Der Klimawandel: Diagnose, Prognose, Therapie. - C. H. Beck, München
- [12] Schönborn, Wilfried und Risse-Buhl, Ute (2013): Lehrbuch der Limnologie. – Schweizerbart, Stuttgart
- [13] Schwörbel, Jürgen und Brendelberger, Heinz (2013): Einführung in die Limnologie. – Spektrum Verlag, Heidelberg
- [14] Verein Niederrhein (1994): „Freizeitpark am Niederrhein“ - in Der Niederrhein 61, Krefeld
- [15] https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/_functions/aktuellemeldungen/160126_weltweit_waermstes_jahr_2015.html