LAND KÄRNTEN

SCHUTZ- UND NUTZUNGSKONZEPT

Wörthersee

Bericht Nr. 2.4.4

Zirkulationsverhalten des Wörthersees - Meromixis

Endversion

April 2024

Abteilung 8 – Umwelt, Naturschutz und Klimaschutzkoordination

LAND KÄRNTEN

Impressum:

Herausgeber:

Amt der Kärntner Landesregierung
Abteilung 12 – Wasserwirtschaft
Unterabteilung Wasserwirtschaftliche Planung und Siedlungswasserwirtschaft
Flatschacher Straße 70, 9021 Klagenfurt am Wörthersee

Projektbearbeitung:

Mag. Georg Santner
Amt der Kärntner Landesregierung
Abteilung 8 – Umwelt, Naturschutz und Klimaschutzkoordination
Unterabteilung Geologie und Gewässermonitoring
Kärntner Institut für Seenforschung

Inhalt

1 Einleitung: Meromixis – die unvollständige Zirkulation 4
2 Methodik 5
3 Ergebnisse 5
3.1 Der Wörthersee als atypischer meromiktischer See 5
3.2 Anstieg des sauerstofffreien Tiefenwassers 6
3.3 Zirkulation und Stagnation im Wörthersee 6
4 Zusammenfassung 10
5 Literatur 11

1 Einleitung: Meromixis – die unvollständige Zirkulation

„Im Laufe des Winters 1931/32 habe ich ziemlich eingehend die Veränderungen in der Wasserschichtung der Kärntner Seen untersucht. Das Ergebnis kann man dahin zusammenfassen, dass die Mehrzahl dieser Seen die bei temperierten Seen zu erwartende Vollzirkulation zu Beginn und am Ende der Winterschichtung nicht erkennen lässt, sondern, dass das Tiefenwasser das ganze Jahr hindurch in dauernder Stagnation verharrt, wodurch es zu einem ungewöhnlich hohen Sauerstoffmangel im tieferen Hypolimnion kommt.“ (FINDENEGG, 1933).

Mit dieser Publikation in der internationalen Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie wurde von Findenegg erstmals das Phänomen eines teilzirkulierenden – von ihm in weiterer Folge als meromiktisch bezeichneten – Sees veröffentlicht.

Dieser Zirkulationstyp ist in Kärnten nicht nur am Wörthersee, sondern auch an anderen Seen, wie dem Millstätter See, dem Weißensee, oder dem Längsee und Klopeiner See zu finden und wird – wie oben dargestellt - durch ein dauerhaft stagnierendes Tiefenwasser, welches von den Stoffkreisläufen ausgeschlossen ist, charakterisiert. Dieses Tiefenwasser ist zumeist (bei den Kärntner Seen immer) sauerstofffrei. Wie von Findenegg erkannt, wird dies in den Kärntner Seen durch die fehlende Kraft des Windes in Zusammenhang mit der Topologie des Seebeckens ausgelöst. Durch das Absinken von biogenem Material und durch die Rücklösung von Phosphor aus dem Sediment kommt es zu einer Anreicherung von Nährstoffen. Dieser Vorgang, der als biogene Meromixis bezeichnet wird kann die Abtrennung des Monimolimnions vom Mixolimnion noch zusätzlich stabilisieren (Klopeiner See). Die Abbauprodukte tragen durch ihre Auflösung zur Dichte des Tiefenwassers bei und verhindern so das Einmischen des Monimolimnions in das Mixolimnion (BÖHRER, SCHULTZE, 1995).

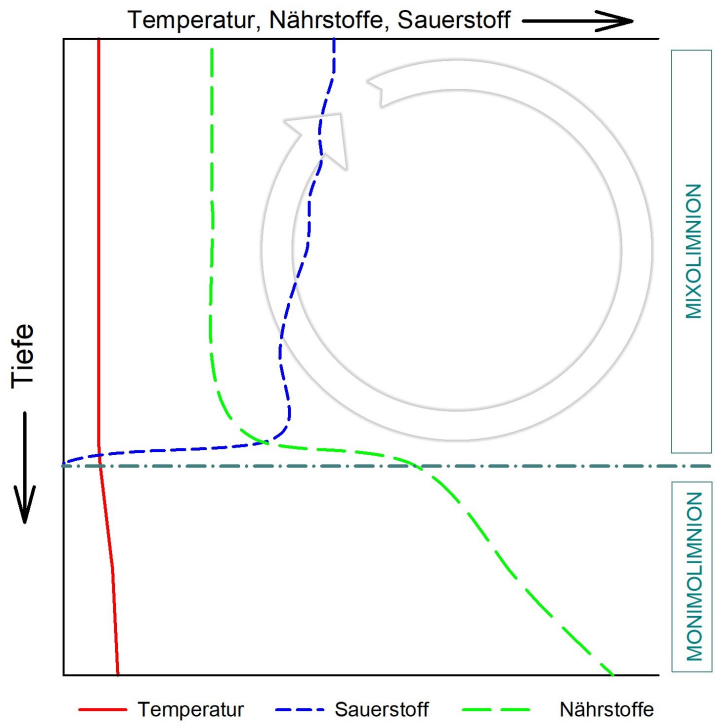

Abb. 1: Schematische Grafik eines meromiktischen Sees während der Zirkulation

2 Methodik

Für den vorliegenden Bericht wurden physikalisch-chemische Daten des Wörthersees verwendet. Diese wurden einerseits beginnend mit den 1930er Jahren von Dr. Ingo Findenegg - und andererseits seit den späten 1970er Jahren in der Routine des Gewässermonitorings des Landes Kärnten erhoben. Zusätzlich wurden in den letzten beiden Jahrzehnten Datalogger im See zum Teil über Jahre hinweg ausgebracht. Dabei konnte die Wassertemperatur und später auch der Sauerstoffgehalt in verschiedenen Tiefen alle drei Stunden aufgezeichnet werden. Die hier verwendeten Daten der Temperatur- und Sauerstoffsonden (Datalogger) wurden im Klagenfurter Becken mit einer maximalen Tiefe von 73 m aufgezeichnet. Die Routineerhebungen, sowie die Daten von Dr. Findenegg wurden im Saager Becken mit einer maximalen Tiefe von 85 m erhoben.

3 Ergebnisse

3.1 Der Wörthersee als atypischer meromiktischer See

Ingo Findenegg begann in den 1930er Jahren mit der systematischen Datenerhebung an den Kärntner Seen. Anhand seiner Daten (Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser) lässt sich erkennen, dass zu jener Zeit der Wörthersee unregelmäßig auch eine Vollzirkulation vollzog (Abb. 2). Dies konnte auch in der Beobachtungsperiode seit den 1980ern immer wieder festgestellt werden. Somit ist der Wörthersee kein streng meromiktischer See, wie dies beispielsweise der Klopeiner See ist.

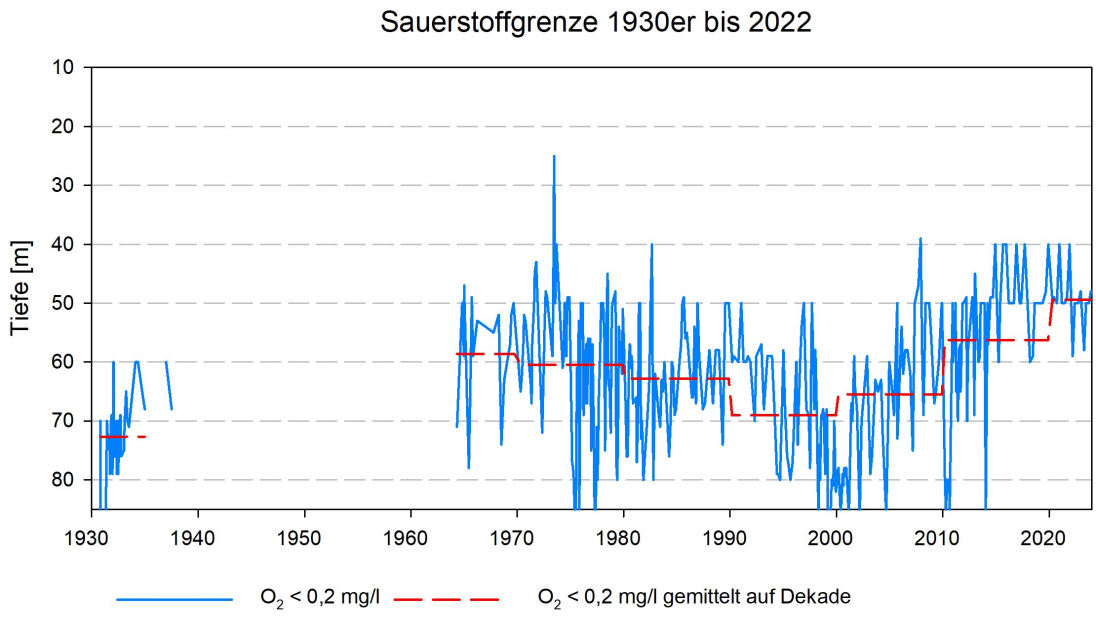

Abb. 2: Sauerstoffgrenze im Wörthersee an der tiefsten Stelle von den 1930er Jahren bis 2022.

3.2 Anstieg des sauerstofffreien Tiefenwassers

Im Zuge der Eutrophierungsphase in den 1970er und 1980er Jahren mit sehr hohen Algenbiomassen und somit stärkerer stofflicher Belastung des Tiefenwassers ging eine erhebliche Sauerstoffzehrung einher. Damit stieg auch das sauerstofffreie Tiefenwasser an. Erst mit der einsetzenden Reoligotrophierung des Wörthersees Mitte der 1980er durch die Sanierung der Einleiter reichte die Zirkulation wieder tiefer. Es kam in dieser Zeit auch wieder zu vereinzelten Vollzirkulationen. Seit den 2000er Jahren steigt das sauerstofffreie Tiefenwasser wieder an, Vollzirkulationen konnten seit 2014 nicht mehr nachgewiesen werden (siehe auch Teilbericht 2.5.1, Allgemeine physikalisch-chemische Parameter).

3.3 Zirkulation und Stagnation im Wörthersee

Findenegg spricht 1932 noch von einer Herbst- und Frühjahrszirkulation, die durch eine inverse Schichtung (Eisbedeckung) des Wasserkörpers in Form einer Winterstagnation (welche manchmal nur wenige Wochen anhält) getrennt sind.

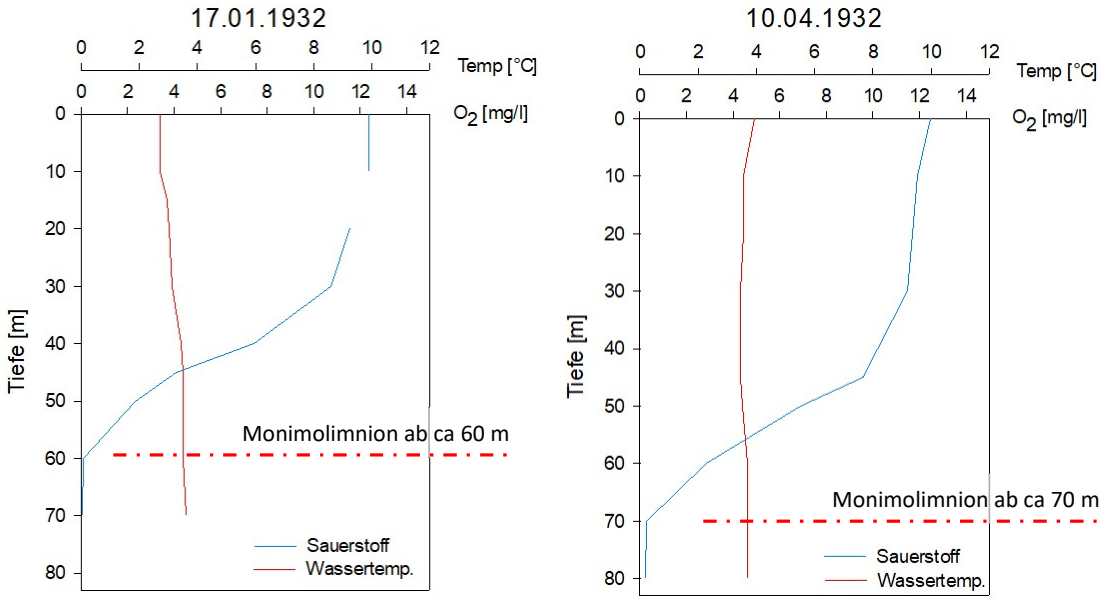

Abb. 3: Tiefenprofil von Sauerstoff und Wassertemperatur im Winter und Frühjahr 1932 im Wörthersee (tiefste Stelle des Veldener Beckens).

In Abb. 3, linkes Diagramm ist die inverse Schichtung des Sees am 17.01.1932 mit oberflächennahen Wassertemperaturen unter 4 °C erkennbar. Zu diesem Zeitpunkt ist die winterliche Zirkulation bereits abgeschlossen. In Abb. 3, rechtes Diagramm vom 10.04.1932 ist bereits wieder eine leichte Schichtung, mit oberflächennahen Temperaturen über 4 °C sichtbar. Zu diesem Zeitpunkt dürfte die Frühjahreszirkulation bereits abgeschlossen gewesen sein. Die Aufzeichnungen Findeneggs belegen bereits in den 1930er Jahren einen sehr späten Beginn (Mitte bis Ende Dezember) der Herbstzirkulation. Die Durchmischung des zirkulierenden Wasserkörpers, des sog. Mixolimnions endete mit der Eisbedeckung des Sees. Nach Verschwinden der Eisdecke setzte die Frühjahrszirkulation ein, die bis Anfang/Mitte April andauerte und mit einem geschichteten Wasserköper abgeschlossen wurde.

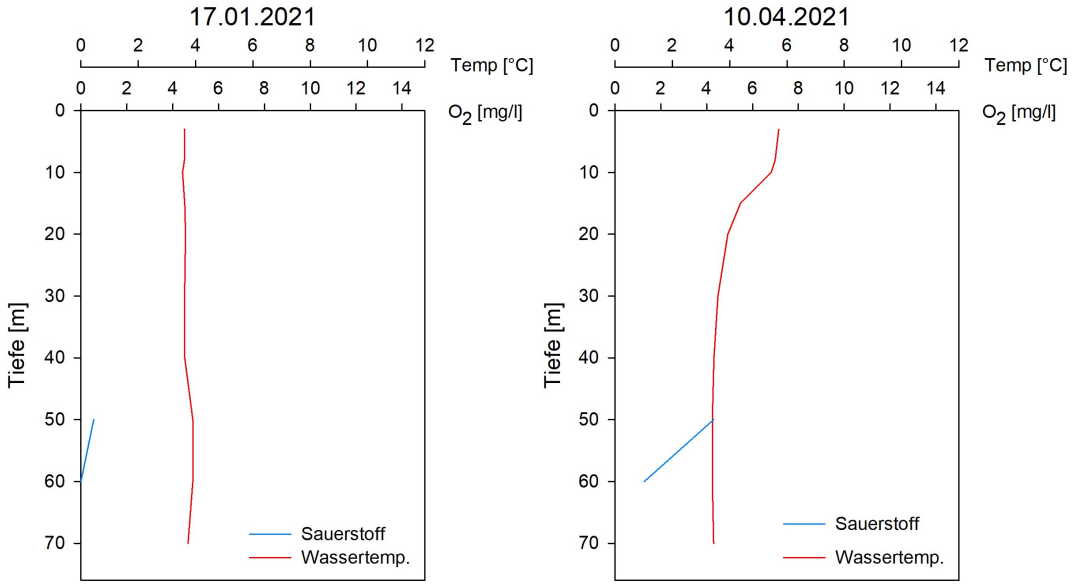

Abb. 4 Tiefenprofil des Wörthersees (Klagenfurter Becken) von Sauerstoff und Wassertemperatur im Winter und Frühjahr 2021. Für den Sauerstoff liegen nur Messungen in 50 und 60 m vor.

In Abb. 4 ist das Tiefenprofil an den gleichen Tagen für das Jahr 2021 dargestellt (Tiefste Stelle im Klagenfurter Becken). Der Jänner Termin im Jahr 2021 weist keine oberflächennahe Kaltwasserschicht (< 4 °C) auf, wie dies in den 1930er Jahren der Fall war. Der Sauerstoffgehalt in 50 m lag bei 0,44 mg/l (Mittel des Tages), in 60 m bei null. Während eine inverse Schichtung für den Jänner Termin nicht erkennbar ist, kann man für den Frühjahrestermin bereits eine deutliche Schichtung von mehr als 2 °C Unterschied erkennen.

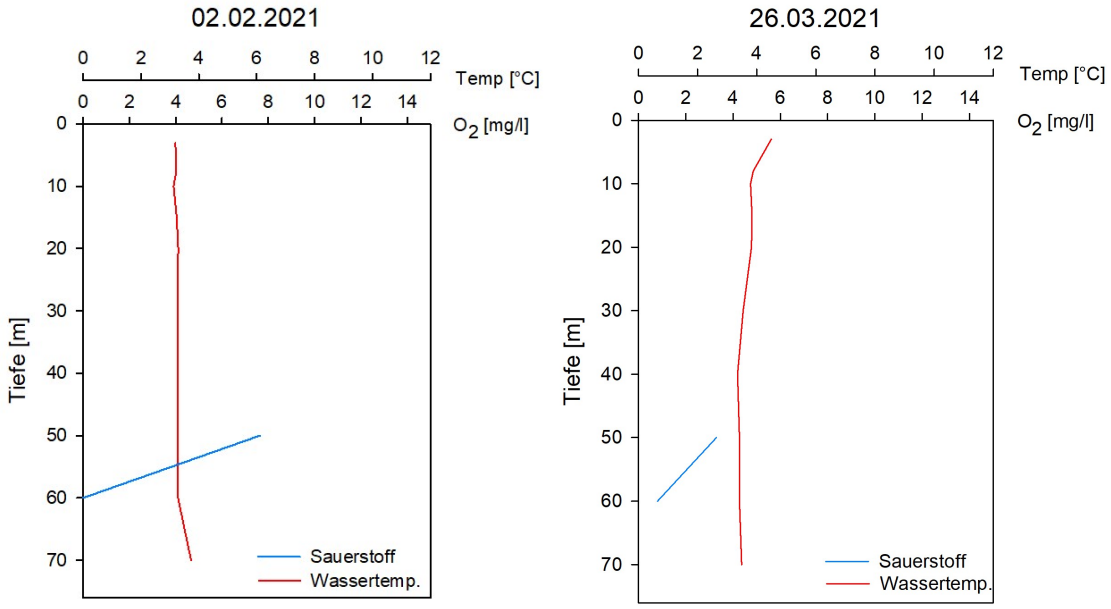

Abb. 5: Tiefenprofil des Wörthersees (Klagenfurter Becken) von Sauerstoff und Wassertemperatur im Winter und Frühjahr 2021; Für den Sauerstoff liegen nur Messungen in 50 und 60 m vor.

Die linke Grafik aus Abb. 5 zeigt einen Termin Anfang Februar 2021. Der See zirkuliert, erkennbar an der Sauerstoffkonzentration (6,11 mg/l) in 50 m Tiefe. Ende März ist die Zirkulation bereits wieder abgeschlossen, der See ist geschichtet. Die Sauerstoffkonzentration in 50 m hat bereits wieder abgenommen, jedoch ist mit einer Konzentration von 0,64 mg/l Sauerstoff auch in 60 m nachweisbar.

Aktuell zeigt der Wasserkörper des Wörthersees keine zwei getrennten Zirkulationsphasen. Die Durchmischung des Wörthersees beginnt mit Mitte/Ende Jänner. Anfang/Mitte März liegt bereits wieder ein geschichteter Wasserkörper vor, ein Zeichen, dass die Zirkulation, oder zumindest die durch Windeintrag induzierte Zirkulation beendet ist. Ein Austausch von Sauerstoff in tieferen Wasserschichten findet auch nach Schichtungsbeginn noch statt (siehe Erläuterungen zu Abb. 6).

Es ist davon auszugehen, dass sich das Zirkulationsverhalten des Wörthersees seit den 1930er Jahren entscheidend verändert hat. Die Untersuchungen von Ingo Findenegg konnten noch zwei - wenn auch zeitlich sehr nahe aneinander liegende – Zirkulationsphasen darlegen. Der See war zu dieser Zeit dimiktisch. Unsere aktuellen Daten belegen, dass die schon immer sehr spät beginnende Winterzirkulation (Ende Dezember, Mitte Jänner) ohne Unterbrechung in die Frühjahrszirkulation übergeht. Hauptgrund dafür sind die warmen Winter, ohne – oder mit nur lokaler – Eisbedeckung, wodurch keine (inverse) winterliche Schichtung entstehen kann. Durch die saisonal frühere Erwärmung der Lufttemperatur im Frühjahr ist der Wasserkörper dementsprechend früher geschichtet, wodurch sich die Zirkulationsphase verkürzt. Der Wörthersee ist derzeit also dem monomiktischen Zirkulationstyp zuzurechnen.

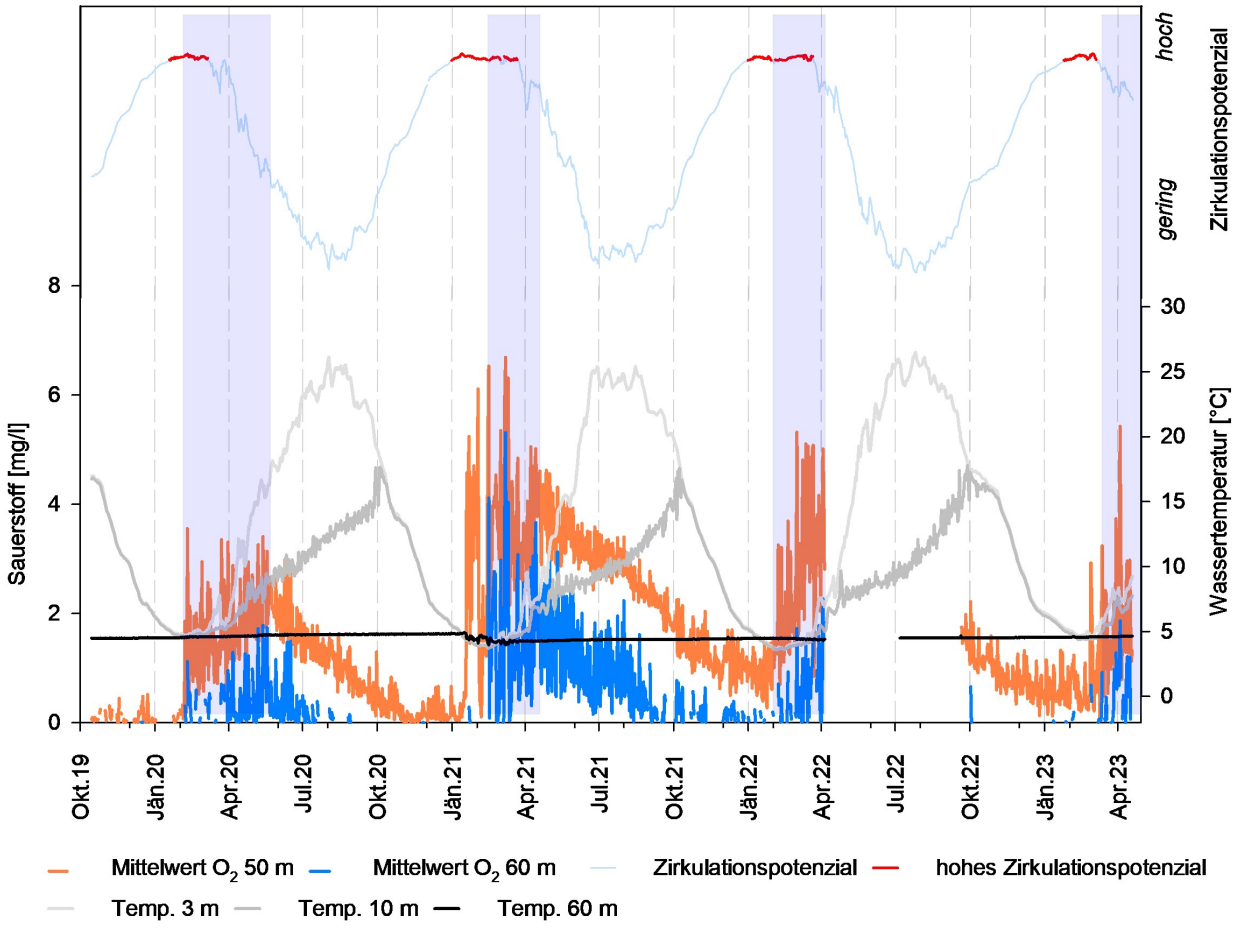

Abb. 6: Sauerstoff- (blau/orange), Temperatur- (Graustufen), und Zirkulationspotenzialverlauf (hellblau/rot) vom Oktober 2019 bis zum April 2023. Die Daten wurden an der tiefsten Stelle im Klagenfurter Becken erhoben. Rote Linie: Temperaturunterschied in der Wassersäule < 1 °C.

In Abb. 6 ist der Sauerstoffverlauf in 50 und in 60 m Tiefe an der tiefsten Stelle im Klagenfurter Becken dargestellt. Weiters sind die Temperaturverläufe in verschiedenen Tiefen (3, 10 und 60 m) sichtbar. Das auch angeführte Zirkulationspotenzial ist der errechnete Unterschied zwischen maximaler und minimaler Wassertemperatur in der Wassersäule von 0-75 m. Es ist davon auszugehen, dass bei geringem Unterschied, also bei annähernd gleicher Temperatur in der Wassersäule, das Potenzial für die Durchmischung am größten ist. Damit ist es möglich auch ohne kontinuierliche Sauerstoffmessung die Zeitspanne für eine mögliche Durchmischung zu ermitteln. Die rote Linie gibt einen Unterschied unter 1 °C an. Die blauen Balken geben den Zeithorizont an, in welchem die Sauerstoffkonzentration in 60 m Tiefe wieder steigt, also den Zeitbereich, wo effektiv die Zirkulation bis in 60 m wirkt. Erkennbar ist, dass es nach Erreichen der Temperaturgleiche (rote Linie Zirkulationspotenzial) noch 1 bis 1,5 Monate dauert um den Sauerstoff bis in die Tiefe zu bringen. Ein interessanter Aspekt ist dabei, dass die Sauerstoffkonzentration des Tiefenwassers noch im Steigen begriffen ist, während der See schon eine Schichtung aufbaut. Dies kann nicht mehr durch den Eintrag von Windenergie getriggert sein, sondern ist der Trägheit des großen Wasserkörpers, damit verbundener interne Wellen, sog. Seiches und einer Konvektion über die Tiefenschichten geschuldet. Dieser Vorgang wirkt noch über einen Monat nach.

Es ist davon auszugehen, dass mit einer Verkürzung der Zirkulationsphase auch eine Auswirkung auf den monimolimnischen, also den dauerhaft stagnierenden Wasserkörper zu erwarten ist. Dies konnten unsere Daten auch schon bestätigen. Es dauert über einen Monat von Beginn der Zirkulation bis der Sauerstoff im Tiefenwasser (60 m) ankommt. Aufgrund der verkürzten Zirkulationsphase gelangt weniger Sauerstoff ins Tiefenwasser, wodurch die Mächtigkeit des sauerstofffreien Tiefenwassers ansteigt. Über den Jahresverlauf steigt durch den Abbau absinkender organischer Substanz und damit einhergehendem Sauerstoffverbrauch die Sauerstoffgrenze weiter an. Mit der Zirkulation sinkt diese wieder. Wenn mehr Nährstoffe verfügbar sind, kann sich eine höhere Biomasse (Phytoplankton) bilden. Dies bedingt wiederum im Abbau einen höheren Sauerstoffbedarf, was die Ausbildung des sauerstofffreien Tiefenwassers zusätzlich begünstigen würde. Es wird daher auch zukünftig ein Fokus auf das Fernhalten von Nährstoffen aus jeglichen Quellen zu legen sein. Dazu tragen intakte Uferabschnitte, die Einschwemmungen (durch Starkregenereignisse) besser abpuffern und filtern wesentlich bei.

4 Zusammenfassung

Der Sauerstoffgehalt und die Wassertemperatur des Wörthersees werden seit ca. 1930 in verschiedenen Tiefenzonen gemessen. Bereits in den 1930er Jahren wurde festgestellt, dass sich das Seewasser zyklisch durchmischt. Die Durchmischung des Wassers umfasst in der Regel aber nicht den ganzen Wasserkörper und reicht bis zu einer Tiefe zwischen 50 und 80 m. Der Prozess der Unvollständigen Zirkulation wird in der Fachwelt „Meromixis“ genannt. Der See weist außerhalb der Zirkulationszeit zwei Schichten auf: Das Mixolimnion (durchmischt) und das Monimolimnion (nicht durchmischt), die sich voneinander in erster Linie durch den Sauerstoffgehalt unterscheiden. Das Monimolimnion besteht aus stagnierendem Tiefenwasser, welches von den Stoffkreisläufen ausgeschlossen ist, daher ist es in der Regel sauerstofffrei. In einer Analyse der vorliegenden Messdaten wurde untersucht, inwieweit sich das Zirkulationsverhalten und die Sauerstoffverhältnisse des Wörthersees seit den 1930er Jahren verändert haben.

Aufgrund der fehlenden Eisbedeckung in Verbindung mit der immer schon sehr spät stattfindenden Herbstzirkulation (jeweils erst Ende Dezember, Anfang Jänner) zeigt der Wörthersee derzeit keine Schichtungphase zwischen Herbst/Winter- und Frühjahrszirkulation. Der See durchmischt nur einmal im Jahr von Ende Jänner bis Anfang/Mitte März. **Das Zirkulationsverhalten des Wörthersees ist daher als monomiktisch zu bezeichnen**.

Aufgrund der verkürzten Zirkulationsphase des nunmehr monomiktischen Seentyps kann Sauerstoff nicht mehr in ausreichender Menge in das Tiefenwasser transportiert werden. Vollzirkulationen konnten seit 2014 nicht mehr beobachtet werden.

Aufgrund des ansteigenden sauerstofffreien Tiefenwassers wird dadurch der **Lebensraum für Fische** (und Invertebraten) prinzipiell kleiner. Für Kaltwasserformen wie die Seeforelle, aber auch die Reinanke erfolgt eine weitere Einschränkung des nutzbaren Raumes, da die stark erwärmten oberflächlichen Wasserschichten als Lebensraum nicht dauerhaft nutzbar sind.

5 Literatur

BÖHRER B., M SCHULTZE (2009): Schichtung von Seen; Handbuch der angewandten Limnologie, Kapitel IV-2.2;p 3-21.

FINDENEGG I. (1932): Beobachtungen an Kärntner Seen, Sonderabdruck aus Carinthia II, Mitteeilungen des Vereines Naturkundliches Landesmuseum für Kärnten, 121./122. Jahrgang

FINDENEGG, I. (1932): Die Schichtungsverhältnisse im Wörthersee; Sonder-Abdruck aus dem Archiv für Hydrobiologie; Bd XXIV; p 253 – 262.

FINDENEGG, I. (1933): Alpenseen ohne Vollzirkulation; Sonderdruck aus Internationaler Revue der ges. Hydropbiol und Hydrographie, Bd 28, Heft 3/4, Leipzig 295 – 311p.

JÖNK, K. (2001):1 D hydrodynamsiche Modelle in der Limnohysik; Turbulenz – Meromixis – Sauerstoff; Habilitationsschrift in Limnophysics Reports, 2001, Vol 1, No. 1, p 1- 235.

REICHMANN, M. (2005): Ursache und Konsequenzen tiefer reichender Durchmischung an meromiktischen Seen Kärntens; Internes Arbeitspapier; 20 pp; Kärntner Institut für Seenforschung, Klagenfurt.