



KLIWA-Kurzbericht

Auswirkungen des „Rekordjahres“ 2018 auf Temperatur und Schichtungsdauer von Seen

(Stand: 09/2020)

im Rahmen der Kooperation KLIWA –
Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft

Impressum

Bearbeitung: Kooperation KLIWA – www.kliwa.de –

Redaktion:

AG Gewässerökologie

Bearbeiter:

Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz

Kaiser-Friedrich-Str. 7

55116 Mainz

Dr.-Ing. Wolfgang Frey

Wolfgang.Frey@lfu.rlp.de

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Demollstraße 31

82407 Wielenbach

Daniela Rau

Daniela.Rau@lfu.bayern.de

Dr. Jochen Schaumburg

Jochen.Schaumburg@lfu.bayern.de

Inhalt

1	Zusammenfassung.....	5
2	Einleitung.....	5
3	Methodik.....	6
4	Ergebnisse.....	7
5	Ausblick.....	12
6	Literatur.....	13

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Auf dem Boot eingeholte Messkette mit Tauchboje und zwei Sauerstoffloggern links und Seil mit Temperaturloggern und Ankerstein rechts (Laacher See). © W. Frey, LfU Rheinland-Pfalz	6
Abbildung 2: Blick von der Dauermessstelle über den Laacher See nach Süden zum Kloster Maria Laach. © S. Sobieray, LfU Rheinland-Pfalz	6
Abbildung 3: Temperaturganglinien am Ammersee in verschiedenen Tiefen 2017-2018 (Tagesmittelwerte).	8
Abbildung 4: Temperaturganglinien am Laacher See August 2015 - April 2019.	8
Abbildung 5: Durchschnittstemperaturen (auf der Grundlage von Tagesmittelwerten) am Ammersee, Vergleich der sommerlichen Temperaturen vom 15.04. bis 15.10. in den Jahren 2014, 2015, 2017 und 2018. Wegen großer Messausfälle sind das Jahr 2016 sowie der 4 m-Wert 2015 nicht dargestellt. Kleinere Ausfälle (10.09.2014 bis 01.10.2014, 14.+15.10.2017 sowie 24.5.-27.5.2018) wurden hingegen bei der Mittelwertbildung vernachlässigt.	9
Abbildung 6: Jahres-Höchsttemperaturen (auf der Grundlage von Tagesmittelwerten) der Jahre 2014, 2015, 2017 und 2018 am Ammersee. Messausfälle: siehe Abb. 5, diese wirken sich aufgrund des Zeitpunktes der Ausfälle nicht auf die jeweiligen Höchsttemperaturen aus.	10
Abbildung 7: Durchschnittstemperaturen (auf der Grundlage stündlicher Messungen) am Laacher See, Vergleich der Temperaturen vom 15.04. bis 15.10. in den Jahren 2016 bis 2018.	10
Abbildung 8: Maximaltemperaturen (auf der Grundlage stündlicher Messungen) am Laacher See, Vergleich der Temperaturen vom 15.04. bis 15.10. in den Jahren 2016 bis 2018.	11
Abbildung 9: Schichtungsdauer und Schichtungszeitraum am Ammersee in den Jahren 2014 bis 2018. Auf Grund eines Ausfalls der Temperaturmesskette kann für das Jahr 2016 nur eine Zeitspanne zwischen 146 bis 165 Tagen angegeben werden.	11
Abbildung 10: Schichtungsdauer und Schichtungszeitraum am Laacher See in den Jahren 2015 bis 2018.	12
Abbildung 11: Messstation im Ammersee mit Kompaktklimastation (oben) und Solarpanelen zur autarken Stromversorgung (seitlich). © BLfU.....	13

1 Zusammenfassung

Der Sommer 2018 war von Trockenheit und Hitze geprägt. Wie sich diese Extreme auf Temperatur- und Schichtungsverhalten von Seen auswirken, wurde beispielhaft am Laacher See (Rheinland-Pfalz) und Ammersee (Bayern) geprüft. An diesen Seen wird seit einigen Jahren die Wassertemperatur weitgehend kontinuierlich und zeitlich hochaufgelöst in ausgewählten Tiefen gemessen. Erste Auswertungen zeigen, dass 2018 in beiden Seen deutlich höhere Durchschnitts- und Maximaltemperaturen in den oberflächennahen Wasserschichten erreicht wurden als in den Vorjahren. Im Tiefenwasser hingegen blieben die Temperaturen weitgehend konstant oder waren tendenziell niedriger als in den Vorjahren. Im Ammersee setzte die sommerliche thermische Schichtung 2018 zudem deutlich früher ein als in den Vorjahren. Dieses Phänomen konnte im Laacher See nicht beobachtet werden. Jedoch reagieren Seen-ökosysteme auf Grund ihrer spezifischen Eigenschaften und geographischen Lage unterschiedlich auf sich ändernde Umwelteinflüsse. Durch die Fortführung der Temperaturmessungen werden zukünftig statistisch abgesicherte Aussagen zu (klimabedingten) Veränderungen im Temperaturhaushalt und den Schichtungseigenschaften möglich sein. Zusätzlich erhobene Daten, wie meteorologische Parameter oder der Sauerstoffgehalt, sollen wertvolle Zusatzinformationen im Klimafolgenmonitoring liefern. Durch die Aufnahme weiterer Seen in das Messnetz werden außerdem zukünftig Aussagen zu typspezifischen Veränderungen in süddeutschen Seen möglich sein.

2 Einleitung

Mit im Schnitt 10,4 Grad hat Deutschland 2018 das wärmste Jahr seit Beginn der Wetteraufzeichnungen im 19. Jahrhundert erlebt. Zugleich war 2018 auch das sonnigste Jahr und eines der trockensten. Bemerkenswert war dabei die lange Trockenheit von März bis November (DWD 2018, KLIWA 2019).

Bereits in der KLIWA-Literaturstudie (KLIWA 2015) werden Wirkungszusammenhänge zwischen Witterung und Seeökologie beschrieben: Zunehmende Lufttemperaturen führen auch zu steigenden Wassertemperaturen. Diese wiederum beeinflussen die Schichtungseigenschaften eines Sees. Eine klimabedingte Gewässererwärmung führt vermutlich vielfach auch zu einer Zunahme der sommerlichen Schichtungsdauer und –stabilität. Temperatur und Schichtung wiederum haben einen entscheidenden Einfluss auf die Lebensgemeinschaften und ökologischen Prozesse in Seen. Differenziert zu betrachten sind die Temperaturen in oberflächennahen (Epilimnion) und grundnahen Wasserschichten (Hypolimnion). Während im Epilimnion die Temperaturen ansteigen, wird angenommen, dass die Hypolimnion-Temperaturen in besonders heißen Jahren geringer sind als in „normalen“ Jahren. Als Grund hierfür wird der geringe Wärmeaustausch zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser durch die besonders stabile Schichtung, die sich in heißen Sommern ausbildet, genannt.

Können diese Zusammenhänge auch mit Messdaten belegt werden? Das Extremjahr 2018 bot die Möglichkeit, die Effekte des besonders heißen und trockenen Jahres 2018 auf das Temperaturverhalten und die Schichtungsdauer an zwei Seen zu verifizieren (Ammersee in Bayern und Laacher See in Rheinland-Pfalz), da dort seit einigen Jahren Messketten mit Temperatursensoren bzw. –loggern in unterschiedlichen Tiefen eingebracht sind. Künftig werden auch aus anderen ausgewählten Seen in Bayern und Baden-Württemberg zeitlich hochaufgelöste Temperaturdaten im Rahmen eines gewässerökologischen Klimafolgenmonitorings vorliegen und entsprechende Auswertungen stattfinden können.

3 Methodik

Die Messungen an den beiden Seen unterscheiden sich hinsichtlich der Messintervalle und der Tiefenstufen der eingesetzten Temperaturlogger und damit auch hinsichtlich der Ermittlung des Schichtungsbeginns und -endes.



Abbildung 1: Auf dem Boot eingeholte Messkette mit Tauchboje und zwei Sauerstoffloggern links und Seil mit Temperaturloggern und Ankerstein rechts (Laacher See). © W. Frey, LfU Rheinland-Pfalz



Abbildung 2: Blick von der Dauermessstelle über den Laacher See nach Süden zum Kloster Maria Laach. © S. Sohieray, LfU Rheinland-Pfalz

August 2015 durch eine Messkette aus Temperatur- und Sauerstoff-Loggern des Leibniz-Instituts für Gewässerbiologie und Binnenfischerei Berlin untersucht.

Beim 81 m tiefen Ammersee wird seit 2013 in 16 unterschiedlichen Tiefen (zwischen 2 und 20 m in 2 m-Abständen sowie in 0,5 m, 1 m, 25 m, 40 m, 60 m und 78 m Tiefe) gemessen. Im 52 m tiefen Laacher See sind sechs Temperatursensoren (in 1 m, 5 m, 10 m, 40 m, 45 m und 49 m Tiefe) im Einsatz. Am Ammersee wird alle 15 min ein Wert aufgezeichnet, am Laacher See alle 30 bis 60 min. Zur Auswertung wurden am Ammersee Tagesmittelwerte gebildet, am Laacher See wurden hingegen die einzelnen Messwerte verwendet.

Die Temperaturdaten am Ammersee werden in einem Datensammler in der Messboje gespeichert und automatisch per Datenfernübertragung an eine Datenbank der bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung gesendet. Zusätzlich werden über eine Kompaktwetterstation auf der Messboje wichtige meteorologische Parameter (Lufttemperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, Windrichtung und Windgeschwindigkeit) im 15-min-Takt erfasst. Der Laacher See wird seit

Der Beginn der Schichtung wurde beim Ammersee dahingehend definiert, dass im Tagesmittel an zwei der 2 m voneinander entfernten Temperatursonden mindestens ein Unterschied von 2 K herrscht. Das Ende der Schichtungsphase wurde entsprechend auf den Termin bestimmt, an dem die Differenz von 2 K unterschritten wurde.

Beim Laacher See musste aufgrund der größeren Abstände zwischen den Temperatursonden eine andere Vorgehensweise zur Ermittlung der Schichtungsdauer gewählt werden. Es wurden zunächst die zahlreichen Feldmessungen (106 Messungen von 2000 bis 2020) mit Messabständen von 1 m den Unterschieden zwischen den Tiefen 5 m und 10 m (für den Beginn der Schichtung) sowie den Unterschieden zwischen den Tiefen 10 m und 40 m (für das Ende der Schichtung) gegenübergestellt. Der Schichtungsbeginn spielte sich im beobachteten Zeitraum immer im Bereich 5 bis 10 m ab. Zudem zeigten alle Messungen im Frühjahr mit einer Differenz zwischen 5 und 10 m $> 2,1$ K eine Schichtung, d. h. mindestens eine Abweichung um 1 K pro m Tiefenunterschied. Alle unter 2,1 K Differenz zeigten keine Schichtung. Das Ende der Schichtungsphase lässt sich am Laacher See in einer Tiefe zwischen 20 und 30 m beobachten, dort wird mit der von oben erfolgenden Einmischung am längsten eine Temperaturdifferenz von mind. 1 K/m aufrechterhalten. Hier zeigen alle Messungen im Herbst mit einer Differenz von mehr als 3 K zwischen 10 und 40 m noch eine Schichtung, alle Messungen < 3 K an keiner Stelle im Tiefenprofil > 1 K/m und somit per Definition Durchmischung.

Mittels Analogieschluss wurde daher festgelegt, dass eine Temperaturdifferenz von $> 2,1$ K zwischen 5 und 10 m den Beginn der Schichtungsphase und eine Temperaturdifferenz < 3 K zwischen 10 und 40 m das Ende der Schichtungsphase im Laacher See darstellt.

Der Beginn der Frühjahrszirkulation 2015, welche noch vor Inbetriebnahme der kontinuierlichen Messungen stattfand, konnte durch eine Feldmessung im April 2015 ermittelt werden.

4 Ergebnisse

Vom Ammersee liegen für die Jahre 2014, 2015, 2017 und 2018 vollständige Messreihen vor. Während es 2016 zwischen Mai und Juli zu größeren Messausfällen kam und somit keine genaue Ermittlung des Schichtungsbeginns möglich ist, sind in den hier betrachteten Jahren lediglich kleinere Lücken in den Datenreihen vorhanden, sodass ein Vergleich stattfinden kann. Auch wirken sich diese lediglich auf die Berechnung der Durchschnittstemperaturen (siehe Abb. 5) aus und aufgrund ihrer jahreszeitlichen Verteilung nicht auf den Vergleich der Maximalwerte oder der Schichtungsdauer. Abb. 3 zeigt beispielhaft die Temperaturganglinien der Jahre 2017 und 2018.

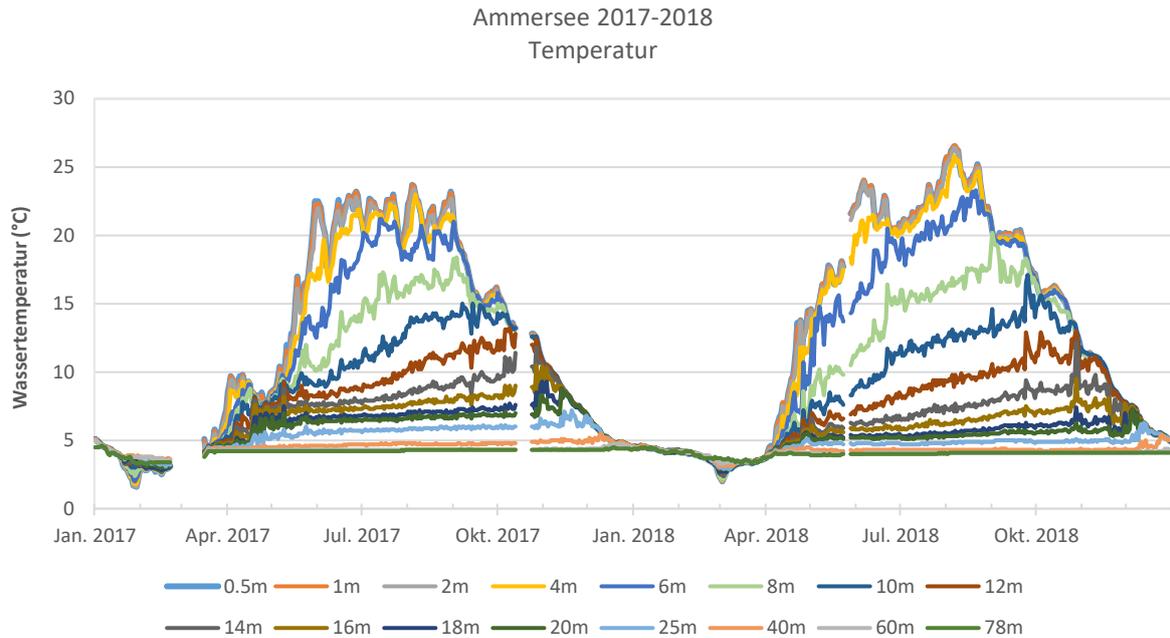


Abbildung 3: Temperaturganglinien am Ammersee in verschiedenen Tiefen 2017-2018 (Tagesmittelwerte).

2018 besonders auffällig sind die höheren Maximaltemperaturen ($> 25^{\circ}\text{C}$) an der Oberfläche sowie ein stärkeres Auseinanderweichen der Temperaturlinien im Mai gegenüber 2017. Generell liegt die oberflächennahe Durchschnittstemperatur im Mai 2018 mit 17°C deutlich über den Werten der Vorjahre 2014-2017 ($13\text{-}14^{\circ}\text{C}$).

Am Laacher See messen seit August 2015 die Datenlogger des IGB Berlin Temperatur und Sauerstoffgehalt (Abb. 4). Dabei sind zwei Messausfälle sichtbar: im März/April 2016 aufgrund einer Verschleppung der Messkette durch Fischer an Land (Lufttemperaturen) und im Oktober 2016 durch Verdriftung der Messkette an eine flachere Stelle.

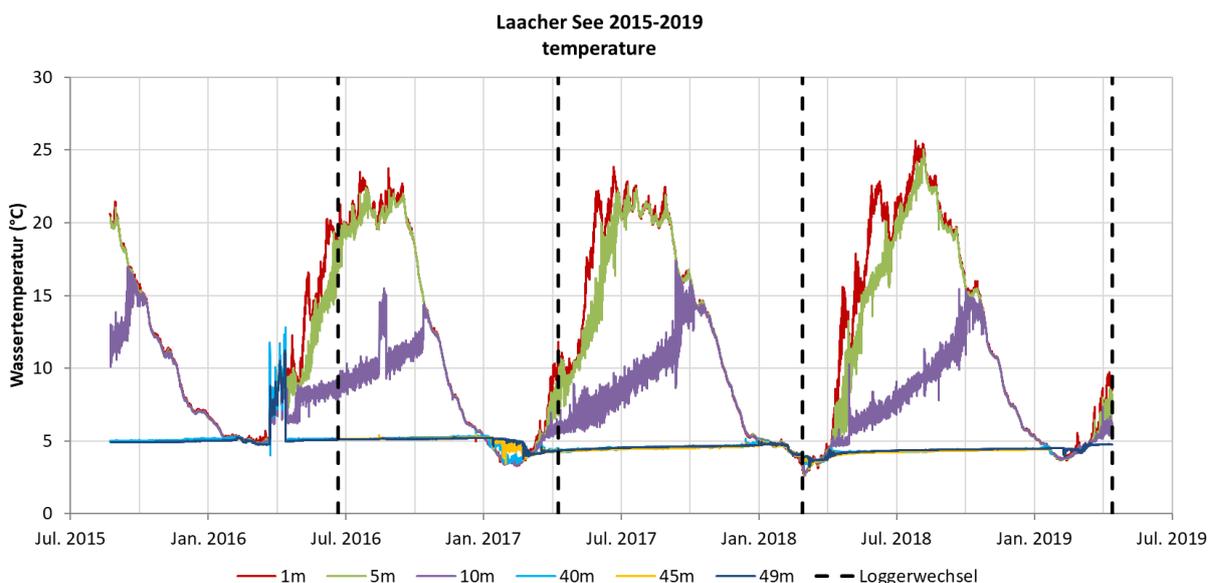


Abbildung 4: Temperaturganglinien am Laacher See August 2015 - April 2019.

Auch hier sind die maximalen oberflächennahen Temperaturen 2018 gegenüber den Vorjahren erhöht.

Eine genauere Betrachtung der sommerlichen Durchschnitts- und Maximal-Temperaturen zeigen die folgenden vier Grafiken. Dabei wurde zur Ermittlung der sommerlichen Durchschnittstemperaturen der Zeitraum von 6 Monaten zwischen 15.04. und 15.10. festgelegt. Anfangs- und Enddatum wurden dabei so gewählt, dass auch für den Laacher See das Jahr 2016 (Ausfälle bis Mitte April und ab Mitte Oktober, s.o.) auswertbar blieb. Die Grafiken zeigen, dass sowohl die Durchschnitts- als auch Maximal-Temperaturen 2018 an beiden Seen bis zu einer Tiefe von etwa 6 m deutlich erhöht sind. In den darunterliegenden Tiefenstufen sind die Unterschiede weniger deutlich. Im Ammersee liegen ab 10 m Tiefe die Durchschnittstemperaturen und ab 16 m Tiefe die Höchsttemperaturen 2018 sogar immer unter denen der vorausgegangenen Jahre (Ausnahme: grundnächste Tiefe 78 m). Möglicherweise deutet sich hier der in Kap. 2 beschriebene Effekt der Temperaturabkühlung im Hypolimnion an.

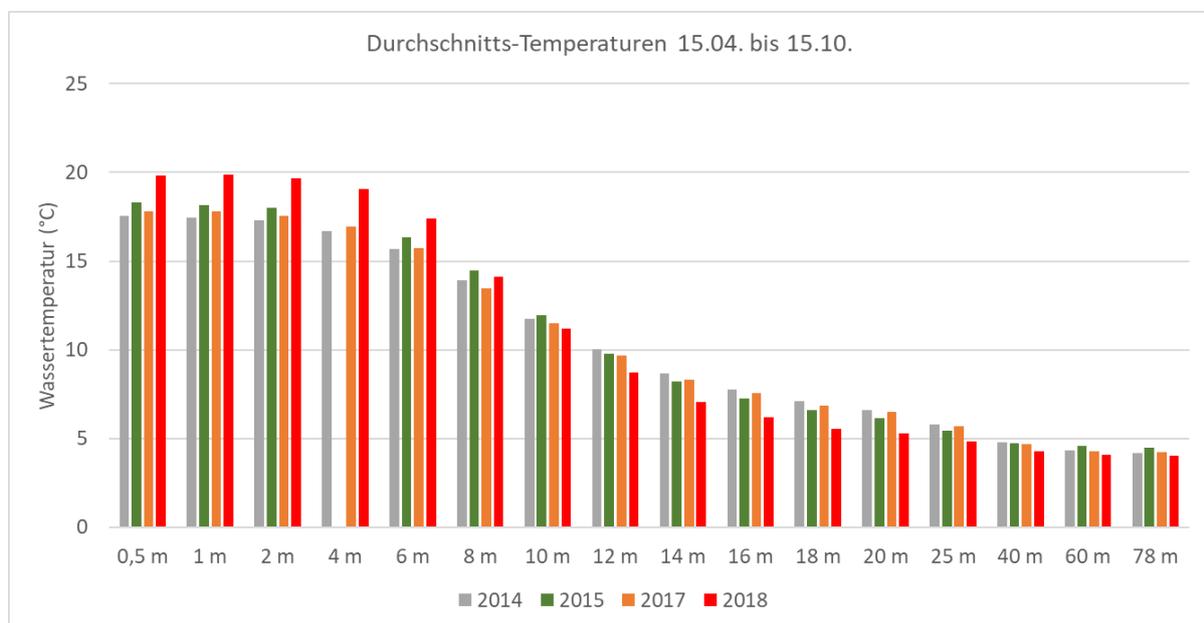


Abbildung 5: Durchschnittstemperaturen (auf der Grundlage von Tagesmittelwerten) am Ammersee, Vergleich der sommerlichen Temperaturen vom 15.04. bis 15.10. in den Jahren 2014, 2015, 2017 und 2018. Wegen großer Messausfälle sind das Jahr 2016 sowie der 4 m-Wert 2015 nicht dargestellt. Kleinere Ausfälle (10.09.2014 bis 01.10.2014, 14.+15.10.2017 sowie 24.5.-27.5.2018) wurden hingegen bei der Mittelwertbildung vernachlässigt.

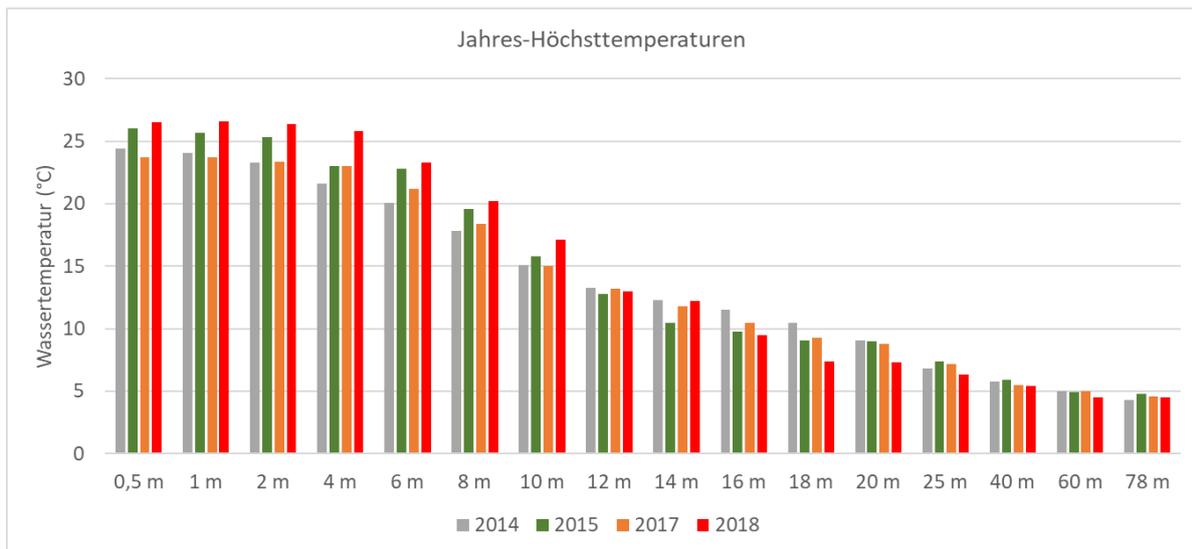


Abbildung 6: Jahres-Höchsttemperaturen (auf der Grundlage von Tagesmittelwerten) der Jahre 2014, 2015, 2017 und 2018 am Ammersee. Messausfälle: siehe Abb. 5, diese wirken sich aufgrund des Zeitpunktes der Ausfälle nicht auf die jeweiligen Höchsttemperaturen aus.

Ähnliches ist am Laacher See zu beobachten. Durchschnitts- und Maximal-Temperaturen sind 2018 in 1 und 5 m Tiefe am höchsten. Doch schon bereits bei 10 m ist dies nicht mehr der Fall (Abb. 7 und 8). Auch hier sind in großen Tiefen die 2018er Werte die jeweils geringsten, allerdings bei nur sehr geringen absoluten Differenzen.

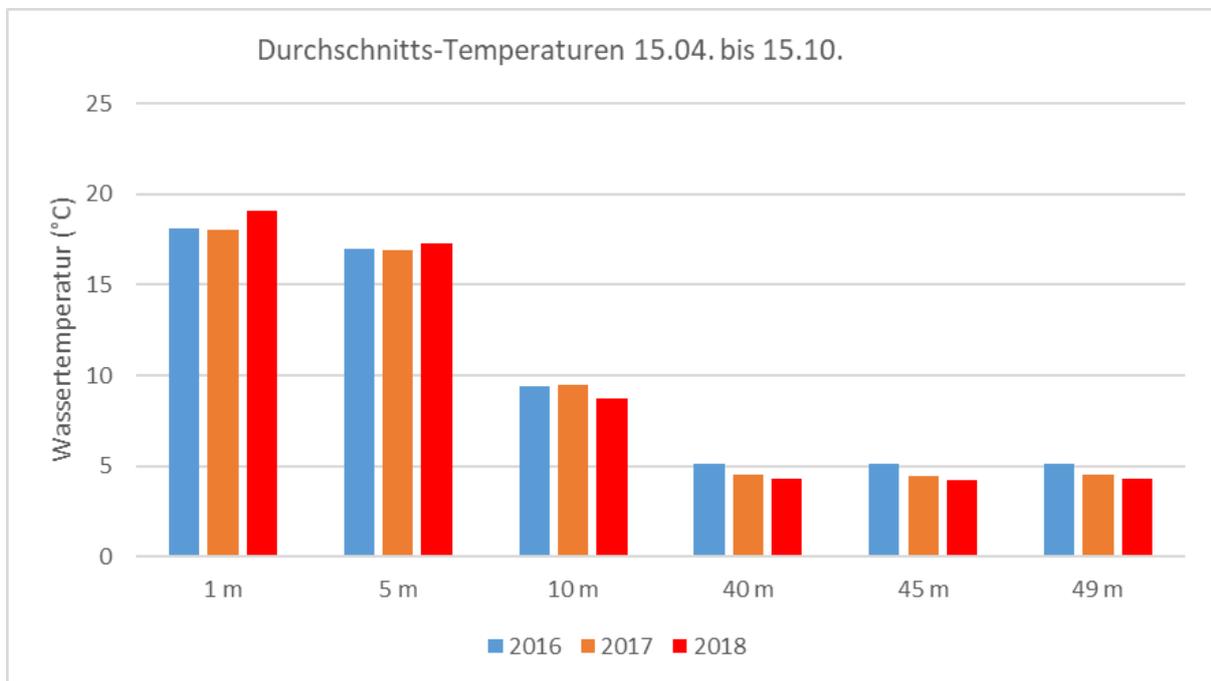


Abbildung 7: Durchschnittstemperaturen (auf der Grundlage stündlicher Messungen) am Laacher See, Vergleich der Temperaturen vom 15.04. bis 15.10. in den Jahren 2016 bis 2018.

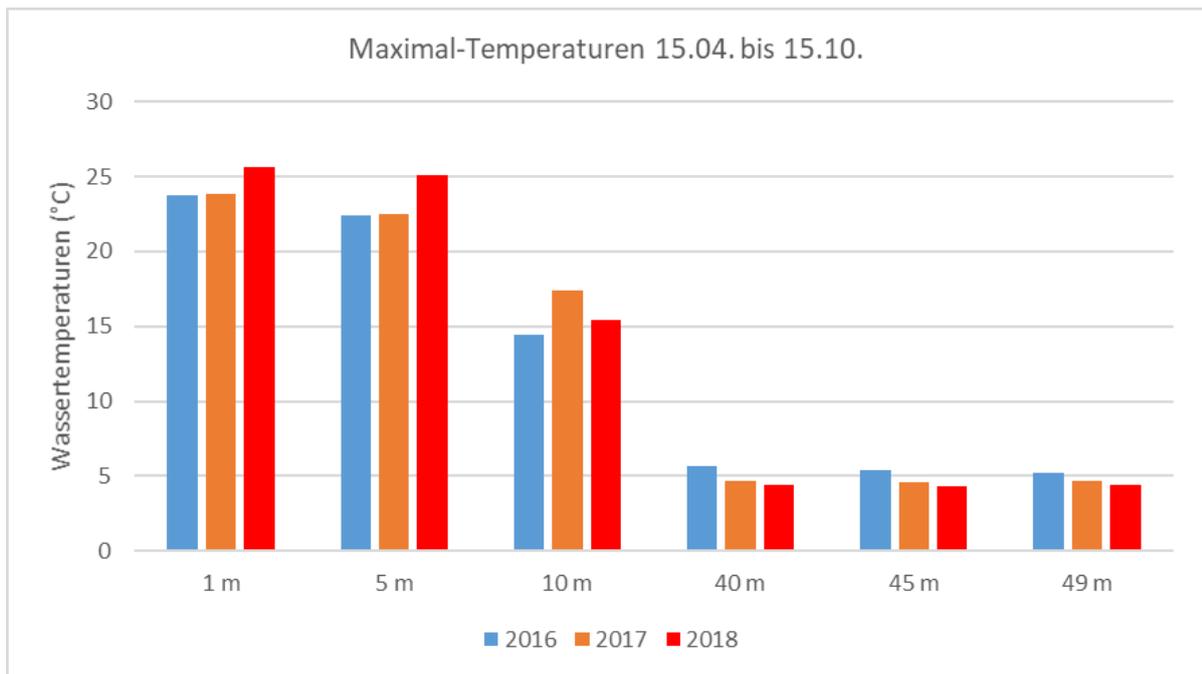


Abbildung 8: Maximaltemperaturen (auf der Grundlage stündlicher Messungen) am Laacher See, Vergleich der Temperaturen vom 15.04. bis 15.10. in den Jahren 2016 bis 2018.

Während am Ammersee im Jahr 2018 die Schichtungsdauer gegenüber den vorausgegangenen vier Messjahren deutlich länger war (Abb. 9), ist am Laacher See keine längere Schichtungsdauer gegenüber den beobachteten drei vorausgegangenen Jahren feststellbar (Abb. 10).

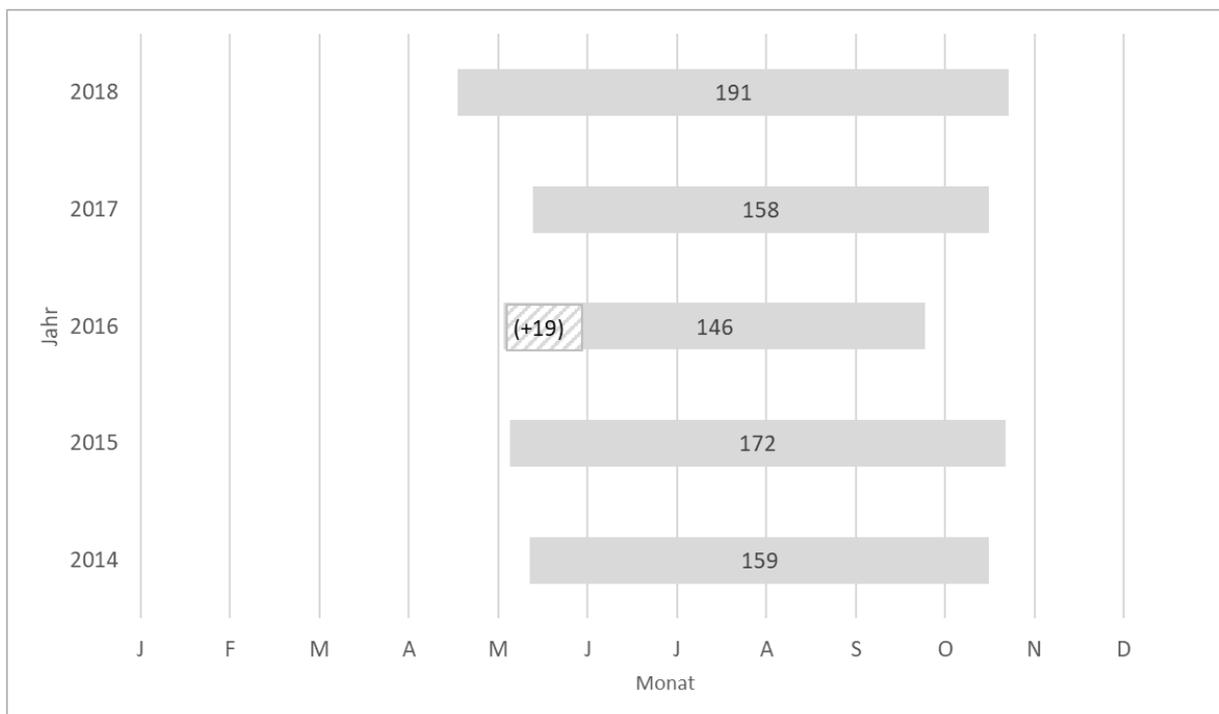


Abbildung 9: Schichtungsdauer und Schichtungszeitraum am Ammersee in den Jahren 2014 bis 2018. Auf Grund eines Ausfalls der Temperaturmesskette kann für das Jahr 2016 nur eine Zeitspanne zwischen 146 bis 165 Tagen angegeben werden.

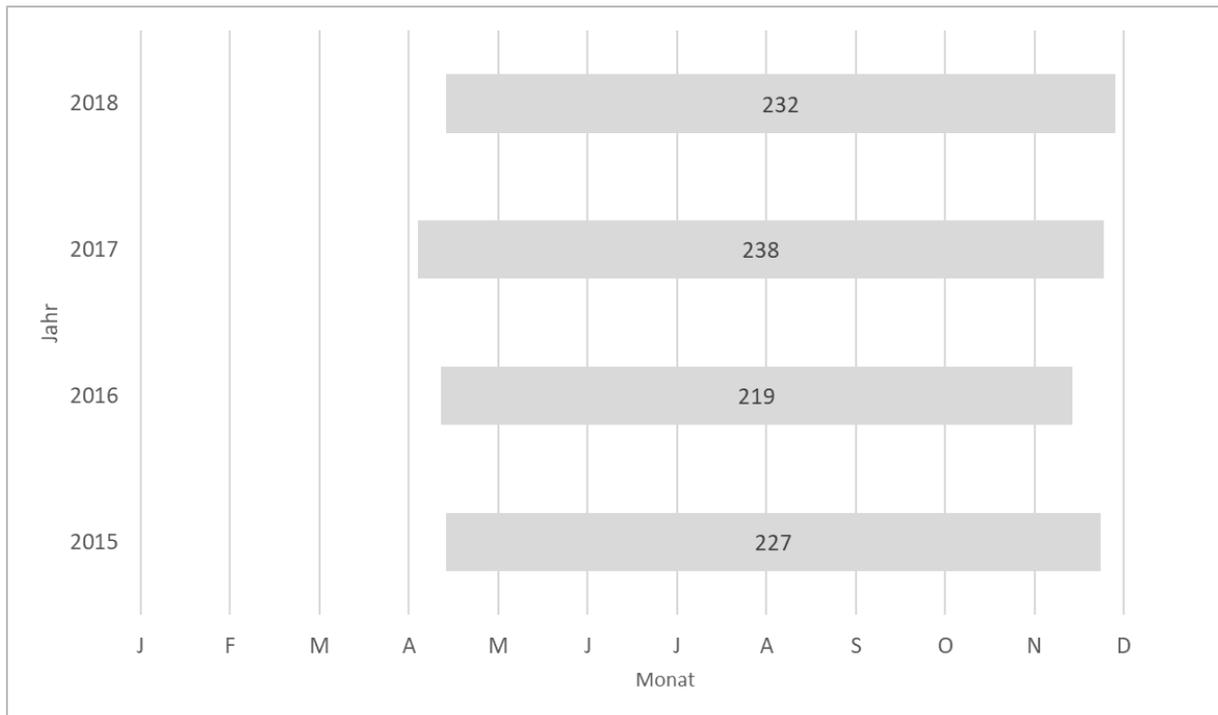


Abbildung 10: Schichtungsdauer und Schichtungszeitraum am Laacher See in den Jahren 2015 bis 2018.

Der Beginn der Schichtung setzte am Ammersee verfrüht ein, im Laacher See dagegen deutlich später als 2017. Das Schichtungsende lag sowohl am Ammersee als auch am Laacher See später als in den Vorjahren. Ein Vergleich der zugrundeliegenden Prozesse zwischen den beiden Seen ist aufgrund ihrer unterschiedlichen geografischen sowie Höhenlage und Morphologie als auch aufgrund der unterschiedlichen methodischen Herleitung der Schichtungsdauer (aufgrund unterschiedlicher Datenlage, s.o.) sehr schwierig. Es wären weitere meteorologische Parameter wie z.B. Sonnenscheindauer, Globalstrahlung, Niederschlag, Windgeschwindigkeit in eine Betrachtung einzubeziehen, um Unterschiede erklären zu können.

Aufgrund der Uneinheitlichkeit der Ergebnisse und der bislang zu geringen Datengrundlage kann die These, dass es zu einer Verlängerung der Schichtungsdauer in Seen Süddeutschlands als zu erwartende Folge des Klimawandels kommt, zum jetzigen Zeitpunkt nicht bestätigt werden.

5 Ausblick

Das Klimafolgenmonitoring und die entsprechenden Auswertungen an Ammersee und Laacher See werden fortgesetzt. Insbesondere die Ergebnisse vom Laacher See für das ebenfalls sehr trockene Jahr 2019 werden von großem Interesse sein. Am Ammersee sind die Daten von 2019 auf Grund von Messausfällen nur bedingt auswertbar.

Die genannten Phänomene müssen über einen wesentlich längeren Zeitraum und an einer größeren Anzahl von Seen untersucht werden, um zu verallgemeinerbaren und abgesicherten Aussagen zu kommen. Genau dies ist das Ziel des im Rahmen der Kooperation KLIWA entwickelten Klimafolgenmonitorings an Seen. Die Anforderungen an ein gewässerökologisches

Klimafolgenmonitoring in Seen werden unter anderem in KLIWA (2015) diskutiert und aktuell für insgesamt vier Seen in Bayern, drei Seen in Baden-Württemberg und am Laacher See in Rheinland-Pfalz umgesetzt.

Die hier dargestellten Auswertungen zeigen zudem Schwächen in der bisherigen Konzeption, was die Dichte der Temperaturlogger, in diesem Fall am Laacher See, betrifft. Beginn und Ende der Schichtungsdauer sollten mittels zusätzlich zu installierenden Loggern in den relevanten Tiefenbereichen erfasst werden. Dies wurde mittlerweile umgesetzt.

Für eine bessere Interpretierbarkeit der Gewässerdaten ist zu empfehlen, neben der Wassertemperatur wichtige meteorologische Daten zu erfassen, Dies ist mit sog. Kompaktklimastationen in Verbindung mit Messbojen auf Seen gut möglich. Der Ammersee und drei KLIWA-Monitoringseen in Baden-Württemberg (Mindelsee, Titisee, Federsee) sind bereits mit solchen Stationen ausgerüstet (s. Abb. 11).

Für die Einschätzung der Folgen der Klimaerwärmung ist neben der Temperatur besonders die Betrachtung der Sauerstoffverhältnisse entscheidend, daher werden künftige Auswertungen im Zusammenhang mit den Sauerstoff-Loggerdaten mit Spannung erwartet.



Abbildung 11: Messstation im Ammersee mit Kompaktklimastation (oben) und Solarpanelen zur autarken Stromversorgung (seitlich). © BLfU

6 Literatur

DWD, DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg., 2018): Jahrbuch 2018 des Deutschen Wetterdienstes, 66 S.

KLIWA, KLIMAVERÄNDERUNG UND KONSEQUENZEN FÜR DIE WASSERWIRTSCHAFT (2019): Das Jahr 2018 im Zeichen des Klimawandels? Viel Wärme, wenig Wasser in Süddeutschland. KLIWA-Kurzbericht, 14 S.

KLIWA, KLIMAVERÄNDERUNG UND KONSEQUENZEN FÜR DIE WASSERWIRTSCHAFT (2015): Einfluss des Klimawandels auf Seen – Literaturauswertungsstudie im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA, 125 S.