



Kanton Aargau – Departement Bau, Verkehr und Umwelt

Sedimentuntersuchungen Hallwilersee 2023

Entwicklung des Makrozoobenthos im Profundal 1985 – 2023

März 2024

Kontakt

Benthos – Büro für Gewässerökologie

Anna Carlevaro

Adresse: Landenbergstrasse 17, 8037 Zürich

Tel.: +41 78 667 88 72

Email: anna.carlevaro@benthos.ch

Auftraggeber

Kanton Aargau – Departement Bau, Verkehr und Umwelt

Lukas De Ventura

Fachspezialist Oberflächengewässer

Abteilung für Umwelt

Adresse: Entfelderstrasse 22, 5001 Aarau

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage und Ziele	1
2	Methode	3
2.1	Feldarbeit	3
2.2	Laborarbeit	3
2.3	Weitere Daten	4
3	Zustand 2023	5
3.1	Besiedlung des Seesediments	6
4	Entwicklung des Makrozoobenthos 1986 - 2023	7
4.1	Besiedlung des Seesedimentes	7
4.2	Entwicklung Beggiatoa, Oxidationsgrad und Schwefelwasserstoff	8
4.3	Entwicklung Biozönose	8
4.4	Zusammensetzung der Oligochaeta-Biozönose	9
4.4.1	Potential des Hallwilersees	10
4.4.2	Lebensgemeinschaft 2023	11
4.4.3	Wiederbesiedlung nach Taxa	11
4.4.4	Ergebnisse eDNA	12
5	Fazit und Empfehlungen	14
5.1	Fazit	14
5.2	Empfehlungen	14
6	Literatur	16
7	Anhang	18

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 – Mittlere Phosphorkonzentration [mg-P/m ³] im Hallwilersee	1
Abb. 2 – Jahresverlauf des monatlich gemessenen Sauerstoffinhaltes [Tonnen O ₂] im Hallwilersee 2016 – 2023	2
Abb. 3 – Entwicklung der Oligochaeta (Würmer) im Hallwilersee in den verschiedenen Tiefenstufen des Westtransektes (Seeboden) anhand von Abundanz-Klassen	7

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 – Tiefenstufen und Beprobungsdaten	3
Tab. 2 – Ergebnisse Erfolgskontrolle 2023: Beggiatoa, Oxidationsgrad der Bodenschicht und Geruch	5
Tab. 3 – Ergebnisse Erfolgskontrolle 2023: Abundanz-Klassen Fauna	6
Tab. 4 – Jahresvergleich Ergebnisse West-Transekt 1991 – 2023	8
Tab. 5 – Potentielle Lebensgemeinschaft Hallwilersee	10

Tab. 6 – Taxaliste Oligochaeta (Erfolgskontrolle 2023)	11
Tab. 7 – Jahresvergleich gefundener Arten	12

Anhangverzeichnis

Anhang 1 – Benthosuntersuchungen Hallwilersee – Detailauswertungen 1985 – 2023

Anhang 2 – Benthosuntersuchung Hallwilersee (ausgewählte Jahre)

1 Ausgangslage und Ziele

Die jahrzehntelange Überdüngung des Hallwilersees brachte das Gleichgewicht des See-Ökosystems bereits Ende des 19. Jahrhunderts ins Schwanken. Ab Mitte des letzten Jahrhunderts war unter 20 m Tiefe kaum noch Sauerstoff vorhanden. Um den Hallwilersee in einen Zustand zurückzuführen, der ihn zur Selbstregulation befähigt und eine standorttypische Artenvielfalt von Tieren und Pflanzen aufkommen lässt, wurden mehrere seeinterne und -externe Massnahmen geplant und durchgeführt. Zu den seeexternen Massnahmen zählen die Verminderung der Phosphoreinträge durch Abwässer, also der Ausbau der ARAs im Hallwilersee-Einzugsgebiet (punktuelle Einträge), sowie diverse Massnahmen in der Landwirtschaft zur Verhinderung der Auswaschung und Abschwemmung von Nährstoffen (diffuse Einträge). Dank diesen Massnahmen bewegt sich der Phosphorgehalt des Hallwilersees seit 2008 im Zielband von 10 bis 20 mg/m³ Phosphor und erreichte im Frühjahr 2023 eine mittlere Konzentration von 19 mg/m³ (Abb. 1). Das Ziel der Seesanieungsmassnahmen ist ein Phosphorgehalt im See von maximal 10 mg/m³ bei einem Jährlichen Eintrag des Gesamt-Phosphors von rund 2 Tonnen/Jahr. Für den Erfolg der Seesanieung ist eine ausreichende Sauerstoffversorgung des Wasserkörpers ein massgeblicher Indikator (Anhang 2, GSchV). Diese soll das Gedeihen einer standortgerechten Lebensgemeinschaft von empfindlichen Tieren wie Oligochaeta (GSchV, Anhang 2, Ziffer 13, Abs. 3b) ermöglichen.

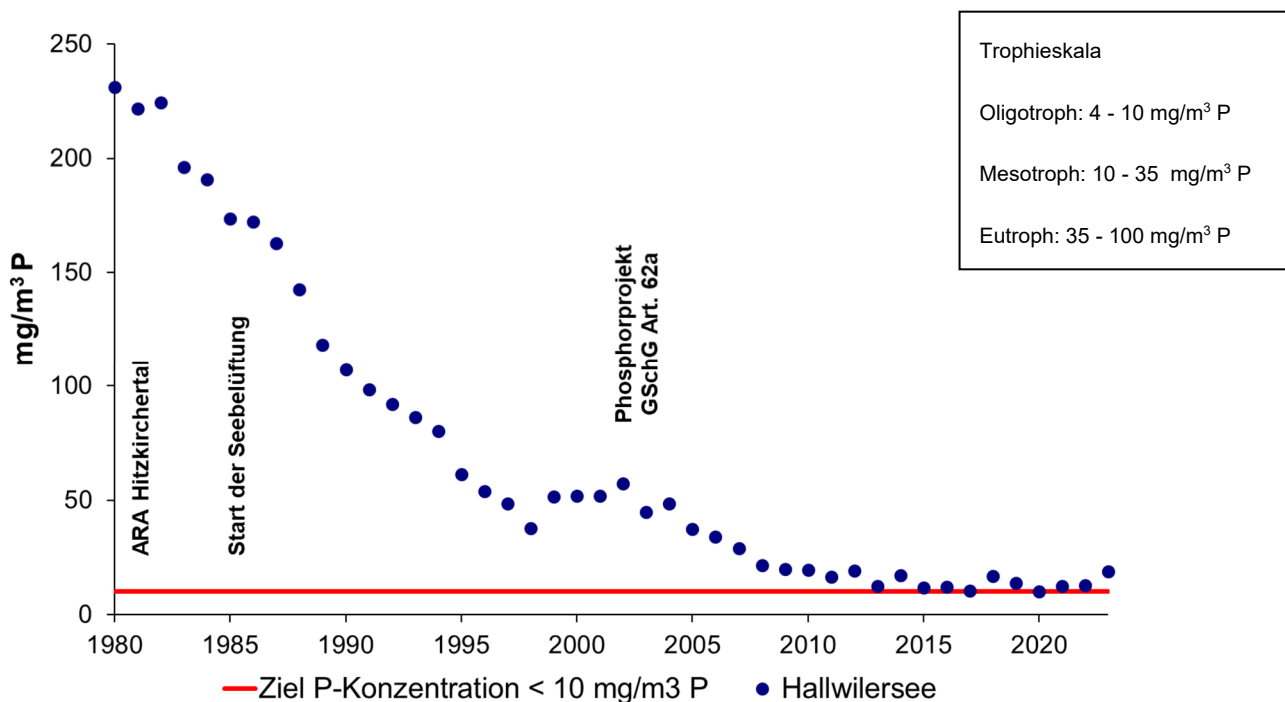


Abb. 1 – Mittlere Phosphorkonzentration [mg-P/m³] im Hallwilersee (blaue Punkte), jeweils zum Ende der Mischungsphase im März. Das Ziel der Seesanieung ist eine Phosphorkonzentration von 10 mg-P/m³(rote Linie)

Quelle: Kanton Aargau, Abteilung für Umwelt 2024

Zu den seeinternen Massnahmen, die seit 1986 durchgeführt werden, zählt die Zirkulationshilfe im Winter, mit der die Umwälzung der Wassermassen gefördert wird, und die Sauerstoffbelüftung im Sommer (April bis Oktober), die dem Sauerstoffmangel durch Abbauprozesse entgegenwirkt.

Als Folge des Gesundungsprozesses des Hallwilersees hat die Sauerstoffzehrung derart abgenommen, dass beim Belüftungsbetrieb seit 2016 auf den Eintrag von zusätzlichem Reinsauerstoff verzichtet werden konnte. Der Betrieb mit Druckluft hat ausgereicht, dass in den Jahren nach 2016 der Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser sich im Herbst im Vergleich zu den Vorjahren nicht wesentlich verschlechterte. Während der Herbstmonate im 2022 und 2023 waren die Sauerstoffgehalte im Tiefenwasser wieder tiefer als in den Vorjahren. Grund dafür

war der längere Sommer, der eher kurzen und milden Winter und die vergleichsweise hohen Niederschläge und somit auch hohen Nährstoffeinträge im 2022 in den Hallwilersee (Abb. 2). Somit bleiben die Monate von September bis November, in denen die Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser unter 4 mg/l sinken kann (Grenzwert für Sauerstoffgehalt im See gemäss GSchV), weiterhin kritisch.

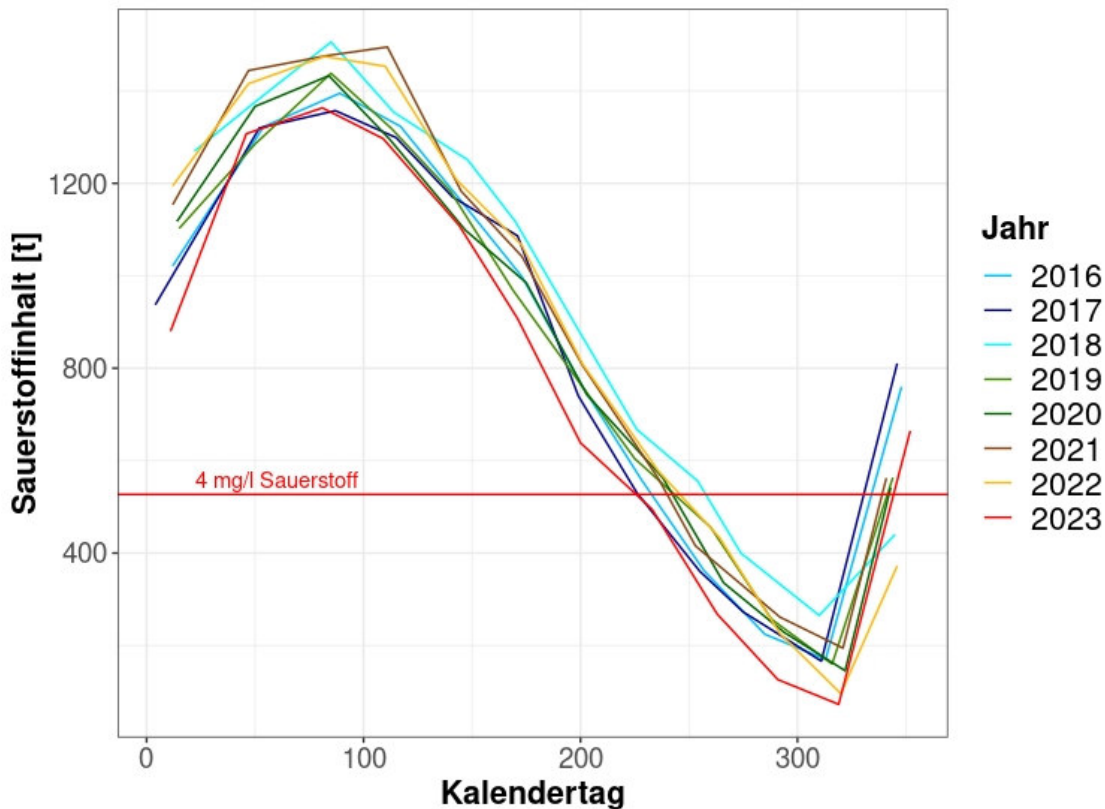


Abb. 2 – Jahresverlauf des monatlich gemessenen Sauerstoffinhaltes [Tonnen O₂] im Hallwilersee 2016 – 2023

Quelle: Kanton Aargau, Abteilung für Umwelt 2024

Um die Erreichung der Ziele gemäss GSchV zu überwachen, wird neben Sauerstoff- und Phosphormessungen eine biologische Erfolgskontrolle durchgeführt. Dabei werden sowohl die Biomasse der benthischen Wirbellosen (Anzahl Individuen, unter anderem der Würmer (Oligochaeta) und Mückenlarven (Chironomidae)) als auch die Artzusammensetzung der Oligochaeta und der Chironomidae untersucht.

Aufgrund der im Vergleich zu früher niedrigeren Nährstoffkonzentrationen im See und der stabilen Sauerstoffgehalte im Tiefenwasser ist auch eine verbesserte Besiedlung der Oligochaeten der tiefer liegenden Sedimentschichten zu erwarten. Das Ziel ist, empfindlichere Oligochaeten und vermehrt Chironomiden in den Sedimenten zu finden – zumindest im West-Transekt.

Der vorliegende Bericht stellt die Resultate der biologischen Erfolgskontrolle 2023 dar.

2 Methode

2.1 Feldarbeit

Die Sedimententnahmen werden seit 1985 mit der sogenannten Dredge-Methode durchgeführt. Die Lage der vier Beprobungstransecte (Nord-, West-, Süd- und Ost-Transect) und die Dredge-Methode sind in Carlevaro (2014) ausführlich beschrieben.

In den Jahren 1985 bis 2002 wurden verschiedene Tiefenstufen zu verschiedenen Jahreszeiten beprobt. Seit 2002 findet die Probeentnahme alle drei Jahre im Oktober statt, da diese Jahreszeit bezüglich der Sauerstoffkonzentration kritisch ist (siehe auch Abb. 2).

In den Jahren 2011 – 2012 wurde am West-Transect untersucht, inwiefern sich bei der Benthos-Besiedlung saisonale Unterschiede zeigen (Carlevaro 2015). Obwohl die Untersuchungen keine relevanten saisonalen Unterschiede in der Verteilung der benthischen Wirbellosen in den tieferen Sedimenten ergaben, wurde entschieden, die Erfolgskontrolle weiterhin während der kritischen Jahreszeit durchzuführen. Darüber hinaus herrschen im Oktober gute Windverhältnisse (Windstille), die eine reibungslose Durchführung der Probeentnahme ermöglichen.

Die Feldarbeiten für die Erfolgskontrolle 2023 fanden am 9.10. und 11.10. statt. Es wurden die nachfolgend in Tab. 1 aufgeführten Tiefenstufen beprobt. Aus zeitlichen Gründen wurde der Ost-Transect nicht beprobt.

Die gesammelten Sedimente wurden vor Ort nach den folgenden Parametern beurteilt:

- Schwefelbakterien (Vorhandensein von Beggiatoa)
- Oxidationsgrad der Bodenschicht
- Schwefelwasserstoff (Geruch)

Die Proben wurden anschliessend grob gesiebt und in Behältern mit Seewasser aufbewahrt. Die Auszählung der Tiere fand jeweils am Tag nach der Probenentnahme statt.

Tab. 1 – Tiefenstufen und Beprobungsdaten

Nord (11.10.2023)	West (9.10.2023)	Süd (9.10.2023)
20 m	20 m	20 m
25 m	25 m	25 m
30 m	30 m	30 m
35 m	35 m	35 m
40 m	40 m	40 m
45 m	45 m	45 m
45a m nahe am Diffusor		

2.2 Laborarbeit

Die Labor-Methode ist in Carlevaro (2014) beschrieben.

Die Bestimmung der Individuendichte (Tiere pro Dredge-Zug) der Oligochaeta, Chironomidae (mit oder ohne Hämoglobin) und Chaoborus wurde am 10.10.2023 und 11.10.2023 im Labor durchgeführt. Auf die Zählung von Cyclops wurde 2023 verzichtet.

Ein Teil der Oligochaeta (wenn ca. 100 Tiere/Tiefenstufe vorhanden) wurde in Formaldehyd 4%, die Chironomidae im Ethanol 85% fixiert, um eine Weiterverarbeitung zu ermöglichen (Artbestimmung).

Die Oligochaeta des West-Transekts wurden bis auf die Art bestimmt. Das gibt Auskunft über die Zusammenstellung der Lebensgemeinschaft, die Tiefenverteilung allfälliger empfindlicher Arten und das Wiederbesiedlungspotential der tieferen Seesedimente.

2.3 Weitere Daten

Im Rahmen einer Neobiota Strategie des Kantons AG wurde im Sommer und Herbst 2021 eine eDNA-Probenahme an jeweils acht Stellen im Hallwilersee und Aabach durchgeführt (SimplexDNA2023). Der Fokus lag auf die Detektion von Neobiota aber es wurden auch Annelida sequenziert und bestimmt. Die Resultate werden im Kapitel 4.3 kurz diskutiert.

3 Zustand 2023

In der Tab. 2 sind die Ergebnisse bzgl. **Beggiatoa**, **Oxidationsgrad der Bodenschicht** und **Geruch** dargestellt.

Beggiatoa (Schwefelbakterien) konnten in keinem der untersuchten Transekten festgestellt werden.

Die Sedimente im West-Transekt sind bis zu einer Tiefe von 45 m gut oxidiert. Der **Oxidationsgrad der Bodenschicht** zeigt, dass hier gute Sauerstoffverhältnisse herrschen. Im Süd-Transekt sind hingegen Reduktionserscheinungen im Sediment schon ab einer Tiefe von 25 m und im Nord-Transekt ab einer Tiefe von 35 m festgestellt worden.

Schwacher **Geruch** wurde ab einer Tiefe von 30 und 35 m im Süd-Transekt festgestellt. Der Geruch war aber unklarer Ursprung (eher moderig).

Tab. 2 – Ergebnisse Erfolgskontrolle 2023: **Beggiatoa**, **Oxidationsgrad der Bodenschicht** und **Geruch**

Transekt	Tiefe (m)	Beggiatoa	Oxidationsgrad der Bodenschicht	Geruch H ₂ S
S	20	N	O	1
S	25	N	Or	1
S	30	N	Or	2
S	35	N	Or	2
S	40	N	Or	1
S	45	N	Ro	1
N	20	N	O	1
N	25	N	O	1
N	30	N	O	1
N	35	N	OR	1
N	40	N	OR	1
N	45	N	Ro	1
N	45a	N	Or	1
W	20	N	O	1
W	25	N	O	1
W	30	N	O	1
W	35	N	O	1
W	40	N	O	1
W	45	N	Or	1

oberste Bodenschicht

O: oxidiert

Or: oxidiert mit red. Anteilen

Ro: reduziert mit oxid. Ant.

OR: oxid. und red. Schichten

R: reduziert

Beggiatoa

N = nicht sichtbar

G = gut sichtbar

Geruch H₂S

1 = kein

2 = schwach

3 = deutlich

3.1 Besiedlung des Seesediments

Die Ergebnisse der Auszählungen von Oligochaeta, Chironomidae (mit und ohne Hämoglobin) sowie Chaoborus sind in der Tab. 3 dargestellt.

Oligochaeta sind in allen Tiefenstufen des Hallwilersees vorhanden. Während im West-Transekt die Dichten mit der Tiefe tendenziell zunehmen, ist die Situation im Süd- und Nord-Transekt etwas unklar – die Dichten sind bei -20/25 m Tiefe gross, nehmen mit der Tiefe ab, um am Seegrund (-45 m) dann wieder zuzunehmen.

Chironomidae (mit und ohne Hämoglobin) wurden im Süd- und Nord-Transekt in sehr geringer Dichte als Einzelfund vorgefunden. Der West-Transekt ist am besten und bis zu einer grösseren Tiefe besiedelt und bestätigt somit den Trend, der in anderen Probenentnahmen festgestellt worden ist, d.h. dass die positive Auswirkung der Diffusoren hier am stärksten ist (Carlevaro 2015).

Chaoborus-Larven verbringen den Tag im Sediment oder knapp darüber (Akeret 1993). Da sie aber ziemlich mobil sind und in der Wassersäule schwimmen, können sie auch während dem Hochziehen der Dredge gefangen worden sein. Sie sind in schwankenden Dichten in allen Transekten und Tiefen zu finden.

Tab. 3 – Ergebnisse Erfolgskontrolle 2023: Abundanz-Klassen Fauna

H = Hämoglobin

Transekt	Tiefe (m)	Oligochaeta	Chironomidae mit H.	Chironomidae ohne H.	Chaoborus
S	20	6		1	5
S	25	6			5
S	30	5	1		5
S	35	5			4
S	40	5			5
S	45	6			4
N	20	6			4
N	25	4			5
N	30	5			4
N	35	5			4
N	40	5			5
N	45	6			4
N	45a	6			5
W	20	4	3	3	4
W	25	5	2	2	5
W	30	6	1	1	2
W	35	5	1		5
W	40	6			4
W	45	5			4

Wertklassen	
Anzahl Tiere pro Dredgenzug	
1:	1 - 4
2:	5 - 16
3:	17 - 64
4:	65 - 256
5:	257 - 1024
6:	> 1024
6+:	massenhaft

4 Entwicklung des Makrozoobenthos 1986 - 2023

4.1 Besiedlung des Seesedimentes

Die Entwicklung der Wiederbesiedlung des Seesedimentes durch Oligochaeta ab 20 m Tiefe wird seit dem Jahr 1985 beobachtet. Die Abb. 3 stellt beispielhaft für das West-Transekt eine Übersicht über die Entwicklung zwischen 1986 und 2023 dar. Die Detailauswertungen zu allen Untersuchungen befinden sich im Anhang 1.

Bevor der Hallwilersee ab 1986 belüftet wurde, waren die Oligochaeta lediglich in den Sedimenten seichterer Stellen in grösseren Dichten zu finden. Die Sedimente tieferer Wasserschichten (tiefer als 25 m) waren damals aufgrund des fehlenden Sauerstoffs sogar für die resistenten Oligochaeta-Arten kein geeigneter Lebensraum.

Die verbesserte Sauerstoffsituation als Folge der Belüftung des Sees erlaubte den Oligochaeta, sich langsam aber kontinuierlich bis in die tiefsten Stellen auszubreiten (bis -46 m). Seit 1993/1994 können Oligochaeta in allen Tiefen nachgewiesen werden. Dies belegt, dass sich die Lebensbedingungen verbessert haben.

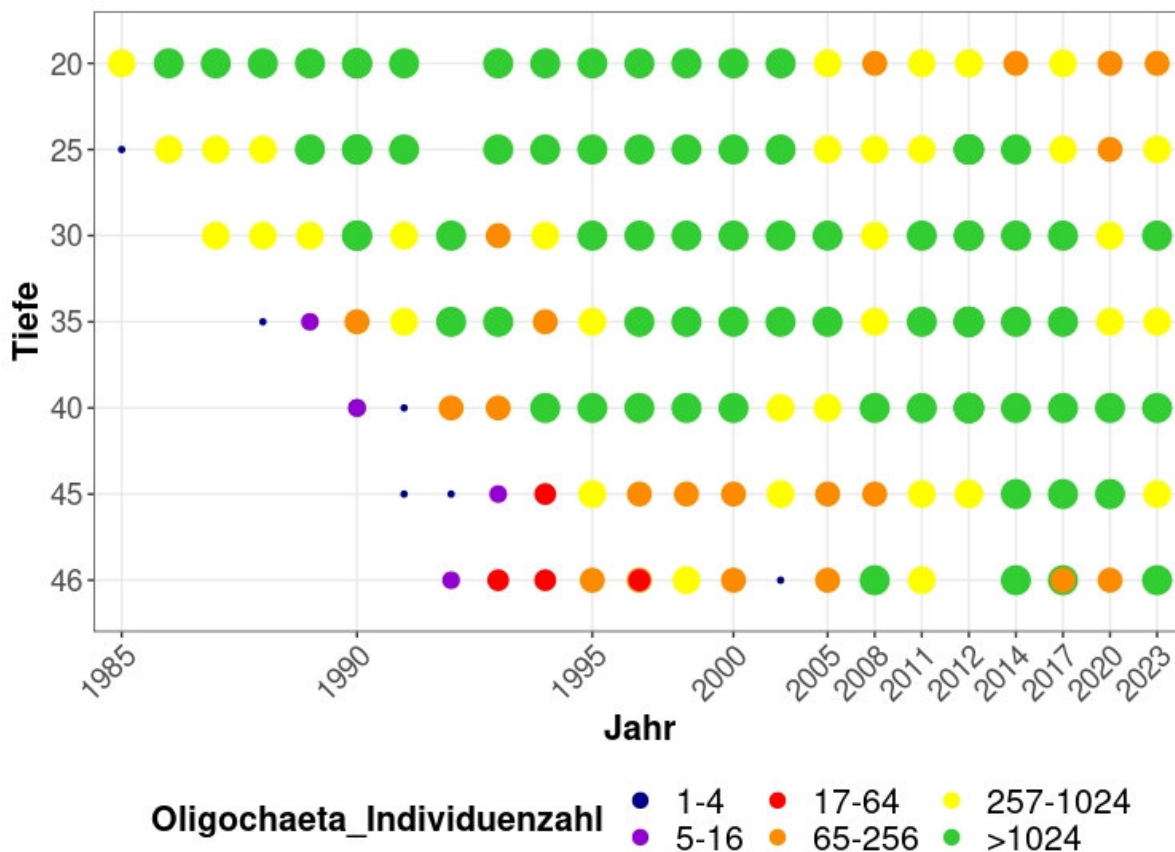


Abb. 3 – Entwicklung der Oligochaeta (Würmer) im Hallwilersee in den verschiedenen Tiefenstufen des Westtransektes (Seeboden) anhand von Abundanz-Klassen.

Quelle: Abteilung für Umwelt, Kanton Aargau 2024

4.2 Entwicklung *Beggiatoa*, Oxidationsgrad und Schwefelwasserstoff

Nachfolgend werden die Ergebnisse der vergangenen Jahre im Hinblick auf einen allfälligen Entwicklungstrend hin zusammenfassend untersucht. Zur besseren Vergleichbarkeit der Daten wurden hierbei nur die Jahre ausgewählt, in denen die Probeentnahmen ebenfalls im Oktober und in denselben Tiefen wie 2023 durchgeführt worden sind, d.h. 1991, 1996, 2002, 2005, 2008, 2011, 2014, 2017 und 2020. Die Probeentnahmen der Nord- und West-Tranekte im September 1991 gelten als vergleichbar.

In der nachfolgenden Tab. 4 sind die Ergebnisse des West-Tranektes dargestellt. Im Anhang 2 sind die Resultate aller Tranekte abgebildet. Weitere Details können den detaillierten Ergebnissen der früheren Erfolgskontrollen im Anhang 1 entnommen werden.

Beggiatoa ist seit 2014 nicht mehr festgestellt worden, vor allem im Vergleich zu 2005 und 2008, wo die Schwefelbakterien in mehreren Tiefenstufen gut sichtbar waren.

Der **Oxidationsgrad** der Bodenschicht des West-Tranektes bleibt seit 2014 relativ konstant, d.h. dass die Sedimente bis zu einer See-Tiefe bis ca. 30 m vollständig oxidiert sind. 2023 ist im Jahresvergleich das Jahr mit dem besten Resultat hinsichtlich Oxidationsgrad der Bodenschicht. Im Nord-Tranekt scheint die Situation über die Jahre stabil zu sein (Anhang 2), während sich beim Süd-Tranekt ein negativer Trend abzeichnet: hier weisen die Sedimente bereits ab einer Tiefe von 25 m Reduktionserscheinungen auf.

2023 konnte ein schwacher **Schwefelwasserstoff-Geruch** im Süd-Tranekt bei 30 und 35 m Tiefe wahrgenommen werden. Der Geruch wurde auch als «moderig» bezeichnet. Der festgestellte Geruch korreliert mit dem Oxidationsgrad.

4.3 Entwicklung Biozonöse

Die Ergebnisse bzgl. **Oligochaeta**-Dichten im West-Tranekt bestätigt, dass über die Jahre eine Verschiebung der Biomasse in die grösseren Tiefen (siehe auch Abb. 3) eingetreten ist. Das heisst, dass die Bedingungen für die Oligochaeta merklich besser geworden sind und diese auch die tieferen Sedimenten besiedeln können. In den weniger tiefen Sedimenten hingegen, nimmt im Laufe der Jahre die Dichte ab, womöglich aufgrund des Frassdruckes (Fische) und der Konkurrenz mit anderen benthischen Organismen um Platz und Ressourcen. Dies lässt vermuten, dass die Genesung des Sees im Gange ist. Diese Verschiebung könnte auch im Nord-Tranekt im Gange sein. Hier ist aber die Tiefenverteilung der Oligochaeta von Jahr zu Jahr eher variabler. Im Süd-Tranekt sind hingegen die grössten Dichten weiterhin bei 20-35 m Tiefe zu finden. Ein Grund für den schlechteren Oxidationsgrad und die tieferen Besiedlungsdichten im Südtranekt könnte die Einleitung des gereinigten Abwassers der ARA Hitzkirchertal in diesem Gebiet des Sees sein.

Chironomidae mit Hämoglobin sind im West Tranekt in kleineren Dichten sowie in den weniger tiefen Sedimenten zu finden (bis 35 m Tiefe). In den anderen Tranekten sind über die Jahre lediglich Einzelfunde in verschiedenen Tiefen gefunden worden.

Chironomidae ohne Hämoglobin (die im Vergleich zu den Chironomidae mit Hämoglobin empfindlicher gegenüber Sauerstoffmangel sind) besiedeln seit 2011 in kleinen Dichten die Sedimente des West-Tranektes bis ca. 30 m Tiefe. Die Dichten sind über die Jahre aber Variabel. In allen anderen Tranekten sind Chironomidae mit Hämoglobin oft lediglich als Einzelfund in verschiedenen Tiefen zu finden (siehe Anhang 2).

Tab. 4 – Jahresvergleich Ergebnisse West-Tranekt 1991 – 2023

Probeentnahme jeweils im Oktober, ausser 1991 (September).

Beggiatoa

	W 20	W 25	W 30	W 35	W 40	W 45
2023	N	N	N	N	N	N
2020	N	N	N	N	N	N
2017	N	N	N	N	N	N
2014	N	N	N	N	G	N
2011	N	N	N	N	G	N
2008	N	G	G	G	N	N
2005	G	G	G	G	G	N
2002	N	N	N	N	G	N

Oxidationsgrad Bodenschicht

	W 20	W 25	W 30	W 35	W 40	W 45
2023	O	O	O	O	O	Or
2020	O	O	O	Or	Or	Or
2017	O	O	O	Or	Ro	Ro
2014	O	O	O	O	Ro	R
2011	O	O	Or	Or	Or	R
2008	O	O	Or	Or	Ro	R
2005	O	O	Or	Or	Ro	Ro
2002	O	O	O	OR	OR	OR

Oligochaeta

	W 20	W 25	W 30	W 35	W 40	W 45
2023	4	5	6	5	6	5
2020	4	4	5	5	6	6
2017	5	5	6	6	6	6
2014	4	6	6	6+	6	6
2011	5	5	6	6	6	5
2008	4	5	5	5	6	4
2005	5	5	6	6+	5	4
2002	6+	6	6	6	4	2
1996	6+	6	6	6.5	6+	4
Sept. 1991	6	6	5	5	1	1

Chironomidae mit H.

	W 20	W 25	W 30	W 35	W 40	W 45
2023	3	2	1	1		
2020	1					
2017	2	2				
2014	3	1	1			
2011	3	1	1			
2008	1					
2005						
2002	1	2	1			
1996	4	2	1			
Sept. 1991	4	3	1			

Chironomidae ohne H.

	W 20	W 25	W 30	W 35	W 40	W 45
2023	3	2	1			
2020	2	1	1			
2017	2	3	1			1
2014	3	1	3	1		1
2011	3	3	2	1	1	
2008	2	1				
2005		1				
2002	1					
1996	2	2	1			
Sept. 1991	2	1	2			

Legende Beggiatoa	Wertklassen
N = nicht sichtbar	Anzahl Tiere pro Dre
G = gut sichtbar	1: 1 - 4
	2: 5 - 16
Legende Oxidationsgrad oberster Bodenschicht	3: 17 - 64
O: oxidiert	4: 65 - 256
Or: oxidiert mit red. Anteilen	5: 257 - 1024
Ro: reduziert mit oxid. Ant.	6: > 1024
OR: oxid. und red. Schichten	6+: massenhaft
R: reduziert	

4.4 Zusammensetzung der Oligochaeta-Biozönose

Neben der Dichtebestimmung und anderen Beobachtungen wurden in den vergangenen Jahren qualitative Daten über die Oligochaeta-Lebensgemeinschaft erhoben (Artbestimmung):

- 1985 – 1996: Bestimmung der Oligochaeta mehrerer Proben in verschiedenen Tiefen und Zeitpunkten (Stössel 1996)
- 2002: Bestimmung der Oligochaeta in einigen Proben (Lodz-Crozet 2009)
- 2011/2012 Bestimmung der Oligochaeta aus 25 m Tiefe (Carlevaro 2014a)
- 2017 Bestimmung der Oligochaeta des West-Transektes (Carlevaro 2018)
- 2020 Bestimmung der Oligochaeta des West-Transektes (Carlevaro 2021)

- 2021 eDNA Sequenzierungen im Hallwilersee und Aabach (Zufluss) (Simplex DNA 2023)
- 2023 Bestimmung der Oligochaeta des West-Transektes (vorliegender Bericht)

4.4.1 Potential des Hallwilersees

Die folgende Tab. 5 fasst die Ergebnisse von mehreren Untersuchungen zusammen. Es sind alle Oligochaeta der Familie Tubificidae aufgelistet, die über die Jahre im Hallwilersee und Baldeggersee morphologisch nachgewiesen worden sind. Es handelt sich grundsätzlich um die Daten von Stössel 1996 und Günthert 1911. Informationen über Zeitpunkt und Tiefe des Nachweises der jeweiligen Art sind Carlevaro (2015) zu entnehmen.

Da nur wenige Tubificidae im juvenilen Stadium bestimmbar sind, ist die Unterteilung in systematische Einheiten für die Beurteilung der Lebensgemeinschaft hilfreich. Es wird zwischen der Unterfamilie der Tubificinae ohne Haarborsten (- Hb) und der Tubificinae mit Haarborsten (+ Hb) unterschieden. Durch diese Unterscheidung kann man in einer artenarmen Probe die Juvenilstadien zu einem bestimmten Taxon zuordnen. *Branchiura sowerbyi* ist ein Neozoon und gehört zur Unterfamilie Rhyacodrilinae. In der Tab. 5 farblich dargestellt ist ebenfalls die Unterteilung bzgl. Eutrophiegrad der jeweiligen Art: Hellblau = Saprobie <2.5; Gelb: Saprobie 2.5; Rot: Saprobie >2.5.

Von den 14 Arten, die im Hallwilersee potentiell vorhanden sind, sind fünf Zeiger oligotropher, drei mesotropher und sechs eutropher Bedingungen.

Tab. 5 – Potentielle Lebensgemeinschaft Hallwilersee

Die Unterteilung des *Eutrophiegrades* erfolgte gemäss Lang 2007, Moog 2002 und Rodriguez & Reinoldson 2011. *Saprobie* aus Hörner, K., Moog, O. & Sporka, F. (1995).

*Aus: Rodriguez & Reinoldson (2011): Tabelle 3.4; Werte von Horwmler und Scott (1977) und Milbrink (1983).

Farblich dargestellt ist ebenfalls die Unterteilung bzgl. Eutrophiegrad der jeweiligen Art: Hellblau = Saprobie <2.5; Gelb: Saprobie 2.5; Rot: Saprobie >2.5.

Systematische Einheit	Art	Eutrophiegrad	Saprobie
Erkennbar auch als juvenil Tubificinae mit Haarborsten (+ Hb)	<i>Aulodrilus pluriset</i> (PIGUET)	Mesotrophe Art (Moog 2002)	2.2
Erkennbar auch als juvenil Haarborsten (+ Hb)	<i>Branchiura sowerbyi</i> BEDDARD NEOZOON	Mesotrophe Art (Moog 2002) (Litoral)	2.4
Erkennbar auch als juvenil Tubificinae mit Haarborsten (+ Hb)	<i>Psammoryctides barbatus</i> (GRUBE)	Oligo-/Mesotrophe Art (Moog 2002) Mesotrophe Art (Milbrink 1983)*	2
Erkennbar auch als juvenil Tubificinae mit Haarborsten (+ Hb)	<i>Spirosperma ferox</i> (EISEN)	Oligotrophe Art (Milbrink 1983)* Mesotrophe Art (Horwmler und Scott 1977)*	2.3
Tubificinae ohne Haarborsten (- Hb)	<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> CLAPARÈDE	Eutrophe Art (Milbrink 1983)* Mesotrophe Art (Lang 2007)	3.5
Tubificinae ohne Haarborsten (- Hb)	<i>Limnodrilus profundicola</i> (VERRIL)	Eutrophe Art (Horwmler und Scott 1977)* Mesotrophe Art (Lang 2007) Mesotrophe Art (Milbrink 1983)*	3.1
Tubificinae ohne Haarborsten (- Hb)	<i>Limnodrilus udekemianus</i> CLAPARÈDE	Eutrophe Art (Milbrink 1983)*	3.3

Systematische Einheit	Art	Eutrophiegrad	Saprobie
Tubificinae ohne Haarborsten (- Hb)	<i>Potamothenix moldaviensis</i> VEJDOVSKY at MRAZEK	Mesotrophe Art (Lang 2007)	2.5
Tubificinae mit Haarborsten (+ Hb)	<i>Ilyodrilus templetoni</i> (SOUTHERN)	Eutrophe Art (Milbrink 1983)* Mesotrophe Art (Horwmler und Scott 1977)* Mesotrophe Art (Moog 2002)	2.5
Tubificinae mit Haarborsten (+ Hb)	<i>Potamothenix bavaricus</i> (OSCHMANN)	Oligo-/Mesotrophe Art (Moog 2002) (Litoral)	2.2
Tubificinae mit Haarborsten (+ Hb)	<i>Potamothenix bedoti</i> (PIGUET)	Mesotrophe Art (Moog 2002)	2.5
Tubificinae mit Haarborsten (+ Hb)	<i>Potamothenix hammoniensis</i> (MICHAELSEN)	Eutrophe Art (Lang 2007) Meso-/Eutrophe Art (Moog 2002)	2.7
Tubificinae mit Haarborsten (+ Hb)	<i>Potamothenix heuscheri</i> (BRETSCHER)	Meso-/ Eutrophe Art (Moog 2002)	2.8
Tubificinae mit Haarborsten (+ Hb)	<i>Tubifex tubifex</i> (MÜLLER)	Eutrophe Art (Lang 2007)	3.6

4.4.2 Lebensgemeinschaft 2023

Es wurden die Oligochaeta der Tiefenstufen 20, 25, 30, 35, 40 und 45 m des West-Transektes bis zur tiefsten systematischen Einheit bestimmt (Tab. 6).

Tab. 6 – Taxaliste Oligochaeta (Erfolgskontrolle 2023)

HB = Haarborsten, Fb = Fächerborsten. Alle Arten haben einen Saprobie-Wert von >2.5 (rot).

Nr.	TAXA	W 20 m	W 25 m	W 30 m	W 35 m	W 40 m	W 45 m
1	<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	5	30	21	33	56	62
2	<i>Limnodrilus profundicola</i>		1			1	
	- Hb	21	28	46	37	29	4
3	<i>Potamothenix hammoniensis</i>	13	5	2	5		1
4	<i>Tubifex tubifex</i>	2	10	6	4	2	12
	+ Hb, + Fb	41	36	22	18	11	17
	Anzahl Taxa	5	6	5	5	5	5
	Davon empfindlichen Arten	0	0	0	0	0	0
	Anzahl gezählten Tiere	82	110	97	97	99	96

P. hammoniensis und *T. tubifex* (+Hb, +Fb) sind in den Proben der Tiefen 20 und 25 m am Häufigsten. Ab einer Tiefe von 30 m ist die Lebensgemeinschaft im Hallwilersee hingegen von *Limnodrilus*-Arten dominiert (- Hb). *L. profundicola* wurde zum letzten Mal im Süd-Transekt (-25m) im 2011 nachgewiesen, ebenfalls als Einzelfund. Alle vier Arten kommen mit Sauerstoffmangel gut aus (Zeiger für eutrophe Bedingungen). Es sind keine empfindlichen Arten nachgewiesen worden.

4.4.3 Wiederbesiedlung nach Taxa

In der Tab. 7 sind die Ergebnisse der Bestimmungen der Jahre 1990, 2002, 2011, 2012, 2017, 2020 und 2023 zusammengefasst. Anhand dieser Tabelle kann man sehen, dass die Diversität ab einer Tiefe von 20 m über

die Jahre sehr gering ausfällt. Mit nur 4 nachgewiesenen Arten im Jahr 2023 ist die Lebensgemeinschaft des Hallwilersees immer noch stark verarmt. Als Referenz dient die Liste mit der potentiellen Lebensgemeinschaft (Tab. 5), die insgesamt 14 Arten enthält, davon acht Zeiger von meso- und oligotrophen Bedingungen.

Tab. 7 – Jahresvergleich gefundener Arten

Potentielle Lebensgemeinschaft (siehe Tab 4). Farblich dargestellt ist ebenfalls die Unterteilung bzgl. Eutrophiegrad der jeweiligen Art: Hellblau = Saprobie <2.5; Gelb: Saprobie 2.5; Rot: Saprobie >2.5.

Quelle: Artbestimmung 1990: Stössel (1996) (Es wurden nur die Arten ab einer Tiefe von 20 m berücksichtigt); Artbestimmung 2002: Lodz-Crozet Reymond (2009); Artbestimmung 2011/2012: Carlevaro (2014a), Artbestimmung 2017: Carlevaro (2018), Artbestimmung 2020: Carlevaro (2021), Artbestimmung 2023: aktuelle Erfolgskontrolle.

Art	1990	2002	2011/ 2012	2017	2020	2023
<i>Aulodrilus plurisetus</i> (PIGUET)						
<i>Branchiura sowerbyi</i> BEDDARD						
<i>Psammoryctides barbatus</i> (GRUBE)						
<i>Spirosperma ferox</i> (EISEN)						
<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> CLAPARÈDE		X	X	X	X	X
<i>Limnodrilus profundicola</i> (VERRIL)		X	X			X
<i>Limnodrilus udekemianus</i> CLAPARÈDE						
<i>Potamothenis moldaviensis</i> VEJDOVSKY at MRAZEK						
<i>Ilyodrilus templetoni</i> (SOUTHERN)						
<i>Potamothenis bavaricus</i> (OSCHMANN)						
<i>Potamothenis bedoti</i> (PIGUET)	X					
<i>Potamothenis hammoniensis</i> (MICHAELSEN)	X		X	X	X	X
<i>Potamothenis heuscheri</i> (BRETSCHER)						
<i>Tubifex tubifex</i> (MÜLLER)	X	X	X	X	X	X
ANZAHL TAXA	3	3	4	3	3	3

Die Wiederbesiedlung der tiefer gelegenen Sedimente des Hallwilersees ist ab 1985 durch *T. tubifex* am schnellsten fortgeschritten. *T. tubifex* war schon in der Frühphase der Eutrophierung in Tiefen von -30 m zu finden (Güntert 1911). Als sich die Bedingungen mit den seeinternen Massnahmen in den tieferen Wasserschichten wieder verbesserten, konnte die Art zwischen 1985 und 1991 die tieferen Sedimente ohne jegliche Konkurrenz rasch besiedeln. *P. hammoniensis* und *L. hoffmeisteri* konnten sich hingegen erst ab 1989 resp. 1991 bis in die tieferen Sedimente ausbreiten. Heute besiedeln alle drei Arten die tieferen Seesedimente, wobei die *Limnodrilus*-Arten (-Hb) die Lebensgemeinschaft mengenmässig dominieren.

4.4.4 Ergebnisse eDNA

Mit den eDNA-Probenahme konnten im Hallwilersee und Aabach (Zufluss) 9 Oligochaeta-Taxa nachgewiesen werden. Nachfolgend ist die kommentierte Taxaliste aufgeführt:

- *Eiseniella tetraedra*: Oligochaeta der Lumbricidae-Familie. Sehr verbreitet insbesondere in Flüsse und Bäche in Sand bis Steine. Der genetische Nachweis kommt wahrscheinlich durch Einträge aus Zuflüssen.
- *Branchiura sowerbyi*: Oligochaeta der Rhyacodrilinae-Familie, Neozoon. Lebt in Flüssen und Seen, insbesondere in schlammigen und sandigen Sedimenten. Diese Art ist im Hallwilersee im Jahr 1986 von Stössel nachgewiesen worden (Süd Transekt, 2 m Tiefe) (Stössel 1996).
- *Chaetogaster diastrophus*: Kleines Oligochaeta der Naididae-Familie (1-5 mm Länge). Lebt hauptsächlich in Schlamm und an Algen/Makrophyten.

- *Limnodrilus hoffmeisteri*: Oligochaeta der Tubificidae-Familie. Diese Art ist im Hallwilersee sehr verbreitet.
- *Nais barbata*: Kleines Oligochaeta der Naididae-Familie. Lebt hauptsächlich an Algen/Makrophyten.
- *Nais christinae*: Kleines Oligochaeta der Naididae-Familie (1-8 mm Länge). Lebt hauptsächlich in stehenden Gewässer im Schlamm und an Algen/Makrophyten und Detritus.
- *Tubifex tubifex*: Oligochaeta der Tubificidae-Familie. Diese Art ist im Hallwilersee sehr verbreitet.
- *Stylodrilus heringianus* Oligochaeta der Lumbriculidae-Familie. Diese Art ist im Hallwilersee 1991 von Stössel nachgewiesen worden (West Transekt, 2 m Tiefe) (Stössel 1996).
- *Sparganophilus tamesis*: Langer Oligochaeta der Sparganophilidae-Familie (60-200 mm), Neozoon. Lebt in Schlamm, Detritus und an Makrophyten in Fließgewässer.

Die morphologisch nachgewiesene Art *Potamotrix hammoniensis* ist mit der eDNA-Sequenzierung nicht nachgewiesen worden.

Viele der genetisch nachgewiesenen Arten leben in den eher seichteren Bereichen des Sees, wo Makrophyten vorkommen, oder sogar in den Zuflüssen. Es sind also keine Arten nachgewiesen worden, die in den tieferen Sedimenten vorkommen könnten bzw. historisch vorkamen (siehe Tab. 5). Das bedeutet aber nicht unbedingt, dass diese Arten nicht mehr vorhanden sind, sondern methodisch bedingt sein (lückenhafte Referenz-Datenbank, Probenahme-Design).

5 Fazit und Empfehlungen

5.1 Fazit

Die Ergebnisse der Erfolgskontrolle des Hallwilersees im Jahr 2023 zeigen, dass sich der See weiterhin in einem eutrophischen Zustand befindet.

In der Literatur (z. B. Fiskal 2020) ist beschrieben, wie Oligochaeten in den eutrophen Seen sowie Chironomiden-Larven in den oligotrophen Seen die Lebensgemeinschaft dominieren. Im Hallwilersee sind Chironomidae-Larven weiterhin lediglich in kleineren Dichten und in oberflächennahen Sedimenten anzutreffen, während Oligochaeten in hohen Abundanzen auch in grösseren Tiefen vorkommen.

Die Ergebnisse der Artbestimmungen haben gezeigt, dass sowohl die Lebensgemeinschaft der Oligochaeta eine stark verarmte Zusammensetzung mit ausschliesslich Zeigern für eutrophe Bedingungen aufweist.

Mit den Sanierungsmassnahmen ist zu erwarten, dass sich – sofern der Trophiegrad sich weiterhin verbessert – eine ähnliche Entwicklung wie in Fiskal (2020) abzeichnen wird: eine Abnahme der Oligochaeta-Dichten bei gleichzeitiger Zunahme und Ausbreitung der Chironomidae in den tieferen Sedimenten. Darüber hinaus müsste mit der Zeit die Diversität der Lebensgemeinschaft dank dem Zuzug von «empfindlicheren» Arten (siehe auch Tab. 5) zunehmen. Diese Entwicklung hat sich noch nicht abgezeichnet.

Der Jahresvergleich und vor allem die Tatsache, dass im West-Transekt seit mehreren Jahren Chironomidae vorhanden sind, bestätigt die Annahme, dass das West-Transekt als Steilufer die beste Sauerstoffversorgung aufweist und dass sich hier die positiven Auswirkungen der Verbesserung des Trophiegrades am deutlichsten abzeichnen können.

Mit der eDNA-Analyse konnten keine Arten nachgewiesen werden, die in den tieferen Seesedimenten historisch vorkamen.

5.2 Empfehlungen

Die biologische Erfolgskontrolle am Hallwilersee hat im Laufe der letzten 30 Jahre wichtige Daten zur Beurteilung der Genesung des Sees geliefert. Folgende Massnahmen werden für die Fortführung der Erfolgskontrolle empfohlen.

Beprobungstransekte

Das West-Transekt weist als Steilufer die beste Sauerstoffversorgung auf. Dort wird zukünftig die Verschiebung der Biomasse (Oligochaeta und Chironomidae) sowie das Vordringen von empfindlicheren Taxa vermutlich zuerst beobachtet werden können. Der Nord- und der Süd-Transekt sind für die Gesamtbeurteilung ebenfalls unerlässlich. Einzig der Ost-Transekt wurde weder 2017, 2020 noch 2023 beprobt. Aus diesem Grund wird es empfohlen, die Probeentnahme 2026 vorrangig im West-, Nord- und Süd-Transekt durchzuführen.

Beprobungszeitpunkt

Wie in Carlevaro (2015) erwähnt, wird empfohlen, die Erfolgskontrolle weiterhin in den Herbstmonaten durchzuführen. Eine Untersuchung des Makrozoobenthos alle drei Jahre genügt für die Beurteilung der Sauerstoffversorgung durch die Belüftung.

Oligochaeta

Die Oligochaeta-Bestimmungen können sowohl morphologisch als auch mittels DNA-Barcoding durchgeführt werden. Mit der DNA-Analyse könnten auch unbestimmbare juvenile Stadien bestimmt werden.

Chironomidae

Chironomidae sind (wenn auch in kleiner Anzahl) auch in den tieferen Sedimenten zu finden. Während die Oligochaeta ins Sediment eingegraben sind, schwimmen einige Chironomidae z. T. frei (*Procladius spp.*) und sind daher von den Redox-Bedingungen des Sediments weniger stark beeinflusst. Sie können aber wichtige Informationen über die Genesung des Sees liefern, da eine Wiederbesiedlung von empfindlichen Arten aus anderen Gewässern viel schneller stattfinden kann (Eiablage von zugeflogenen Imagines) als von Oligochaeta. Es wird daher empfohlen alle sechs Jahre, gleichzeitig zur Oligochaeta-Artbestimmung auch die Chironomidae des Westtransekts bis zur tiefstmöglichen systematischen Einheit zu bestimmen. Die Bestimmung kann allenfalls auch mittels DNA-Barcoding erfolgen.

eDNA

Es ist unwahrscheinlich, dass historisch nachgewiesene, empfindliche Oligochaeta-Arten aus dem Hallwilersee "verschwunden" sind. Wahrscheinlicher ist, dass das Probenahme-Design der eDNA-Studie nicht geeignet war, um diese Arten zu erfassen. Aus diesem Grund soll abgeklärt werden, ob die Artbestimmung durch Gen-Sequenzierung für die historisch nachgewiesenen Arten (DNA-Datenbank) sinnvoll ist. Zudem könnten auch eDNA-Proben aus Wasserproben aus grösserer Tiefe oder aus Sedimentproben auf der Oligochaeta und Chironomidae analysiert werden.

6 Literatur

- Akeret B. 1993: Zur Biologie von *Chaoborus flavicans*, *Leptodora kindtii* und *Bythotrephes longimanus* unter dem Einfluss interner Restaurierungsmassnahmen in drei Schweizer Seen. Diss. Naturwiss. ETH Zürich, Nr. 10137, 1993
- Carlevaro A. 2014: Sanierung Hallwilersee – Erfolgskontrolle Makrozoobenthos 2014. Aufarbeitung der Proben im Labor und Darstellung der Resultate. Internes Dokument Kt. AG.
- Carlevaro A. 2014a: Identifikation des Makrozoobenthos im Hallwilersee-Sediments (2011 – 2012). Taxaliste. Internes Dokument Kt. AG.
- Carlevaro A. 2015: Sanierung Hallwilersee. Entwicklung des Makrozoobenthos im Profundal 1985 – 2014. Zusammenfassender Bericht. Internes Dokument Kt. AG.
- Carlevaro A. 2018: Sedimentuntersuchungen Hallwilersee 2017. Entwicklung des Makrozoobenthos im Profundal 1985 – 2017. Internes Dokument Kt. AG
- Carlevaro A. 2021: Sedimentuntersuchungen Hallwilersee 2020. Entwicklung des Makrozoobenthos im Profundal 1985 – 2017. Internes Dokument Kt. AG
- De Ventura L. 2020: Neue Ziele für die Sanierung des Hallwilersees. In: Umwelt Aargau, UMWELT AARGAU, Nr. 80 Mai 2019.
- Fiskal A. et a. 2020: Carbon sources of benthic fauna in temperate lakes across multiple trophic states. Biogeosciences Discuss. [preprint], <https://doi.org/10.5194/bg-2020-318>, in review, 2020.
- Güntert A. 1911: Einige Mitteilungen über die Tiefenfauna des Hallwilersees. Festschrift der Aarg. Natf. Gesell. 12.
- Hörner K., Moog, O. & Sporck, F. 1995: Oligochaeta. In: Moog, O. (Ed.): Fauna Aquatica Austriaca, Lieferungen 1995, 2002. Wasserwirtschaftskataster, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- Lang. C. 2007: Comment interpréter les modifications du zoobenthos (oligochètes et chironomides) dans le lac de Neuchâtel entre 1984 et 2002? Bulletin de la Société vaudoise des Sciences Naturelles Nr. 90.
- Lods-Crozet B. & O. Reymond 2009 : Evaluation de la qualité des sédiments profonds du Hallwilersee par les vers oligochètes. Interner Bericht Kanton AG. Laboratoire du Service des Eaux, Sols et Assainissement, Kanton Waadt.
- Rodriguez P. & T. B. Reinoldson 2011: The Pollution Biology of Aquatic Oligochaetes. Springer Netherlands.
- Simplex DNA 2023: Erweiterte Analyse Neobiota-Monitoring mittels eDNA im Hallwilersee 2021. Internes Dokument Kt. AG.
- Stössel F. 1996: Taxalisten der Untersuchungen am Hallwilersee 1985-1996. Notizen des Verfassers, EAWAG 1996.

Websites:

Zustand Hallwilersee

https://www.ag.ch/de/bvu/umwelt_natur_landschaft/umwelt_1/oberflaechengewaesser/hallwilersee/zustand_hallwilersee/zustand_hallwilersee.jsp

7 Anhang

Anhang 1 – Benthosuntersuchungen Hallwilersee – Detailauswertungen 1985 – 2023

Anhang 2 – Benthosuntersuchung Hallwilersee (ausgewählte Jahre)

- Beggiatoa
- Oxidierungsgrad oberste Bodenschicht
- Oligochaeta
- Chironomidae mit Hämoglobin
- Chironomidae ohne Hämoglobin