

Pilotprojekt Temperaturmonitoring Schweizer Seen



Kastanienbaum, 25.08.2025

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Hydrologie, CH-3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: Eawag

Autoren: Fabian Bärenbold, James Runnalls, Damien Bouffard, Martin Schmid

Begleitung BAFU: Thilo Herold, Florian R. Storck

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst.
Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	5
1.1	Hintergrund.....	5
1.2	Projektziele.....	6
2.	Übersicht, Typisierung und Auswahl Schweizer Seen.....	8
2.1	Einführung.....	8
2.2	Versuch der (physikalischen) Typisierung der Schweizer Seen.....	9
2.3	Auswahl Seen für das Pilotprojekt.....	16
3.	Bestehende See-Monitoringprogramme.....	21
3.1	Übersicht.....	21
3.2	Temperatur und Sauerstofftrends der letzten Jahrzehnte.....	22
3.3	Nachteile von monatlichen Profilen.....	28
4.	Beschreibung der Pilot-Messtationen.....	31
4.1	Einführung.....	31
4.2	Messtationen in Kleinseen entlang eines Höhengradienten.....	32
4.3	Messkette Hallwilersee.....	39
4.4	Messkette Murtensee.....	45
4.5	Profiler Ägerisee.....	50
4.6	Weitere Temperatur-Messtationen.....	55
5.	Datenverfügbarkeit und Visualisierung.....	57
5.1	Hochaufgelöste Messtationen.....	57
5.2	Kantonale Monitoringdaten.....	59
6.	Zusätzliche Datenprodukte und Analysen.....	62
6.1	Automatisch berechnete Datenprodukte.....	62
6.2	Datenbank für Seehypsometrien.....	64
6.3	Vergleich monatliche mit hochaufgelösten Messdaten.....	65
7.	Numerische Seetemperatur-Simulationen.....	69
7.1	Einführung.....	69
7.2	Weiterentwicklung und Verbesserung der eindimensionalen Simulationen mit Simstrat.....	70
7.3	Ausweitung der Simulationen auf Kleinseen.....	73
7.4	Vergleich der Simulationen mit Messdaten.....	75
7.5	Untersuchungen zur Modellkalibration.....	77
7.6	Parameterisierung von Modellen für Seen ohne Messdaten.....	82
7.7	Versuch der Simulation der Sauerstoffdynamik in Schweizer Seen.....	84
7.8	Integration von Satellitendaten.....	85

8.	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	87
8.1	Zusammenfassung Ergebnisse.....	87
8.2	Beantwortung der BAFU-Fragen.....	89
8.3	Empfehlungen und Ausblick.....	91
9.	Bibliografie.....	93
	Anhang A Messgenauigkeit und Tiefenauflösung	95
	Anhang B Detailbeschreibung Kleinsee-Messsystem	97

1. Einleitung

1.1 Hintergrund

Die Schweizer Seen erbringen eine breite Palette von Ökosystemdienstleistungen. Sie dienen als Nahrungsquellen durch Fischerei und Trinkwasserversorgung. Die meisten Seen sind reguliert und leisten einen wesentlichen Beitrag zum Hochwasserschutz. Seen dienen zunehmend als lokale und erneuerbare Energiequellen für Wärmenutzungen. Ausserdem sind sie wichtige Naherholungsräume für zahlreiche Freizeitaktivitäten und haben so einen grossen Wert für den Tourismus. Nicht zuletzt sind sie aber auch Hotspots der Biodiversität, welche zahlreichen bedrohten Organismen einen Lebensraum bieten. So beherbergen sie unter anderem eine grosse Anzahl endemischer Fischarten (Seehausen et al., 2022).

Der fortschreitende Klimawandel ist für die Seen und ihre Ökosysteme eine grosse Herausforderung, deren Folgen sich in den kommenden Jahrzehnten verstärkt auswirken werden.

Der unmittelbare Einfluss des Klimawandels auf die Seen ist die Erwärmung der Oberflächentemperatur, welche in direktem Wärmeaustausch mit der Atmosphäre steht. Die Oberflächentemperatur von Seen passt sich je nach der aktuellen Dicke der gemischten Oberflächenschicht in einem Zeitraum von Tagen bis Wochen an die aktuellen meteorologischen Bedingungen an. Die Oberflächentemperaturen der grösseren Schweizer Seen haben in den letzten 50 Jahren im Mittel um etwa 0.4 bis 0.5 °C zugenommen (Abbildung 1).

Eine weitere Zunahme der Oberflächentemperaturen in den nächsten Jahrzehnten ist unumgänglich und wird sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts nach Modellrechnungen je nach dem Erfolg der globalen Klimaschutzmassnahmen im Rahmen von etwa 1.0 °C bei starkem Klimaschutz und von etwa 3.0 bis 4.0 °C ohne Klimaschutz bewegen (BAFU, 2021; Råman Vinnå et al., 2021).

Die Veränderung der Oberflächentemperatur hat weitreichende Folgen. Sie führt zu einer veränderten Saisonalität mit einer länger dauernden Sommerschichtung und in zahlreichen Seen zu einer wesentlichen Veränderung der Mischungsdynamik. So waren viele der grösseren Seen im Schweizer Mittelland bis vor wenigen Jahrzehnten dimiktisch. Sie bildeten jeden Winter zwischen einer Mischungsphase im Spätherbst und einer zweiten Mischungsphase im Frühjahr eine inverse Schichtung oder gar eine Eisbedeckung aus. Inzwischen sind diese Seen mehrheitlich monomiktisch geworden, das heisst sie mischen sich nur noch einmal pro Jahr ohne inverse Schichtung im Winter. In Seen, welche bereits zuvor monomiktisch waren, hat sich die Dauer der Wintermischung verkürzt und deren Intensität zum Teil abgeschwächt.

Dies hat wiederum Auswirkungen auf zahlreiche biogeochemische Prozesse in den Seen. Insbesondere wird die Nachlieferung von Sauerstoff bei der Mischung im Winter vermindert, und durch die zunehmende Dauer der Sommerschichtung der Sauerstoffverbrauch im Tiefenwasser erhöht (Jane et al., 2023). Beides führt dazu, dass bereits bestehende Sauerstoffdefizite in vielen Seen weiter verstärkt werden, mit entsprechenden Folgen für die Lebensgemeinschaften.

Die Temperatur ist deshalb ein Schlüsselparameter für die Folgen des Klimawandels auf Seen. Qualitativ hochwertige, und zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Temperaturmessungen sind eine wichtige Grundlage, um die durch den Klimawandel in den Seen ausgelösten Veränderungen gut beobachten und interpretieren zu können.

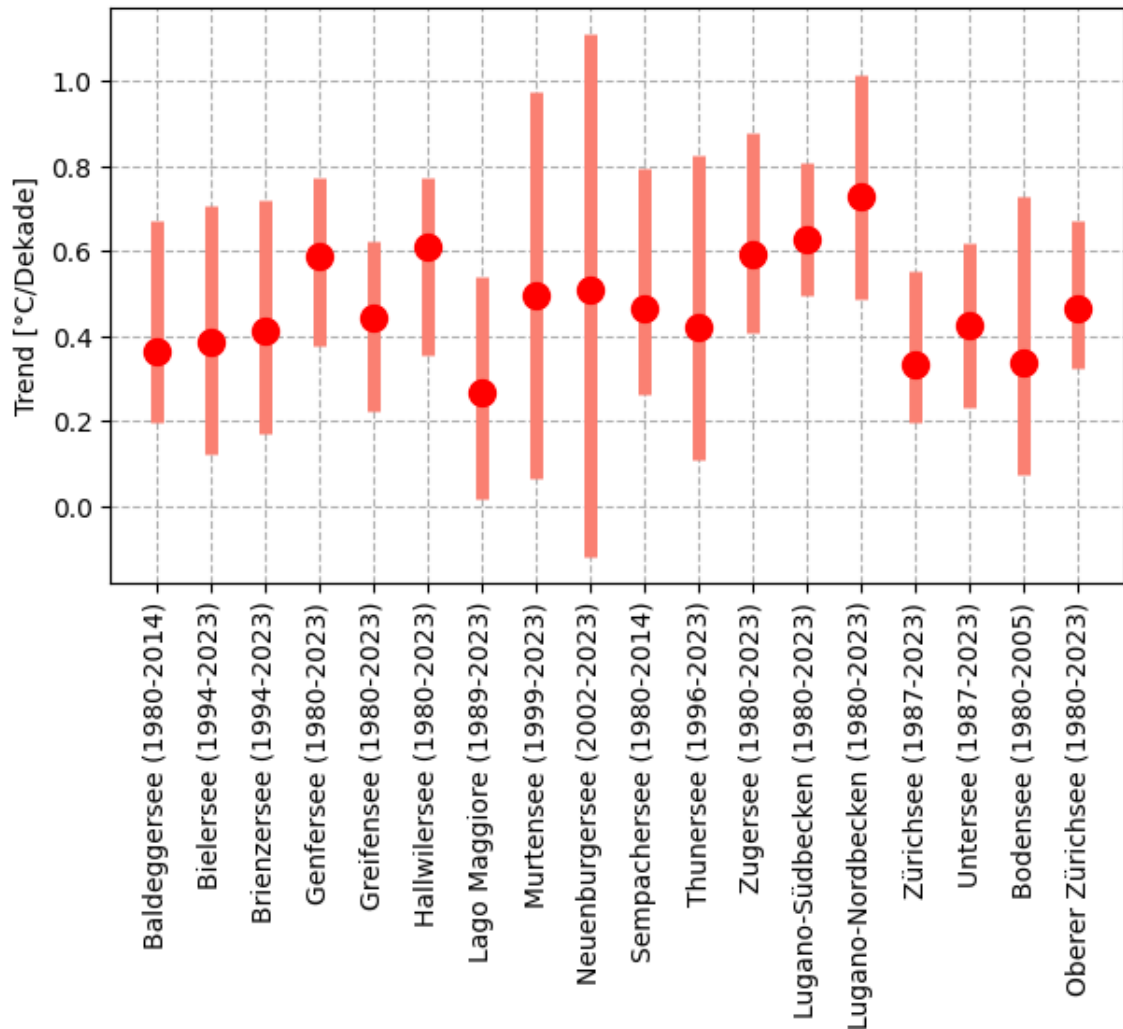


Abbildung 1: Lineare (Theil-Sen) Trends der Oberflächentemperatur einer Auswahl der grössten Schweizer Seen seit 1980. Die Berechnungen basieren auf den Monitoringdaten der Kantone und der IGKB, der CIPEL und der CIP AIS.

1.2 Projektziele

In Fließgewässern betreibt das Bundesamt für Umwelt (BAFU) seit 1963 ein Messnetz mit Temperaturmessungen (Jakob, 2010). Die Temperaturen in den Seen wurden bisher hingegen hauptsächlich durch kantonale Fachstellen, und im Fall von grenzüberschreitenden Seen, durch internationale Kommissionen durchgeführt. Dabei handelte es sich meistens um Profilmessungen mit einer zeitlichen Auflösung von einem Monat oder länger, die gemeinsam mit Wasserqualitätsmessungen durchgeführt wurden.

Diese Messungen, die in einigen Seen seit vielen Jahrzehnten regelmässig durchgeführt wurden, bilden eine sehr wertvolle Grundlage für die Auswertung der historischen Veränderungen in den Seen. Untersuchungen im Rahmen eines Vorgängerprojektes (Bouffard et al., 2019) zeigten aber, dass eine monatliche oder noch geringere zeitliche Auflösung der Messungen kaum genügend ist, um die Trends der Temperaturen und insbesondere auch der saisonalen Schichtung in den Seen mit genügender

Genauigkeit bestimmen zu können. Da eine höhere zeitliche Auflösung bei konventionellen Messungen mit grossem Zeitaufwand verbunden ist, wurden Messungen mit fest installierten Messstationen empfohlen.

Im Sinne einer vorsorglichen Umweltbeobachtung hatte das BAFU im Jahr 2018 den Grundsatzentscheid gefällt, das Temperaturmonitoring des Bundes auf die Seen auszuweiten. Die Eawag wurde dabei beauftragt, an verschiedenen Standorten Pilotmessungen mit unterschiedlichen Methoden durchzuführen und basierend auf den Ergebnissen der Pilotmessungen ein Konzept für ein Messnetz zu erstellen.

Die Ziele des geplanten Messnetzes wurden im Pflichtenheft für das Pilotprojekt wie folgt definiert:

Das Monitoring-Messnetz sollte möglichst repräsentativ sein, das heisst

- mit einer beschränkten Auswahl von Seen sollte das Verhalten möglichst vieler See(typen) abgebildet werden können;
- die im Monitoring eingeschlossenen Seen sollten geeignet sein, um die Fragen, die sich bezüglich Wassertemperaturen unter anderem hinsichtlich des Klimawandels stellen oder stellen werden, bearbeiten zu können.

Das Messnetz sollte gut vernetzt sein mit

- den Nutzungen des Wassers, insbesondere für die Wasserversorgung, aber auch mit anderen sozioökonomischen Nutzungsaspekten;
- den Messungen der Kantone;
- anderen relevanten Messdaten, welche bereits bestehen oder in Zukunft bestehen werden (z.B. Meteorologie, Fliessgewässertemperaturen, NAWA, etc.).

Zudem soll das künftige Monitoring erlauben:

- die bestehenden, bisherigen Messreihen der Kantone mit den künftigen Temperaturmessungen des Bundes zu korrelieren (Verbindung Geschichte – Gegenwart – Zukunft);
- die bestehenden Messstationen (niederfrequente Messintervalle) der Kantone, dort wo möglich, zu ergänzen, nicht aber zu ersetzen;
- die Niederfrequenz (monatliche Messungen) mit der Hochfrequenz (quasi-kontinuierliche Messungen) mittels «intelligenter Interpolation» in Verbindung zu setzen;
- die Zusammenhänge zwischen den Temperaturen und anderen physikalischen, chemischen und biologischen Beobachtungen, dort wo möglich, aufzuzeigen und zu dokumentieren,
- die Dynamik von anderen physikalischen, chemischen und biologischen Parametern zwischen den chemischen Messungen, dort wo möglich, zu rekonstruieren;
- Vorhersagen der Wassertemperatur auf die nächsten 7 Tage zu ermöglichen, unter besonderer Berücksichtigung der Temperatur der Seeabflüsse;
- die Grundlagen für Langzeit-Modellierungen, für Entwicklungsszenarien und Projektionen zu liefern.

Im Jahr 2024 hat das BAFU entschieden, auf den Aufbau eines eigenen Temperatur-Messnetzes zu verzichten und stattdessen das kontinuierliche Monitoring der Seetemperaturen gemeinsam mit kantonalen Fachstellen und der Eawag weiterzuführen. Die bestehenden Pilot-Stationen sollen dabei an die Kantone übergeben werden.

2. Übersicht, Typisierung und Auswahl Schweizer Seen

2.1 Einführung

Laut der Schweizer Landeskarte «Swiss Map Vector25» gibt es in der Schweiz 11'133 Stillgewässer mit einer Fläche grösser als 30 m² (Herold, 2019). Darin sind künstlich angelegte, aber naturnahe Kleingewässer inbegriffen, nicht aber Schwimmbäder oder Brunnen. Wenn Grossseen wie beispielsweise der Vierwaldstättersee, der Bodensee und der Zürichsee in einzelne Becken aufgeteilt werden, sind es gar 11'142. Im Folgenden bezeichnen wir Stillgewässer mit einer Fläche grösser als 10 Hektaren als Seen und diejenige mit einer Fläche kleiner als 10 Hektaren als Kleinseen. Auf eine weitere Aufteilung der Kleinseen in Weiher und Teiche wird verzichtet. In der Literatur gibt es Diskussionen bezüglich der weiteren Einteilung basierend auf Ursprung (natürlich oder künstlich) oder der Lichtverhältnisse (Licht erreicht den Seegrund oder nicht) aber kein einheitlich akzeptiertes Vorgehen. Weiter kann es Sinn ergeben, eine Mindestgrösse für Kleinseen festzusetzen. Diese Mindestgrösse ist vor allem praktischer Natur, da es in der Realität schwierig ist, ein klassisches Monitoring für sehr kleine Seen umzusetzen. Sehr kleine Seen sind oft überwachsen und/oder trocknen im Sommer ganz oder teilweise aus. Eine solche Mindestgrösse könnte zum Beispiel bei 1000 m² angesetzt werden. Dies entspräche einem Gewässer von etwa 30 – 40 m Seitenlänge und würde die Anzahl Seen von etwa 11'000 auf etwa 4'600 reduzieren (Tabelle 1).

Tabelle 1: Anzahl Schweizer Seen in verschiedenen Grösseklassen (die Gesamtanzahl der Seen > 30 m² beträgt 11'142 inkl. Aufteilung der Grossseen in Seebecken, basierend auf Daten von Swisstopo)

	>1 km ²	>10 ha	> 1 ha	> 1000 m ²
Anzahl Seen	63 (0.6%)	183 (1.6 %)	964 (8.7 %)	4'637 (41.6 %)
Gesamtfläche	2010 km ² (96.5%)	2048 km ² (98.3%)	2069 km ² (99.3%)	2080 km ² (99.9%)

Die Schweizer Stillgewässer verteilen sich zwischen einer Meereshöhe von 193 und 3473 m und weisen eine Fläche von bis zu 580 km² (Genfersee) auf. Abbildung 2 zeigt basierend auf der Schweizer Landeskarte die Verteilung der Schweizer Stillgewässer in Bezug auf die Fläche und die Höhe über Meer. Man erkennt rechts unten die grossen Flachlandseen und rechts oben zumeist grössere Stauseen. Obwohl 98.4 % aller Schweizer Stillgewässer kleiner als 10 Hektaren sind, tragen diese Kleinseen weniger als 1 % zur Gesamtfläche der Stillgewässer bei. Während die Temperatur der meisten grossen Flachlandseen teilweise seit Jahrzehnten von den kantonalen Behörden überwacht wird, weiss man über die Temperaturdynamik in Kleinseen wenig.

Die Tiefe ist die wohl wichtigste morphologische Eigenschaft von Stillgewässern. Während die grösseren (und tieferen) Seen in der Schweiz im Sommer üblicherweise durch die Erwärmung der Wasseroberfläche stabil geschichtet sind, werden seichte und klare Gewässer oft auch im Sommer bis an den Grund durchgemischt (Kirillin & Shatwell, 2016). Dieses unterschiedliche Verhalten hat grossen Einfluss auf den Sauerstoff- und Nährstoffgehalt in den verschiedenen Wassertiefen und bestimmt daher die biologischen Aktivitäten mit. Jedoch ist für viele kleinere Stillgewässer weder die durchschnittliche noch die Maximaltiefe bekannt.

Weitere wichtige lokale Faktoren sind Zuflüsse, Grundwassereintrag, Trophiegrad (Lichtverteilung, Biofouling an Geräten), Windexposition und bei kleinen Gewässern Beschattung.

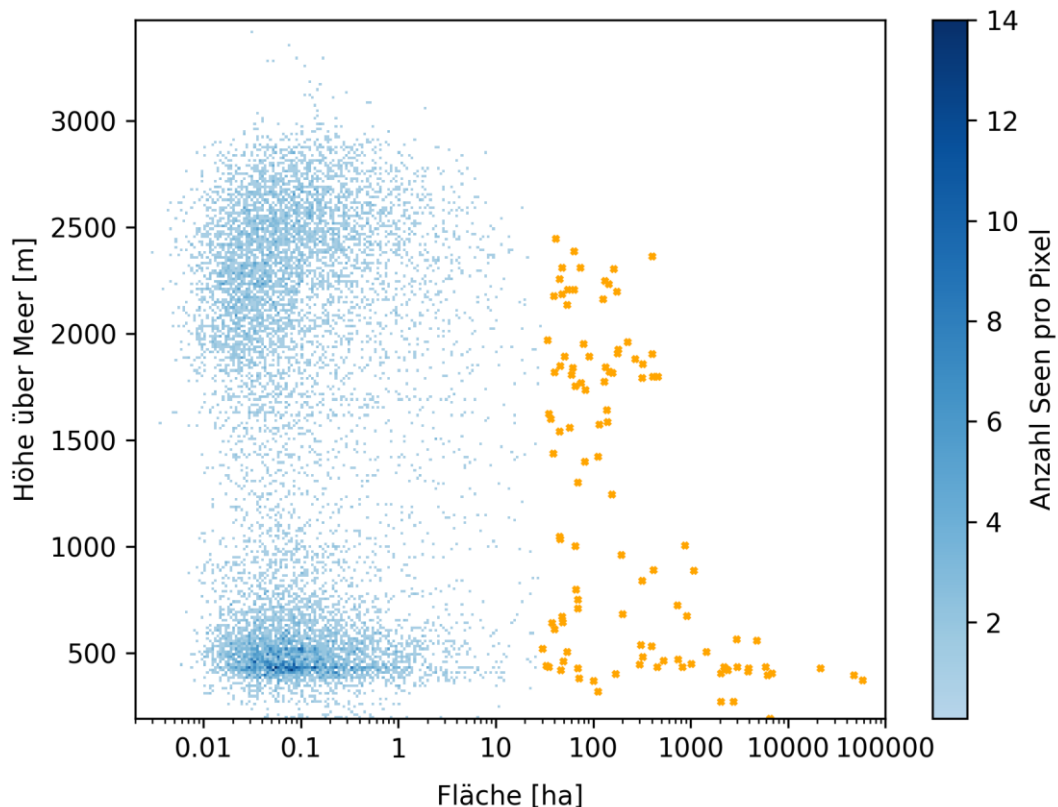


Abbildung 2: Verteilung der Schweizer Stillgewässer bezüglich Fläche und Höhe über Meer (basierend auf Daten von Swisstopo). Seen mit einer Fläche grösser als 0.3 km² wurden mit grösseren orangen Punkten dargestellt, um ihre Sichtbarkeit in der Grafik zu verbessern.

2.2 Versuch der (physikalischen) Typisierung der Schweizer Seen

Für die Planung eines repräsentativen Netzwerkes stellt sich die Frage, welche und wie viele Seen gemessen werden sollten, um einen möglichst repräsentativen Überblick über die Temperaturentwicklung der Schweizer Seen zu erhalten. Lassen sich die Schweizer Seen anhand einiger Eigenschaften, welche für die Temperaturstruktur wichtig sind, in sogenannte Cluster oder Gruppen einteilen? Seen innerhalb desselben Clusters hätten idealerweise ähnliche Eigenschaften und als Folge davon eine ähnliche Temperaturstruktur. Eine solch klare Typisierung könnte es erlauben, anhand von Messungen einer bestimmten Anzahl von Seen innerhalb eines Clusters Rückschlüsse auf die Temperaturentwicklung der anderen Seen des Clusters zu ziehen. Idealerweise könnten so Ressourcen gespart werden bei ähnlicher Aussagekraft für die Entwicklung der Temperaturstruktur der Schweizer Seen.

Wir haben für die Schweizer Seen eine Cluster-Analyse mit der Technik k-Means durchgeführt. Diese weit verbreitete Technik besteht darin, dass Datenpunkte (also Seen) in einem n-dimensionalen Raum so in «k» Gruppen aufgeteilt werden, dass die Punkte innerhalb eines Clusters möglichst nahe beieinander und gleichzeitig die verschiedenen Gruppen möglichst weit auseinanderliegen. Der n-dimensionale Raum wird von Eigenschaften der Seen aufgespannt, welche die thermische Struktur der

Seen wesentlich bestimmen. Idealerweise sind diese Eigenschaften einfach zu messen oder gar aus einer Karte auslesbar (wie z.B. Fläche und Höhe über Meer).

Folgende Eigenschaften wurden ausgewählt, um die Seen in Gruppen einzuteilen:

- **Fläche in km²:** Die Fläche bestimmt, wie stark ein See mit der Atmosphäre interagiert. Eine grosse Seefläche erlaubt insbesondere eine grössere Angriffsfläche des Windes.
- **Tiefe in m:** Die Tiefe bestimmt u.a., wie einfach ein See gemischt werden kann. Flache Seen können mehrmals jährlich vollständig gemischt werden. Sehr tiefe Seen werden hingegen oft nicht jedes Jahr bis an den Seegrund durchmischt.
- **Höhe über Meer in m:** Haupteffekt der Höhe über Meer ist die niedrigere Lufttemperatur an höheren Lagen. Aber auch Wind und Niederschlag nehmen mit zunehmender Höhe tendenziell zu.
- **Mittlere Sichttiefe in m:** Die Sichttiefe bestimmt wesentlich die vertikale Verteilung der Sonnenergie. Bei sehr trüben Seen erhitzt sich v.a. die unmittelbare Oberfläche, während die Sonnenstrahlung in klaren Seen auch einige Meter in den See hineindringt.
- **Verhältnis Seefläche zu Einzugsgebietsfläche (optional):** Dies ist ein Proxy für die Wasseraufenthaltszeit in einem See. Ein See mit grossem Einzugsgebiet hat eine kürzere Wasseraufenthaltszeit als ein See mit kleinem Einzugsgebiet (bei ähnlicher Niederschlagsmenge).
- **Klimaregion (optional):** Wir haben die Schweiz in folgende 3 regionale Klimazonen eingeteilt (basierend auf einer Analyse von MeteoSchweiz, siehe Abbildung 3): Alpennordseite, Tessin (warm und nass) und Wallis/Graubünden (warm und trocken)

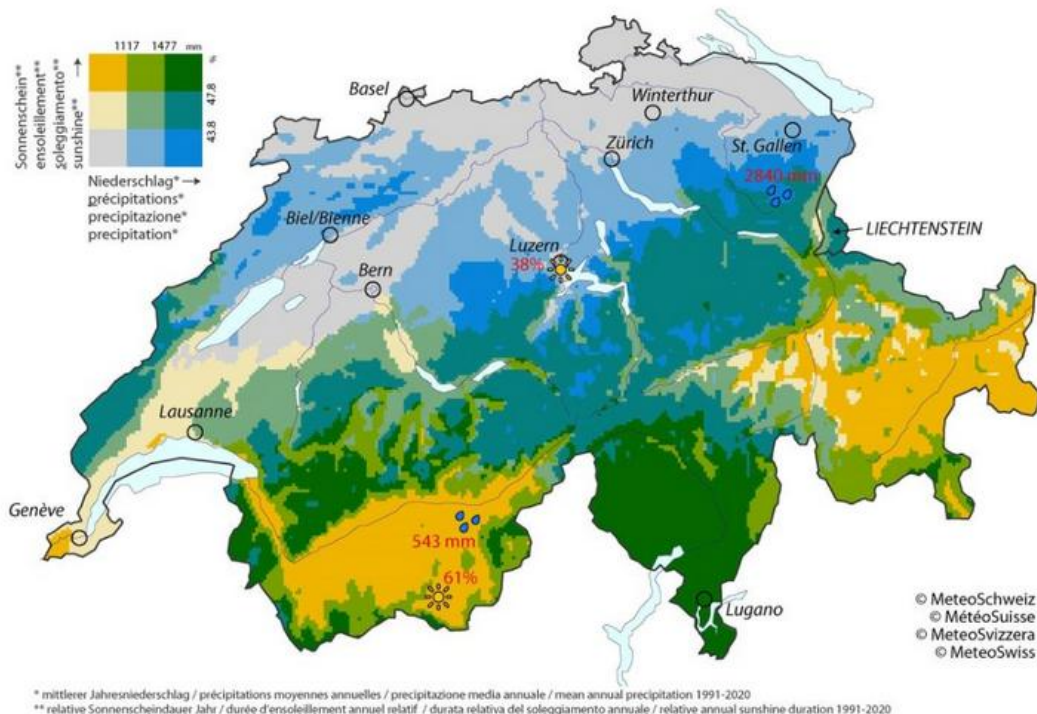


Abbildung 3: Klimaregionen der Schweiz und Liechtenstein basierend auf Sonneneinstrahlung und Niederschlag. Quelle: MeteoSchweiz (2023).

Während Fläche, Höhe über Meer, die Klimaregion und mit Abstrichen das Verhältnis Seefläche zu Einzugsgebiet für alle Schweizer Seen vorhanden sind (die Fläche des Einzugsgebiets ist für Kleinseen allerdings oft schwierig zu bestimmen), sind Tiefe und Sichttiefe nur vor Ort messbar. Dank kantonalen Monitoring-Programmen und Messungen, welche während dieses Pilotprojekts vorgenommen wurden,

haben wir 71 Seen zur Verfügung, für welche alle 6 Eigenschaften bekannt sind (siehe Abbildung 4 für deren Verteilung bezüglich Fläche und Höhe über Meer). Im Vergleich zu den schweizweit etwa 11'000 Seen sind 71 Seen sehr wenig. Die Datenbasis für die Cluster-Analyse könnte mit einer zeitlich begrenzten Messkampagne (Messung von Tiefe und Trübung in Kleinseen) aber beträchtlich erweitert werden.

Vor dem Verwenden des Algorithmus müssen die Eigenschaften skaliert werden. Dies betrifft vor allem Eigenschaften, welche über mehrere Grössenordnungen variieren wie die Fläche und die Tiefe:

- Flächen werden per Ziehung der Quadratwurzel in Längenmasse umgewandelt
- Stark variierende Grössen werden zusätzlich logarithmiert (Tiefe, Fläche)
- Alle Eigenschaften werden zwischen 0 und 1 normalisiert

Die Entscheidungsfindung beim k-Means Clustering läuft so ab, dass man die Cluster-Analyse für verschiedene Anzahl Cluster «k» durchführt und dann einerseits beurteilt, wie nahe sich Datenpunkte (Seen) innerhalb eines Clusters sind (SSE-Koeffizient) und andererseits, wie stark sich die Cluster unterscheiden (Silhouette-Koeffizient). Der SSE-Koeffizient sollte möglichst tief und der Silhouette-Koeffizient möglichst hoch sein. Wir haben die Seen automatisiert in 2 bis 10 Cluster eingeteilt und diese beiden Kriterien berechnet. Abbildung 5 zeigt die beiden Kriterien als Funktion der Anzahl Cluster für ein Beispiel, wo vier See-Eigenschaften als Basis für das Clustering benutzt wurden. Der Silhouette-Koeffizient legt nahe, dass die Seen in drei Cluster eingeteilt werden sollten. Der Wert SSE zeigt aber, dass die Seen innerhalb eines Clusters dann immer noch relativ divers sind.

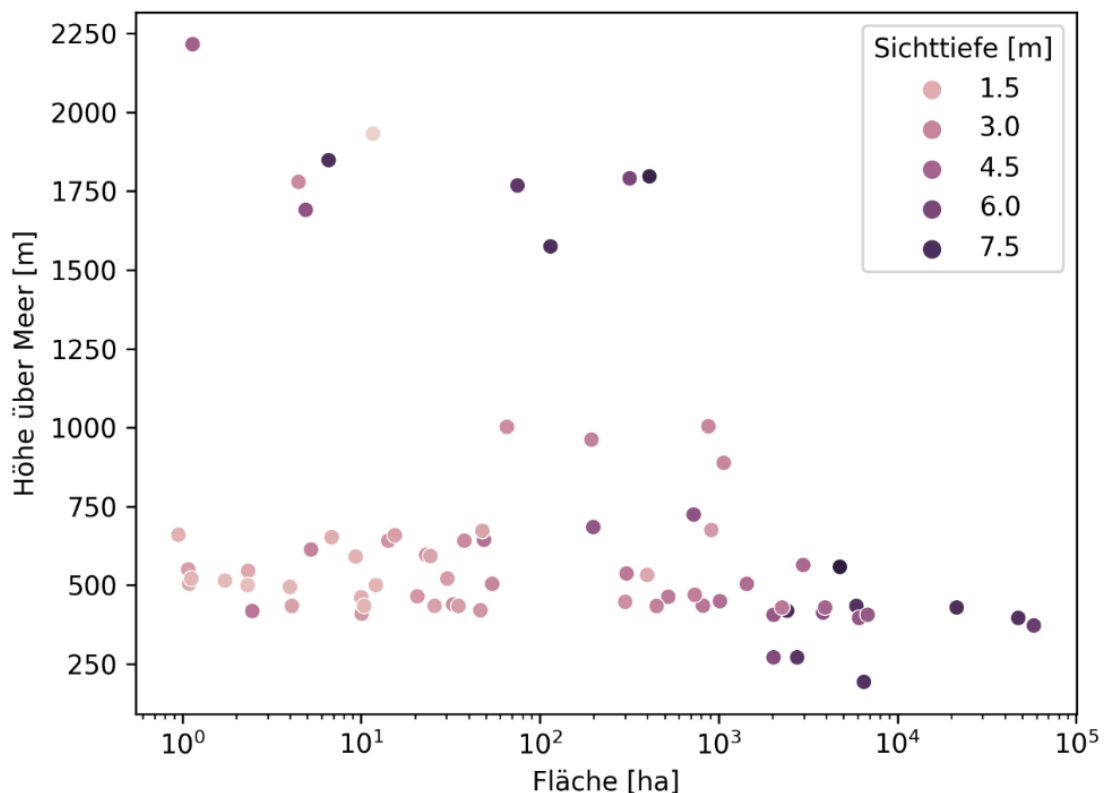


Abbildung 4: Alle 71 für die Clustering-Analyse verwendeten Seen als Funktion von Fläche, Höhe über Meer und mittlere Sichttiefe

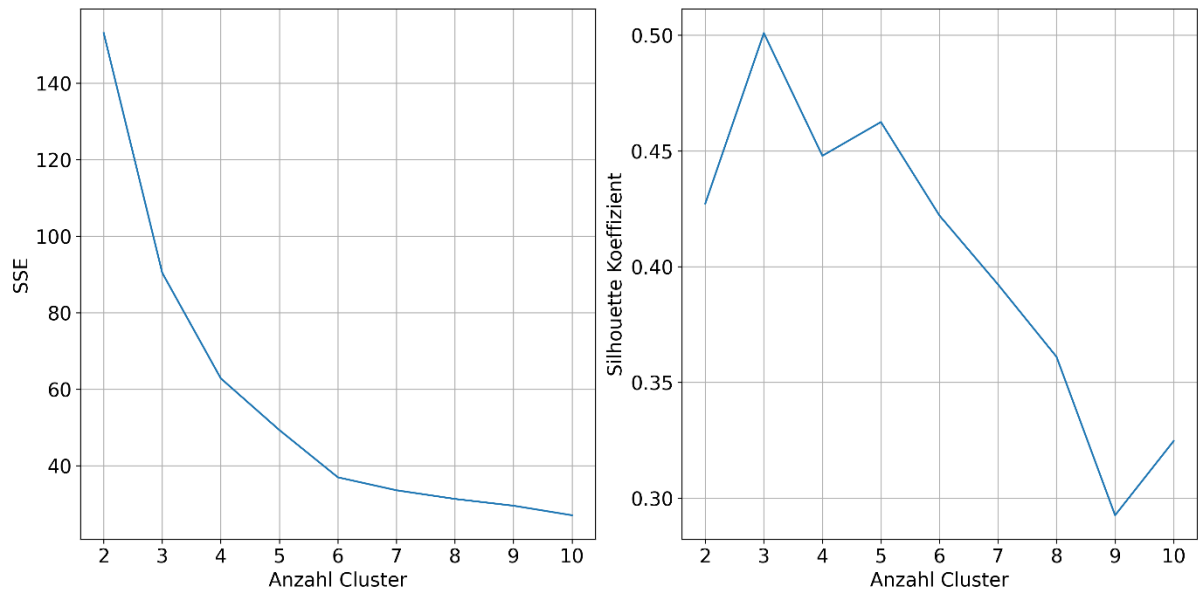


Abbildung 5: Kriterien des K-Means-Algorithmus: Der SSE (Summe der quadratischen Fehler) sollte möglichst tief und der Silhouette-Koeffizient möglichst hoch sein. Hier das Beispiel für 4 See-Eigenschaften. Die beiden Kriterien legen nahe, dass entweder 3 oder 5 Cluster gewählt werden sollten.

Manuelles Clustering mit Fläche und Höhe über Meer

Abbildung 2 zeigt die Schweizer Seen als Funktion der Fläche und der Höhe über Meer. Offensichtlich dominieren anzahlmässig die Kleinseen mit einer Fläche zwischen etwa 0.01 und 10 ha. Diese Kleinseen können wiederum in zwei Cluster aufgeteilt werden: Mittelland (400 – 700 m.ü.M.) und alpin (etwa 1800 – 2800 m.ü.M.). Es gibt relativ wenige Seen in Höhenlagen zwischen etwa 700 und 1800 m.ü.M. Das dritte Cluster wird von Grossseen > 10 ha, zumeist im Flachland, gebildet. Letztere bilden zahlenmässig die mit Abstand kleinste Gruppe. Das Clustering mit nur zwei Eigenschaften (Fläche und Höhe) hat den Vorteil, dass sie für alle Seen bekannt sind, jedoch den Nachteil, dass wichtige Einflussgrössen wie z.B. Trübung und Tiefe nicht berücksichtigt werden.

K-Means clustering mit 4 Eigenschaften (ohne Wasseraufenthaltszeit und Klimaregion)

Der SSE-Wert und der Silhouette-Koeffizient legen nahe, dass die Seen am besten in 3 Cluster aufgeteilt werden. Abbildung 6 zeigt Querschnitte durch den 4-dimensionalen Raum, welche durch die vier Eigenschaften Fläche, Tiefe, Sichttiefe und Höhe über Meer aufgespannt wird. Die drei Cluster können ungefähr so charakterisiert werden:

- Gelb: grosse, tiefe Seen mit grosser Sichttiefe in tiefer Lage
- Türkis: kleine, seichtere Seen mit geringerer Sichttiefe in tiefer Lage
- Violett: alpine Seen mit variabler Tiefe und grösstenteils grosser Sichttiefe (Ausnahme: Gletscherseen)

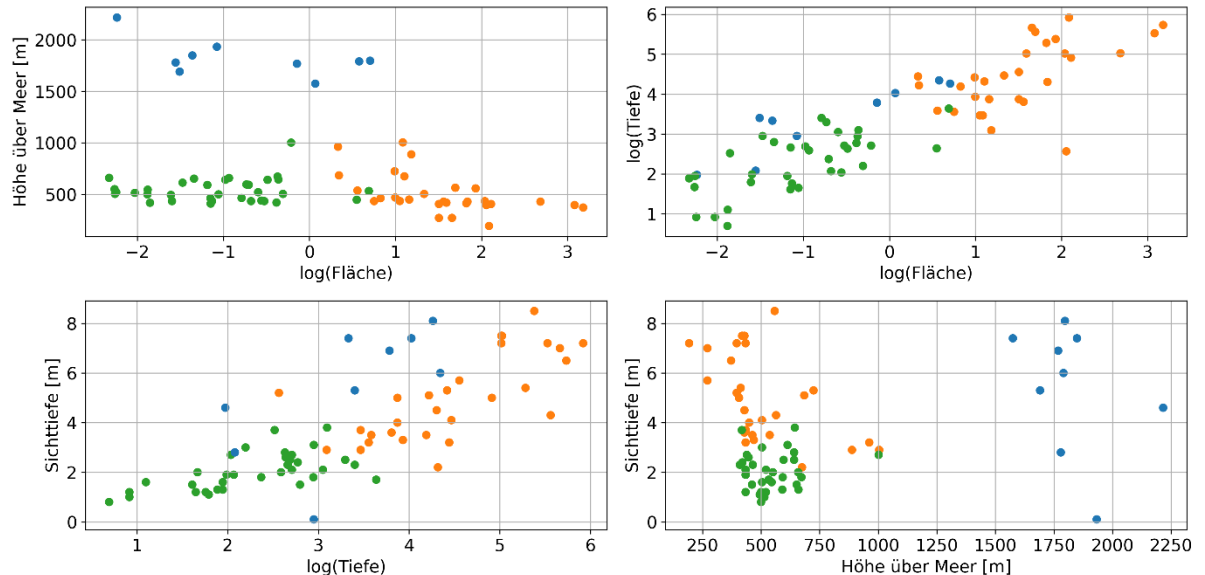


Abbildung 6: Aufteilung der 71 Seen in 3 Cluster (basierend auf den Eigenschaften Fläche, Tiefe, Sichttiefe und Höhe über Meer. Die Fläche und die Tiefe wurden log-transformiert, wobei die Fläche vorher per Ziehung der Quadratwurzel in eine Längenskala umgewandelt wurde.

Die drei Cluster ähneln sehr stark denjenigen, welche durch manuelles Clustering erreicht wurden. Der Grund dafür ist, dass die Trübung der untersuchten alpinen Seen zumeist gering war.

K-Means clustering mit 5 Eigenschaften (ohne Klimaregion)

Wieder legt der Silhouette-Koeffizient nahe, dass die Seen am besten in dieselben drei Cluster aufgeteilt werden sollten, wie in Abschnitt 2 gezeigt (Grossseen, Kleinseen und alpine Seen). Interessanterweise schlägt die «zweitbeste» Aufteilung 7 Cluster vor und Abbildung 7 zeigt Querschnitte durch den 5-dimensionalen Raum, welche durch die fünf Eigenschaften Fläche, Tiefe, Sichttiefe, Höhe über Meer und Wasseraufenthaltszeit (Seefläche geteilt durch Fläche Einzugsgebiet) aufgespannt wird.

Es werden 5 Cluster von Seen im Flachland vorgeschlagen entlang eines Gradienten der Fläche (gross bis klein), Tiefe (tief bis seicht) und Sichttiefe (klar bis trüb). Dazu gibt es ein separates Cluster von grösseren Seen mit langer Wasseraufenthaltszeit (Zugersee, Ägerisee, Sempachersee, Lac de Bret). Die alpinen Seen werden zwei Clustern zugeordnet: klaren und eher trüben Seen mit Extrembeispiel Steinsee (Gletschersee).

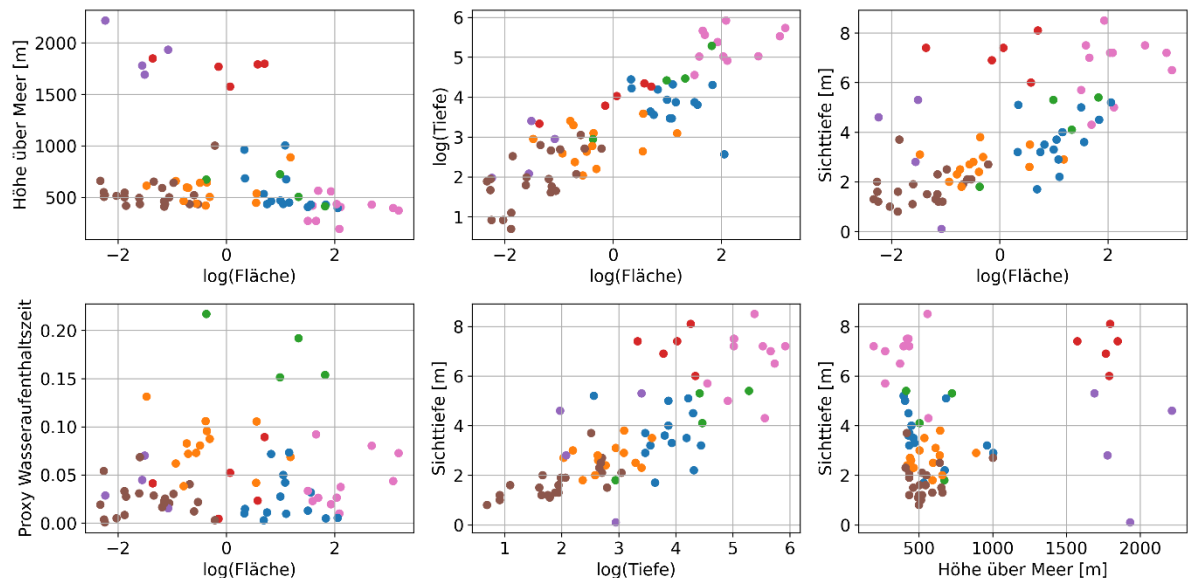


Abbildung 7: Aufteilung der Seen in 7 Cluster basierend auf den Eigenschaften Fläche, Tiefe, Sichttiefe, Höhe über Meer und einem Proxy für die Wasseraufenthaltszeit.

K-Means clustering mit 6 Eigenschaften

Das Klima (Lufttemperatur, Niederschlag, Wind) wird in der Schweiz grösstenteils durch die Höhenlage bestimmt, welche bereits als Eigenschaft ins Clustering einfließt. Daneben gibt es aber auch signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Landesteilen. Um diese Unterschiede zu berücksichtigen, wurden vereinfachte Klimaregionen definiert und so die Tessiner und Walliser/Bündner Seen separiert. Diese Unterscheidung numerisch zu machen (also jedem Landesteil eine Zahl zuzuordnen) ist nicht einfach. Besser wäre wohl, man würde einen quantitativen Index bestehend aus Anzahl Sonnenstunden und Niederschlagsmenge kreieren. Hier haben wir den Seen im Norden der Alpen die Zahl 0 zugeordnet, den Bündner/Walliser Seen die Zahl 0.5 und den Tessiner Seen die Zahl 1.

Die beste Anzahl Cluster ist laut dem Silhouette-Koeffizienten 4 und die zweitbeste Anzahl 7. Die Aufteilung in 4 Cluster ist analog der Aufteilung aus Abschnitt 2 plus ein Cluster für die Tessiner/Bündner/Walliser Seen (egal welche Höhenlage) und ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Aufteilung in 7 Cluster beinhaltet ein separates Cluster für die Tessiner auf der einen Seite und die Bündner/Walliser Seen auf der anderen. Dazu werden die Flachlandseen entlang des Flächen-/Tiefengradienten in 4 Cluster aufgeteilt.

Die klare Abspaltung der Tessiner/Bündner/Walliser Seen ist insofern etwas problematisch, als die Höhenlage wesentlich wichtiger ist für die thermische Struktur als die geographische Lage. Problematisch ist auch, dass die Zuordnung der Zahlenwerte für die Klimaregionen willkürlich ist. Eine andere Möglichkeit wäre es, einen Proxy aus der mittleren Lufttemperatur und der jährlichen Niederschlagsmenge zu berechnen.

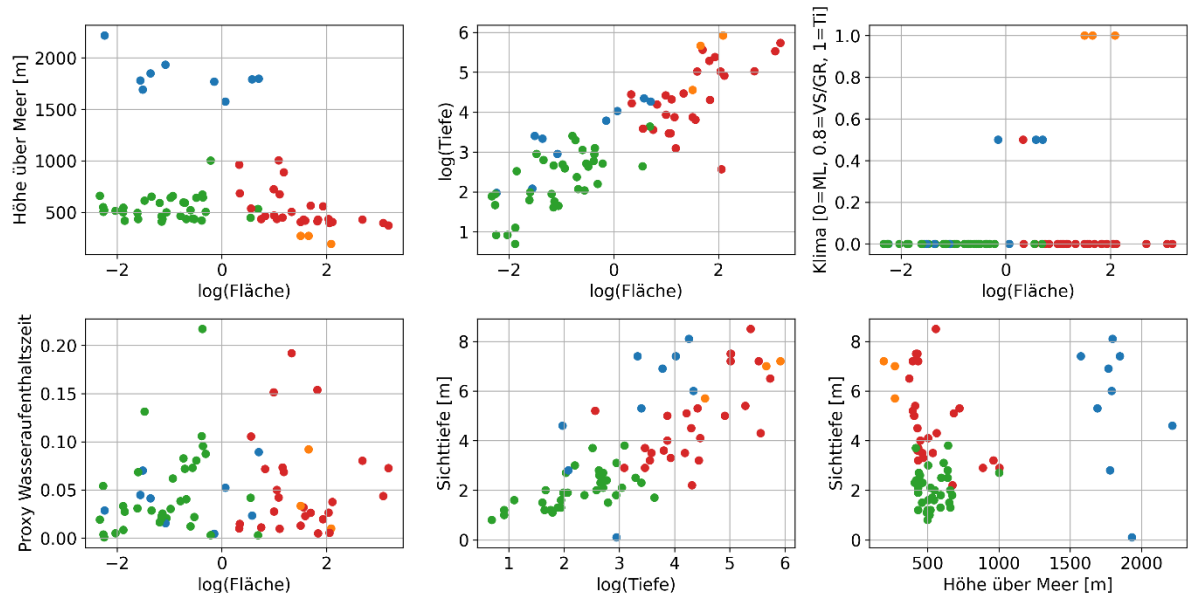


Abbildung 8: Aufteilung der Seen in 4 Cluster basierend auf den Eigenschaften Fläche, Tiefe, Sichttiefe, Höhe über Meer, einem Proxy für die Wasseraufenthaltszeit und Klimaregion (ML bedeutet «Mittelland», VS/GR bedeutet Wallis/Graubünden und Ti bedeutet «Tessin»).

Diskussion und Schlussfolgerungen

- Diejenigen Eigenschaften von Seen, welche die thermische Struktur am stärksten beeinflussen, sind Fläche, Tiefe, Höhenlage und Sichttiefe. Weitere bedeutende Eigenschaften sind die Wasseraufenthaltszeit und das lokale Klima. Tiefe und Sichttiefe können nur mittels Feldarbeit bestimmt werden, während die anderen vier Eigenschaften aus Karten ausgelesen werden können.
- Diese sechs Eigenschaften sind für 71 Schweizer Seen bekannt. Bei diesen Seen handelt es sich zumeist um grosse Seen und Kleinseen im Flachland. Vor allem die Sichttiefe ist bei vielen alpinen Seen unbekannt (evtl. könnten in Zukunft Satellitenbeobachtungen Abhilfe schaffen, zumindest zur Unterscheidung von sehr trüben und sehr klaren Seen).
- Eine Messkampagne von Kleinseen (maximale Tiefe + Sichttiefe) könnte eine breitere Datenbasis (100 zusätzliche Seen) für zukünftige Versuche der Typologie schaffen. Eine solche könnte über eine definierte Zeit (z.B. 3 Monate im Sommer) von zwei Personen mit wenig Aufwand durchgeführt werden.
- Unsere Untersuchung deutet darauf hin, dass eine Aufteilung der Seen in klar definierte Cluster nicht einfach ist. Am besten funktioniert die Aufteilung in 3 Cluster (Abbildung 6):
 - o Grosse, tiefe und klare Seen im Flachland mischen höchstens einmal pro Jahr und haben deswegen eine klare Trennung zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser.
 - o Kleine, meist seichte und eher trübe Seen im Flachland können (müssen aber nicht) mehrmals pro Jahr mischen und entwickeln im Winter oft eine Eisschicht.
 - o Alpine (meist oberhalb von etwa 1800 m. ü. M.), meist kleine Seen mit variabler Tiefe. Diese Seen werden dominiert durch eine Eisbedeckung, welche oft über 6 – 9 Monate andauert. Viele dieser Seen weisen eine hohe Sichttiefe auf. Die Ausnahme davon sind Seen, welche von Gletscherwasser gespeist werden. Letztere sind oft sehr trüb (in unserem Datensatz betrifft dies nur den Steinsee) und würden wohl ein eigenes Cluster bilden, falls genügend Exemplare im Datensatz wären.

- Diese drei (oder mit Gletscherseen vier) vorgeschlagenen Cluster haben aber einen relativ hohen SSE, was heisst, dass sich die Eigenschaften von Seen innerhalb eines Clusters relativ stark unterscheiden. Dies bedeutet, dass pro Cluster viele Seen gemessen werden müssen, um einen guten Überblick über die Entwicklung der thermischen Struktur von Seen zu erhalten.
- Möglicherweise macht es mehr Sinn, die Eigenschaften als Gradienten zu sehen, entlang derer sich die Seen aufteilen. In diesem Fall würde es Sinn machen, sich auf die vier wesentlichen Eigenschaften Fläche, Tiefe, Sichttiefe und Höhe über Meer zu beschränken (geographische Verteilung ist weniger bedeutend und die Wasseraufenthaltszeit ist in Kleinseen schwierig zu bestimmen). Die zu untersuchenden Seen könnten zum Beispiel möglichst gut in diesem vierdimensionalen Raum verteilt werden, so dass ein möglichst vollständiges Bild der thermischen Struktur der Schweizer Seen entsteht, ohne dass die Seen in Cluster eingeteilt werden.
- In jedem Fall werden auch bei nur vier bestimmenden Eigenschaften sehr viele Seen benötigt, um einen guten Überblick über die thermische Struktur zu erhalten. Besonders bei den bis jetzt schlecht untersuchten Kleinseen müssten sicherlich weit mehr als 20 Seen kontinuierlich gemessen werden. Eine Beschränkung des Messprogramms auf weniger Seen würde zwar Rückschlüsse auf die Entwicklung von einzelnen Seen erlauben, aber nur sehr beschränkt die Extrapolation auf andere Seen.
- Numerische Simulationen könnten Messungen ergänzen, da mit wenig Aufwand die thermische Struktur von vielen Seen simuliert werden kann. Die Simulation von Kleinseen bedarf aber noch Entwicklungsaufwand, da einige der Einflüsse wie Grundwassereintritt, Schneeschmelze, Beschattung oder Wärmeaustausch mit dem Seegrund nicht in den Simulationen enthalten sind.

2.3 Auswahl Seen für das Pilotprojekt

Vorgehen

Bezüglich der Auswahl, der im Pilotprojekt zu überwachenden Seen bestehen zwei Hauptanforderungen: Erstens soll es die Auswahl erlauben, verschiedene Messsysteme unter verschiedenen Bedingungen zu testen. Zweitens soll schon jetzt der Grundstein gelegt werden, um mit den gemessenen Daten später repräsentative Aussagen für die Temperaturentwicklung in der ganzen Schweiz machen zu können.

Neben den bereits existierenden kontinuierlichen Messstationen im Genfersee und im Lac de Joux wurden zunächst zwei zwar typische, aber doch unterschiedliche Flachlandseen für die Pilot-Messstationen ausgewählt: Der Murtensee ist ein mittelgrosser (23 km²), mitteltiefer (46 m), nährstoffreicher See im Mittelland (429 m. ü. M.), während der Ägerisee kleiner (7.3 km²), tiefer (83 m), nährstoffarm und höher gelegen (724 m. ü. M.) ist. Ausserdem wurde der Hallwilersee (10.3 km², 47 m, nährstoffreich, 449 m. ü. M.) mit einem günstigen Messsystem ausgestattet, welches von einer noch jungen Firma aus den USA stammt.

Die unterschiedlichen Charakteristiken der gewählten Seen erlaubten es, die Messsysteme in unterschiedlichen Bedingungen zu testen. Relevante Einflussfaktoren waren dabei vor allem sogenanntes Biofouling in nährstoffreichen Seen (Murtensee und Hallwilersee), starke Winde durch Föhn (Ägerisee), mögliche Eisbildung im Winter (Ägerisee) und die Maximaltiefe (Ägerisee; v.a. als Herausforderung bei der Installation). Zusätzlich weisen alle drei gewählten Seen ökologisch relevante Probleme auf: Der Murtensee hat seit der Eutrophierung in den 60ern und 70ern Jahren ein Sauerstoffproblem mit Tiefenwasser-Konzentrationen im Herbst deutlich unterhalb der gesetzlichen Grenze von 4 mg/L (Müller & Schmid, 2009). Auch der Ägerisee weist, obwohl oligotroph, in den

grössten Tiefen oft im Herbst Sauerstoffkonzentrationen unter 4 mg/L auf. Dies ist wohl auf eine natürliche Anreicherung des Seegrunds mit organischem Material zurückzuführen (Amt für Umwelt Kanton Zug, 2024). Zudem befindet sich der Ägerisee in einer Phase des Übergangs von einem dimiktischen zu einem monomiktischen Mischungsregime. Der Hallwilersee wiederum wird seit 1986 künstlich belüftet, um der starken Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser entgegenzuwirken (Departement Bau, Verkehr und Umwelt Kanton Aargau, Abteilung Umwelt, 2024). Durch die Erwärmung v.a. der oberen Wasserschichten durch den Klimawandel könnte sich das Sauerstoffproblem in allen drei Beispielen verstärken. Dies weil die Erwärmung dazu führt, dass sich die Wasseroberfläche in einzelnen Jahren nicht mehr genügend abkühlt, um im Herbst ein Durchmischen auch der tiefsten Schichten zu erreichen, wodurch das Sauerstoffreservoir seltener aufgefüllt wird, und weil die Sommerschichtung länger andauert und deshalb mehr Zeit für den Sauerstoffabbau zur Verfügung steht (Jane et al., 2021).

Kantonale Temperatur-Messreihen existieren in Grossseen schon lange, in Kleinseen (< 10 ha) wurden sie bisher in der Schweiz aber nur in wenigen Fällen kontinuierlich erhoben. Und trotz ihres geringen Anteils an der Gesamtoberfläche der Schweizer Stillgewässer sind Kleinseen, Weiher und Teiche lokal sehr bedeutend für Ökologie, Wirtschaft und Freizeit. Zudem unterscheidet sich das Mischverhalten von seichten Gewässern stark von demjenigen von tieferen Seen: erstere können im Sommer oft (bis zu täglich) bis an den Grund mischen, während letztere üblicherweise den ganzen Sommer eine stabile Dichteschichtung aufweisen. Das heisst auch, dass Erkenntnisse zu Temperaturdynamik und Schichtung nicht direkt auf Kleinseen übertragen werden können.

Als ersten Schritt zur Schliessung dieser Datenlücke wurden entlang eines Höhengradienten zwischen ungefähr 600 und 2200 m fünf Kleinseen ausgewählt, die mit Messsystemen ausgestattet wurden (Tabelle 2 und Abbildung 9). Um den administrativen Aufwand (Bewilligung durch Fischereiaufsicht/Kontakt zu Umweltamt) klein zu halten, wurde die Auswahl auf den Kanton Bern beschränkt.

Tabelle 2: Morphologische und physikalische Eigenschaften der im Rahmen dieses Pilotprojekts mit Temperaturloggern ausgerüsteten Kleinseen

	Fläche [ha]	Tiefe [m]	Höhe über Meer [m]	Trübung	Wasser- spiegel
Inkwilersee	10	5	461	trüb	stabil
Weiherhus	0.18	2	475	trüb	stabil
Waldweiher	0.23	1	553	trüb	stabil
Geistsee	0.95	6.6	660	trüb	stabil
Lenkerseeli	2.0	2.2	1065	klar	stabil
Stockseewli	0.28	2	1620	klar	stabil
Meiefallseeli	1.52	3.5 - 8	1899	wechselnd	schwankend
Oberes Bänzlauseeli	1.16	7.2	2216	wechselnd	stabil

Zusätzlich wurden auch der Inkwilersee als etwas grösserer Kleinsee (und zusätzlich mit Sauerstoffproblem) und zwei Weiher/Teiche in der Nähe von Luzern ins Pilot-Messprogramm aufgenommen: Der Gütschweiher liegt etwas erhöht neben der Stadt Luzern und wurde vor einigen Jahrzehnten künstlich aufgestaut, wird durch Grund- und Regenwasser gespeist und liegt vollumfänglich im Wald. Wahrscheinlich existierte früher an gleicher Stelle ein natürlicher Weiher, der aber entwässert wurde. Das zweite Kleingewässer liegt auf dem Areal der Firma «Weierhus Kompost»

in Malters. 2008 wurde dort ein Naturpark mit drei naturnahen, von Grundwasser gespeisten Teichen angelegt. Der von uns ausgewählte Teich ist knapp 2 m tief und teilweise beschattet.

Mit dieser Auswahl von drei Gross- und acht Kleinseen sind die Schweizer Stillgewässer grösser als ca. 0.1 Hektaren gut abgedeckt und es konnten erste Erfahrungen mit Installation und Betrieb von Messstationen, sowie mit Temperaturdaten gesammelt werden. Noch kleinere Gewässer wurden aus zwei Gründen nicht berücksichtigt: Einerseits sind sehr kleine Gewässer oftmals durch sehr lokale Faktoren beeinflusst, was eine Übertragung der Erkenntnisse auf andere Gewässer erschwert. Andererseits ist für Parameter wie Maximaltemperatur, Schichtungsstabilität oder Mischfrequenz die Tiefe entscheidender als die Fläche. Wie Tabelle 2 zeigt, verteilen sich die Maximaltiefen der ausgewählten Kleinseen sehr gut zwischen 1 und etwa 7 m.

Abbildung 10 stellt die ausgewählten Seen (in rot) im Vergleich zu allen Schweizer Seen als Funktion der Fläche und der Höhe über Meer dar. Zusätzlich eingezeichnet sind Seen, welche in verwandten Projekten überwacht werden (z.B. die Léxplora-Plattform im Genfersee oder die Gletscherseen des Projekts «alpine wells») und Seen, welche über ein regelmässiges kantonales Monitoring verfügen.



Abbildung 9: Geographische Verteilung der acht Kleinseen mit Pilot-Messstationen. Die Kleinseen liegen, mit Ausnahme der beiden Weiher bei Luzern (Gütschweiher und Weiherhus) im Kanton Bern. Karte: <https://map.geo.admin.ch>

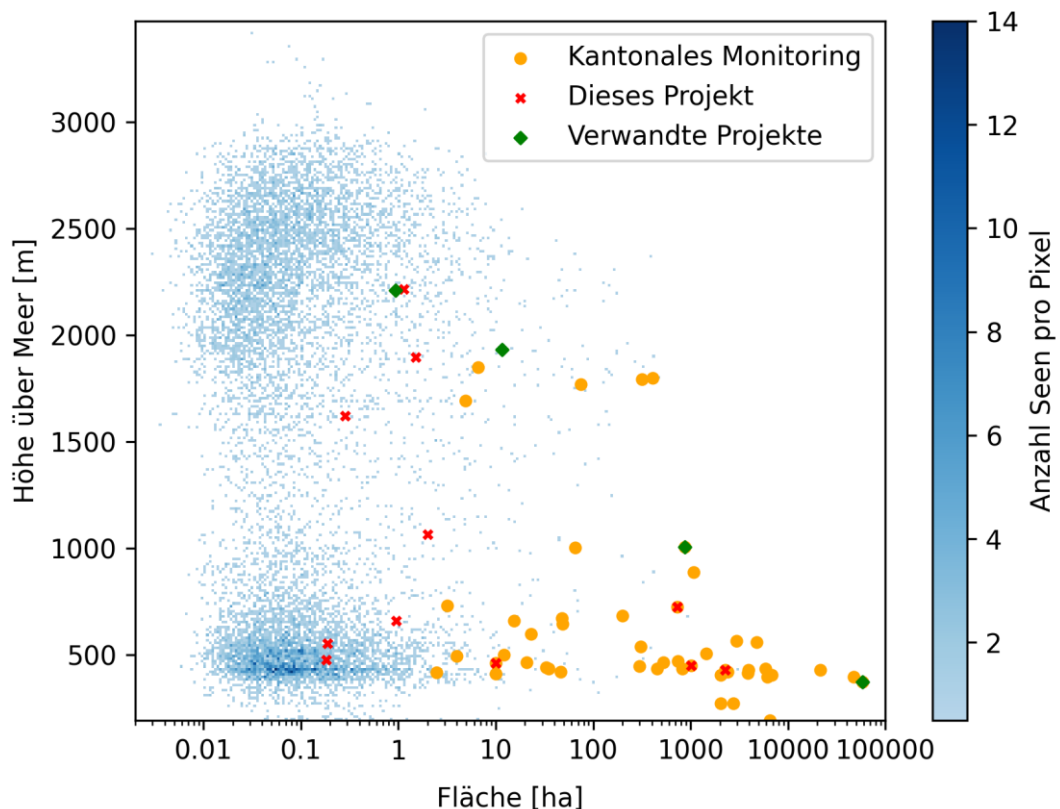


Abbildung 10: Schweizer Seen dargestellt als Funktion der Fläche und der Höhe über Meer. Die gestrichelte Linie markiert die Grenze von 0.1 ha. Rote Punkte zeigen die in diesem Projekt überwachten Seen und die lachsroten die Seen, welche von anderen laufenden Projekten überwacht werden (z.B. Léxplorer im Genfersee). Die orangen Seen verfügen über ein kantonales oder interkantonales Monitoring (mindestens vierteljährlich alle 2 Jahre).

Rechtliches und Logistisches

Für alle ausgewählten Seen mussten bei den Grundbesitzern die nötige Bewilligung für den dreijährigen Pilotbetrieb eingeholt werden. Während die Zusammenarbeit mit den kantonalen Ämtern generell unkompliziert war, verweigerten einige der kontaktierten Grundeigentümer/-innen die Installation einer Messstation. Trotzdem gelang es innert nützlicher Frist, acht Messstationen in Kleinseen verschiedener Grössen und an verschiedenen Höhenlagen zu betreiben. Die Eigentümer des Weiherhus verlangten nach etwa 2 Jahren den Abbau der Messstation.

Ägerisee: Baubewilligung Gemeinde Oberägeri für 10 Jahre mit Option zur Verlängerung

Murtensee: Kantonale Bewilligung für 5 Jahre

Hallwilersee: Kantonale Bewilligung für 3 Jahre

Kleinseen Bern: Bewilligung des kantonalen Fischereiinspektorats

Bewilligung der Abteilung Naturförderung falls unter Naturschutz (Lenkerseeli, Inkwilersee)

Kleinseen Luzern: LAWA (Fischerei)

Die Bewilligung der Abteilung für Naturförderung Bewilligung für das Lenkerseeli umfasst ein absolutes Fahr- und Betretungsverbot der Seeoberfläche zwischen Anfang April und Mitte Juli. Seit 2023 gelten diese Regeln auch für den Inkwilersee.

In Tabelle 3 zeigt Details zur Logistik, wie die Anreisedauer, sowie die gewählten Transportmittel. Generell wäre die Anfahrt (bis auf die Wanderung) immer per Auto möglich. Wir bevorzugen aber so weit wie möglich (und praktikabel) den Zug aus Gründen der CO₂-Emissionen, aber auch, weil im Zug sowohl Teile der Vor- wie auch der Nachbearbeitung der Feldarbeit möglich sind. Bei alpinen Seen kann es vorkommen, dass der Anfahrtsweg über eine Privatstrasse führt. Informationen über eine entsprechende Bewilligung können bei der Gemeinde eingeholt werden.

Tabelle 3: Anreisedauer und gewähltes Transportmittel, sowie Boot auf dem See

	Dauer Anreise (Hin + Rückweg)	Transportmittel Anreise	Boot
Inkwilersee	2 h	Auto	Ruderboot Fischereiverein
Weiherhus	1 h	E-Bike	Schlauchboot
Waldweiher	40 min	E-Bike	Schlauchboot
Geistsee	2 h 30 min	Auto	Ruderboot Eigentümerin
Lenkerseeli	7 h 10 min	Zug + Fussweg	Schlauchboot
Stockseewli	3 h 40 min	Zug + Auto + Fussweg	Schlauchboot
Meiefallseeli	5 h 30 min	Zug + Auto + Fussweg	Schlauchboot
Oberes Bänzlauseeli	7 h 30 min	Zug + Auto + Fussweg	Schlauchboot

Zusammenfassung Kapitel 2

- Es gibt in der Schweiz etwa 4600 stehende Gewässer (Kleinseen + Seen) mit einer Oberfläche grösser als 0.1 Hektare (1000 m²)
- Eine Typologie mittels manuellem Clustering, sowie auch automatisiertes Clustering mit vier Eigenschaften (Fläche, Tiefe, Höhe über Meer, Sichttiefe) ergibt drei wichtige Cluster von Seen:
 - o Klare, tiefe und grosse Seen im Flachland
 - o Trübe und kleine Seen im Flachland
 - o Alpine Seen mit variabler Tiefe und zumeist klarem Wasser
- Insbesondere die Kleinseen besitzen solch variable Eigenschaften (mit Einflüssen durch Grundwasser, Zuflüsse, Landnutzung, Schneeschmelze usw.), dass sehr viele von ihnen überwacht werden müssen für einen repräsentativen Überblick.
- Für das Einrichten einer Messstation muss die Bewilligung der Eigentümer und allenfalls der Gemeinde und von kantonalen Ämtern eingeholt werden.

3. Bestehende See-Monitoringprogramme

3.1 Übersicht

Das bisher bestehende Temperaturmonitoring der Schweizer Seen wird durch kantonale Fachstellen und, bei grenzüberschreitenden Seen, von internationalen Kommissionen durchgeführt. Die Wassertemperatur wurde dabei lange nur als Nebenprodukt der wesentlich wichtigeren chemischen Nährstoffanalysen erhoben. Meist wurden an der tiefsten Stelle eines Sees in verschiedenen Wassertiefen Wasserproben entnommen, in Behälter abgefüllt und im Labor auf die Hauptnährstoffe Phosphor und Nitrat, Metalle wie Eisen und Mangan, den gelösten Sauerstoff oder die elektrische Leitfähigkeit analysiert. Nur die Wassertemperatur muss zwingend vor Ort gemessen werden, da sich die Temperatur einer Wasserprobe beim Transport stark verändern würde. Für die insitu-Messung der Wassertemperatur wurden früher diverse Methoden eingesetzt, zum Beispiel Messsonden der Firma Zülig, Kippthermometer oder sogar die manuelle Messung vor Ort mit einem Thermometer in Wasserproben. Letzteres führt dazu, dass die Wassertemperaturen im Tiefenwasser des Murten- und Neuenburgersees vor dem Jahr 2001 nicht verlässlich sind und für Analysen nicht verwendet werden sollten. Diese Informationen konnten mittels Umfrage bei den kantonalen Fachstellen und den internationalen Kommissionen erhoben werden. Es hat sich aber auch herausgestellt, dass die Details über die Messmethoden, insbesondere der Wassertemperatur, nicht verlässlich archiviert wurden und einiges über die Zeit verloren ging.

Seit den 1990er-Jahren wird die Wassertemperatur in den meisten Schweizer Seen mithilfe einer Messsonde für Temperatur, Leitfähigkeit und Tiefe gemessen (einer sogenannten CTD-Sonde). Oft kann die Messsonde auch den gelösten Sauerstoff, den pH und sogar Algenpigmente messen. Die Genauigkeit der Temperaturmessungen beläuft sich auf zwischen $\pm 0.002\text{ °C}$ für sehr genaue, moderne Messsonden und etwa $\pm 0.1\text{ °C}$ für ältere Messsonden. Die Genauigkeit von Kippthermometern sollte laut diversen Quellen etwa $\pm 0.02\text{ °C}$ betragen. Eine genaue Angabe wurde aber nicht gefunden.

Durchgehende (meist monatliche) See-Monitoringprogramme wurden in vielen grösseren Schweizer Seen in den 1960er oder 1970er Jahren gestartet (siehe das Beispiel Zugersee in Abbildung 11). Für andere Seen wurde das Monitoring erst in den 1990er Jahren gestartet (siehe Beispiel Brienersee in Abbildung 12), während für den Zürichsee sogar eine Wassertemperatur-Datenreihe seit 1936 existiert (Abbildung 13).

Heute werden die meisten Grossseen monatlich beprobt. Ausnahmen mit mehr Profilen sind der Luganersee mit 24 Profilen und der Genfersee mit 18 Profilen pro Jahr. Auf der anderen Seite werden der Walensee und der obere Zürichsee seit etwa Anfang 2000 nur noch 4-mal jährlich untersucht und der Baldegger- und der Sempachersee seit 2014 noch 8-mal jährlich. Der Ägerisee wird seit langem nur 4-mal jährlich beprobt. Um ein einigermaßen konsistentes Bild der Wassertemperatur im Jahresverlauf zu haben, sind aber mindestens etwa 10 jährliche Profile nötig.

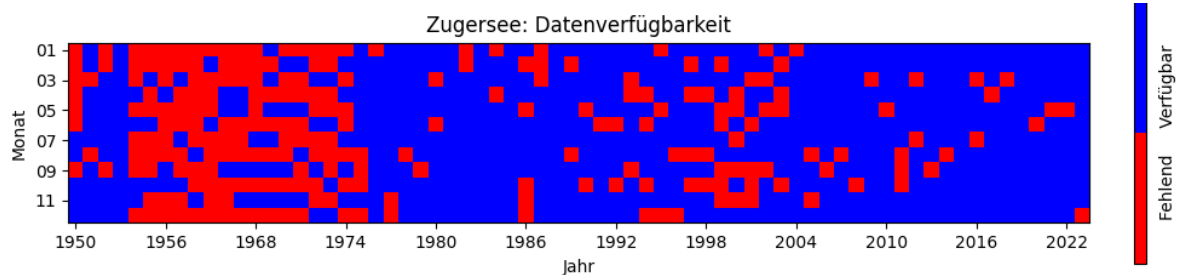


Abbildung 11: Verfügbarkeit von Wassertemperaturdaten aus dem kantonalen Monitoring des Zugersees. Falls in einem bestimmten Monat ein Temperaturprofil gemessen wurde, erscheint das betreffende Quadrat in Blau, ansonsten in Rot. Datenherkunft: Amt für Umwelt, Kanton Zug

Neben den zumeist monatlich beprobten Grossseen werden verschiedene kleine bis mittlere Seen in den Kantonen Zürich, Waadt, Bern und Obwalden regelmässig überwacht. Im Kanton Bern werden zum Beispiel alle 10 Jahre etwa 5 Profile in etwa 5 Kleinseen gemessen.

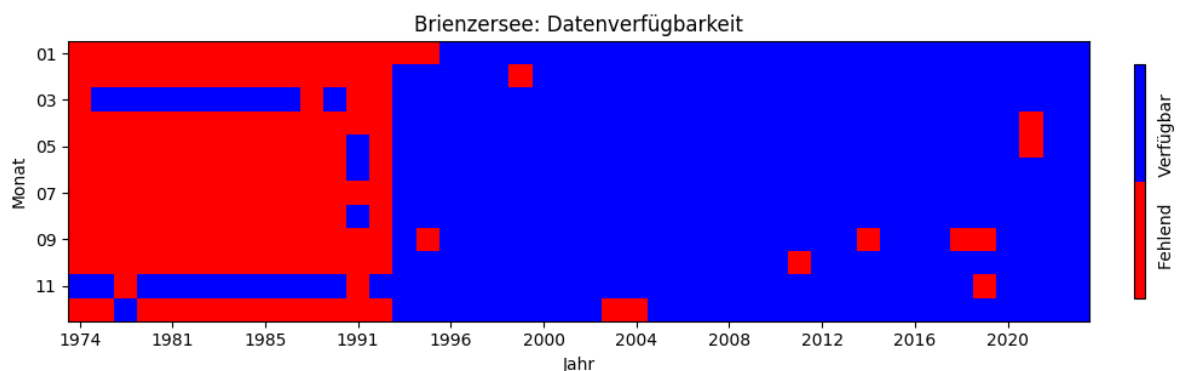


Abbildung 12: Verfügbarkeit von Wassertemperaturdaten aus dem kantonalen Monitoring des Brienersees. Falls in einem bestimmten Monat ein Temperaturprofil gemessen wurde, erscheint das betreffende Quadrat in Blau, ansonsten in Rot. Datenherkunft: Gewässer und Bodenschutzlabor, Kanton Bern

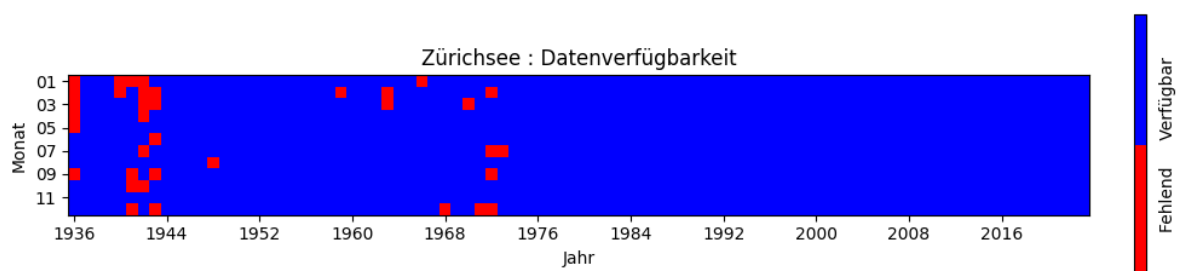


Abbildung 13: Verfügbarkeit von Wassertemperaturdaten aus dem kantonalen Monitoring des Zürichsees. Falls in einem bestimmten Monat ein Temperaturprofil gemessen wurde, erscheint das betreffende Quadrat in Blau, ansonsten in Rot. Datenherkunft: AWEL, Kanton Zürich.

3.2 Temperatur und Sauerstofftrends der letzten Jahrzehnte

Neben der Wassertemperatur ist der gelöste Sauerstoff im Wasser ein zweiter Schlüsselparameter von Seen, denn er ermöglicht höheres Leben. Die Sauerstoffzufuhr in den See erfolgt durch Gasaustausch mit der Atmosphäre und durch die Produktion von Mikroorganismen (Phytoplankton) nahe der Seeoberfläche. Eliminiert wird der Sauerstoff durch die Zersetzung von organischen Stoffen vor allem

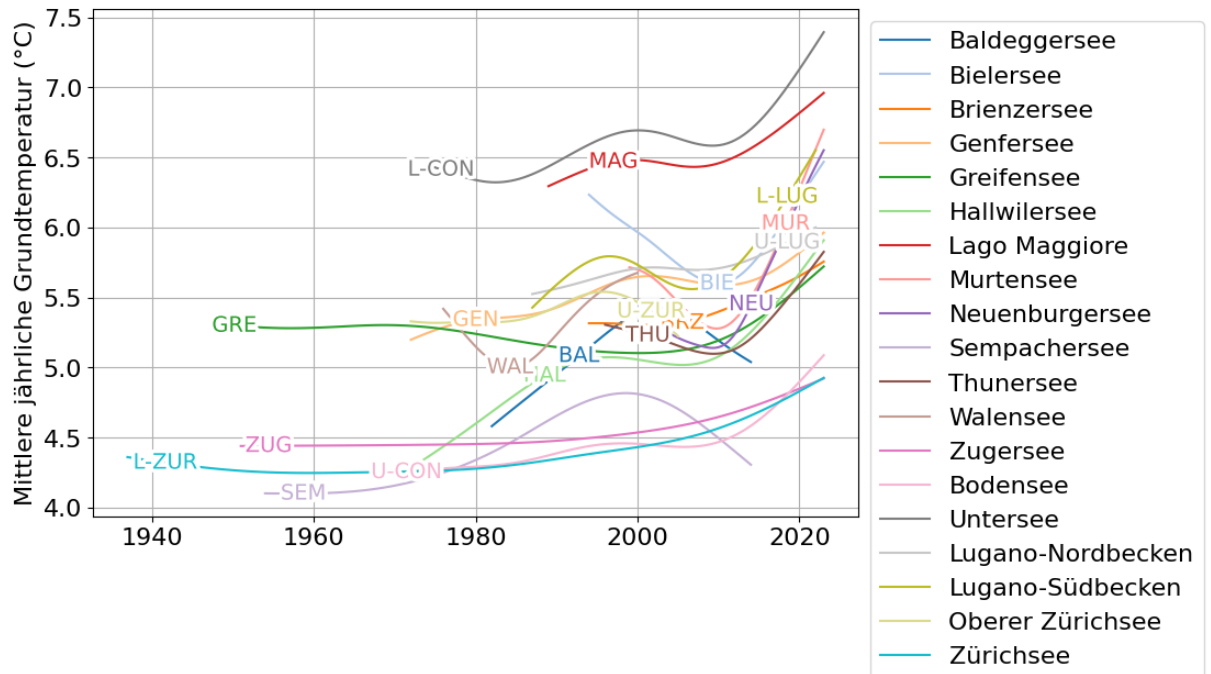


Abbildung 15: Entwicklung der jährlich gemittelten Grundtemperatur (unterste 5 m) von Schweizer Seen. Die Kurven wurden mittels GAM-Regression aus den Monitoringdaten der kantonalen Fachstellen und internationalen Kommissionen interpoliert.

Da die Oberflächentemperatur stärker zugenommen hat als die Grundtemperatur, ist der Dichteunterschied zwischen Oberfläche und Seegrund tendenziell grösser geworden. Dies zeigt sich klar, wenn die Schmidt-Stabilität berechnet wird (Abbildung 16). Die Schmidt-Stabilität sagt aus, wie viel Energie nötig wäre, um einen See zu einem bestimmten Zeitpunkt zu mischen. Diese Energie hat im Sommer für die meisten Seen um etwa 20 bis 40 % zugenommen.

Während bei den Wassertemperaturen ein klarer Anstieg aufgrund des Klimawandels, aber auch wegen der Zunahme der Sonneneinstrahlung aufgrund abnehmender Luftverschmutzung (Schmid et al., 2016; Schilliger et al., 2024) sichtbar ist, zeigt die Thermoklinentiefe kein so klares Muster (Abbildung 17). Für Seen mit einer eher niedrigen Thermoklinentiefe (6 – 10 m) scheint die Tiefe eher zunehmend und für solche mit eher hohen Thermoklinentiefe (15 – 20 m) tendenziell abnehmend.

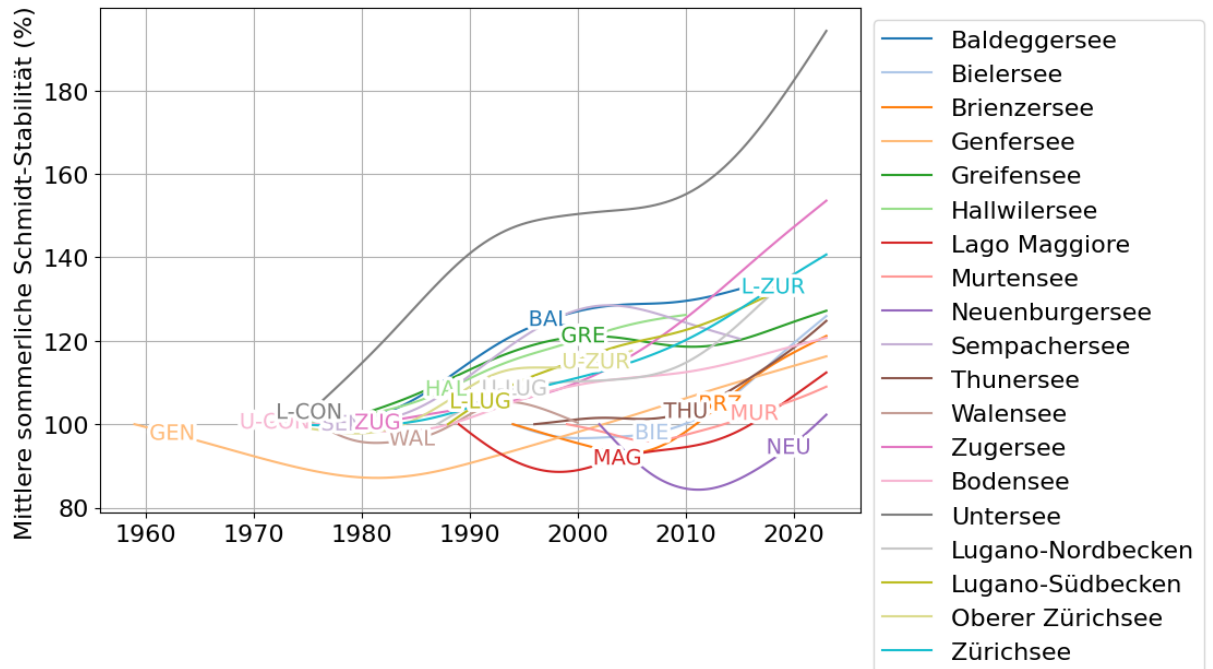


Abbildung 16: Entwicklung der sommerlichen (Juni, Juli, Aug.) Stärke der Dichteschichtung (Schmidt-Stabilität) von Schweizer Seen als Veränderung in (%) seit Messbeginn. Die Schmidt-Stabilität wurde mithilfe der Python-Bibliothek «pylake» aus den Monitoringdaten der kantonalen Fachstellen und internationalen Kommissionen berechnet und mittels GAM-Regression interpoliert.

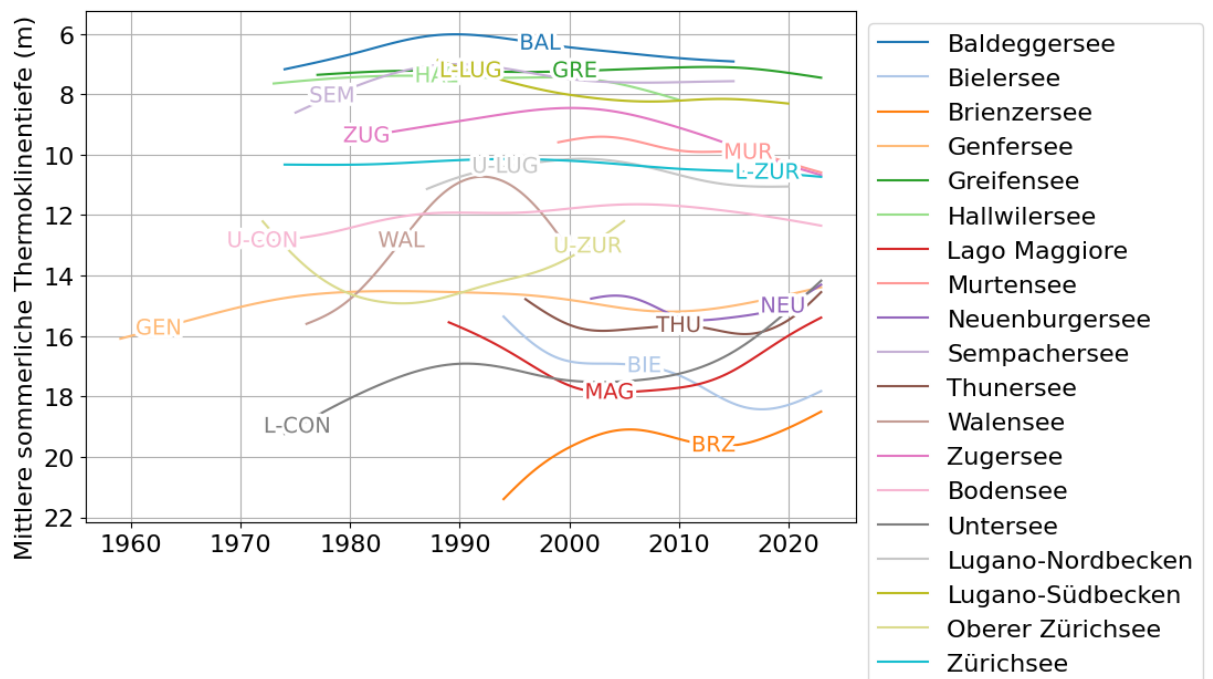


Abbildung 17: Entwicklung der Sommer-Thermoklinentiefe (Juni, Juli, Aug.) von Schweizer Seen. Die Thermoklinentiefe wurde mithilfe der Python-Bibliothek «pylake» aus den Monitoringdaten der kantonalen Fachstellen und internationalen Kommissionen berechnet und mittels GAM-Regression interpoliert.

Die Tiefe der Thermokline hängt unter anderem mit der Sichttiefe zusammen, da die Sichttiefe bestimmt, welche Wassertiefen noch Sonnenlicht erhalten und welche nicht. Abbildung 18 zeigt, dass die Sichttiefe für die meisten Schweizer Seen tendenziell zunehmend ist. Dies hängt sehr wahrscheinlich mit dem verringerten Algenwachstum im Sommer zusammen, welches wiederum ein Resultat der verringerten Nährstoffkonzentrationen ist. Grosse Ausnahme ist dabei der Bodensee, wo die Sichttiefe seit den 1980er Jahren von etwa 5.5 auf etwa 3.5 m gesunken ist.

Wegen der Abnahme von Sauerstoff-produzierenden Algen im Sommer hat auch die Sauerstoffkonzentration an der Oberfläche abgenommen (Abbildung 19). Eine kleine Rolle spielt dabei auch die durch die Temperaturerhöhung induzierte Abnahme der Sättigungskonzentration von Sauerstoff im Wasser.

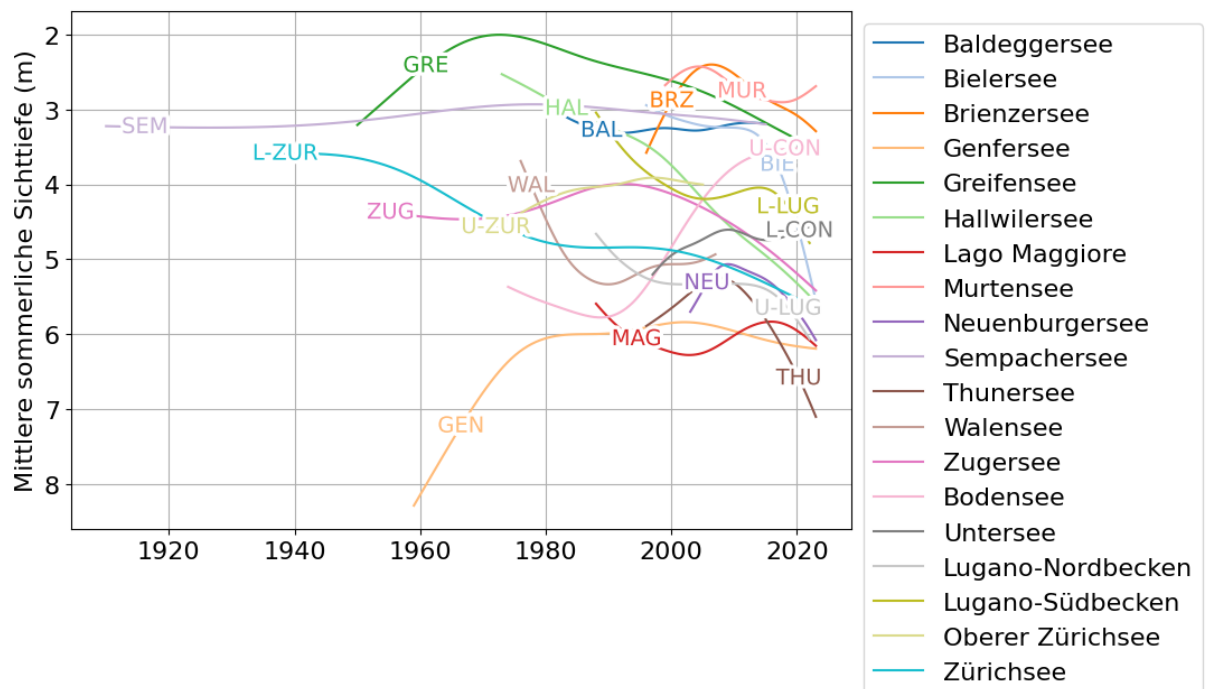


Abbildung 18: Entwicklung der sommerlichen Sichttiefe (Juni, Juli, Aug.) von Schweizer Seen. Die Kurven wurden mittels GAM-Regression aus den Monitoringdaten der kantonalen Fachstellen und internationalen Kommissionen interpoliert.

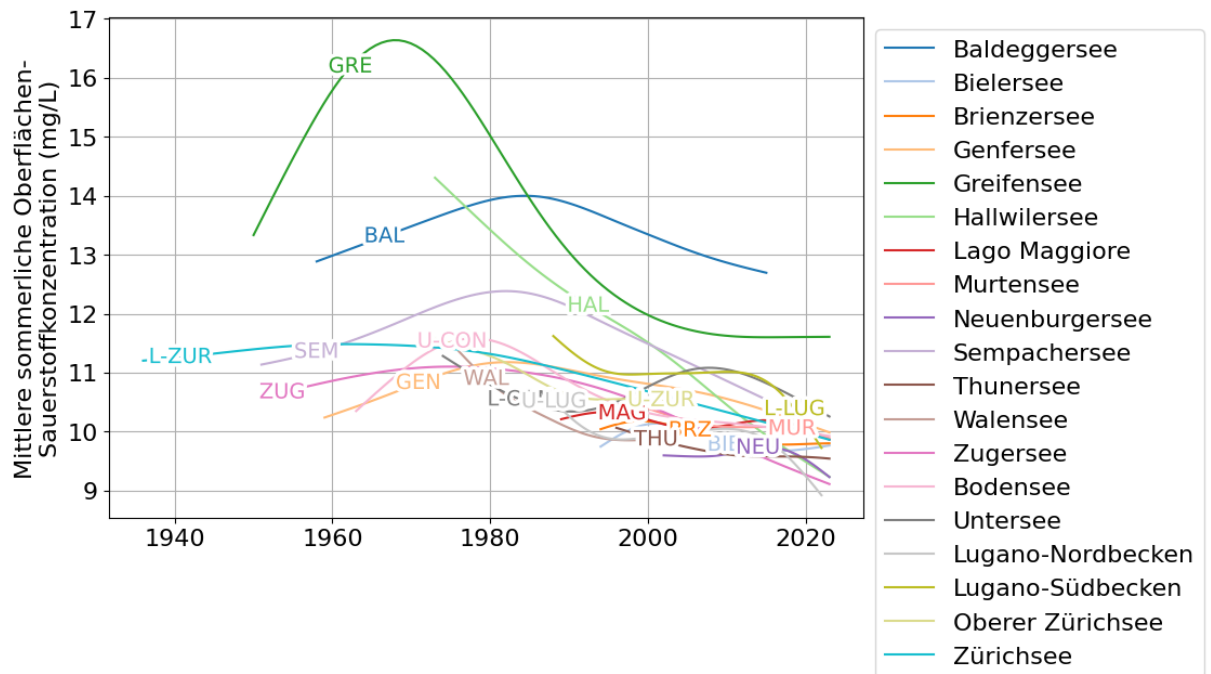


Abbildung 19: Entwicklung des sommerlichen Sauerstoffgehalts im Oberflächenwasser (oberster Meter) in Schweizer Seen. Die Kurven wurden mittels GAM-Regression aus den Monitoringdaten der kantonalen Fachstellen und internationalen Kommissionen interpoliert.

Noch wichtiger als die Sauerstoffkonzentration an der Oberfläche ist der Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser im Herbst. Die Eutrophierung der Schweizer Seen zwischen etwa 1950 und 1980 wegen Nährstoffzufluss aus Landwirtschaft und Siedlungsabwasser hat dazu geführt, dass grosse Mengen an abgestorbenen Mikroorganismen an den Seegrund sinken und dort mit Sauerstoff zersetzt werden. Dies führt über den Sommer und Herbst zu Sauerstoffmangel in vielen Schweizer Seen. Abbildung 20 zeigt, dass viele Seen immer noch über sehr wenig Sauerstoff verfügen im Herbst. Bei einigen Seen ist der Gehalt aber ansteigend (Bielersee oder Bodensee). Hingegen ist der Gehalt abnehmend für sehr tiefe Seen, welche weniger unter der Eutrophierung gelitten hatten (Brienersee, Thunersee, Lago Maggiore). Hier spielt wohl bereits der Klimawandel eine Rolle, welcher zu einer Verminderung der Dauer, Intensität und oder Tiefe der winterlichen Mischung führt.

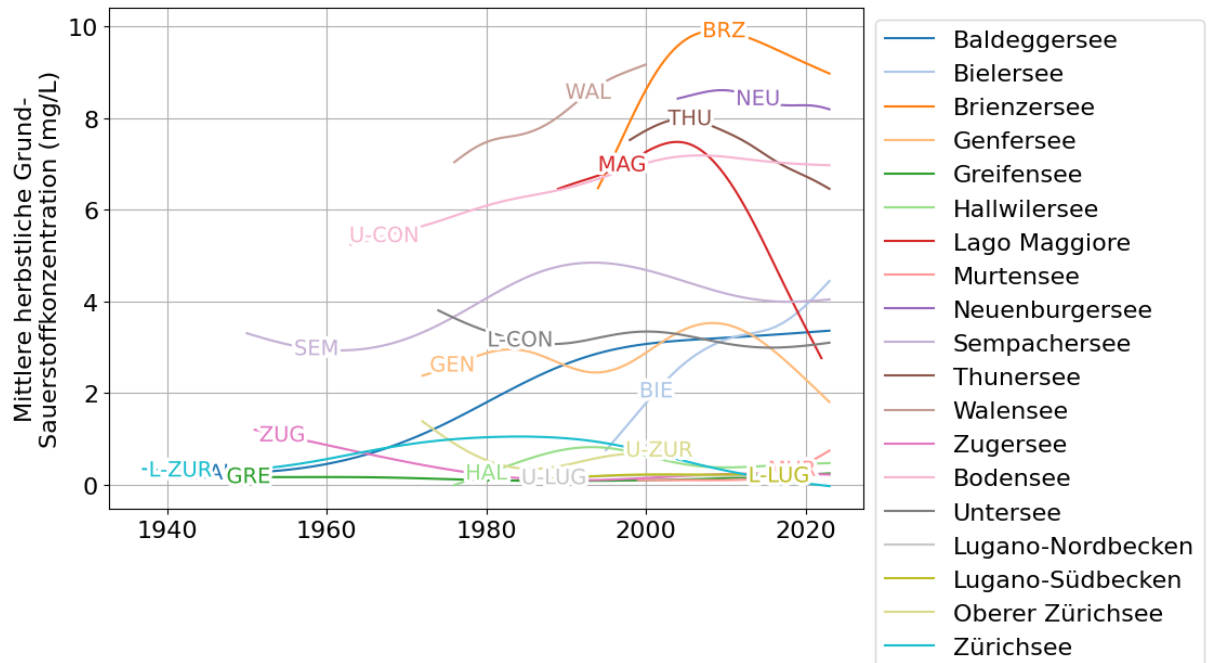


Abbildung 20: Entwicklung des Sauerstoffgehalts im Tiefenwasser (unterste 5 m) im Herbst (Sep., Okt. und Nov.). Die Kurven wurden mittels GAM-Regression aus den Monitoringdaten der kantonalen Fachstellen und internationalen Kommissionen interpoliert.

3.3 Nachteile von monatlichen Profilen

Während die Zeitreihen aus monatlichen Profilen einen guten Überblick über die generelle Erhöhung der jährlichen Durchschnittstemperaturen ergeben, sind andere Veränderungen schwieriger zu erfassen. Zum Beispiel lässt sich die wichtige Dauer der Sommerstagnation aus monatlichen Profilen nicht genau berechnen. Vor allem im Frühling und im Spätherbst ist die Zu- und Abnahme der Temperatur nicht unbedingt linear, und darum ist es schwierig zu bestimmen, wann genau zwischen zwei monatlichen Profilen der See gemischt hat. Weiter ist die Quantifizierung des Sauerstoffgehalts vor oder nach der Mischung eine Herausforderung, da der Zeitpunkt der Mischung stark variiert von einem Jahr zum nächsten. Eine Messung im März kann je nach See in einem noch nicht vollständig gemischten See geschehen oder aber bereits wieder beeinflusst sein durch den Sauerstoffkonsum, wenn der See schon seit einigen Wochen wieder geschichtet ist.

Ein anderer gewichtiger Grund, wieso monatliche Werte einen falschen Eindruck vermitteln, ist die kurzfristige Variabilität von See-Parametern. Abbildung 21 zeigt die Variabilität der Oberflächentemperatur im Ägerisee im Juli 2023 gemessen von der Messstation im Ägerisee. Vom 7. bis 9. Juli ist die tägliche Maximaltemperatur von etwa 20 auf 26 °C angestiegen. Je nachdem, an welchem Tag die Probenahme durchgeführt wird, kann das Resultat also sehr unterschiedlich sein, was sich auch auf die Trendberechnungen auswirkt. Solch kurzfristige Veränderungen ergeben sich aber nicht nur an der Seeoberfläche, sondern selbst in grosser Tiefe. In Abbildung 22 ist die Sauerstoffkonzentration in Murtensee zwischen März und April 2023 in 41 m Tiefe dargestellt. Die März- oder April-Profile werden oft verwendet, um die Sauerstoffkonzentration am Ende der Wintermischung zu charakterisieren. Unsere Messungen zeigen jedoch, dass die Werte in dieser Periode zwischen etwa 6 und 10 mg/L variieren können. Selbst von einem Tag zum anderen, z.B. um den 24. März herum, variieren die Werte von zwischen 7.5 bis 9.5 mg/L. Gründe für die starken Schwankungen könnte ein

Zusammenspiel zwischen internen Wellen (sogenannte «Seiches») und einem unvollständig gemischten See sein.

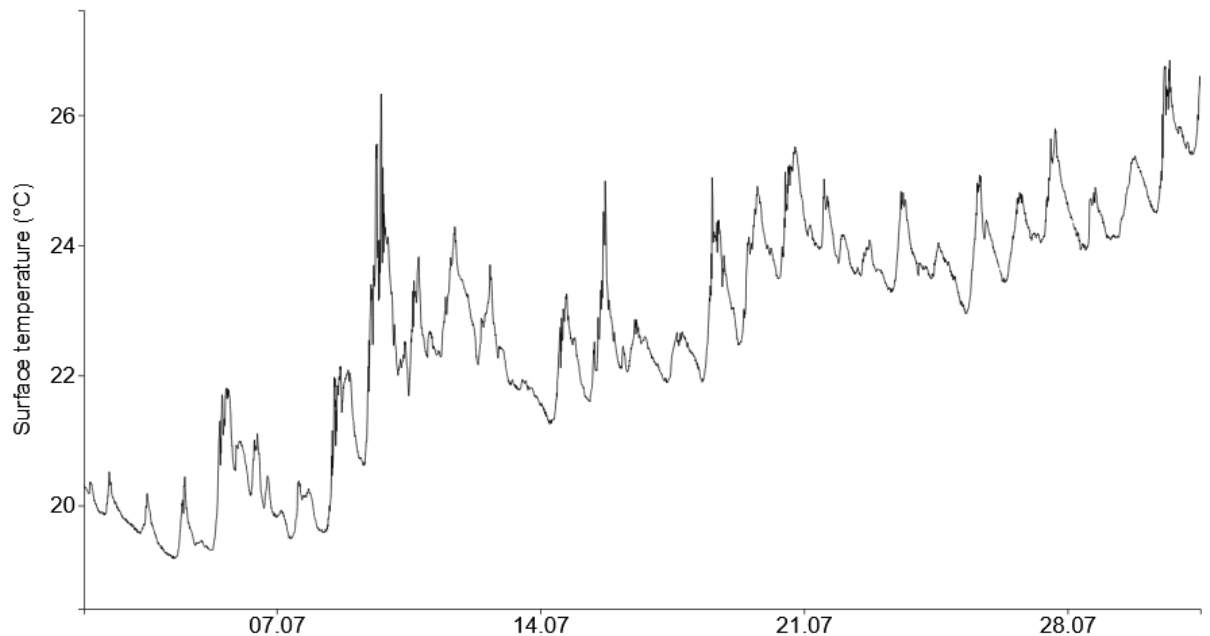


Abbildung 21: Oberflächentemperaturmessung (0.5 m Tiefe) der Messstation im Ägerisee im Juli 2023.

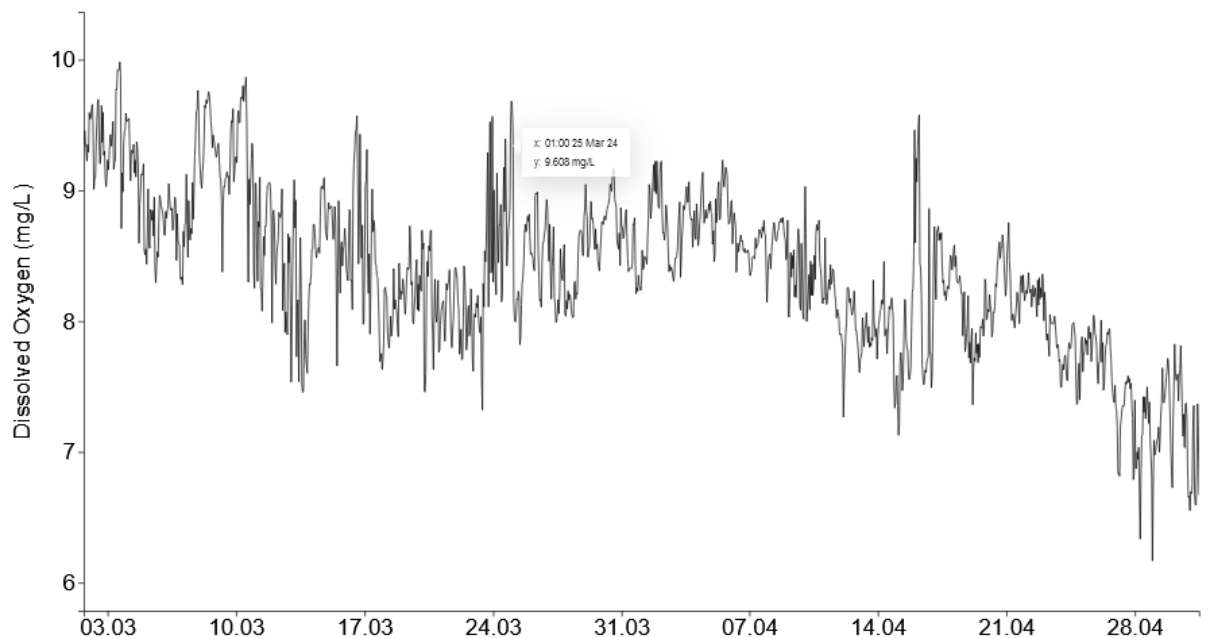


Abbildung 22: Sauerstoffmessungen im Murtensee in 41 m Tiefe von März bis April 2023.

Zusammenfassung Kapitel 3

- Die Schweizer Grossseen werden seit Jahrzehnten von kantonalen Fachstellen und internationalen Kommissionen überwacht.
- Die Wassertemperatur war lange nicht der Fokus dieser Untersuchungen, und die verwendeten Messmethoden sind zum Teil nicht gut beschrieben.
- Die Untersuchungen bestehen aus meist monatlichen Profilen. Seit dem Rückgang der Nährstoffkonzentrationen wurden die Probenahmen teilweise reduziert.
- Die Analyse dieser Messdaten zeigt, dass die Wassertemperaturen stark zugenommen haben, an der Seeoberfläche um etwa 0.5 °C/Dekade seit 1980. Zugenommen haben auch Grundtemperatur und Schichtungsstabilität.
- Monatliche Untersuchungen über lange Zeithorizonte sind sehr wichtig, besitzen aber zwei grosse Nachteile:
 - Die Dauer von Stagnations- und Mischungsphasen kann nur ungenügend nachvollzogen werden.
 - Kurzfristige Variabilität innerhalb von wenigen Tagen oder Stunden beeinträchtigt die Repräsentativität von monatlichen Profilen.

4. Beschreibung der Pilot-Messtationen

4.1 Einführung

Seen sind drei-dimensionale Körper deren Temperatur, sowie Konzentration von gelösten Stoffen sich unterscheidet, je nachdem, wo gemessen wird. Zum Beispiel unterscheiden sich in geschichteten Seen die Temperatur und die chemische Zusammensetzung des Oberflächenwassers sehr stark von denjenigen des Tiefenwassers. In geringerem Ausmass gibt es auch Unterschiede zwischen Wasser im Uferbereich und im offenen See, sowie zwischen verschiedenen Becken eines Sees. Da ein Monitoring all dieser verschiedenen Bereiche eines Sees zu aufwändig und teuer wäre, werden die Messungen meist am tiefsten Punkt eines Sees durchgeführt. Der tiefste Punkt liegt meist weit im offenen Wasser und im wichtigsten Becken eines Sees. Da in geschichteten Seen die horizontalen Transportprozesse wesentlich schneller sind als die vertikalen, kann davon ausgegangen werden, dass die Messungen an der tiefsten Stelle alle in einem See stattfindenden Prozesse (mit einer gewissen Latenzzeit) zeitlich integrieren. Die Messung an der der tiefsten Stelle sagt also nicht zwingend etwas darüber aus, wie warm das Seeufer zum selben Zeitpunkt ist. Über längere Zeiträume können aber Veränderungen eines Sees, wie ein zum Beispiel ein Erwärmungstrend, damit gut nachvollzogen werden.

Historisch gesehen wurden in den Schweizer Seen Temperaturmessungen und chemische Proben mit einer Tiefenauflösung von 1 – 3 m in den obersten 20 m, sowie einer Auflösung von 10 – 50 m darunter durchgeführt. So trägt man dem Fakt Rechnung, dass sich das Wasser an der Oberfläche, beeinflusst durch die Atmosphäre, wesentlich dynamischer verhält als in der Tiefe. Seit der Einführung von Messsonden mit hoher zeitlicher Auflösung erheben viele Kantone die Temperatur, die Leitfähigkeit und den Sauerstoffgehalt in wesentlich grösserer Auflösung (oft ein Wert pro Meter Tiefe). Die meisten Schweizer Grossseen werden heute monatlich beprobt. Es gibt aber auch Messprogramme mit zeitlichen Auflösungen von 4 (Ägerisee und Walensee) bis 24 Profilen pro Jahr (Luganersee).

Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Arten Messsysteme, um die Temperatur an einem gewissen Standort von der Seeoberfläche bis zum Seegrund überwachen zu können:

- Messketten, welche die Temperatur in diskreten, fixen Tiefen überwachen.
- Profiling-Systeme, welche die Temperatur quasi-kontinuierlich von der Oberfläche bis zum Seegrund erfassen.

Tabelle 4 fasst die Vor- und Nachteile, sowie die ungefähren Kosten der zwei Arten von Messsystemen zusammen. Die Auflösungen und Kosten sind als ungefähre Schätzungen zu verstehen, hängen im konkreten Fall aber von den Spezifikationen der Geräte ab.

Tabelle 4: Eigenschaften von Temperaturmessketten im Vergleich zu profilierenden Messsystemen

	Zeitliche Auflösung	Räumliche Auflösung	Kosten	Messung von zusätzlichen Parametern
Messkette	1 – 10 min	1 – 5 m	25 – 50 k CHF	Hohe Zusatzkosten
Profiler	2 – 24 h	10 – 20 cm	100 – 120 kCHF	Geringe Zusatzkosten

Im Folgenden fassen wir die im Pilotprojekt evaluierten Messsysteme zusammen.

4.2 Messstationen in Kleinseen entlang eines Höhengradienten

Von Frühling 2021 bis Sommer 2024 wurden Temperaturmessketten in acht Kleinseen betrieben (Tabelle 2 und Abbildung 9). Die eingesetzten Messketten bestehen aus einer Auftriebsboje, einer Stahlkette und einem Grundgewicht. Daran befestigt sind ein Pegelmesser (am Seegrund) und Temperaturlogger mit Plastikschildern zur Beschattung. Die verwendeten Hobo Logger weisen eine spezifizizierte Anfangsgenauigkeit von ± 0.2 und eine jährliche Drift von ± 0.1 °C auf. Um sie vor direkter Sonneneinstrahlung zu schützen, wurden die Logger mit PVC-Platten beschattet. Unsere Untersuchungen zeigen, dass ungeschützte Logger in Kleinseen bei direkter Sonneneinstrahlung die Wassertemperatur um bis zu etwa 0.5 °C überschätzen können. Die Logger wurden ein bis zweimal jährlich ausgelesen und danach im Labor validiert. Abbildung 23 zeigt die Messkette schematisch, sowie im Stockseewli installiert. Wichtigste Bauteile der Messkette sind:

- Eine Auftriebsboje (Grösse hängt von der Länge der Stahlkette und damit der Tiefe ab); dient gleichzeitig zur Markierung der Messkette für Fischer
- Stahlkette zur Befestigung der Logger und PVC-Platten
- Hobo-Temperaturlogger (mit Karabinern an der Stahlkette befestigt)
- PVC-Platten zum Sonnenschutz der Logger, da unsere Experimente zeigten, dass die direkte Sonneneinstrahlung die gemessene Wassertemperatur um bis zu etwa 0.5 °C erhöhen kann
- Grundgewicht aus Stahl oder Beton
- Genügend lange dünne Stahlkette am Grund, damit die Logger aus dem Wasser gehoben werden können, ohne das Grundgewicht bergen zu müssen
- Ein Pegellogger am Seegrund, um Wasserspiegelschwankungen nachvollziehen zu können
- Optional: ein Sauerstofflogger nahe am Seegrund, um die Mischungsdynamik besser nachvollziehen zu können

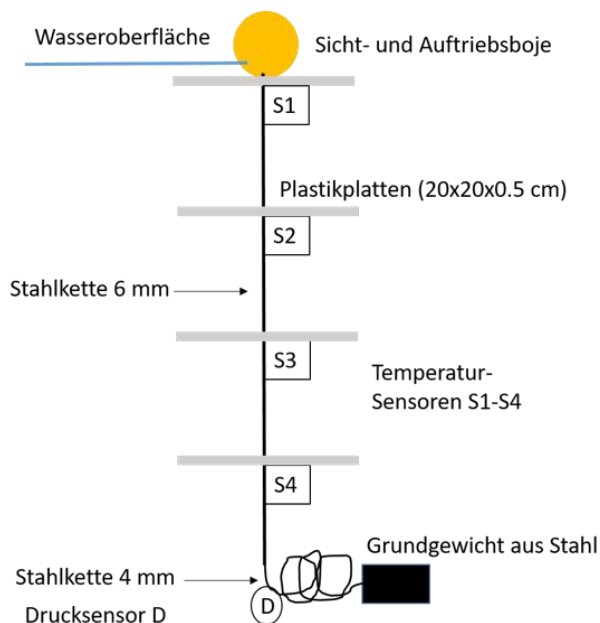


Abbildung 23: Schematische Darstellung der verwendeten Messketten in den Kleinseen (links); installiertes Messsystem im Stockseewli (rechts)

Auch andere Varianten wurden getestet (siehe Zwischenberichte an das BAFU oder auch Rebière et al. (2013) und Rebière et al. (2018)), jedoch bewährte sich das aktuelle Design der Messkette am besten, um folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Die Logger können ausgelesen werden, ohne das Grundgewicht zu heben.
- Auch bei schwankendem Seespiegel wird immer in denselben Tiefen gemessen (bei niedrigem Wasserstand kann es sein, dass ein oder zwei Logger am Seegrund liegen)
- Durch das Eigengewicht der Stahlkette bleibt die Messkette auch bei leichten Strömungen (durch Wind ausgelöst) vertikal.
- Zum Einsetzen und Warten der Messstationen wird ein Boot benötigt. Dieses wurde in zwei Fällen (Inkwilersee, Geistsee) von den Eigentümern zur Verfügung gestellt. In den anderen sechs Fällen wurden Gummiboote der Eawag eingesetzt.

Nach aktuellem Wissensstand werden die meisten der Kleinsee-Verankerungen nach Abschluss des Pilotprojekts nicht weiterbetrieben. Für den Fall, dass in Zukunft wieder ähnliche Messketten betrieben werden sollen in kleinen und/oder alpinen Seen, schlagen wir folgende Änderungen vor:

- Ersetzen der Stahlkette durch ein 2 mm Stahlseil, da das Befestigen der PVC-Platten an der Stahlkette umständlich ist.
- Das nun fehlende Eigengewicht der Messkette wird durch 0.5 kg Hantelscheiben ersetzt
- 10 kg Hantelscheiben als Grundanker: günstig und gut verfügbar
- Einsatz von teureren, aber genaueren und langlebigeren Temperaturlogger

Der Preis einer Verankerung für einen 6 m tiefen See mit 6 Hobo-Loggern und einem Pegellogger beläuft sich auf etwa 1500 CHF. Falls wesentlich präzisere, langlebigere und wartungsärmere Logger (z.B. RBR solo-T) eingesetzt werden, steigt der Anschaffungspreis auf etwa 4400 CHF. Dafür können Kosten im Unterhalt eingespart werden und die Datenqualität ist wesentlich höher (siehe nächste Abschnitte). Komponentenvorschläge, eine detailliertere Kostenschätzung und ein Schema der verbesserten Messkette sind in Anhang B zu finden.

Datenqualität

Die gewünschte Messgenauigkeit wird in Anhang A detailliert besprochen. Im Pilotprojekt haben wir für das Kleinsee-Monitoring Temperaturlogger der Firma Onset vom Typ Hobo MX2203 eingesetzt (im weiteren Verlauf «Hobo-Logger» genannt). Diese Logger sind folgendermassen spezifiziert:

- | | |
|----------------------------|---|
| - Anfängliche Genauigkeit: | $\pm 0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| - Maximale Drift: | $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$ |
| - Reaktionszeit: | in 7 Minuten 90% der Temperaturänderung |
| - Speicherplatz: | 96'000 (11 Monate bei 1 Messung pro 10 Minuten) |
| - Batterie: | > 3 Jahre (hängt von Temperatur ab) |

Im Pilotprojekt wurden die Logger so konfiguriert, dass sie jede Minute einen Temperaturwert erheben und alle 10 Minuten davon der Mittelwert gespeichert wird. So kann die Präzision (zufällige Streuung der Messungen) verbessert werden, ohne dass wertvoller Speicherplatz beansprucht wird. Da der 10-Minuten-Momentanwert trotzdem immer mitgespeichert werden muss, beträgt die maximale Autonomie der Hobo-Logger etwa 11 Monate (340 Tage).

Ein- bis zweimal jährlich werden die Messketten/Logger bei einem Feldeinsatz ausgetauscht. Die Logger werden vor und nach jedem Einsatz im Eawag-eigenen Kalibrationsbad auf ihre Genauigkeit überprüft. Dies geschieht, indem das Bad sukzessive von 27 auf 2 °C (in 5 °C Schritten) abgekühlt und bei jeder Temperatur für eine halbe Stunde konstant gehalten wird. Dabei haben wir herausgefunden, dass die Abweichungen der Logger nur leicht temperaturabhängig sind, d.h. die Abweichung gegenüber einer genauen Referenzsonde ist bei 2 °C ähnlich wie bei 27 °C. Die mittlere Abweichung eines Loggers

(über alle 6 Temperaturen) gegenüber der Referenzsonde repräsentiert also gut die Abweichung bei den einzelnen Temperaturen.

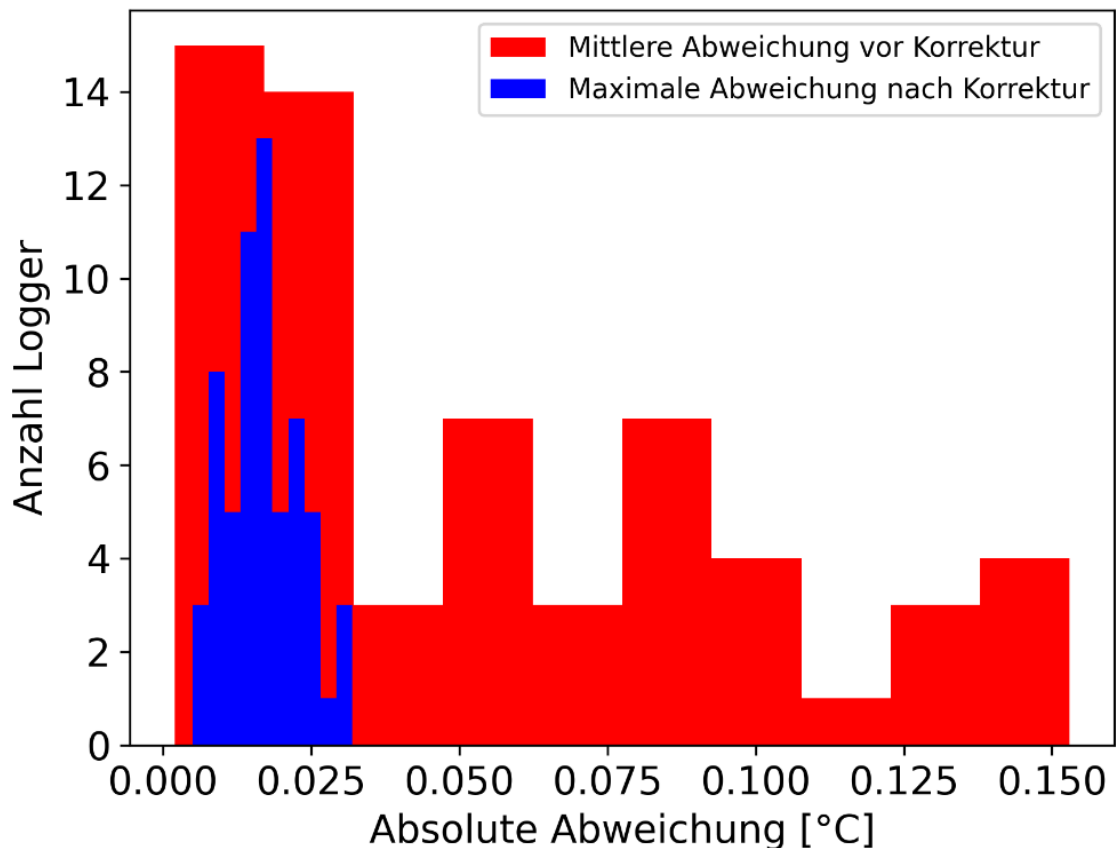


Abbildung 24: Absolute Abweichung der 50 eingesetzten Hobo-Logger. In Rot die mittlere Abweichung (über alle sechs Kalibrationstemperaturen gemittelt) vor der Korrektur und in blau die maximale Abweichung (zusammengesetzt aus leichter Temperaturabhängigkeit und zufälligen Schwankungen) nach der Korrektur.

Die im Pilotprojekt eingesetzten Hobo-Logger entsprachen den Spezifikationen, d.h. die mittlere absolute Abweichung lag bei allen Loggern unterhalb von 0.2 °C (Abbildung 24). Nachdem die mittlere Abweichung abgezogen wurde, verblieb eine Rest-Abweichung, verursacht durch eine leichte Temperaturabhängigkeit der Abweichung und zufällige Schwankungen. Diese Abweichung ist < 0.05 °C für alle eingesetzten Logger (Abbildung 24).

Der zeitliche Verlauf der Genauigkeit der Logger wird in Abbildung 25 dargestellt. Im Vergleich zu einer genauen (± 0.006 °C) Referenzsonde ändert sich die Abweichung der Logger um etwa 0.10 bis 0.15 °C innerhalb von 3 Jahren. Vor allem während des ersten Jahres veränderte sich die Abweichung noch stark, was eine 6-monatliche Überprüfung zur Einhaltung einer Genauigkeit von ± 0.1 °C rechtfertigt. Nach 2 – 3 Jahren könnte zu einer 12-monatlichen Überprüfung übergegangen werden.

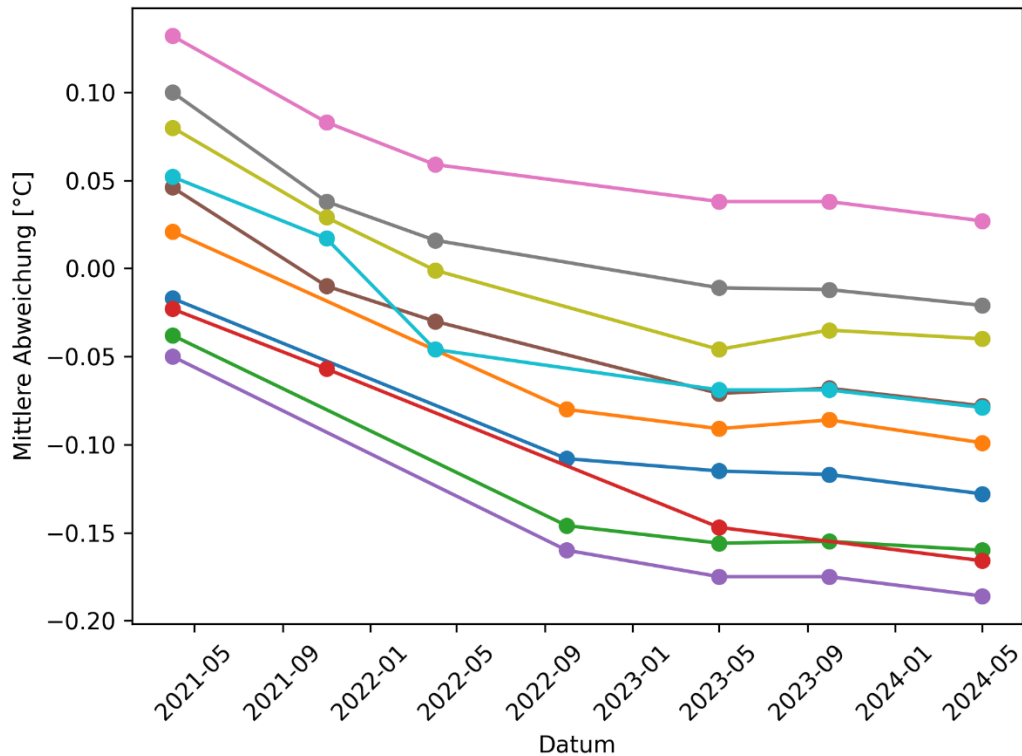


Abbildung 25: Zeitlicher Verlauf der mittleren Abweichung von 10 Hobo-Loggern. Jede Farbe stellt einen anderen Logger dar.

Vor der Überprüfung im Kalibrationsbad an der Eawag wurde evaluiert, ob auch eine Überprüfung direkt im Feld möglich ist. Dafür wurden die Logger an einem Messgerät mit hochgenauem Temperaturfühler ($\pm 0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$) befestigt und für eine Stunde einige Meter tief in den entsprechenden Kleinsee gehängt (Abbildung 26, links). Alternativ wurde auch eine Überprüfung in einem Eimer versucht (Abbildung 26, rechts). Bei beiden Methoden stellte sich heraus, dass sie fehleranfällig sind. Gut funktioniert hat die Methode in trüben Seen mit genügend grosser Tiefe ($> 4\text{ m}$). In sehr seichten und klaren Seen, sowie auch im Eimer, hat sich die Temperatur hingegen während der Überprüfung verändert (meist erwärmt), und durch die unterschiedliche Reaktionszeit der Referenzsonde und der Hobo-Logger wirkt sich dies negativ auf die Berechnung der Abweichung aus. Eine Überprüfung in Thermosflaschen, wie sie im BAFU-Flusstemperatur-Monitoring von der METAS durchgeführt wird, ist durch die Menge an Loggern sowie deren Grösse nicht einfach durchzuführen. Schlussendlich hat die Überprüfung im Labor kaum Nachteile, da die Kosten eines Kalibrationsbades im Vergleich zu Personalkosten tief sind (ca. 15 kCHF für Anschaffung + 2 kCHF für Kalibration der Referenzsonde (alle 1 – 2 Jahre)).



Abbildung 26: Hochgenaue CTD-Sonde mit Hobo-Loggern für Kalibration im Kleinsee (links); CTD und Hobo-Logger in einem Eimer für Feldkalibration (rechts)

Datenbearbeitung

Alle etwa 6 – 8 Monate werden die Messdaten vor Ort mit dem Smartphone mittels App der Firma Onset über Bluetooth ausgelesen. Dafür müssen die Logger aus dem Wasser gehoben werden. Anschliessend werden die Logger mit frisch überprüften Loggern ausgetauscht, und die mittlere Abweichung der Logger wird im Kalibrierbad gemessen. Die Messdaten einer bestimmten Messperiode (z.B. April bis Oktober 2023) werden dann mit der durchschnittlichen Abweichung der zwei Überprüfungen von April und Oktober 2023 korrigiert. Falls ein Logger bei einer Kalibration eine ungewöhnlich grosse Abweichung zeigt (mehrere Zehntelgrade im Vergleich zur vorherigen Kalibration), sollten dessen Ergebnisse für die entsprechende Messperiode gelöscht und der Logger nicht mehr verwendet werden. Dies kam während des Pilotprojekts aber nie vor. Auch fehlende Messwerte kamen nicht vor, könnten für spätere Analysen aber räumlich interpoliert werden, falls sich der Logger nicht an der Oberfläche oder am Grund befindet.

Zeitliche Unterbrechungen der Messungen kamen bisher fast nur während Wartungsarbeiten vor. Grundsätzlich werden die Temperaturwerte aufgrund der hohen Schwankungen nicht zeitlich interpoliert. Da die Berechnung von langfristigen Trends lückenlose Messdaten bedingt, können zeitliche Lücken gegebenenfalls intelligent interpoliert werden. Für letzteres bietet sich das an der Eawag entwickelte numerische Seenmodell «Simstrat» oder auch künstliche Intelligenz an.

Zusammenfassend

- Bias-Korrektur mittels Überprüfung der Logger im Labor (anfänglich alle 6 Monate, danach ist eine jährliche Überprüfung möglich)
- Jährliche Datensichtung: Entfernen von nicht-physikalischen Messwerten

- Keine zeitliche Interpolation von fehlenden Messwerten der gesamten Messkette (z.B. wegen Wartungsarbeiten)
- Keine räumliche Interpolation von fehlenden Messwerten der gesamten Messkette (z.B. wegen Wartungsarbeiten). Lediglich für die Berechnung des Wärmeinhalts, der Schichtungsstabilität und der Thermoklinentiefe werden die Messdaten räumlich interpoliert.
- Für weitere Analysen (beispielsweise zur Berechnung von langfristigen Trends) können die Messdaten bei Bedarf räumlich und zeitlich interpoliert werden. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die verwendeten Methoden adäquat und die Lücken nicht zu gross sind. Zeitliche Lücken bis zu einem Monat können z.B. mit statistischen Methoden interpoliert werden.

Wartungsarbeiten und Kosten

Die meisten Komponenten der Messkette haben eine hohe Lebensdauer und benötigen kaum Wartung (Auftriebsboje, PVC-Platten, Stahlseil, Befestigungen, Gewichte). Allenfalls können diese Komponenten von Algenbewuchs gereinigt werden. Der Algenbewuchs hat aber keinen nennenswerten Einfluss auf die Temperaturmessungen. Die Batterien der Temperaturlogger müssen regelmässig überprüft und gegebenenfalls ersetzt werden, um die Verlässlichkeit der Messungen zu gewährleisten. Die meisten Hobo-Logger benötigten während des Pilotprojekts (etwa 3.5 Jahre) jedoch keine neue Batterie.

Im Folgenden werden die voraussichtlichen Kosten zusammengefasst:

Anschaffung

- | | |
|--|------------------------|
| - Hobo-Logger (typischerweise 5 – 10 Stück pro Messkette): | 160 CHF/Stück |
| - Hobo Pegellogger | 400 CHF/Stück |
| - Zubehör (Auftriebsboje, Ketten, PVC-Schilder, Gewicht): | 100 CHF pro Messkette |
| - Optional: Sauerstofflogger im Tiefenwasser: | 1500 CHF pro Messkette |
| - Kalibrationsbad + Referenzsonde: | 15'000 CHF |

Wartungsarbeiten

- 6-monatliche Kontrolle, Reinigung, Kalibration, Datenkontrolle
 - o 0.5 – 1 Arbeitstag für 2 Personen im Feld (je nach Anfahrtsweg)
 - o 1 Arbeitstag für 1 Person im Labor/Büro (Kalibration Temperaturlogger, Datenkontrolle und –korrektur (mittleren Bias abziehen)
 - o Benützung Auto + geeignetes Gummiboot

Option Sauerstofflogger

- Ein Sauerstofflogger im Tiefenwasser gibt Aufschluss über die Mischungsdynamik und komplementiert die Temperaturlogger. Die Anschaffung liegt bei ungefähr 1500 CHF (z.B. PME miniDOT) und es empfiehlt sich eine jährliche Kalibration im Labor (kann an der Eawag durchgeführt werden), sowie bei Bedarf beim Hersteller.

Option genauere Temperaturlogger

Der Gebrauch von genaueren, stabileren und teureren Loggern (z.B. solo-T von RBR mit $\pm 0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$) würde eine jährliche (anstatt 6-monatliche) Kontrolle ermöglichen. Ausserdem wären keine PVC-

Schilder zur Beschattung nötig, da Versuchsmessungen zeigten, dass diese Logger durch die Sonneneinstrahlung nur minimal beeinflusst werden. Die Kosten für solche Logger liegen bei ungefähr 650 CHF. Die zusätzlichen Anschaffungskosten werden durch niedrigere Personalkosten sowie die längere Haltbarkeit der Logger innerhalb weniger Jahre wettgemacht. Dazu ist die Datenqualität besser, was eine bessere Verfolgung der Mischungsdynamik erlaubt.

4.3 Messkette Hallwilersee

Beschreibung Messsystem

Im Hallwilersee wurde im September 2022 eine Messboje mit 18 Thermistoren der Firma Soundnine aus den USA eingesetzt (Abbildung 27). Folgendes sind die Spezifikationen der Sensoren:

- Anfangsgenauigkeit: $\pm 0.005 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Typische Drift: $0.005 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$
- Reaktionszeit: $< 1 \text{ Sekunde}$
- Messintervall: 10 Minuten Momentanwert (Intervall kann geändert werden)
- Sensoren-Batterie: 3 Jahre bei 10 Minuten Messintervall (Sensoren müssen für Batteriewechsel eingeschickt werden)

Die einzelnen Sensoren werden durch austauschbare Batterien gespeist und können in beliebigen Abständen auf dem Stahlkabel befestigt werden (Abbildung 27). Der Controller-Akku wird von den Solarpanels geladen und garantiert die Datenübertragung von den Sensoren zur Messboje und von der Messboje zum Server. Die Datenübertragung zwischen den Thermistoren und der Messboje erfolgt per Induktion über das Stahlkabel, während die Übertragung von der Messboje zum Server per GSM (Mobilfunknetz) geleitet wird.

Mess-, sowie Übertragungsintervall der Daten können via Laptop und serieller Verbindung auf den Messcontroller übertragen werden. Die Kommunikation mit dem Controller wird in den Dokumenten von Soundnine erklärt, benötigt aber idealerweise etwas Erfahrung mit Controllern/Programmieren.



Abbildung 27: Einzelne gelieferte Sensoren (links oben), Innenleben des Controllers mit Akku-Batterien (links unten) und Vorbereitung Messboje mit Befestigen der Sensoren (rechts)

Die Messkette von Soundnine benötigt für die Einsetzung ein Arbeitsboot mit einer Winde und zwei Personen (Abbildung 28). Für die Verankerung wurde ein 65 kg-Stahlanker gewählt. Für das Heben des Ankers wird eine Winde mit einer Maximallast von idealerweise etwa 100 – 150 kg benötigt, da der Anker aus dem Sediment gelöst werden muss. Eine 5 Meter lange Stahlkette verbindet den Anker und das Stahlseil mit Sensoren. Diese Kette stellt sicher, dass die Sensoren auch bei niedrigem Wasserstand nie am Seegrund liegen und dass die Messboje bei hohem Wasserstand nicht unter die Wasseroberfläche gezogen wird.

In Zusammenarbeit mit dem Kanton Aargau wurden an der Messkette zusätzlich drei Sauerstofflogger befestigt in 35, 40 und 43 m Tiefe. Die Messungen dieser Logger werden nicht automatisch übermittelt, sondern müssen während der Wartungsarbeiten ausgelesen werden. Die Firma Soundnine bietet auch kleine CTDO-Instrumente (Leitfähigkeit, Temperatur, Tiefe, Sauerstoff) an, welche Temperatur, Leitfähigkeit und Sauerstoff in einer bestimmten Tiefe messen und ebenfalls automatisch übermitteln. Geplant ist, die Sauerstofflogger durch CTDO-Instrumente von Soundnine zu ersetzen.



Abbildung 28: Messkette Hallwilersee: 65-kg Stahlanker (links oben), Messboje im Wasser (links unten), Einsetzung der Boje und Sensoren an Stahlseil (Mitte), Schema der Verankerung mit Boje, Sensoren an Stahlseil und Anker (aber ohne Metallkette zwischen Messkette und Anker). Fotos und Schema: BAFU.

Datenqualität

Die (relative) Genauigkeit der Sensoren kann im Winter ermittelt werden, wenn der See komplett gemischt ist. Dies war zum Beispiel im Januar 2024 mehrmals der Fall. Das Profil vom 16. Januar 2024 (Abbildung 29, rechts) zeigt, dass alle Sensoren im Bereich von etwa ± 0.02 °C liegen (absoluter Range ist etwa 0.04 °C). Dies ist etwas höher als spezifiziert (± 0.005 Anfangsgenauigkeit und 0.005 °C Drift pro Jahr) aber zufriedenstellend und ausreichend für das genaue Verfolgen der Mischungs- und Schichtungsprozesse, welche besonders hohe Anforderungen an die Messgenauigkeit stellen.

Die absolute Messgenauigkeit kann nicht beurteilt werden, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass alle Sensoren eine Drift mit demselben Vorzeichen (+ oder -) aufweisen. Informationen über die absolute Messgenauigkeit werden nach der ersten Kalibration der Sensoren bei der Firma Soundnine vorliegen.

Es ist aber nicht zu erwarten, dass alle Sensoren dieselbe Drift aufweisen, und so liegt die absolute Genauigkeit wohl ähnlich hoch wie die relative Genauigkeit.

Ziel des Monitorings ist es, eine Messgenauigkeit von $\pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu garantieren (siehe Anhang A). Dafür sollten die Sensoren etwa alle 1.5 – 2 Jahre zur Kalibration eingeschickt werden. Falls einige Sensoren nahe an oder über der Grenze von $\pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegen (nur sichtbar während Wintermischung), sollten die Sensoren bald zur Kalibration geschickt werden. Falls nur einzelne Sensoren klar darüber liegen, können diese ersetzt werden. Die ersetzten Sensoren können bei der nächsten Kalibration eingeschickt werden.

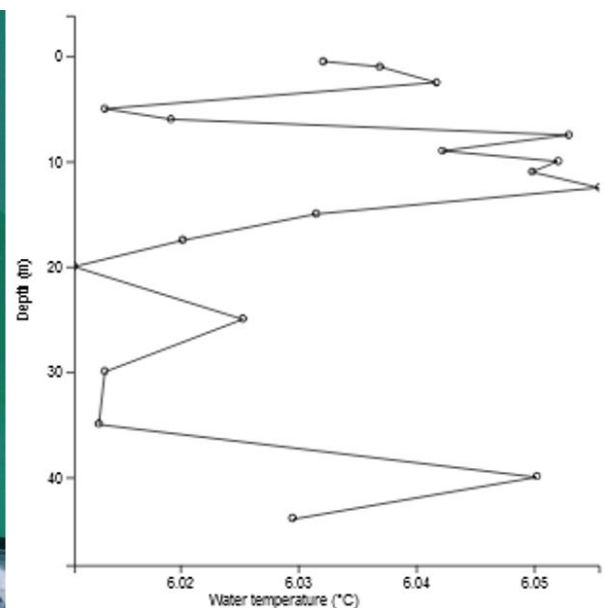
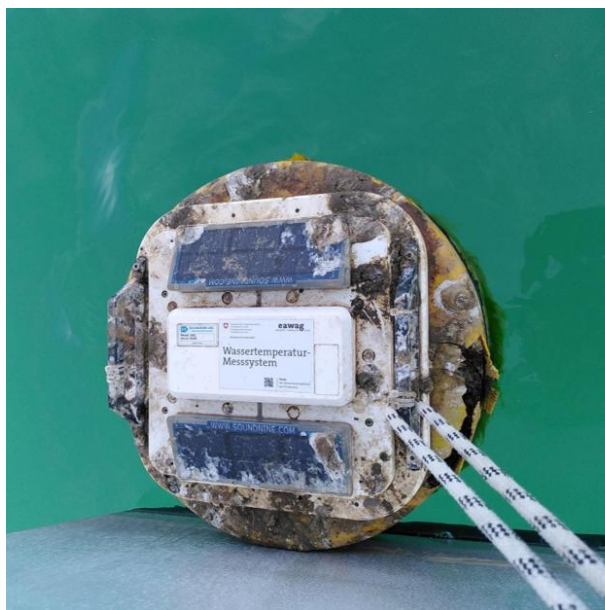


Abbildung 29: Messboje Hallwilersee (von Soundnine) im Oktober 2023 mit (wahrscheinlich) durch Vögel verursachten Schäden nach einem Jahr Einsatz (links), komplett gemischtes Temperaturprofil im Hallwilersee im Januar 2024. Alle Sensoren liegen innerhalb von ca. $\pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rechts)

Die Temperatur wird alle 10 Minuten gemessen und die Messwerte werden alle 2 Stunden per Mobilfunknetz an einen ftp-Server der Eawag übermittelt. Soundnine stellt ein rohes oder ein bearbeitetes Datenformat zur Verfügung. Im bearbeiteten Format sind fehlbare Messwerte mittels einer «Check-Summen-Berechnung» aussortiert, während dies im Rohformat vom Benutzer (Eawag, Kanton oder BAFU) selbst gemacht werden muss. Solche fehlbaren Messwerte entstehen v.a. durch Übermittlungsfehler vom Sensor zur Messboje, sind aber selten.

Datenbearbeitung

- Fehlende oder falsch übermittelte Messdaten könnten automatisch räumlich interpoliert werden falls gewünscht. Im Hallwilersee zum Beispiel ist die Datenübermittlung vom Sensor in 40 m Tiefe zur Messboje etwa einmal pro Woche fehlerhaft. Wir raten aber eher davon ab, solch fehlende Werte zu interpolieren und schlagen vor, sie als NaN (not a number) zu klassifizieren. Interpoliert werden die Messwerte nur für:
 - die Berechnung von physikalischen Indikatoren wie Wärmeinhalt und Stabilität der Schichtung
 - die Darstellung auf Datalakes (Einstellung «y-linear» in den Display Options) und somit auf kantonalen/BAFU-Webseiten

Falls derselbe Sensor sehr oft fehlerhafte Messwerte übermittelt, sollte dieser zeitnah inspiziert und gegebenenfalls ersetzt werden.

- Zeitliche Lücken aller Sensoren werden typischerweise durch Wartungsarbeiten verursacht. Diese Lücken betragen normalerweise etwa 1 – 4 Stunden, sie können bei zeitaufwendigeren Arbeiten aber auch mehrere Wochen betragen. Prinzipiell könnten solche Lücken zeitlich interpoliert werden. Wir raten aber wiederum eher von einer Interpolation der Rohdaten ab, da sich die Messwerte innerhalb dieser Zeit stark ändern können (durch starke Sonneneinstrahlung oder interne Wellen zum Beispiel). Falls gewünscht, können die Messwerte später im Rahmen von Analysen (langfristige Trends) interpoliert werden. Dafür bieten sich z.B. das an der Eawag entwickelte numerische Seenmodell «Simstrat» oder statistische Methoden an. Es sollte möglichst darauf geachtet werden, dass Datenlücken einen Monat nicht übersteigen.
- Fehlerhafte Sensoren können nur von geschulten Personen mittels Konsultation der Live-Grafiken zuverlässig erkannt werden. Es können aber Grenzwerte definiert werden, die zu automatischen Alarmen führen, welche manuell überprüft werden. Dazu benützt man am besten den Fakt, dass die Temperatur im Normalfall monoton abnimmt mit der Tiefe (Ausnahme: invers geschichtete Seen im Winter). Falls die Messwerte eines Sensors als fehlerhaft erkannt werden, sollte der Sensor:
 - o in einem speziellen Text-File als fehlerhaft vermerkt werden (siehe Abbildung 30). Dieses File wird vom momentan eingesetzten Datenbearbeitungsskript gelesen und benutzt, um fehlerhafte Messwerte zu maskieren.
 - o idealerweise zeitnah ausgetauscht werden (1 – 2 Wochen)

In jedem Fall sollten alle Messwerte im Rahmen einer jährlichen Datensichtung von Spezialisten validiert werden.

- Momentan werden die Temperaturmessungen benutzt, um automatisch physikalische Indikatoren wie die Mischungstiefe, den Wärmehalt oder die Stabilität der Schichtung zu berechnen. Diese werden zusammen mit den Temperatur-Rohdaten auf die Datenplattform Datalakes geladen. Dies geschieht ebenfalls mithilfe der in Python programmierten Datenbearbeitung deren Quellcode hier eingesehen werden kann (auf «reproduce» klicken): <https://www.datalakes-eawag.ch/datadetail/1046>

```
start;stop;parameter;sensor_id;comments
20230329 10:00:00;20230329 12:00:00;All;All;Maintenance
20231012 10:00:00;20231012 12:30:00;All;All;Maintenance
20231108 10:00:00;20231108 12:30:00;All;All;Maintenance
20231012 10:00:00;20231108 12:30:00;All;[4,6,7,15];Sensors moved
20240322 09:30:00;20240322 11:30:00;All;All;Maintenance
20250328 09:00:00;20250328 16:00:00;All;All;Maintenance
```

Abbildung 30: Inhalt des Text-Files, welches definiert, welche Sensoren in welchem Zeitabschnitt ungültige Messwerte liefern. In diesem Beispiel für den Hallwilersee sind vier Datenlücken wegen Wartungsarbeiten ersichtlich, welche jeweils etwa 2-3 Stunden dauern (März, Oktober und November 2023 und März 2024). Dazu vier ungültige Sensoren von Oktober bis November 2023, weil ihre Tiefen versehentlich verändert wurden im Oktober 2023 und umfassende Wartungsarbeiten im März 2025, welche sieben Stunden in Anspruch nahmen.

Zusammenfassung Datenbearbeitung

- Erkennen und Markieren (NaN) von fehlerhaften Messwerten durch ca. wöchentliche Kontrolle der Live-Daten
- Jährliche Datensichtung: Entfernen von nicht-physikalischen Messwerten

- Keine zeitliche Interpolation von fehlenden Messwerten der gesamten Messkette (z.B. wegen Wartungsarbeiten)
- Keine räumliche Interpolation von fehlenden Messwerten der gesamten Messkette (z.B. wegen Wartungsarbeiten). Lediglich für die Berechnung des Wärmeinhalts, der Schichtungsstabilität und der Thermoklinentiefe werden die Messdaten räumlich interpoliert.

Wartungsarbeiten und Kosten

Wegen ihrer horizontalen Lage werden die Solarpanels der Messstation von Soundnine schnell durch Vogelkot verschmutzt. Eine Reinigung alle 1-2 Monate ist deswegen sinnvoll und kann gut mit den monatlichen kantonalen Probenahmen kombiniert werden. Der Kanton Aargau führt diese Reinigungen seit Anfang des Pilotprojekts im Rahmen der monatlichen Probenahmen durch.

Die weitere Wartung umfasst die oberflächliche Reinigung der Sensoren mit einem Tuch. Dies kann durchgeführt werden, indem die Sensoren an die Oberfläche geholt werden. Zu diesem Zweck ist ein Seil am Anker befestigt und an der Messboje festgebunden. Dieses Seil kann von der Messboje losgebunden und an einer Winde befestigt werden, um den Anker hochzuziehen und so die Sensoren zu reinigen oder gegebenenfalls auszutauschen.

Nach etwa 1.5 Jahren Betrieb zeigt die Hülle der Messboje erkennbare Schäden (Abbildung 29, links). Die Hülle und der Schaumstoff im Innern wurden sehr wahrscheinlich von Vögeln verbissen. Als Gegenmassnahme wurden die Löcher behelfsmässig versiegelt und Kabelbinder/Draht zum Vertreiben der Vögel eingesetzt. Nach etwa 2.5 Jahren Betrieb wurde der Bojenkörper im März 2025 durch eine laut Hersteller langlebigere Variante ersetzt. Dafür musste. Die Kosten waren mit etwa 2 kCHF relativ gering.

Die Soundnine-Sensoren könnten auch mit einer grösseren Messboje (z.B. analog Murtensee-Messboje) kombiniert werden. Dies würde das Messsystem witterungsbeständiger und dauerhafter machen, dafür aber die Verankerung der Boje und die Wartung verändern (siehe Abschnitt über Murtensee).

Die Kosten der Wartungsarbeiten sind im nächsten Abschnitt dargelegt. Grob geschätzt betragen die voraussichtlichen langfristigen jährlichen Kosten des momentan installierten Messsystems ungefähr 12 – 20 kCHF (oder ca. 13 – 24 kCHF pro Jahr, wenn zu einer grösserer Messboje gewechselt wird, siehe Abschnitt Murtensee). Dies beinhaltet:

- Anschaffung und Amortisation der Messboje
- Anschaffung und Amortisation der Messkette + 1 Satz Ersatz-Sensoren, welcher eingesetzt wird, wenn der erste Satz Sensoren in Kalibration/Reparatur ist. Der Satz Ersatz-Sensoren kann mit dem Murtensee geteilt werden.
- Kalibration der Sensoren in den USA (ungefähr alle 1.5 – 2 Jahre)
- Diverses Ersatzmaterial wie Messkabel, Anoden und Schäkel
- Überwachung der Messdaten, Qualitätssicherung, Problembehebung, automatische Berechnung von physikalischen Indikatoren (Mischungstiefe, Wärmeinhalt und weitere), Aufschaltung der Daten auf Datalakes

Der Grund für die grosse Unsicherheit der Kostenschätzung liegt vor allem bei der Unsicherheit bezüglich der Lebensdauer der Messboje und der Sensoren, sowie der anfallenden Wartungsarbeiten. Bezüglich Wartungsarbeiten wird im optimistischen Szenario mit keinen grösseren Problemen und im pessimistischen Szenario mit zwei grösseren Interventionen pro Jahr gerechnet.

Nicht in dieser groben Kostenschätzung enthalten ist die monatliche Reinigung der Solarpanels durch den Kanton. Zusätzliche Kosten könnten durch grössere Defekte an der Messboje (ausgelöst durch

Stürme oder Vandalismus) entstehen. Tabelle 5 fasst die mittleren jährlichen Kosten für die Messstation im Hallwilersee zusammen.

Tabelle 5: Wartungsarbeiten und Kosten Hallwilersee (basierend auf Herstellerangaben und 2 Jahren Messerfahrung)

	Preis [kCHF]	Lebensdauer [Jahre]		Jährliche Kosten [kCHF/Jahr]	
		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
Controller und Sensoren	17	10	5	1.70	3.40
Bojenhülle	1.5	5	3	0.30	0.50
Verankerung	2	20	10	0.10	0.20
Zubehör (Stahlseil, Batterien, Anoden)	0.5	3	2	0.17	0.25
Divers (z.B. Ersatz von defekten Sensoren)	1	2	1	0.50	1.00
Kalibration	2.5	2	1.5	1.25	1.67
Satz Ersatz-Sensoren (geteilt mit Kt. FR)	7.5	10	5	0.75	1.50
Total Material				4.8	8.5
1 O2-Logger	6	10	5	0.6	1.2
1 Ersatz-O2-Logger (geteilt mit Kt. FR)	3	10	5	0.3	0.6
Kalibration O2-Logger	1.5	2	1.5	0.8	1.0
Total Material O2 (optional)				1.7	2.8
Total Expertenarbeit (inkl. MWST)				7.1	11.7
Total Expertenarbeit O2 (inkl. MWST)				0.8	0.8
Total (ohne O2)				11.9	20.2
Total (mit O2)				14.3	23.8

4.4 Messkette Murtensee

Im Murtensee wurde im Juli 2022 eine Messboje der Firma Mobilis (Frankreich) kombiniert mit einer Messkette der Firma RBR (Kanada) mit 24 Sensoren eingesetzt (Abbildung 31). Folgendes sind die Spezifikationen der Sensoren:

- Anfangsgenauigkeit: $\pm 0.005 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Typischer Drift: $0.002 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$
- Reaktionszeit: 30 Sekunden
- Messintervall: 10 Minuten Mittelwert (Intervall kann geändert werden)
- Sensoren-Batterie: keine (Sensoren werden durch Messbojen-Akku versorgt)

Der Messbojen-Akku (100 Ah Kapazität) wird von den Solarpanels geladen und speist die Sensoren, die Datenübertragung von den Sensoren zur Messboje und von der Messboje zum Server. Die Datenübertragung zwischen den Thermistoren und der Messboje erfolgt über die Datenleitung des Messkabels, während die Übertragung von der Messboje zum Server per GSM (Mobilfunknetz) geleitet wird.



Abbildung 31: Vorbereitung der Messboje durch Mitarbeiter der Firma Intrastub (links oben), Ankergewicht (oben rechts, Foto: Intrastub), Innenleben der Controller-Box (links unten), eingesetzte Messboje (rechts unten, Foto: T. Herold)

Mess-, sowie Übertragungsintervall der Daten müssen auf dem Controller (Campbell CR6) eingestellt werden. Diese Einstellung kann über eine serielle Verbindung mit einem Laptop gemacht werden oder ferngesteuert über das Mobilfunknetz (Campbell connect service).

Die Messboje ist an zwei Punkten an 300 kg Betongewichten verankert (Abbildung 31 rechts oben und Abbildung 32 links). Um die Messkette auszutauschen, kann der metallene Oberteil der Boje inkl. Solarpaneele abgeschraubt und vor Ort mit einem Boots-Kran angehoben werden. Falls nötig kann die Messboje von den Ankerseilen getrennt und in den Hafen gebracht werden. Dafür müssen die Ankerseile von Tauchern gleich unterhalb der Messboje getrennt werden. Alternativ können die Ankerseile ohne Taucher in etwa 5 m Tiefe getrennt werden. In dieser Tiefe befindet sich auf beiden Seiten der Übergang von einer Metallkette zur einem Nylonseil mittels Karabiner-Verbindung. Diese Verbindung kann mit einem bereits vorhandenen Seil per Winde hochgezogen und getrennt werden.

Im Mai 2024 wurde die RBR-Messkette durch Sensoren der Firma Soundnine ersetzt (siehe Kapitel Hallwilersee für Informationen zu dieser Messkette) und mit einem speziellen Modem von Soundnine mit dem Bojen-Controller verbunden. Die Messungen verlaufen seitdem problemlos und mit besserer Datenqualität (siehe nächster Abschnitt).

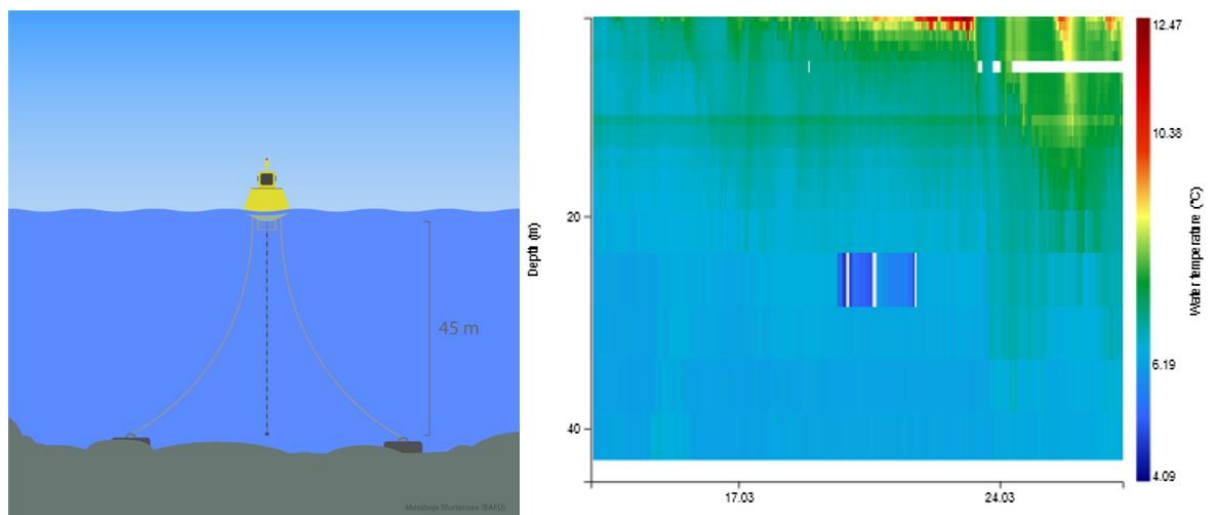


Abbildung 32: Verankerung der Murtensee-Messboje an zwei Punkten (links), Mangelhafte Datenqualität mit Datenlücken und temporären Drifts bei 6, 26 und 45 m (rechts)

Datenqualität

Die Datenqualität der RBR-Messkette war im Vergleich zu den Spezifikationen mangelhaft. Das Ziel von ± 0.02 °C konnte nicht eingehalten werden. Folgende Probleme sind in knapp 2 Jahren aufgetreten:

- Datenlücken (temporär bei 6 und 26 m und durchgehend bei 45 m seit September 2023)
- Temporäre Drifts (6, 26 und 45 m) von bis zu 4 °C (Abbildung 32 rechts)
- Genauigkeit generell schlechter als angegeben: Abweichung zwischen Sensoren bis zu 0.3 °C im gemischten Zustand, v.a. bei 11, 12 und 13 m Tiefe (sichtbar in Abbildung 32 rechts als grüne Streifen)
- Nach etwa 1.5 Jahren erfüllten nur etwa die Hälfte der Sensoren die Spezifikationen

Dazu kommt das Problem, dass die Sensoren der Messkette nicht individuell ausgetauscht werden können. Es wird daher vom Gebrauch dieser Art Messkette abgeraten.

Mittlerweile wurde die Messkette durch Sensoren der Firma Soundnine ersetzt. Die Genauigkeit dieser Sensoren hat sich im Hallwilersee als sehr gut erwiesen.

Datenbearbeitung (analog Hallwilersee)

- Fehlende oder falsch übermittelte Messdaten können automatisch räumlich interpoliert werden falls gewünscht. Im Murtensee beispielsweise wurden die Messwerte in 6, 26 und 44 m Tiefe rasch als fehlerhaft identifiziert (siehe Abschnitt Datenqualität). Wir raten aber eher davon ab, solch fehlerhafte Werte zu interpolieren und schlagen vor, sie als NaN (not a number) zu klassifizieren. Interpoliert werden die Messwerte nur für:
 - o die Berechnung von physikalischen Indikatoren wie Wärmeinhalt und Stabilität der Schichtung
 - o die Darstellung auf Datalakes (Einstellung «y-linear» in den Display Options) und somit auf kantonalen/BAFU-Webseiten

Falls derselbe Sensor sehr oft fehlerhafte Messwerte übermittelt, sollte dieser zeitnah inspiziert und gegebenenfalls ersetzt werden (nicht möglich bei Messkette von RBR).

- Zeitliche Lücken aller Sensoren werden typischerweise durch Wartungsarbeiten verursacht. Diese Lücken betragen normalerweise etwa 1 – 4 Stunden, sie können bei grösseren Problemen aber auch mehrere Wochen betragen. Prinzipiell könnten solche Lücken zeitlich interpoliert werden. Wir raten aber wiederum eher von einer Interpolation der Rohdaten ab, da sich die Messwerte innerhalb dieser Zeit stark ändern können (durch starke Sonneneinstrahlung oder interne Wellen zum Beispiel). Falls gewünscht, können die Messwerte später im Rahmen von Analysen (langfristige Trends) interpoliert werden. Dafür bieten sich z.B. das an der Eawag entwickelte numerische Seenmodell «Simstrat» oder statistische Methoden an. Es sollte möglichst darauf geachtet werden, dass Datenlücken einen Monat nicht übersteigen.
- Fehlerhafte Sensoren können nur von geschulten Personen mittels Konsultation der Live-Grafiken zuverlässig erkannt werden. Es können aber Grenzwerte definiert werden, die zu automatischen Alarmen führen, welche manuell überprüft werden. Dazu benützt man am besten den Fakt, dass die Temperatur im Normalfall monoton abnimmt mit der Tiefe (Ausnahme: invers geschichtete Seen im Winter). Falls die Messwerte eines Sensors als fehlerhaft erkannt werden, sollte der Sensor:
 - o in einem speziellen Text-File als fehlerhaft vermerkt werden (siehe Abbildung 30). Dieses File wird vom momentan eingesetzten Datenbearbeitungsskript gelesen und benutzt, um fehlerhafte Messwerte zu erkennen.
 - o idealerweise zeitnah ausgetauscht werden (1 – 2 Wochen)

In jedem Fall sollten alle Messwerte im Rahmen einer jährlichen Datensichtung von Spezialisten validiert werden.

- Momentan werden die Temperaturmessungen benutzt, um automatisch physikalische Indikatoren wie die Mischungstiefe, der Wärmeinhalt oder die Stabilität der Schichtung zu berechnen. Diese werden zusammen mit den Temperatur-Rohdaten auf die Datenplattform Datalakes geladen. Dies geschieht mit einem in Python programmierten Workflow dessen source code hier eingesehen werden kann (auf «reproduce» klicken): <https://www.datalakes-eawag.ch/datadetail/956>

Zusammenfassung Datenbearbeitung

- Erkennen und Markieren (NaN) von fehlerhaften Messwerten durch ca. wöchentliche Kontrolle der Live-Daten
- Jährliche Datensichtung: Entfernen von nicht-physikalischen Messwerten
- Keine zeitliche Interpolation von fehlenden Messwerten der gesamten Messkette (z.B. wegen Wartungsarbeiten)

- Keine räumliche Interpolation von fehlenden Messwerten der gesamten Messkette (z.B. wegen Wartungsarbeiten). Lediglich für die Berechnung des Wärmeinhalts, der Schichtungsstabilität und der Thermoklintentiefe werden die Messdaten räumlich interpoliert.

Wartungsarbeiten und Kosten

Nach der Umrüstung zu Soundnine-Sensoren beinhaltet die Wartung folgende Punkte:

- Visuelle Qualitätskontrolle der Messdaten
- Manuelle Reinigung der Solarpanels (2 – 4 x jährlich bei vertikalen Panels)
- Ersatz von defekten Sensoren
- Kalibration der Sensoren (Einschicken zum Hersteller in den USA)
- Kontrolle/Ersatz der Verankerungsseile

Die geschätzten Kosten dieser Wartungsarbeiten sind im nächsten Abschnitt dargelegt. Grob geschätzt betragen die voraussichtlichen langfristigen jährlichen Kosten einer solchen Messkette ungefähr 13 – 24 kCHF. Dies beinhaltet:

- Anschaffung und Amortisation der Messboje
- Anschaffung und Amortisation der Messkette, sowie einem Satz Ersatz-Sensoren, welche eingesetzt wird, wenn der erste Satz Sensoren in Kalibration/Reparatur ist. Hier könnten Kosten gespart werden, falls die Ersatz-Sensoren mit anderen Seen «geteilt» werden (z.B. Hallwilersee)
- Einsetzung und Wartung der Anker und Ankerseile durch spezialisiertes Unternehmen
- Kalibration der Sensoren in den USA (ungefähr alle 1.5 – 2 Jahre)
- Überwachung der Messdaten, Qualitätssicherung, automatische Berechnung von physikalischen Indikatoren (Mischungstiefe, Wärmeinhalt und weitere), Aufschaltung der Daten auf Datalakes

Zusätzliche Kosten könnten durch grössere Defekte an der Messboje (ausgelöst durch Stürme oder Vandalismus) entstehen. Der Grund für die grosse Unsicherheit der Kostenschätzung liegt vor allem bei der Unsicherheit bezüglich der Lebensdauer der Messboje und der Messsonden. Auch die Schätzungen der langfristigen Kosten der Wartungsarbeiten, sowie der Datenbearbeitung sind unsicher. Bezüglich Wartungsarbeiten wird im optimistischen Szenario mit keinen grösseren Problemen und im pessimistischen Szenario mit zwei grösseren Interventionen gerechnet.

Der Hauptgrund für die höheren Kosten der Messkette im Vergleich zu der Hallwilersee-Messkette ist die grössere und schwerere (aber dauerhaftere) Messboje. Inkl. 2-Punkt-Verankerung bedeutet die schwerere Messboje mehr Aufwand und bedingt den Einsatz eines spezialisierten Tauch-Unternehmens zur Kontrolle und Wartung der Ankerseile (da diese nicht an die Oberfläche gehoben werden können werden). Tabelle 6 fasst die mittleren jährlichen Kosten für die Messstation im Murtensee zusammen.

Tabelle 6: Wartungsarbeiten und Kosten Murtensee (basierend auf Herstellerangaben und 2 Jahren Messerfahrung). Die Kosten der Messboje wurden mit den Angaben von verschiedenen Herstellern abgeschätzt, da die Firma Mobilis keine Zusage zur Veröffentlichung der Kosten gab.

	Preis [kCHF]	Lebensdauer [Jahre]		Jährliche Kosten [kCHF/Jahr]	
		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
Messboje	15	15	10	1.00	1.50
Sensoren	15	10	5	1.50	3.00
Verankerung	10	20	10	0.50	1.00
Satz Ersatzsensoren (geteilt mit Kt. AG)	7.5	10	5	0.75	1.50
Kalibration	2.5	2	1.5	1.25	1.67
Divers (z.B. Ersatz von defekten Sensoren)	1	2	1	0.50	1.00
Kontrolle Verankerung	5	5	3	1.00	1.67
Miete Boot	0.4	0.5	0.5	0.80	0.80
Total Material				7.3	12.1
1 O2-Logger	6	10	5	0.6	1.2
1 Ersatz-O2-Logger (geteilt mit Kt. AG)	3	10	5	0.3	0.6
Kalibration O2-Logger	1.5	2	1.5	0.8	1.0
Total Material O2 (optional)				1.7	2.8
Total Expertenarbeit (inkl. MWST)				6.1	11.5
Total Expertenarbeit O2 (inkl. MWST)				1.2	1.2
Total (ohne O2)				13.4	23.6
Total (mit O2)				16.3	27.6

4.5 Profiler Ägerisee

Beschreibung Messsystem

Im Ägerisee wurde im November 2022 eine Profiling-Messboje der Firma Flydogmarine (Estland) eingesetzt und mit einer Messsonde der Firma Idronaut (Italien) kombiniert. Letztere ist mit Sensoren für Temperatur, Leitfähigkeit, Sauerstoff und, seit November 2023, Algenpigmenten ausgestattet. Folgendes sind die Spezifikationen der Sensoren:

- Anfangsgenauigkeit der Sensoren:
 - o Temperatur: ± 0.002 °C
 - o Leitfähigkeit: ± 0.003 mS/cm
 - o Sauerstoff: ± 0.1 mgO₂/L
- Reaktionszeit: 50 Millisekunden für T und C; 1 Sekunde für O₂
- Messintervall: 1 – 8 Profile pro Tag
- Bojen-Akku: 1440 Wh

Die Sensoren sind praktisch driftfrei, was mit einer jährlichen Kalibration beim Hersteller abgesichert wird.

Der Messbojen-Akku wird von den Solarpanels geladen und speist die Elektronik, die Datenübertragung sowie die Messsonde. Die Messdaten werden per GSM (Mobilfunknetz) von der Messboje zum Server übermittelt. Die Eawag hat auf der Messboje zusätzlich einen Temperatursensor in etwa 30 cm Tiefe befestigt, welcher alle 10 Minuten einen Momentanwert misst. Auch eine Wetterstation wurde installiert, um die im See gemessenen Variablen mit meteorologischen Messgrößen wie Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung und Windverhältnissen korrelieren zu können. Beide zusätzlichen Instrumente werden voraussichtlich nach Ablauf des Pilotprojekts wieder demontiert (könnten aber evtl. auch gegen eine Abgeltung übernommen werden).

Pro Tag verbraucht die Messboje etwa 15 Wh für den Dauerbetrieb sowie 10 Wh pro Profil. An sonnigen Sommertagen erzeugen die Solarpanels mehrere 100 Wh während an nebligen Wintertagen praktisch gar kein Strom erzeugt wird. Im Mittel sind es in den Wintermonaten etwa 30 – 50 Wh/Tag. Dies reicht im Winter durchschnittlich für ein bis zwei Profile täglich, während im Sommer acht Profile gemessen werden (auch 12 bis 16 wären möglich). Um auch bei längeren Nebelperioden mindestens ein tägliches Profil zu gewährleisten, wurde die Anzahl Profile ab November 2023 von acht auf vier, und im Dezember von vier auf zwei reduziert. Danach wurde wöchentlich der Wetterbericht konsultiert, um zu entscheiden, ob eine weitere Absenkung auf nur noch ein tägliches Profil nötig wäre.

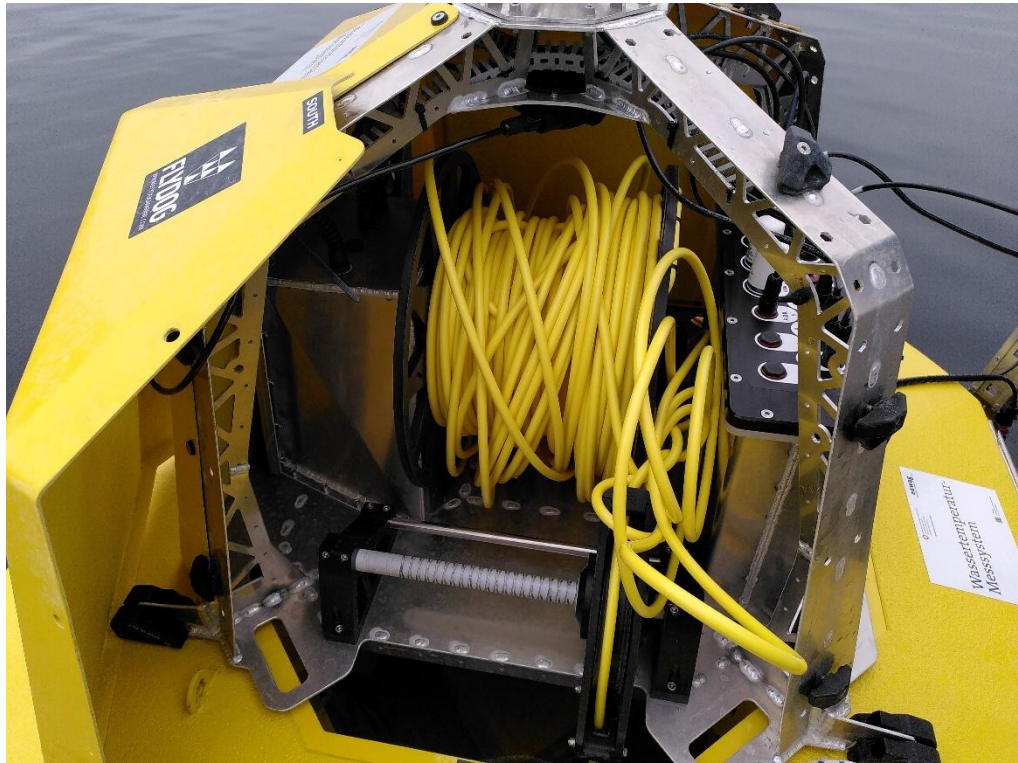


Abbildung 33: Verheddern des Messkabels ausgelöst durch sehr kalte Lufttemperaturen

Bei sehr kalten Temperaturen kann es vorkommen, dass das Messkabel nicht korrekt aufgewickelt wird (Abbildung 33). Der Auslöser des Problems ist sehr wahrscheinlich die Kabelführung, welche unterhalb von etwa $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht zuverlässig funktioniert. Daher wurde in Zusammenarbeit mit dem Hersteller eine (einstellbare) Lufttemperaturgrenze programmiert. Falls die Lufttemperatur (gemessen von der Wetterstation der Messboje) unter diese Grenze fällt, werden keine Profile gemessen. Im Winter 2023/2024 traten so keine Probleme mehr auf (Grenzwert war auf $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingestellt), hingegen konnte an kalten Tagen kein Profil gemessen werden (ca. 5 – 10 Tage pro Winter).

Die Messsonde wird in etwa 60 – 70 m Tiefe gelagert, um Algenwachstum zu vermeiden. Ein Profil dauert etwa 35 Minuten (inkl. Hochziehen). Anlässlich der vierteljährlichen kantonalen Probenahmen im Ägerisee reinigt der Kanton Zug die Messsonde. Es zeigt sich, dass dank der Lagerung in grosser Tiefe auf der Messsonde jeweils nur sehr wenig Biofilm zu finden ist.

Datenqualität

Im Unterschied zu einer Temperaturmesskette misst bei einem Profiler derselbe Temperatursensor über die gesamte Wassertiefe. Dies bedeutet, dass die relative Genauigkeit keine Rolle spielt, da sich ein potenzieller Sensor-Drift identisch auf die gesamte Wassertiefe auswirkt. Die absolute Genauigkeit kann hingegen nur per Vergleich mit kantonalen CTD-Profilen abgeschätzt werden. Deshalb wird die Sonde jedes Jahr zum Hersteller eingeschickt, um die Kalibration zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen. Die Kalibration im November 2023 (ein Jahr nach Einsetzung der Messboje) ergab, dass die Genauigkeit des Temperatur- und des Leitfähigkeitssensors innerhalb der Spezifikationen lag ($\pm 0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\pm 0.003\text{ mS/cm}$). Die Genauigkeit des Sauerstoffsensors wird vor allem durch die Membran bestimmt und kann laut Hersteller bei der Kalibration nicht evaluiert werden, da die Membran zuvor durch eine neue ersetzt wird.

Die Messsonde wurde am 28. September 2023 demontiert und nach Italien zum Hersteller Idronaut geschickt. Am 1. November 2023 wurde die Messsonde wiedereingesetzt. In der Zwischenzeit wurde ein praktisch identisches Ersatzinstrument der l'Explore-Plattform im Genfersee eingesetzt, um Messlücken zu vermeiden. Verglichen mit unserer Messsonde wies dieses Messinstrument aber signifikante Unterschiede in der Sauerstoff- und, überraschenderweise, auch in der Druckmessung auf. Letzteres führte zu Problemen im Betrieb des Profilers, da die Druckmessung benutzt wird, um die Tiefengrenzen eines Profils zu definieren. Die Messsonde stoppte nicht mehr wie vorgesehen bei 79 m, sondern traf auf den Seegrund, was den automatischen Betrieb stoppte. Eine Software-Anpassung löst das Problem jedoch. Bei der jährlichen Überprüfung der l'Explore-Sonde beim Hersteller Idronaut zeigte sich im Nachhinein, dass der Drucksensor defekt war.

Für die Zukunft wird empfohlen, eine eigene Ersatz-Messsonde anzuschaffen. Falls auch im Zugersee ein Profiler installiert wird, kann dieselbe Sonde als Ersatz-Sonde für beide Seen dienen.

Der Profiler misst erst ab einer Wassertiefe von 2 m. Bei Bedarf kann die Messboje mit einem Oberflächensensor ergänzt werden. Im Pilotprojekt wurde etwa 0.5 m unterhalb der Wasseroberfläche ein Temperaturlogger der Firma RBR installiert und mittels Schnittstelle mit der Messboje verbunden. Besonders an sonnigen Frühlingstagen kann die Temperaturdifferenz zwischen der unmittelbaren Oberfläche und 2 m Wassertiefe bis zu 5 °C betragen (Beispiel Mitte April 2024). Falls die Kommunikation der Oberflächentemperatur an die Öffentlichkeit ein Ziel des Monitorings ist, würde sich die Anschaffung eines Oberflächentempersensors sicher lohnen. Weitere Oberflächensensoren wären möglich z.B. mit der Installation einer fixen Multiparametersonde (z.B. Exo von YSI, wie sie der Kanton Tessin im Lago di Lugano und Lago Maggiore seit März 2024 installiert hat). Generell besitzt die Messboje genügend Schnittstellen, um mit weiteren Sensoren ausgestattet zu werden und deren Messdaten zu übermitteln.

Datenbearbeitung

Die Messdaten werden während eines Profils mit einer Frequenz von 4 Hz (also 4 Messungen pro Sekunde) erhoben. Die Absinkgeschwindigkeit der Messsonde ist wegen der unterschiedlichen Kabelmenge auf der Kabeltrommel (und konstanter Drehgeschwindigkeit der Winde) nicht konstant, sondern ändert sich leicht mit der Tiefe. Deswegen ist auch die Anzahl Messungen pro Meter nicht konstant. Um konsistente Profile zu erhalten, werden die Roh-Messungen in den ersten 20 m alle 20 cm interpoliert und zwischen 20 und 79 m alle 50 cm. Weiter berechnet unser Python-Skript automatisch Salinität, Dichte, Stabilität, Wärmehalt und Mischungstiefe. Alle diese Parameter werden auf unserer Datenplattform Datalakes aufgeschaltet: <https://www.datalakes-eawag.ch/datadetail/1077>. Die Skripts zur Datenbearbeitung können unter «Reproduce» abgerufen und heruntergeladen werden.

Für die Berechnung von langfristigen Trends müssen potenzielle Datenlücken gefüllt werden. Solche Datenlücken können wegen Wartungsarbeiten oder wegen zu kalten Tagen ausgelöst werden und können mittels intelligenter Interpolation gefüllt werden. Hier bietet sich z.B. der Gebrauch des an der Eawag entwickelten Seenmodells «Simstrat» an, welches für alle grösseren Seen mit kantonalen Monitoringdaten kalibriert wurde. Des Weiteren könnten statistische Methoden entwickelt und angewendet werden.

Zusammenfassung Datenbearbeitung

- Räumliche (Tiefen-) Interpolation auf konsistente Tiefen. Zum Beispiel alle 20 cm zwischen 0 und 20 m und alle 50 cm zwischen 20 und 79 m (Seegrund)
- Jährliche Datensichtung: Entfernen von nicht-physikalischen Messwerten

- Berechnung von physikalischen Grössen wie Salinität, Dichte, Sauerstoffkonzentration, Schichtungsstabilität, Wärmeinhalt und Mischungstiefe (weitere Möglichkeiten sind: Sauerstoff am Seegrund, hypolimnetischer Sauerstoff, evtl. Warnsystem für Algenblüten)

Wartungsarbeiten und Kosten

C - check and/or clean	Y - years									
M - maintenance	M - months in water									
R - replace	H - hours of profiling									
Component		Designed lifetime (years)	Every three months	Always before deployment	Always before Storing	After year 1	After year 2	After year 3	After year 4	After year 5
Constructional componen	Float Frame	10 Y		C	C	C	C	C	C	C
	Float	10 Y		C	C	C	C	C	C	C
	Upper construction	10 Y	C	C	C	C	C	C	C	C
	Anchor lines	3 Y	C	C	C	C	C	R	C	C
	Anchors	5 Y		C	C	C	C	C	C	R
Wearable parts	Profiling Cable and cablegrip	18 M or 1500H	C	C	C	C	R	C	R	C
	Add-on Sensor Cable	18 M	C	C	C	C	R	C	R	C
	Sensor connector chackles	10 M	C	R	C	R	R	R	R	R
	Cable guide mechanism	20 M or 1500H	C	C	C	C	R	C	R	C
	Winch mechanism	5000H		C		C	C	C	C	R
	Shaft seals	5 Y or 5000H					C			R
	Housing seals	5 Y		C		C	C	C	C	C
	Wave damper	50 M	C	C	C	C	C	C	C	R
	Wave damper rollers	18 M	C	C	C	C	R	C	R	C
Electric components	Sensors	N/A	M	M	M	M	M	M	M	M
	Underwater cable connectors	5 Y	M	M	M	M	M	M	M	M
	Solar panels	10 Y	C	C	C	C	C	C	C	C
	Connectors suffering splash	5 Y		C	C	C	C	C	C	C
	Connectors in housing	10 Y			C	C	C	C	C	C
	Rechargeable battery	5 Y		M	M	M	M	M	M	R
	Non rechargeable battery	5 Y		C	C	C	C	C	C	R
	Controller internal components	10 Y					C			C

Abbildung 34: Wartungstabelle der Messboje (vom Hersteller Flydogmarine)

Abbildung 34 zeigt die vom Hersteller zur Verfügung gestellte Wartungstabelle. Kostspielig sind vor allem das Ersetzen der Verankerungsseile (anchor lines), da diese Arbeit in Zukunft wohl von einem spezialisierten Unternehmen durchgeführt werden muss. Die ursprüngliche Verankerung wurde von Eawag-Personal eingesetzt, was keine externen Kosten verursachte.

Der Hersteller empfiehlt, die Mechanik und die Elektronik der Messboje (nicht aber den Schwimmkörper) nach 5 Jahren nach Estland zu schicken, um grössere Wartungsarbeiten durchzuführen und den Blei-Akku auszuwechseln. Alternativ könnten diese Wartungsarbeiten unter Anleitung von Flydogmarine in der Schweiz geschehen.

Die restlichen Positionen in Abbildung 34 sollten keine allzu grossen Kosten verursachen (falls keine grösseren Defekte auftauchen während des Betriebs). Generell ist die Messboje auch für Ozeanbedingungen ausgelegt und der Verschleiss sollte in einem kleineren See wie dem Ägerisee eher unterdurchschnittlich sein.

Generell sind Angaben zu den Kosten der Unterhaltsarbeiten schwierig abzuschätzen. Zum einen sind Defekte nicht miteingeschlossen und zum anderen hängen die Kosten davon ab, wer die Arbeiten durchführt (Spezialisiertes Unternehmen vs. Eigenarbeit unter Anleitung von Spezialisten). Als grobe

Schätzung haben wir langfristige Gesamtkosten von etwa 21 – 31 kCHF pro Jahr Messbetrieb ausgerechnet. Dies beinhaltet:

- Anschaffung und Amortisation des Messsystems
- Anschaffung und Amortisation der Messsonde, sowie einer Ersatz-Messsonde, welche eingesetzt wird, wenn die erste Messsonde in Kalibration/Reparatur ist. Hier könnten Kosten gespart werden, falls die Ersatz-Messsonde mit anderen Seen «geteilt» wird (z.B. Zugersee)
- Einsetzung und Wartung der Anker und Ankerseile durch spezialisiertes Unternehmen
- Wartung der Messboje, inkl. kleinere Defekte (nicht jedoch grössere Schäden durch Vandalismus o. ä.)
- Überwachung des Systems, Qualitätssicherung, automatische Berechnung von physikalischen Indikatoren (Dichte, Mischungstiefe, Wärmeinhalt und weitere), Aufschaltung der Daten auf Datalakes

Die Kostenschätzung beinhaltet nicht die vierteljährliche Reinigung der Messsonde während der kantonalen Probenahmen.

Der Grund für die grosse Unsicherheit der Kostenschätzung liegt vor allem bei der Unsicherheit bezüglich der Lebensdauer der Messboje und der Messsonden. Auch die Schätzungen der langfristigen Kosten der Wartungsarbeiten, sowie der Datenbearbeitung sind unsicher. Bezüglich Wartungsarbeiten wird im optimistischen Szenario mit keinen grösseren Problemen und im pessimistischen Szenario mit zwei grösseren Interventionen gerechnet.

Als Alternative zur Beauftragung eines spezialisierten Unternehmens in der Schweiz bietet der Hersteller Flydog eine kontinuierliche Überwachung des Messsystems für etwa 2200 Euro pro Jahr inkl. Notfallsupport an. Dies beinhaltet aber nicht die Überwachung und Bearbeitung der Messdaten, sowie den Support vor Ort.

Tabelle 7 fasst die voraussichtlichen Kosten des Betriebs eines Profiling-Messsystems im Ägerisee zusammen.

Tabelle 7: Wartungsaufwand und Kosten Ägerisee (basierend auf Herstellerangaben und 2 Jahren Messerfahrung)

	Preis [kCHF]	Lebensdauer [Jahre]		Jährliche Kosten [kCHF/Jahr]	
		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
Messboje	80	15	10	5.33	8.00
Messsonde (inkl. Leitfähigkeit, O2, Algenpigmente)	27	15	10	1.80	2.70
Verankerung durch spezialisiertes Unternehmen	10	20	10	0.50	1.00
Kalibration Idronaut	1.5	1	1	1.50	1.50
Ersatz-Messsonde (geteilt mit Zugersee)	13.5	15	10	0.90	1.35
Kalibration Trilux	1	2	1	0.50	1.00
Komplett-Service Messboje (inkl. Akku-Ersatz)	5	5	5	1.00	1.00
Diverse Reparaturen	2	2	1	1.00	2.00
Ersatz Messkabel	2	3	2	0.67	1.00
Kontrolle Verankerung	5	5	3	1.00	1.67
Miete Boot	0	1	1	0.00	0.00
Total Material				14.2	21.2
Total Expertenarbeit (inkl. MWST)				8.4	15
Total				22.6	36.2

4.6 Weitere Temperatur-Messstationen

Im Rahmen des Schwesterprojekts «Alpine Wells» (bearbeitet von der Fernerkundungsgruppe von D. Odermatt, Eawag) wurden die alpinen Gletscherseen Steinsee und Rhonensee ebenfalls mit Temperaturmessketten ausgestattet. Anstatt Hobo-Logger wurden dabei genauere Temperaturlogger der Firma RBR eingesetzt. Wegen der dicken Eisschicht im Winter wurde der oberste Sensor bei etwa 2 Meter Tiefe eingesetzt.

Seit etwa 10 Jahren misst die Eawag die Wassertemperatur an verschiedenen Tiefen im Lac de Joux und seit etwa 5 Jahren werden die Wassertemperatur und viele weitere Parameter mit der Léxplora-Plattform im Genfersee erhoben, jedoch nur bis zu einer Tiefe von etwa 90 m (bei einer Maximaltiefe von 312 m).

Seit März 2024 werden Wassertemperaturen auch im Lago Maggiore, sowie im Lago Ceresio (Nordbecken Luganersee) erhoben. In beiden Seen hat der Kanton Tessin Temperaturmessketten bis zu einer Tiefe von 40 m (bei Maximaltiefen von 371 und 288 m respektive) installiert. Die Messdaten sind live auf der Webseite der Tessiner Behörden einsehbar.

Seit Juli 2024 misst im Rheinsee, einem Seitenarm des Bodensee-Untersees, eine YSI-Profiling-Messboje. Diese wurde vom Kanton Thurgau installiert und die Messdaten sollen bald öffentlich gemacht werden.

In Zusammenhang mit der geplanten Seebelüftung soll im Zugersee ab 2025 ebenfalls eine Profiling-Messstation zum Einsatz kommen. Vorzugsweise wird es sich um dasselbe System wie im Ägerisee handeln, um Kosten im Bereich Unterhalt und Kalibration sparen zu können.

Bis auf diejenigen des Rheinsees sind alle Messdaten auf Datalakes, der Datenplattform der Eawag frei verfügbar.

Zusammenfassung Kapitel 4

- Während zweieinhalb Jahren wurden drei Grosse-Messstationen (zwei Messketten und ein Profiler) und während drei Jahren acht Kleinsee-Messketten erfolgreich betrieben.
- Die verwendeten Hobo-Logger bewährten sich mit guter Genauigkeit und Verlässlichkeit. Für ein langfristiges Temperatur-Monitoring empfehlen wir die teureren, aber genaueren RBR-Logger. Auf lange Frist spart dies Kosten wegen selteneren Kalibrations- und Wartungsarbeiten.
- Die Messkette im Hallwilersee funktionierte über zwei Jahre nahezu wartungsfrei. Der Profiler im Ägerisee ebenfalls, ausser bei sehr kalten Lufttemperaturen. Die störungsanfällige Messkette im Murtensee wurde im Mai 2024 durch eine Messkette der Firma Soundnine (analog Hallwilersee) ausgetauscht, was die Datenqualität wesentlich verbesserte. Zudem wurde so die Kompatibilität der Messkette der Firma Soundnine mit einem Standard-Datenlogger getestet.
- Ein Profiler ist das optimale Messsystem falls zusätzliche Messparameter wie Sauerstoff, Leitfähigkeit oder Algenpigmente gewünscht werden. Anderenfalls ist eine Messkette der Firma Soundnine kombiniert mit einem herkömmlichen Datenlogger eine kostengünstige Alternative
- Während der Laufzeit des Projekts wurden durch kantonale Fachstellen weitere Messstationen im Lago Maggiore und Lago Ceresio (Kanton Tessin) und im Rheinsee (Kanton Thurgau) installiert.

5. Datenverfügbarkeit und Visualisierung

5.1 Hochaufgelöste Messstationen

Die automatischen Messstationen im Hallwiler-, Murten- und Ägerisee senden die Messdaten an einen FTP-Server der Eawag. Automatisch aufgerufene Daten-Verarbeitungsskripte holen die Messdaten periodisch ab und verarbeiten sie (inkl. Qualitätskontrolle). Diese Skripts sind in der Programmiersprache «Python» geschrieben und auf «Github» abgelegt. Github ist ein Online-Tool zur Versionskontrolle, welches heute in der Softwareentwicklung Standard ist. Mehrere Personen können die Skripte bearbeiten und weiterentwickeln. Nach einer Kontrolle durch die verantwortliche Person (hier J. Runnalls) werden die Änderungen von Github auf den Server kopiert, wo die automatische Datenverarbeitung läuft.

Nach der Verarbeitung der Messdaten werden diese im «netCDF»-Format auf einem S3-Bucket gespeichert und im Text-Format direkt ans BAFU geschickt. Die Messdaten im S3-Bucket können mit der an der Eawag entwickelten Online-Datenplattform «Datalakes» verbunden werden. So sind jederzeit alle Messdaten visualisierbar und zum Herunterladen verfügbar. Dazu sind alle Metadaten erfasst, wie z.B. die Koordinaten und die Genauigkeiten der Messungen. Auch die Verarbeitungsskripte können unter «Reproduce» aufgerufen werden. So sind alle Bearbeitungsschritte der Daten öffentlich und können von allen Interessierten nachvollzogen werden. Auch können die Skripte von Dritten übernommen werden, um ihre eigenen Daten zu verarbeiten.

Abbildung 35 zeigt einen Screenshot der Visualisierung der Wassertemperaturdaten im Hallwilersee im November 2024. Zusätzlich zu den in diesem Projekt erhobenen Daten werden viele andere Messungen und Simulationen in Seen in Datalakes erfasst und sind so zentral verfügbar.

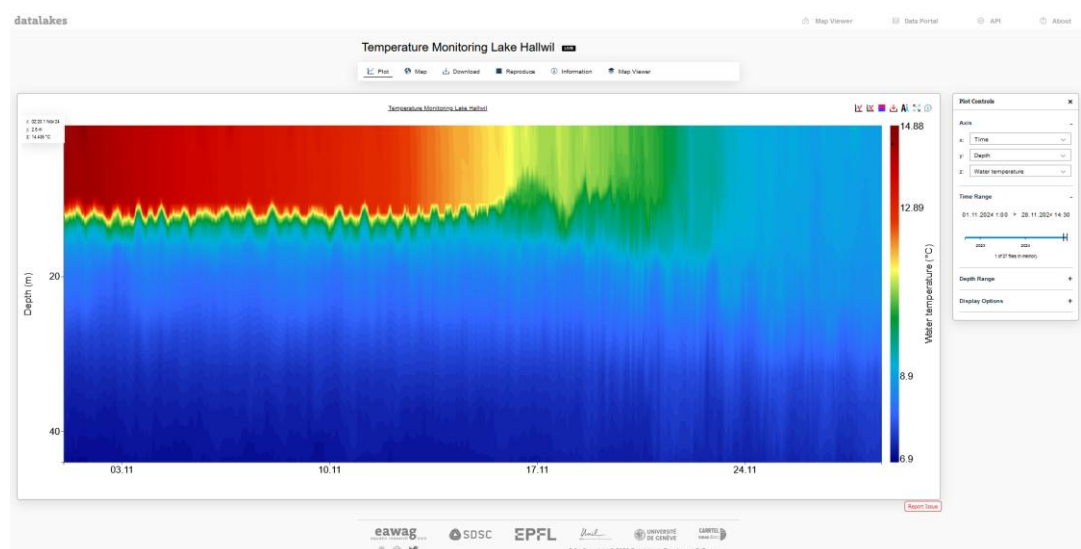


Abbildung 35: Screenshot der Temperaturdaten der Messstation im Hallwilersee auf der Datenplattform «Datalakes». Der Ausschnitt zeigt die Wassertemperatur im November 2024 und kann unter <https://www.datalakes-eawag.ch/datadetail/1046> aufgerufen werden.

Die Visualisierungen von Datalakes können auch auf externen Webseiten eingebunden werden. So wurde für die Kleinseen des Pilotprojekts die Webseite «[Seetemperaturen Eawag](#)» aufgeschaltet. Die enthaltenen Grafiken werden von Datalakes generiert und sind mit einer kurzen Interpretation versehen (Abbildung 36). Wir hatten an einigen der Kleinseen Schilder mit QR-Codes angebracht,

welche direkt zum entsprechenden See auf der Webseite führen (Abbildung 37 zeigt das Beispiel Inkwilensee). Die Idee dahinter ist, dass alle interessierten Personen direkt Zugang zu den Messdaten und zu den Erklärungen dazu haben.

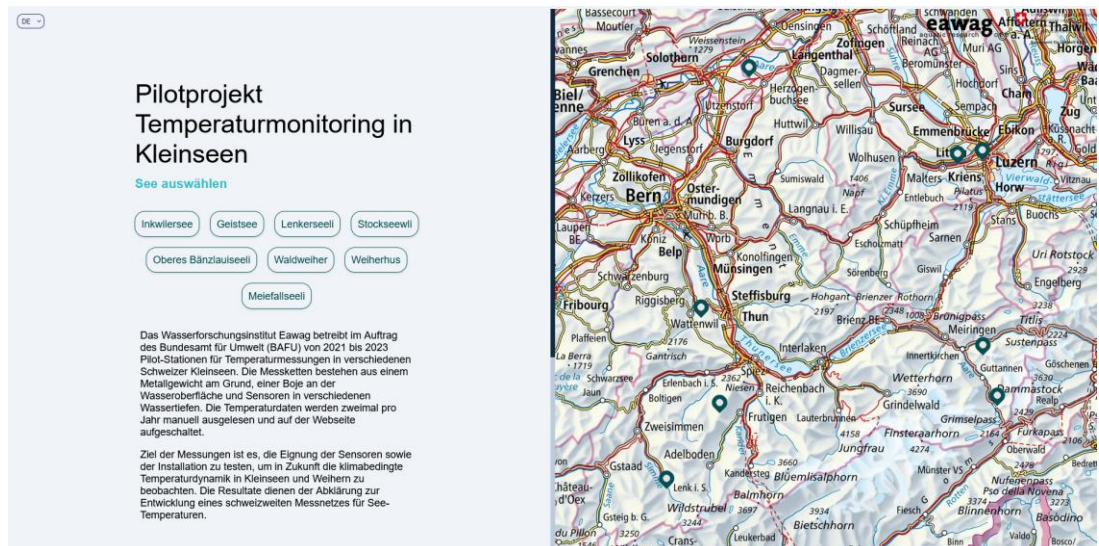


Abbildung 36: Projektwebseite für die in den Kleinseen erhobenen Wassertemperaturdaten. Zugänglich unter <https://www.seetemperaturen.eawag.ch/de>

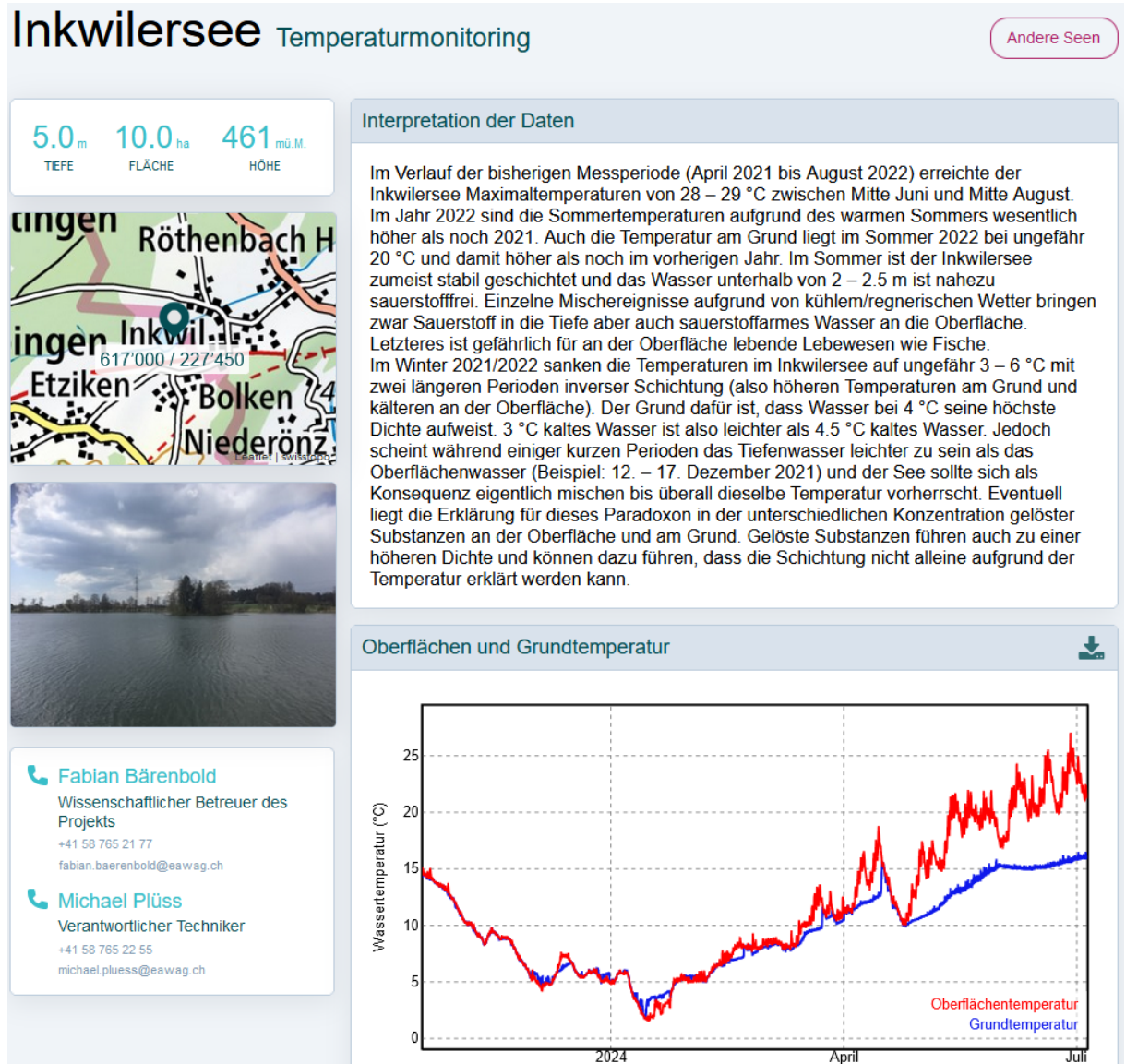


Abbildung 37: Ausschnitt der Projektwebseite für die gemessenen Kleinseen. Der am Inkwilersee angebrachte QR-Code führt direkt zu dieser Webseite.

Zusätzlich sind die Datalakes-Visualisierungen für den Hallwiler-, Murten- und Ägerisee, sowie für zwei Kleinseen auch auf einer Webseite des BAFU eingebunden und diejenige des Murtensees auf der Webseite des Kantons Fribourg.

Nicht zuletzt sind auch viele Grafiken in diesem Bericht direkte Screenshots von Datalakes-Visualisierungen. Die Möglichkeit der direkten Interaktion mit Datensätzen macht das Auffinden von guten Datenbeispielen wesentlich einfacher und effizienter, als wenn die Grafik selbst produziert werden müsste.

5.2 Kantonale Monitoringdaten

In Zukunft könnten vermehrt Kantone bei der Visualisierung ihrer Messdaten unterstützt werden, indem sie ihre Messdaten automatisiert an einen Eawag ftp-Server schicken, wo sie, ähnlich wie die Messungen der hochaufgelösten Messstationen, verarbeitet und zur Berechnung von zusätzlichen

Datenprodukten verwendet werden. Momentan schicken in einem Pilotversuch bereits der Kanton Zug und der Kanton Bern ihre CTD-Monitoringdaten jeden Monat per Mail an die Eawag. Die Files werden, ähnlich wie bei der Verarbeitung der Kleinsee-Messstationen, von Hand in einem Datenfolder abgelegt und per Python-Skript verarbeitet. So entsteht eine Win-Win-Situation, in welcher die Eawag jeweils über die neusten Messungen verfügt für wissenschaftliche Arbeiten und der Kanton über Grafiken, welche bei Interesse in deren Webseite eingebunden werden können. Neben der Wassertemperatur (Beispiel Bielersee in Abbildung 38) wurden ebenfalls berechnete Datenprodukte (siehe Abschnitt 6.1), sowie Sauerstoffdaten (Abbildung 39) visualisiert.

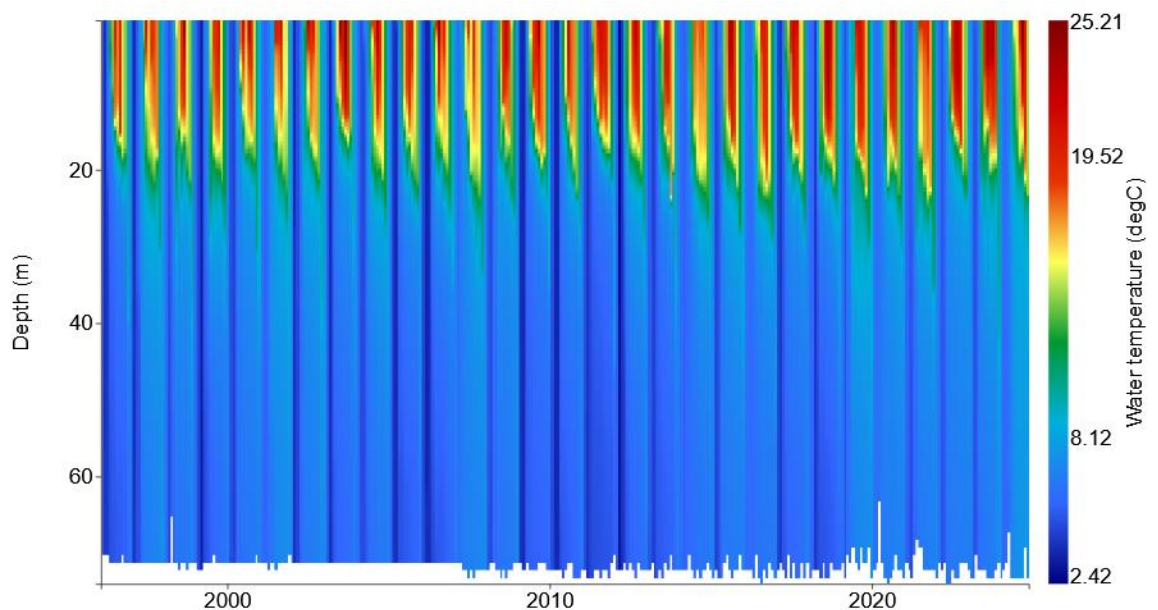


Abbildung 38: Temperaturmonitoringdaten des Bielersees. Die Daten werden vom Gewässer- und Bodenschutzlabor des Kantons Bern erhoben und auf Datalakes visualisiert.

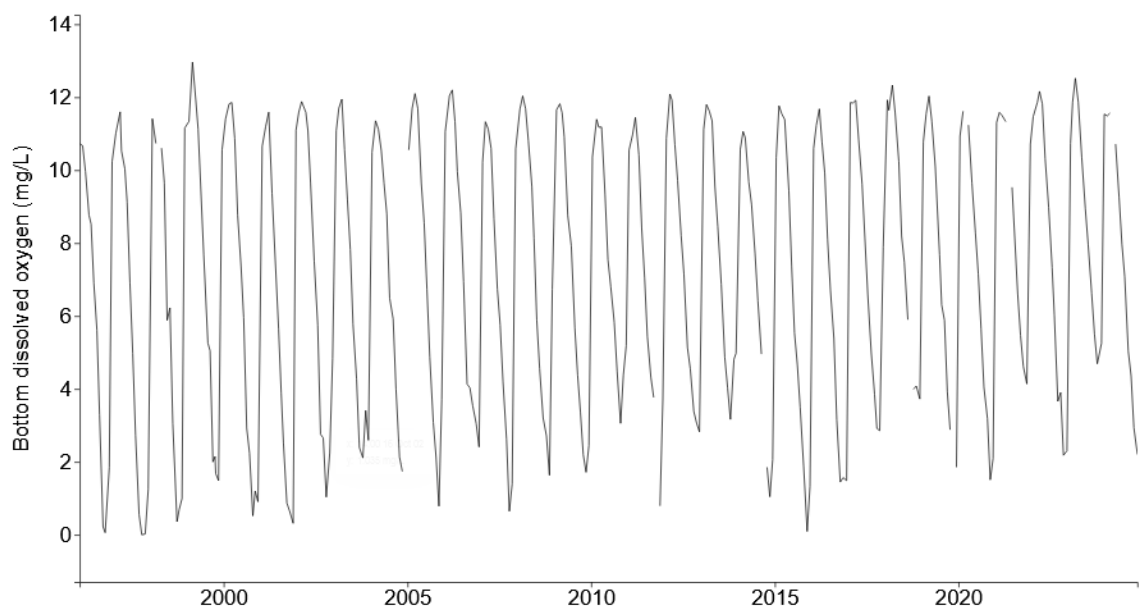


Abbildung 39: Sauerstoffdaten am Seegrund (unterste 5 m) des Bielersees. Die Daten werden vom Gewässer- und Bodenschutzlabor des Kantons Bern erhoben und auf Datalakes visualisiert.

Zusammenfassung Kapitel 5

- **Alle Messdaten der neuen Messstationen werden mittels eines automatisierten Workflows verarbeitet und auf der Datenwebseite «Datalakes» der Eawag visualisiert**
- **Die Grafiken auf Datalakes können einfach in bestehende Webseiten z.B. des BAFU oder der Kantone eingebaut werden.**
- **Die monatlichen CTD-Profile einiger Kantone wurden ebenfalls auf Datalakes publiziert und sind dort statisch (Kantone Aargau und Tessin) oder mit regelmässigen Updates (Kantone Zug und Bern) zur Visualisierung und zum Herunterladen bereit.**

6. Zusätzliche Datenprodukte und Analysen

6.1 Automatisch berechnete Datenprodukte

Sehr oft werden Seetemperaturdaten zur Berechnung von wichtigen Indikatoren verwendet. Ein Beispiel dafür ist die Tiefe der Thermokline (oder Sprungschicht), also der Tiefe, in welcher während der Stagnationsphase im Sommer die Oberflächenschicht (Epilimnion) in die Tiefenwasserschicht (Hypolimnion) übergeht. Dieser Übergang kann sehr steil oder eher flach sein (Abbildung 40).

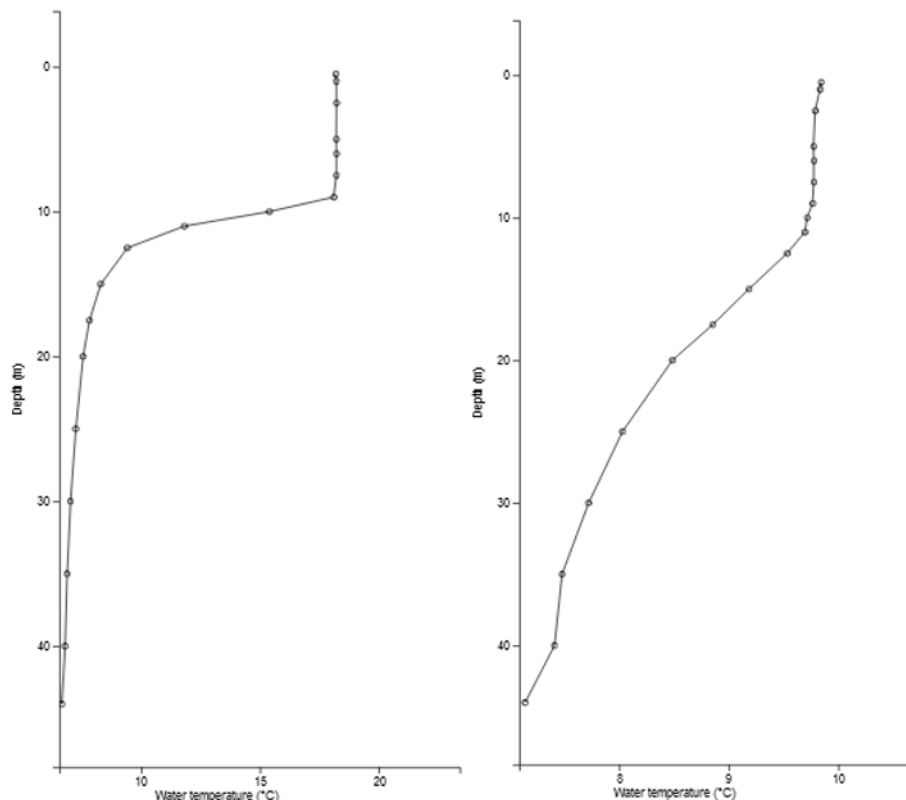


Abbildung 40: Klar definierte Thermokline am 18. September 2024 (links), flachere Thermokline am 21. November 2024 (rechts). Messdaten erhoben von der automatischen Messstation im Hallwilersee.

In beiden Fällen wird die Tiefe der Thermokline üblicherweise als die mittlere Tiefe des Übergangs berechnet. In Abbildung 40 links würde die Thermoklintiefe etwa 10 m betragen und rechts etwa 20 m. Für die automatische Berechnung der Thermoklintiefe der Messstationen benutzen wir die an der Eawag entwickelte Python-Bibliothek «pylake». Pylake basiert grösstenteils auf der weit verbreiteten R-Bibliothek «Lake-Analyzer» (Read et al. 2011). Eine der am weitesten verbreiteten Methoden, um die Thermoklintiefe zu berechnen, basiert auf der Suche nach dem steilsten Gradienten eines Profils. Diese Methode ist in pylake implementiert, hat aber bei der Berechnung der Thermokline aus diskreten Messpunkten (Hallwilersee und Murtensee) ungenügende Resultate geliefert. Im Fall von quasi-kontinuierlichen Messungen (alle 20 – 50 cm im Ägerisee) hat die Methode aber gut funktioniert. Deswegen haben wir eine zusätzliche Methode entwickelt, wo in welcher die Tiefe der Thermokline als diejenige Tiefe definiert wird, in welcher die Temperatur den Mittelwert zwischen als Mittelpunkt zwischenden Temperaturen an den beiden Übergängen vom Epilimnion zur Sprungschicht und von der Sprungschicht zum Hypolimnion definiert ist erreicht. Diese Methode ist nun ebenfalls in pylake implementiert und wird auf die Messdaten des Hallwiler- und Murtensees angewendet (und in Zukunft auch auf die Kleinseen).

Neben der Thermoklinentiefe berechnen wir folgende Indikatoren:

- Wärmeinhalt eines Sees, berechnet als Multiplikation der tiefeninterpolierten Temperatur mit der entsprechenden Schichtfläche
- Schmidt-Stabilität (benötigte Energie, um einen See komplett zu mischen, Idso 1973)
- Mischungstiefe berechnet als Tiefe, in welcher die Dichte um mehr als 0.01 kg/m³ abweicht von der Dichte an der Oberfläche

Der zusätzliche Nutzen der Berechnung der Mischungstiefe ist, dass sie auch bei sehr geringen Dichteunterschieden im Herbst/Winter funktioniert, während die Berechnung der Thermoklinentiefe bei Temperaturunterschieden unterhalb von etwa 1 °C keinen Sinn mehr ergibt. Dies weil die Temperaturprofile in diesen Fällen oft keine klare Thermokline mehr aufweisen. Auf der anderen Seite wird die Mischungstiefe im Sommer oft durch die tägliche Erwärmung der obersten 1-2 m bestimmt und sagt so nichts über die Tiefe der Thermokline aus. Abbildung 41 zeigt die Mischungstiefe im Ägerisee im Jahr 2024 und Abbildung 42 die Thermoklinentiefe. Im Sommer (Juni, Juli und August) ist die Mischungstiefe wegen der täglichen Erwärmung der obersten paar Meter meist wesentlich seichter als die Thermokline. Ab etwa Mitte September sind die maximalen Werte der Mischungstiefe der Thermoklinentiefe sehr ähnlich, die minimalen aber immer noch nahe bei 0 wegen der täglichen Erwärmung durch Sonneneinstrahlung.

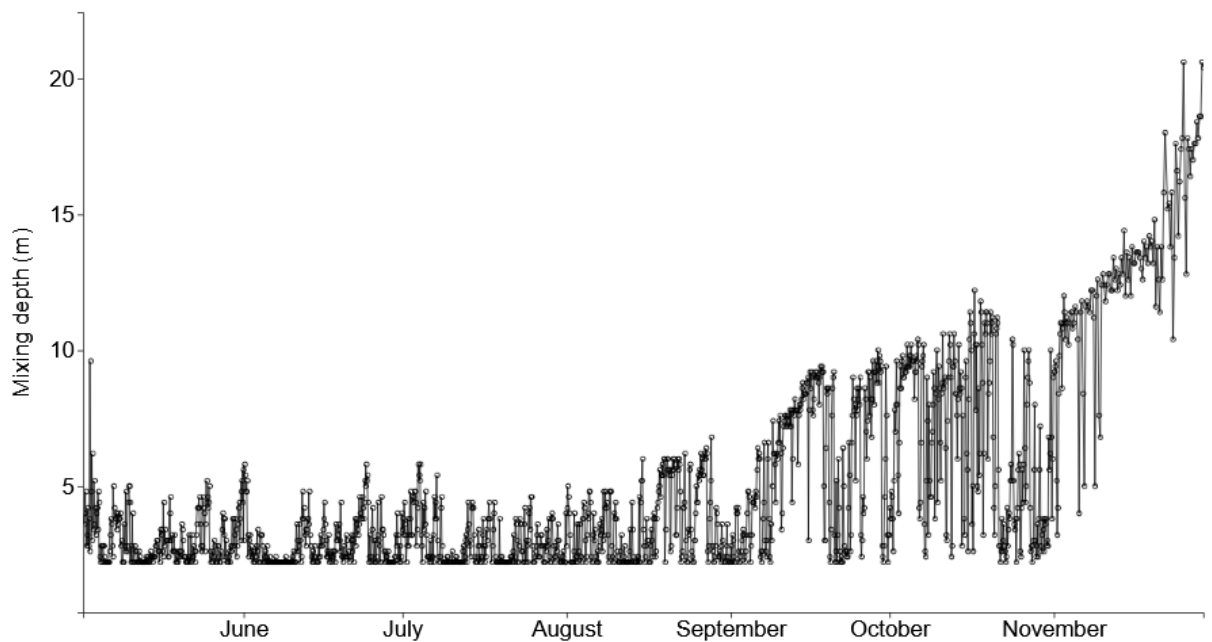


Abbildung 41: Mischungstiefe im Ägerisee im Jahr 2024 berechnet aus den Monitoringdaten der automatischen Messstation.

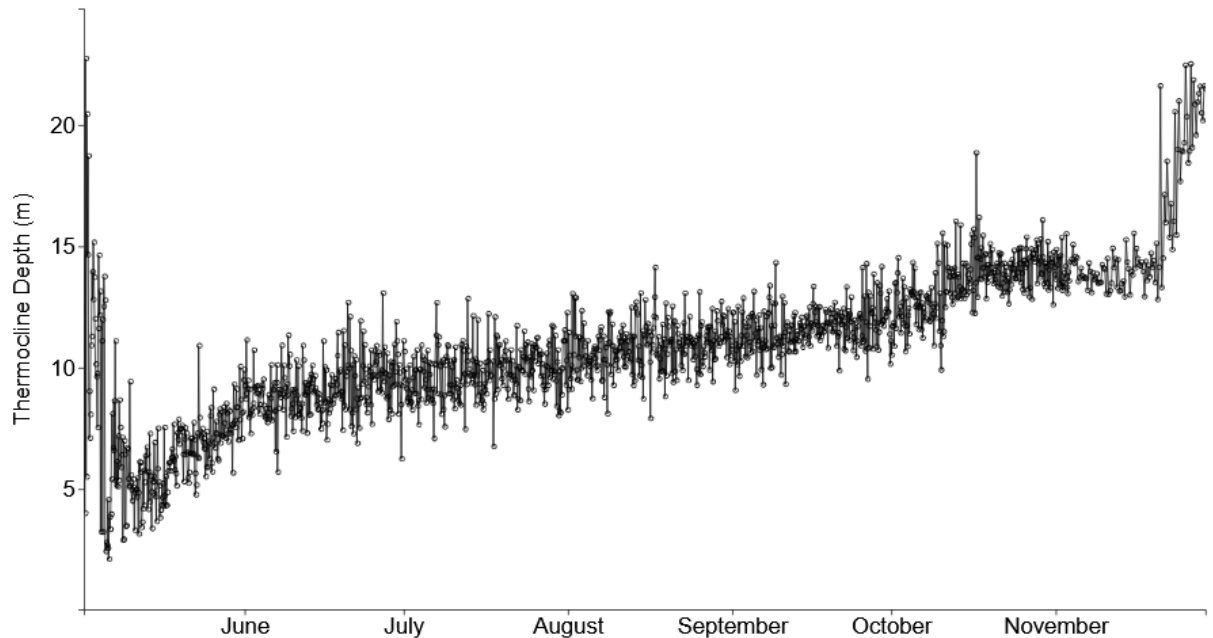


Abbildung 42: Thermoklinentiefe im Ägerisee im Jahr 2024 berechnet aus den Monitoringdaten der automatischen Messstation.

6.2 Datenbank für Seehypsometrien

Für die Berechnung der Schmidt-Stabilität, des Wärmeinhalts wird die Hypsometrie eines Sees benötigt, also die Seefläche in verschiedenen Tiefen. Diese Hypsometrie-Daten mussten jeweils bei kantonalen Fachstellen angefragt werden oder in Publikationen gesucht werden. Um die Arbeit in Zukunft zu erleichtern, haben wir eine Datenbank für See-Hypsometrien auf Datalakes angelegt (siehe Abbildung 43). Die Hypsometrien sind alle in einheitlichem Format, mit der korrekten Datenherkunft beschriftet und verfügbar zum Herunterladen. Neben den sogenannten Schichtflächen (also der Seefläche pro Tiefe) werden auch der Gradient der Schichtflächen, das Seevolumen pro Tiefe und weitere Parameter berechnet.

Stand Ende 2024 wurde die Hypsometrie von 156 verschiedenen Schweizer Seen verfügbar gemacht. Dies ist ein weiterer Schritt in Richtung «offene Wissenschaften», welcher künftige wissenschaftliche Analysen erleichtert.

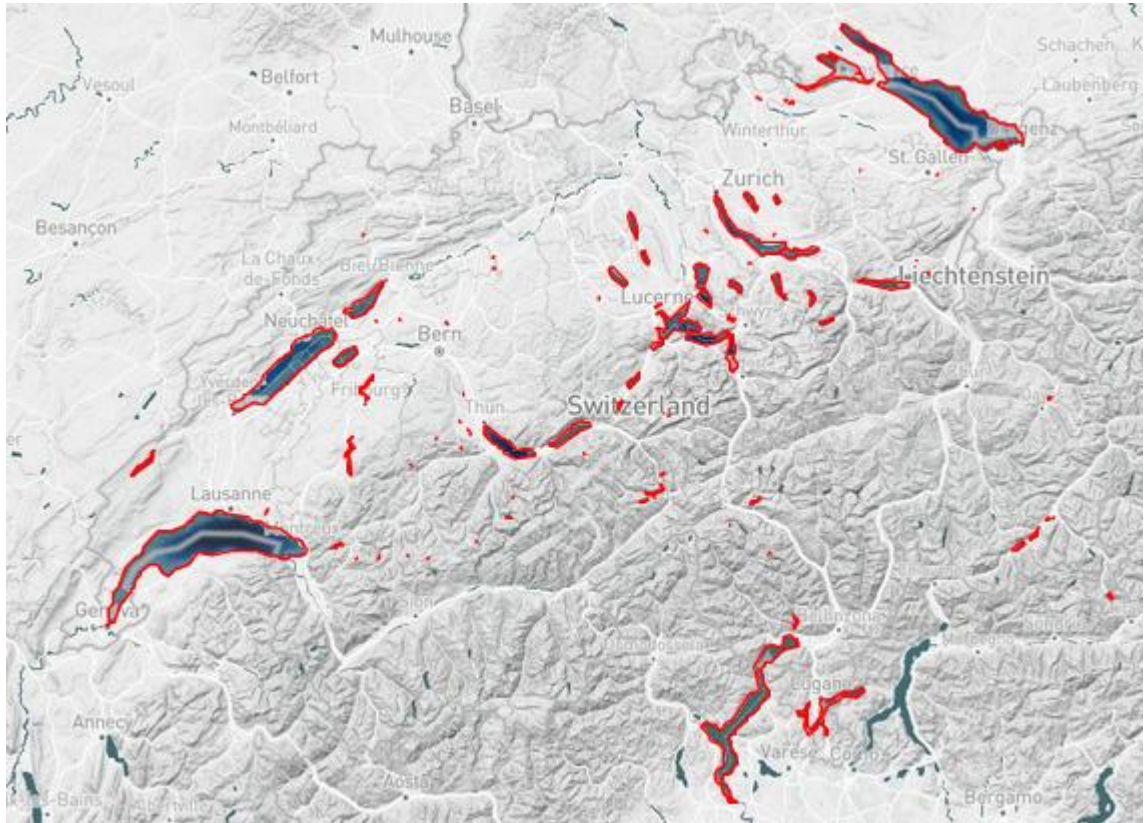


Abbildung 43: Vorhandene Seen in der See-Hypsometrie-Datenbank auf Datalakes (<https://www.datalakes-eawag.ch/lakemorphology>).

6.3 Vergleich monatliche mit hochaufgelösten Messdaten

Ende 2024 stehen von jeder Messstation (Hallwiler-, Murten- und Ägerisee) etwa 2 Jahre an Messdaten zur Verfügung. Diese können nun den monatlichen (Hallwilersee und Murtensee) bzw. vierteljährlichen Messungen der Kantone gegenübergestellt werden.

Abbildung 44 vergleicht die kantonalen Messungen mit denjenigen der Messstation (BAFU) an der Oberfläche, in 10 m und 15 m Tiefe, sowie am Seegrund. Es fällt auf, dass die kantonalen Messpunkte die Temperaturen bei 44 m sehr gut repräsentiert. Dies weil die Temperaturen in grosser Tiefe während der Stagnationsphase nur geringfügig variieren. An der Oberfläche jedoch gibt es grosse Schwankungen innerhalb von wenigen Tagen, v.a. im Sommer. Je nachdem, ob die kantonale Messung während einer eher kühlen oder einer heissen Periode stattfindet, repräsentiert der Messpunkt den gegebenen Monat gut oder weniger gut. Zum Beispiel ist mittlere Oberflächentemperatur im Sommer im Jahr 2023 in Wirklichkeit wesentlich um 1.6 °C tiefer als aus den kantonalen Messdaten berechnet (Tabelle 8), welche auf nur zwei Messpunkten basiert. Je mehr Messpunkte gemittelt werden, desto höher ist die Chance, dass die kantonalen Messungen repräsentativ sind. Die mittlere Oberflächentemperatur im Jahr 2023 wird von den kantonalen Daten um etwa 0.4 °C überschätzt. Die Häufigkeit der Messungen hat also einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Berechnung von langfristigen Trends. Die berechnete Überschätzung der Oberflächentemperatur im Jahr 2024 aus den kantonalen Messungen bewegt sich beispielsweise in ähnlicher Grössenordnung wie der gegenwärtige Anstieg der Oberflächentemperatur während eines Jahrzehnts (etwa 0.5 °C/Dekade, siehe Abbildung 1).

Tabelle 8: Maximale Sommertemperatur und mittlere Sommer- (Juli und August), sowie Jahrestemperatur im Jahr 2023 an der Seeoberfläche berechnet aus den kantonalen Messungen und den Daten der BAFU-Messstation.

	Kantonale Messung [°C]	BAFU-Messstation [°C]
Maximale Sommertemperatur	26.10	27.34
Mittlere Sommertemperatur	25.35	23.75
Mittlere Jahrestemperatur	14.92	14.53

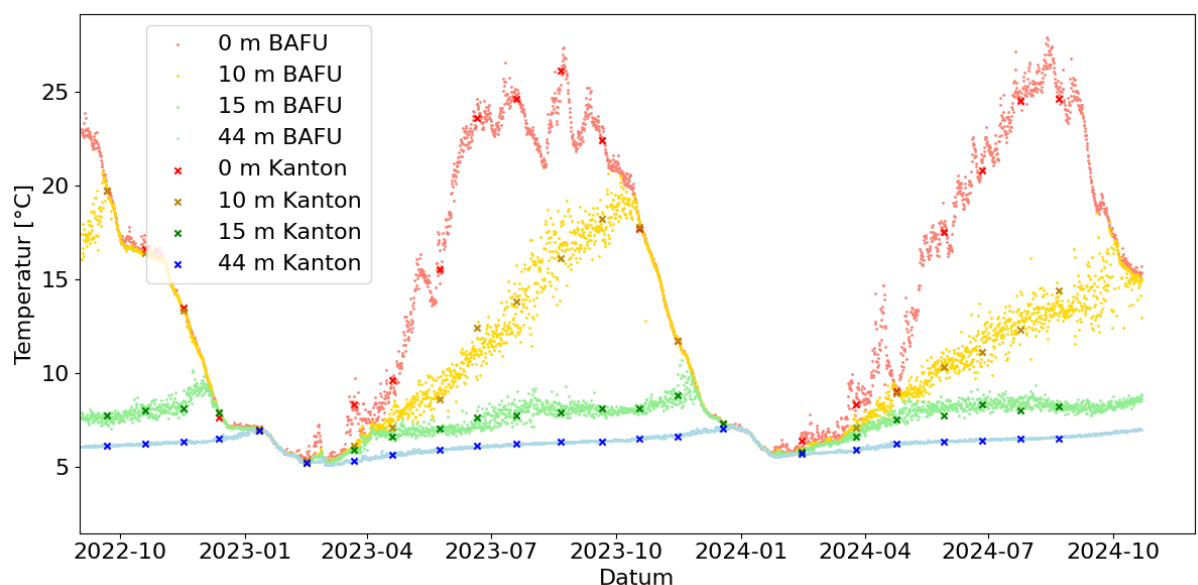


Abbildung 44: Vergleich der monatlichen kantonalen Profile mit der Messstation im Hallwilersee (dargestellt sind Messpunkte alle 6 Stunden). Oberflächentemperatur in Rot und Grundtemperatur in Blau. Die kantonalen Profile werden vom Amt für Umwelt des Kantons Aargau erhoben.

In mittleren Wassertiefen nahe der Thermokline variieren die Wassertemperaturen ebenfalls stark. Dies geschieht nicht wegen des direkten Einflusses der Atmosphäre, sondern wegen internen Wellen. Diese werden durch konstante Winde in die gleiche Richtung ausgelöst und sorgen für ein Hin- und Herschaukeln des Sees. In einem eindimensionalen Messprofil äussert sich dieses Schaukeln in einer Auf- und Ab-Bewegung der Isolinien der Temperatur (Abbildung 45). Wird ein Messprofil während erhöhter Aktivität von internen Wellen gemessen (siehe z.B. 20. – 22. Juni in Abbildung 45), besteht eine erhöhte Chance, dass die Messung im Bereich der Thermokline nicht repräsentativ ist. Abbildung 46 zeigt, dass sich die Thermokline während der Stagnationsphase meist zwischen etwa 6 und 14 m Tiefe befindet.

Neben der absoluten Wassertemperatur und der Thermoklintiefe ist die Dauer der Sommerstagnation eine weitere wichtige Grösse. Während der Stagnation wird der Sauerstoff im Tiefenwasser aufgezehrt und es erfolgt kein Zufluss von oben. Die Berechnung der Stagnationsdauer aus monatlichen Profilen ist sehr ungenau, da sie meist plötzlich aufgrund eines Windereignisses und/oder einer Kälteperiode im Herbst/Winter ausgelöst werden kann. In einigen Jahren, wenn längere Zeitreihen von hochaufgelöste Temperaturdaten verfügbar sein werden, wird verglichen werden können, wie sich die Verfügbarkeit von hochaufgelösten Daten auf die Abschätzung der Stagnationsdauer auswirkt. Jedoch ist die Berechnung der Stagnationsdauer auch mit hochaufgelösten Daten nicht trivial, da sich ein See im Frühling zum Teil mehrere Male schichtet, nur um dann wieder zu mischen. Meist wird ein See als

gemischt betrachtet, wenn die Dichte in der gesamten Tiefe gleich ist (innerhalb einer gewissen Toleranz).

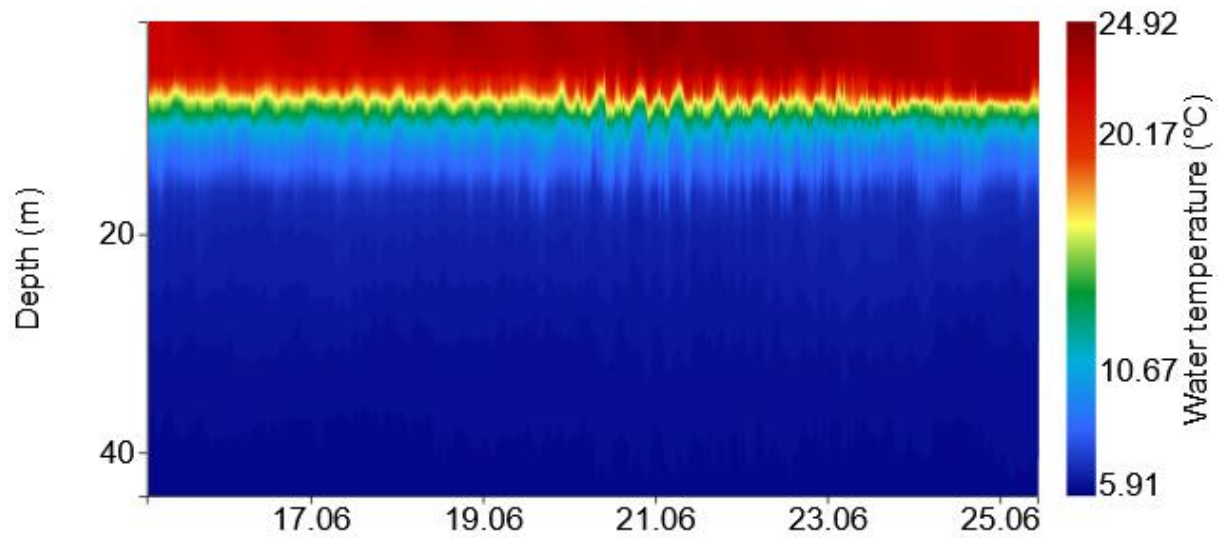


Abbildung 45: Konturenlinien der Wassertemperatur im Hallwilersee gemessen von der BAFU-Messstation im Juni 2023.

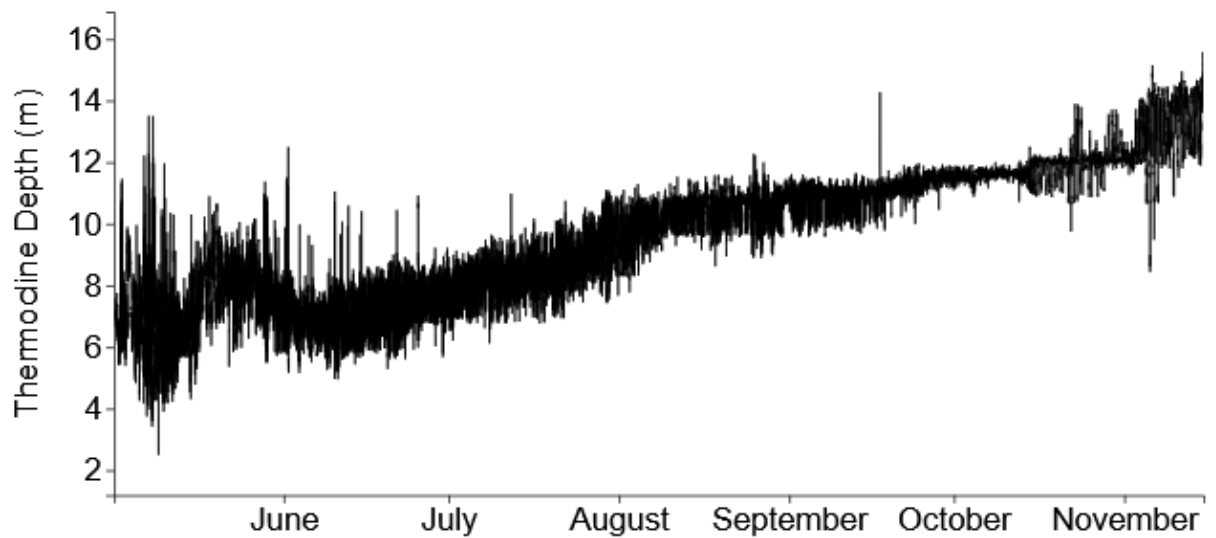


Abbildung 46: Thermoklinentiefe des Hallwilersees im Jahr 2023 berechnet aus den Messungen der automatischen Messstation.

Zusammenfassung Kapitel 6

- Die Temperaturmessungen werden automatisch zu Datenprodukten verarbeitet, welche ebenfalls auf Datalakes visualisiert werden. Beispiele dafür sind die Tiefe der Thermokline, der Wärmeinhalt und die Stabilität der Schichtung (Schmidt-Stabilität)
- Eine Datenbank für See-Schichtflächen (Hypsometrien) wurde erstellt auf Datalakes. Momentan sind die Schichtflächen von 156 Seen und Kleinseen frei verfügbar.
- Der Vergleich der kantonalen mit hochaufgelösten Messungen im Hallwilersee zeigt, dass die monatlichen Temperaturmessungen vor allem an der Oberfläche und im Bereich der Thermokline nicht unbedingt repräsentativ sind für den ganzen Monat. Damit sind auch Trendberechnungen aus den monatlichen kantonalen Daten mit einiger Unsicherheit behaftet.
- Die Dauer der Sommerstagnation kann mit hochaufgelösten Messungen ebenfalls wesentlich besser berechnet werden.

7. Numerische Seetemperatur-Simulationen

7.1 Einführung

Numerische Simulationen von Seen erlauben es, auch ohne aktuelle Messung gute Kenntnisse der im See ablaufenden physikalischen Prozesse zu erhalten. Bis heute wird die Temperatur in Schweizer Seen höchstens alle zwei Wochen erhoben (zumeist wesentlich seltener), und so sind gut kalibrierte numerische Simulationen eine Alternative, welche eine wesentlich höhere zeitliche Auflösung aufweisen. Numerische Simulationen können ein-, zwei- oder dreidimensional sein, wobei mit steigender Dimensionalität der Rechenaufwand stark zunimmt. An der Eawag wird für Klima- oder See-Management-Szenarien oft das eindimensionale Modell "Simstrat" verwendet. Dieses Modell wurde an der Eawag entwickelt (Goudsmit et al., 2002) und wird auch von externen Forschenden regelmässig verwendet. Die Eawag betreibt seit 2019 die Simulations-Webplattform "[Simstrat-Operational](#)", wo mithilfe von Simstrat die Temperatur von etwa 80 Schweizer Seen in hoher vertikaler Auflösung simuliert wird (Gaudard et al., 2019). Die Simulationen werden täglich aktualisiert mithilfe von Wetterdaten von MeteoSchweiz und Zuflussdaten des BAFU. Im Zuge des durch das Pilotprojekt mitermöglichten Zusammenführens der Simstrat- (eindimensionale Simulationen) und der Alplakes-Plattform (dreidimensionale Simulationen), wurde auch eine 5-Tages-Prognose eingeführt basierend auf aktuellen Wetterprognosen von MeteoSchweiz (Abbildung 47).

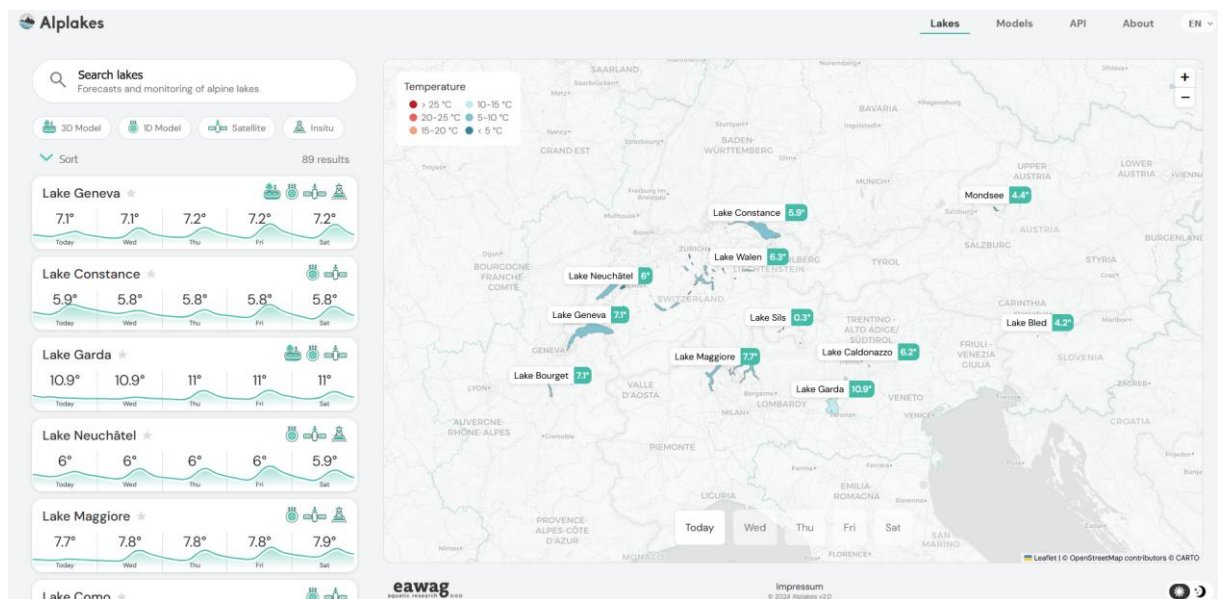


Abbildung 47: Eindimensionale Simulationen der Schweizer Seen auf der neuen Simulationsplattform "Alplakes".

Die Simulationen werden mittels der Messdaten aus den kantonalen Langzeitmonitoring-Programmen kalibriert und validiert. Die Simulationsergebnisse sind, wie oben ausgeführt, wichtig als intelligente Interpolationsmethode von Datenreihen mit niedriger zeitlicher Auflösung. Darüber hinaus können sie verwendet werden, um Voraussagen zu machen zur Klimaveränderung oder zur veränderten Nutzung von Seewasser (z.B. Kälte- oder Wärmenutzung).

Im Folgenden geben wir eine Übersicht über die im Rahmen dieses Pilotprojekts durchgeführten Weiterentwicklungen der eindimensionalen Schweizer See-Simulationen.

7.2 Weiterentwicklung und Verbesserung der eindimensionalen Simulationen mit Simstrat

Verbesserung der Berechnung der eingehenden langwelligen Strahlung

Die eingehende langwellige Strahlung ist ein wichtiger Bestandteil des Wärmebudgets eines Sees. Obwohl ihr absoluter Wert in unseren Breitengraden grösser ist als derjenige der eingehenden kurzwelligen Strahlung (siehe Abbildung 2 in Schmid & Read, 2022), wird sie momentan nur von wenigen automatischen Wetterstationen von MeteoSchweiz gemessen. Öfter erfasst wird die «totale Wolkenbedeckung» (visuell) aber zumeist nur drei Mal pro Tag. In der Simulationsplattform «Simstrat-Operational» wurde die eingehende langwellige Strahlung bisher mithilfe des Algorithmus von Dilley und O'Brien (1998) und der Wolkenkorrektur von Unsworth und Monteith (1975) berechnet. Beide Algorithmen schnitten in der Vergleichsstudie von Flerchinger et al. (2009) sehr gut ab. Um die Wolkenbedeckung abzuschätzen, wurden in Simstrat-Operational, falls vorhanden, die gemessenen Werte von MeteoSchweiz verwendet und anderenfalls das Verhältnis zwischen gemessener Sonneneinstrahlung und theoretischer Sonneneinstrahlung als Proxy für Wolkenbedeckung verwendet.

Wir stellten uns folgende Fragen:

- Ist die beobachtete Wolkenbedeckung tatsächlich besser geeignet als die aus der Sonneneinstrahlung berechnete? Die zeitliche Auflösung der gemessenen Wolkenbedeckung ist sehr gering (drei Mal pro Tag) und die Interpolation unklar. Dazu existieren diese Beobachtungen nur für wenige Wetterstationen.
- Welcher Algorithmus zur Wolkenkorrektur ist am besten geeignet, wenn die Wolkenbedeckung aus der Sonneneinstrahlung berechnet wird? Zusätzlich zum bisherigen Algorithmus von Unsworth und Monteith (1975) wird derjenige von Crawford and Duchon (1999) getestet (beide beschrieben in Flerchinger et al. 2009). Letzterer hat den Vorteil, dass die Emissivität direkt aus dem Verhältnis der Sonneneinstrahlung zur theoretischen Sonneneinstrahlung berechnet werden kann (Flerchinger et al. 2009).

Unsere Analyse zeigt erstens, dass das Verhältnis zwischen der berechneten Wolkenbedeckung und der Emissivität der eingehenden Strahlung für alle untersuchten Wetterstationen linear ist und eine ähnliche Steigung aufweist (Abbildung 48). Dies bedeutet, dass der Effekt der Wolkenbedeckung auf die Emissivität gut mit einer berechneten Wolkenbedeckung abgeschätzt werden kann. Daher werden wir die Wolkenbedeckung in Zukunft für alle Stationen aus der Sonneneinstrahlung berechnen.

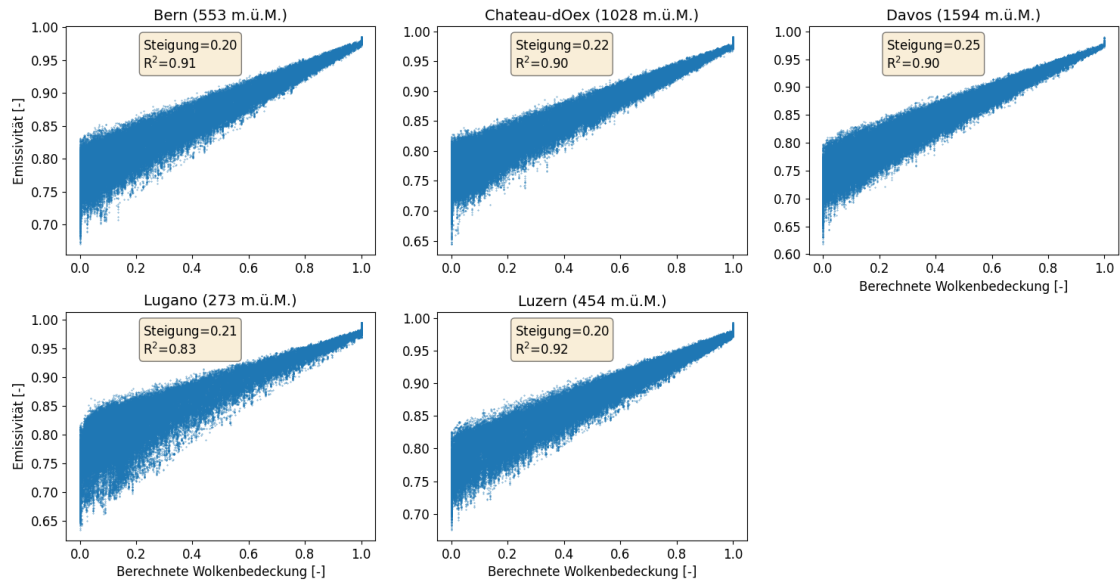


Abbildung 48: Berechnete Wolkenbedeckung im Vergleich mit gemessener Emissivität der langwelligen Strahlung (berechnet mit Daten von MeteoSchweiz).

Abbildung 49 zeigt den Vergleich zwischen gemessener und berechneter eingehender langwelliger Strahlung während drei Monaten. Drei verschiedene Arten der Berechnung werden gezeigt:

- Emissivität berechnet mit der beobachteten Wolkenbedeckung und der Wolkenkorrektur von Unsworth (alter Algorithmus, wenn beobachtete Wolkenbedeckung vorhanden)
- Emissivität berechnet mit der aus der beobachteten Solarstrahlung errechneten Wolkenbedeckung und der Wolkenkorrektur von Unsworth (alter Algorithmus, wenn keine beobachtete Wolkenbedeckung vorhanden)
- Emissivität berechnet mit der aus der beobachteten Solarstrahlung errechneten Wolkenbedeckung und der Wolkenkorrektur von Crawford (neuer Algorithmus)

Die Übereinstimmung mit der gemessenen langwelligen Strahlung ist wesentlich besser, wenn anstatt der beobachteten Wolkenbedeckung, die aus der Sonneneinstrahlung berechnete verwendet wird. Im täglichen Durchschnitt sinkt der mittlere quadratische Fehler bei fünf untersuchten Stationen von einem Bereich von 16 bis 28 auf 10 bis 16 W m^{-2} (Abbildung 49). Der Fehler kann leicht verringert werden, wenn anstatt der Wolkenkorrektur von Unsworth diejenige von Crawford verwendet wird. Der mittlere quadratische Fehler sinkt dann auf etwa 9 bis 13 W m^{-2} . Da die Wolkenkorrektur von Crawford einen geringeren Fehler aufweist und einfacher ist in der Anwendung, wird sie zukünftig in Simstrat-Operational verwendet werden.



Abbildung 49: Vergleich von Messdaten der eingehenden langwelligen Strahlung von MeteoSchweiz mit dem alten (Dilley-Unsworth mit beobachteter und berechneter Wolkenbedeckung) und dem neuen Algorithmus (Dilley-Crawford mit Wolkenbedeckung berechnet aus Sonneneinstrahlung)

Optimierung der automatischen Kalibration

Bei den eindimensionalen Simulationen wird das physikalische Modell Simstrat für jeden See mittels automatischer Kalibration an die lokalen Gegebenheiten angepasst. Die Kalibrationsparameter umfassen Skalierfaktoren für die Windgeschwindigkeit und die eingehende langwellige Strahlung, sowie einen Parameter, welcher bestimmt, welcher Anteil der Windenergie über interne Wellen ins Tiefenwasser gelangt. Für höher gelegene Seen wird zusätzlich ein Eis-spezifischer Parameter kalibriert und für Seen mit nur wenigen Messungen der Secchi-Tiefe ein Skalierfaktor für die Extinktion des Lichtes. Die automatische Kalibration wird momentan mit der Kalibrationssoftware «PEST» (<https://pesthhomepage.org/>) durchgeführt. PEST kann parallel auf vielen Prozessoren Simulationen durchführen und die Resultate zur Optimierung der Parameter nutzen. Nach der Behebung einiger Fehler und durch effizientere Implementierung konnte die Kalibration aller 87 Seen von mehreren Wochen auf 2 Tage reduziert werden. Dies ist ein wichtiger Schritt im Hinblick auf die weitere Verbesserung der Simulationen da die kalibrierten Modelle viel schneller miteinander verglichen werden können.

Der Code von Simstrat-Operational ist in Python geschrieben und führte bisher viele verschiedene Aufgaben durch:

- Starten und Durchführen der täglichen Simstrat-Simulationen der 87 Seen
- Berechnung der aktuellen Modell-Inputdaten aus Wetter-, Zufluss- und Hypsometrie-Daten von BAFU, MeteoSchweiz und Kantonen
- Automatische Kalibration mithilfe der Kalibrationssoftware PEST und der gemessenen Temperaturprofile der Kantone

Im Zuge der Professionalisierung der operationellen Simulationen wurde diese Software nun aufgetrennt, so dass jede Aufgabe von einem spezifischen Modul übernommen wird. Dies vereinfacht

den Unterhalt und die Weiterverwendung der Software. Zum Beispiel kann nun neben PEST auch eine Kalibrationsmethode der Python-Bibliothek «Scipy» verwendet werden. Auch die Geschwindigkeit der Kalibration und der täglichen Simulationen wurde nochmals markant verbessert. Der Python-Code für die [Kalibration](#) der Simulationen, sowie derjenige für die [tägliche Aktualisierung](#) der Simulationen sind online frei verfügbar.

7.3 Ausweitung der Simulationen auf Kleinseen

Im Verlauf des Pilotprojekts wurde die Anzahl simulierter Seen von etwa 50 auf über 80 Seen vergrößert. Einige dieser zusätzlich simulierten Seen verfügen über ein konsistentes kantonales Monitoring-Programm, wie zum Beispiel die Kleinseen der Kantone Zürich, Bern und Waadt. Andere wurden nur über ein oder zwei Jahre regelmässig beprobt (u.a. Glarus und St. Gallen) und wieder andere können durch die in diesem Pilotprojekt gemessenen Temperaturdaten kalibriert und simuliert werden. Die Homogenisierung der Temperaturdaten zur Kalibration, sowie der Hypsometrien der Kleinseen war aufwändig, da diese in den verschiedensten Formaten abgespeichert waren und, im Fall der Hypsometrien, zum Teil digitalisiert werden mussten. Für einige der Kleinseen sind nur 5 bis 10 vertikale Profile vorhanden zur Kalibration. Es ist anzunehmen, dass dies für eine robuste Kalibration nicht ausreichend ist. Trotzdem bleiben diese Kleinseen momentan Teil von Alplakes. Die Idee ist es, diese Seen entweder ausreichend gut zu kalibrieren (Verbesserung des Modells oder Erfassung von mehr Messungen zur Kalibration) oder Informationen zur Qualität der Simulationen auf Alplakes zu veröffentlichen.

Die mittlere quadratische Abweichung der Simulationsergebnisse im Vergleich zu den Messdaten ist in Abbildung 50 (links) dargestellt. Es zeigt es sich, dass die Abweichung der Simulation zu den Messungen für die Grossseen zumeist wesentlich kleiner ist als für die Kleinseen. Dies ist auf die grössere Mächtigkeit des von der Atmosphäre weitgehend unbeeinflussten Tiefenwassers (Hypolimnion) zurückzuführen, aber auch darauf, dass im Modell nicht berücksichtigte Effekte die Kleinseen stärker beeinflussen.

Solche Effekte sind zum Beispiel:

- Der Zufluss von Schmelzwasser der Schneedecke oder von Gletschern
- Der Zufluss von Grundwasser
- Die Wärmeübertragung zwischen Wasser und dem Seegrund
- Die Beschattung durch die Topografie

Aus diesen diversen Gründen ist die Abweichung zwischen Simulation und Messdaten bei den Kleinseen oft grösser als 2 °C und teilweise bis 3 oder 4 °C, was aus den Simulationen gezogenen Schlussfolgerungen weniger zuverlässig macht. Im Pilotprojekt wurde ein erster Versuch unternommen, die Genauigkeit der Kleinsee-Simulationen zu verbessern. Dafür wurde mit der Software HORAYZON (entwickelt an der ETH von Christian Steger) die Beschattung aller simulierten Seen durch die Topografie berechnet und dann in Simstrat berücksichtigt. Während der Einbezug der Beschattung bei einigen Seen zu einer Verbesserung der Genauigkeit von einigen Zehntelgraden führte, trat bei einigen Seen das Gegenteil auf (Abbildung 50 rechts).

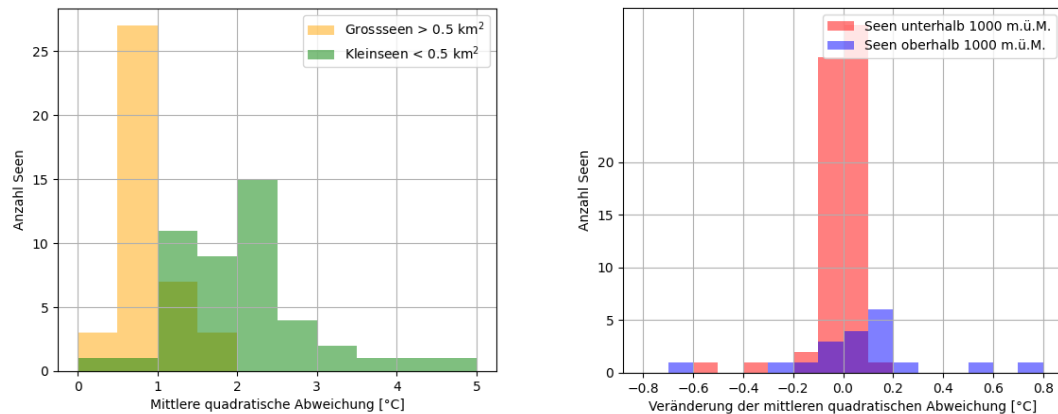


Abbildung 50: Links: Histogramm der mittleren quadratischen Abweichung zwischen gemessener und mit Simstrat simulierter Temperatur für Grossseen (> 0.5 km²) und Kleinseen (< 0.5 km²). Rechts: Veränderung der mittleren quadratischen Abweichung der Simulation nach Korrektur der Beschattung durch die Topografie für tiefer (unter 1000 m) und höher gelegene Seen.

Diese Verschlechterung der Genauigkeit kann wahrscheinlich durch den fehlenden Einbezug der anderen erwähnten Effekte (Schmelzwasser, Grundwasser, Wärmeübertragung am Seegrund) erklärt werden. Es kann zum Beispiel sein, dass die fehlende Kälte im Sommer (durch fehlendes Schmelzwasser) durch die fehlende Beschattung kompensiert wurde. Wenn die fehlende Beschattung korrigiert wird, nicht aber das fehlende Schmelzwasser, kann es sein, dass die Simulation noch schlechter zu den Messdaten passt als vorher. Die Verschlechterungen betreffen vor allem sehr kleine Seen mit einer Fläche von etwa einer Hektare (Oberes Bänzlauseeli, Lobsigenseeli, Seeweidsee), während Verbesserungen bei etwas grösseren Seen mit einer Fläche von etwa 5 – 7 Hektaren auftreten (Lac Lioson, Lac de Bretaye, Lac des Chavonnes). Abbildung 51 zeigt den Vergleich im Jahresverlauf des Sonneneinstrahlungskoeffizienten (= 1 – Beschattungskoeffizient) zwischen einem Grosssee, wo die Beschattung eine untergeordnete Rolle spielt (Bielersee) und einem Kleinsee, welcher im Winter völlig im Schatten liegt (Lac Lioson).

Potenziell könnten die Kleinsee-Simulationen weiter verbessert werden. Zum Beispiel verfügen andere eindimensionale Seemodelle wie das «General Lake Model» (Hipsey et al. 2019) über eine Formel zur Berechnung der Wärmeübertragung aus dem Sediment. Eine solche könnte auch in Simstrat implementiert werden. Weiter könnte der Einfluss der Schneeschmelze aus Schneedaten des WSL und der Grundwassereintrag mit Wissen über die lokale Hydrologie abgeschätzt werden.

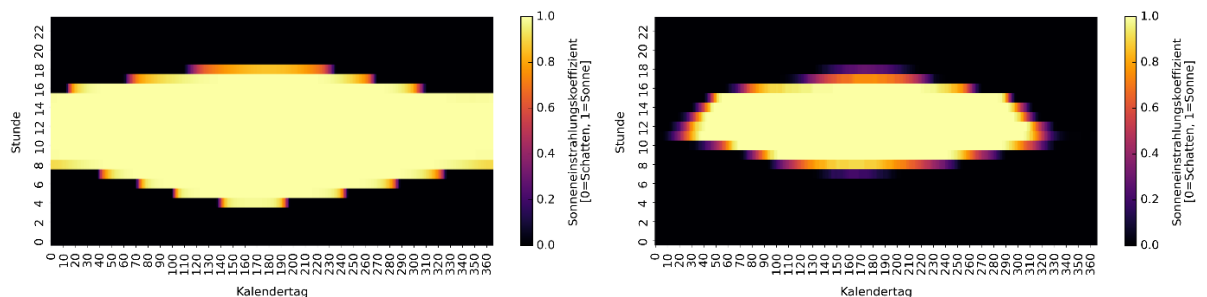


Abbildung 51: Sonneneinstrahlungskoeffizient im Verlauf des Jahres (x-Achse) und des Tages (y-Achse) am Beispiel des Bielersees (links) und des Lac Lioson (rechts).

7.4 Vergleich der Simulationen mit Messdaten

Abbildung 50 zeigt, dass der mittlere quadratische Fehler der Grossee-Simulationen zumeist unter 1 °C liegt. Diese Information genügt, um die Resultate der Simulationen beispielsweise zur intelligenten Interpolation von diskreten Temperaturmessungen oder zur Korrelation mit biochemischen Variablen zu nutzen. Jedoch ist weniger klar, ob auch jahrzehntelange Temperatur-Trends in der Simulation korrekt abgebildet werden.

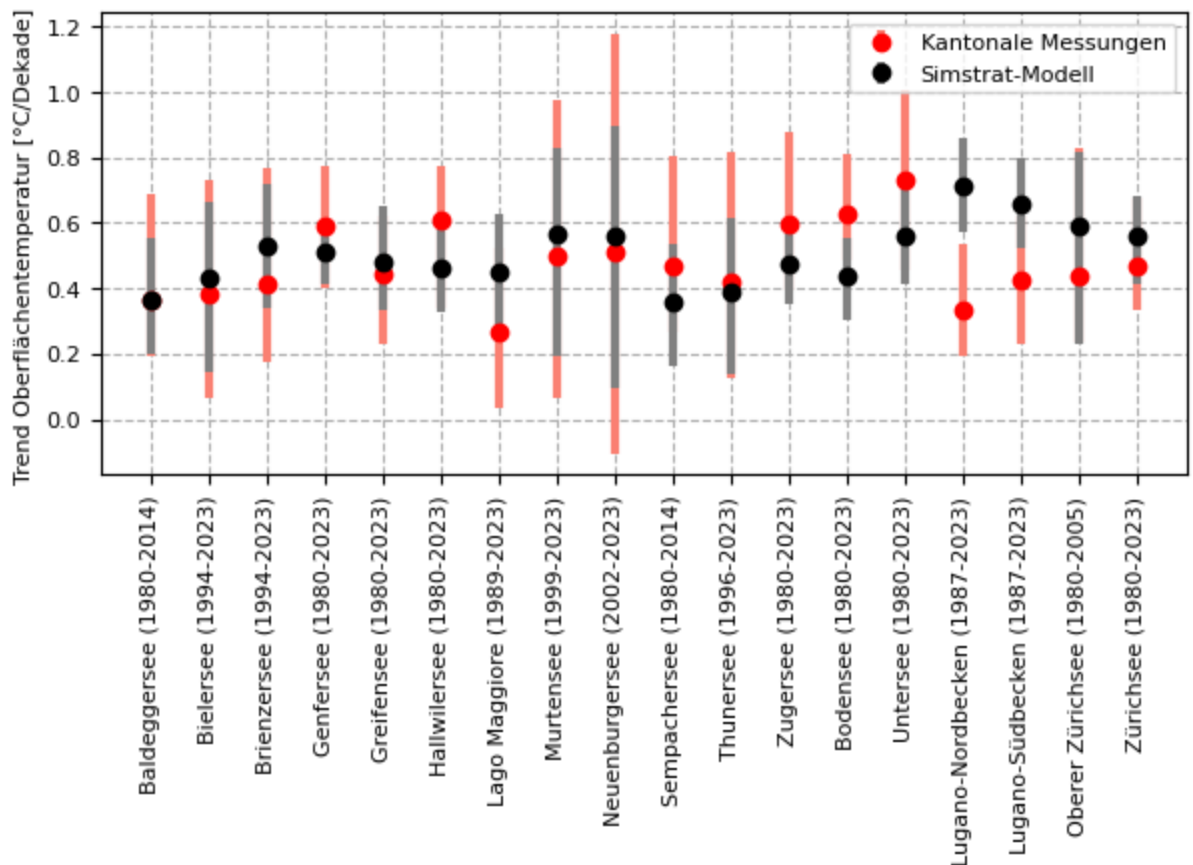


Abbildung 52: Vergleich der Oberflächentemperaturtrends von Schweizer Grosseen, berechnet mit dem Modell «Simstrat» (schwarz) und mit den kantonalen Messungen (rot). Die Trends wurden mit dem Theil-Sen-Verfahren aus den Jahresmitteltemperaturen berechnet und der Balken repräsentiert das 95%-Vertrauensintervall

In Abbildung 52 sind die Temperaturtrends der Oberfläche (oberster Meter) für 18 der grössten Schweizer Seen abgebildet. Der Trend wurde jeweils einmal mit den kantonalen Messdaten und einmal mit der damit kalibrierten Simulation berechnet. Für die Berechnung wurden diejenigen Jahre verwendet, für welche ein verlässliches kantonales Temperaturmonitoring mit einer genügenden Anzahl Profile pro Jahr existiert. Beim Neuenburgersee und beim Murtensee ist dies erst ab Anfang 2000 der Fall, beim Baldegger- und Sempachersee nur bis 2014, und beim oberen Zürichsee nur bis 2005 der Fall.

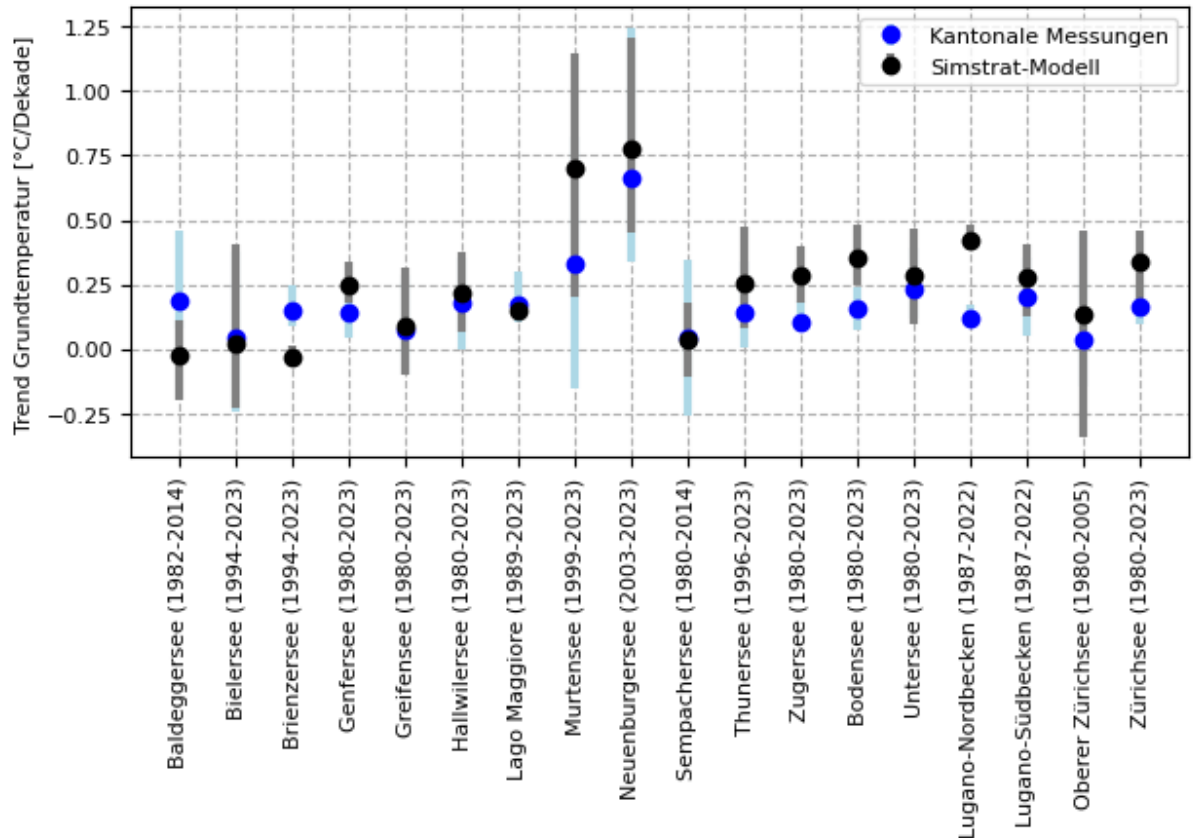


Abbildung 53: Vergleich der Grundtemperaturtrends von Schweizer Grossseen, berechnet mit dem Modell «Simstrat» und aus den kantonalen Messungen (blau). Die Trends wurden mit dem Theil-Sen-Verfahren aus den Jahresmitteltemperaturen berechnet und der Balken repräsentiert das 95%-Vertrauensintervall.

Für viele Seen stimmen die Trends sehr gut oder zumindest mit überlappendem Vertrauensintervall überein. Grössere Abweichungen sind für die Seen südlich der Alpen erkennbar. Für das Nordbecken des Luganersees ist der aus dem Simstrat-Modell berechnete Trend mehr als doppelt so gross wie derjenige, welcher aus den kantonalen Monitoringdaten berechnet wurde. Abbildung 53 vergleicht die Trends für die Grundtemperatur (Durchschnitt der untersten 5 Meter), und wiederum stimmen die Trends zumeist gut überein. Die Erwärmung ist mit durchschnittlich etwa 0.2 °C wesentlich tiefer als die Erwärmung der Oberfläche mit etwa 0.5 °C. Die sehr starke Erwärmung der Grundtemperatur des Neuenburgersees (Modell und Messungen), sowie des Murtensees (nur Modell) können dadurch erklärt werden, dass nur die letzten 20 Jahre berücksichtigt wurden. Wenn kürzere Zeitreihen analysiert werden, können zufällige Schwankungen eine grössere Rolle spielen. Es ist zu erwarten, dass sich die simulierte und gemessene Erwärmungsrate des Murten- und Neuenburgersees in den nächsten Jahren derjenigen der anderen Seen annähern wird. In sehr tiefe Seen mit seltenen Mischereignissen (z.B. Genfersee, Lago Maggiore oder Nordbecken des Luganersees) erwärmt sich die Grundtemperatur kontinuierlich über mehrere Jahre bis Jahrzehnte durch Wärmediffusion von der Oberfläche zum Grund bis das nächste Mischereignis eintritt (Abbildung 54 zeigt das Beispiel des Nordbecken des Luganersees). Um in solchen Seen den Trend inkl. Mischereignissen nachvollziehen zu können, sind längere Zeitreihen nötig.

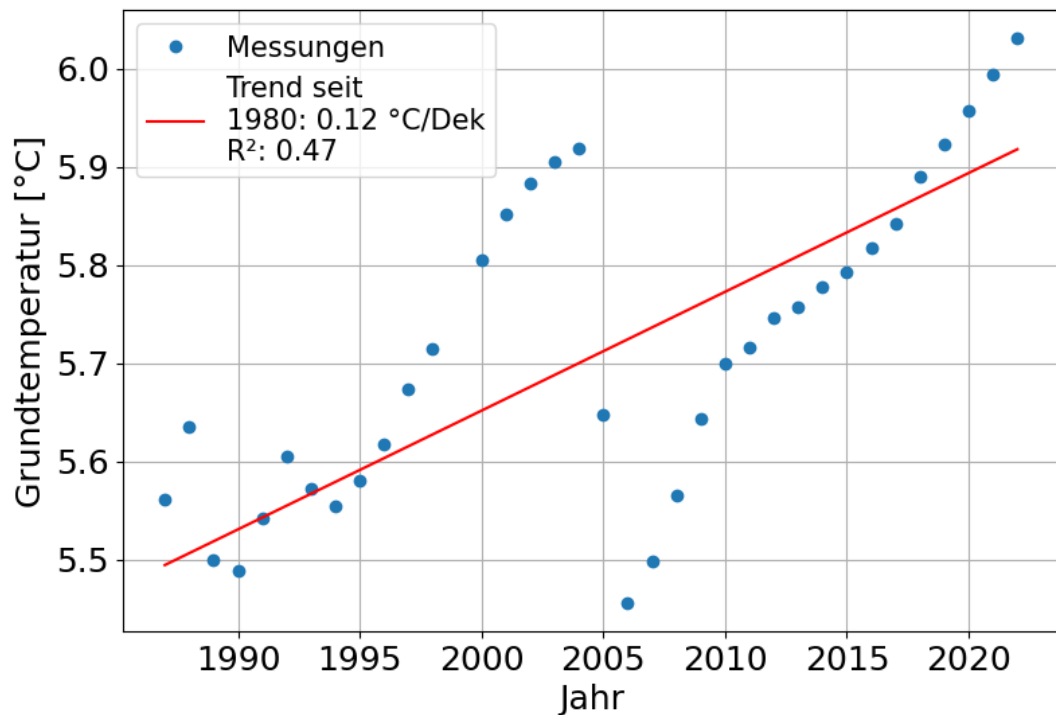


Abbildung 54: Entwicklung der Grundtemperatur im Nordbecken des Luganersees von 1987 bis 2023 mit einem grossen Mischereignis im Winter 2005/2006 (Daten aus dem Monitoring des Kanton Tessin).

7.5 Untersuchungen zur Modellkalibration

Wie viele Jahre an monatlichen Messungen sind nötig, um ein Modell verlässlich zu kalibrieren?

Für die meisten Schweizer Grosseen existieren jahrzehntelange Messreihen von monatlichen Temperaturprofilen. Zur Kalibration von Simstrat werden grundsätzlich alle verfügbaren Messdaten verwendet. Es wurde bisher jedoch nicht untersucht, ob wirklich die gesamte Zeitreihe von oft 30 – 40 Jahren verwendet werden muss, oder ob auch wesentlich weniger Jahre reichen würden. Wichtiger ist diese Frage bei kleinen und mittleren Seen, für welche oft weniger lange Datenreihen existieren. Um diese Frage zu untersuchen, haben wir das Modell für den Zürichsee mit Temperaturmessungen zwischen 1981 und 2020 kalibriert. Von 1 bis 40 Jahren wurden alle möglichen, nicht-überlappenden Zeitreihen innerhalb dieses Intervalls einzeln zur Modellkalibration verwendet, also 40 Kalibrationen mit einer Dauer von einem Jahr, 20 Kalibrationen mit einer Dauer von 2 Jahren usw. Abbildung 55 zeigt oben die Konvergenz der Modellparameter und unten den Fehler des Modells als Funktion der Kalibrationsdauer. Daraus ergeben sich folgende Beobachtungen:

- Der kalibrierte Wert des Strahlungsparameters bleibt von Anfang an praktisch unverändert.
- Der Windparameter und der Seicheparameter (in log) konvergieren in den ersten 2 – 3 Jahren stark und ändern sich danach nur noch leicht.
- Die Abweichung zwischen Modell und Messungen unterschreitet nach etwa 3 Jahren die Grenze von 1 °C und ändert sich ab etwa 5 Jahren nur noch leicht.

Zusammengefasst kann man sagen, dass das Modell für den Zürichsee ab einer Kalibrationsdauer von etwa 5 Jahren gut kalibriert werden kann. Für eine perfekte Konvergenz der Modellparameter (und eine weitere leichte Senkung des Fehlers) braucht es hingegen etwa 10 Jahre an monatlichen Messungen.

Obwohl diese Analyse bisher nur für den Zürichsee durchgeführt wurde, ist anzunehmen, dass die Resultate auch für viele weiteren Grossseen ähnlich wären. Eine Ausnahme könnten diejenigen Seen sein, welche nur selten mischen (Zugersee, Lago Maggiore, Genfersee, Nordbecken des Luganersees). Weiter abgeklärt werden müsste, ob unsere Schlussfolgerungen auch für kleinere Seen gelten oder für den Fall, dass Messungen nur in bestimmten Jahreszeiten vorgenommen werden.

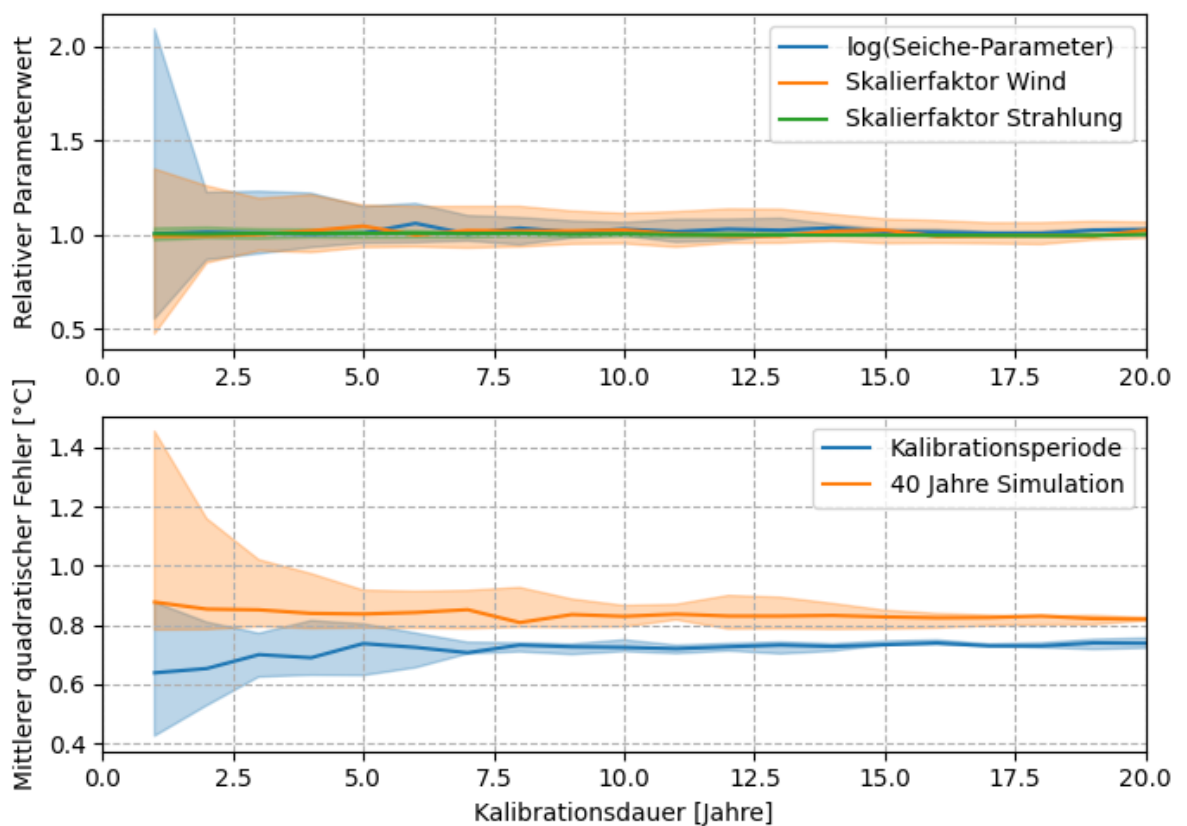


Abbildung 55: Kalibration von Simstrat für den Zürichsee. Oben: Kalibrierte Modellparameter von Simstrat in Abhängigkeit der Länge der zur Kalibration verwendeten Temperatur-Zeitreihe; die Parameter wurden mit den Parameterwerten nach 40 Jahre Kalibration normalisiert, um relative Werte zu erhalten. Unten: Mittlerer quadratischer Fehler der Simulation gegenüber den Messungen während der Kalibrationsdauer (blau), sowie während der gesamten Simulationsdauer von 1981 – 2020 (orange). In beiden Grafiken repräsentiert die durchgehende Linie den Medianwert und der schattierte Bereich den minimalen und maximalen Wert.

Wie viele Jahre an hoch-frequenten Messungen sind nötig, um ein Modell verlässlich zu kalibrieren?

Im vorherigen Abschnitt wurde gezeigt, dass, je nach Kriterium, etwa 5 bis 10 Jahre an monatlichen Profilen nötig sind, um das Modell des Zürichsees verlässlich zu kalibrieren. Mit dem Aufkommen von hoch-frequenten Messstationen stellt sich die Frage, ob von diesen Messungen auch weniger Jahre ausreichen für eine ausreichende Kalibration. Diese Frage möchten wir hier anhand der hoch-frequenten Messungen aus dem Hallwilersee beantworten.

Abbildung 56 zeigt, analog zu Abbildung 55 für den Zürichsee, die Konvergenz der Modellparameter und des Modellfehlers für den Hallwilersee. Neben der Kalibration mit kantonalen Messdaten (repräsentiert durch Linien und schattierte Bereiche) sind auch drei Kalibrations-Intervalle mit hochfrequenten Temperaturdaten eingezeichnet. Es zeigt sich, dass die vorhandenen Intervalle von hochfrequenten Daten (September 2022 – September 2024) genügen, um das Modell des Hallwilersees gut zu kalibrieren, also mit einem möglichst geringen Fehler. Jedoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass hochfrequente Messungen von anderen Jahren zu schlechteren Ergebnissen führen könnten. Ähnlich kann auch die Kalibration des Modells mit einzelnen Jahren von monatlichen Messungen zu schlechten bis sehr guten Ergebnissen führen (siehe den orangenen Bereich bei 1 Jahr in Abbildung 56 unten). Die Schlussfolgerung, dass wenige Jahre an hochfrequenten Messungen genügen, um ein Modell gut zu kalibrieren, sollte sobald möglich mit längere Zeitreihen an konsistenten, hochfrequenten Messdaten erhärtet werden.

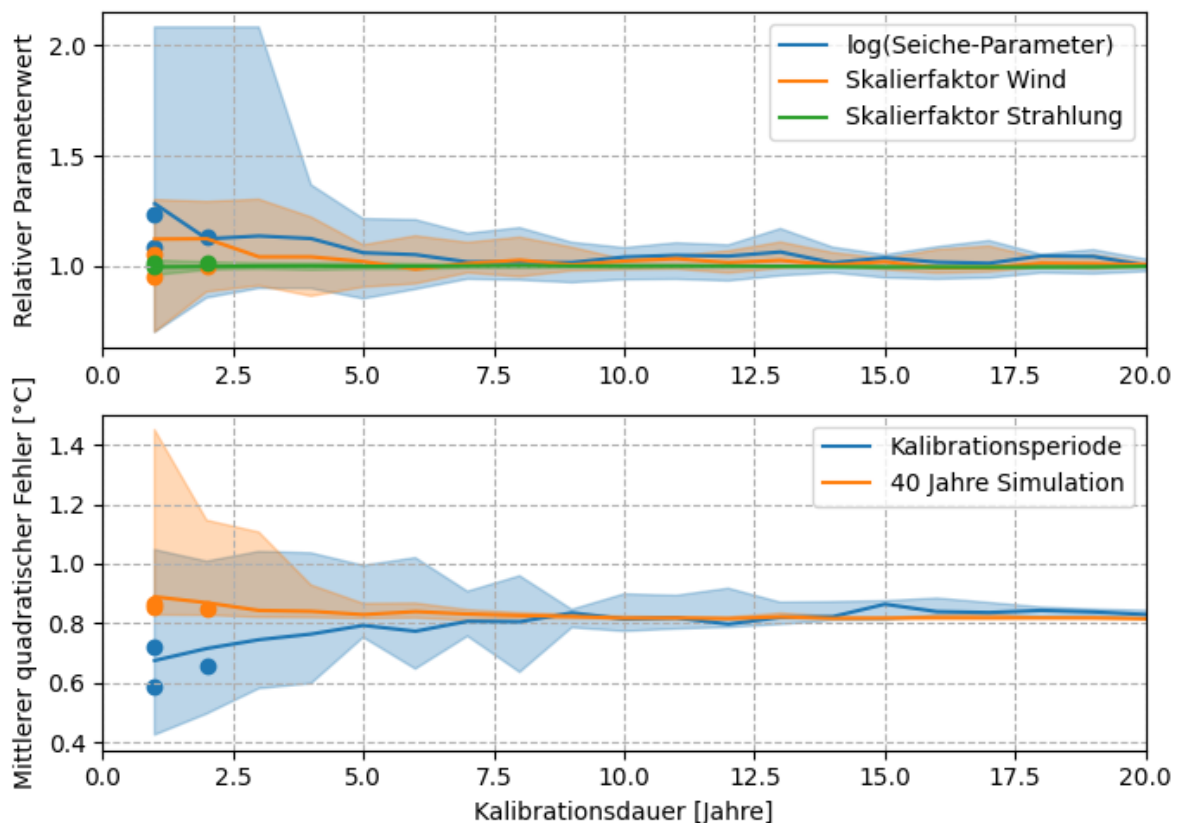


Abbildung 56: Kalibration von Simstrat für den Hallwilersee. Oben: Kalibrierte Modellparameter von Simstrat in Abhängigkeit der Länge der zur Kalibration verwendeten Temperatur-Zeitreihe; die Parameter wurden mit den Parameterwerten nach 40 Jahre Kalibration normalisiert, um relative Werte zu erhalten. Unten: Mittlerer quadratischer Fehler der Simulation gegenüber den Messungen während der Kalibrationsdauer (blau), sowie während der gesamten Simulationsdauer von 1981 – 2020 (orange). In beiden Grafiken repräsentiert die durchgehende Linie den Medianwert und der schattierte Bereich den minimalen und maximalen Wert der Kalibration mit kantonalen Messungen. Die Punkte repräsentieren die Ergebnisse der Kalibration mit den hochfrequenten Messdaten der Messboje im Hallwilersee.

Neben dem direkten Vergleich der Temperaturdaten aus Messungen und Simulationen zeigen auch die Temperaturtrends der kalibrierten Modelle interessante Einblicke. Wir haben für den Hallwilersee ein Modell mit hochfrequenten Temperaturdaten von einem Jahr (Modell 1), 2 Jahren (Modell 2), sowie 40

Jahren an monatlichen Profilen (Modell 3) kalibriert. Danach wurden diese drei Modelle mit den monatlichen kantonalen Messungen von 1985 – 2024 validiert. Weiter wurden für alle drei Modelle die Temperaturtrends an der Oberfläche und am Seegrund berechnet und mit den Messdaten verglichen.

Tabelle 9 fasst die mittleren Abweichungen zwischen den drei Modellen und den kantonalen Daten zusammen. Es fällt auf, dass die Abweichung über alle Tiefen gemittelt bei allen Modellen ähnlich gut ist und von Modell 1 (1 Jahr hochfrequente Messungen für Kalibration) bis Modell 3 (40 Jahre monatliche Profile) nur leicht sinkt. Bei Modell 3 ist jedoch die Repräsentation der Oberflächentemperatur klar besser, während Modell 1 die Grundtemperatur am besten simuliert. Die leicht tiefere Gesamtabweichung von Modell 2 gegenüber Modell 1 kann mit der besseren Simulation der mittleren Tiefen erklärt werden. Trotz den ähnlichen Abweichungen sind die Parameterwerte für die drei Simulationen unterschiedlich (Windparameter zwischen 0.87 und 1.07; Seiche-Parameter zwischen 8×10^{-4} und 9×10^{-3}).

Tabelle 9: Mittlere Abweichung zwischen Simstrat-Modell und Messdaten von 1985 – 2024 für alle Tiefen, die Oberfläche und den Grund, und Modelle kalibriert mit einem bzw. zwei Jahren an hoch-frequenten Messungen (Modell 1 und Modell 2), sowie kantonalen monatlichen Profilen (Modell 3).

	Abweichung alle Tiefen [°C]	Abweichung Oberfläche [°C]	Abweichung Grund [°C]
Modell 1	0.88	0.96	0.51
Modell 2	0.87	0.96	0.55
Modell 3	0.83	0.84	0.55

Neben der mittleren Abweichung haben wir für die drei Modelle, sowie für die Messungen und ein unkalibriertes Modell die Temperaturtrends an der Oberfläche und am Grund berechnet (Abbildung 57). Die Ergebnisse können folgendermassen zusammengefasst werden:

- Die Oberflächen- und Grundtemperaturtrends der mit hochfrequenten und monatlichen Messungen kalibrierten Modelle unterscheiden sich nur sehr geringfügig.
- Die aus den Monitoringdaten berechneten Trends sind leicht höher als die simulierten, jedoch ist auch deren Unsicherheit höher, da monatliche Messungen immer einer gewissen Zufälligkeit unterliegen.
- Auch ein unkalibriertes Modell kann den Temperaturanstieg befriedigend repräsentieren. Der Anstieg der Oberflächentemperatur wird tendenziell leicht unter- und derjenige der Grundtemperatur überschätzt.

Es muss wiederum betont werden, dass diese Erkenntnisse vorerst nur den Hallwilersee betreffen. Ob sie auch für andere Seen (speziell die sehr tiefen) gültig sind, wird sich in weiteren Untersuchungen erweisen müssen.

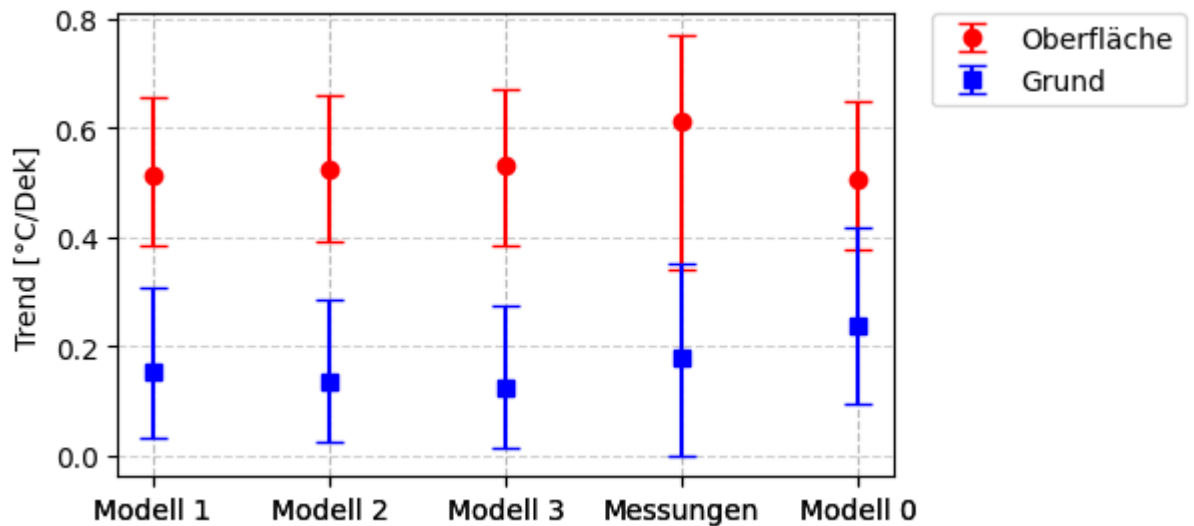


Abbildung 57: Trends der Oberflächen- und der Grundtemperatur des Hallwilersees von 1985 – 2024. Modell 1 und 2 wurden mit einem bzw. zwei Jahr hoch-frequenten Messungen kalibriert, Modell 3 mit 40 Jahren kantonalen Messungen und Modell 0 ist unkalibriert. Die Regression wurde mit dem Theil-Sen-Algorithmus berechnet und die Fehlerbalken stellen das 95%-Vertrauensintervall dar.

Abbildung 58 zeigt die monatlichen (kantonalen), sowie die hochaufgelösten Messungen im Vergleich mit den kalibrierten Modellen 2 und 3 von 2020 bis 2024. Die Abbildung zeigt, dass die simulierten Wassertemperaturen vor allem an der Oberfläche und am Seegrund sehr nahe bei den Messungen liegen. Auch im Bereich der Thermokline (welche im Spätsommer und Herbst bei etwa 10 m liegt) sind die Differenzen meist klein. Knapp unterhalb der Thermokline bei 15 m sind die simulierten Wassertemperaturen jedoch oft einige Grad über der gemessenen Temperatur.

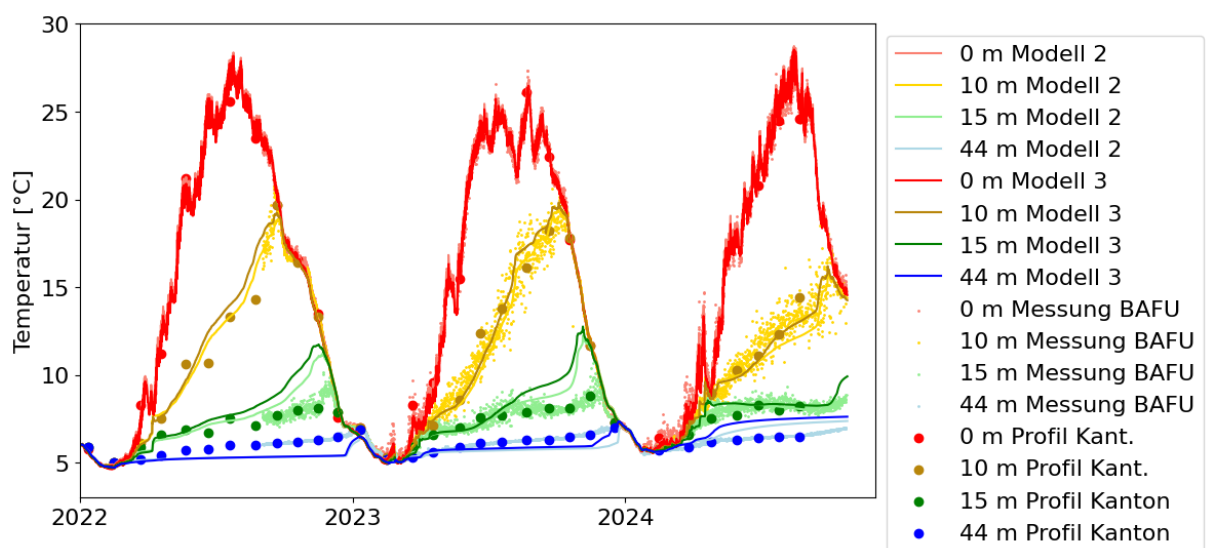


Abbildung 58: Vergleich der monatlichen kantonalen, und der hochaufgelösten Temperaturmessungen der BAFU-Stationen im Hallwilersee mit einer Simulation kalibriert mit kantonalen Messungen (Modell 3) und einer Simulation kalibriert mit BAFU-Messungen (Modell 2).

Sind abgeleitete Grössen geeigneter als die Temperatur um Modelle zu kalibrieren?

In der Praxis werden grossmehrheitlich direkt die gemessenen Temperaturwerte verwendet, um Seemodelle zu kalibrieren. Dabei wird die mittlere Abweichung zwischen Simulation und Messung für alle Tiefen und Zeitpunkte minimiert. Hier wurde anhand des Beispiels des Zürichsees der Versuch gemacht, aus den Temperaturmessungen abgeleitete Grössen wie der Wärmeinhalt, die Schmidt-Stabilität und die Mischungstiefe zur Kalibration zu verwenden. Es zeigte sich, dass die Kalibration mit Wärmeinhalt oder Schmidt-Stabilität zu ähnlichen Ergebnissen führte, während sich bei der Kalibration mit der Mischungstiefe die Modellparameter signifikant veränderten.

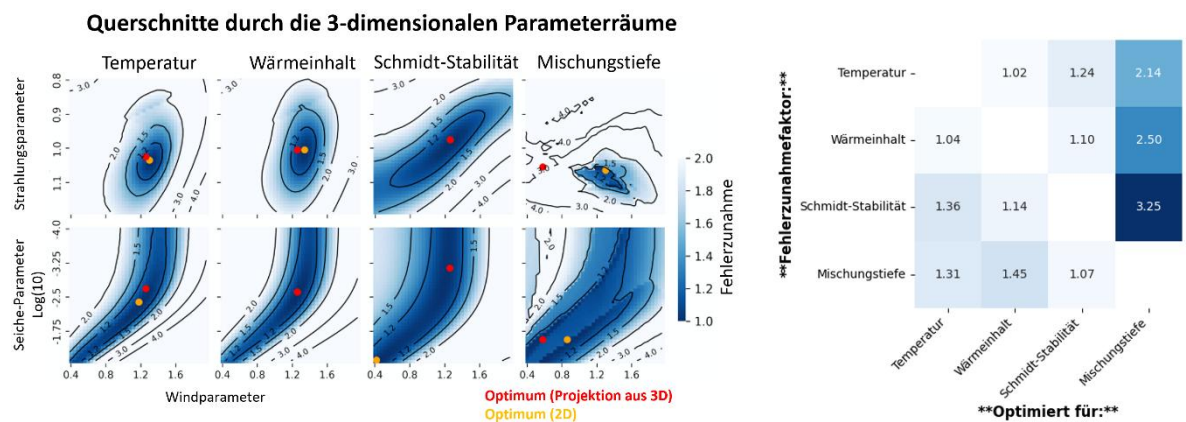


Abbildung 59: Querschnitte durch den dreidimensionalen Parameterraum für verschiedene optimierte Variablen (links); Faktor des Fehleranstiegs, wenn verschiedene Variablen optimiert werden. Zum Beispiel führt die Kalibration mit der Schmidt-Stabilität zu einer Erhöhung des Temperaturfehlers um 36 % (rechts). Figur Thomas Lorimer.

Das heisst, dass es keine grosse Rolle zu spielen scheint, ob man die Temperatur, den Wärmeinhalt oder die Schmidt-Stabilität als Zielgrösse für die Kalibration verwendet, da die Ergebnisse ähnlich sind. Jedoch führt die Optimierung der Mischungstiefe dazu, dass die simulierte Temperatur, der simulierte Wärmeinhalt und die simulierte Schmidt-Stabilität nicht mehr optimal mit den gemessenen Werten übereinstimmen. Dieses Ergebnis könnte dazu führen, dass in Zukunft Modelle für verschiedene Zwecke kalibriert werden könnten. Falls zum Beispiel die Mischungstiefe von grosser Wichtigkeit ist, könnte diese in der Kalibration optimiert werden. Neben der Zunahme des Fehlers für die Optimierung bestimmter Grössen zeigt Abbildung 59 die projizierten Parameterräume der Kalibration mit drei Parametern. Es zeigt sich, dass für die Ebene, welche vom Windparameter und vom Strahlungsparameter aufgespannt werden, ein gut definiertes Optimum existiert. Im Gegensatz dazu besteht die Projektion des Windparameters und des Seicheparameters aus einem flachen, gebogenen Tal. Dies bedeutet, dass ein tiefer Wert für den Windparameter durch einen erhöhten Wert des Seicheparameters teilweise kompensiert werden kann (in Abbildung 59 ist der Seicheparameter logarithmisch dargestellt) ohne dass sich die Simulation wesentlich verschlechtert.

7.6 Parameterisierung von Modellen für Seen ohne Messdaten

Für die operationelle Simulation der 87 Schweizer Seen wurden für jeden See vier Modellparameter kalibriert: dies sind einerseits drei Skalier-Faktoren für die Windgeschwindigkeit, die einfallende

langwellige Strahlung und den Eintrag von Energie aus dem Wind in interne Wellen, sowie andererseits die Temperatur, bei welcher Niederschlag als Schnee fällt (nur für höhergelegene Seen relevant). Bei Seen mit weniger als 24 Beobachtungen der Sichttiefe (Secchi-Tiefe) wurde zusätzlich ein Skalier-Faktor für die Absorption der Sonnenstrahlung im Wasser hinzugefügt. Zielfunktion der Kalibration ist die Wurzel der quadratischen Abweichung (RMSE) der simulierten und beobachteten Temperaturprofile. Letztere werden durch das kantonale Monitoring zur Verfügung gestellt.

Anstatt die vier (oder fünf für Seen mit nur wenigen Beobachtungen der Sichttiefe) Modellparameter zu kalibrieren, können sie auch geschätzt werden. Damit dies möglich ist, braucht es konsistente Zusammenhänge zwischen einfach zu messenden oder zu schätzenden Variablen wie Seeoberfläche, Höhe über Meer, Steilheit des Geländes oder auch meteorologischen Variablen wie mittlerer Lufttemperatur oder Windgeschwindigkeit auf der einen Seite und den Modellparametern auf der anderen Seite. Ein Beispiel eines solchen Zusammenhangs ist Abbildung 60 (links) dargestellt: der adimensionale Windfaktor korreliert positiv mit der Seeoberfläche, das heisst, je grösser der See, desto grösser ist auch die Windangriffsfläche und desto mehr muss die gemessene Windgeschwindigkeit (von MeteoSchweiz) nach oben korrigiert werden. Demgegenüber ist der Zusammenhang zwischen dem Skalier-Faktor für langwellige Strahlung und der Seeoberfläche weit weniger klar (Abbildung 60 rechts).

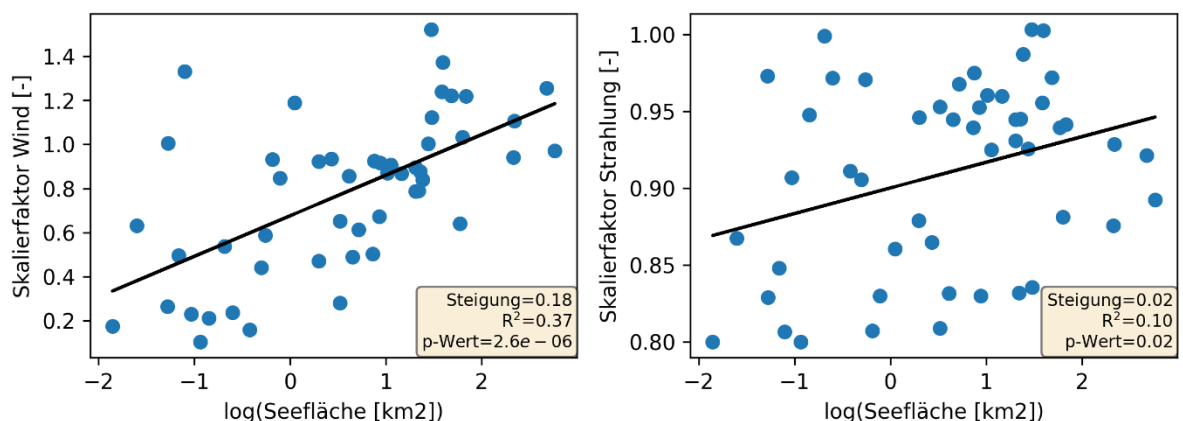


Abbildung 60: Abhängigkeit des Wind-Skalierfaktors (links) und des Skalierfaktors für langwellige Strahlung (rechts) von der Seefläche für alle 87 Seen. Die lineare Regressionsgerade ist in schwarz eingezeichnet.

In einem ersten Versuch wurden unter den 87 kalibrierten Seemodellen diejenigen ausgewählt, für die der RMSE $< 2^\circ\text{C}$ ist. Von dieser Menge an Seen wird ein Teil verwendet, um Algorithmen wie «Random Forest» oder «multilineare Regression» zu trainieren, die Modellparameter anhand von Variablen wie Seeoberfläche, Tiefe, Lufttemperatur oder Sonneneinstrahlung schätzen. Der restliche Teil wird verwendet, um die Qualität der Schätzungen zu überprüfen, d.h. wie stark sich die geschätzten Modellparameter von den kalibrierten Modellparametern unterscheiden. Als Vergleich werden die Modellparameter eines Sees einfach auf den Mittelwert aller anderen Seen gesetzt. Zum Beispiel wäre der Wind-Parameter von See «X» dann der Mittelwert des Wind-Parameters aller kalibrierten Seemodelle.

Es zeigte sich, dass mit den gewählten Algorithmen zur Schätzung der Parameter leicht bessere Modellergebnisse erzielt werden können als bei der Verwendung der mittleren Parameterwerte. Weitere Untersuchungen werden zeigen, wie substantiell diese Verbesserung ist und ob sie ausreicht, um Seen ohne Beobachtungen verlässlich zu simulieren.

7.7 Versuch der Simulation der Sauerstoffdynamik in Schweizer Seen

Das physikalische Modell Simstrat wurde von uns vor einigen Jahren mit dem biochemischen Modell «AED2» verknüpft. Dies erlaubt auch die Simulation von Nährstoffen, Sauerstoff und weiteren biochemischen Parametern. Die Simulation von Sauerstoff kann sehr aufwändig sein, da viele Prozesse eine Rolle spielen: Produktion durch Phytoplankton, biologische Zersetzungsprozesse am Seegrund und im Wasser, chemische Reaktionen und Gas-Austausch mit der Atmosphäre. Wir haben einen ersten Versuch gestartet, die Sauerstoffdynamik in Schweizer Seen operationell (d.h. mit täglichem Update) zu simulieren. Dazu vereinfachen wir den Sauerstoffkreislauf in Schweizer Seen und beschränken uns auf folgende Prozesse:

- Gas-Austausch mit der Atmosphäre an der Seeoberfläche
- Konstante Sauerstoffzehrung am Seegrund

Die seespezifische Rate der Sauerstoffzehrung wurde Müller et al. (2019) entnommen und ist zeitlich und räumlich konstant. Die Vernachlässigung der Sauerstoffzehrung im Wasser kann dadurch gerechtfertigt werden, dass sie in gegenüber derjenigen am Seegrund meist eine untergeordnete Rolle spielt. Letzteres stimmt jedoch nicht für sehr tiefe Seen wie zum Beispiel dem Genfersee (Schwefel et al. 2017). Jedoch bedeutet die Vernachlässigung der Sauerstoffproduktion durch Phytoplankton, dass das Modell die Sauerstoffkonzentration im Epilimnion während des Sommers unterschätzt. Abbildung 61 zeigt, dass die Simulation trotz den Vereinfachungen qualitativ gut mit den Messungen der Kantone übereinstimmt. Es gibt einzelne Jahre, in welchen die Simulation aber an ihre Grenzen stösst. Beispiele dafür sind das Jahr 2022 für den Murtensee und die Jahre 2015 und 2021 – 2024 für den Hallwilersee. In allen diesen Fällen scheint das Hauptproblem, dass die Sauerstoffkonzentration zu Beginn der Stagnationsphase stark unterschätzt wird. Die Sauerstoffzehrungsrate (also die Steigung der Kurven während des Sommers) stimmt aber meist gut überein zwischen Messungen und Simulation.

Die Simulationen könnten folgendermassen verbessert werden:

- Verbesserung der Gleichung für den Gas-Austausch zwischen See und Atmosphäre; insbesondere die hochaufgelösten Sauerstoffdaten der Messstation im Ägerisee könnten hierzu hilfreich sein.
- Aufteilung der Sauerstoffzehrung in Zehrung im Sediment und im freien Wasser.
- Implementierung der Sauerstoffproduktion durch Phytoplankton in Abhängigkeit der Temperatur, der Licht- und der Nährstoffverhältnisse.

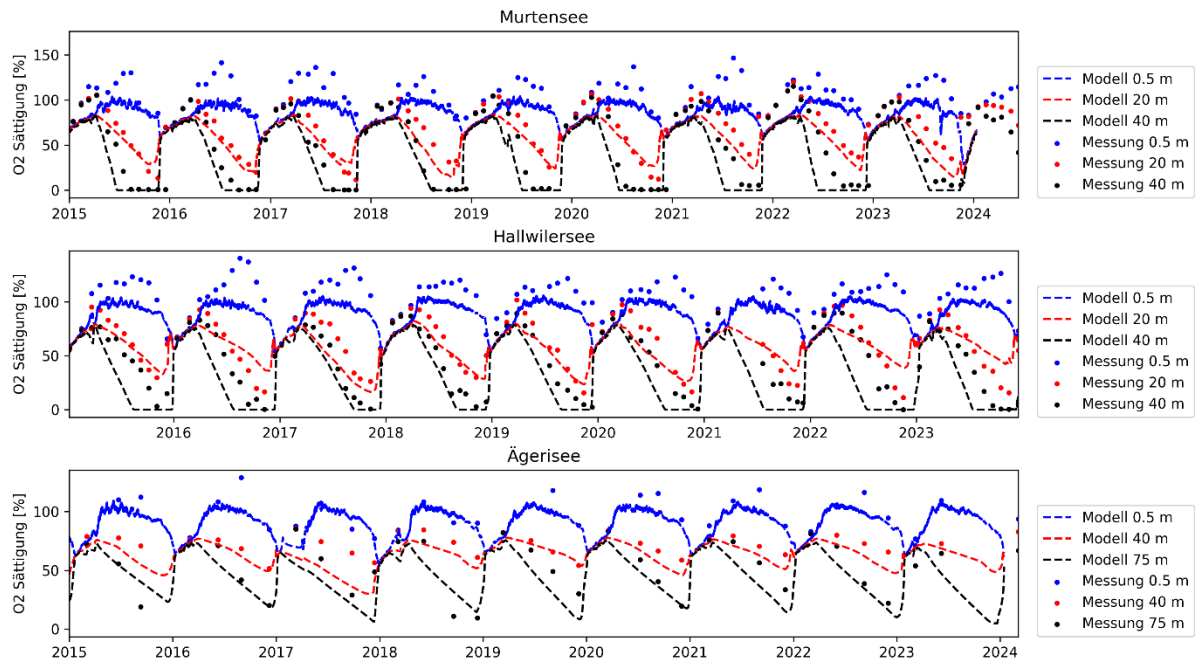


Abbildung 61: Sauerstoffsimulationen mit Simstrat-AED2 für den Murtensee, Hallwilersee und Ägerisee an verschiedenen Tiefen und verglichen mit den Messungen der kantonalen Fachstellen.

7.8 Integration von Satellitendaten

Die Forschungsgruppe Fernerkundung stellt seit einiger Zeit Echtzeit-Sichttiefendaten von ungefähr 20 grossen Schweizer Seen auf der Datalakes-Plattform zur Verfügung. Die Sichttiefen werden mithilfe von Sentinel3-Satellitenbildern berechnet. Da diese Seen zumeist über monatliche Messungen der Sichttiefen durch die kantonalen Fachstellen verfügen, wurden die satellitengestützten Sichttiefen bisher nicht als Inputdaten in die eindimensionalen Simulationen integriert. Die Nutzung von Bildern des Satelliten Sentinel2, welcher über eine wesentlich höhere räumliche Auflösung verfügt, könnte es jedoch erlauben, die Sichttiefe auch für kleinere Seen zu messen, welche über kein Monitoring-Programm verfügen. Die Sichttiefe ist insbesondere für die Simulation von Kleinseen wichtig, da sie die Verteilung der Sonnenenergie in die verschiedenen Wassertiefen reguliert. Leider hat sich herausgestellt, dass sich auch mit der besseren Auflösung die Sichttiefe von Kleinseen nur sehr schwer messen lässt. Lokale Einflüsse durch Topografie, seichte Stellen mit sichtbarem Seegrund und zu wenige Pixel für eine gute Mittelwertbildung erschweren den Prozess. Es bleibt zu hoffen, dass in den kommenden Jahren Methoden entwickelt werden können, welche die satellitengestützte Messung der Sichttiefe in Kleinseen erlaubt.

Schon weit fortgeschritten ist die Berechnung der Temperatur der Wasseroberfläche mittels Satellitenbildern. Die Unsicherheit dieser Daten ist jedoch im Bereich von etwa $\pm 1^\circ\text{C}$ und somit, im Fall der Grossseen, in einem ähnlichen Bereich, wie die Simulationen. Dies bedeutet, dass es zumindest zweifelhaft ist, ob der Gebrauch von Temperaturdaten aus Satellitenmessungen einen Mehrwert bietet. Für die Simulation von Seen mit nur wenig Temperaturdaten, könnte sich der Gebrauch von Satellitenbildern aber durchaus lohnen. Dies sollte in späteren Arbeiten untersucht werden.

Zusammenfassung Kapitel 7

- Das eindimensionale physikalische Seenmodell "Simstrat" wurde im Rahmen des Pilotprojekts weiter verbessert. Insbesondere wurden erste Schritte unternommen, um die Simulation von Kleinseen zu verbessern.
- Momentan werden 87 Schweizer Seen simuliert mit täglicher Aktualisierung basierend auf aktuellen Wetter- und Zuflussdaten.
- Die Genauigkeit der Simulationen ist für die Grossseen sehr gut; sowohl einzelne Tage wie auch die Temperaturtrends über mehrere Jahrzehnte werden gut abgebildet.
- Eine gleichzeitige Optimierung der Temperatur, sowie der Mischungstiefe ist herausfordernd.
- Für die Kalibration von Simstrat sind mindestens 5 und idealerweise 10 und mehr Jahre an monatlichen Profilen wünschenswert
- Erste Analysen zeigen, dass die Kalibrationsperiode kürzer sein darf, wenn hochfrequente Messdaten verwendet werden. Diese Schlussfolgerung sollte in einigen Jahren erhärtet werden, sobald längere Zeitreihen von hochfrequenten Messdaten vorhanden sind.
- Sehr tiefe Seen mit seltenen Mischereignissen wurden nicht untersucht, benötigen aber womöglich eine längere Kalibrationsdauer als monomiktische Seen.
- Es wurden erste Versuche zur Vorhersage der Modellparameter von Seen ohne Messdaten unternommen. In diesen ersten Versuchen wurde die Genauigkeit der Simulationen gegenüber solchen mit unkalibrierten Modellparametern aber nicht signifikant verbessert.
- Die Kopplung von Simstrat mit dem biochemischen Modell AED2 führt nach kurzem Entwicklungsaufwand zu guten Ergebnissen für die Simulation von Sauerstoff im Tiefenwasser.

8. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

8.1 Zusammenfassung Ergebnisse

Es gibt etwas mehr als 11'000 Schweizer Seen grösser als 30 m². Diese können grob in folgende Gruppen eingeteilt werden:

- Grossseen ab etwa 0.3 km² zumeist an flachen Lagen, wovon es, abzüglich der künstlichen Stauseen, schweizweit etwa 50 gibt
- Kleinseen an flachen Lagen und tendenziell hoher Trübung durch hohen Nährstoffgehalt und Algenproduktion
- Kleinseen an Höhenlagen > 1800 m ü. M. mit zumeist klarem Wasser
- Gletscherseen mit hoher Trübung durch mineralische Partikel

Die Kleinseen dominieren zahlenmässig und werden oft stark durch lokale Gegebenheiten beeinflusst wie beispielsweise Zuflüsse, Grundwasser, Eis- und Schneeschmelze und lokale Beschattung. Eine repräsentative Auswahl würde deswegen viele Kleinseen umfassen müssen. Ein Anfang könnte mit etwa 30 – 40 Kleinseen gemacht werden. Für eine feinere Einteilung (Clustering) der Kleinseen fehlt die Datenbasis, da zwei der wichtigsten Eigenschaften (Tiefe und Trübung) von weniger als 100 Seen bekannt sind, also weniger als 1 % der Schweizer Seen. Eine feinere Einteilung wäre jedoch wünschenswert, da die Clustering-Analyse zeigt, dass sich die Seen innerhalb eines Clusters stark unterscheiden.

Die kantonalen Fachstellen und internationalen Kommissionen erheben, teilweise seit vielen Jahrzehnten, Wassertemperaturen in Schweizer Seen. In den Grossseen geschieht dies zumeist mit monatlichen vertikalen Profilen an der tiefsten Stelle. Einige Kantone, wie beispielsweise Waadt, Zürich und Bern, beproben zudem auch regelmässig einige kleine bis mittelgrosse Seen. Diese Langzeit-Messungen erlauben es, den generellen Erwärmungstrend der Schweizer Seen in den letzten Jahrzehnten nachzuvollziehen. Bei der Oberflächentemperatur der Schweizer Grossseen beträgt der Trend in den letzten 40 Jahren etwa 0.5 °C/Dekade. Bei Variablen wie Maximaltemperaturen oder Stagnationsdauer stösst die Aussagekraft dieser monatlichen Messungen aber an ihre Grenzen.

Wir haben in den letzten 2.5 Jahren in drei Schweizer Seen zeitlich hochaufgelöste Messsysteme mit automatischer Datenübermittlung getestet:

- Im Hallwilersee eine Datenboje des US-Herstellers Soundnine mit 18 Sensoren und Temperaturwerten alle 10 Minuten. Dieses günstige Messsystem hat sich mit hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit bewährt. Nur die Schaumstoffhülle der Datenboje ist zu wenig robust.
- Im Murtensee eine Datenboje der Firma Mobilis (FR) mit Messkette der Firma RBR (CA) mit 24 Sensoren und Temperaturwerten alle 10 Minuten. Die Sensoren der Messkette haben nicht zuverlässig funktioniert und wurden durch 18 Sensoren der Firma Soundnine ersetzt. Die Kombination Mobilis-Soundnine ist robust, langlebig und präzise, aber etwas höher im Anschaffungspreis, als wenn die Datenboje ebenfalls von Soundnine stammen würde.
- Im Ägerisee eine Profiling-Datenboje der Firma Flydog (EST) mit Messinstrument der Firma Idronaut (IT). Dieses System ermöglicht eine sehr hohe Tiefenauflösung (10 cm), aber eine niedrigere zeitliche Auflösung (alle 3 – 24 Stunden). Die Zuverlässigkeit des Systems war, mit Ausnahme von mechanischen Problemen bei sehr kalten Temperaturen, sehr hoch. Die Probleme können vermieden werden, indem bei Lufttemperaturen deutlich unter dem Gefrierpunkt nicht gemessen wird. Ein grosser Vorteil des Profiler-Systems ist die einfache Erweiterung mit Wasserqualitätssensoren (Sauerstoff, Algenpigmente, pH etc.).

Bei Kleinseen werden meist einfache Messketten mit Temperaturloggern an verschiedenen Tiefen eingesetzt. Wir haben dafür die MX2203-Logger der Firma Hobo verwendet. Wir haben bei diesen günstigen Sensoren (ca. 150 Fr.) die mittlere Abweichung korrigiert, und sie gegen Sonneneinstrahlung geschützt. So konnten zu einem günstigen Preis gute Resultate erzielt werden. Für die zukünftige Messung von Kleinseen empfehlen wir aber die teureren Logger der Firma RBR (ca. 600 Fr.), welche langlebiger sind und weniger Wartungs- und Validierungsaufwand verursachen. So können langfristig Kosten gespart werden.

Die Live-Messdaten werden automatisiert bearbeitet, gespeichert und auf Datalakes visualisiert. Dies geschieht durch automatisch ausgelöste Computer-Skripts, welche in Python geschrieben und über Datalakes öffentlich einsehbar sind. Die Messdaten, sowie ihre Bearbeitung, sind also im Sinne des Öffentlichkeitprinzips jederzeit öffentlich, und zur Weiterbearbeitung durch die Wissenschaft, die öffentliche Hand, private Büros und Privatpersonen verfügbar. Die Visualisierung auf Datalakes erlaubt das Begutachten der aktuellen Messwerte, und die Grafiken können in externe Webseiten eingebaut werden, beispielsweise diejenigen der Kantone oder des Bundes.

Neben den Temperaturdaten werden Variablen wie der Wärmehalt, die Stabilität der Schichtung und die Thermoklinentiefe automatisch berechnet und visualisiert. Diese Variablen bieten den Stakeholdern einen Mehrwert, der über die Messung der Temperatur hinausgeht.

Die Eawag publiziert seit 5 Jahren ihre See-Simulationen auf einer öffentlichen Webseite. Die Simulationen werden mit dem an der Eawag entwickelten eindimensionalen Modell «Simstrat» durchgeführt und täglich aktualisiert. Die numerischen Simulationen können genutzt werden, um

- monatliche Datenreihen wie diejenigen der kantonalen Probenahmen intelligent zu interpolieren inkl. Berechnung der aktuellen Seetemperatur
- die Veränderung von Seen aufgrund menschlicher Interventionen wie Wärmenutzung oder veränderter Zuflüsse abzuschätzen
- Kurzzeit-Prognosen zu erstellen (5 Tage)
- Langzeit-Simulationen für die Auswirkungen von Klimaszenarien durchzuführen.

Der mittlere quadratische Fehler der Simulationen beträgt bei Grossseen ungefähr 1 °C an der Oberfläche und 0.5 °C im Tiefenwasser. Bei Kleinseen kann der Fehler wesentlich grösser sein (bis 4 °C), da lokale Effekte wie Schneeschmelze oder Grundwassereintrag in Simstrat bisher nicht berücksichtigt werden können. Für die Kalibration der Modelle werden die kantonalen Temperaturmessungen benutzt. Erste Untersuchungen zeigen, dass die zur Kalibration nötigen Temperatur-Zeitreihen von etwa 5 bis 10 auf nur wenige Jahre reduziert werden können, wenn hochfrequente Messungen verwendet werden. Dies bedeutet, dass während zwei bis drei Jahren Temperaturmessketten in einem See installiert werden könnten und damit ein Modell kalibriert werden könnte. Es werden aber weitere Analysen mit längeren Zeitreihen von hochfrequenten Messdaten empfohlen, um diese Schlussfolgerung zu erhärten.

Die Simstrat-Simulationen wurden im Verlauf der letzten 3 Jahre in die neue Webplattform «Alplakes» integriert und sind nun dort zusammen mit drei-dimensionalen Simulationen laufend verfügbar. Diese Webplattform wurde in einem gemeinsamen Projekt der Eawag und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) erarbeitet. Aufgrund seiner grossen Bedeutung wird in einem Pilotversuch auch der Sauerstoffgehalt der Seen mit einem stark vereinfachten Modell mitsimuliert.

Um die Simulationen auf Seen auszuweiten, welche über gar keine Temperaturmessungen verfügen, wurden erste Versuche gestartet, um die Modellparameter basierend auf See-Eigenschaften wie beispielsweise Fläche, Tiefe oder Trübung abschätzen zu können.

Ein wichtiger Input-Parameter von Simstrat ist die Sichttiefe (Secchi-Tiefe). Dieser Parameter wird benötigt, um die einfallende Sonnenenergie korrekt über die Seetiefe zu verteilen. Die Secchi-Tiefe ist Bestandteil der kantonalen See-Monitoringprogramme, wird aber nur für Grossseen monatlich erhoben. Für die restlichen Seen verhindert die fehlende Secchi-Tiefe bessere Simulationsergebnisse. Für Seen ab einer Grösse von etwa 5 Hektaren könnten aber in Zukunft Satellitendaten (Sentinel 2) verwendet werden, um die die Secchi-Tiefe abzuschätzen.

8.2 Beantwortung der BAFU-Fragen

Die Fragen des BAFU sind in schwarz, die aus den Erkenntnissen dieser Arbeit abgeleiteten Antworten in blau.

Das Monitoring-Messnetz sollte möglichst repräsentativ sein, das heisst

- mit einer beschränkten Auswahl von Seen sollte das Verhalten möglichst vieler See(typen) abgebildet werden können;

Dies ist für die Temperaturtrends (Oberfläche- und Grundtemperatur) der Grossseen durch die Kombination von Messungen und Modellrechnungen relativ gut möglich, da sie nur wenig durch Zuflüsse (inkl. Grundwasser und Schneeschmelze) beeinflusst werden. Bei den Kleinseen würde eine hohe zweistellige Anzahl an Seen benötigt werden, um repräsentative Aussagen machen zu können. Falls bei den Grossseen auch die Mischungsdynamik von Interesse ist, würden wir empfehlen, dass schlussendlich (in Zusammenarbeit mit den Kantonen) alle bedeutenden Grossseen mit Messsystemen überwacht werden. Die Gründe dafür sind folgende:

- Vor allem die tieferen Seen (> 100 m) sind bezüglich Mischungsdynamik Unikate und diese ist eine bedeutende Komponente der vertikalen Verfügbarkeit von Sauerstoff und Nährstoffen.
 - Jeder einzelne Grosssee ist regional von gesellschaftlicher Bedeutung (Ökologie, Trinkwasser, Freizeit, Fischerei).
 - Die Simulationen können die Mischungsdynamik von tiefen Seen oft noch nicht befriedigend abbilden.
- die im Monitoring eingeschlossenen Seen sollten geeignet sein, um die Fragen, die sich bezüglich Wassertemperaturen unter anderem hinsichtlich des Klimawandels stellen oder stellen werden, bearbeiten zu können.

Die ausgewählten Grossseen (Ägerisee, Hallwilersee, Murtensee) bieten einen guten Gegensatz zwischen einem See, welcher im Wandel von dimiktisch zu monomiktisch ist und zwei eutrophen Seen mit bestehenden Sauerstoffproblemen, welche durch den Klimawandel verstärkt werden könnten. So sind zwei der wichtigsten Themen abgedeckt. Was fehlt, ist ein tiefer See, in welchem der Klimawandel potenziell zu noch selteneren Mischereignissen führt. Im Jahr 2026 ist jedoch die Inbetriebnahme einer Messstation im Zugersee, sowie im Vierwaldstättersee geplant.

Die acht bisher gemessenen Kleinseen genügen nicht, um einen repräsentativen Überblick über die Kleinseen zu erhalten. In Zukunft werden zwei davon weitergeführt, weitere könnten aber dazukommen.

Das Messnetz sollte gut vernetzt sein mit

- den Nutzungen des Wassers, insbesondere für die Wasserversorgung, aber auch mit anderen sozioökonomischen Nutzungsaspekten;

Die Wassertemperaturdaten sind jederzeit öffentlich verfügbar und können so auch von Wasserversorgungen oder anderen Nutzenden verwendet werden. Die enge Zusammenarbeit mit den Kantonen sorgt dafür, dass Weiterentwicklungen der Messstationen der Praxis zugutekommen. Ein

Beispiel dafür ist die Integration eines Sensors für Algenpigmente in die Messstation im Ägerisee. Die Entwicklung der Algenpopulation ist u.a. für die lokale Wasserversorgung bedeutend. Konkret wird empfohlen, neben der Wassertemperatur, die folgenden Parameter zu messen:

- Leitfähigkeit
- Sauerstoffkonzentration und -sättigung
- Algenpigmente (Chlorophyll-A; evtl. Phycoerythrin und Phycocyanin)

Diese Parameter bedingen nur wenig Wartungsaufwand (monatliche Reinigung), welcher oft während der kantonalen Probenahmen durchgeführt werden kann. Mit der Leitfähigkeit kann die Salinität berechnet werden, welche im Winter die Mischungsdynamik mit beeinflussen kann. Der Sauerstoffgehalt und die Algenkonzentrationen erlauben wichtige Rückschlüsse auf biologische Prozesse in den Seen.

- den Messungen der Kantone;

Die beiden Messketten im Murten- und Hallwilersee messen die Wassertemperatur unter anderem in denjenigen Tiefen, welche auch in den kantonalen Monitoringprogrammen beprobt werden. So können die hochaufgelösten Temperaturmessungen mit monatlichen, biochemischen Parametern verknüpft werden. Die Messstationen werden möglichst nahe an der tiefsten Stelle platziert, wo üblicherweise auch die kantonalen Probenahmen stattfinden. So ergänzen die hochaufgelösten Temperaturmessungen in idealer Weise die monatlichen biochemischen kantonalen Untersuchungen.

- anderen relevanten Messdaten, welche bereits bestehen oder in Zukunft bestehen werden (z.B. Meteorologie, Fliessgewässertemperaturen, NAWA, etc.).

Die Temperaturdaten sind jederzeit öffentlich verfügbar und können mit Messungen der Meteorologie und der Fliessgewässer verknüpft werden. Die Oberflächentemperatur der Messstationen kann als «Proxy» für die See-Abflusstemperatur genutzt werden. Die See-Abflusstemperatur kann sich aber insbesondere infolge von internen Wellen von der Oberflächentemperatur in der Seemitte unterscheiden.

Zudem soll das künftige Monitoring erlauben:

- die bestehenden, bisherigen Messreihen der Kantone mit den künftigen Temperaturmessungen des Bundes zu korrelieren (Verbindung Geschichte – Gegenwart – Zukunft);
- die bestehenden Messstationen (niederfrequente Messintervalle) der Kantone, dort wo möglich, zu ergänzen, nicht aber zu ersetzen;
- die Niederfrequenz (monatliche Messungen) mit der Hochfrequenz (quasi-kontinuierliche Messungen) mittels «intelligenter Interpolation» in Verbindung zu setzen;

Dies kann mithilfe von numerischen Simulationen erreicht werden.

- die Zusammenhänge zwischen den Temperaturen und anderen physikalischen, chemischen und biologischen Beobachtungen, dort wo möglich, aufzuzeigen und zu dokumentieren,
- die Dynamik von anderen physikalischen, chemischen und biologischen Parametern zwischen den chemischen Messungen, dort wo möglich, zu rekonstruieren;

Das hochaufgelöste Temperaturmonitoring erlaubt es, in Zusammenhang mit dem regelmässigen Monitoring der Wasserqualität Rückschlüsse zu ziehen, wie beobachtete Veränderungen in der Wasserqualität auf physikalische Prozesse wie Mischungseignisse, Hitzeperioden oder interne Wellen beeinflusst werden. Es ermöglicht ebenfalls die Entwicklung von Methoden für eine Interpolation von chemischen und biologischen Parametern zwischen den Messwerten. Mittelfristig sollen diese Möglichkeiten in Zukunft auch durch die Ergänzung der physikalischen Seemodelle mit Wasserqualitätsmodellen weiterentwickelt werden.

- Vorhersagen der Wassertemperatur auf die nächsten 7 Tage zu ermöglichen, unter besonderer Berücksichtigung der Temperatur der Seeabflüsse;

Eine 5-Tages-Prognose der Wassertemperatur für über 80 Schweizer Seen wird gegenwärtig durch kalibrierte See-Modelle auf der Webplattform «Alplakes» angeboten. Die Genauigkeit der Simulationen beträgt für die Oberflächentemperatur von Grossseen ungefähr ± 1 °C.

- die Grundlagen für Langzeit-Modellierungen, für Entwicklungsszenarien und Projektionen zu liefern.

Das hochaufgelöste Temperaturmonitoring verbessert die Grundlagen zur Kalibration von Seemodellen, welche für die Berechnung von Szenarien und Projektionen verwendet werden.

8.3 Empfehlungen und Ausblick

Um einen repräsentativen Überblick über die Entwicklung der Oberflächen- und Grundtemperatur der Schweizer Seen zu erhalten, wäre es nötig, mindestens etwa fünf grosse und 30 - 40 kleine Seen mit Messstationen auszurüsten. Die Kleinseen sollten verschiedene Höhenlagen, Tiefen und Wasserbilanzen (Zuflüsse, Grundwassereintrag, Grösse Einzugsgebiet) abdecken. Im Hinblick auf ihre gesellschaftliche Bedeutung wird aber empfohlen, in Zusammenarbeit mit den Kantonen, ein Monitoring für alle grossen Schweizer Seen anzustreben. Ein solches Monitoring würde nicht nur die Temperatur, sondern auch biochemisch wichtige Parameter wie den Sauerstoffgehalt oder Algenpigmente umfassen.

Das BAFU hat sich jedoch dazu entschieden, vorerst kein eigenes Seetemperatur-Monitoringnetzwerk aufzubauen. Stattdessen sollen die Kantone die Messstationen selbst weiterbetreiben. Weitere interessierte Kantone werden vom BAFU bei der Erstausrüstung unterstützt. Der Fokus der repräsentativen Auswahl verschiebt sich daher auf das, was machbar ist. Dies heisst, dass sich die Erweiterung der überwachten Seen auch darauf abstützt, ob die zuständigen kantonalen Fachstellen solche Projekte finanziell und ideell unterstützen. Da mit den bisher beteiligten Kantonen bereits Vereinbarungen für den Weiterbetrieb abgeschlossen werden konnten und weitere Kantone Interesse angemeldet haben, scheint dies ein gangbarer Weg in Richtung umfassendes Temperaturmonitoring in Schweizer Seen zu sein.

Wir empfehlen unbedingt, auch den Weg in Richtung öffentliche Daten und Datenverarbeitung weiterzugehen. Dies erleichtert den kantonalen Fachstellen die Arbeit, da sie in ihren Seen ablaufende Prozesse in Echtzeit beobachten und mit anderen Seen abgleichen können. Ein solches Abgleichen kann auch zu noch vermehrter Zusammenarbeit zwischen Fachstellen führen, da alle Fachstellen Zugriff auch dieselben Messdaten haben. Neben den kantonalen Fachstellen erleichtern öffentlich verfügbare Daten auch wissenschaftliche Arbeiten und führen zu einem besseren Verständnis der Prozesse in Seen, was wiederum der Allgemeinheit zugutekommt.

Temperaturmessketten und Profilier-Systeme haben sich beide als geeignet erwiesen, um die Thermalstruktur von Seen zu überwachen. Die Wahl des Systems hängt von den Wünschen der beteiligten Projektpartner (Kantone, BAFU) ab. Während eine Temperaturmesskette für ein reines Temperaturmonitoring sicherlich die günstigere Variante ist, kann ein Profiler als ersten Schritt in Richtung eines umfassenden Monitorings des Ökosystems See sein. Ein solches Monitoring würde neben der Wassertemperatur auch biochemische Variablen beinhalten.

Numerische Simulationen sollten ein integraler Bestandteil des zukünftigen Monitorings sein, da sie das Testen von Hypothesen im Bereich Seen-Management erleichtern. Darüber hinaus erlauben sie kurzfristige und langfristige Prognosen der Thermalstruktur. Von den etwa 50 Schweizer Seen grösser

als 0.3 km² verfügen 30 über ein gut kalibriertes Modell und etwa 20 über ein ungenügend kalibriertes oder über kein numerisches Modell. Wir empfehlen diese Lücke zu schliessen, indem mobile Messstationen jeweils über zwei bis drei Jahre in einem See mit ungenügend kalibriertem Modell belassen werden. Es kann sich dabei um einfache Messketten (analog zu den Kleinseen) ohne automatische Datenübermittlung handeln. Die Daten können dann zur Kalibration der Simulation benutzt werden.

Für täglich aktualisierte Simulationsergebnisse, wie sie momentan auf der Webplattform «Datalakes» präsentiert werden, sind Informationen zur aktuellen Sichttiefe der Seen erforderlich. Für die Grosseen über 10 km² können solche Informationen bei freier Sicht täglich aus Sentinel-3 Satellitendaten gewonnen werden. Die erforderliche Software, um diese Informationen automatisiert zu generieren wurde an der Eawag bereits entwickelt (Forschungsgruppe Fernerkundung). Diese Secchi-Tiefen-Produkte wurden in einem früheren Projekt der Eawag für die Sektion Wasser des BAFU entwickelt und validiert, und haben gegenüber den Messungen verschiedener Kantone rund 1 m oder 20% Fehler (<https://sencast.readthedocs.io/en/latest/>). Es ist damit zu rechnen, dass auch der Fehler der im See von Hand gemessenen Secchi-Tiefe nicht viel tiefer liegt.

Für mittelgrosse Seen ab etwa 0.3 km² könnten solche Informationen bei freier Sicht alle 5 Tage aus Sentinel-2 Satellitendaten gewonnen werden. Diese Produkte werden seit Ende 2024 im Rahmen des EU Interreg Projekts DiMark (<https://www.alpine-space.eu/project/dimark/>) analog zu den Sentinel-3 Produkten generiert. Die Validierung für mittelgrosse Seen und Sentinel-2 ist aber noch ausstehend.

Die Simulation von Kleinseen hat sich als schwierig erwiesen, und die gewünschte Genauigkeit (mittlerer Fehler < 2 °C) wurde meist nicht erreicht. Um in Zukunft auch für kleinere Seen über Simulationsmodelle zum Testen von Hypothesen, sowie zum Erstellen von Prognosen zu verfügen, müsste in Forschung investiert werden. Insbesondere müssten der Einfluss von Schneeschmelze, Grundwassereintrag und Wärmeeintrag aus dem Sediment quantifiziert und in den Simulationen berücksichtigt werden.

Um die Einteilung der Schweizer Kleinseen in Untergruppen zu verbessern, könnten Maximaltiefe und Trübung von etwa 100 mehr Kleinseen in einer zeitlich beschränkten Messkampagne erfasst werden. Bei erfolgreichem Einteilen (Clustering) der Kleinseen, könnte eine gewisse Repräsentativität wahrscheinlich auch mit einer geringeren Anzahl an gemessenen Seen erreicht werden.

9. Bibliografie

Amt für Umwelt Kanton Zug (2024). Zugriff am 25.08.2025. <https://zg.ch/de/natur-umwelt-tiere/wasser-und-gewaesser/gewaesserqualitaet/aegerisee>

BAFU (Hrsg.) 2021: Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2101: 134 S.

Bouffard D, Dami J, Schmid M (2019). Swiss lake temperature monitoring program. Report commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN), Eawag, Kastanienbaum.

Departement Bau, Verkehr und Umwelt Kanton Aargau, Abteilung Umwelt (2021). Zugriff am 25.08.2025. <https://www.ag.ch/de/verwaltung/bvu/umwelt-natur-landschaft/umwelt/oberflaechen-gewaesser/hallwilersee/sanierung-hallwilersee>

Flerchinger, G. N., Xiaio, W., Marks, D., Sauer, T. J., & Yu, Q. (2009). Comparison of algorithms for incoming atmospheric long-wave radiation. *Water resources research*, 45(3). <https://doi.org/10.1029/2008WR007394>

Gaudard, A., Råman Vinnå, L., Bärenbold, F., Schmid, M., & Bouffard, D. (2019). Toward an open access to high-frequency lake modeling and statistics data for scientists and practitioners—the case of Swiss lakes using Simstrat v2. 1. *Geoscientific Model Development*, 12(9), 3955-3974. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3955-2019>

Goudsmit, G. H., Burchard, H., Peeters, F., & Wüest, A. (2002). Application of k- ϵ turbulence models to enclosed basins: The role of internal seiches. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C12), 23-1. <https://doi.org/10.1029/2001JC000954>

Herold, T. (2019): Temperaturmonitoring Oberflächengewässer Schweiz. *Aqua & Gas* 4-2019: 2-5

Hipsey, M. R., Bruce, L. C., Boon, C., Busch, B., Carey, C. C., Hamilton, D. P., ... & Winslow, L. A. (2019). A General Lake Model (GLM 3.0) for linking with high-frequency sensor data from the Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON). *Geoscientific Model Development*, 12(1), 473-523. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-473-2019>

Idso, S. B. (1973). On the concept of lake stability 1. *Limnology and oceanography*, 18(4), 681-683. <https://doi.org/10.4319/lo.1973.18.4.0681>

Jakob A (2010). Temperaturen in Schweizer Fließgewässern - Langzeitbeobachtung. *Gas, Wasser, Abwasser* 3/2010, 221-231

Jane SF, Mincer JL, Lau MP, Lewis ASL, Stetler JT, Rose KC (2023). Longer duration of seasonal stratification contributes to widespread increases in lake hypoxia and anoxia. *Global Change Biology*, 29, 1009–1023. <https://doi.org/10.1111/gcb.16525>

MeteoSchweiz (2023). <https://www.meteoschweiz.admin.ch/ueber-uns/meteoschweiz-blog/de/2023/05/klimareise-durch-die-schweiz.html>

Müller, B., & Schmid, M. (2009). Oxygen and Phosphorus Budgets of Murtensee. <https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag:14883>

Müller, B., Steinsberger, T., Schwefel, R., Gächter, R., Sturm, M., & Wüest, A. (2019). Oxygen consumption in seasonally stratified lakes decreases only below a marginal phosphorus threshold. *Scientific reports*, 9(1), 18054. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54486-3>

- Råman Vinnå L, Medhaug I, Schmid M, Bouffard D (2021) The vulnerability of lakes along an altitudinal gradient to climate change, *Communications Earth & Environment* 2: 35. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00106-w>
- Read, J. S., Hamilton, D. P., Jones, I. D., Muraoka, K., Winslow, L. A., Kroiss, R., ... & Gaiser, E. (2011). Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data. *Environmental Modelling & Software*, 26(11), 1325-1336. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.05.006>
- Rebière, D., Danis, P. A., Daufresne, M., Peroux, T., & Baudoin, J. M. (2013). Mise en place d'un réseau de suivi thermique lacustre à l'échelle nationale: Phase de test (Doctoral dissertation, irstea). <https://hal.inrae.fr/hal-02599804>
- Rebière, D., Danis, P. A., Peroux, T., Dublon, J., Daufresne, M., & Baudoin, J. M. (2018). Protocole pour la réalisation de dispositifs de suivi pérenne de la température de plans d'eau. Guide méthodologique. Agence française pour la biodiversité. Irstea.
- Schilliger, L., Tetzlaff, A., Bourgeois, Q., Correa, L. F., & Wild, M. (2024). An investigation on causes of the detected surface solar radiation brightening in Europe using satellite data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(15), e2024JD041101. <https://doi.org/10.1029/2024JD041101>
- Schmid, M., & Köster, O. (2016). Excess warming of a Central European Lake driven by solar brightening. *Water Resources Research*, 52(10), 8103-8116. <https://doi.org/10.1002/2016WR018651>
- Schmid, M., & Read, J. (2022). Heat budget of lakes. *Encyclopedia of inland waters*, 760.
- Schwefel, R., Steinsberger, T., Bouffard, D., Bryant, L. D., Müller, B., & Wüest, A. (2018). Using small-scale measurements to estimate hypolimnetic oxygen depletion in a deep lake. *Limnology and Oceanography*, 63(S1), S54-S67. <https://doi.org/10.1002/lno.10723>
- Seehausen O, Alexander T, Egloff N, Vonlanthen P (2022). Unerwartete Artenvielfalt in Seen des Alpenraums. *Aqua & Gas*, 2+8/2022, 64-71. <https://doi.org/10.48350/171582>

Anhang A Messgenauigkeit und Tiefenauflösung

Messgenauigkeit generell

Hauptziel des Monitorings ist es, die Erwärmung der Seen (insbesondere Oberflächen- und Grundtemperatur), sowie die Schichtungs- und Mischungsdynamik verfolgen zu können. Letztere ist hauptverantwortlich für den Transport von Gasen und Nährstoffen in Seen und damit wichtig für die Verfügbarkeit von Lebensräumen in Seen.

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Oberflächentemperatur der Schweizer Seen um etwa 0.4 °C/Dekade erhöht (Bärenbold et al., in Vorbereitung). Die Messgenauigkeit sollte also idealerweise wesentlich besser sein als ± 0.2 °C, um solche Trends verlässlich erkennen zu können. Das Verfolgen der Mischungsdynamik erfordert jedoch eine noch bessere Genauigkeit. Unsere Erfahrungen aus dem Pilotprojekt zeigen auf, dass grössere Seen wie der Murten-, der Hallwiler- und der Ägerisee auch bei Temperaturdifferenzen (zwischen der Oberfläche und dem Grund) von 0.1 – 0.2 °C noch geschichtet sein können. Bei den kleineren Seen können gewisse Abstriche bei der Messgenauigkeit gemacht werden, da Unterschiede von 0.1 – 0.2 °C wegen der geringen Tiefe und der dadurch resultierenden viel geringeren Schichtungsenergie nur kurze Zeit aufrechterhalten werden können.

Wir schlagen vor, dass Messstationen in grösseren Seen (Tiefe > 30 m) jederzeit eine Genauigkeit von ± 0.020 °C einhalten sollten. Dies setzt eine Anfangsgenauigkeit von etwa ± 0.005 °C voraus, da die Genauigkeit im Verlauf der Zeit abnimmt. Diese sogenannte jährliche Drift ist typischerweise vergleichbar zur Anfangsgenauigkeit (also etwa 0.005 °C/Jahr bei einer Anfangsgenauigkeit von ± 0.005 °C), sie kann bei einzelnen Sensoren aber mehr betragen. Die Sensoren müssten so etwa alle 1.5 – 2 Jahre neu kalibriert werden. Laut Hersteller nimmt die Drift mit der Zeit ab, was einen Kalibrationsrhythmus von 2 Jahren ermöglichen sollte.

In Kleinseen ist es denkbar, dass günstigere Sensoren mit grösserer Messunsicherheit eingesetzt werden. Dies weil diese Seen selten über längere Zeit schwach geschichtet sind, aber auch weil die ökologische, gesellschaftliche und wirtschaftliche Bedeutung geringer ist als bei Grossseen. Im Pilotprojekt haben wir die Temperaturlogger Hobo MX2203 der Firma Onset eingesetzt, welche eine Anfangsgenauigkeit von ± 0.2 °C und eine jährliche Drift von etwa 0.1 °C aufweisen. Wir zeigen, dass eine regelmässige Validation dieser Logger im Labor kombiniert mit Bias-Korrektur die Genauigkeit auf etwa ± 0.05 °C verbessert. Diese Genauigkeit ist ausreichend für Kleinseen, beinhaltet aber zusätzlichen Wartungsaufwand im Vergleich zu genaueren Loggern. Letztere sind dafür in der Anschaffung wesentlich teurer.

Tiefen- und Zeitauflösung von Messketten

Empfehlungen vertikale Auflösung (Distanz zwischen Sensoren):

- Oberster Sensor zwischen 0 und 1 m Tiefe (im Murten- und Hallwilersee wurden 0.5 m Tiefe gewählt)
- Mindestens ein Sensor alle 2 – 3 m im Tiefenbereich 0 - 20 m; besser alle 1 – 2 m (z.B. analog zu den bestehenden chemischen Probenahmen);
- Ein Sensor etwa alle 5 m im Tiefenbereich 20 – 40 m
- Ein Sensor etwa alle 10 – 30 m unterhalb von 40 m Tiefe
- Unterster Logger wenn möglich etwa 1-2 m über dem Seegrund. Dieser Sensor sollte auch bei niedrigem Wasserstand nicht direkt auf dem Seegrund liegen.

Empfehlungen zeitliche Auflösung (Messintervall):

- Messung des Momentanwerts alle 10 Minuten (analog zur Datenerhebung der Lufttemperatur von MeteoSchweiz). Bei ungenauen Sensoren wie dem Hobo können die Daten über 10 Minuten gemittelt werden (Frequenz von 1 Minute) um die zufällige Streuung zu reduzieren.
- Kürzere Messintervalle sind wünschenswert für die Forschung, falls es die Stromversorgung zulässt

Tiefen- und Zeitauflösung Profiler

Empfehlung vertikale Auflösung:

- Bei sehr schneller Reaktionszeit des Sensors (unterhalb etwa 3 Sekunden; meist ist Sauerstoff der langsamste) können kontinuierliche Profile erhoben werden, d.h. die Messsonde wird mit konstanter Geschwindigkeit abgesenkt. Im Ägerisee beträgt die Absinkgeschwindigkeit ca. 10 cm/Sekunde und die Reaktionszeit des Sauerstoffsensors etwa 1 Sekunde.
- Falls die Reaktionszeit des langsamsten Sensors > 3 – 5 Sekunden ist, sollten spezifische Tiefen angefahren werden und die Sonde für eine gewisse Zeit «parkiert» werden. Die ideale «Parkierzeit» hängt von der Reaktionszeit des Sensors ab und sollte in Feldversuchen herausgefunden werden.
- Profilieren von der Seeoberfläche (bzw. der obersten baulich möglichen Messtiefe, welche beim Ägerisee etwa 2 m beträgt) bis etwa 1 m oberhalb des Seegrunds. Bei stark schwankendem Wasserspiegel sollte die unterste Wassertiefe so angepasst werden, dass die Sonde nie den Seegrund berührt. Bei Kontakt mit dem Seegrund können Sensoren mit Schlamm verunreinigt werden, was Wartungsarbeiten nötig macht.

Empfehlung zeitliche Auflösung (Messintervall):

- Idealerweise werden täglich mindestens 2 Profile gemessen (z.B. Mittag und Mitternacht).
- Die Flydog-Boje im Ägerisee erhält an etwa 8 von 12 Monaten mehr als genug Sonnenenergie, so dass 8 Profile pro Tag gemessen werden können (möglich wären bis etwa 20 tägliche Profile, jedoch wäre dann die Messsonde praktisch in Dauerbewegung und der Verschleiss erhöht)
- An kalten Wintertagen sollte versucht werden, zumindest das Mittagsprofil zu messen. Alternativ kann das Profil auf den Nachmittag verschoben werden, da dann die Lufttemperatur meist ihr Maximum erreicht. Bei der Flydog-Boje kann ein Luft-Temperaturgrenzwert eingestellt werden, so dass die Sonde bei sehr kalten Temperaturen die Messungen aussetzt. Ansonsten besteht die Gefahr, dass sie steckenbleibt.

«Parkierung» der Messsonde im See:

- Die Messsonde sollte zwischen Profilen in einer Tiefe ohne Sonnenlicht «parkiert» werden, da so der Algenbewuchs der Messsonde massiv reduziert werden kann. Eine vierteljährliche Reinigung der optischen Sensoren (Sauerstoff + Algenpigmente) hat sich im oligotrophen Ägerisee als genügend erwiesen.

Kalibrationsrhythmus:

- Die relative Genauigkeit eines Profilers ist immer sehr gut, da in jeder Tiefe derselbe Sensor misst. Jedoch können Veränderungen der absoluten Genauigkeit (also die Differenz zu einer unabhängigen Referenzsonde) nicht wahrgenommen werden.
- Der Temperatursensor ist üblicherweise sehr genau unempfindlich und eine Kalibration alle 2 Jahre wäre wohl ausreichend (laut Spezifikationen ist die Genauigkeit der Idronaut-Sonde 0.002 °C mit einer Drift von < 0.001 °C/Jahr. Im Hinblick auf weitere gemessene Parameter (Leitfähigkeit, Sauerstoff, Algenpigmente) empfehlen wir aber eine jährliche Überprüfung und Kalibration beim Hersteller.

Anhang B Detailbeschreibung Kleinsee-Messsystem

Komponenten

Edelstahlseil 2 mm 7x7, 15.50 Fr. pro 20 m (Referenz: <https://www.stahlseile24.ch>)

Simplexklemmen 2 mm 1 Fr. pro Stück (Referenz: <https://www.stahlseile24.ch>)

Klemmstopper 2 mm 1.50 Fr. pro Stück (Referenz: <https://www.stahlseile24.ch>)

Unterlagsscheiben 50 mm AD, 17 mm ID, 1 Fr. pro Stück: (Referenz: <https://www.bauhaus.ch>)

Hantelscheiben 0.5 kg, 30 mm ID, 4.50 Fr. pro Stück (Referenz: <https://isports.ch>)

Hantelscheibe 10 kg, 30 mm ID, 25 Fr. pro Stück (Referenz: <https://isports.ch>)

PVC-Platte grau 5 mm, 230 Fr. pro ~90 Stück à 20 x 20 cm (Referenz: <https://shop.maagtechnic.ch>)

Kugelfender 25 cm Durchmesser, 25 Fr. pro Stück (Referenz: <https://www.compass24.ch>)

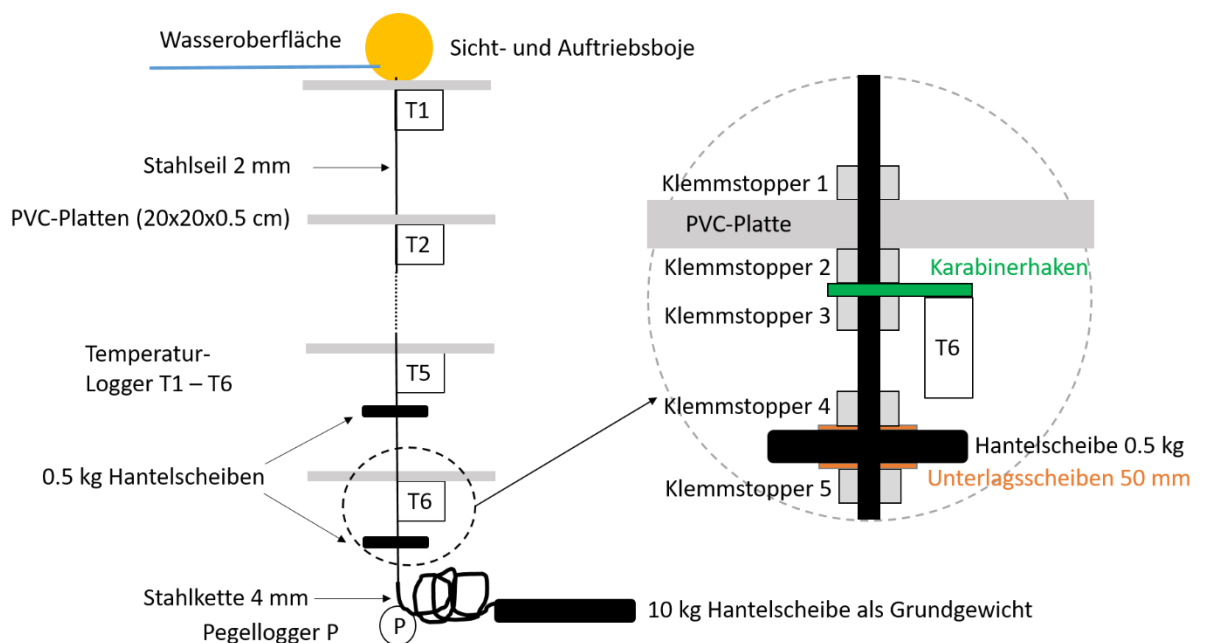
Karabinerhaken DIN 5299 4 mm, 0.60 Fr. pro Stück (Referenz: <https://www.stahlseile24.ch>)

Pegellogger HOB0 U20L-02 (30m), 400 Fr. pro Stück (Referenz: <https://www.datenlogger-store.de>)

Hobo-Logger MX2203 160 Fr. pro Stück (Referenz: <https://www.datenlogger-store.de>)

RBR solo-T Logger 600 Fr. pro Stück (Referenz: Anfrage bei <https://rbr-global.com/>)

Schema



- Die PVC-Platten schützen die Logger vor direkter Sonneneinstrahlung
- Die 0.5 kg Hantelscheiben halten das Stahlseil gestreckt

- Der Pegellogger dient dazu, die Wasserstandsschwankungen nachvollziehen zu können. Dies hilft, um nachvollziehen zu können, welche Logger zu welchem Zeitpunkt am Seegrund liegen.



Abbildung B 1: Unterster Sensor mit PVC-Platte zur Beschattung und 0.5 kg Hantelscheibe als Gewicht, um das Stahlseil gespannt zu halten im Wasser. Die 4mm Stahlkette unterhalb ist flexibler und gleichzeitig schwerer und garantiert so, dass sie, (ausser vielleicht bei starkem Wind, am Seegrund liegt.

Kostenschätzung

Für einen Kleinsee mit einer Maximaltiefe von 6 m, 6 Loggern und einer Seespiegelschwankung von etwa 1 m. Die Logger sollten bei 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5 und 5.5 m Tiefe installiert werden. Die Hantelscheiben bei etwa 4.5 m und 5.5 m (gleich unterhalb der Logger).

Mit Hobo-Loggern:

13 m Edelstahlseil:	10 Fr.
20 Klemmstopper:	40 Fr.
6 Karabinerhaken:	5 Fr.
2 Unterlagsscheiben:	2 Fr.
2 Hantelscheiben 0.5 kg:	9 Fr.
1 Hantelscheibe 10 kg:	25 Fr.
1 Kugelfender 25 cm:	25 Fr.
1 Pegellogger (30 m):	400 Fr.
7 PVC-Platten:	20 Fr.
6 Hobo-Logger:	960 Fr.
Total:	~1500 Fr.

Mit RBR-Loggern (dafür ohne PVC-Platten):

13 m Edelstahlseil:	10 Fr.
14 Klemmstopper:	28 Fr.
7 Karabinerhaken:	5 Fr.
2 Unterlagsscheiben:	2 Fr.
2 Hantelscheiben 0.5 kg:	9 Fr.
1 Hantelscheibe 10 kg:	25 Fr.
1 Kugelfender 25 cm:	25 Fr.
1 Pegellogger (30 m):	400 Fr.
6 RBR-Logger:	3900 Fr.
Total:	~4400 Fr.