

## Datenblatt physikalisches Monitoring

### Schwerpunkt Flachwasserzone

#### 1. Einleitung

Die Seenphysik ist ein relativ junger Wissenschaftszweig, der sich aus der Erkenntnis heraus entwickelt hat, dass das Ökosystem eines Sees und all seine biologischen und chemischen Komponenten wesentlich durch physikalische Parameter beeinflusst werden. Bereits bei den ersten Seemonitoringprogrammen des Institutes für Seenforschung in den 1920-er Jahren wurden daher auch die Wassertemperaturen im See ermittelt. Heutzutage werden diese Messungen mit modernen Mitteln fortgesetzt und es wird ein Ensemble sehr unterschiedlicher Messgeräte und –konzepte eingesetzt, das von Multiparametersonden über Algen-Fluoreszenzsonden bis zu akustischen Strömungsprofilierern (ADCP) reicht. Ergänzt werden diese modernen in situ Messverfahren durch numerische Modelle, die in den 1980-er Jahren erstmalig am Bodensee zum Einsatz kamen, und der satellitenbasierten Fernerkundung, die mit Beginn der 2000-er Jahre resp. verstärkt seit 2016 in den Fokus der limnologischen Anwendung rückte. Ziel ist es, mit diesen unterschiedlichen Messgeräten, -konzepten und neuen Methoden zu einem möglichst umfassenden Verständnis des Sees und seines Ökosystems beizutragen und die Informationen aus in situ Messungen, numerischer Modellierung und satellitenbasierter Fernerkundung zu einem ganzheitlichen Informationsbild zu verschmelzen.

**Physikalische Parameter prägen und bestimmen sehr viele Prozesse in Seen** im Allgemeinen und in der Flachwasserzone im Besonderen. Thermo- und hydrodynamische Prozesse und Parameterfelder, wie z. B. Temperaturverteilungen und dreidimensionale Strömungsfelder, bestimmen sowohl direkt als auch indirekt auf vielfältige Art und Weise die im See ablaufenden chemischen und biologischen Prozesse und beeinflussen damit ganz wesentlich die Entwicklung des Ökosystems in einem See.

Neben den direkt im See stattfindenden Prozessen, stehen Gewässer natürlich in engem Austausch mit der Umwelt – speziell über **meteorologische Prozesse** mit der Atmosphäre – und werden wesentlich vom Wärmeaustausch mit der Atmosphäre und der Sonneneinstrahlung geprägt.

Die chemische Beschaffenheit des Seewasserkörpers, wie auch die Entwicklung des Ökosystems werden durch die Zuflüsse und die flussspezifischen hydrologischen Kenngrößen, wie Zuflußmengen und Stofffrachten bestimmt.

**Stofftransporte**, die im See selber stattfinden oder aber Stofftransporte eingetragener Substanzen (z. B. Flusswasserfahnen) können nur durch dreidimensionale Strömungsfelder und Mischungsprozesse näher beschrieben und in ihrem Einwirken auf bestimmte Lebensräume (z. B. der Flachwasserzone) oder die dort befindliche Fauna und Flora erfasst werden. Speziell in der Flachwasserzone kommt es dabei sowohl zu Wechselwirkungen und Einwirkungen durch diffuse Einträge als auch zu Beeinflussungen der Umgebungsparameter und chemischen Beschaffenheit durch Flusswassereinträge.

In der Flachwasserzone kommen noch enge **Verknüpfungen sich überlagernder Prozesse** hinzu. Z. B. führen Strömungsfelder im Zusammenwirken mit aus Richtung See einlaufendem Wellenfeld zu Aufwirbelung (Resuspension) von Sediment, dessen Weitertransport und entsprechenden

Umlagerungen von Material. Dies hat über Prozesse der Sedimentumlagerung und -ablagerung (Morphodynamik) eine Veränderung der Topographie zur Folge.

All diese Prozesse wirken durch direkte physikalische Parameter und Prozesse (z. B. Wellenexposition, Stofftransporte) oder auch andere mittelbare Veränderungen (z. B. Veränderungen der Wasserinhaltsstoffe durch eingetragene Stoffe oder Veränderung des Lichtklimas durch aufgewirbeltes Sediment) auf vielfältige Weise auf Fauna und Flora eines Habitats ein und prägen das Ökosystem in der Flachwasserzone (z. B. die Ausbildung von Wasserpflanzenbeständen in der Flachwasserzone und deren Funktion als Habitat).

Um ein besseres Verständnis sowohl chemischer als auch biologischer Befunde zu erreichen und die Daten interpretieren zu können, ist die Aufnahme entsprechender physikalischer Parameter unumgänglich.

## 2. Fragestellungen und Themenbereiche

Fragestellungen und Themenbereiche, denen seenphysikalische Parameter zugrunde liegen sind vielfältig und umfassend, da der See und all seine chemischen und biologischen Subsysteme ausnahmslos von der physikalischen Matrix abhängen, in die sie eingebunden sind.

Im Grundsatz kann man die Themen und Fragestellungen in direkte und indirekte Wirkungen unterteilen.

So sind zum Beispiel die Auswirkungen des Klimawandels direkt im physikalischen Schichtungsverhalten und den dadurch bedingten Änderungen im Transport- und Mischungsverhalten des Sees zu beobachten. Diese Änderungen in den physikalischen Parametern und Prozessen des Sees haben Wirkungen auf die chemischen Subsysteme und Reaktionsketten und diese wieder auf die biologischen Kompartimente. Umgekehrt kann es zu komplexen Rückkopplungen kommen, bei denen zum Beispiel die indirekten Auswirkungen wiederum die direkt betroffenen Parameterfelder (z. B. die dreidimensionale Temperaturverteilung im Bodensee) beeinflussen und diese modifizieren. So zum Beispiel, wenn ein durch ein geändertes Temperaturregime verändertes Verhalten des Algenwachstums zu Veränderungen des Absorptionsverhaltens des Wasserkörpers führt, was wiederum ein zumindest auf kleinen Skalen variierendes Absorptions- und Temperaturverhalten zur Folge haben kann. Diese sekundären Effekte können die primären, direkten Auswirkungen des Klimawandels verändern.

Diese Beispiele zeigen auf, dass die physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse und Parameterfelder eng miteinander verbunden sind, wechselwirken und für ein Verständnis der Veränderung eines Ökosystems mit all seinen chemischen und biologischen Komponenten, die Kenntnis der physikalischen Umgebungsparameter wesentlich ist.

Einige Themenbereiche und Fragestellungen sind zum Beispiel:

- Generell: Physikalische Parameter, um chemische und biologische Messungen und Befunde verstehen und besser interpretieren zu können
- Erwärmungs- und Abkühlungsprozesse in der Flachwasserzone (FWZ)
- Eintrag und Verteilungsmuster von Flusswasserfahnen und deren mitgeführten Wasserinhaltsstoffen
- Eintrag und Verteilung von anthropogenen Spurenstoffen, Expositionsszenarien
- Eintrag und Ablagerung von Sedimentfrachten

- Wellen und –strömungsbedingte Resuspensions- und Sedimenttransportprozesse
- Einfluss von Wellen auf Makrophytenbestände und umgekehrt der Einfluss von Makrophyten auf hydrodynamische Parameter, wie Strömung und Wellen
- Einfluss des Klimawandels auf das Schichtungsverhalten des Sees
- Auswirkungen des Klimawandels auf den See z. B.:
  - Veränderung des Schichtungsverhaltens sowie der Transport- und Mischungsprozesse
  - Veränderungen der chemischen Subsysteme und Reaktionsketten und die physiologischen Umgebungsparameter für biologische Subsysteme
  - Reaktionen des Ökosystems auf veränderte Klimabedingungen
- Informationen zu Langzeitwirkungen und langzeitlichen Variationen von Umgebungsparametern; Verknüpfung mit entsprechenden chemischen bzw. biologischen Befunden

### 3. Methoden

Verschiedene Informationsquellen und Methoden stehen zur Verfügung, um physikalische Prozesse und Parameter generell in Seen und speziell in der Flachwasserzone zu erfassen. Dabei kann zwischen den klassischen in situ Messtechniken, bei denen z. B. mit Thermistorketten, Multiparametersonden, ADCP-Strömungsmesser vor Ort im See die entsprechenden Parameter erfasst werden und neuartigen, nicht in situ arbeitenden Methoden, wie der numerischen Modellierung und Fernerkundung, unterschieden werden.

Im Folgenden wird kurz auf einige dieser Messgeräte, Messkonzepte und ergänzende Methoden eingegangen.

#### 3.1 Messgeräte, Messkonzepte und ergänzende Methoden

Alle nachfolgend genannten Informationsquellen - Messgeräte, Messmethoden und andere nicht in situ Verfahren wie numerische Modelle und die satellitenbasierte Fernerkundung – können genutzt werden, um ein möglichst umfassendes und detailliertes Bild der verschiedenen Parameter, Prozesse und Habitate zu erhalten.

Dabei ergänzen sich die verschiedenen Verfahren mit ihren unterschiedlichen Stärken und Schwächen und können durch eine Zusammenschau der verschiedenen Informationen zu einem möglichst ganzheitlichen Bild zusammengeführt werden.

##### *Multiparametersonden*

Multiparametersonden können sehr flexibel und an bestimmte Messaufgaben angepasst eingesetzt werden. Sie verfügen über eine Anzahl von Sensoren, die sowohl direkt seenphysikalische Parameter (z. B. Temperatur, Druck, Trübung, PAR-Strahlung) als auch chemische (z. B. Sauerstoff, pH-Wert, Redoxpotential) und biologische Parameter (z. B. Chlorophyll-a-Konzentrationen) erfassen können.

##### *Fluoreszenzoptische Algensonden*

Mit fluoreszenzoptischen Sonden (z. B. Fluoroprobe von BBE Moldaenke) können Algenklassen anhand ihrer fluoreszenzoptischen Signaturen bestimmt werden. Dadurch sind über einfache Chlorophyll-a-Messungen hinaus weiter differenzierende kontinuierliche Messungen von verschiedenen Algenklassen möglich. Diese liefern Informationen zur räumlichen (z. B. vertikal

profilierender Einsatz oder Einsatz entlang von Horizontaltransekten) bzw. zeitlichen Dynamik (z. B. als fest installierte Messsonde an einer Messstation) der Algengemeinschaften im See.

### *Akustische Strömungsprofilierer - ADCP*

Akustische Strömungsprofilierer (ADCP – acoustic doppler current profiler) bestimmen aus der Rückstreuung von akustischen Signalen räumlich hochaufgelöst die Strömungsgeschwindigkeiten, die Strömungsrichtung und weitere Parameter, wie z. B. die akustische Rückstreuung („akustische Trübung“).

Einzelne speziell konfigurierte ADCP können darüber hinaus sehr genau die Wellenauslenkung registrieren und die Wellenspektren des Seegangs bestimmen.

### *Kontinuierliche Messungen mit autonomen Messstationen*

Autonome Messstationen bieten den Vorteil, dass sie unabhängig von Witterung und Tageszeit langzeitstabil, kontinuierlich Messungen mit hoher zeitlicher Auflösung (z. B. Messungen jede Minute oder alle 20 Minuten) auf den zeitlich relevanten Skalen vornehmen können. Sie bilden somit die tatsächlich im See an einem Messort auftretende Dynamik und Variationsbreite der gemessenen Parameter ab, während das mit Einzelmessungen nur stark eingeschränkt möglich ist.

An autonom arbeitenden Messstationen können unterschiedliche Sensoren und Messsysteme zum Einsatz kommen, die sowohl eine ganze Palette von relevanten physikalischen Parametern und Gewässergüteparametern simultan und kontinuierlich erfassen, als auch weitere Umgebungsparameter bestimmen, die die Gewässerqualität beeinflussen (z. B. Sonneneinstrahlung, Wind). Messstationen verfügen über eine autonome Stromversorgung (Sonnenpaneel) und sind somit in der Lage Ihre Daten per GSM-Datenfunk online zu übertragen. Sie können je nach Verwendungszweck und Budget mit unterschiedlichen Sensoren ausgestattet werden, so z. B.

- Multiparametersonden
- meteorologische Multisensorsysteme
- fluoreszenzoptische Algensonden
- Strömungsmessgeräte

Limitierend für den Einsatz solcher Messstationen ist, dass sie Informationen nur am ausgewählten Messort gewinnen können (räumliche Repräsentativität) sowie die relativ hohen Kosten.

### *Numerische Modelle*

Numerische Modelle liefern als integraler Bestandteil eines Monitoringkonzeptes wertvolle Informationen für die Planung, Durchführung und die Interpretation der Ergebnisse von Messkampagnen. Darüber hinaus lassen sich mit Modellen Prognosen für zukünftige Zustände erstellen und Szenarien für unterschiedliche Umweltbedingungen (z. B. geänderte Nährstoffeinträge in einen See) simulieren, die eine bessere Einordnung der Messergebnisse ermöglichen.

Numerische Modelle – speziell 3-dimensionale hydrodynamische Modelle und angekoppelte Tracer-Transportmodelle – bieten die Möglichkeit, die physikalischen Parameterfelder und die im See ablaufenden Transport- und Mischungsprozesse seeweit, dreidimensional, räumlich hochaufgelöst und zeitlich kontinuierlich zu simulieren. Im Gegensatz zu einzelnen Messungen, Messkampagnen oder Messstationen bieten sie damit die Möglichkeit, die ablaufenden Prozesse in ihrer zeitlichen Kontinuität und für den gesamten See zu erfassen und zu verstehen. Sie sind damit ein überaus wertvolles Werkzeug der Limnologie. Mit BodenseeOnline steht ein state-of-the-art Modellsystem für den Bodensee zur Verfügung, mit dem chemische, biologische und seenphysikalische Messdaten

in das zeitlich-räumliche Prozesskontinuum des Sees eingeordnet und interpretiert werden können. In der Flachwasserzone können mit einem solchen Modellsystem die notwendigerweise immer nur für kurze Zeiten oder kleinere Gebiete erhobenen Messdaten in den Kontext des gesamten Sees und seiner zeitlichen Entwicklung eingebunden werden und Rückschlüsse auf die Situation an anderen Orten oder zu anderen Zeiten abgeleitet werden.

### *Satellitenbasierte Fernerkundung*

Die Methoden der satellitenbasierten Fernerkundung bieten neuartige Möglichkeiten, seenphysikalische Parameter und Gewässergüteparameter aus Satellitendaten abzuleiten. Folgende Parameter sind dabei aktuell von Interesse und können mit unterschiedlicher Robustheit (unterschiedliche Messunsicherheiten der Parameter resp. Fehler durch parameterspezifische Störsignale) abgeleitet und für ein Gewässermonitoring genutzt werden:

- Chlorophyll-a-Konzentrationen
- Wassertemperatur (oberflächlich)
- Trübung
- Secchi-Tiefe
- Trophieindikator - Analogon zu in situ bestimmter Trophie jedoch aus optischen Fernerkundungsdaten abgeleitet
- Blaualgenindikator - Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Blaualgen

Diese Daten bieten jeweils für den Moment des Überfluges ein synoptisches flächenhaftes Bild der entsprechenden Parameter und liefern damit wertvolle Informationen zur Verteilung der untersuchten Größen in den beobachteten Seen.

Darüber hinaus lassen sich weitere Informationen aus Satellitendaten gewinnen, die jedoch einen höheren Arbeitsaufwand und eine komplexere Algorithmik und/oder spezifische noch nicht operationell betriebene Satelliten erfordern, so z. B. für die Ableitung der Eisbedeckung, des Makrophytenbestandes und die Bestimmung von Algenklassen (auf der Grundlage von Hyperspektralsensoren).

Das Signal, das von den optischen Satellitensensoren aufgenommen wird, enthält neben dem eigentlichen Nutzsignal zur Farbe (spektrale Signatur) eines Gewässers, eine ganze Reihe von anderen Störsignalen, wie zum Beispiel Sonnenreflexionen, Streuung in der Atmosphäre und Nachbarschaftseffekte, die mit speziellen Algorithmen prozessiert und entfernt werden.

Zu beachten ist beim Einsatz von satellitenbasierten Fernerkundungsdaten, dass es sich speziell bei Flachwassergebieten häufig um sogenannte *Case-2-Waters* handelt – also um Wasserkörper, die sich durch eine optisch hohe Komplexität auszeichnen, in denen zum Beispiel Wechselwirkungen des optischen Signals des Seewasserkörpers mit Flusswasserfahnen, aufgewirbeltem Sediment und dem Einfluss des Seebodens auftreten können. Darüber hinaus sind optischen Fernerkundungsdaten auch Einschränkungen durch die Meteorologie bzw. die aktuelle Wolkenbedeckung unterworfen.

## **3.2 Zielsetzung des Einsatzes und gegenseitige Ergänzung der verschiedenen Messgeräte und Methoden**

**Einzelne Messungen und Messkampagnen mit Multiparametersonden** sind wichtig, um für aktuelle Messungen von chemischen bzw. biologischen Größen die physikalischen Umgebungsvariablen zu bestimmen. Darüber hinaus können zum Beispiel die Messungen einer Vertikalprofilsonde genutzt werden, um die tiefenstufenabhängig oder summativ ermittelten in situ Parameter von Chlorophyll a

mit vertikal kontinuierlichen Messdaten zu untersetzen und den wassertiefenabhängigen kontinuierlichen Verlauf der Größen zu ermitteln.

Die Erfassung der physikalischen Gegebenheiten mit vertikal profilierenden Multiparametersonden oder mit Multiparametersonden, die horizontal profilierend entlang von Transekten betrieben werden, ist zweckmäßig und notwendig. Diese Informationen helfen zwei- oder dreidimensionale biologische und chemische Messungen in einen physikalischen Kontext zu stellen und aus diesem heraus die Daten besser interpretieren zu können.

In der **Ufer- und Flachwasserzone mit ihren meist sehr großen räumlichen Gradienten der limnologischen Größen** (z. B.: Sedimentverteilungen, Makrophyten, Algen, Trübung etc.pp.) und den häufig schnell ablaufenden **zeitlichen Fluktuationen der gemessenen Parameter**, ist die kontinuierliche Erfassung von physikalischen Parametern eine wichtige Voraussetzung, um die vor Ort erhobenen Daten und limnologischen Kenngrößen besser interpretieren und in ihren zeitlichen Kontext einordnen zu können.

Einzelne Messungen und Messkampagnen, die in großem zeitlichen Abstand durchgeführt werden, können die schnellen physikalischen Veränderungen in der Flachwasserzone nur ungenügend erfassen und liefern daher häufig kein umfassendes Bild der zeitlichen Dynamik der Umgebungsbedingungen. Sie erfassen lediglich einzelne Momente, sind mitunter gebiased (z. B.: Ausfahrt bei „schönem“ Wetter) und führen im schlimmsten Fall zu Fehlinterpretationen.

**Kontinuierlich registrierende Messstationen** können zumindest punktuell diese zeitliche Dynamik erfassen und ermöglichen somit die bessere Bewertung der bei Messkampagnen erhobenen Daten und deren Einordnung in das dynamische Gesamtgeschehen, sowie die Erfassung der langfristig wirksamen Umweltbedingungen, die die Entwicklung im Ökosystem/Habitat Flachwasserzone wesentlich prägen können.

**Messstationen erfüllen unterschiedliche wichtige Funktionen und Aufgaben.** Zum einen können die Gesamtheit der zeitlichen Dynamik und die tatsächlich am Standort auftretenden Parameter-Impakte und Variationsbandbreiten der Umweltparameter erfasst werden. Zum anderen können Messstationen in der Flachwasserzone als **Validationsstationen für numerische Modelle und Fernerkundungsverfahren** dienen, mit deren Messungen überhaupt erst eine detaillierte Bewertung der Güte und Aussagekraft der numerischen Modelle in diesen extrem variablen Kompartimenten des Bodensees möglich wird.

Durch die synergistische **Zusammenschau der verschiedenen Informationsquellen** – Einzelmessung, kontinuierliche Messung mit einer Messstation und Simulation mit numerischen Modellen - gegebenenfalls satellitenbasierte Fernerkundungsdaten - kann man ein umfassenderes Bild der Umweltbedingungen in der Flachwasserzone erhalten.

### 3.3 Periodizität und Dauer

Im Rahmen des geplanten Flachwassermonitorings ist die Periodizität der physikalischen Messungen immer an die biologischen und chemischen Messkampagnen gebunden, die durch physikalische Messungen begleitet werden.

Ansonsten sind für physikalische Messungen die Begriffe des Messintervalls und die Dauer des Messeinsatzes eines Messgerätes wichtig, deren Wahl sich an den zeitlichen Skalen der jeweils betrachteten Fragestellungen und Prozesse orientieren muss.

Dabei hat die Dauer des Messeinsatzes mindestens die längste Zeitspanne abzudecken, die untersucht wird – z. B.: für saisonale Untersuchungen müssen die Messungen diese saisonalen Zeitskalen abdecken, für interannuale Vergleiche müssen die Messungen mehrere Jahre erfassen. Das Messintervall der Messung muss so gewählt werden, dass die zeitlichen Fluktuationen der Parameter auf den ihnen innewohnenden Zeitskalen aufgelöst werden – z. B. müssen, um die Tagesvariabilität eines Parameters zu erfassen, mehrere Messungen pro Tag erfolgen. Für den Langzeiteinsatz kontinuierlich messender Messstationen haben sich Messintervalle  $\Delta t$  von etwa 10 - 20 Minuten bewährt. Technisch sind mit diesen Messstationen aber auch Messungen mit kürzerem Messintervall realisierbar, z. B. ein Messintervall mit  $\Delta t = 1$  Minute, mit dem jeweils ein vollständiger Datensatz erhoben wird. Für Sondenmessungen können in der Praxis je nach Aufgabestellung noch deutlich kleinere Messintervalle gewählt werden, um entsprechende zeitliche – und damit räumliche Auflösungen - zu realisieren. So werden bei Vertikalprofilen mit Multiparametersonden Messintervalle von 1- 2 Sekunden gewählt.

### *Multiparametersonden*

Multiparametersonden – häufig auch als CTD-Sonden bezeichnet - werden in unterschiedlichen Messkonfigurationen eingesetzt. Üblich sind folgende Einsatzkonfigurationen

- vertikalprofilierend
- horizontal profilierende Messungen entlang von Transekten
- stationäre Messungen an fest installierten Messstationen

Das Messintervall und die Dauer der Messungen richten sich dabei nach dem Untersuchungsgegenstand und der Themenstellung. Das Messintervall der Multiparametersonden beträgt meist wenige Sekunden, so dass zeitlich – und damit für profilierende Messungen auch räumlich - hochauflösende Daten gewonnen werden.

### *Fluoreszenzoptische Algensonden*

Der Einsatz von fluoreszenzoptischen Algensonden erfolgt nach ähnlichen Kriterien wie der von Multiparametersonden. Sie können vertikal und horizontal profilierend sowie stationär eingesetzt werden. Messintervall und Dauer der Messungen müssen an die Fragestellung sowie die zeitlichen und räumlichen Skalen angepasst werden, die für das beobachtete Phänomen relevant sind. Die Themen können dabei sehr unterschiedliche Zeitskalen überspannen – so z. B. eine einmalige begleitende Messung zum Abgleich mit einer klassischen in situ Algenprobenahme bis zu stationären Langzeitmessungen zur Erfassung der saisonalen Variabilität der verschiedenen Algenklassen. Fluoreszenzoptische Algensonden können dabei für hohe Messfrequenzen konfiguriert werden, wobei das minimale Messintervall wenige Sekunden beträgt.

### *Akustische Strömungsprofilierer - ADCP*

ADCP werden in unterschiedlichen Messkonfigurationen eingesetzt und können sowohl stationär als auch von Bord eines Schiffes eingesetzt werden. Dauer und Messintervall des Einsatzes orientieren sich an der jeweiligen untersuchten Fragestellung. Meist werden Einsatzformen gewählt, bei denen an einer speziellen Messposition Daten über einen längeren Zeitraum (z. B.: drei Monate bis zu einem Jahr) hinweg gewonnen werden. So können saisonale Variabilitäten bestimmt und meteorologie-statistisch relevante Datensätze erfasst werden, welche die Strömungsbedingungen für einen repräsentativen Zeitraum erfassen und auch extremere Ereignisse (z. B. Starkwindereignisse) aufnehmen. Mit ADCP können sehr kurze Messintervalle im Bereich von Sekunden bzw. Zehntelsekunden realisiert werden.



### *Kontinuierliche Messungen mit autonomen Messstationen*

Der Einsatz von stationären Messstationen erfolgt an Positionen, die sich an der Standortwahl der Messprogramme des biologischen, chemischen und uferstrukturellen Monitorings orientieren. Diese Messpositionen werden unter Beachtung logistischer und seenphysikalischer Kriterien so gewählt, dass für den Standort repräsentative und kontinuierliche Messungen seenphysikalischer und limnologischer Parameter realisiert werden können.

Ziel ist es, durch eine entsprechende Standortwahl Umweltparameter zu registrieren und sowohl den aktuellen Zustand des Gewässers im Messareal als auch kurzfristig wirksame Einflüsse sowie Langzeiteinwirkungen zu bestimmen. Dadurch können chemische und biologische Messbefunde besser interpretiert und in den raum-zeitlich hochdynamischen Kontext des Sees gestellt werden.

Da die Messstationen kontinuierlich messen, wird keine Periodizität im engeren Sinne vorgegeben. Im Gegensatz zur Periodizität, die für die chemischen und biologischen Parameter festgelegt wird und üblicherweise mit der Wiederkehr bzw. Wiederholrate von Messkampagnen assoziiert ist, wird für kontinuierlich registrierende Messstationen ein Messintervall festgelegt. Dieses wird bei aktuellen Implementierungen von Stationen häufig auf Werte von etwa 10 bis 15 Minuten definiert. In Abhängigkeit von den untersuchten Fragestellungen und deren relevanten Zeitskalen (z. B.: Erfassung von Gewitterstürmen, die hohe Windgeschwindigkeiten und damit verbundene Transportprozesse im See bedingen) können unter Abwägung des Energie- und Datenspeicherbedarfs aber auch kürzere Messintervalle von z. B. einer Minute technisch ohne Probleme realisiert werden.

Die Dauer des Einsatzes von kontinuierlich registrierenden Messstationen wird bevorzugt mittel- bis langfristig in der Größenordnung von Jahren erfolgen und dient sowohl der Erfassung sehr schnell fluktuierender Prozesse und Parameter als auch der Erhebung von saisonalen und interannualen Veränderungen im Messareal.

Die Bauweise, relativ geringe Größe und Technik aktueller Messstationen gestattet es davon unabhängig, auch neue Standorte zu wählen und die Messstationen entsprechend den Erfordernissen aktueller Fragestellungen an andere Positionen zu verbringen. Eine solche Änderung der Standortwahl erfordert immer eine detaillierte Abwägung zwischen Vor- und Nachteilen von stationären Langzeitmessungen an einem fest gewählten Ort gegenüber der Wahl von mehreren Positionen mit unterschiedlichen Charakteristika der relevanten Umweltparameter bei entsprechend zeitlich eingeschränkter Länge der erhobenen Messreihen.

Aktuell sind im Bodensee folgende kontinuierlich registrierende Messstationen im Einsatz oder geplant

- Messstation Rheinsee (CH, Kanton Thurgau – Amt für Umwelt AfU) mit einer Multiparametersonde (Inbetriebnahme 2022 vorgesehen)
- Flachwassermessstation Langenargen (D, Institut für Seenforschung der LUBW) mit folgenden Messsystemen: Multimeteorologiesensoren, Multiparametersonde, Horizontal-ADCP, temporär: ADCP, Thermistorkette
- Messstation Untersee Zeller See (D, Institut für Seenforschung der LUBW) mit folgenden Messsystemen: Multimeteorologiesensoren, Multiparametersonde, Thermistorkette
- Zwei Messstationen im Überlinger See – Station Pfaffental und Station Süßenmühle (D, Bodensee-Wasserversorgung BWV) mit folgenden Messsystemen: Multimeteorologiesensoren, Multiparametersonde, Thermistorkette





Abbildung 1 Positionen von Verankerungen und operationell betriebener Messstationen im Bodensee (Stand Dezember 2021)

### 3.4 Kosten

Bei den unten aufgeführten Kosten handelt es sich **um reine Beschaffungskosten** der Messinstrumente. Die Beschaffung sowie der Betrieb und Unterhalt der Messgeräte erfolgt bisher eigenverantwortlich durch die Betreiber (Institut für Seenforschung der LUBW, Bodensee-Wasserversorgung BWV, Amt für Umwelt Kanton Thurgau), welche die Daten bis anhin unentgeltlich der IGKB zur Verfügung stellen.

#### *Multiparametersonden*

Die Beschaffungskosten liegen zwischen etwa 10.000 Euro für eine Sonde mit Basis-Sensorik (z. B.: Druck, Temperatur, Leitfähigkeit) und etwa 35.000 Euro für eine sensorisch sehr umfassend ausgestattete Multiparametersonde

#### *Fluoreszenzoptische Algensonden*

Die Beschaffungskosten belaufen sich auf etwa 35.000 Euro

#### *Akustischer Strömungsprofilierer – ADCP*

Die Beschaffungskosten liegen im Bereich von etwa 35.000 Euro

#### *Kontinuierlich registrierende, autonome Messstation*

Die Beschaffungskosten für eine Monitoringstation betragen:

- Basisausstattung (Meteorologiesensor, Multiparametersonde, Thermistorkette, Datenlogger, GSM-Datenübertragung): etwa 50.000 Euro
- Basis-Monitoringstation kann ergänzt werden mit z. B.
  - ADCP: etwa 35.000 Euro
  - Fluoreszenz Algenklassensonde: etwa 35.000 Euro
  - Etc.pp.

Ergänzende Messgeräte und –sonden, wie z. B. ADCP und fluoreszenzoptische Algenklassensonden, können gegebenenfalls auch aufgabenbezogen temporär an Messstationen angebracht und zwischen diesen ausgetauscht werden.

### 3.5 Künftiges Monitoring

Aktuell betreiben bereits verschiedene Anrainer kontinuierlich registrierende Messstationen, die entweder direkt in der Flachwasserzone positioniert sind oder sich im Vorfeld des Ufers und der Flachwasserzone befinden (Abb. 1). Diese Arbeiten und entsprechenden Investitionen werden bisher von den verantwortlichen Institutionen außerhalb des Rahmens der IGKB-Aktivitäten durchgeführt und finanziert. Folgende Messstationen sind bereits operationell resp. gehen in naher Zukunft in Betrieb und liefern kontinuierlich Messdaten.

1. Messstation Rheinsee, Kanton Thurgau, CH (Inbetriebnahme 2022 vorgesehen)
2. Messstation Flachwasserstation Langenargen, ISF der LUBW, D
3. Messstation Untersee Zeller See, ISF der LUBW, D
4. Messstation Überlinger See Pfaffental, BWV, D
5. Messstation Überlinger See Süssenmühle, BWV, D

Weitere Messstationen sollten bisher nicht erfasste Uferabschnitte und häufig im Bodensee auftretende Uferformen erfassen. Zu berücksichtigen sind bei einer potentiellen Erweiterung des Messnetzes die bereits geleisteten Beiträge der verschiedenen Institutionen und die im operationellen Einsatz befindlichen Messstationen.

Vorstellbar sind weitere Monitoringstationen im Bereich des südlichen Bodenseeuferes, der Bregenzer Bucht und des nordöstlichen Uferbereiches. Exakte Positionen müssen in Abstimmung mit dort befindlichen Messarealen des Basismonitorings und den vor Ort anzutreffenden logistischen Bedingungen bestimmt werden.

## 4 Fachliche Querverbindungen

Es existiert eine Vielzahl von anderen Monitoringelementen und –aufgaben, für die eine Erhebung physikalischer Umgebungsparameter wertvolle Informationen zu Seezustand, Umgebungsparametern, Habitat und allgemein zur besseren Interpretation der Befunde und deren Einordnung in das hochdynamische seenphysikalische Geschehen des Sees liefert.

Dabei sind sowohl biologische und chemische als auch sedimentologische Themen und Fragestellungen direkt oder auch mittelbar vom seenphysikalischen Kontext und seinen Parametern betroffen und werden häufig durch diesen maßgeblich geprägt.

Im Folgenden sollen für einige seenphysikalische Parameter exemplarisch Querverbindungen genannt werden.

- Meteorologische Parameter
  - Diese haben entweder direkten Einfluss auf entsprechende chemische und biologische Parameter und Prozesse (z. B. PAR-Strahlung) oder wirken mittelbar über das hydrodynamische System See auf chemische, biologische und sedimentologische Komponenten ein (z. B.: windbedingte Transport- und Mischungsprozesse).
- Hydrologische Parameter
  - Diese haben wesentlichen Einfluss auf die chemische Beschaffenheit des Seewassers und tragen mit flussspezifischen Zuflussmengen und Frachten Wasserinhaltsstoffe in den See

ein, die wesentlich die Entwicklung des Ökosystems (z. B.: Eintrag von Nährstoffen) beeinflussen. Potentiell wassergefährdende Stoffe (z. B.: anthropogene Spurenstoffe) können zur Beeinträchtigung der Wasserqualität in Teilen oder im gesamten See führen. (siehe auch Datenblatt Freiwassermonitoring Bodensee Chemie)

- Wassertemperatur
  - Einfluss auf alle biologischen, chemischen und sedimentologischen Parameter und Prozesse
- Strömung
  - Wesentlicher Umgebungsparameter, der sowohl Stoffflüsse in der Flachwasserzone bestimmt als auch ein wichtiger habitatformender (Umlagerungsprozesse in der FWZ) und –charakterisierender Parameter (Welche Strömungsgeschwindigkeiten treten auf?) ist (siehe auch Datenblatt Wasser-Land-Strukturelemente).
- Wasserstand
  - Einfluss auf hydrologische Verhältnisse im See (Abflussverhalten über Seerhein) – wesentliche Beeinflussung der saisonalen Ausprägung von Flachwasserzonen und damit einhergehenden Prozessen der Sedimentresuspension und –umlagerung. Beeinflussung von Ufervegetation und Ausbildung von Makrophytenbeständen.
- Wellen
  - Räumlich hochvariabler Umgebungsparameter, der wesentlich die morphodynamischen Prozesse in der FWZ prägt, darüber hinaus aber auch eine wichtige habitatcharakterisierende Größe für viele Organismen ist. Mittelbar werden z. B. über durch Wellen resuspendierte Sedimente auch gegebenenfalls Nährstoffe freigesetzt und andere Umgebungsbedingungen signifikant beeinflusst (z. B. Trübung → Lichtbedingungen und Überformung von vorhandenen Flachwasser-Zönosen siehe auch Datenblatt Wasser-Land-Strukturelemente).
  - Mit dem räumlich hochauflösenden Seegangmodell des BodenseeOnline-Informationssystems können wertvolle räumlich und zeitlich kontinuierlich ableitbare Informationen zum seeweiten Seegangsfeld bereitgestellt werden. Diese Informationen werden bei entsprechenden Auswertungen, z. B. zu Makrozoobenthos, Makrophytenbestände und Land-Wasser-Strukturelementen herangezogen.
- Trübung (Lichtbedingungen)
  - Relevanter Parameter, der für Fauna und Flora gleichermaßen bedeutsam ist und deren Entwicklung, z. B. durch die Festlegung der euphotischen Zone wesentlich bestimmt und somit die Biozönose als Ganzes beeinflusst (z. B. Primärproduktion). Der Parameter kann auch entsprechende (photo)chemische Reaktionen triggern, inhibieren oder fördern (siehe auch Datenblatt Freiwassermonitoring Bodensee Chemie).
- Stoffflüsse und weitere hydrodynamische Parameter und Prozesse (z. B. häufig eher lokal ausgeprägte Flusswasserfahneinträge oder auch seeweite vertikale Durchmischungsprozesse)
  - Diese beeinflussen wesentlich die Verteilung und Transporte unterschiedlicher Stoffklassen. Durch Transport- und Mischungsprozesse bestimmt, bilden sich sowohl seeweit als auch lokal entsprechende Stoffverteilungen und –konzentrationen aus, die die Biozönose in ihrer Gesamtheit oder in Teilen wesentlich beeinflussen, z. B. die Makrophytenentwicklung in der Flachwasserzone, die Verfügbarkeit von Nährstoffen mit Einfluss auf die Ausbildung und Entwicklung des gesamten Nahrungsnetzes oder der Eintrag von potentiell schädlichen Stoffklassen (z. B.: anthropogene Spurenstoffe) mit großen räumlichen Gradienten bezüglich der anzutreffenden Stoffkonzentrationen und

zu erwartenden Beeinflussung des aquatischen Ökosystems (siehe auch Datenblatt Makrozoobenthos oder auch Makropten).

- Mit dem dreidimensionalen hydrodynamischen Modell des BodenseeOnline-Informationssystems werden räumlich und zeitlich kontinuierlich ableitbare Informationen zum seeweiten Strömungsfeld und weiteren hydrodynamischen Parametern räumlich hochaufgelöst bereitgestellt. Diese Informationen sind bei Auswertungen und Interpretationen von Messbefunden sehr wertvoll.

Weitere Querverbindungen werden in den einzelnen Datenblättern der biologischen, chemischen und sedimentologischen Komponenten aufgeführt.

## 5 Gesetzliche Grundlagen/Vorgaben

### • Deutschland

- Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) 2000/60/EG
- Umweltqualitätsnormen-Richtlinie 2008/105/EG, geändert durch 2013/39/EU
- Oberflächengewässerverordnung (OGewV)
- Wasserhaushaltsgesetz (WHG)

### • Österreich

- Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) 2000/60/EG
- Umweltqualitätsnormen-Richtlinie 2008/105/EG, geändert durch 2013/39/EU
- Wasserrechtsgesetz (WRG 1959 idgF)
- Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV, BGBl. II Nr. 479/2006 idgF)
- Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer (QZV Ökologie OG, BGBl. II Nr. 99/2010 idgF)
- Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer (QZV Chemie OG, BGBl. II Nr. 96/2006 idgF)

### • Schweiz

- Gewässerschutzgesetz (GSchG, SR 814.20)
- Gewässerschutzverordnung (GSchV, SR 814.201)
- Modulstufenkonzept - Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Oberflächengewässer der Schweiz

## 6 Zuständigkeit/Synergien

Physikalische Parameter sind integraler und wesentlicher Bestandteil der aktuell implementierten Routinemessprogramme der IGKB und werden auch bei vielen speziellen Untersuchungsprogrammen oder Forschungsprojekten erhoben – siehe z. B. nachfolgende Untersuchungsprogramme:

- IGKB Basismonitoring
- Klimafolgenmonitoring

- Erhebung von physikalischen Parametern begleitend bei vielen Forschungsprojekten (z. B.: Forschungsprojekte SEEWANDEL, SEEZEICHEN, hydroakustisches Fischmonitoring)

Die Informationen des Routinemonitoringprogrammes der IGKB sind überaus wertvoll für eine Vielzahl von Fragestellungen und Themen sowie für viele Forschungsprojekte, die am Bodensee mit sehr unterschiedlichen Themenstellungen realisiert werden. Umgekehrt können die Messergebnisse von Forschungsprojekten und Sondermessprogrammen aufgrund der standardisierten Auswerteformate und einheitlich angewandten SOP's auch als Ergänzung und Erweiterung des IGKB-Monitorings herangezogen werden.

Ergänzend und erweiternd kommen als Informationsquellen die numerischen Modelle – insbesondere des BodenseeOnline-Informationssystems – und die Methoden der satellitenbasierten Fernerkundung hinzu, die Informationen zu seenphysikalischen und limnologischen Parametern und Prozessen liefern und die Befunde der in situ Messprogramme ergänzen, zeitlich und räumlich verdichten und im Falle der numerischen Modelle kontinuierlich und seeweit zur Verfügung stellen können.

## **7 Bisheriges Monitoring/Erhebungen**

### **7.1 Multiparametersonden**

Multiparametersonden werden im Rahmen des IGKB-Routinemessprogrammes und bei anderen themen- bzw. projektbezogenen Messkampagnen sehr häufig eingesetzt und bilden eine der wesentlichen Grundlagen der aktuell implementierten Messprogramme.

### **7.2 Fluoreszenzoptische Algensonden**

Im Bodensee werden fluoreszenzoptischen Algensonden im Rahmen der IGKB-Monitoringausfahrten sowohl vertikalprofilierend als auch kontinuierlich horizontal an Transekten entlang messend eingesetzt.

### **7.3 Akustischer Strömungsprofilierer – ADCP**

ADCP werden themenbezogen für Fragestellungen der Transportprozesse im Freiwasser als auch für die nähere Charakterisierung der Strömungssysteme und Sedimentumlagerungsprozesse im Flachwasserbereich (z. B. im Bereich der Flachwassermessstation Langenargen) genutzt.

### **7.4 Kontinuierliche Messungen mit autonomen Messstationen**

Im Bodensee werden durch verschiedene Anrainer und Akteure unterschiedlich ausgestattete Messstationen betrieben oder sind in Planung, so z. B. vom Amt für Umwelt des Kantons Thurgau, der Bodensee-Wasserversorgung (BWV) und dem Institut für Seenforschung der LUBW.

### **7.5 Numerische Modelle**

Das state-of-the-art Modellsystem BodenseeOnline ([www.bodenseeonline.de](http://www.bodenseeonline.de)) stellt für den Bodensee räumlich hochauflösend und zeitlich kontinuierlich Daten von unterschiedlichen numerischen Modellen zur Verfügung. Folgende Modelle liefern aktuell für den Bodensee Simulationsdaten:

- Mesoskalen nested grid Windmodell
- dreidimensionales hydrodynamisches Modell
- gekoppeltes Tracer-Transportmodell

- Seegangmodell
- Ökosystemmodell
- Morphodynamikmodell (keine kontinuierliche Simulation im Rahmen des Vorhersage-Modellschemas)

## 7.6 Satellitenbasierte Fernerkundung

Die Methoden der satellitenbasierten Fernerkundung bieten neuartige Möglichkeiten, seenphysikalische Parameter und Gewässergüteparameter aus Satellitendaten abzuleiten. Folgende Parameter sind dabei aktuell von Interesse und können mit unterschiedlicher Robustheit abgeleitet und für ein Gewässermonitoring genutzt werden:

- Chlorophyll-a-Konzentrationen
- Wassertemperatur (oberflächlich)
- Trübung
- Secchi-Tiefe
- Trophieindikator
- Blaualgenindikator

Bisher werden satellitenbasierte Fernerkundungsdaten nur sporadisch für Forschungsprojekte und Themenstellungen des Bodensees eingesetzt. Mit aktuellen Arbeiten im Rahmen des Projektes SAMOSEE-BW „Satellitenbasiertes Seenmonitoring in Baden-Württemberg“ (Förderung durch die Digitalisierungsstrategie des Landes Baden-Württemberg) sollen zukünftig auch für den Bodensee routinemäßig aufbereitete Fernerkundungsdaten zur Verfügung stehen.

## 8 Datenhaltung

Die Datenhaltung für die verschiedenen Messprogramme und Messgeräte erfolgt bei den Behörden und Institutionen der direkten Anrainerstaaten in standardisierter Form. Wesentliche Informationen und Messergebnisse speziell des IGKB-Routinemonitoringprogramms werden in der BOWIS-Datenbank eingepflegt und archiviert und sind dort abrufbar.

Die primären Datenhaltungen der Rohdaten in entsprechenden binären Fileformaten und die Archivierung abgeleiteter anderer Fileformate (z. B.: Excel-Files) liegt in der Verantwortung der jeweiligen Betreiber der Messstationen. Ausgabeformate und generische Namensgebungen sind aktuell nicht zwischen den Anrainerstaaten abgestimmt.

Eine Harmonisierung der primären Datenformate und Namenskonventionen wäre grundsätzlich wünschenswert, erscheint aber aktuell sehr aufwändig und praktisch kaum realisierbar. Die Stärkung der BOWIS-Datenplattform als zentraler Datenspeicher und Daten-Austauschort und die Einpflege entsprechender Datensätze in diese Datenbank erscheint hier deutlich zielführender.

Die Datenhaltung der einzelnen primären Rohdaten erfolgt jeweils in gerätespezifischen binären Datenformaten, die vom jeweiligen Hersteller der Messgeräte vorgegeben sind. Das betrifft z. B. die Messgerätetypen

- Multiparametersonden
- Fluoreszenzoptische Algensonden
  - Akustischer Strömungsprofilierer – ADCP

Die Datenhaltung autonomer Messstationen umfasst mehr Datentypen und komplexere Formate. Aktuell werden am Institut für Seenforschung der LUBW die entsprechenden Daten der Messstationen automatisch aus Datenfernübertragungen direkt in eine Oracle-Datenbank am ISF der LUBW übernommen und dort archiviert. Aktuell geplante weitere Messstationen (siehe auch Kapitel 3.3) des ISF (Untersee Zeller See) und der Bodensee-Wasserversorgung (BWV, zwei Stationen im Überlinger See) sollen ebenfalls in diese IT-Logistik eingebunden werden.

**Die Datenhaltung der Simulationsergebnisse numerischer Modelle erfolgt in proprietären binären Formaten der entsprechenden numerischen Modellsysteme. Simulationsdaten des Online-Informationssystems BodenseeOnline ([www.bodenseeonline.de](http://www.bodenseeonline.de)) sind über verschiedene Schnittstellen des Systems verfügbar und können in diesem System sowohl exportiert als auch direkt visualisiert werden.**

Die Datenhaltung satellitenbasierter Fernerkundungsdaten erfolgt in spezifischen, sehr komplexen Dateiordnerstrukturen und den zugehörigen sehr unterschiedlichen Fileformaten (z. B. xhtml, GeoTiff, jpg, pdf), deren Strukturierung und Namensgebung generischen Regeln folgt. Aktuell werden solche Daten am Institut für Seenforschung der LUBW im Rahmen von Projekten vorgehalten und bearbeitet.

## 9 Literatur

Lerman, A., Imboden, D.M., Gat, J.R., Chou, L., Davison, W., Eisenreich, S.J., Gat, J.R., Hamilton-Taylor, J., Hornbuckle, K.C., Hostetler, S.W., Imboden, D.M., Ishiwatari, R. (1995): Physics and Chemistry of Lakes, Springer; 2nd ed. Edition (1995), ISBN-10: 3540578919, ISBN-13: 978-3540578918

Schönborn, W., Risse-Buhl, U. (2013): Lehrbuch der Limnologie, Schweizerbart'sche, E.; 2., Edition (2013), ISBN-10: 3510652754, ISBN-13: 978-351065275

Schwoerbel, J., Brendelberger, H. (2022): Einführung in die Limnologie - Stoffhaushalt - Lebensgemeinschaften – Technologie, Springer Spektrum; 11. Aufl. 2021 Edition (2022) ISBN-10: 3662633337, ISBN-13: 978-3662633335