


# SAMOSEE-BW: Fernerkundung von Seen – unsere Augen im All


 Satellitenbasiertes Monitoring von Stehgewässern in Baden-Württemberg –  
ein Teilprojekt der Digitalisierungsstrategie des Landes „digital@bw“



<b>HERAUSGEBER</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe, <a href="http://www.lubw.de">www.lubw.de</a>
<b>BEARBEITUNG</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe, <a href="http://www.lubw.de">www.lubw.de</a> Abteilung 4 Wasser
<b>REDAKTION</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Dr. Klaus Zintz, Dr. Thomas Wolf, Kristina Popp
<b>BEZUG</b>	<a href="http://www.lubw.de">www.lubw.de</a> Publikationen im Bestellshop der LUBW
<b>STAND</b>	Dezember 2021
<b>SATZ UND BARRIEREFREIHEIT</b>	Satzweiss.com Print Web Software GmbH Mainzer Straße 116, 66121 Saarbrücken
<b>AUFLAGE</b>	1. Auflage
<b>TITELBILD</b>	Im Titelbild sind die multispektralen Messmöglichkeiten des Sentinel-2-Satelliten der ESA mit den Messergebnissen zu den Chlorophyllkonzentrationen im Bodensee bei einem Überflug am 03.09.2020 kombiniert. Die Farbskala reicht von tiefblau (0,1 Mikrogramm Chlorophyll a pro Liter Wasser) bis zum hellgrünen Wert von 20 µg/l. Quellen: ESA und ISF.
<b>ZITIERVORSCHLAG</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hrsg., 2021): SAMOSEE-BW: Fernerkundung von Seen, 1. Auflage, Karlsruhe

Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

# SAMOSEE-BW: Fernerkundung von Seen – unsere Augen im All

 Satellitenbasiertes Monitoring von Stehgewässern in Baden-Württemberg –  
ein Teilprojekt der Digitalisierungsstrategie des Landes „digital@bw“

	<b>GELEITWORT</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>FERNERKUNDUNG: MESSDATEN AUS DEM ALL</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>DIGITALE SEENÜBERWACHUNG: DAS PROJEKT SAMOSEE-BW</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>WIE SATELLITENDATEN ANSCHAULICH WERDEN</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>WICHTIGE INFORMATIONEN I: TABELLEN UND JAHRESGÄNGE</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>WICHTIGE INFORMATIONEN II: ZEITREIHEN UND RÄUMLICHE VERTEILUNG</b>	<b>14</b>
<b>6</b>	<b>MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN DER FERNERKUNDUNG</b>	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>FAZIT UND AUSBLICK</b>	<b>18</b>

# Geleitwort

Liebe Leserinnen und Leser,

Baden-Württemberg ist reich an Stehgewässern: Die oberschwäbischen Seen, die Karseen im Schwarzwald sowie die vielen vom Menschen angelegten Weiher, Kiesgrubenseen und Rückhaltebecken prägen unsere Landschaft. Von besonderer Bedeutung ist der Bodensee, der nicht nur Touristen anzieht, sondern insgesamt rund fünf Millionen Menschen mit Trinkwasser versorgt. Daher ist es selbstverständlich, dass dieser See und seine Wasserqualität kontinuierlich überwacht werden.

In dem hier vorliegenden Bericht stellen wir Ihnen die Möglichkeiten vor, welche die Fernerkundung bei der Überwachung der Seen bieten kann. Die von der europäischen (ESA) und amerikanischen Weltraumagentur (NASA) ins All entsandten Erdbeobachtungssatelliten haben mit ihren Messsensoren die gesamte Landoberfläche und damit auch die Seen im Blick. Dabei liefern sie bei ihren häufigen Überfliegungen eine Vielzahl von Daten. Diese ermöglichen es uns, zukünftig bestimmte Vorgänge in einem so großen See wie dem Bodensee umfassend abzubilden und die klassischen Untersuchungen der Vor-Ort-Messprogramme zu ergänzen.

Darüber hinaus eröffnen die „Augen“ im All auch ganz neue Perspektiven auf die unzähligen kleineren Stehgewässer im Land: In Baden-Württemberg gibt es 28 Seen mit einer Fläche von mehr als 50 Hektar, die regelmäßig im Zuge der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) der EU überwacht werden müssen. Ferner gibt es 261 Stehgewässer, die zwischen zehn und 50 Hektar groß sind – und rund 1300 natürliche und künstliche Stehgewässer zwischen einem und zehn Hektar. Mit den klassischen Methoden ist eine kontinuierliche Überwachung kaum möglich. Mit der Fernerkundung aus dem All rücken nun ganz neue Monitoringkonzepte in den Blick.

Das Land hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Digitalisierung voranzutreiben und dazu die Digitalisierungsstrategie „digital@bw“ ins Leben gerufen, in deren Rahmen derzeit verschiedene Leuchtturmprojekte durchgeführt werden. Dazu zählen auch smarte Umweltdaten, wie sie die Satelliten aus dem Weltall liefern. Mit dem im Rahmen von „digital@bw“ finanzierten Vorhaben SAMOSEE-BW – „Satellitenbasiertes Monitoring von Seen in Baden-Württemberg“ –, das über einen Zeitraum von zwei Jahren mit einer Zuwendung von rund 300.000 Euro realisiert wurde, hat das Institut für Seenforschung (ISF) der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) nun die Voraussetzungen geschaffen, dass diese satellitenbasierten Umweltdaten in Zukunft auch im Alltag zur Verfügung stehen können. Davon profitieren nicht nur die mit der Überwachung unserer Stehgewässer beauftragten Behörden, sondern auch alle Bürgerinnen und Bürger, weil die Gewässerqualität so besser überwacht werden kann. Dank der im Zuge dieses Projekts entwickelten Verarbeitungsroutinen lassen sich nun die komplexen Satellitendaten in anschaulicher Form darstellen. Dies ist ein wichtiger Beitrag, um die Entwicklungen in den Gewässern des Landes noch besser verfolgen zu können – und um in der Zukunft schneller reagieren zu können, wenn sich etwa in beliebten Badeseen unerwünschte Blaualgenblüten mit möglichen Gesundheitsrisiken entwickeln.

Seien Sie gespannt auf die neuen Möglichkeiten, die zur Überwachung unserer Seen zur Verfügung stehen.

Werner Altkofer

Stellvertretender Präsident der LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg

→ **Wenn Gewässerfachleute die Entwicklung von Seen verfolgen, müssen sie regelmäßig Messungen vor Ort durchführen und Wasserproben für chemische und biologische Analysen entnehmen. Einen Teil dieser Aufgabe können heute die optischen Messsensoren von Satelliten übernehmen. Diese sogenannte Fernerkundung spart Zeit, Arbeit und Geld – und sie ermöglicht ganz neue Wege der Überwachung. So lassen sich deutlich mehr Seen als bisher in das Gewässermonitoring einbeziehen. Das ist für den Schutz der Seen als wertvolle Ökosysteme ebenso hilfreich wie für ihre Nutzung beispielsweise für die Freizeitgestaltung.**

## 1 Fernerkundung: Messdaten aus dem All

### **Anspruchsvolle Aufgabe: Die Überwachung von Seen**

Seen sind als „blaue Augen“ der Landschaft nicht nur für Touristen und Erholungssuchende höchst attraktiv. Auch als artenreiche Ökosysteme, Trinkwasserreservoir, Fischgewässer und als Ressource für wirtschaftliche Nutzungen erfüllen sie vielfältige Funktionen. Ihre Überwachung ist daher eine essentielle Aufgabe für alle Institutionen, Organisationen und Behörden, die sich zu deren Schutz verpflichtet haben.

Bisher sind die Gewässerfachleute dabei auf Messungen im Gewässer selbst sowie auf Laboranalysen angewiesen. Das ist mühsam, zeitaufwendig, kostenintensiv und zudem nur in zeitlich und räumlich begrenzter Intensität möglich. Hier lassen sich nun mit den Methoden der modernen satellitengestützten Fernerkundung ganz neue Überwachungskonzepte entwickeln. In Zusammenarbeit mit anderen Institutionen hat das Institut für Seenforschung der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Möglichkeiten erarbeitet, die Messdaten aus dem Weltall für die

Routineüberwachung der vielen großen und kleinen Seen im Land zu nutzen.

### **Unsere Augen im All: Copernicus und Landsat**

Herzstück des Erdbeobachtungsprogramms Copernicus, mit dem die Europäische Union die Fernerkundung aus dem Weltall kräftig unterstützt, sind seit 2014 die Sentinel-Satelliten. Bei den Amerikanern wiederum kommt die NASA dieser Aufgabe mit dem Landsat-Programm nach. Die zu diesen Projekten gehörenden Satelliten überfliegen auch Mitteleuropa in regelmäßigen Abständen und liefern dabei Daten, unter anderem im sichtbaren sowie im Infrarotbereich. Für größere Seen wie den Bodensee lassen sich dabei die Messwerte der Sentinel-3-Satelliten mit einer Auflösung von 300 Meter nutzen, die den See jeden Tag überfliegen. Für die Überwachung kleinerer Seen sind die Daten von Satelliten wie Sentinel-2A/B oder Landsat-8 erforderlich, die eine Auflösung von 10 bis 90 Metern haben, dafür eine Region aber nur alle 5 (Sentinel 2) beziehungsweise alle 16 Tage (Landsat 8) überfliegen.



Abbildung 1: Die Alpen mit dem Bodensee am Nordrand, vom Weltall aus gesehen. Quelle: Nasa/Landsat 8



Abbildung 2: Der europäische Sentinel-2-Satellit der ESA.  
Quelle: ESA



Abbildung 3: Der amerikanische Landsat-8-Satellit der Nasa.  
Quelle: Nasa

### Chlorophyll und Co.: Welche Parameter eignen sich zur Fernerkundung?

Der grüne Blattfarbstoff Chlorophyll-a kommt wie in allen Pflanzen auch im pflanzlichen Plankton vor, wo er für die Fotosynthese unentbehrlich ist. Vom All aus lässt sich das Chlorophyll aufgrund der Grünfärbung des Gewässers erfassen, die sich aus dem Absorptionsverhalten des Chlorophylls ergibt. Damit können die Fachleute mit Hilfe dieses Parameters wertvolle Informationen über die biologische Entwicklung in einem See vom All aus ermitteln. Auch weitere wichtige Daten zur Bestimmung des aktuellen Gewässerzustandes liefern die „Augen“ im Weltall, etwa zur Trübung und Sichttiefe, zur Temperatur an der Wasseroberfläche sowie zur Wahrscheinlichkeit, dass sich im See problematische Algen entwickeln und es zu sogenannten Blaualgenblüten kommt. Im Winter wird zudem angezeigt, ob sich Eis an der Wasseroberfläche befindet.

### Neue Chancen für die Stehgewässer

Baden-Württemberg ist für den größten Teil des Bodensees zuständig, der der drittgrößte See in Mitteleuropa ist. Darüber hinaus gibt es im Land 28 Seen, die größer als 50 Hektar sind. Weitere 261 Seen und Talsperren sind zwischen zehn und 50 Hektar groß. Doch die allermeisten Stillgewässer im Land sind kleiner – 1300 Seen, Weiher und künstlich angelegte stehende Gewässer überschreiten immerhin die 1-Hektar-Grenze. Sie alle zu überwachen, ist mit den Mitteln der Vor-Ort-Probenahme und klassischen limnologischen Untersuchungen nicht möglich. Ein satellitenbasiertes Monitoringprogramm leistet hier wertvolle Hilfe bei der Bewertung. Hier ermöglicht das sogenannte indikative Gewässermonitoring eine erste Einschätzung der Gewässerqualität bei einer Vielzahl kleiner Stehgewässer, die in regulären Umweltmessprogrammen noch gar nicht erfasst werden konnten. So liefern die Satellitendaten anhand von

einigen wesentlichen Wasserqualitätsparametern erste Indikationen über den Gewässerzustand. Falls erforderlich, können dann weitere detaillierte und seenkundlich umfassendere Untersuchungen durchgeführt werden.

Bei den größeren Seen wie dem Bodensee wird durch die häufige Überfliegung eine zeitlich engere Analyse möglich. Die höhere räumliche Auflösung der Satellitenbilder wiederum erlaubt es den Fachleuten, die Entwicklung in mehr Seeteilen und Buchten im Detail zu verfolgen als dies bei der regelmäßigen Analyse von Wasserproben möglich ist. Diese können wegen des hohen Aufwandes nur an wenigen Stellen im See genommen werden. Gerade im Hinblick auf die Entwicklung potenziell gefährlicher Blaualgenblüten – angezeigt durch den sogenannten HAB-Indikator (Harmful Algal Bloom, gefährliche Algenblüte) – können die Daten aus dem All wichtige Informationen für die Sicherheit des betreffenden Gewässers als Badesees geben.

### Erhebliches Innovationspotenzial

Die neue Methodik der satellitengestützten Gewässeruntersuchung ergänzt die bisher etablierten Verfahren und erweitert die Anzahl der untersuchten und überwachten Seen erheblich. So lassen sich bedenkliche Entwicklungen leichter erkennen. Zudem sind durch die häufigen Überfliegungen prinzipiell zeitnahe Warnungen möglich, etwa wenn sich der Gewässerzustand durch Blaualgenblüten rasch verschlechtern sollte. Auch wenn eine derart schnelle Verarbeitung der Satellitendaten derzeit noch in der Entwicklung ist, so birgt diese neue Methodik doch insgesamt ein erhebliches Innovationspotenzial des aktuell bestehenden Umweltmonitorings. Die größeren Seen müssen zwar nach wie vor zeitaufwendig vor Ort untersucht werden, doch bei den vielen kleineren Seen wird mit der Satellitentechnik eine neue Basis für ihre Bewertung geschaffen.

→ Um die zahlreichen Stehgewässer des Landes besser überwachen zu können, haben die Fachleute nun Zugriff auf Daten aus dem All. Doch von den digitalen Messwerten der Sensoren an Bord von Umweltsatelliten bis zu alltagstauglichen und anschaulichen Informationen für die Bewertung und Überwachung der Seen ist es ein weiter Weg. Zwei Projekte in Baden-Württemberg haben die Grundlagen für eine nutzerfreundliche Anwendung gelegt.

## 2 Digitale Seenüberwachung: Das Projekt SAMOSEE-BW

### Die Digitalisierungsstrategie des Landes

„Die Digitalisierung ordnet nahezu alle Wirtschafts- und Lebensbereiche neu.“ Diesem Leitsatz fühlt sich die Digitalisierungsstrategie „digital@bw“ des Landes Baden-Württemberg verpflichtet, die 2017 ins Leben gerufen wurde. Bis Ende 2021 standen mehr als zwei Milliarden Euro zur Verfügung, um im Rahmen einer Vielzahl innovativer Projekte und Maßnahmen die Digitalisierung voranzubringen – von der Mobilität über das Gesundheitswesen und die Bildung bis hin zur Infrastruktur und Wirtschaftsunternehmen.

Auch beim Umweltschutz schreitet die Digitalisierung voran. Dabei eröffnen sich ganz neue Perspektiven. So kön-

nen künftig etwa dank digitaler Satellitendaten die vielen natürlichen Seen und künstlichen Stehgewässer des Landes besser überwacht werden. Hierzu ist es allerdings unerlässlich, dass die Daten aus dem All auch zuverlässig sind und zudem nutzerfreundlich aufgearbeitet vorliegen. Mit dem Leuchtturmprojekt „SAMOSEE-BW“ wird im Rahmen des Handlungsfeldes „Smarte Umweltdaten“ der Digitalisierungsstrategie des Landes dieser neuen Methodik der Weg in den Alltag geöffnet. Ziel ist, den aktuellen Zustand von Stehgewässern in vergleichsweise engen Zeiträumen satellitengestützt zu ermitteln. Dies bildet die Grundlage für die kontinuierliche Überwachung ihrer räumlichen und zeitlichen Entwicklung.

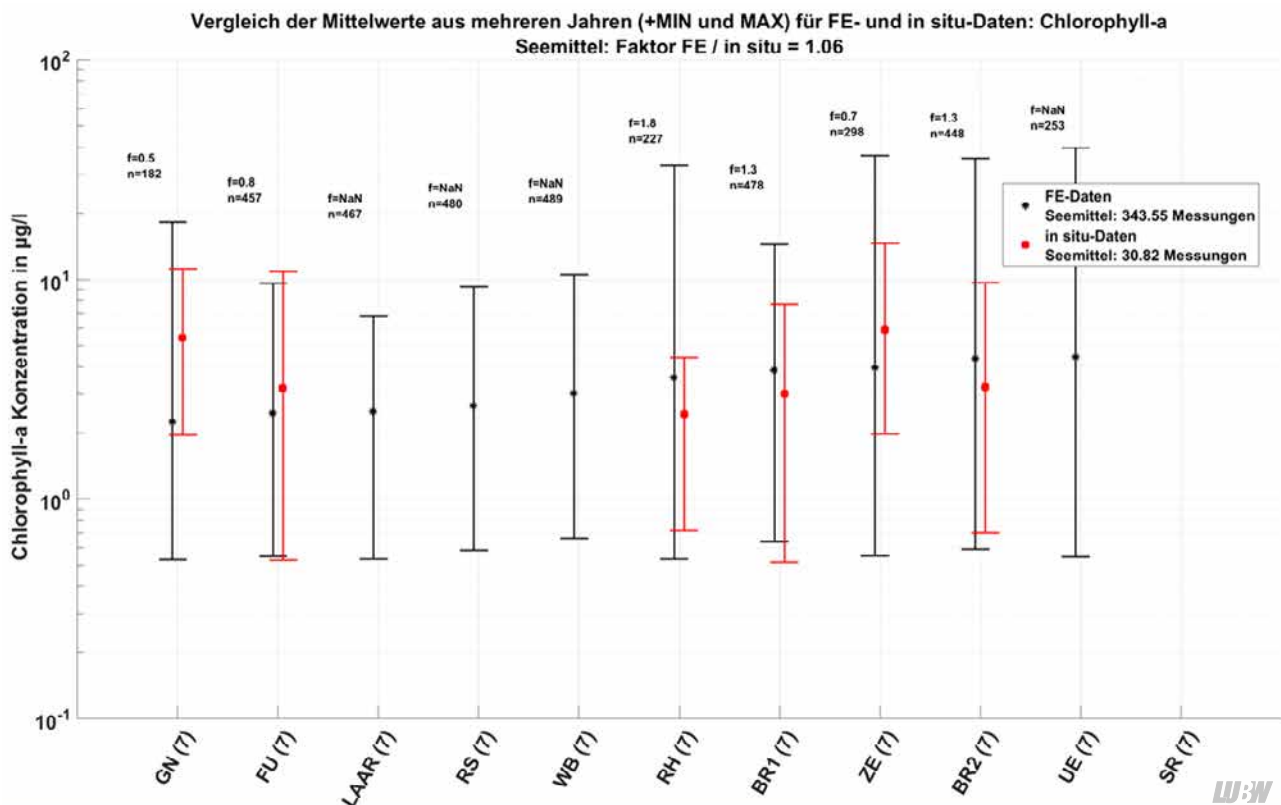


Abbildung 4: Vergleich von Chlorophyll-a-Werten, die im Bodensee von Satelliten per Fernerkundung (FE, schwarz) und vor Ort (rot) gemessen wurden; dargestellt sind die von 2011 bis 2017 ermittelten Durchschnittswerte sowie die mittleren Minimal- und Maximalwerte. Die Abkürzungen stehen für die Messorte im Bodensee, etwa SR für Seerhein oder FU für Seemitte zwischen Fischbach und Uttwil. Quelle: ISF





Abbildung 5: Am Bodensee werden routinemäßig Wasserproben für die Analyse der Gewässergüte genommen. Foto: Zintz



Abbildung 6: Auch kleinere Seen in Baden-Württemberg wie der Federsee werden immer wieder untersucht. Foto: Zintz

### Das Projekt WasMon-CT: Wie gut funktioniert die Fernerkundung?

Eine unabdingbare Voraussetzung dafür, dass ein solches Konzept auch funktioniert, ist die Zuverlässigkeit der Messwerte, die von den Instrumenten an Bord der Satelliten ermittelt und zur Erde gefunkt werden. Hier hat das Projekt „Satellitendaten für das behördliche Gewässermonitoring von Chlorophyll und Trübung“ (WasMon-CT) wertvolle Grundlagenarbeit geleistet. Dabei haben das Institut für Seenforschung (ISF), das zu der Landesanstalt für Umwelt (LUBW) gehört, und die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) eng zusammengearbeitet. Ein wichtiges Ergebnis dieses wegweisenden Verbundprojektes war, dass beim Bodensee die Fernerkundungsdaten für den grünen Pflanzenfarbstoff Chlorophyll-a gut bis sehr gut mit denjenigen Mittelwerten und Bandbreiten übereinstimmen, die im gleichen Zeitraum vor Ort im See gemessen wurden. Hinzu kommt, dass aus dem All viel mehr Daten über den Zustand des Sees geliefert werden als dies mit den routinemäßigen Untersuchungen vor Ort möglich ist. So lässt sich die Entwicklung des Sees im Jahresverlauf viel genauer verfolgen, und zwar sowohl in engeren Zeitabständen als auch in besserer räumlicher Auflösung, etwa im Hinblick auf Buchten und die verschiedenen Seeteile.

Bei den kleineren Seen im Land zeigte sich ein etwas differenzierteres Bild. Die Vergleichsanalyse umfasste hier 16 Stehgewässer, die sich im Hinblick auf ihre Größe und Tiefe sowie ihre geografische Lage und ihren Nährstoffgehalt stark unterschieden. Insgesamt ergab sich auch hier für eine große Anzahl der Stehgewässer eine gute Übereinstimmung der Mittelwerte und Bandbreiten der Messwerte, die einerseits aus der Fernerkundung stammten und andererseits vor Ort ermittelt wurden. Allerdings kam es bei einzelnen Stehgewässern zu größeren Abweichungen,

etwa wenn sie viele Huminstoffe enthalten oder sehr flach sind. Immerhin ließen sich die Übereinstimmungen verbessern, wenn die Datenverarbeitung speziell an die dort herrschenden Verhältnisse angepasst wurde. Festzuhalten bleibt, dass für viele kleine Seen die Messwerte aus dem All im Wertebereich der Vor-Ort-Messungen liegen. Somit wird eine Einschätzung des Gewässerzustandes auch bei solchen kleinen Seen möglich, über die bisher kaum Informationen vorliegen.

### SAMOSEE-BW: Eine Fülle an Messdaten, anschaulich präsentiert

Die besten Daten nützen allerdings nur begrenzt, wenn sie nicht anschaulich präsentiert werden können. Genau diese Aufgabe sollte das Projekt „Satellitenbasiertes Monitoring von Seen in Baden-Württemberg“, kurz SAMOSEE-BW, erfüllen. Aufbauend auf den Erkenntnissen der grundlegenden Untersuchungen im Rahmen des Projekts WasMon-CT hatte dieses Forschungsvorhaben das Ziel, die Satellitendaten für die routinemäßige Bewertung von Stehgewässern nutzbar zu machen. Dazu werden die Messwerte aus dem All so aufgearbeitet, dass sie ohne großen weiteren Aufwand für den Nutzer in Form von Tabellen und Grafiken zur Verfügung stehen.

Vorrangig werden dabei diejenigen Gewässerqualitätsparameter Chlorophyll-a sowie Trübung und Sichttiefe berücksichtigt, die für die Bewertung von Seen ein besonderes Gewicht haben. Auch die Temperatur an der Seeoberfläche wird erfasst. Darüber hinaus sind satellitenbasierte Informationen über die Gewässertrophie von Interesse und Daten, die auf Blaualgen schließen lassen. So sollen Bewertungskriterien zur Verfügung gestellt werden, die für die Einordnung der Seen nach der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) sowie der LAWA von Bedeutung sind.

→ **Wenn ein Satellit über einen großen See wie den Bodensee fliegt, dann liefert er eine Flut von Rohdaten. Bis diese in Form von Tabellen, Grafiken und Abbildungen vorliegen, ist es ein weiter Weg. Die Bewertung und eventuelle Korrektur der Rohdaten sowie spezielle Computerprogramme und Arbeitsroutinen sind erforderlich, um die Informationen für die öffentliche Verwaltung sowie die Bürgerinnen und Bürger nutzbar zu machen.**

### 3 Wie Satellitendaten anschaulich werden

#### Prozessierung der Daten – ein mühsamer Weg

Bereits in den 1980er Jahren wurden die ersten Satelliten in Betrieb genommen, mit denen sich Meere und Küsten überwachen lassen. Ebenfalls in dieser Zeit wurde etwa durch die Landsat-Satelliten damit begonnen, routinemäßig aktuelle Informationen über den Zustand der Landoberfläche in höherer räumlicher Auflösung zu gewinnen – und damit auch über die Binnengewässer. Aus den spektralen Eigenschaften eines Gewässers, also der Art der Strahlung, die von der Wasseroberfläche ins Weltall zurückgesandt wird, können die Instrumente an Bord solcher Erkundungssatelliten wertvolle Messwerte und Informationen ableiten.

Doch die von den Satelliten gelieferten multispektralen Aufnahmen sind komplex. Und sie unterliegen Störfaktoren wie beispielsweise der Streuung von Strahlen in der Atmosphäre oder Reflexionen an der Wasseroberfläche. Um verlässliche Fernerkundungsdaten zu erhalten, müssen also mit Hilfe komplexer Rechenschritte mögliche Fehler und Störeinflüsse zunächst erkannt und dann herausge-

filtert und korrigiert werden. Dazu zählen zum Beispiel störende Einflüsse der Atmosphäre, Wolkenbildung oder Sonnenreflexionen auf der Gewässeroberfläche. Diese Algorithmen zur Datenauswertung wurden immer weiter verfeinert. So lassen sich zum Beispiel mit Hilfe empirischer Algorithmen die Messwerte der Satelliten mit den vor Ort gewonnenen Daten eines Gewässers in Verbindung bringen und so abgleichen, dass die Daten an die speziellen Verhältnisse dieses Gewässers wie etwa seine natürliche Farbe angeglichen werden können. Sogenannte Neuronale Netzwerke wiederum können mit Hilfe der Vor-Ort-Daten so trainiert werden, dass sie aus den Satellitendaten die entsprechenden Parameter zur Einschätzung der Gewässergüte ableiten können. Schließlich gibt es Algorithmen, die – basierend auf allgemeinen physikalischen Grundlagen – so gestaltet sind, dass sie sich mit guten Ergebnissen auf neue Seen und Seentypen anwenden lassen.

#### Automatisierte Bearbeitung: Implementierung des Workflows

Im Rahmen des Projekts SAMOSEE-BW wurden nun Arbeitsroutinen erstellt, um die Satellitendaten für das Gewässermonitoring des Landes nutzbar zu machen. Dabei kooperiert das Institut für Seenforschung der LUBW eng mit Service Providern. Diese arbeiten die Satelliten-Rohdaten auf, die von der NASA und der europäischen Welt-raumbehörde ESA zur Verfügung gestellt werden. Hierfür ist eine langjährige Erfahrung unerlässlich, damit diese Daten mit den passenden Algorithmen von Störgrößen bereinigt und georeferenziert – also den richtigen Stellen auf der Erde zugeordnet – zur Verfügung gestellt werden können. Diese Daten über Chlorophyll-a, Trübung, Sichttiefe und Temperatur werden dann am Institut für Seenforschung weiterverarbeitet. Auch hierbei kommen Spezialprogramme wie MATLAB zum Einsatz, um die Sa-

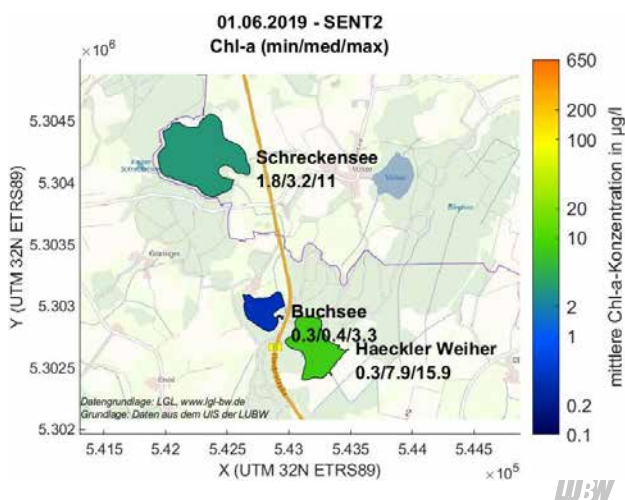


Abbildung 7: Die Chlorophyll-a-Gehalte der Blitzenreuter Seenplatte beim Überflug am 1. Juni 2019. Die Zahlen unter den Seen stehen für Minimum/Median/Maximum der ermittelten Werte. Quelle: ISF

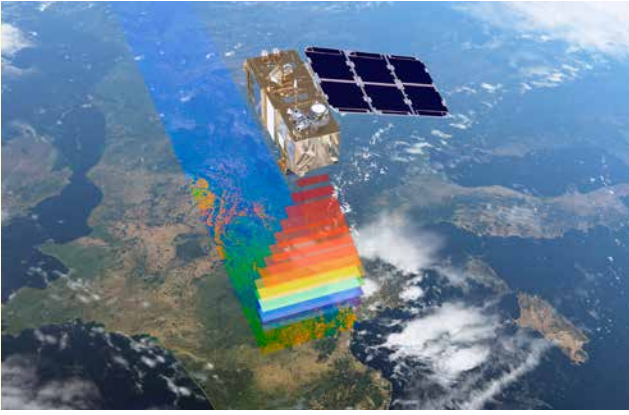


Abbildung 8: Der Sentinel-2-Satellit der ESA kombiniert eine hohe Auflösung mit neuen multispektralen Messmöglichkeiten. Quelle: ESA

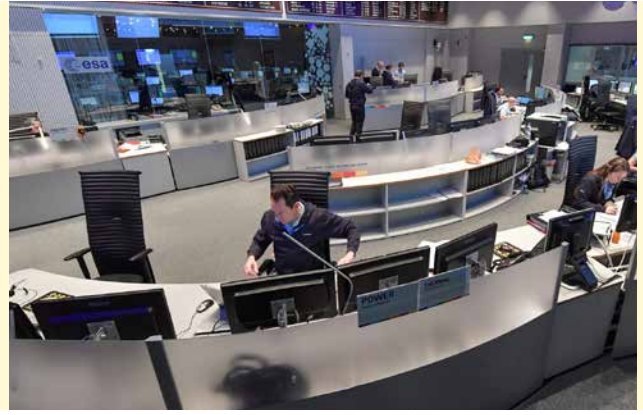


Abbildung 9: Blick in den Kontrollraum der ESA, wo auch der Satellit Sentinel-2 überwacht wird. Foto: ESA

tellitendaten in nutzerfreundliche Darstellungen wie Grafiken oder Videosequenzen zu überführen. Zudem wird die Expertise der Seenfachleute genutzt, um die Informationen aus der Fernerkundung und die biologischen wie chemischen Befunde der Vor-Ort-Messungen zusammenzuführen und daraus gegebenenfalls Handlungsempfehlungen abzuleiten – etwa über die Risiken von Blaualgenblüten.

Mit dem im Zuge von SAMOSEE-BW entwickelten Workflow können die Fernerkundungsdaten nun so aufbereitet werden, dass sie sich mit Standard-Software wie Excel oder mit Geoinformationssystemen verwenden lassen. Dies gilt für ein ergänzendes Satellitenmonitoring des Bodensees genauso wie auch für kleinere Seen, für die nun ein indikatives satellitenbasiertes Gewässermonitoring möglich wird.

Die aufbereiteten Daten erlauben auch eine übersichtliche Darstellung, wie sich eng benachbarte Seen entwickeln. Damit lassen sich die Seen auf einen Blick anschaulich vergleichen. Ein Beispiel ist die hier dargestellte Blitzenreuter Seenplatte in Oberschwaben. Abbildung 7 gibt die Messwerte für Chlorophyll-a wieder, die vom

Sentinel-2-Satelliten bei einem Überflug am 1. Juni 2019 für den Häckler Weiher, den Buchsee und den Schreckensee ermittelt wurden. Dabei weist der als Badeseen genutzte Häcklerweiher eine ähnliche Chlorophyll-Konzentration auf wie der Schreckensee, während beim Buchsee zu diesem Zeitpunkt deutlich niedrigere Werte und damit eine geringere Algendichte zu verzeichnen ist.

Allein für die drei Jahre 2018 bis 2020 lieferten die bisher entwickelten Workflows 105.000 Dateien in Form von Tabellen, Grafiken, Kartendarstellungen, Abbildungen und Videos für 21 ausgewählte Seen im Land. Berücksichtigt wurden dabei die Parameter Chlorophyll-a, Sichttiefe, Trübung, Temperatur, Blaualgenindikator, Trophiestatus, Gelbstoffe und Schwebstoffe. Die Informationen und Erkenntnisse aus der Fernerkundung lassen sich auch übersichtlich in individuellen Datenblättern in leicht nutzbarer Form als pdf-Dateien zusammenfassen, in denen die wesentlichen Informationen kompakt zusammengeführt werden. Beabsichtigt ist, diese seenspezifischen Dokumente automatisiert aus den Fernerkundungsdaten zu erstellen.

OBJECTID	NAME	DATE	TIME	SENSOR	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	
1	99992 Bodensee GN	02.01.2018	10:09:08	SENT3	0,284296634	0,280702814	0,197329907	0,347020477	0,05103048	6	85,71428571	0,199590916	0,259901806	0,339407111	0,2464	377	0,0238454	0,022491339
2	99992 Bodensee ZE	02.01.2018	10:09:08	SENT3	0,232457458	0,226034164	0,197649583	0,311062872	0,02519084	18	100	0,207863997	0,21813902	0,24266613	0,2571	849	0,02004706	0,020008869
3	99992 Bodensee GN	02.01.2018	10:24:20	SENT2	0,16021389	0,15789989	0,049530447	0,524068496	0,05807231	6255	99,9680358	0,092259997	0,117497444	0,19241145	0,2354	353	0,04111149	0,041147273
4	99991 Bodensee UE	02.01.2018	10:24:20	SENT2	0,143119114	0,131740552	0,0272161685	0,59771204	0,06788787	17404	100	0,067043245	0,093186378	0,181343506	0,2321	534	0,024742918	0,024941241
5	99992 Bodensee ZE	02.01.2018	10:24:20	SENT2	0,1909998248	0,178440109	0,037496325	0,698451877	0,07972156	17350	100	0,100658432	0,133826699	0,232710842	0,2980	818	0,03110043	0,031526214
6	99994 Bodensee BR	15.01.2018	09:31:44	SENT3	0,198576082	0,11579251	0,333519727	0,451468772	0,03994121	70	100	0,146300659	0,168414272	0,427716796	0,4331	004	0,01284466	0,010822771
7	99994 Bodensee GN	17.01.2018	10:23:41	SENT3	0,170686745	0,162667482	0,029772429	0,461481482	0,059757449	5061	80,88540834	0,101418008	0,126647389	0,206809991	0,2491	106	0,090884424	0,089971127
8	99991 Bodensee UE	19.01.2018	09:28:03	SENT3	0,02063421	0,044725986	0,021929537	0,064648212	0,00537307	10	50	0,029921003	0,031547129	0,041151005	0,0448	899	0,02965666	0,027630317
9	99992 Bodensee GN	21.01.2018	10:16:37	SENT3	0,663266043	0,659371972	0,639802642	0,699946642	0,02122894	8	85,71428571	0,639807642	0,639807642	0,682223001	0,6998	517	0,04668214	0,045494981
10	99992 Bodensee ZE	21.01.2018	10:16:37	SENT3	0,334113072	0,337786615	0,215070143	0,410647919	0,04336859	21	100	0,288911486	0,303927496	0,358199897	0,3908	619	0,09701808	0,090640663
11	99994 Bodensee BR	28.01.2018	10:09:08	SENT3	0,592397778	0,58899039	0,541968524	0,626578212	0,02191058	19	100	0,562951009	0,580720162	0,614972997	0,6203	286	0,01000053	0,010000034
12	99993 Bodensee GN	31.01.2018	09:16:47	SENT3	0,199254823	0,194139868	0,178607285	0,238148734	0,02104165	6	85,71428571	0,178677654	0,181949824	0,209856502	0,2327	100	0,028875462	0,028760843
13	99991 Bodensee UE	31.01.2018	09:16:47	SENT3	0,132941885	0,139082029	0,070703156	0,190987036	0,02978708	21	100	0,093368915	0,109174916	0,15411326	0,1711	696	0,03097707	0,029931213
14	99992 Bodensee ZE	31.01.2018	09:16:47	SENT3	0,082052713	0,064306604	0,06242062	0,155963033	0,03555267	19	100	0,056301714	0,060785966	0,084551495	0,1511	176	0,043084077	0,045889065
15	99991 Bodensee UE	02.02.2018	10:20:24	SENT3	0,134896753	0,132357918	0,081040353	0,20387839	0,02740475	18	85,71428571	0,105669231	0,119303599	0,117793767	0,1771	169	0,021694169	0,018570415
16	99993 Bodensee GN	14.02.2018	10:31:25	SENT3	0,384047093	0,382865961	0,380037536	0,401725217	0,11486348	6255	99,9680358	0,235000078	0,303920989	0,463167711	0,5356	843	0,128615268	0,128025063
17	99992 Bodensee ZE	14.02.2018	10:31:25	SENT2	0,408142085	0,407130629	0,380004938	0,410774878	0,1261508	17350	100	0,244018483	0,32028866	0,494466607	0,5672	602	0,125774701	0,126654685
18	11527 Erlichee N	14.02.2018	10:31:25	SENT2	0,536627605	0,530652566	0,530853025	0,596608117	0,13637111	77	100	0,37583314	0,420314071	0,619396138	0,7302	683	0,041851335	0,041837811
19	11527 Erlichee S	14.02.2018	10:31:25	SENT2	0,475214512	0,479930222	0,238532543	0,722185088	0,10496193	77	100	0,334551454	0,398507243	0,548479521	0,607	675	0,043749966	0,042298196
20	11527 Erlichee W	14.02.2018	10:31:25	SENT2	0,157816354	0,156514692	0,128756061	0,674936235	0,11243197	78	100	0,194207921	0,264161266	0,440858749	0,486	845	0,047428008	0,047283685
21	9323 Rohrkeppelsee	14.02.2018	10:31:25	SENT2	0,156823388	0,126567721	0,044048323	0,617944717	0,08745802	3878	70,58609392	0,076988215	0,092160626	0,198906102	0,285	335	0,072124604	0,076219745
22	11527 Erlichee N	14.02.2018	10:30:18	SENT2	0,410884481	0,37156677	0,191771477	0,701439938	0,142808396	77	100	0,250617903	0,368454992	0,547184098	0,6094	838	0,011193086	0,100969806

Abbildung 10: Die Satelliten-Rohdaten müssen in umfangreichen Routinen und Workflows aufgearbeitet werden.

→ Statistik mag auf den ersten Blick recht trocken erscheinen, sie liefert jedoch in kompakter Form wichtige Informationen, beispielsweise um ein Gewässer einzuordnen. Tabellen sind hier eine geeignete Form der Darstellung. Ebenso interessant ist die zeitliche Entwicklung im Jahresverlauf, etwa wann es zu Algenblüten mit hohen Konzentrationen an Chlorophyll-a kommt. Für eine alltagstaugliche Bewertung von Seen ist es daher wichtig, dass den Fachleuten solche anschaulichen Darstellungen zur Verfügung stehen.

## 4 Wichtige Informationen I: Tabellen und Jahrgänge

### Übersichtliche Tabellen

Minimum, Maximum, Durchschnitt – das sind die wichtigsten statistischen Eckwerte, mit denen sich ein See im Jahresverlauf einordnen lässt. Wobei neben dem Durchschnitt, also dem Jahresmittelwert, noch der Jahresmedian angegeben wird. Das ist derjenige Wert, der in einer Zahlenreihe genau in der Mitte liegt. Im Gegensatz dazu wird beim Jahresmittelwert die Summe der betrachteten Zahlen – im konkreten Fall die Zahl der Satellitenüberflüge mit brauchbaren Messwerten – durch ihre Anzahl geteilt.

Zwei Beispiele aus dem Jahr 2020 sollen die Bandbreite der Fernerkundungsdaten verdeutlichen. So konnten für die Messstelle in Seemitte des Bodensees, also zwischen Fischbach und Uttwil, bis zu 151 Werte bei den Parametern Sichttiefe und Blaualgenindikator mit einbezogen werden. Bei Chlorophyll-a waren es 112 Werte und bei der Tempe-

*Tabelle 1: Aus der Fernerkundung ermittelte Messwerte für den Bodensee (Probestelle Seemitte zwischen Fischbach und Uttwil) sowie für den Schreckensee*

	Chlorophyll-a µg/l	Sichttiefe m	Blaualgen HAB	Temperatur °C
<b>Bodensee</b>				
Fischbach-Uttwil				
Jahresmittel	2,7	4,5	1,9	15,4
Jahresmedian	2,6	4	2	16,9
Jahresminimum	0,1	0,1	1	7,7
Jahresmaximum	18,6	21,5	4	19,9
Anzahl der Werte	112	151	151	4
<b>Schreckensee</b>				
Jahresmittel	13	2,6	1,9	14,6
Jahresmedian	6,9	1,9	2	17,1
Jahresminimum	0	0,2	1	6
Jahresmaximum	105,9	7,8	4	20,7
Anzahl der Werte	30	30	30	5

ratur nur vier Daten. Dies liegt daran, dass nur der Landsat-Satellit die Oberflächentemperatur misst, dieser den See aber seltener überfliegt als die Sentinel-Satelliten. Beim kleineren Schreckensee dagegen gingen nur 30 Überflüge in die Statistik von Chlorophyll-a, Sichttiefe und Blaualgenindikator ein, da hier nur die Sentinel-2-Satelliten mit ihrer hohen räumlichen Auflösung Daten liefern. Bei der Oberflächentemperatur waren es fünf Werte. Die Zahlen zeigen, dass es im Schreckensee zu massiven Algenblüten mit hohen Chlorophyll-a-Werten und der großen Gefahr von Blaualgenblüten – also HAB-Klasse 4 entsprechend „sehr wahrscheinlich“ – kommen kann.

### Aufschlussreiche Jahrgänge

Nicht nur die statistischen Eckwerte eines gesamten Jahres liefern wichtige Informationen über den Zustand eines Sees, sondern auch die zeitlichen Verläufe der verschiedenen Parameter. Exemplarisch hierfür steht das Messareal Fischbach-Uttwil in Seemitte des Bodensees. In dieser Grafik sind die Messwerte von drei Satelliten dokumentiert: Von Sentinel 2 und 3 (S2, S3) sowie von Landsat 8 (LS8). Die mit eingezeichneten Balken verdeutlichen die minimalen und maximalen Werte der jeweiligen Messungen. Im Winter liefern die Satelliten wegen des flachen Einstrahlwinkels der Sonne keine verlässlichen Werte.

Der Jahresverlauf der Sichttiefe zeigt deutlich ein sogenanntes Klarwasserstadium im Frühjahr von etwa Mitte März bis Mitte April. In dieser Zeit entwickelt sich das Zooplankton so stark, dass ein Großteil des pflanzlichen Planktons weggefressen wird und damit die Sichttiefe erheblich größer ist als im Sommerhalbjahr, wo sie durchweg unter fünf Meter liegt. Im Herbst wiederum steigen die Sichttiefen erneut an. Am Bodensee korrelieren hohe Sichttiefen mit geringeren Chlorophyll-a-Werten.





Abbildung 11: Der Bodensee. Foto: Wolf



Abbildung 12: Der Schreckensee in Oberschwaben. Foto: Pixabay

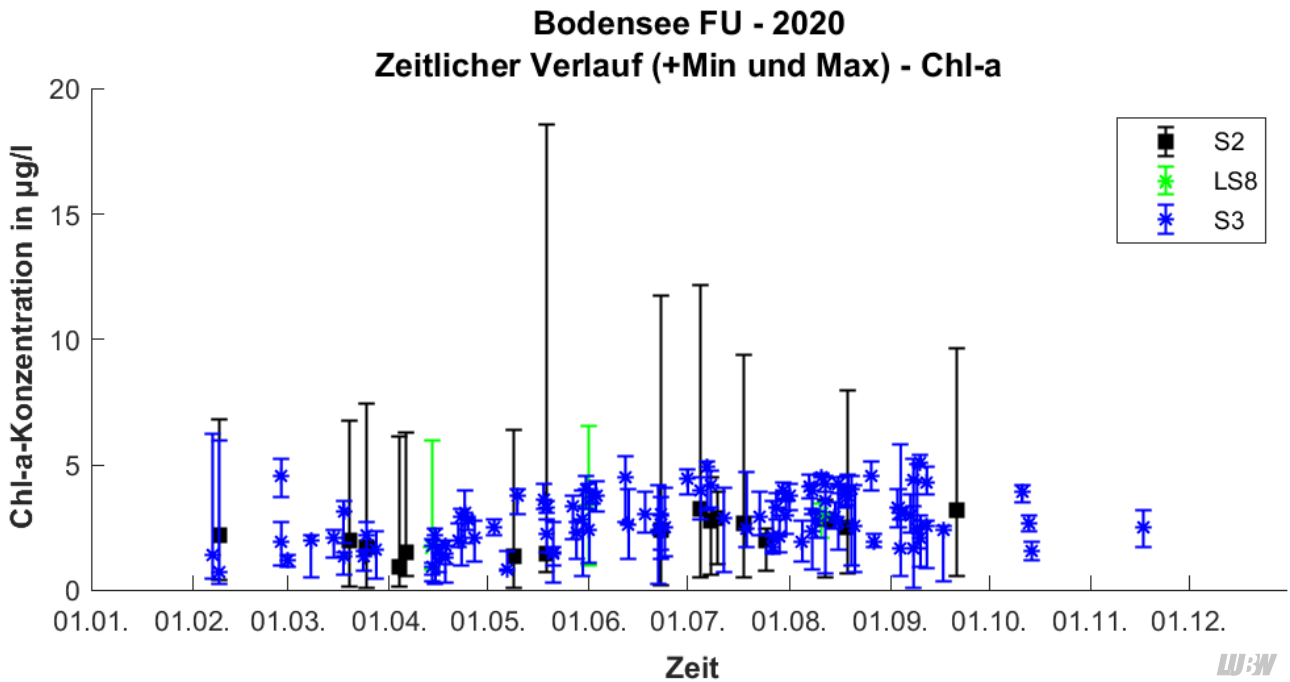


Abbildung 13: Der Verlauf der Chlorophyll-a-Werte im Bodensee in Seemitte zwischen Fischbach und Uttwil im Jahr 2020. Die Balken zeigen die Minimal- und Maximalwerte, die farbigen Punkte die jeweiligen Satelliten Sentinel 2 und 3 sowie Landsat 8. Quelle: ISF

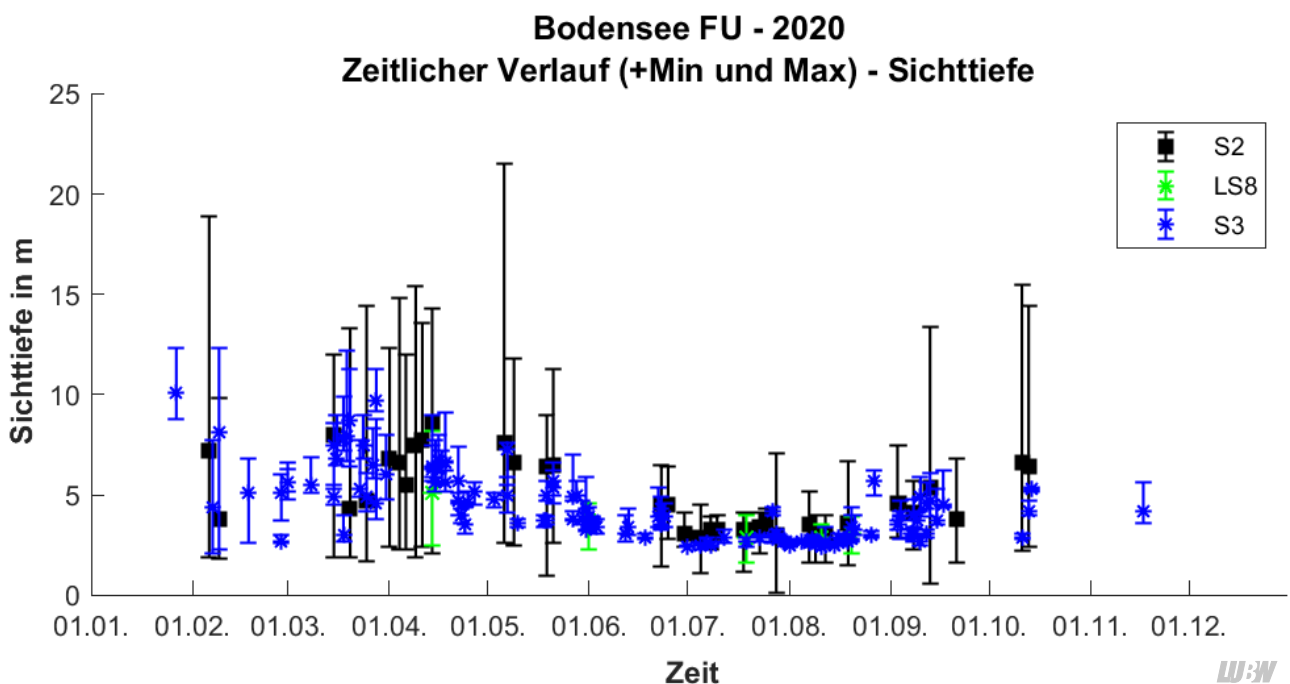


Abbildung 14: Der Verlauf der Sichttiefe im Bodensee in Seemitte. Quelle: ISF

→ Mit einer einmaligen Probe ist bei einem Stehgewässer nicht viel erreicht: Je länger man einen See beprobt, desto besser kennt man ihn. Erst in der Zusammenschau mehrerer Jahre wird deutlich, wie er sich entwickelt. Dann zeigen sich Trends und mögliche Gefahren – oder Erfolge, wenn Sanierungsmaßnahmen ergriffen wurden. Fernerkundungsdaten können dabei eine wertvolle Hilfe sein, auch weil sie in größeren Seen wichtige Unterschiede zwischen einzelnen Seeteilen aufzeigen können.

## 5 Wichtige Informationen II: Zeitreihen und räumliche Verteilung

### Langzeitbetrachtung zeigt Trends auf

Wenn man monatliche Messdaten in einer Grafik aneinanderreihet, ergibt sich eine mehr oder weniger übersichtliche Kurve der Messwerte. Dabei kann man die Daten mehrerer Jahre zusammenstellen, was die Übersichtlichkeit nicht unbedingt erhöht. Es gibt aber auch die Möglichkeit, beispielsweise monatliche Mittel- oder Medianwerte in kleinen, unterschiedlich gefärbten Kästchen darzustellen, also in einer Heatmap. Diese „Hitzekarte“ macht wie das Wärmebild einer Hausfassade auf einen Blick markante Werte sichtbar.

Am Beispiel des Federsees (siehe Abbildung 15) wird deutlich, dass es in den betrachteten Jahren 2018 bis 2020 regelmäßig im Frühjahr und Herbst zu erhöhten Trübungswerten kam, während das Wasser im Frühsommer klarer war. Diese Heatmaps werden nicht nur in monatlichen Zeiträumen erstellt, sondern auch für kürzere Zeitintervalle. So lassen sich bei häufigen Überfliegungen in zeitlich engen

Beobachtungsintervallen die Geschehnisse insbesondere bei der Algenentwicklung in einem Gewässer gut verfolgen. Damit bietet diese Darstellungsform einen kompakten Überblick, um kurz- wie auch langfristig die Gewässerdynamik anschaulich zu beschreiben.

### Räumliche und zeitliche Variationen

Je größer ein See ist, desto stärker unterscheiden sich die einzelnen Seeteile voneinander – vor allem, wenn das Gewässer wie der Bodensee in drei verschiedene Bereiche aufgeteilt ist: den großen Obersee, den fjordartigen Überlinger See und den vergleichsweise flachen Untersee. Hinzu kommen Strömungen im See, die im Falle des Bodensees vor allem durch den Einfluss des Windes bestimmt werden, aber auch durch interne Wellen, die sogenannten Seiches. Aber natürlich können auch unterschiedliche Nährstoffgehalte etwa in den Buchten zu lokal stärkeren Algenentwicklungen führen. Dementsprechend können zu einem bestimmten Zeitpunkt unterschiedliche Messwerte

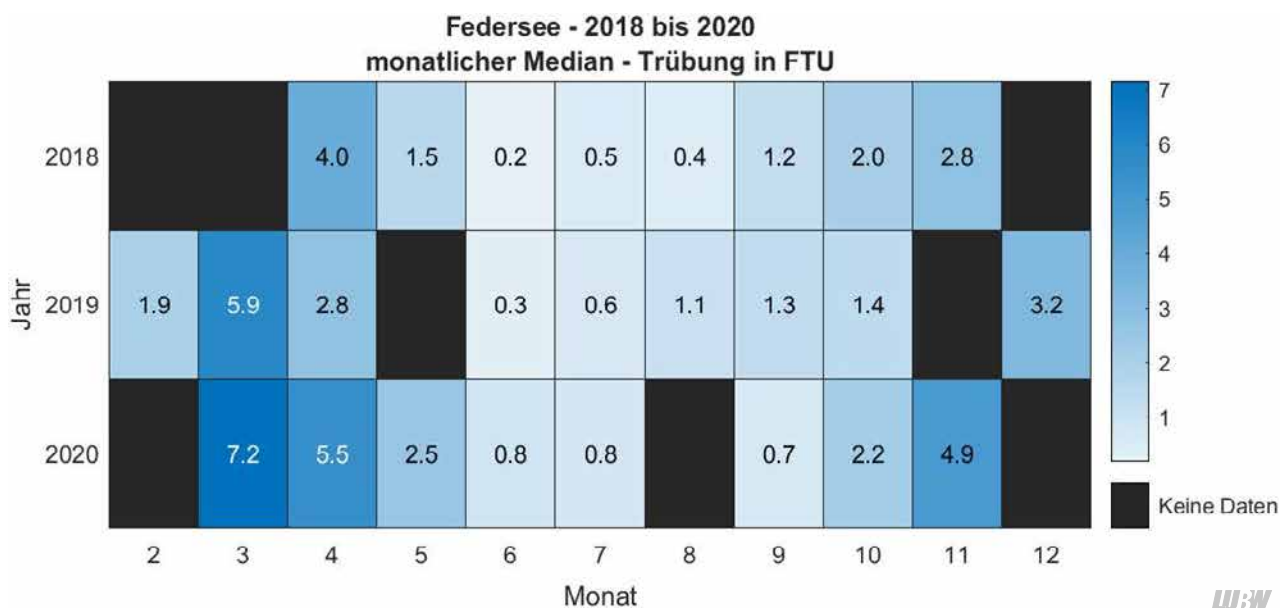


Abbildung 15: Heatmap der Trübung (in Formazin-Trübungseinheiten FTU) im Federsee in den Jahren 2018 bis 2020. Quelle: ISF



Abbildung 16: Der Federsee in Oberschwaben. Foto: Zintz

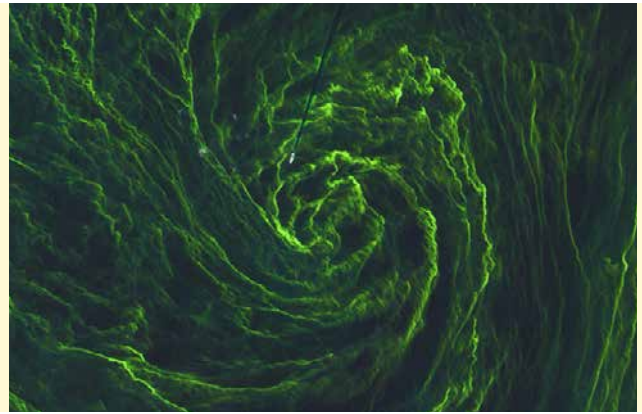


Abbildung 17: Sentinel-2 kann Algenblüten wie hier in der Ostsee erkennen. Ähnliche Muster gibt es auch in Seen. Foto: ESA

in den verschiedenen Seeteilen und großen Buchten auftreten, beispielsweise für Chlorophyll-a.

Die Fernerkundung eignet sich besonders gut dazu, solche räumlichen Variationen zu entdecken, weil sie zu einem gegebenen Zeitpunkt die Entwicklung im gesamten See großflächig wiedergibt. Hinzu kommt, dass die unterschiedliche horizontale Verteilung auch noch im Jahresverlauf

schwanken kann. Dies zeigt anschaulich die Verteilung der Chlorophyll-a-Konzentration im Bodensee im März, Juli und September 2020. Insbesondere im Juli ergeben sich interessante Verteilungsmuster der Chlorophyll-a-Werte, die mit der unterschiedlichen Algenproduktion in den einzelnen Seeteilen korrespondieren. Dies zeigt sich auch in der entsprechenden räumlichen Variabilität des Blaualgenindicators HAB, wobei die HAB-Klasse 4 (rot) erreicht wird, die „sehr wahrscheinlich“ eine Blaualgenblüte anzeigt.

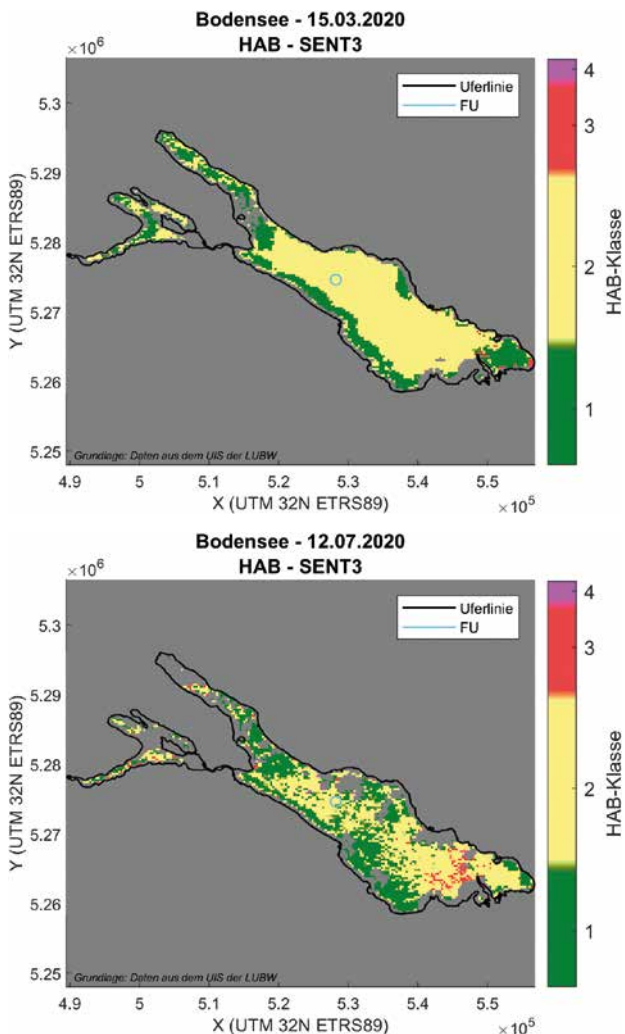


Abbildung 18: Die Verteilung von Blaualgen (HAB-Indikator mit den Gefährdungsklassen 1 bis 4) am Bodensee bei verschiedenen Überflügen von Sentinel-3 im Jahr 2020. Quelle: ISF

### Aufschlussreiche Videosequenzen

Besonders augenfällig wird die Entwicklung in einem See, wenn die zu den verschiedenen Zeitpunkten ermittelten Messdaten nicht nur in einzelnen Grafiken dargestellt werden, sondern in einer Videosequenz aneinander gereiht werden. Dies ist allerdings sehr aufwendig. Sehr aufschlussreich können zudem fotografische Abbildungen aus dem All sein, beispielsweise wenn sie großflächige Algenblüten zeigen. Dann lassen sich teilweise sehr interessante Muster erkennen, und zwar nicht nur im Meer, sondern auch in größeren Seen.



→ Die Satellitentechnik und die Digitalisierung bieten auch im Gewässerschutz ganz neue Möglichkeiten, um Seen zu bewerten und zu überwachen. Doch dies funktioniert nur, wenn man auch die Grenzen dieser neuen Methoden kennt und respektiert. So gibt es etwa wetterbedingte Einschränkungen und Fehlerquellen, die sich allerdings zumindest teilweise korrigieren lassen. Zudem dauert es derzeit noch einige Wochen oder gar Monate, bis die Satellitendaten in auswertbarer Form vorliegen. Doch es wird daran gearbeitet, zeitkritische Daten etwa zu Blaualgenblüten dank automatisierter Auswertung schnell zur Verfügung zu stellen.

## 6 Möglichkeiten und Grenzen der Fernerkundung

### Die Grenzen ausloten

Wenn ein Erdbeobachtungssatellit einen See bei schönem Wetter im Sommer überfliegt, dann kann er hervorragende Daten von diesem Gewässer liefern. Im Winter dagegen sieht es wegen des flach einfallenden Sonnenlichtes schlecht aus. Und auch sonst können Wolken, Dunst und spezielle Effekte etwa an Übergangslinien wie dem Ufer die Messergebnisse mehr oder weniger stark beeinträchtigen.

Derzeit werden bei der Fernüberwachung von Gewässern vor allem optische Sensoren eingesetzt, die ein weites Lichtspektrum auswerten. Es gibt aber auch Sensoren, die mit Radarwellen arbeiten oder neuartige „Messaugen“, die sogenannten Hyperspektralsensoren. Sie können wertvolle Informationen für das Monitoring von Gewässern und ihrem Umfeld liefern.

Doch auch mit den aktuellen Messwerten lässt sich viel erreichen, wenn das Qualitätsmanagement gut ist und die Datenverarbeitung an die individuellen Verhältnisse eines Gewässers wie etwa seine Wasserfärbung angepasst wird. Unerlässlich dabei ist es, die Fehler und Unsicherheiten bei der „Übersetzung“ der Messsignale in die daraus abgeleiteten Gewässerparameter qualitativ und quantitativ zu bewerten. Daher geben die Fachleute für Fernerkundungsdaten stets Unsicherheits- und Fehlermaße für die abgeleiteten Gewässerqualitätsparameter an. Dabei werden für jeden Überflug, jeden Parameter und jeden Bildpunkt (Pixel) sowohl die spezifischen Verhältnisse etwa im Hinblick auf Wolkenbedeckung berücksichtigt als auch ein sogenanntes Gesamtunsicherheitsmaß berechnet – englisch Quality Assessment Value, QAV. So lässt sich ermitteln, wie „robust“ die aus den Messdaten abgeleiteten Informationen über die

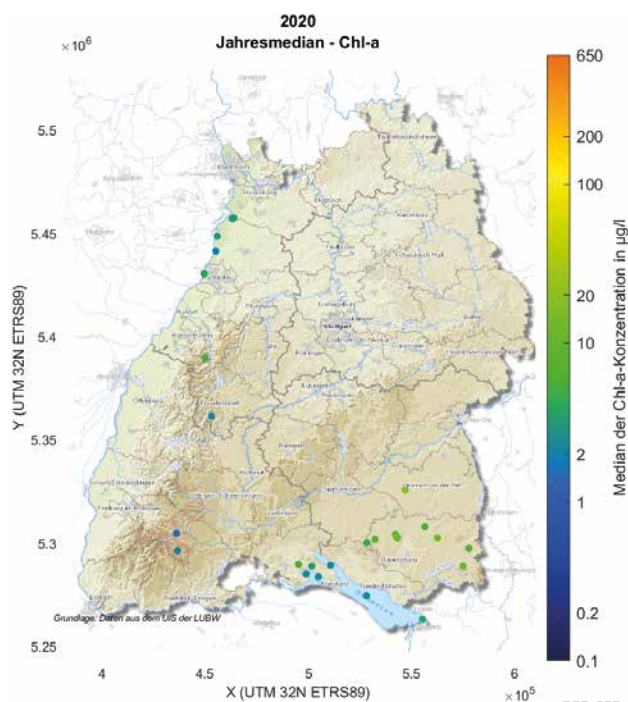


Abbildung 19: Überblick über die Chlorophyll-a-Gehalte in 21 baden-württembergischen Seen. Quelle: ISF

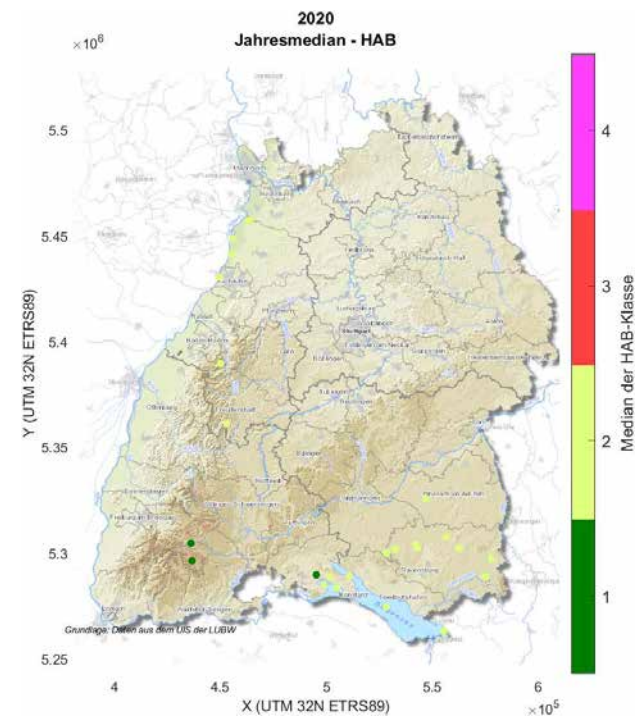


Abbildung 20: Überblick über das Risiko für eine Blaualgenblüte (HAB-Indikator) in 21 Seen des Landes. Quelle: ISF





Abbildung 21: Badende am Bodensee. Foto: Zintz



Abbildung 22: Solche Algenmatten verderben garantiert die Badelust. Foto: ISF



Gewässer sind. Falls erforderlich können dann im Rahmen des Qualitätsmanagements einzelne Parameter oder ganze Überflüge aus dem Datensatz herausgefiltert werden, wenn sie zu stark mit Unsicherheiten behaftet sind.

### **Noch Zukunftsmusik: Die schnelle Risikowarnung**

Derzeit dauert es etwa ein Vierteljahr, bis die von den Satelliten gelieferten Messdaten so weiterverarbeitet sind, dass sie alltagstauglich in das Gewässermonitoring einfließen können. Dies reicht für den vorsorgenden Gewässerschutz in der praktischen Wasserwirtschaft in der Regel aus. Hier kommt es bei der langfristigen Überwachung und den meist jährlich zu erstellenden Berichten nicht auf eine rasche Datenlieferung an. Wenn es aber um Entwicklungen geht, die wie beispielsweise Blaualgenblüten mit Risiken verbunden sind, dann sieht es anders aus: In solchen Fällen wäre eine möglichst schnelle, am besten sogar aktuelle Online-Verarbeitung und Auswertung der Daten äußerst wünschenswert, um zeitnah reagieren zu können. So kann man gegebenenfalls vertiefte Untersuchungen im See selbst veranlassen, bevor Badeverbote ausgesprochen werden.

Bereits heute lassen sich die Reaktionszeiten mit sogenannten Online-Prozessierungssystemen für Satellitendaten verkürzen. Dabei werden die vorverarbeiteten Daten der Satelliten online zur Verfügung gestellt. Doch die im Rahmen des Pilotprojekts SAMOSEE-BW etablierten Verarbeitungsroutinen mit der Entwicklungsumgebung MATLAB sowie weiteren rechnergestützten Verarbeitungsprozessen erlauben derzeit noch kein Rund-um-die-Uhr-Überwachungsschema. Um ein solches Warnsystem mit sehr kurzen Reaktionszeiten zu verwirklichen, müssen die entsprechenden Voraussetzungen im Hinblick auf die

Datenprozessierung sowohl bei der Hardware als auch der Software erst noch entwickelt werden.

### **Überblick über das Geschehen im Land**

Die automatisierte Verarbeitung der Satellitendaten hat den großen Vorteil, dass sich mit ihr ein schneller Überblick über die Situation der Seen im Land gewinnen lässt. Dies ist vor allem für die Gehalte von Chlorophyll-a in den Stehgewässern interessant, weil sie ein wichtiger Indikator für deren Trophie, also ihren Nährstoffgehalt sind. Für das Jahr 2020 wurden diesbezüglich 21 Seen im Land erfasst und die Ergebnisse in eine Landkarte von Baden-Württemberg eingetragen, und zwar in Form farbiger Punkte. Daraus wird ersichtlich, dass die kleineren Seen im Voralpenland wie auch entlang des Rheins im Hinblick auf ihre Chlorophyllwerte im mittleren Bereich liegen. Richtig nährstoffarme Seen mit sehr niedrigem Chlorophyll-Gehalt finden sich dagegen im Schwarzwald. Auch der Bodensee weist vergleichsweise geringe Chlorophyllwerte auf.

Wichtige Informationen unter anderem über die Eignung als Badegewässer liefert die Risikoanalyse von Blaualgenblüten (HAB-Indikator). Die farbigen Punkte auf der HAB-Landkarte repräsentieren die Jahresmediane der vier HAB-Klassen „keine“, „unwahrscheinliche“, „wahrscheinliche“ und „sehr wahrscheinliche“ Blaualgenblüte. Wie die Übersicht zeigt, konnten 2020 nur drei Seen mit der HAB-Klasse 1 bewertet werden, es traten im Jahresmedian also „keine“ Blaualgenblüten auf. Andererseits wurden aber auch keine höher belasteten Seen der Klassen 3 und 4 ermittelt. Werden solche Daten regelmäßig erhoben, lassen sich landesweit mögliche Veränderungen auf den ersten Blick erkennen und analysieren. Dies ist wichtig, um auf gefährliche Entwicklungen reagieren zu können.

→ Die Fernerkundung aus dem Weltall ermöglicht ganz neue Wege zur Überwachung von Stehgewässern. Bei großen Seen wie dem Bodensee liefert sie für einige wesentliche Gewässerqualitätsparameter viel mehr Daten von der Seeoberfläche als die routinemäßigen Messungen im See selbst. Dies erlaubt weitaus detailliertere Einblicke in das seenkundliche Geschehen, und zwar sowohl in räumlicher als auch zeitlicher Hinsicht. Bei vielen kleinen Stehgewässern wiederum, die nicht regelmäßig überwacht werden können, wird so überhaupt erst eine Bewertung auf der Basis von Messwerten möglich.

## 7 Fazit und Ausblick

### Fernerkundung – ein wertvolles Werkzeug zur Überwachung

In Baden-Württemberg gibt es 28 Stehgewässer, die im Zuge der Wasserrahmenrichtlinie der EU regelmäßig überwacht werden müssen. Hinzu kommen 261 Stehgewässer, die zwischen zehn und 50 Hektar groß sind – und über die es oftmals nur recht wenige Daten gibt, die für ihre Bewertung herangezogen werden können. Hier können die Messdaten, die von den Sensoren der Landbeobachtungssatelliten im All erhoben werden, eine wertvolle Hilfe bei ihrer Überwachung sein. Wie das Projekt „Satellitendaten für das behördliche Monitoring von Chlorophyll und Trübung“ SAMOSEE-BW gezeigt hat, stellen die neuen Methoden der Fernerkundung zwei wesentliche Erweiterungen des bisherigen Untersuchungsspektrums dar.

So lassen sich zum einen bei großen Seen wie dem Bodensee in zeitlich deutlich kürzeren Abständen Daten gewinnen, weil die Satelliten wesentlich häufiger den See überfliegen als die aufwendigen Routinemessungen stattfinden können. Zudem liefern die Satelliten für weitaus mehr Messpunkte Informationen als dies mit den Vor-Ort-Messungen möglich ist. Die zeitliche wie auch räumliche Auflösung ist also deutlich höher. Zum anderen kann auch die Überwachung kleinerer Stehgewässer enorm von der Fernerkundung profitieren. Mit den Daten aus dem All wird für viele dieser Seen überhaupt erstmalig eine methodisch konsistente und landesweit synchrone Erfassung der Gewässerqualität möglich – die Fachleute sprechen von einem indikativen satellitenbasierten Gewässermonitoring.



Abbildung 23: Ein Bild vom Bodensee, aufgenommen mit Radarsensoren an Bord des Umweltsatelliten Sentinel-1. Wasserflächen haben bei Radarbildern die geringste Rückstrahlung, weshalb sie dunkel erscheinen. Die Vegetation ist grün dargestellt, Gebäude sind rosa. Quelle: ESA



Abbildung 24: Sentinel-2 erfasst auch Daten über die Nährstoffbelastung von Seen. Quelle: ESA



Abbildung 25: Landsat-8 liefert Informationen über den Zustand der Gewässer. Quelle: Nasa

Dies funktioniert, weil sich mit den Instrumenten an Bord der Satelliten einige Parameter erfassen lassen, die für die Bestimmung des aktuellen Gewässerzustandes essentiell sind: Chlorophyll-a, die Gefahr von gefährlichen Blaualgenblüten mit Hilfe von vier HAB-Klassen (HAB steht für Harmful Algal Bloom, gefährliche Algenblüte), die Sichttiefe sowie die Trübung und die Gelbstoffe. Auch die Oberflächentemperatur sowie die Eisbedeckung können aus dem All gemessen werden. So lässt sich in der Gesamtschau dieser seenkundlichen (limnologischen) Indikatorparameter eine satellitenbasierte Berechnung der Trophie, also des Gewässerzustandes vornehmen.

Aufgrund dieser ersten Bewertung können dann gegebenenfalls weitere limnologische Untersuchungen auf den Weg gebracht werden. Denn klar ist auch, dass ein satellitenbasiertes Gewässermonitoring die im See selbst vorgenommenen Untersuchungen nicht ersetzen kann – schon weil Messungen und Probenahmen in den verschiedenen Tiefenstufen eines Sees nur vor Ort möglich sind. Aber die Fernerkundung kann für viel mehr Stehgewässer als bisher wichtige Basisinformationen bereitstellen.

### Neue Möglichkeiten, neue Ziele

Bisher stehen die Daten aus der Fernerkundung erst mit einigem zeitlichen Abstand zur Verfügung. Wenn aufgrund der Messdaten vor bedenklichen Entwicklungen wie beispielsweise Blaualgen gewarnt werden soll, dann müssen die Datenverarbeitung und die Workflows so weiter entwickelt werden, dass sie automatisch und mit geringer Zeitverzögerung zur Verfügung stehen – und das am besten rund um die Uhr. Dies werden Themen der mittel- und langfristigen Weiterentwicklung der Fernerkundung für Binnengewässer sein.

Hilfreich könnten in Zukunft auch weitere Sensoren sein. Bereits heute gibt es radarbasierte Satellitensensoren, und auch neuartige optische Hyperspektralsensoren werden mittelfristig verfügbar sein. So strahlt im Sonnenlicht sowohl das Chlorophyll-a der grünen Blätter als auch der Phytoplanktonorganismen ein fluoreszierendes Licht ins Weltall zurück, das aber nur von speziellen Sensoren erfasst werden kann, die noch nicht im Routineeinsatz sind. Weiterhin könnten sich künftig die spektralen Eigenschaften der Gewässer vom All aus noch detaillierter untersuchen lassen. Dies eröffnet die Möglichkeit, einzelne funktionelle Algengruppen wie beispielsweise Kieselalgen optisch erkennen zu können.

Fernerkundungsdaten für den Gewässerschutz verfügbar zu machen, ist ebenfalls eine neue Herausforderung für die Expertinnen und Experten dieses noch jungen Arbeitsgebietes. Dabei müssen es nicht unbedingt immer Daten aus dem Weltall sein: Auch Drohnen können hochauflösend wichtige Informationen aus der Luft liefern, etwa bei Fragestellungen, welche die Ufer- und Flachwasserzonen von Seen betreffen, wie zum Beispiel die Kartierung von Wasserpflanzen-Beständen. Aber auch Fließgewässer könnten von der Fernerkundung mit Satelliten profitieren, beispielsweise bei der Analyse und Bewertung von Gewässerqualitätsparametern und der Temperatur oder perspektivisch der radarbasierten Erfassung von Informationen zu Gewässerrandstreifen.

Insgesamt zeigt das im Rahmen der Digitalisierungsstrategie des Landes durchgeführte Projekt SAMOSEE-BW deutlich auf, dass sich mit den noch jungen Arbeitsgebieten der Fernerkundung und Verarbeitung digitaler Messdaten interessante und ausbaufähige Innovationspotenziale zum aktuell bestehenden Umweltmonitoring erschließen lassen.

