

Satelliten-basierte Überwachung der Wasserqualität von Stand- und Fließgewässern in Deutschland

Beispiele, Schnittstellen und Wege zur behördlichen Integration (BIGFE)

Pia Laue, Werner Blohm (Hamburg), Susanne I. Schmidt, Tanja Schröder (Magdeburg), Rebecca D. Kutzner (Finsterwalde), Thomas Wolf (Langenargen), Désirée Dietrich, Kurt Friese, Karsten Rinke (Magdeburg)

Zusammenfassung

Das Copernicus-Programm der EU mit seinen Sentinel-Satelliten bietet eine kostengünstige und regelmäßige Überwachung von Wasserqualitätsparametern wie Chlorophyllgehalt, Trübung und Sichttiefe. Im Rahmen des BIGFE-Projekts wurde untersucht, wie diese Satellitendaten in das behördliche Gewässermonitoring integriert werden können. Die in diesem Beitrag gezeigten Anwendungsbeispiele wie Trophieklassifizierungen oder die Ergänzung von kontinuierlichen Messreihen vergleichen satelliten-basierte mit traditionellen Messmethoden nach den Vorgaben der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). Satellitendaten können vorhandene Messreihen sinnvoll ergänzen und eine hohe räumliche und zeitliche Abdeckung bieten, wie am Beispiel der Elbe gezeigt werden kann. Satellitendaten ermöglichen zudem eine kosteneffiziente und zeitlich-räumlich hoch abdeckende Überwachung des Gewässerzustandes wie der Trophie, auch für weniger häufig überwachte Gewässer und große Gebiete. Die Nutzung dieses Potenzials seitens der Wasserwirtschaft bedarf der Abstimmung und Umsetzung in die entsprechende behördliche Praxis.

Schlagwörter: Hydrologie, Wasserqualität, Binnengewässer, Seen, Talsperren, Satelliten, Fernerkundung, Monitoring, Elbe

DOI: 10.3243/kwe2025.02.001

Abstract

Satellite-based monitoring of water quality in Germany's lakes, ponds and watercourses
Examples, interfaces and pathways to official integration (BIGFE)

The EU Copernicus programme and its Sentinel satellites offer low-cost and regular monitoring of water quality parameters, such as chlorophyll content, turbidity and visible depth. A BIGFE research project analysed how this satellite data can be integrated into official water body monitoring. The sample uses included in this article, such as trophic classifications and supplementation of continuous measurement series, compare satellite-based methods with traditional measurement methods based on guidelines from the German Federal/State Working Group on Water Issues (LAWA). Satellite data can complement existing measurement series in a meaningful manner and provide a high level of spatial and temporal coverage, as can be seen from the example of the Elbe. Satellite data also enable monitoring of the water body's condition that is cost-efficient and comprehensive from a temporal and spatial perspective, such as trophic status, including for less frequently monitored water bodies and large areas. Coordination and implementation in official practice are needed for the water sector to leverage this potential.

Keywords: Hydrology, water quality, inland water bodies, lakes, dams, satellites, remote sensing, monitoring Elbe

1 Einleitung

Binnengewässer wie Talsperren, Seen und Flüsse sind wichtige Lebensräume und Ökosysteme und tragen maßgeblich zur Gesundheit und zum Wohlbefinden der Menschen bei. In Europa regelt die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) [1] die gesetzlichen Vorgaben für die Verbesserung der Wasserqualität, unter anderem durch regelmäßiges Monitoring. Beim traditionellen Monitoring von Binnengewässern werden Untersuchungen vor Ort durchgeführt und Wasserproben im Labor ausgewertet (In-situ). Diese Art des Gewässermonitorings erfordert einen er-

heblichen zeitlichen und personellen Einsatz. Satelliten-basierte Monitoringdaten haben das Potenzial, diese Messungen zeitlich und räumlich höher aufgelöst zu ergänzen.

Das vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) durch die Deutsche Raumfahrtagentur im DLR geförderte Projekt „BIGFE“ (Erfassung der Wasserqualität und Wasserflächenausdehnung von Binnengewässern durch Fernerkundung) verfolgt das Ziel, die Nutzung der Satellitendaten im Gewässermonitoring deutscher Landesumweltämter zu etablie-

ren. Im Fokus des Projekts stehen insbesondere die Seen und Talsperren in Deutschland. Die Methoden lassen sich auch auf größere Fließgewässer anwenden. Bisher nutzen nur wenige Landesumweltämter die Fernerkundung regelmäßig und operativ für ihre Arbeit.

In Friese et al. [2] wurde gezeigt, dass die Satellitenfernerkundung neue Möglichkeiten in der Überwachung der Gewässer durch Vervollständigung bzw. Verdichtung von In-situ-Messreihen und der Zustandsermittlung von Gewässern bietet. Messdaten optischer Sensoren der Satelliten Sentinel-2 und -3 des Copernicus-Programms bieten eine effiziente Möglichkeit, den Gewässerzustand bzw. dessen Veränderungen zu überwachen. Dies schließt auch die Überwachung bisher nicht in den Überwachungsprogrammen integrierter Gewässer und Gewässerabschnitte mit ein. Ein zentrales Element bei der Implementierung der Satellitendaten in das behördliche Gewässermonitoring ist die Definition informativer und praxisorientierter Fernerkundungsprodukte, die für den behördlichen Bedarf aufbereitet sind.

Umfragen im Nutzerkreis des Projekts haben gezeigt, dass spezifisch ausgearbeitete Zeitreihen, Übersichtstabellen, Darstellungen zur Verteilungsform und Karten zu Gewässerdaten gut einsetzbare Formate im behördlichen Kontext sind (Umfrage-Ergebnisse unter https://www.ufz.de/export/data/496/278201_BIGFE_ErgebnisseUmfrage1.pdf). Wie diese Nutzungen konkret in Landesumweltämtern aussehen könnten, sollen die folgenden Beispiele in diesem Beitrag verdeutlichen. Es werden Beispiele der Trophieklassifizierung und die Ergänzung von kontinuierlichen Messreihen durch Fernerkundungsdaten dargestellt. Im Anschluss werden verschiedene Implementierungsoptionen zwischen der Satellitenfernerkundung und den Landesumweltämtern aufgezeigt, mittels derer die Beispiele in die Praxis überführt werden können.

2 Beispiele für die Nutzung von Satellitendaten im behördlichen Gewässermonitoring

2.1 Trophieklassifizierung

Die Klassifizierung der Trophie von natürlichen Seen, Talsperren und Baggerseen wird nach den Richtlinien der LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser) durchgeführt. Der Trophie-Index der LAWA basiert auf den Saisonmittelwerten der Parameter Chlorophyll-a (Chl-a), Sichttiefe und Phosphor [3] (nachfolgend als LAWA-Trophie bezeichnet). Hierbei werden über eine Vegetationsperiode mindestens vier Proben entnommen, im Labor untersucht und bewertet. Der Chl-a-Index

wird für alle Seentypen einheitlich gewichtet und berechnet (Gleichung 1). Die Gewichtung der anderen Parameter (Sichttiefe und Phosphor) ist nicht einheitlich und richtet sich nach dem jeweiligen hydromorphologischen Seentyp. In der Regel und für viele Gewässertypen gehen höhere Phosphatkonzentrationen mit höheren Chl-a-Jahresmittelwerten einher. Die entsprechenden Algenentwicklungen sorgen dann für eine Reduktion der Sichttiefe. Da die drei Parameter meistens in direkter Abhängigkeit zueinander stehen, ist die Bewertung der Trophie auch allein auf der Basis von Chl-a in erster Näherung möglich. Insbesondere bei kleineren und/oder bislang nicht in Monitoringprogramme integrierten Gewässern bietet eine solche vereinfachte Bewertung die Möglichkeit, eine flächendeckende Übersicht über Trophieklassen und deren tendenzielle Entwicklungen zu schaffen.

Die optischen Satellitendaten aus den Sentinel-Missionen S2 und S3 des Copernicus-Programms ermöglichen die Erfassung von Chl-a, Sichttiefe und Trübung in Gewässern. Die Daten des Sentinel-3-OLCI-Instrumentes bieten zwar nahezu tägliche Überflüge, sind aufgrund der recht groben räumlichen Auflösung von 300 m aber nur für ausgewählte, sehr große Gewässer nutzbar. Die Sentinel-2-MSI-Satellitendaten ermöglichen hingegen die Auswertung von Chl-a, Sichttiefe und Trübung in Abständen von zwei bis fünf Tagen und mit einer räumlichen Auflösung von 10–60 m [4], wodurch dieser Satellit für alle WRRL-relevanten Gewässer (das heißt > 50 ha) gut einsetzbar ist. Erläuterungen zur Anwendung der Satellitendaten und eine deutschlandweite Validierung zur Eignung der Satellitendaten für das Gewässermonitoring sind in [5] und [6] nachzulesen.

Das praktische Beispiel der Trophieklassifizierung mittels der Sentinel-2-Satellitendaten auf Basis von Chl-a-Werten sowie im Vergleich zur LAWA-Trophie wird hier demonstriert und soll potenzielle, unterstützende Anwendungen der Satellitendaten in den Landesumweltämtern aufzeigen.

2.1.1 Methodik zur Berechnung des Trophie-Index mit Satellitendaten und In-situ-Chl-a-Daten

Zur Berechnung des Trophie-Index wurden Sentinel-2-Chl-a-Daten von deutschlandweit 109 Gewässern aus den Jahren 2016 bis 2020 genutzt. Die Prozessierung der Daten wird im Beitrag von Friese et al. [2] zusammengefasst.

Vor der Berechnung der Trophie-Indices wurden aus allen verfügbaren Satelliten- sowie In-situ-Chl-a-Daten Saisonmittelwerte (April bis Oktober) berechnet, um den Vorgaben der LAWA-Trophie-Berechnung gerecht zu werden. Dieser Zeit-

Obere Klassengrenze Chl-a-Saisonmittelwert [$\mu\text{g/L}$]	Trophie-Index	Trophieklasse	Symbol
3,0	1,5	oligotroph	o
9,6	2,5	mesotroph	m
31	3,5	eutroph	e
100	4,5	polytroph	p
> 100	> 4,5	hypertroph	h

Tabelle 1: Vereinfachte Trophie-Klassengrenzen für Chl-a, angelehnt an die Vorgaben der LAWA [3].

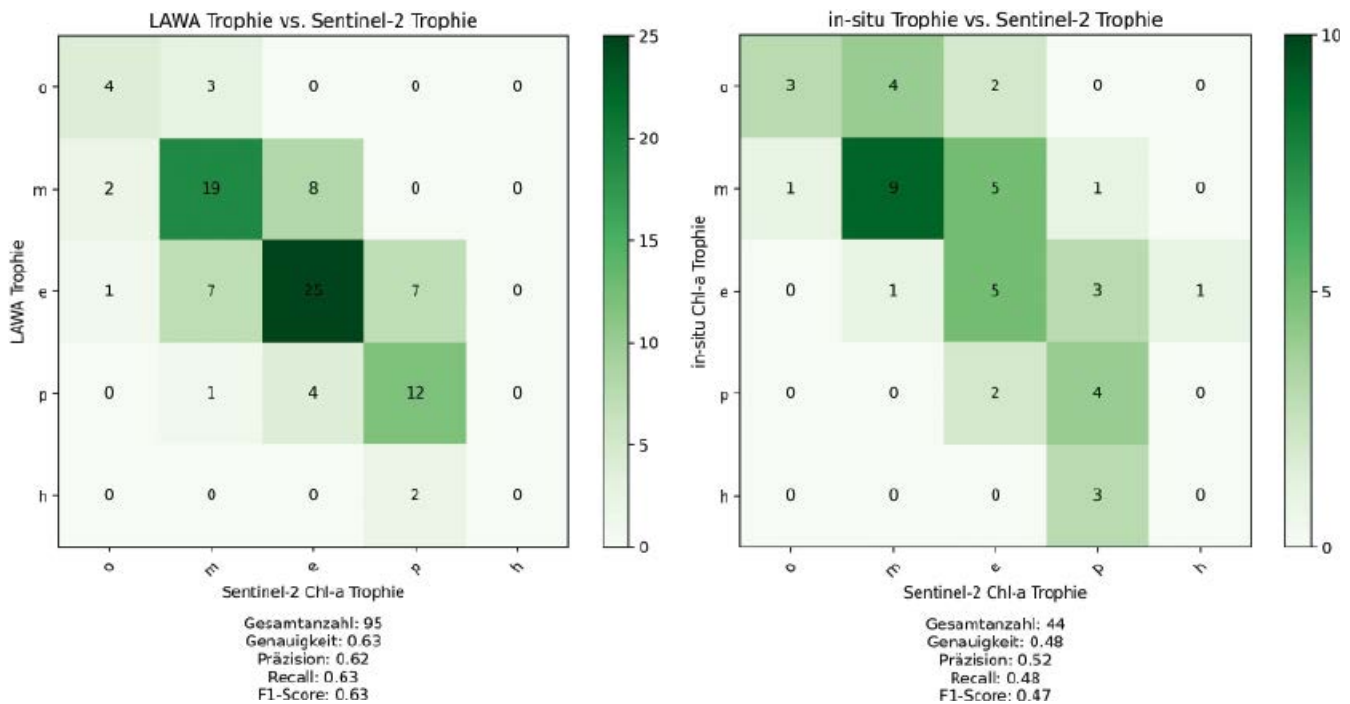


Abb. 1: Konfusionsmatrizen der LAWA-Trophie (links) und der Trophie aus Chl-a-Saisonmittelwerten von In-situ-Messungen (rechts) im Vergleich zur Trophie berechnet aus den Chl-a-Saisonmittelwerten des Sentinel-2 Satelliten

raum deckt die Vegetationsphase in den meisten Seen ab und entspricht dem Vorgehen in der LAWA-basierten Klassifikation. Der Saisonmittelwert wurde für die gesamte Fläche des Sees aus den Satellitendaten berechnet, im Gegensatz zu den Punktmessungen der In-situ-Messverfahren.

Die Chl-a-Konzentration wird in dieser Berechnung der Trophie als einzige Messgröße verwendet und der Trophie-Index mit Gleichung 1 berechnet [3]:

$$\text{Chl-a} - \text{Trophie} - \text{Index} = 0,856 \times \ln(\text{Chl-a Saisonmittelwert}) + 0,56$$

Der jeweils jährliche Chl-a-Saisonmittelwert der Seen wird in Gleichung 1 eingefügt und so der satelliten-basierte Trophie-Index berechnet (Tabelle 1). Im Anschluss erfolgt die Zuordnung des Chl-a-Trophie-Index in die Trophieklassen. Zum vereinfachten Vergleich wurden fünf Trophieklassen (oligotroph, mesotroph, eutroph, polytroph, hypertroph, siehe auch Tabelle 1) verwendet.

Für den Vergleich der beiden Trophie-Indices (LAWA und satelliten-basiert) wurden Konfusionsmatrizen verwendet. Konfusionsmatrizen sind ein Analysetool zur Beurteilung der Leistung eines Klassifikationsmodells und geben an, wie gut ein Klassifikationsmodell seine Vorhersagen im Vergleich zu den Referenzwerten getroffen hat. Die Matrizen zeigen, wie oft die beiden Klassifikationen übereinstimmen (diagonale Werte) und wie oft und in welchem Bereich sie abweichen.

2.1.2 Ergebnisse des Trophievergleichs ermittelt nach LAWA und mit Satellitendaten

Den Vergleich zwischen der LAWA- und satelliten-basierten (Sentinel-2) Trophieklassifizierung zeigt Abbildung 1 (links). Die Satelliten-Daten repräsentieren die Klassifizierungsergeb-

nisse für 95 Gewässer mit den Chl-a-Saisonmittelwerten aus 2020, bei denen sowohl die LAWA-Trophie (berechnet aus Chl-a, Sichttiefe und Phosphor) als auch Sentinel-2-Daten vorlagen. Gute Übereinstimmungen bei der trophischen Klassifizierung, basierend auf Satellitendaten, wurden für Gewässer mit mittleren bis hohen Nährstoffgehalten festgestellt. Im Gegensatz dazu zeigte sich bei nährstoffarmen (oligotrophen) Gewässern eine tendenzielle Überschätzung der trophischen Einstufung durch Satellitendaten. In Abbildung 1 (rechts) wird die Trophieklassifizierung von 44 Gewässern, basierend auf In-situ-Chl-a-Messungen (y-Achse), mit der satelliten-basierten Trophieklassifizierung dargestellt.

Im Vergleich zum LAWA-basierten Ansatz (Abbildung 1, links) sind hier bei nährstoffreichen wie nährstoffarmen Seen weniger präzise Ergebnisse zu finden. Bei meso- und polytrophen Seen zeigen sich in Einzelfällen Abweichungen von bis zu zwei Trophieklassen. Trotzdem ist in beiden Ansätzen die überwiegende Mehrheit der Gewässer korrekt durch die satelliten-basierten Chl-a-Werte klassifiziert. Die systematischen Überschätzungen bei nährstoffärmeren Seen durch den satelliten-basierten Ansatz deuten auf eine ungenaue Detektion von sehr niedrigen Chl-a-Konzentrationen oder eine nicht ausreichende Repräsentativität der In-situ-Daten für den See hin. Die Gesamtzahl der für den Vergleich herangezogenen Seen ist durch die Verfügbarkeit der Satelliten- und In-situ-Daten limitiert.

2.1.3 Vorteile der Trophieklassifizierung mit Satellitendaten

Die aus den Chl-a-Saisonmittelwerten des Sentinel-2-Satelliten abgeleiteten Trophieklassifizierungen bieten eine vielversprechende Methode in der ökologischen Gewässerbewertung. Diese Methode ist kostengünstig und erlaubt eine großflächige Überwachung von Gewässern. Außerdem bietet sie die Mög-

Anmerkung: Kennung des Datensatzes: S2B_MSIL1C_20200509T102559_N0500_R108_T32UNE_20230503T040402

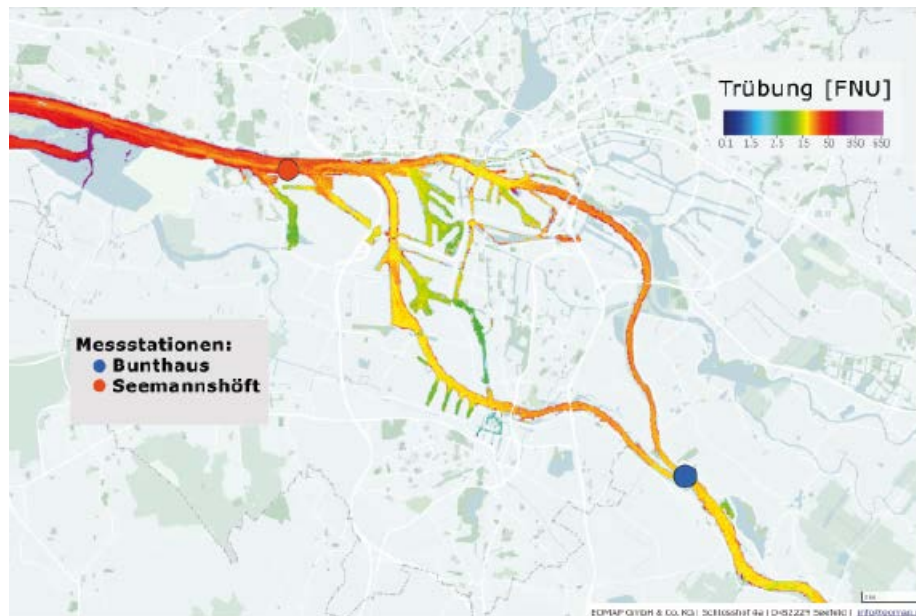


Abb. 2: Verteilung der aus den Satellitendaten berechneten Trübung im Hamburger Hafen am 9. Mai 2020 der Fa. EOMAP mit Lage der Messstationen Bunthaus und Seemannshöft

lichkeit, Veränderungen im trophischen Zustand von Gewässern zeitnah zu identifizieren und Probenahmen und Bewirtschaftungsmaßnahmen effektiv zu steuern oder die Wirksamkeit von Maßnahmen zu bewerten. Auch intra-annuelle, das heißt saisonale Dynamiken können abgebildet werden.

Die Weiterentwicklung und Validierung der Trophieklassifizierung mit Satellitendaten könnte dazu beitragen, die Gewässerüberwachung in Zukunft preiswerter und durch die bessere räumliche und zeitliche Abdeckung umfassender zu gestalten. Möglichkeiten der Weiterentwicklungen sind das Einbeziehen der Satellitendaten für den Parameter Sichttiefe in den Trophie-Index und eine Regressionsanalyse für eine neue Berechnungsformel des Index, speziell für Chl-a und Sichttiefe, aus Satellitendaten. In dieser Studie wurden Daten der Fernerkundung in eine Gleichung eingesetzt, die für In-situ-Daten empirisch entwickelt wurde. Bereits mit diesem Verfahren zeigt die Berechnung der Trophie das Potenzial für die Anwendung von Satellitendaten für Landesumweltämter auf.

2.2 Ergänzung von kontinuierlichen Messreihen durch Fernerkundungsdaten am Beispiel der Messstationen Bunthaus und Seemannshöft an der Elbe in Hamburg

Die Stadt Hamburg betreibt zwei Messstationen (Bunthaus und Seemannshöft) an der tidebeeinflussten Elbe, die mit kontinuierlich messenden Systemen für die Trübung und Chlorophyllkonzentration ausgerüstet sind. Die Trübungsmessung erfolgt gemäß der DIN EN ISO 7027 mittels nephelometrischer Streulichtmessung. Bei der In-situ-Messung der Chlorophyllkonzentration in den Messstationen kommt ein fluorometrisches Verfahren zum Einsatz (Abbildungen 3 und 6). Im bbe-Algentoximeter werden unter anderem aus der Fluoreszenzantwort einer Probe bei fünf verschiedenen Wellenlängen die Gesamt-Chlorophyllkonzentration und die Anteile von vier Algenklassen spektrophotometrisch berechnet.

Die Messstation Bunthaus (Elbe km 610) liegt östlich des Hafens in der Norderelbe, kurz nach der Abzweigung der Süderelbe, und die Messstation Seemannshöft (Elbe km 629)

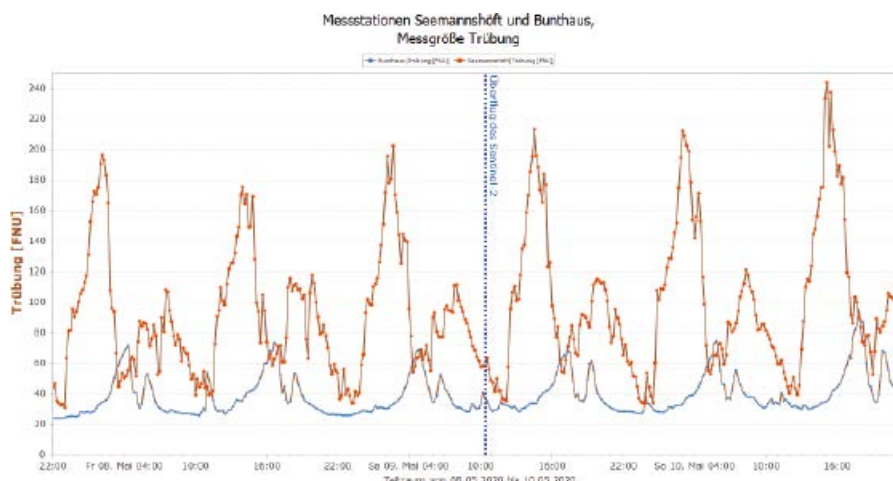


Abb. 3: In-situ-Messwerte der beiden Messstationen Seemannshöft und Bunthaus des Wassergütemessnetzes zur Trübung über drei Tage (8. bis 10. Mai 2020)

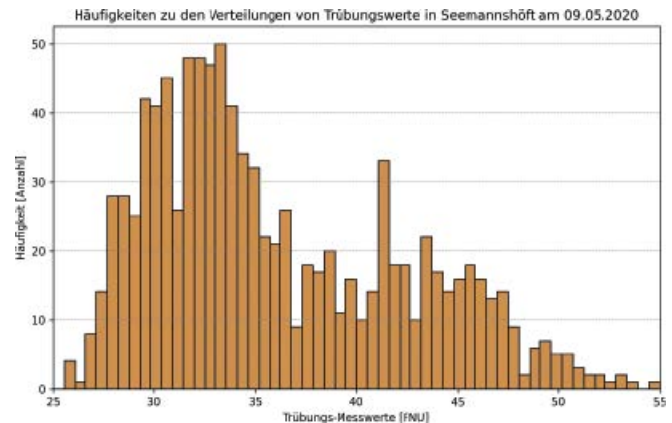
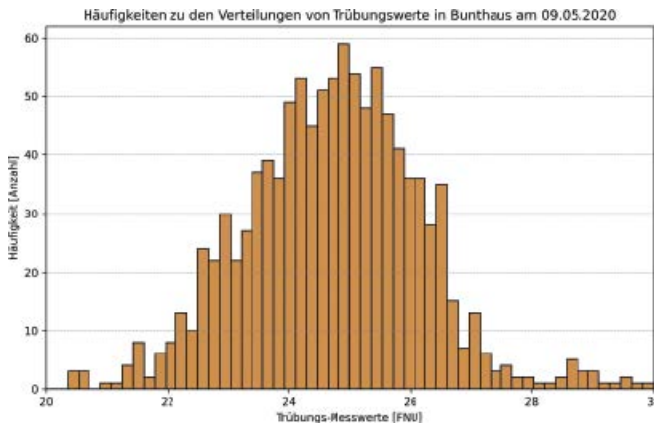


Abb. 4: Häufigkeiten der Messwerte der Satellitendaten von Trübung in den frei gewählten Flächen vor den Messstationen (siehe Abbildung 2) am 9. Mai 2020

liegt im westlichen Hafen am Südufer, nachdem Süder- und Norderelbe wieder vereint sind. Dazwischen liegt der größte Teil des Hamburger Hafens mit sehr vielen Hafenbecken (Abbildung 2 und 5). In diesem Abschnitt werden die Sentinel-2-Satellitendaten genutzt, um die Chl-a-Konzentrationen sowie die Trübung mit den kontinuierlichen In-situ-Messungen in Hamburg an der Elbe zu ergänzen.

Während die Sentinel-2-Satelliten bei guten Witterungsbedingungen (wenig bis keine Wolken über den Wasserflächen) in Abständen von zwei bis fünf Tagen eine flächendeckende Information zu Chlorophyll und Trübung liefern (das heißt eine Momentaufnahme), zeigen die In-situ-Messungen an den Messstationen kontinuierliche Messwerte über die Zeit an einem Ort an (das heißt eine ortsbezogene Zeitreihe). Die Verfahren ergänzen sich gut, und eine Kombination der Informationen bietet sowohl räumlich als auch zeitlich eine hohe Beobachtungsdichte. Mithilfe dieser Informationen können dann verschiedene Erkenntnisse über die Situation der Algenentwicklung und die Schwebstoffverteilungen gewonnen werden.

Die Daten des Sentinel-2-Satelliten vom 9. und 29. Mai 2020 basieren auf der Auswertung der Sentinel-2-Pixel in einer hier frei gewählten Fläche nahe den Messstationen. In diesem Beispiel bilden die Pixelflächen den Querschnitt der Elbe vor Seemannshöft (ca. 120 000 m²) und Bunthaus (ca. 200 000 m²) ab. Die in den Stationen installierten Messsysteme erhalten Proben aus ca. 1 m Tiefe (Abbildungen 3 und 6), während optische Satelliten über die Sichttiefe mit abnehmender Intensität integrieren. Die analysierten Probenvolumina (Satellit und Messstation) sind damit sehr unterschiedlich. Weiterhin finden die Messungen in einem hochdynamischen System (Strömung etc.) statt. Abweichungen der Messergebnisse der beiden Methoden sind daher zu erwarten.

2.2.1 Beispiel Trübung – Datenvergleich zwischen Fernerkundungsdaten für Trübung und den In-situ-Daten der Messstationen Bunthaus und Seemannshöft

Sowohl in der Wasserfläche des Hamburger Hafens als auch in den Flächen vor den Stationen schwankten die Trübungswerte des Satelliten stark (Abbildung 2).

Die Trübungswerte des Sentinel-2-Satelliten schwanken in diesen Bereichen in Abhängigkeit von Strömungsbedingungen, Witterungseinflüssen und Sedimentaufwirbelungen, was sich auch in den punktuellen In-situ-Messungen in den Messstationen widerspiegelt (Abbildung 3).

Die Verteilung der Trübungswerte zeigt in den beiden Stationen Bunthaus und Seemannshöft deutliche Unterschiede. In Bunthaus konzentrieren sich die Werte im Bereich von 23 bis 27 FNU mit einem Peak um 25 FNU, was auf eine insgesamt niedrigere Trübung im Vergleich zu Seemannshöft hinweist. In Seemannshöft sind die Werte hingegen höher und verteilen sich breiter zwischen 30 und 45 FNU, mit einem Peak um 35 FNU (Abbildung 4). Im Vergleich mit den In-situ-Messwerten (Abbildung 3) zeigen sich Unterschiede in der Höhe der Werte. Die Dynamik des Systems im Verhältnis zueinander bildet sich ab mit niedrigeren Trübungswerten in Bunthaus und höheren Trübungswerten in Seemannshöft.

Durch die Kombination beider Datenquellen lassen sich Trends in der Trübung sowohl räumlich als auch zeitlich differenzieren.

Anzeige

TIPPS ZUM THEMA



WebSeminar

Vertiefenseminar zur Gewässerunterhaltung
13./14. März 2025
Online
670,00 €/560,00 €**

Seminar

Fließgewässer aktuell
7./8. Mai 2025
Koblenz
600,00 €/500,00 €**

DWA-M 517

Gewässermonitoring - Strategien und Methoden zur Erfassung der physikalisch-chemischen Beschaffenheit von Fließgewässern
April 2017
74 Seiten, A4
Print 114,00 €*
E-Book 99,00 €*
Kombi 143,50 €*

* Fördernde Mitglieder erhalten 20% Rabatt
** Mitgliederpreis

Anmerkung: Kennung des Datensatzes: S2B_MSIL1C_20200529T102559_N0209_R108_T32UNE_20200529T124255

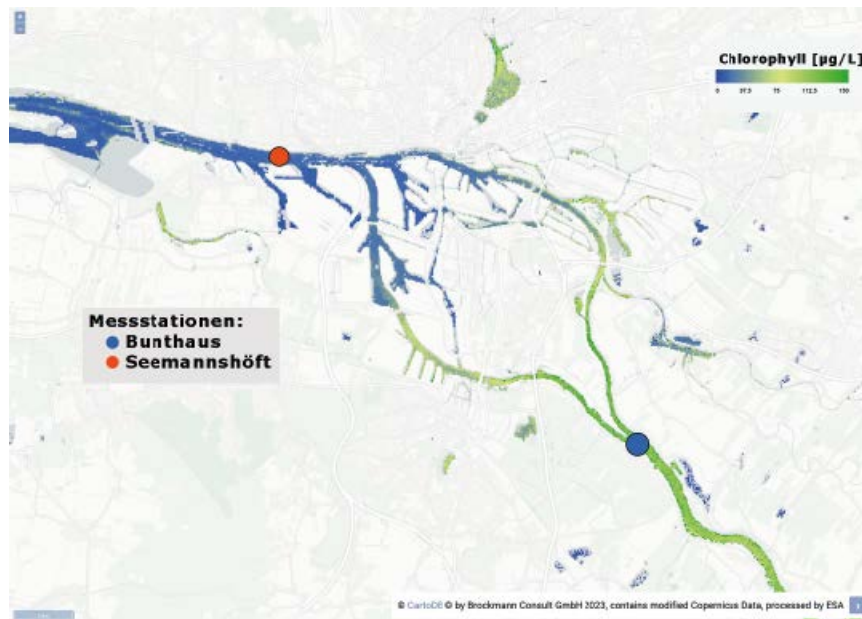


Abb. 5: Verteilung der aus den Satellitendaten berechneten Chlorophyllkonzentration im Hamburger Hafen am 29. Mai 2020 der Fa. Brockmann Consult mit Lage der Messstationen Bunthaus und Seemannshöft.

renziert analysieren. Die satellitengestützte Flächeninformation bietet dabei eine ergänzende Perspektive zu den punktuellen, aber kontinuierlich gemessenen In-situ-Daten. Dies erlaubt die Identifikation von Arealen mit hoher und niedriger Trübung (zum Beispiel in den Hafenbecken). Die Dynamik des Systems „Elbe und Hafen“ kann mithilfe der flächenhaften Satellitendaten besser analysiert und verstanden werden. Die Satellitendaten können somit auch die Bereiche abdecken, die zwischen den beiden Messstationen liegen.

2.2.2 Beispiel für Chlorophyllkonzentrationen – Datenvergleich zwischen Fernerkundungsdaten für Chlorophyll und den In-situ-Daten der Messstationen Bunthaus und Seemannshöft

Die satelliten-basierten Messwerte für die Chlorophyllkonzentration liegen in Bunthaus sehr viel höher als in Seemannshöft

(Abbildung 5), das zeigen auch die In-situ-Messungen. Im zeitlichen Verlauf der In-situ-Messungen ist darüber hinaus eine hohe Variabilität (Abbildung 6) zu erkennen.

Die satelliten-basierten Chl-a-Konzentrationen zeigen eine hohe räumliche Variabilität in der Elbe und schwanken an der Station Bunthaus zwischen 90 und 120 $\mu\text{g Chl-a/L}$ und in Seemannshöft zwischen 10 und 20 $\mu\text{g Chl-a/L}$ (Abbildung 7).

Die Kombination von Fernerkundungs- und In-situ-Daten erlaubt eine präzisere Identifikation von Hotspots erhöhter Chlorophyllkonzentration und unterstützt die Interpretation der ökologischen Dynamik des Systems. Solche Daten helfen, die Ursachen von Algenblüten zu verstehen, und tragen so zur Entwicklung präventiver Maßnahmen im Wassermanagement bei. Die räumliche Abdeckung der Satellitendaten und die zeitliche Kontinuität der In-situ-Messungen bieten zusammen eine umfassende Datengrundlage für adaptive Umweltstrategien.

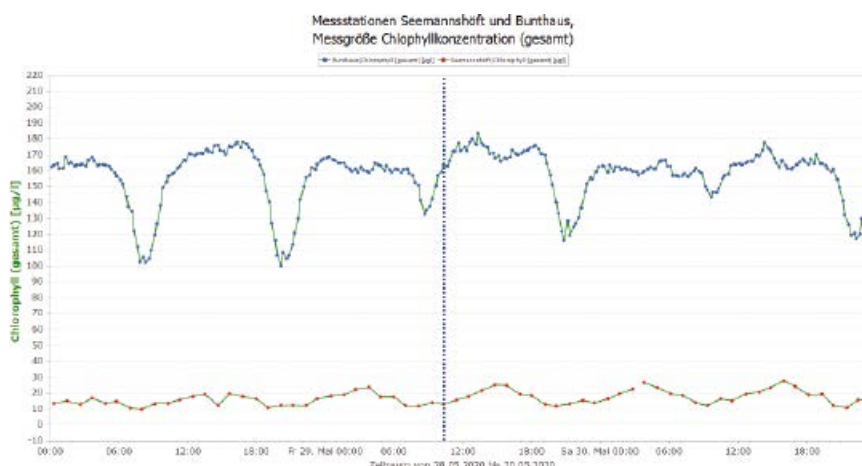


Abb. 6: In-situ-Messwerte der beiden Messstationen Seemannshöft und Bunthaus des Wassergütemessnetzes zu Chlorophyllkonzentrationen über drei Tage (28. bis 30. Mai 2020)

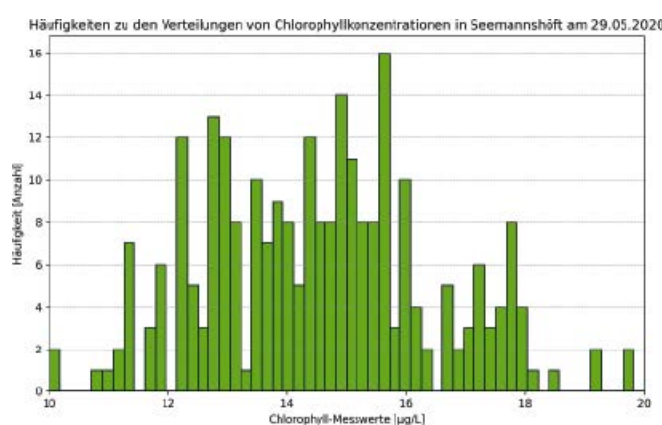
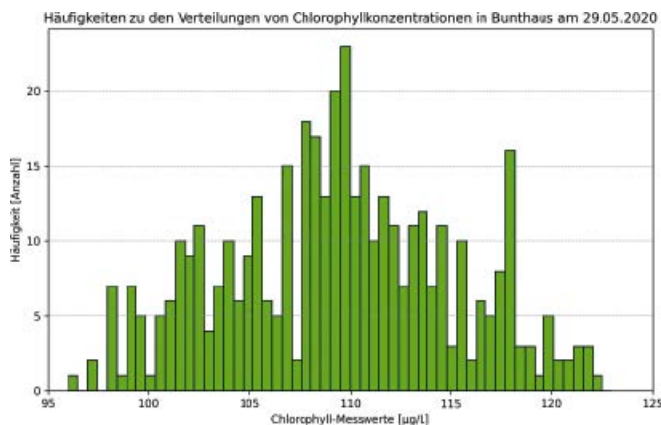


Abb. 7: Häufigkeiten der Messwerte der Satellitendaten von Chlorophyll in den frei gewählten Flächen vor den Messstationen (siehe Abbildung 5) am 29. Mai 2020

2.2.3 Vorteile der Nutzung von Satellitendaten zur Ergänzung von kontinuierlichen Messreihen

Wie die beiden vorhergehenden Beispiele zeigen, liefern die Daten der Fernerkundung und die daraus abgeleiteten Darstellungen Erkenntnisse, die durch einzelne Messungen oder kontinuierliche Messungen aus Messstationen nicht herzustellen sind. Das gilt für alle größeren, stehenden und fließenden Gewässer. Dies gilt auch für Gewässer, die nur unregelmäßig überwacht werden können.

Die aus den Daten des Sentinel-2-Satelliten abgeleiteten Verteilungen der Algen und Trübung bieten eine ergänzende Methode in der ökologischen Gewässerbewertung. Diese Methode ist kostengünstig und erlaubt eine großflächige Überwachung von Gewässern. Sie bietet die Option, Veränderungen von Gewässern zeitnah zu identifizieren und räumlich zuzuordnen. Bewirtschaftungsmaßnahmen könnten effektiver gesteuert oder die Wirksamkeit von Maßnahmen abgeschätzt werden. So können zum Beispiel auch die Dynamiken der Algenentwicklungen in der Vegetationsperiode in einem Maß erkannt werden, die mit den Standardmethoden nicht beobachtbar sind.

Wie schon bei der Trophieklassifizierung gezeigt, könnte die Fernerkundung durch Auswertung der Satellitendaten dazu beitragen, die Gewässerüberwachung durch die bessere räumliche und zeitliche Abdeckung weiter zu optimieren.

3 Schnittstellen für die Implementierung von Satellitendaten in die operative Praxis der Landesumweltämter

Die Integration von Fernerkundungsdaten in das behördliche Gewässermonitoring erfordert den Einsatz der aktuellen technisch-wissenschaftlichen Lösungen, die in Deutschland vor allem durch Dienstleister aus dem privaten Sektor, die auf die Verarbeitung von Satellitendaten spezialisiert sind, bereitgestellt werden. BIGFE zielt darauf ab, die Akzeptanz und die Implementierung von Fernerkundungstechnologien in die Verwaltungspraxis der Landesumweltämter zu befördern.

3.1 Servicemodelle im behördlichen Gewässermonitoring

Ein zentrales Element bei der Implementierung der Satellitendaten im behördlichen Gewässermonitoring sind unterschiedliche Servicemodelle mit abgestuften Produktkategorien. Diese müssen sowohl die möglichen Monitoring-Informationen aus der Fernerkundung abbilden als auch den praktischen Bedarf der Landesämter erfassen. Diese Servicemodelle sind in BIGFE in vier Kategorien aufgeteilt worden: Bronze, Silber, Gold und Platin (Tabelle 2). Sie zeigen mögliche und unterschiedliche Arbeitsverteilungen zwischen Dienstleistern und Landesämtern auf. Diese Kategorien berücksichtigen auch unterschiedliche Arten des Datenzugriffs auf die satelliten-basierten Umweltein-

Produktkategorie	Bronze	Silber	Gold	Platin
Datenbeschaffung	Landesamt	Dienstleister	Dienstleister	Dienstleister
Prozessierung (zum Beispiel Atmosphärenkorrektur, Wolkendetektion)	Landesamt	Dienstleister	Dienstleister	Dienstleister
Auswertung (zum Beispiel Zeitreihen und Statistik)	Landesamt	Landesamt	Dienstleister	Dienstleister
Qualitätssicherung	Landesamt	Landesamt	Dienstleister	Landesamt
Visualisierung	Landesamt	Landesamt	Dienstleister	Landesamt
Berichte	Landesamt	Landesamt	Dienstleister	Landesamt
Kartendienste	Landesamt	Landesamt	Dienstleister	Dienstleister

Tabelle 2: Servicemodelle für die Schnittstellen zwischen Satellitendaten und den Landesumweltämtern

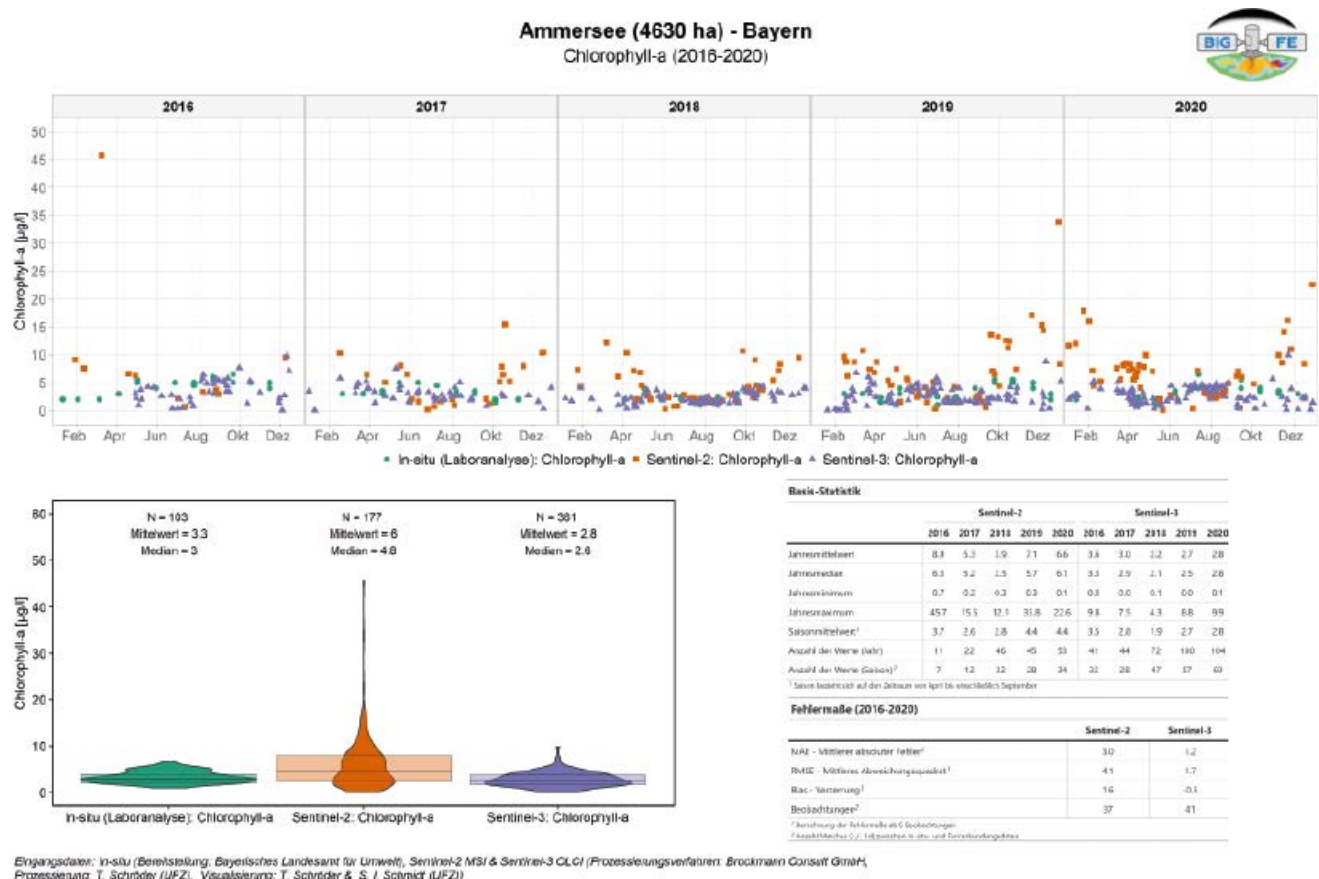


Abb. 8: Exemplarische Darstellung eines Seen-Steckbriefs aus dem BIGFE-Projekt am Beispiel des Ammersees in Bayern (Stand August 2023)

formationen. Die kategorisierten Servicemodelle sind nicht starr, sondern beliebig modifizierbar und kombinierbar. Auch weitere alternative Herangehensweisen wie zum Beispiel ein zentralisierter Fernerkundungsservice aller Bundesländer oder entsprechende Erweiterungen des Copernicus-Land-Service der EU sind denkbar. In den Workshops und Nutzerbefragungen im Rahmen von BIGFE hat sich eindeutig gezeigt, dass Landesämter und Wasserverbände aktuell eine Servicebereitstellung durch Dienstleister favorisieren (siehe Umfrage-Ergebnisse unter https://www.ufz.de/export/data/496/278201_BIGFE_ErgebnisseUmfrage1.pdf).

Die Bronze-Kategorie richtet sich an Nutzende, die eigene Prozessierungsketten aufbauen und den gesamten Datenverarbeitungsprozess, von der Validierung bis zur Kartenerstellung, selbst übernehmen möchten. Diese Nutzer sind unabhängig von externen Dienstleistern, benötigen jedoch erhebliche personelle und technische Ressourcen innerhalb der Landesämter. Hierfür können frei verfügbare Softwarelösungen wie SNAP (ESA-Softwaretool zur Verarbeitung von Fernerkundungsdaten (<https://earth.esa.int/eogateway/tools/snap>)) genutzt werden. Etablierte Workflows können über die Serverplattform CODE-DE (<https://code-de.org/de>) für weitere behördliche Nutzer in Deutschland verfügbar gemacht werden.

Die Silber-Kategorie bietet eine gewisse Entlastung der Fachbehörden, indem Nutzende aus vordefinierten Prozessierungsoptionen fertige Produkte vom Serviceprovider auswählen können. Während die Prozessierung extern durchgeführt wird, verbleiben einige Verarbeitungsschritte, wie die Kartenerstellung oder Datenanalyse, in den Landesämtern. Eine Auswertung wie die eigene Trophieklassifizierung wäre beispiels-

weise möglich. Dies reduziert den internen Aufwand, führt jedoch zu zusätzlichen Kosten für die Nutzung externer Prozessierungsplattformen.

Die Gold-Kategorie geht einen Schritt weiter und umfasst die komplette Auslagerung der Datenprozessierung an Dienstleister, die in entsprechend festgelegten Untersuchungszeiträumen vollständige Berichte, Karten und Grafiken liefern. Dies ermöglicht es den Landesämtern, qualitativ hochwertige Ergebnisse ohne eigene Prozessierungskapazitäten zu erzielen, erfordert jedoch die Akzeptanz eines geringeren Einflusses auf die Datenverarbeitung und den höheren externen Kostenaufwand. Ein mögliches Produkt sind die „Seen-Steckbriefe“, die in den Bundesländern Schleswig-Holstein und Hamburg verwendet werden. Im Projekt wurde in Abstimmung mit den Landesumweltämtern ebenfalls ein Format für informative Steckbriefe erarbeitet (Abbildung 8). Der Steckbrief gibt zusammenfassende statistische Werte für mehrere Jahre und den Vergleich von Satelliten- und In-situ-Daten in Form von Zeitreihen, Violin-Plots und statistischen Tabellen wieder. Im BIGFE-Projekt wurden für über 100 Standgewässer diese Steckbriefe erstellt und stehen den Gewässerbewirtschaftern für die Zielgrößen Chl-a, Sichttiefe und Trübung zur Verfügung.

Die Platin-Kategorie stellt schließlich die umfassendste Lösung dar, bei der alle verfügbaren Satellitendaten für ein bestimmtes Gebiet kontinuierlich in nahezu Echtzeit verarbeitet und bereitgestellt werden. Diese Echtzeit-Bereitstellung ist der maßgebliche Unterschied zur Gold-Kategorie und erlaubt ein „Near-Real-Time“-Monitoring. Diese Daten sind über eine browserbasierte Anwendung vom Serviceprovider zugänglich, können online ausgewertet und bewertet werden und sind in

GIS-Systeme der Landesämter übertragbar, was eine operationelle Nutzung der Informationen ermöglicht. Die Kombination mit kontinuierlichen Messreihen ist hier ebenfalls denkbar, wie in Abschnitt 2.2 gezeigt. Diese Lösung erfordert nur geringfügig interne Ressourcen, führen jedoch zu einem vollständigen Outsourcing der Datenverarbeitung und entsprechenden Kosten. Für Badegewässer oder hoch-prioritäre Gewässer wie zum Beispiel große Trinkwassertalsperren kann hiermit ein sehr umfassendes Wassergütemonitoring, beziehungsweise sogar ein Frühwarnsystem für kritische Entwicklungen, etabliert werden.

Zusammenfassend bieten die vorgestellten Produktkategorien flexible Lösungen für die Integration von Fernerkundungsdaten in das Gewässermonitoring, die auf die spezifischen Bedürfnisse und Ressourcen der jeweiligen Landesumweltämter abgestimmt werden können.

3.2 Nutzung von Satellitendaten für die WRRL-Berichterstattung am Beispiel Finnland

Eine weitere praktische Anwendung und potenzielle Schnittstelle ist die Nutzung von Satellitendaten für die WRRL-Berichterstattung. Für den Berichtszyklus 2015 bis 2021 hat beispielsweise das Ministerium für Umwelt in Finnland satellitengestützte Chl-a-Daten für die Bewertung gemäß der WRRL genutzt. Die finnische Gewässerverwaltung steht vor der Herausforderung, den ökologischen Status für 4617 Seen zu erfassen. Mithilfe der Satellitendaten konnten rund 2000 der Seen mit Sentinel-2-Daten in einer Auflösung von 60 m bewer-

tet werden. In-situ- sowie Satellitendaten werden in einer web-basierten Anwendung zusammengefasst und können dort analysiert werden. Die Ergebnisse werden in Form von Karten dargestellt (<https://tarkka.syke.fi>). Damit stehen die Ergebnisse transparent der Öffentlichkeit zügig zur Verfügung, und das System leistet so einen Beitrag zur transparenten Veröffentlichung von Umweltinformationen. Die Ergebnisse der satelliten-basierten Statusbewertung für die WRRL stimmten in 80 % der Fälle mit den In-situ-Daten überein [7]. Das Beispiel Finnland zeigt eindrucksvoll, dass Satellitendaten für das WRRL-Monitoring einen wichtigen Beitrag leisten können. Dies bietet sich insbesondere dort an, wo es unter anderem aus Ressourcengründen wenige In-situ-Proben gibt und/oder wo die flächenhafte Verteilung der Werte von Bedeutung ist. Im Kontext behördlicher Vorgänge in Deutschland wäre hier eine Öffnung der Monitoringverfahren im Rahmen der WRRL gegenüber satelliten-basierten Methoden wünschenswert. Damit könnten verfügbare Umweltinformationen aus dem Copernicus-Programm nutzbar gemacht, die Gewässerbewertung verbessert bzw. kosteneffizienter gestaltet und die Richtlinienziele (unter anderem den ökologischen Zustand aller Gewässer zu verbessern) durch ein flächendeckendes Monitoring umfassender als bislang umgesetzt werden. Hierbei geht es nicht um die Abschaffung des In-situ-Monitorings, das wir nach wie vor für essentiell halten, sondern vielmehr um eine zusätzliche bessere Informationsbasis zum Gewässerzustand. Außerdem wäre dies dann auch mit einer Inwertsetzung der erheblichen Investitionen der EU in das Copernicus-Programm verbunden (<https://www.copernicus.eu>).

RENEXPO INTERHYDRO

[27. – 28. März 2025]

Fachmesse für Wasserkraft
www.renexpo-interhydro.eu



Messezentrum Salzburg

4 Fazit

Es gibt vielfältige und wertvolle Anwendungsmöglichkeiten für Satellitendaten in den Landesumweltämtern im Bereich der Gewässerüberwachung. Die vorgestellten Anwendungen reichen von der Ergänzung und Erweiterung bestehender kontinuierlicher Messstellen oder regelmäßiger Probenpunkte und der Trophieklassifizierung bis hin zum Einsatz in der Badegewässerüberwachung und der Bereitstellung von Auskunftstools für die Öffentlichkeit. Besonders hervorzuheben ist die Möglichkeit, mit Satellitendaten informative Grafiken und Tabellen für Berichte zu liefern und das Systemverständnis für Oberflächengewässer zu erweitern – auch für jene Seen, die wenig oder gar nicht überwacht werden können.

Ein wesentlicher Vorteil der Satellitendaten liegt in ihrer räumlich und zeitlich hohen Auflösung gegenüber dem in der Regel weniger häufigen und oftmals räumlich nur sehr punktuell eingesetzten In-situ-Monitoring, insbesondere bei der Erfassung von Sichttiefe, Trübung und Chl-a. Dies ermöglicht eine detaillierte Anzeige der flächenhaften und zeitlichen Verteilung dieser Messgrößen, die gleichzeitige Beobachtung aller Wasserflächen und eine einfache Vergleichbarkeit der satellitenbasierten Messergebnisse untereinander. Besonders wertvoll ist die Möglichkeit, jahreszeitliche Schwankungen und Algenblüten auf Wasserflächen zu quantifizieren, die sonst nur selten In-situ beprobt werden können. Beim Umgang mit Satellitendaten ist zu bedenken, dass bei Wolkenbedeckung keine oder in Bezug auf die Gesamtfläche des Gewässers nur teilweise Informationen geliefert werden können und Datenreihen somit Lücken aufweisen können, da eine Datenverfügbarkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt wetterbedingt nicht garantiert werden kann. Einschränkungen in der Vergleichbarkeit von Satellitendaten und In-situ- bzw. kontinuierlichen Messungen können sich in hochvariablen Systemen ergeben, wie am Beispiel der Messstation Seemannshöft sichtbar wurde.

Die Evaluierung von Anwendungen der Fernerkundung hat gezeigt, dass die Kombination mit In-situ-Messungen in den meisten Fällen vergleichbare und ergänzende Ergebnisse liefern kann (siehe [2]). Dabei zeigen die Beispiele in diesem Beitrag, dass beide Ansätze, Satelliten- und In-situ-Messungen, ihre eigenen Stärken und Schwächen besitzen, die Fernerkundung aber eine hilfreiche Ergänzung zu In-situ-Messungen bieten kann.

Das Projekt BIGFE hat gezeigt, dass es sinnvoll, günstig und lohnend ist, die vielen Vorteile der Satellitendaten für die Aufgaben in der Gewässerüberwachung auszuschöpfen. Es wurde an einigen Beispielen und Schnittstellen gezeigt, wie diese durch interne und externe Dienstleister erfolgreich in den Landesumweltämtern implementiert werden könnten. Der Schritt, diese „Letzte Meile“ zu überwinden, liegt schlussendlich in der Verantwortung der Landesumweltämter.

Dank

Wir danken Kerstin Stelzer von Brockmann Consult GmbH sowie Hendrik Bernert und Dr. Christoph Deller von EOMAP GmbH & Co. KG für ihre fortwährende, kollegiale Beratung und Unterstützung im BIGFE-Projekt. Das dieser Veröffentlichung zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr unter dem Förderkennzeichen 50EW2101 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

Literatur

- [1] Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, *Amtsblatt der Europäischen Union*, 22. Dezember 2000, L 327/1–73
- [2] Friese, K., Schmidt, S. I., Schröder, T., Laue, P., Kutzner, R. D., Dietrich, D., Wolf, T., Blohm, W., Rinke, K.: Nutzung von Satellitendaten in der behördlichen Überwachung der Gewässergüte von Seen und Talsperren in Deutschland – Ergebnisse eines Projekts zum Binnengewässer-Monitoring mit Satellitenfernerkundung (BIGFE), *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* 2025, 18 (1), 17–24
- [3] Riedmüller, U., Hoehn, E., Mischke, U.: *Trophie-Klassifikation von Seen. Trophie-Index nach LAWA. Handbuch*, Version 1.0, Stand November 2013, im Rahmen des Länderfinanzierungsprogramms „Wasser, Boden und Abfall“ 2008–2010
- [4] European Space Agency (ESA): Sentinel-2 Factsheet, 2017, https://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/SENTINEL-2_sheet_170125.pdf (abgerufen am 26. August 2024)
- [5] Schmidt, S. I., Schröder, T., Kutzner, R. D., Laue, P., Bernert, H., Stelzer, K., Friese, K., Rinke, K.: Evaluating satellite-based water quality sensing of inland waters on basis of 100+ German water bodies using two complementary processing chains, *Remote Sensing* 2024, 16 (18), 3416, <https://doi.org/10.3390/rs16183416>
- [6] Schröder, T., Schmidt, S. I., Kutzner, R. D., Bernert, H., Stelzer, K., Friese, K., Rinke, K.: Exploring spatial aggregations and temporal windows for water quality match-up analysis using Sentinel-2 MSI and Sentinel-3 OLCI data, *Remote Sensing* 2024, 16 (15), 2798, <https://doi.org/10.3390/rs16152798>
- [7] Papathanasopoulou, E., Simis, S. G. H., Alikas, K., Ansper, A., Anttila, J., Barillé, A., Zoffoli, M. L., et al.: *Satellite-assisted monitoring of water quality to support the implementation of the Water Framework Directive*, White Paper, 2019, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3463050>

Autor*innen

Pia Laue, M. Sc., Dipl.-Ing. Werner Blohm
Freie und Hansestadt Hamburg
Institut für Hygiene und Umwelt
Marckmannstraße 129b, 20539 Hamburg

Dr. Susanne I. Schmidt, Tanja Schröder, Dr. Désirée Dietrich,
Prof. Dr. Kurt Friese^{*)}, Prof. Dr. Karsten Rinke
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ
Department Seenforschung
Brückstraße 3a, 39114 Magdeburg

^{*)} Korrespondenzautor; E-Mail: kurt.friese@ufz.de

Dr. Rebecca D. Kutzner
Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e. V.
Brauhausweg 2, 03238 Finsterwalde

Dr. Thomas Wolf
LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
Institut für Seenforschung
Argenweg 50/1, 88085 Langenargen

Beteiligte Firmen

Brockmann Consult GmbH
Chrysanderstraße 1, 21029 Hamburg

EOMAP GmbH & Co. KG
Schlosshof 4, 82229 Seefeld

