



Leuchtturmprojekt BIGFE

Satelliten-basiertes Monitoring
der Gewässerqualität von
Oberflächengewässern

Eine Übersicht und ein Einstieg
in die Fernerkundung der
Oberflächengewässer



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

Herausgeber:



Institut für Hygiene und Umwelt
Hamburger Landesinstitut für Lebensmittelsicherheit
Gesundheitsschutz und Umweltuntersuchungen



HELMHOLTZ

Zentrum für Umweltforschung

Projekträger:



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt
German Aerospace Center

Satelliten-basiertes Monitoring der Gewässerqualität von Oberflächengewässern

Eine Übersicht und ein Einstieg in die Satellitenfernerkundung von Oberflächengewässern für Landesumweltämter

Autoren: Kurt Friese, Karsten Rinke und Werner Blohm

unter Mitarbeit von Susanne Schmidt, Tanja Schröder und Pia Laue

Anschrift der Herausgeber:

Kurt Friese und Karsten Rinke

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ

Department Seenforschung

Brückstrasse 3a

39114 Magdeburg

Werner Blohm

Freie und Hansestadt Hamburg

Institut für Hygiene und Umwelt

Marckmannstraße 129b

20539 Hamburg

A. Vorwort

Die vorliegende Broschüre zeigt die wesentlichen Ergebnisse eines Forschungsprojektes zur Eignung eines Satelliten-basierten Monitorings der Gewässerqualität und erläutert die wichtigsten Arbeitsschritte und Randbedingungen für eine Nutzung dieser Methoden.

Als Ergänzung zu Projektberichten, Veröffentlichungen und Workshops fasst unsere Dokumentation die wesentlichen Ergebnisse der Arbeitspakete 1 und 2 aus dem Projekt „Erfassung der Wasserqualität und Wasserflächenausdehnung von Binnengewässern durch Fernerkundung (BIGFE)“ (www.ufz.de/bigfe; FKZ 50EW2101) zusammen. BIGFE wurde vom ehemaligen Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) über die Deutsche Raumfahrtagentur (DRA) beim Projektträger (PT) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) vom 1.6.2021 bis 30.09.2025 gefördert.

Diese Schrift soll interessierten Fachleuten vornehmlich in den Landesumweltämtern als Übersicht und Einstieg in die Nutzung der Satellitenfernerkundung für die Überwachung der Wasserqualität von Oberflächengewässern dienen. Es wird gezeigt, dass die Satellitenfernerkundung vor allem auch in der Vervollständigung und Ergänzung von Labor-Messreihen und für die Zustandsermittlung von Gewässern dienen kann. Es werden verschiedene Möglichkeiten der Auswertung hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Auflösung aufgezeigt sowie die Grenzen der Verfahren diskutiert.

Im Rahmen des BIGFE-Projektes wurden sogenannte „naive“ Prozessierungen durchgeführt. Dies bedeutet, dass die Algorithmen, die in Prozessierungsketten verwendet wurden (s. Kapitel 3), nicht mit *in situ* Daten für die jeweiligen Gewässer oder unter Zuhilfenahme gewässerspezifischer spektraler Eigenschaften kalibriert wurden. Mit gewässerspezifischen Kalibrierungen lassen sich ggf. bessere Übereinstimmungen zwischen Satelliten-basierten und *in situ* Monitoring erzielen, aber die Algorithmen könnten dann in ihrer Übertragbarkeit eingeschränkt sein oder diese ganz verlieren. Ohne diese naive Anwendung und Übertragbarkeit erscheint daher eine Länder-übergreifende, bundesweite Verwendung von Satellitenaufnahmen für das Oberflächengewässer-Monitoring unrealistisch. Deshalb wurden im BIGFE-Projekt übertragbare, allgemeingültige Algorithmen verwendet und deren Praxistauglichkeit wissenschaftlich überprüft.

Damit beschränken sich die Beschreibungen und Bewertungen in dieser Schrift auf die reine Anwendung von vor-prozessierten Satellitenaufnahmen für die Überwachung der Gewässerqualität von Binnengewässern in Deutschland. Eine ausführliche Dokumentation (Copernicus für das Umweltmonitoring) der Möglichkeiten des Copernicus Programms für das Umweltmonitoring mit einführenden Erläuterungen findet sich u.a. bei Ehlert und Schweitzer (2018).

Wir wollen aber auch zeigen, dass die Satellitenfernerkundungsdaten der Sentinel-2 und Sentinel-3-Satelliten mit dem Programm SNAP und den Datenbanken des Copernicus-Programms eine effiziente Möglichkeit bieten Umweltveränderungen in Gewässern aufzuzeigen. Die Daten

können auch in Eigenregie prozessiert und genutzt werden, was bei vorhandenen personellen Ressourcen eine kostengünstige Option für den Einstieg in die Fernerkundung erlaubt.

B. Danksagung

Die Herausgeber möchten sich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Arbeitspakete 1 und 2 des BIGFE-Projektes bedanken, die seit Juni 2021 am Erfolg des Projektes und damit auch am Zustandekommen dieser Broschüre beteiligt waren, in alphabetischer Reihenfolge: Désirée Dietrich, Jannik Hinsch, Rebecca Kutzner, Pia Laue, Susanne I. Schmidt, Tanja Schröder, Thomas Wolf.

Ein besonderer Dank gilt Kerstin Stelzer und Jorrit Scholze von Brockmann Consult GmbH sowie Hendrik Bernert und Christoph Deller von EOMAP GmbH & Co. KG für ihre fortwährende, kollegiale Beratung und Unterstützung im BIGFE-Projekt.

Auch unseren Fachkolleginnen und -kollegen im Projektbeirat sei für ihre kritische und stets konstruktive Begleitung des Projektes ganz herzlich gedankt: Prof. Dr. Natascha Oppelt (Univ. Kiel), Dr. Stella Berger (IGB), Dr. Annalena Goll (LAWA), Dr. Björn Baschek (BfG), Dr. Matthias Rothe (UBA) und Toralf Schaarschmidt (LAWA).

Wir danken auch Frau Lena Schultz-Lieckfeld, Herrn Jaroslaw Grünwald und Herrn Michael Großhans von der Deutschen Raumfahrtagentur im Projektträger des DLR für ihre fachliche und administrative Begleitung über fast vier, intensive Projektjahre.

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.

Inhaltsverzeichnis

A. Vorwort	3
B. Danksagung	4
Inhaltsverzeichnis	5
1. Aufgaben und Zielstellung.....	9
2. Die Satelliten und ihre Fernerkundungsprodukte	10
3. Prozessierung der Satellitenaufnahmen.....	13
Ergebnisse des Vergleichs mit Labordaten aus den Überwachungsprogrammen der beteiligten Bundesländer.....	17
Vergleich der räumlichen Auflösung zwischen Satellitendaten und Einführung in situ Werten anhand von Makropixeln.....	18
Vergleich verschiedener zeitlicher Auflösungen zwischen in situ Messungen und den Aufnahmen der Satelliten	19
Vergleich von in situ Messwerten und Satellitendaten für Sichttiefe und Chlorophyllgehalt	21
4. Anwendungsbeispiele zur Überbrückung der „Letzten Meile“	25
Karten	26
Messwertverdichtungen	26
Saisonale Muster	26
Seensteckbriefe	27
Trophieklassifizierung	29
5. Vom Satellitenbild zu den Wasserqualitätsprodukten	32
Vom Sentinel-2 Satelliten zum Produkt	32
Copernicus Data Space Ecosystems (CDSE)	33
EO-Browser des CDSE	33

ESA-Softwaretool SNAP	33
Datenprozessierung mit SNAP im Detail	33
6. Handlungsempfehlungen für Behörden und Anwender.....	34
Konzept einer Operationalisierung	34
Servicemodelle im behördlichen Gewässermonitoring	34
Bereitstellungsdienst	35
Datendienst.....	35
Berichtsdienst	35
Echtzeitdienst.....	36
Empfehlung	36

7. Zusammenfassung und Ausblick.....	37
D. Literaturverzeichnis.....	39
E. Abkürzungen.....	42
F. Abbildungsverzeichnis	43
G. Tabellenverzeichnis.....	45
H. Anhang:.....	47
Eine ausführliche Beschreibung der Prozesskette in SNAP	47
Allgemeine Bedienung des CDSE	48
Filtereinstellungen - Suche des ZIP-Archivs.....	49
Ebenenvoransicht - Beispiel NDVI.....	50
Download des ZIP-Archivs.....	50
ESA-Softwaretool SNAP	51
SNAP - Prozessschritte.....	51
Subset erzeugen	52
Resampling.....	53
C2RCC-Prozessor.....	55
RGB-Bild und die Bänder zusammenfügen.....	59
Weitere Prozessierungen	60

1. Aufgaben und Zielstellung

Die Überwachung der Gewässergüte von Flüssen, Seen und Talsperren ist von großer Bedeutung für das Management von Wasserressourcen und den Umweltschutz. Sie ist in Europa für Flussgebietsgemeinschaften, Seen und Talsperren > 50 ha durch die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL 2000) und für Badegewässer durch die Europäische Badegewässerrichtlinie (2006) gesetzlich geregelt und harmonisiert. Trinkwassertalsperren unterliegen oft weiterführenden Überwachungen zur Sicherung der Rohwasserqualitäten. In Deutschland werden die Durchführungsbestimmungen der Gewässerüberwachung in der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) abgestimmt und festgelegt.

Die WRRL schreibt vor, dass die Gewässerqualität anhand spezifischer Messgrößen bewertet werden muss. Für Seen und Talsperren sind dabei u.a. Messgrößen wie die Sichttiefe, Nährstoffbelastung (z. B. Phosphor und Stickstoff) und der Chlorophyllgehalt relevant. Gemäß der WRRL werden die Gewässer in Zyklen von drei bis sechs Jahren hinsichtlich ihres ökologischen und chemischen Zustands untersucht. Selbstverständlich wäre es wünschenswert, wenn die großen Gewässer > 50 ha in Deutschland deutlich häufiger einer entsprechenden Bewertung unterzogen würden. Aufgrund der großen Anzahl an Gewässern ist dies weder personell noch finanziell auf klassischem Wege zu leisten. Die Satellitenfernerkundung kann hier Alternativen aufzeigen und auch kleinere Gewässer könnten so durch die Fernerkundungsdaten eine erste Einstufung erhalten.

Durch die Satellitenfernerkundung ergeben sich neue Möglichkeiten sowohl in der Überwachung bisher nicht erfasster Gewässer, aber vor allem auch in der Vervollständigung bzw. Verdichtung von Labor-Messreihen und für die Zustandsermittlung von Gewässern. Satellitenfernerkundungsdaten der Sentinel-Satelliten Sentinel-2 und Sentinel-3 des Copernicus-Programms, die mit optischen Messinstrumenten ausgestattet sind, bieten hierfür eine effiziente Möglichkeit und können Umweltveränderungen in Gewässer feststellen. Internationale Studien haben die Verwendbarkeit von Sentinel-Daten für die Überwachung von Gewässern an Einzelbeispielen gezeigt (z.B. Dörnhöfer et al. 2018; Lehmann et al. 2021; Werther et al. 2022; Alikas et al. 2023).

2. Die Satelliten und ihre Fernerkundungsprodukte

Bereits mit frühen Satellitenmissionen im Landsat-Programm der NASA (Landsat 1 bis Landsat 7) wurden ab 1972 Umweltdaten der Landoberfläche sowie der Ozeane und Küstenbereiche erhoben. Mit dem Start von Landsat 8 im Jahr 2013 (<https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>) wurden erstmals auch für Wasseroberflächen räumlich höher aufgelöste (30 bis 100 m) Umweltdaten weltweit verfügbar (Wulder et al. 2022).

Die Sentinel-Satelliten (<https://www.d-copernicus.de/daten/satelliten/daten-sentinels/>) sind beginnend ab 2015 Teil des Copernicus-Programms der Europäischen Weltraumbehörde (ESA-European Space Agency) und stellen eine breite Palette von Umweltdaten für globale Anwendungen bereit. Die meisten Sentinel-Missionen bestehen aus mehreren baugleichen Satelliten, von denen jeweils zwei gleichzeitig im Orbit sind, um somit die zeitliche Wiederholrate und die räumliche Abdeckung sowie die Zuverlässigkeit zu erhöhen. Die Satelliten und Instrumente werden von der ESA als Kernkomponente des Copernicus-Programms entwickelt.

Für die Wasserqualitätsmessgrößen Sichttiefe, Trübung und Chlorophyllgehalt werden bestimmte Wellenlängen im sichtbaren und infraroten Bereich des von der Wasseroberfläche rückgestrahlten Sonnenlichtes ausgewertet und ins Verhältnis gesetzt (Abbildung 1). Die beiden Sentinel-2-Satelliten (S2A und S2B) sind dazu mit einem multispektralen Sensor MSI (Multi Spectral Instrument) ausgestattet (seit September 2024 ist Sentinel-2C im Orbit und ersetzt S2A). Das Sentinel-2 Multispektral-Instrument erfasst 13 Spektralbänder: 4 Bänder im sichtbaren Licht und im nahen infraroten

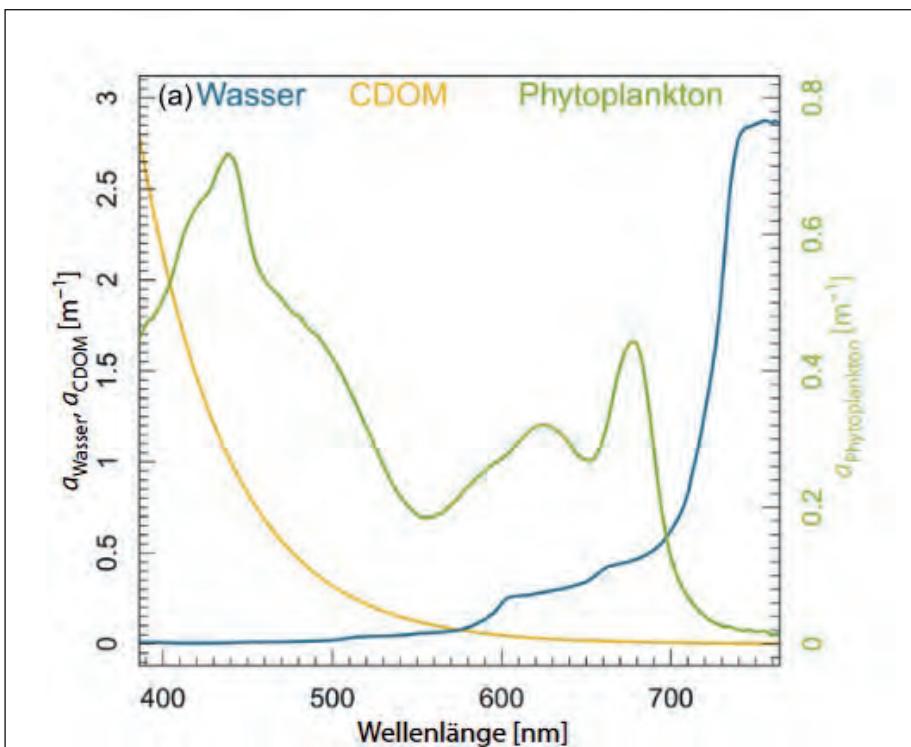


Abbildung 1: Absorptionsspektren für Wasser, Gelbstoff (CDOM: coloured dissolved organic matter) und Chlorophyll-a. Die maximale Absorption für Chlorophyll-a liegt im blauen Bereich bei 430 nm und im roten Bereich bei 662 nm (aus Baschek et al. 2018)

Bereich (NIR) mit 10 Meter Auflösung, 6 Bänder im Rotrand und im kurzweligen infraroten Bereich (SWIR: short wave infrared) mit 20 Meter Auflösung sowie 3 atmosphärische Bänder mit einer räumlichen Auflösung von 60 Metern. Sentinel-2 hat über Deutschland eine zeitliche Auflösung von 2 bis 5 Tagen (Abbildung 2, 3 und 4).

Sentinel-3A und -3B (S3A/B) bieten dagegen eine tägliche Auflösung über Deutschland, liefern aber mit dem optischen Sensor OLCI (Ocean

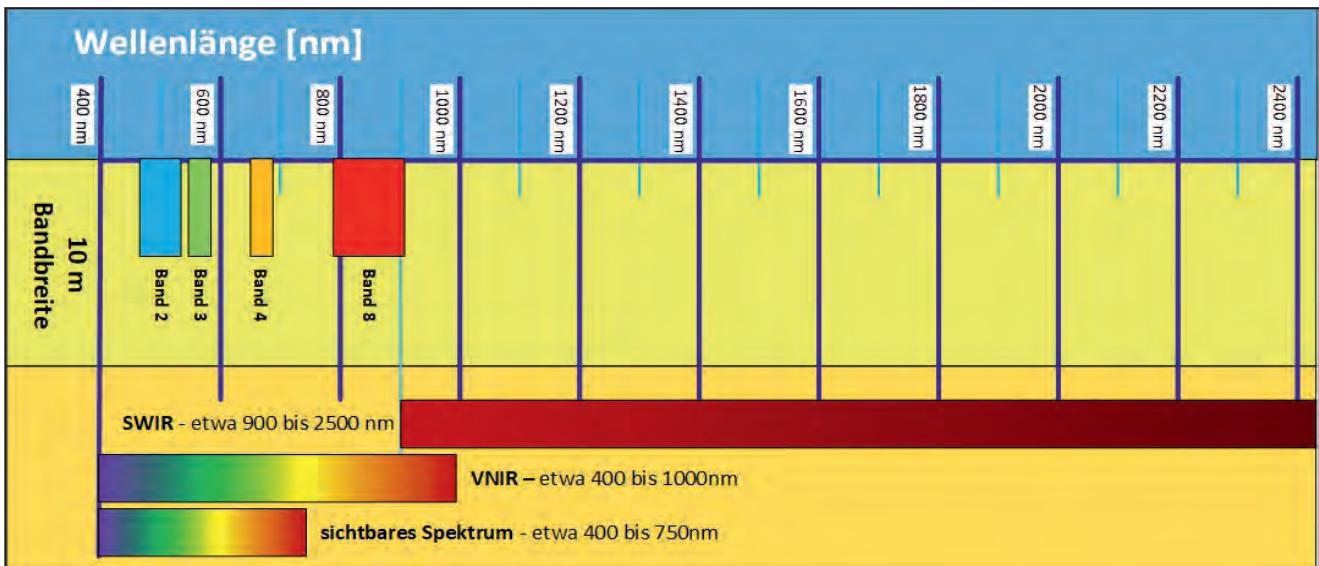


Abbildung 2: Spektralbänder des MSI von Sentinel-2 mit einer räumlichen Auflösung von 10 m: B2 (490 nm), B3 (560 nm), B4 (665 nm) und B8 (842 nm)

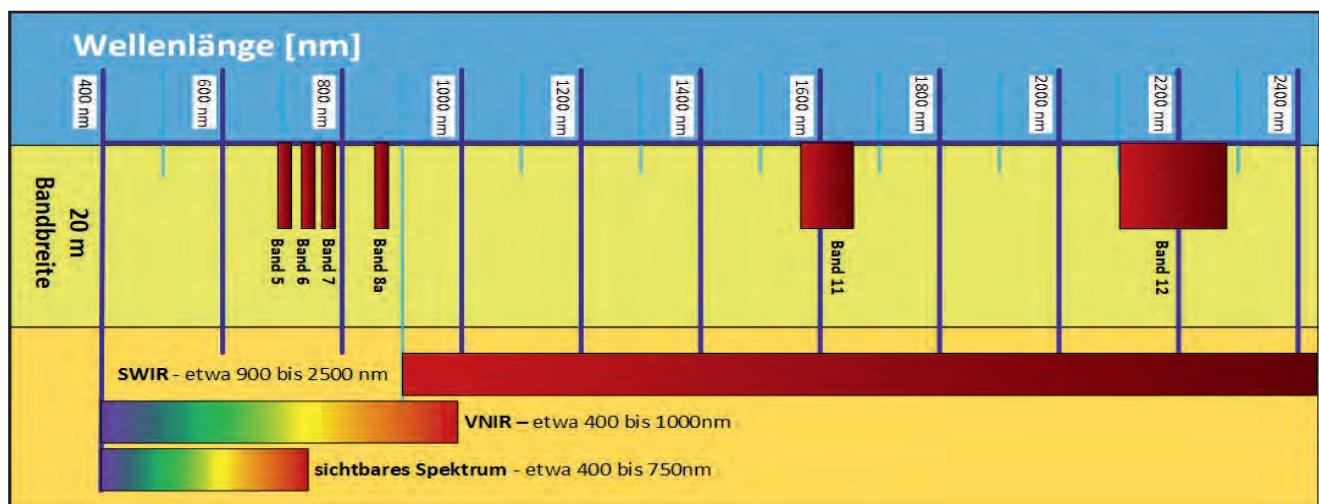


Abbildung 3: Spektralbänder des MSI von Sentinel-2 mit einer räumlichen Auflösung von 20 m: B5 (705 nm), B6 (740 nm), B7 (783 nm), B8a (865 nm), B11 (1610 nm) und B12 (2190 nm)

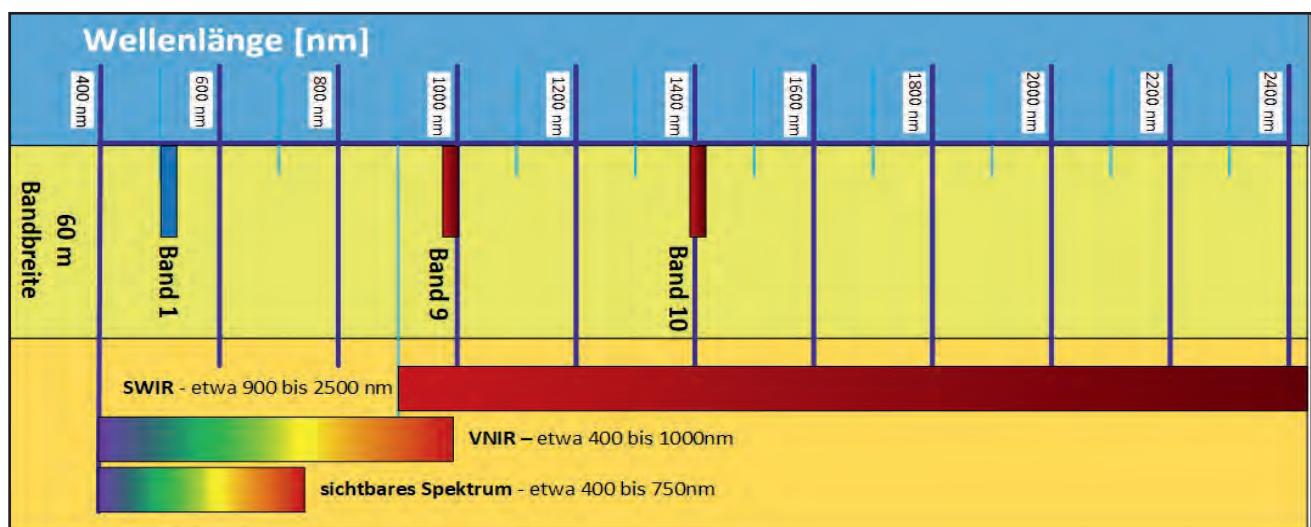


Abbildung 4: Spektralbänder des MSI von Sentinel-2 mit einer räumlichen Auflösung von 60 m: B1 (443 nm), B9 (940 nm) und B10 (1375 nm)

and Land Color Imager), mit seinen 21 Wellenlängenbändern nur eine räumliche Auflösung von 300 m (Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht der Sentinel-Satelliten im Copernicus-Programm, die in BIGFE verwendet wurden (<https://sentiwiki.copernicus.eu/web/?l=en>); s.a. a Sentinel-2 Factsheet (ESA 2017a) und Sentinel-3 Factsheet (ESA 2017b)

Satellit	S2A (seit 2015) S2B (seit 2017) S2C (seit 2024)	S3A (seit 2016) S3B (seit 2018)		
Sensor	MSI	OLCI		
Spektralbänder	13 Spektralbänder (443-2190 nm) 4 im sichtbaren und nah-infraroten Bereich	21 Spektralbänder zw. 400 und 1020 nm Wellenlänge 6 Rotrand-/Kurzwellen-Infrarot-Bänder 3 atmosphärische Korrekturbänder		
räumliche Auflösung (m)	10	20	60	300
Produkt	Sichttiefe/Trübung/Chlorophyll	Sichttiefe/Trübung/Chlorophyll		
zeitliche Auflösung über Deutschland	alle 2 bis 5 Tage	täglich		

Obwohl der S2-MSI-Sensor im Gegensatz zum S3-OLCI-Sensor nicht für die Untersuchung von Wasserinhaltsstoffen konzipiert wurde, können die aufgenommenen multispektralen Daten ebenso für die Überwachung der im Folgenden genannten Messgrößen ausgewertet werden.

Die Sichttiefe eines Gewässers kann aus der Analyse der Lichtdurchlässigkeit bzw. Reflektanz im sichtbaren Spektrum abgeleitet werden (z.B. Topp et al. 2020; Dörnhöfer und Oppelt 2016; Soomets et al. 2020). Trübungen, z.B. verursacht durch Schwebstoffe, werden mithilfe von Algorithmen berechnet, welche die Trübungsbedingte Absorption und Streuung quantifizieren (z.B. Dörnhöfer und Oppelt 2016; Soomets et al. 2020). Der Chlorophyllgehalt in Gewässern, ein Indikator für das Algenwachstum, kann durch Berücksichtigung der Absorptions- und Streueigenschaften von Chlorophyll-a über verschiedene Algorithmen erfasst werden (z.B. Dörnhöfer und Oppelt 2016; Ogashawara 2019; Llodrà-Llabrés et al. 2023).

3. Prozessierung der Satellitenaufnahmen

Die Satellitenaufnahmen der Sentinel-Missionen sind grundsätzlich frei verfügbar und können über verschiedene Plattformen der ESA (EO4EU: <https://eo4eu.eu/#platform>; Copernicus Space Data Ecosystem (CDSE) Portal: <https://dataspace.copernicus.eu/>) bzw. einer damit von der ESA beauftragten Firma eingesehen oder heruntergeladen werden (EO-Lab: <https://eo-lab.org/de/>; CODE-DE: <https://code-de.org/de/>). Die Daten werden als ZIP-Archive in unterschiedlichen Leveln angeboten. Die ESA bietet dazu Level-1C-Archive für die Verarbeitung in SNAP und einen georeferenzierten und Atmosphären-korrigierten Level-2A der Satellitendaten an.

Die Daten können in Eigenregie mit der Software SNAP prozessiert und visualisiert werden (siehe Kapitel 5 und Anhang). Es ist aber auch möglich Speicherplatz auf Cloud-basierten Bereichen dieser Portale anzumelden und dort bei entsprechender Kenntnis eine eigene Weiterverarbeitung der Daten durchzuführen.

Für das BIGFE-Projekt wurden die Prozessierungen von zwei Firmen durchgeführt, die beide auf die Auswertung von Satellitendaten für Wasserqualitätsmessgrößen, wie Sichttiefe, Trübung oder Chlorophyllgehalt spezialisiert sind. Es handelt sich um die Firma Brockmann Consult GmbH mit Sitz in Hamburg und die Firma EOMAP GmbH & Co. KG aus Seefeld / Oberbayern. Beide Firmen verwenden für ihre Prozessierungsketten dabei Satellitendaten auf dem niedrigeren Verarbeitungslevel (L1C) und verarbeiten diese dann mit eigenen, speziell entwickelten Algorithmen für verschiedenen Korrekturen. Mit diesen Ergebnissen wurden dann Auswertungen im BIGFE-Projekt hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Auflösung vorgenommen sowie eine Validierung mit in situ Daten durchgeführt (siehe Kapitel 4). Ausführliche Darstellungen der Ergebnisse dazu finden sich bei Schröder et al. (2024) und Schmidt et al. (2024).

Die Instrumente auf den Satelliten Sentinel-2 und Sentinel-3 zeichnen das rückgestrahlte Sonnenlicht von der Wasseroberfläche auf. Der überwiegende Anteil des reflektierten Sonnenlichtes stammt dabei von der Wasseroberfläche, aber das Signal am Sensor beinhaltet auch einen zu beachtenden Anteil aus dem oberen sichtbaren Bereich des Wasserkörpers. Dieser kann durch Absorptions- und Streueffekte von gelösten und partikulären Wasserinhaltsstoffen gestört sein (Abbildung 5). Auch Schattenwürfe durch Wolken, nahe dem Ufer stehende Gebäude, Bäume oder große Schiffe erschweren eine Auswertung.

Wolkenbedeckung und Wolkenschatten behindern somit die Rückstrahlung des Sonnenlichts, da die Satellitenaufnahmen für die betrachteten Wasserqualitätsmessgrößen über optische Detektoren (MSI, OLCI) ähnlich einer Kamera erfolgen.

Grundsätzlich ist es daher erforderlich vor der Prozessierung der Satellitenaufnahmen die Entscheidung zu treffen, bis zu welchem Grad einer Wolkenbedeckung Aufnahmen (Szenen) für das betrachtete Gewässer ausgewählt werden sollen.

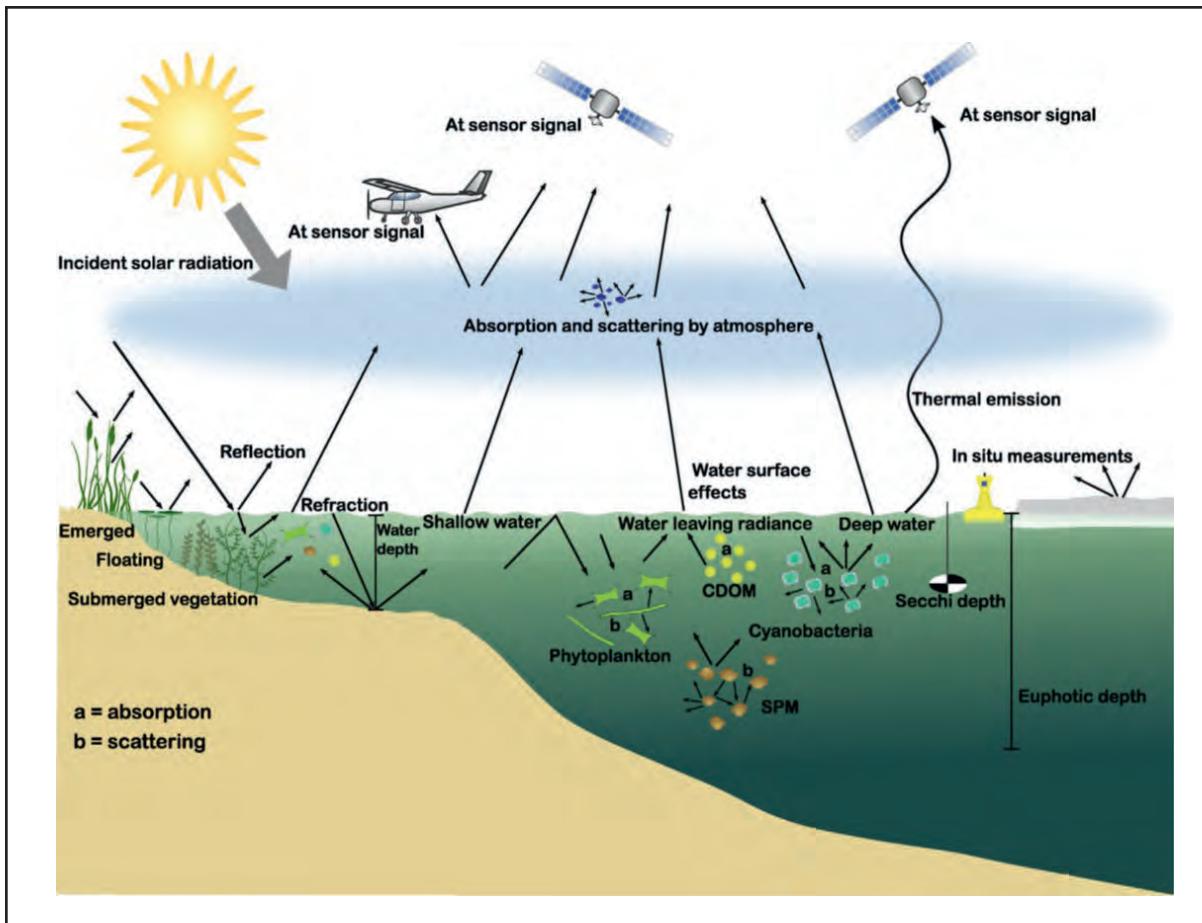


Abbildung 5: Beispiele für mögliche Störeffekte des rückgestreuten Sonnenlichtes am Satellitensor durch Absorptionen und Streuungen (aus Baschek et al. 2018])

Im weiteren Verlauf der Prozessierung ist eine Atmosphärenkorrektur von großer Bedeutung, da Gase, Aerosole und Partikel in der Atmosphäre zu Absorption und Streuung sowohl beim Einstrahlen des Sonnenlichts als auch bei der Rückstrahlung führen (Abbildung 5).

Weitere Korrekturen betreffen die Abgrenzung von Land und Wasser, was besonders im flachen Uferbereich bei ungetrübtem Wasser eine Rolle spielt (sog. Nachbarschaftseffekte) sowie sog. Glitzereffekte (Sunglint), wenn Winkeleffekte zwischen Einstrahl- und Abstrahlwinkel auf einer Wasseroberfläche eine Auswertung am Sensor verhindern (Steinmetz et al. 2011).

Insgesamt ist der Weg des Sonnenlichts durch die Atmosphäre zur Wasseroberfläche (teilweise auch in den Wasserkörper hinein) und wieder zurück zu den Sensoren des Satelliten also recht komplex. Auch die Effekte aus der Umgebung haben einen nicht unerheblichen Störinfluss. Für all diese Störquellen wurden von den beiden genannten Firmen bestimmte Korrekturen (sog. Algorithmen) entwickelt. Auch das frei zugängliche Programm SNAP kann Teile dieser Störungen korrigieren (siehe auch Kapitel 5 und Anhang).

Bei den Satellitenüberflügen von Sentinel-2 und Sentinel-3 werden Szenen aufgenommen, die in einem standardisierten Kachelsystem (oder Gridsystem) unterteilt werden, um die Daten zu organisieren und zugänglich zu machen (Abbildung 6). Jede Kachel ist mit einer eindeutigen alphanumeri-

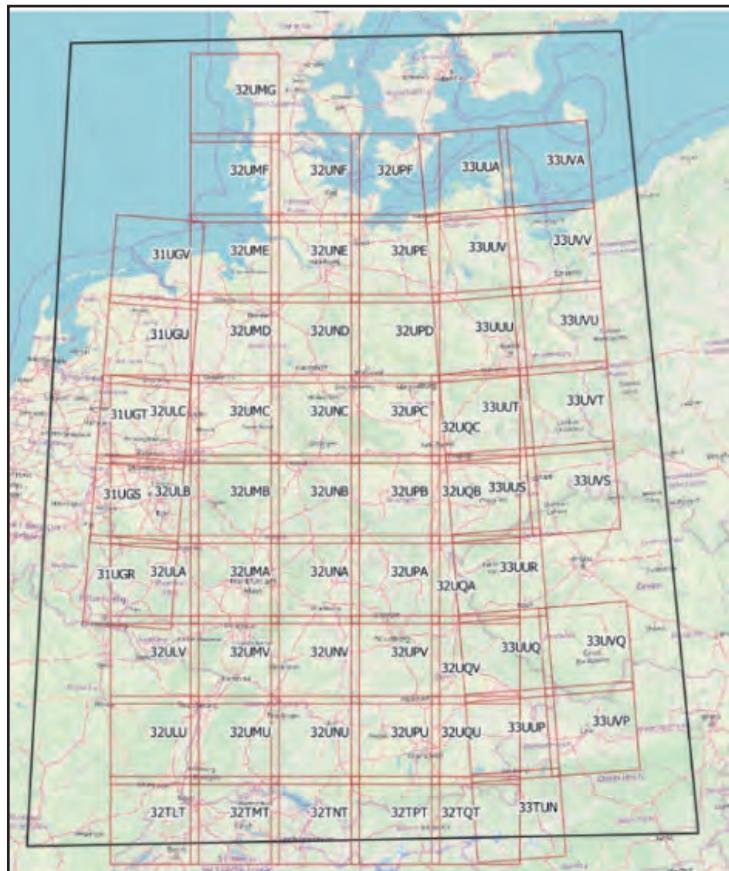


Abbildung 6: UTM-Kacheleinteilung und -bezeichnung über Deutschland wie es für Sentinel-2 genutzt wird (Quelle: CODE-DE)

schen Bezeichnung versehen, die ihren geografischen Bereich definiert. Diese Kacheln werden entsprechend dem globalen Koordinatensystem UTM (Universal Transverse Mercator) eingeteilt.

Die Sentinel 2-Kacheln haben eine Kantenlänge von 100 km, während Sentinel 3-Kacheln aus einer Abtastung mit einer Streifenbreite von 1270 km resultieren. Ein Pixel ist dabei das Quadrat mit der kleinsten räumlichen Auflösung der Szene des ausgewählten Sensors (s.o.), also im Fall von Sentinel-3 ein Quadrat von 300*300 m und im Fall von Sentinel-2 je nach Spektralband ein Quadrat von 10*10 m, 20*20 m oder 60*60 m (vgl. Tabelle 1).

Um einen Vergleich mit in situ Werten der betrachteten Messgrößen durchführen zu können, wäre es möglich nur ein Pixel auszuwerten, welches die in situ Messstelle abdeckt. Davon wird jedoch aus statisti-

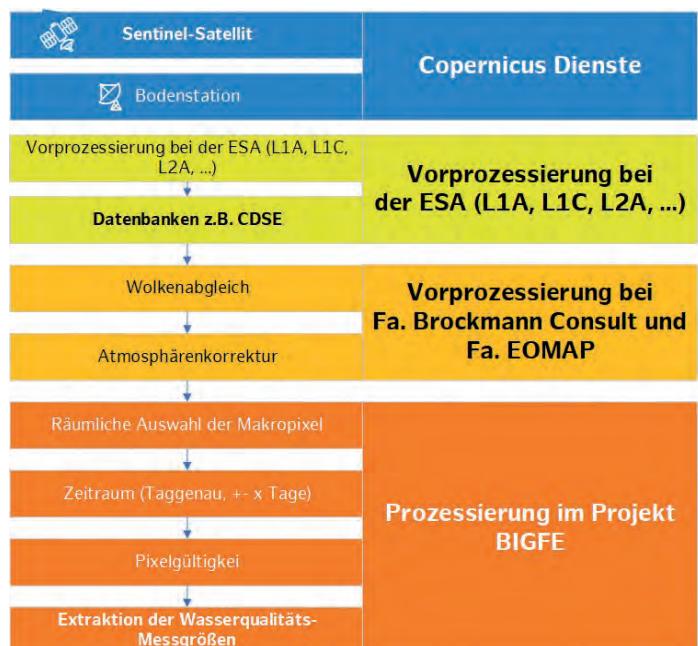


Abbildung 7: Stark vereinfachtes, generalisiertes Schema eines Prozessierungsablaufs von Satelliten-daten (verändert nach Friese et al., 2025)

schen Gründen dringend abgeraten (Bailey et al. 2006), da Satellitenmesssignale auch einem Rauschen unterliegen und daher ein Mittelwert oder Median über mehrere Pixel, sogenannte Makropixel, einen robusteren Messwert liefert (Bailey et al. 2006; EUMETSAT 2021). Alternativ können auch alle Pixel eines Gewässers ausgewertet werden, d.h. eine gewässerweite Auswertung erfolgen.

Für Sentinel-3-Aufnahmen kann eine 1-Pixel-Auswertung Sinn ergeben, wenn das Gewässer für ein Makropixel, wie es für eine Auswertung empfohlen wird (EUMETSAT 2021), nicht groß genug ist (3×3 Makropixel von S3 = 810.000 m^2). Ein Sentinel-3-Pixel deckt bereits eine Fläche von 90.000 m^2 ab und mittelt statistisch damit Inhomogenitäten auf der Wasseroberfläche.

Am Ende der Prozessierungskette muss über die Gültigkeit der einzelnen Pixel einer Szene entschieden werden (siehe Abbildung 7).

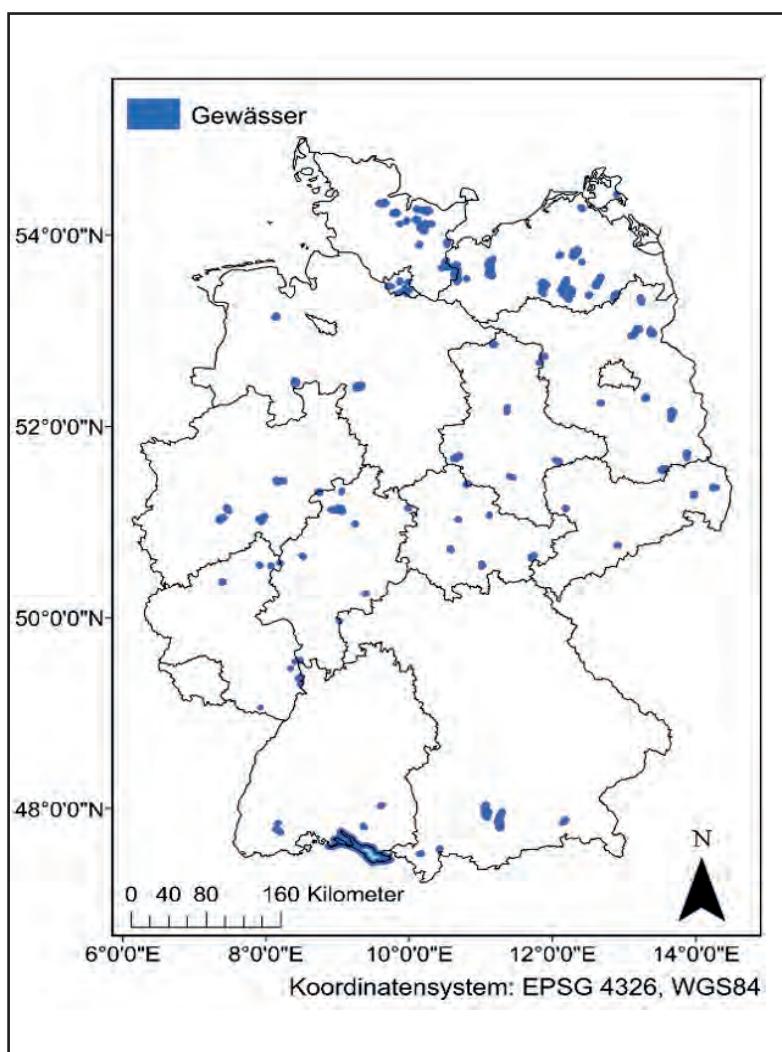


Abbildung 8: Referenzgewässer in BIGFE - 109 Seen und Talsperren in Deutschland (verändert nach Schröder et al. 2024)

Die Untersuchungsgebiete

Von den 13 in BIGFE assoziierten Landesumweltämtern wurden Laborwerte der Überwachungsprogramme (sog. in situ Messwerte) für den Zeitraum 2016 bis 2020 von insgesamt 109 Gewässern (Abbildung 8) für die drei Messgrößen Sichttiefe, Trübung und Chlorophyll-a zur Verfügung gestellt und mit Daten der Sentinel-Satelliten S2 und S3 in diesem Zeitraum verglichen.

Diese Auswahl an Gewässern gibt die Diversität deutscher Standgewässer nach Größe, Tiefe und Trophie nach Auskunft der beteiligten Bundesländer recht gut wieder (Abbildung 9).

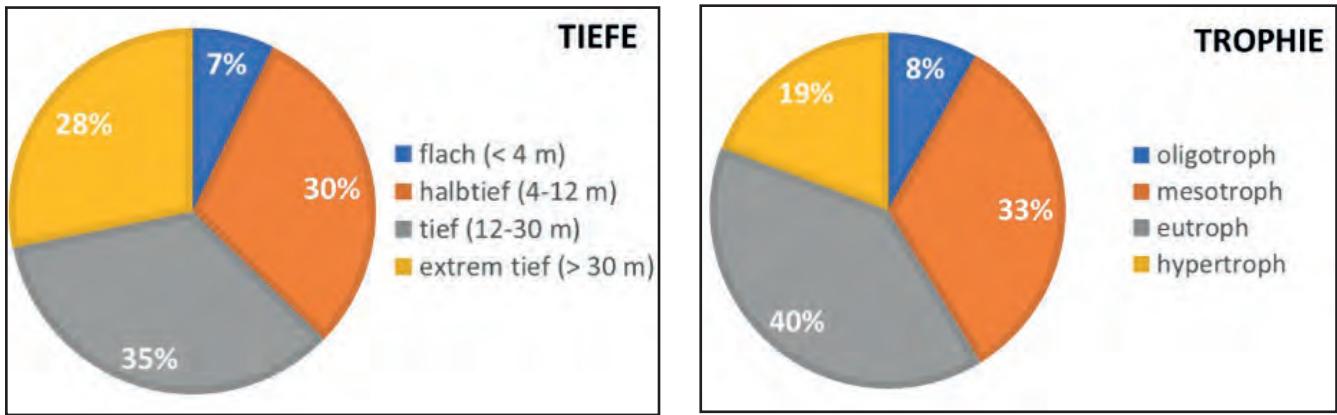


Abbildung 9: Prozentuale Verteilung von Gewässertiefe und trophischer Einstufung der BIGFE-Referenzgewässer (109 Seen und Talsperren in Deutschland)

Ergebnisse des Vergleichs mit Labordaten aus den Überwachungsprogrammen der beteiligten Bundesländer

Anmerkung: Im Vorwort wurde darauf hingewiesen, dass im Rahmen des BIGFE-Projektes sogenannte „naive“ Prozessierungen durchgeführt wurden (Kapitel 3).

Für die statistische Auswertung des Vergleichs von Satellitenwerten verschiedener räumlicher Auflösungen und zeitlicher Übereinstimmungen mit in situ Werten (Kapitel 4) wurden gemäß den Empfehlungen von (Seegers et al. 2018) zwei Fehlermaße angewendet (Abbildung 10):

- i) der mittlere absolute Fehler (**MAE**: mean absolute error) und
- ii) der **Bias** (Differenz der Mittelwerte zweier Datensätze). Zusätzlich wurde noch
- iii) die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (**RMSE**: root mean squared error) berechnet.

$$MAE = 10 \left(\frac{\sum_{i=1}^n |\log_{10}(satellite_i) - \log_{10}(in_situ_i)|}{n} \right)$$

$$Bias = 10 \left(\frac{\sum_{i=1}^n \log_{10}(satellite_i) - \log_{10}(in_situ_i)}{n} \right)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (satellite_i - in_situ_i)^2}{n}}$$

$$R^2 = \frac{\sum (\log_{10}(satellite_i) - \log_{10}(average_{satellite}))^2}{\sum (\log_{10}(satellite_i) - \log_{10}(average_{satellite}))^2}$$

$$slope = \frac{\log_{10}(satellite_1) - \log_{10}(satellite_2)}{\log_{10}(in_situ_1) - \log_{10}(in_situ_2)}$$

Abbildung 10: Gleichungen der statistischen Fehlermaße

Der Bias quantifiziert systematische Über- oder Unterschätzungen zwischen zwei Datensätzen und ist hier als Differenz der Mittelwerte für die in situ- und die Satelliten-basierten Werte definiert und daher nicht sehr anfällig für zufällige Fehler.

Der RMSE und der MAE sind beides Fehlermaße, die die Genauigkeit oder die paarweise Übereinstimmung zwischen den in situ- und den Satelliten-basierten Beobachtungen beschreiben. Da die Daten eine logarithmische Fehlerverteilung aufweisen, wurde der Empfehlung von Seegers et al. (2018) gefolgt und MAE und Bias anhand von log-transformierten Daten berechnet. Anschließend wurden sie in den linearen Raum rücktransformiert wurden, um die Interpretation zu erleichtern. Der RMSE wurde mit nicht-transformierten Daten berechnet, um die Vergleichbarkeit mit anderen Studien und die Interpretation zu erleichtern (Pahlevan et al. 2021).

Für den Vergleich der Satelliten- mit den in situ Daten wurde zusätzlich noch eine Regressionsanalyse durchgeführt und das Bestimmtheitsmaß R^2 der log-transformierten Daten berechnet.

Vergleich der räumlichen Auflösung zwischen Satellitendaten und Einführung in situ Werten anhand von Makropixeln.

Im BIGFE-Projekt wurden für alle verwendbaren Szenen Daten von Sentinel-2, die in einer zeitlichen Übereinstimmung mit den in situ Messwerten für die 3 Messgrößen standen, statistische Auswertungen mit 3×3 , 5×5 , 15×15 -Makropixeln und einer gewässerweiten Betrachtung durchgeführt (vgl. Abbildung 11 und Tabelle 2). Für Daten von Sentinel-3 wurden Vergleiche mit 1-Pixel, 3×3 -Makropixeln und ebenfalls einer gewässerweiten Betrachtung durchgeführt (Tabelle 2).



Abbildung 11: Darstellung von Makropixeln von S2 bei einer räumlichen Auflösung mit 60 m Kantenlänge pro Pixel am Beispiel des Barleber See in Magdeburg (rote Punkte = Messstellen); verändert nach Schröder et al. (2024)

Die Ergebnisse dieser statistischen Auswertungen sind im Detail in Schröder et al. (2024) beschrieben. Diese Broschüre gibt unsere Empfehlung für die räumliche Anwendung von Sentinel-2 und Sentinel-3-Aufnahmen zur Ableitung der drei Messgrößen wieder.

Tabelle 2: Ergebnis der Fehlermaße MAE, Bias und RMSE bei verschiedenen räumlichen Aggregationen (Makropixel) unter Verwendung taggenauer Übereinstimmung von Satellitenüberflug und in situ Probenahme mit getrennten MSI- (Sentinel-2) und OLCI-Daten (Sentinel-3) für die drei Messgrößen Chlorophyll-a, Trübung und Sichttiefe (N = Anzahl der Gewässer; Gw = Gewässerweit). Dunkelgrüne Schattierungen zeigen ein schlechteres Ergebnis der Variante an, während die hellsten Schattierungen das beste Ergebnis darstellen (verändert nach Schröder et al. 2024)

Sensor	Zielvariable	MAE					Bias					RMSE					N				
		1	3*3	5*5	15*15	Gw	1	3*3	5*5	15*15	Gw	1	3*3	5*5	15*15	Gw	1	3*3	5*5	15*15	Gw
MSI	Chlorophyll-a	-	1.8	2.8	3.8	2.8	-	0.8	0.8	0.8	0.7	-	27.0	26.3	31.9	26.0	-	396	400	377	437
MSI	Trübung	-	3.8	4.1	3.7	2.8	-	0.4	0.4	0.4	0.5	-	10.5	11.3	12.0	8.8	-	100	94	74	111
MSI	Sichttiefe	-	1.8	1.8	1.9	1.8	-	1.4	1.4	1.5	1.5	-	3.9	3.8	3.7	3.2	-	382	384	360	419
OLCI	Chlorophyll-a	2.9	2.8	-	-	2.8	0.8	0.8	-	-	0.8	38.8	34.2	-	-	32.7	477	525	-	-	585
OLCI	Trübung	3.5	2.9	-	-	2.6	0.3	0.4	-	-	0.4	13.9	11.9	-	-	11.5	36	51	-	-	43
OLCI	Sichttiefe	1.9	1.9	-	-	2.0	1.2	1.2	-	-	1.3	2.8	2.7	-	-	2.8	414	501	-	-	482

Die Unterschiede in den statistischen Kenngrößen für die gewählten Makropixel und die gewässerweite Betrachtung waren gering. Daher halten wir die Verwendung eines 3*3-Makropixels für Sentinel-2-Aufnahmen um eine in situ Messstelle bzw. die Auswertung einer gewässerweiten Betrachtung für Sentinel-2- und Sentinel-3-Aufnahmen für eine Anwendung im behördlichen Alltag für geeignet. Auch ein 3*3-Makropixel für Sentinel-3 kommt bei entsprechend großen Seen in Frage. Die Entscheidung, ob ein Makropixel oder die gesamte Seeoberfläche ausgewertet wird hängt dabei im Wesentlichen von der geplanten Verwendung der Ergebnisse ab.

Wenn für den Anwender die reine Validierung mit in situ Messwerten einer Messstelle im Vordergrund steht, kann eine Auswertung auf Basis eines Makropixels um die Messstelle herum ein besseres Ergebnis liefern, wenn Probenahme und Satellitenüberflug zeitgenau übereinstimmen. Sollen die Satelliteninformationen dagegen einen repräsentativen Wert für das ganze Gewässer ergeben oder z.B. für eine Trophie-Einstufung des Gewässers dienen, liefert eine gewässerweite Betrachtung möglicherweise den größeren Informationsgehalt.

Vergleich verschiedener zeitlicher Auflösungen zwischen in situ Messungen und den Aufnahmen der Satelliten

Um einen Vergleich mit in situ Daten vornehmen zu können, sollten Satellitenaufnahme und Probenahme idealerweise auf den gleichen Tag, im besten Fall sogar auf dieselbe Stunde fallen. In der Praxis werden aber die Probenahmen nicht an den Satellitenüberflügen ausgerichtet und für jeden Probenahmetermin in Übereinstimmung mit einem Satellitenüberflug muss zudem Wolkenfreiheit herrschen, um einen Vergleich vornehmen zu können.

Im BIGFE-Projekt ergaben sich daher in der Auswertung der 109 Gewässer über 5 Jahre (2016-2020) nur wenige taggenaue Übereinstimmungen (sog. „Matches“). Daher wurden neben den taggenauen Messungen der Satelliten auch Abweichungen zwischen Satellitenüberflug und Probenahme von ± 1 und ± 5 Tage statistisch hinsichtlich der Übereinstimmung mit den in situ Werten ausgewertet (Abbildung 12). Damit erhöhte sich die Anzahl der für einen Vergleich heranziehbaren Wertepaare von Satellitensignal und in situ Wert je nach Satelliten bis zu einem Faktor 5 (Spalte „N“ „ $\pm 5d$ “ in Tabelle 3).

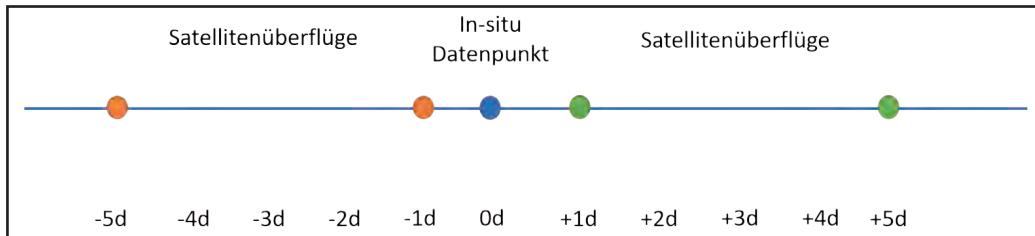


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Vergleichs von *in situ* Probenahme und Satellitenüberflügen

Je nach Gewässergröße, Jahreszeit, Wettersituation und trophischen Zustand können damit im Einzelfall auch die Abweichungen zwischen den beiden Werten erwartungsgemäß deutlich zunehmen. In der statistischen Auswertung über die 109 Gewässer und 5 Jahre (2016-2020) sind aber die Unterschiede zwischen den 3 betrachteten zeitlichen Übereinstimmungen von Satellitenüberflug und Probenahme (taggenau, ± 1 und ± 5 Tage) für die 3 Fehlermaße mit Ausnahme des RMSE eher gering (Tabelle 3). Für den Anwender/Nutzer ergibt sich damit die Möglichkeit, nicht nur auf taggenaue Satellitenaufnahmen für einen Vergleich mit in situ Werten zurückzugreifen, sondern auch davon abweichende Überflugdaten mit einem Zeitversatz von bis zu ± 5 Tagen zu verwenden.

Tabelle 3: Ergebnis der Fehlermaße MAE, Bias und RMSE bei verschiedenen zeitlichen Abständen von Satellitenüberflug und *in situ* Probenahme für die drei Messgrößen Chlorophyll-a, Trübung und Sichttiefe (N = Anzahl der Gewässer; d = Tag). Dunkelgrüne Schattierungen zeigen ein schlechteres Ergebnis der Variante an, während die hellsten Schattierungen das beste Ergebnis darstellen (verändert nach Schröder et al. 2024)

Zielvariable	MAE			Bias			RMSE			N		
	$\pm 0d$	$\pm 1d$	$\pm 5d$	$\pm 0d$	$\pm 1d$	$\pm 5d$	$\pm 0d$	$\pm 1d$	$\pm 5d$	$\pm 0d$	$\pm 1d$	$\pm 5d$
Chlorophyll-a	2.70	2.66	2.79	0.80	0.81	0.79	31.32	36.54	35.61	921	2167	4625
Trübung	3.44	2.86	2.86	0.39	0.48	0.50	11.63	11.84	13.00	151	421	1000
Sichttiefe	1.89	1.81	1.82	1.31	1.27	1.31	3.25	3.17	3.38	883	2096	4539

Vergleich von in situ Messwerten und Satellitendaten für Sichttiefe und Chlorophyllgehalt

Die in situ Messwerte dienten auch zum Vergleich mit den entsprechenden Fernerkundungsprodukten, die von den Prozessierungsroutinen der beiden beteiligten Firmen generiert wurden. Wie bereits eingangs erläutert, wurden diese Prozessierungen als „naive Anwendung“ durchgeführt, d.h. es erfolgten keine gesonderte Berücksichtigung Gewässer-spezifischer Charakteristika bei der Prozessierung. Die Satellitendaten wurden als gewässerweiter Median verarbeitet und die Ergebnisse beider Prozessierungsroutinen im Sinne eines Modelensembles. Es wurden nur taggenaue Vergleiche verwendet. Eine ausführliche Diskussion dieser statistischen Betrachtungen findet sich bei Schmidt et al. (2024).

Für eine statistisch belastbare Auswertung von Trübungswerten lagen zu wenig in situ Analysen vor ($N=52$). Tabelle 4 zeigt daher nur die statistischen Ergebnisse für den Vergleich von Sichttiefe und Chlorophyllgehalt der beiden Satelliten S2 und S3 mit den entsprechenden in situ Werten.

Messgröße	Sentinel -2	Sentinel -3
Anzahl der Wertepaare (N)		
Sichttiefe	238	235
Chlorophyll	249	269
Regressionsanalyse / Steigung		
Sichttiefe	0,8	0,7
Chlorophyll	0,8	0,8
Regressionsanalyse / R²		
Sichttiefe	0,68	0,70
Chlorophyll	0,63	0,71
MAE		
Sichttiefe	1,8	1,7
Chlorophyll	2,0	1,9
RMSE		
Sichttiefe	2,3	1,8
Chlorophyll	20,7	27,2
Bias		
Sichttiefe	1,5	1,3
Chlorophyll	1,0	1,1

Tabelle 4: Statistische Ergebnisse des Vergleichs von Satellitendaten von Sentinel-2 und Sentinel-3 für Sichttiefe und Chlorophyll-a mit in situ Werten von 109 Gewässern im Zeitraum 2016 bis 2020 (verändert nach Schmidt et al. 2024)

Anhand der Regressionsanalyse ist zu erkennen, dass die Übereinstimmungen zwischen Satellitenwert von Sentinel-2 und in situ Wert sowohl für die Sichttiefe mit einem R^2 von 0,68 als auch für Chlorophyll-a mit einem R^2 von 0,63 als recht gut einzustufen ist (Abbildung 13).

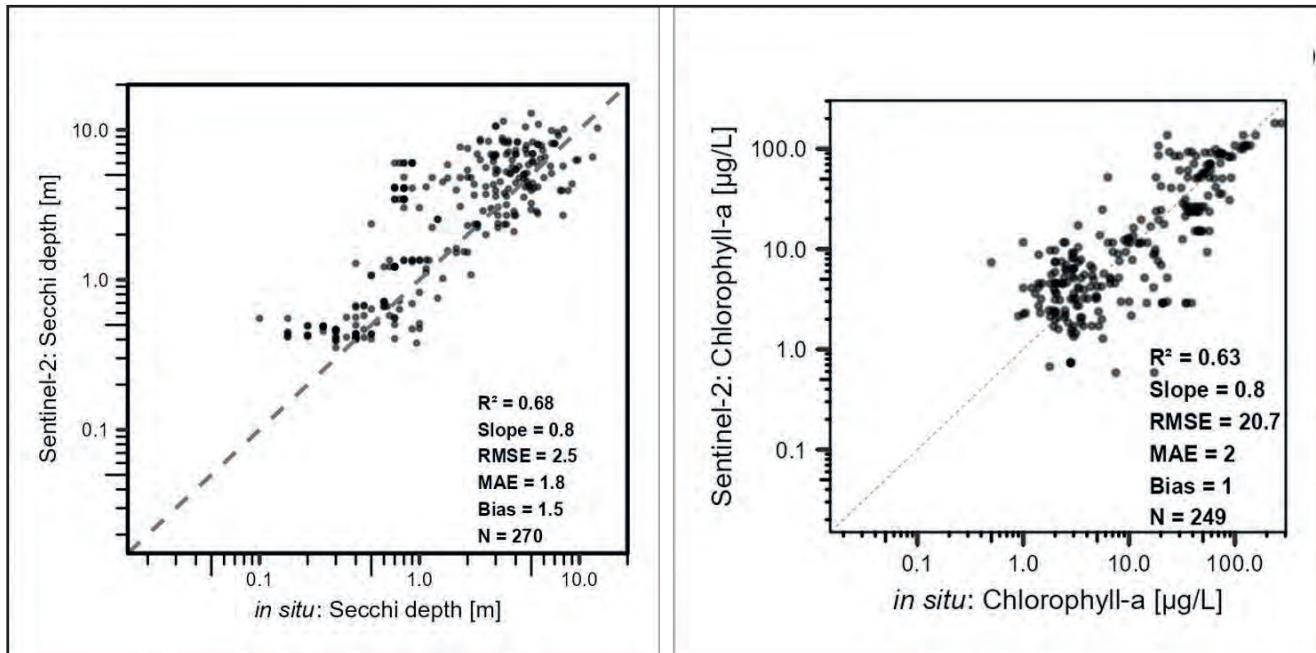


Abbildung 13: Ergebnisse der Regressionsanalysen für die Sichttiefe und Chlorophyll-a von in situ Werten (X-Achse) und Satellitenauswertungen Sentinel-2 (Y-Achse) (aus Schmidt et al. 2024)

Für Sentinel-3 sind die Übereinstimmungen noch etwas besser mit einem R^2 von 0,70 für die Sichttiefe bzw. einem R^2 von 0,71 für Chlorophyll-a (Abbildung 14).

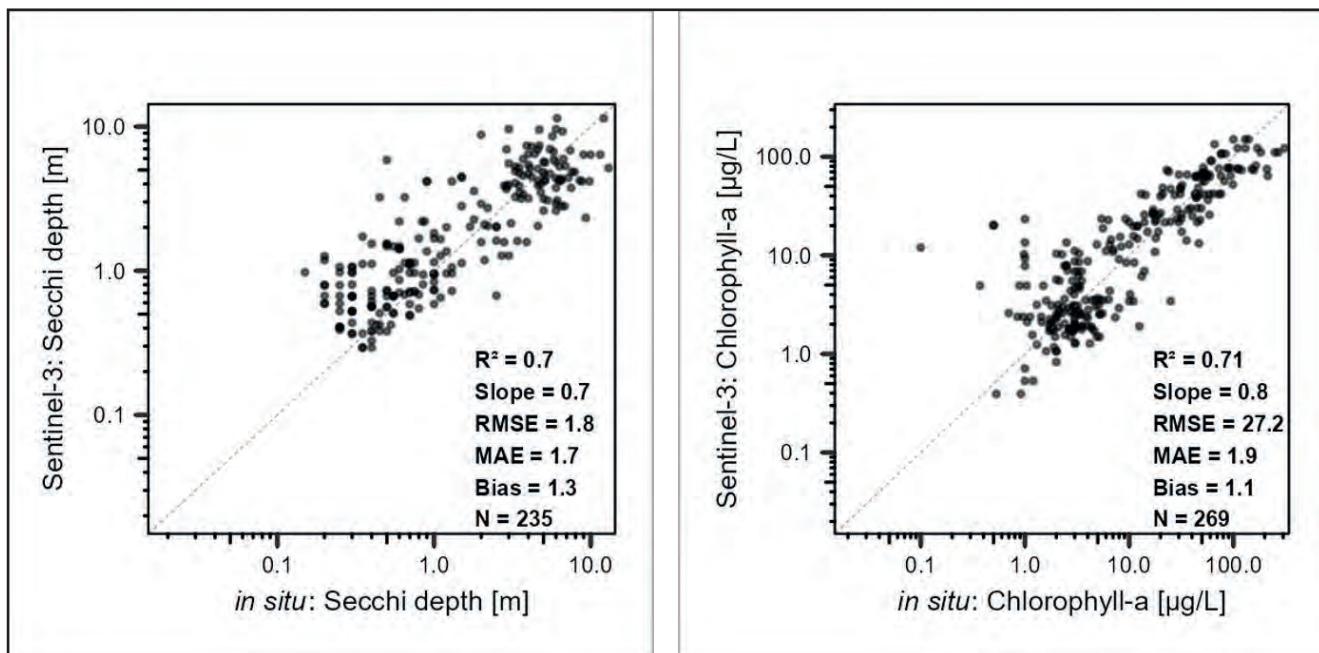


Abbildung 14: Ergebnisse der Regressionsanalysen für die Sichttiefe und Chlorophyll-a von in situ Werten (X-Achse) und Satellitenauswertungen Sentinel-3 (Y-Achse) (aus Schmidt et al. 2024)

Hierbei muss auch berücksichtigt werden, dass nicht nur das Satellitensignal einer Reihe von Störungen unterliegt und damit fehlerbehaftet ist, sondern auch der *in situ* Wert (z.B. Veränderungen bei Konservierung, Lagerung und Transport, unterschiedliche Laboranalysenverfahren, verschiedene Bearbeiter). Für die Validierung ist der *in situ* Wert zwar als Referenzwert gesetzt, aber inwieweit er dem „wahren“ Wert entspricht bleibt mit einer gewissen Unsicherheit behaftet.

Auch die große räumlich-zeitliche Dynamik von Algenpopulationen ist relevant, denn selbst bei taggenauem Vergleich von Satellitenaufnahme und *in situ* Wert, kann allein die Abweichung in der Tageszeit zwischen Satelliten-Überflug und Probenahme einen erheblichen Unterschied zwischen beiden Werten verursachen. Bei der Nutzung von Laborwerten der Landesumweltämtern, für die in der Regel keine Uhrzeit-genaue Zeitangabe vorliegt, war der Tag-genaue Vergleich die bestmögliche Zeitauflösung. Für eine exakte Validierung müssten dagegen die *in situ* Daten innerhalb eines wenige Stunden-Fensters zum Satelliten-Überflug vorliegen (Alikas et al. 2023; Lladrà-Llabrés et al. 2023; Park et al. 2024).

Die Regressionsanalyse, aber auch die anderen statistischen Kennzahlen, wie MAE und Bias zeigen, dass die Satellitenaufnahmen unter Berücksichtigung der entsprechenden Unsicherheit eine hohe Aussagekraft für die Sichttiefe und den Chlorophyllgehalt besitzen.

Die Fernerkundungsdaten werden immer mit einer Punktanalyse der *in situ* Daten verglichen (Tabelle 5 und Abbildung 15). Ein aus vielen Pixeln gewässerweit abgeleiteter Medianwert für Chlorophyll-a ist daher oftmals weitaus repräsentativer für den betrachteten Wasserkörper, als die punktuelle Information aus der *in situ* Probenahme.

Tabelle 5: Flächen- und Volumenvergleich einer punkthaften *in situ* Probenahme mit der räumlichen Auflösung von Sentinel-2 und Sentinel-3 (Signalinformationen am Satelliten bis maximal Sichttiefe; im Beispiel = 2m)

Sichttiefe 2 m im Beispiel	Fläche (m ²)	Volumen
in situ	1	500 mL – 2 L
Sentinel-2 (1 Pixel bei 10*10 m)	100	200 m ³
Sentinel-3 (1 Pixel mit 300*300 m)	90.000	180.000 m ³

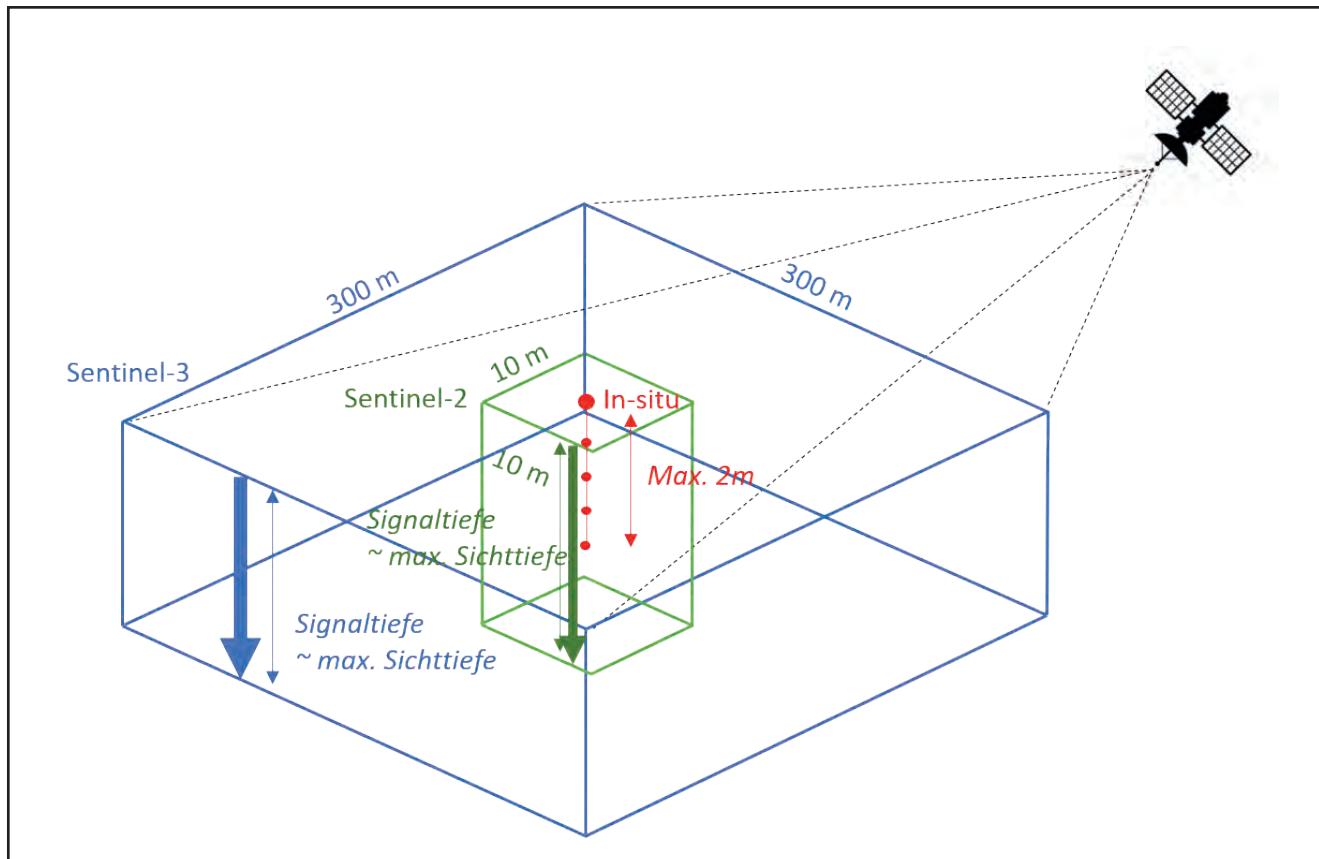


Abbildung 15: Schematische Darstellung des Flächen- und Volumenvergleichs einer punkthaften *in situ* Probenahme mit der räumlichen Auflösung von Sentinel-2 (bei Kanälen mit 10 m Auflösung) und Sentinel-3 (Signalinformationen am Satelliten bis maximal Sichttiefe; im Beispiel = 2m)

4. Anwendungsbeispiele zur Überbrückung der „Letzten Meile“

Ziel des BIGFE-Projektes war es auch, für die Landesumweltämter einen Einstieg in die Satellitenfernerkundung zu bieten. Als „Letzte Meile“ wird von uns die Lücke bezeichnet, die zwischen der Bereitstellung der Daten von den Satelliten und der Anwendung dieser Daten in der täglichen Arbeit bei der Ermittlung der Gewässerqualität in den Landesumweltämtern besteht. Es sollen daher Wege aufgezeigt bzw. Handlungsempfehlungen gegeben werden, wie diese Lücke geschlossen werden könnte.

Umfragen im Nutzerkreis des Projektes (Landesumwelt- und Gesundheitsämter) haben gezeigt, dass spezifisch ausgearbeitete Zeitreihen, Übersichtstabellen, Darstellungen zur Verteilungsform und Karten zu Gewässerdaten gut einsetzbare Formate im behördlichen Kontext darstellen (Laue et al. 2025). Wie diese Nutzungen konkret in Landesumweltämtern aussehen könnten, sollen die folgenden Beispiele verdeutlichen. Es werden Kartenbilder, Ergänzungen von kontinuierlichen Messreihen, saisonale Mustererkennungen, Seensteckbriefe und Beispiele der Trophieklassifizierung dargestellt. Im Anschluss werden verschiedene Implementierungsoptionen zwischen der Satellitenfernerkundung und den Landesumweltämtern aufgezeigt, mittels derer die Beispiele in die Praxis überführt werden können.



Abbildung 16: RGB-Bild des Ratzeburger See, Schaalsee und Schweriner See sowie Umgebung. Sentinel-2 Aufnahme vom 2. Juli 2025

Karten

Die einfachste Option für die Bewertung von Gewässern durch die Satellitenfernerkundung stellen Satellitenbilder dar, in denen die prozessierten Daten bzw. Messgrößen in farblicher Abstufung in der Wasserfläche erzeugt werden (Abbildung 16 und Abbildung A18 im Anhang). Diese können dann in einer zeitlichen Reihenfolge die Veränderungen in einer Vegetationsperiode anzeigen. Aus den Daten zu den Bildern können dann weitere Auswertungen abgeleitet werden.

Messwertverdichtungen

Wie einleitend beschrieben, liegen nur für wenige Gewässer in Deutschland dichte Messreihen von Laborwerten aus (monatlichen oder noch häufigeren) Probenahmen vor. Auch können viele Gewässer (aufgrund der großen Anzahl) wenig bis überhaupt nicht bewertet werden. Hier können die Daten der Satellitenüberflüge und die daraus abgeleiteten Werte für Trübung, Sichttiefe und Chlorophyllgehalt als Ersatz oder zur Ergänzung und Verdichtung herangezogen werden (s. Abbildung 17). Die damit abgeleiteten Verteilungen von Algenaufkommen oder Trübung bieten somit eine ergänzende Methode in der ökologischen Gewässerbewertung.

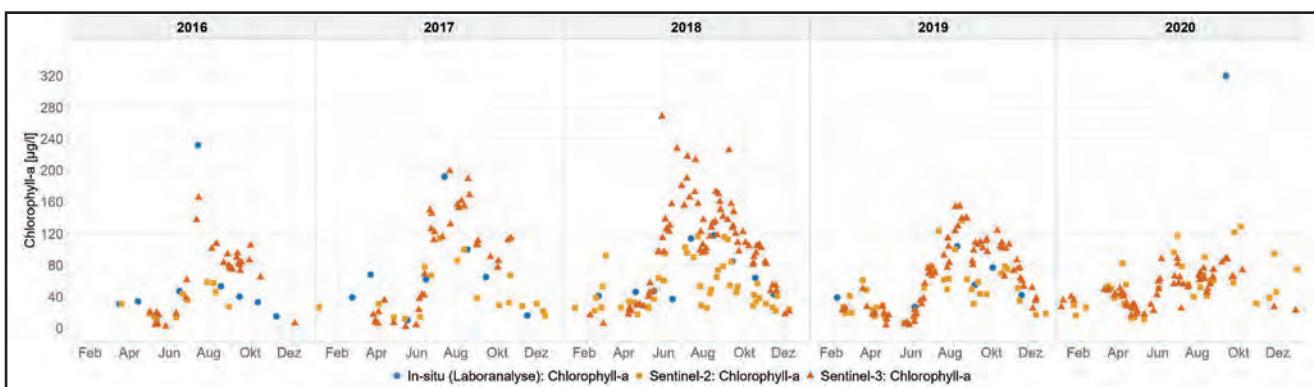


Abbildung 17: Beispiel für eine Messwertverdichtung von Chlorophyll-a Laboranalysen durch Satellitendaten von Sentinel-2 und Sentinel-3 für die Jahre 2016 bis 2020 in der Talsperre Quitzdorf (Sachsen)

Diese Methode ist kostengünstig und erlaubt eine relativ häufige sowie einfache, großflächige Überwachung von Gewässern. Sie bietet die Optionen, Veränderungen von Gewässern zeitnah zu identifizieren und räumlich zuzuordnen. Bewirtschaftungsmaßnahmen könnten effektiver gesteuert oder die Wirksamkeit von Maßnahmen abgeschätzt werden. So können z.B. auch die Dynamiken der Algenentwicklungen in der Vegetationsperiode in einem Maße erkannt werden, die mit den Standardmethoden nicht beobachtbar sind.

Saisonale Muster

Liegen wie am Beispiel der Talsperre Quitzdorf gezeigt (Abbildung 17) über mehrere Jahre Daten aus den gleichen Monaten oder Tagen vor, so können diese zusammengefasst werden (Mittelwert- oder Medianbildung mit Standardabweichung bzw. Quartile) und im Jahresverlauf saisonale Muster er-

kennen lassen (Abbildung 18). Dies kann aber nur gelingen, wenn ausreichend Messwerte vorliegen, wofür in der Regel Satellitendaten erforderlich sind.

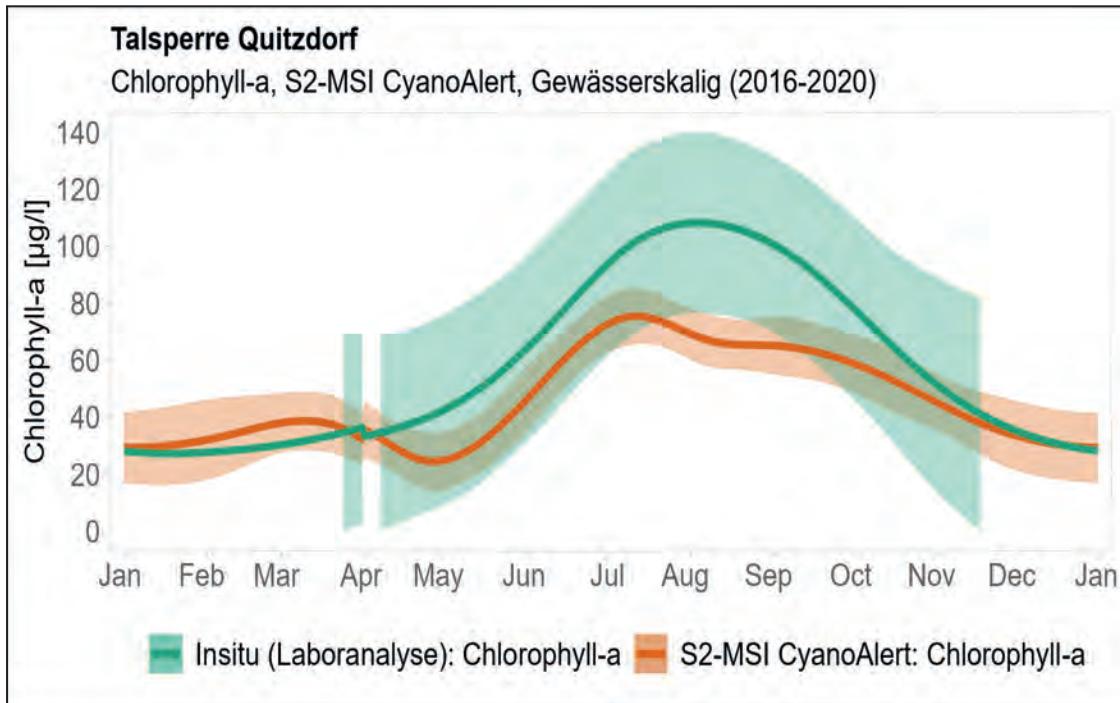


Abbildung 18: Beispiel für die Darstellung von saisonalen Mustern anhand des Chlorophyll-a in der Talsperre Quitzdorf aus Laborwerten (grün) und Satellitendaten (Sentinel-3, orange) von 2016 bis 2020 im Vergleich (Satellitenauswertung Gewässerweit); Darstellung als geglättete Interpolation (GAM-Analyse)

Seensteckbriefe

Zeitreihen aus Satellitendaten oder/und in situ Messreihen, die den zeitlichen Verlauf einer Messgröße darstellen, wie am Beispiel der Talsperre Quitzdorf für Chlorophyll gezeigt (s. Abbildung 18) lassen sich auch mit statistischen Basis-Angaben dieser Werte, wie z.B. Jahresmittelwert, Jahresminimum und -maximum in Tabellenform kombinieren und durch Boxplots oder sogenannte Violinplots, welche eine Kombination aus einem Boxplot- und einem Dichtediagramm darstellen und Auskunft über die Verteilung der Daten sowie dem Median und Quartil der Daten geben ergänzen. Diese Kombination wurde im BIGFE-Projekt als „Seensteckbrief“ bezeichnet und für jedes der untersuchten Gewässer für den Untersuchungszeitraum 2016 bis 2020 erstellt (Abbildung 19).

Liegen die Labormesswerte und die prozessierten Satellitendaten in einer definierten Struktur (Datenbank) vor, lassen sich Routinen in einer der geläufigen Anwendungen, wie Python, RStudio oder MatLab programmieren, die diese Seensteckbrief automatisch erzeugen. Damit ergibt sich eine nützliche und leicht erkennbare Übersicht aller verfügbarer und ausgewerteter Messgrößen im Vergleich von Labor- und Satellitendaten für den behördlichen Alltag.

Steinhuder Meer (2910 ha) - Niedersachsen

Chlorophyll-a (2016-2020)

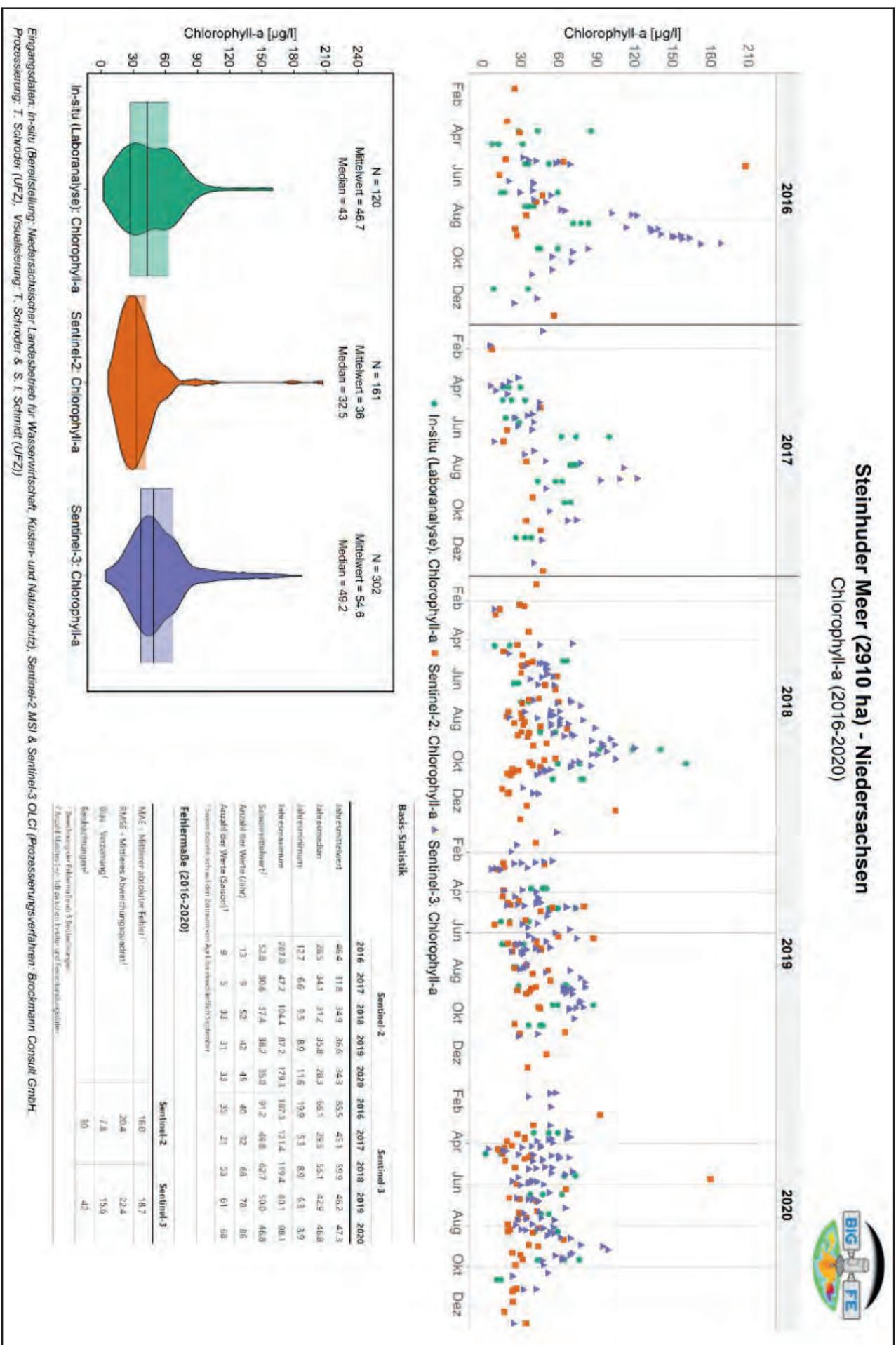


Abbildung 19: Beispiel für einen „Seensteckbrief“ aus dem BGFE-Projekt aus der Kombination von Zeitreihen (laborwerte, Sentinel-2- und Sentinel-3-Daten), statistische

Basiskenngrößen in Tabellenform und deren grafische Darstellung in Violinplots für das Steinhuder Meer (verändert nach Läue et al. 2025)

Trophieklassifizierung

Die Klassifizierung der Trophie von natürlichen Seen, Talsperren und Baggerseen wird nach den Richtlinien der LAWA durchgeführt. Der Trophie-Index der LAWA basiert auf den Saisonmittelwerten der Parameter Chlorophyll-a, Sichttiefe und Phosphor (Riedmüller et al. 2014) (nachfolgend als LAWA-Trophie bezeichnet). Hierbei werden über eine Vegetationsperiode mindestens vier Proben entnommen, im Labor untersucht und bewertet. Der Chlorophyll-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 Chlorophyll-a-Jahresmittelwerten einher. Die entsprechenden Algenentwicklungen sorgen dann für eine Reduktion der Sichttiefe. Da die drei Parameter meistens in direkter Abhängigkeit zueinanderstehen, ist die Bewertung der Trophie auch nur auf der Basis von Chlorophyll-a in erster Näherung möglich. Insbesondere bei kleineren und/oder bislang nicht in Monitoringprogramme integrierten Gewässern bietet eine solche vereinfachte Bewertung die Möglichkeit, eine einfache flächendeckende Übersicht über Trophieklassen und deren tendenzielle Entwicklungen zu schaffen.

Ein praktisches Beispiel für die Trophieklassifizierung mit Sentinel-2-Satellitendaten für Chlorophyll-a im Vergleich mit der nach der LAWA-Vorschrift ermittelten Trophie sowie mit einer nur auf den Laborwerten von Chlorophyll-a abgeleiteten Trophie wird im Folgenden demonstriert und soll potentielle, unterstützende Anwendungen der Satellitendaten in den Landesumweltämtern aufzeigen.

Vor der Berechnung der Trophie-Indizes wurden aus allen verfügbaren Satelliten- sowie in situ Chlorophyll-a Daten Saisonmittelwerte (April bis Oktober) berechnet, um den Vorgaben der LAWA-Trophie-Berechnung gerecht zu werden. Dieser Zeitraum deckt die Vegetationsphase in den meisten Seen ab und entspricht dem Vorgehen in der LAWA-basierten Klassifikation. Der Saisonmittelwert aus den Satellitendaten wurde für die gesamte Fläche des Sees berechnet, im Gegensatz zu den Punktmessungen der in situ Messverfahren.

Die Chlorophyll-a Konzentration wird in dieser Berechnung der Trophie als einzige Messgröße verwendet und der Trophie-Index $TIChl-a$ mit nachfolgender Gleichung berechnet:

Gleichung 1: *Berechnung des Chlorophyll-a Trophie-Index ($TIChl-a$)*

$$TIChl-a = 0,856 * \ln(\text{Chlorophyll-a Saisonmittelwert}) + 0,56$$

Der jeweils jährliche Chlorophyll-a Saisonmittelwert der Seen, zum einen aus den Laborwerten (in situ), zum anderen aus den Satellitendaten wird in Gleichung 1 eingefügt und so der Laborbasierte bzw. der Satellitenbasierte Trophie-Index berechnet (Tabelle 6). Im Anschluss erfolgt die Zuordnung des $TIChl-a$ in die Trophieklassen. Zum vereinfachten Vergleich wurden nur fünf Trophieklassen: oligotroph, mesotroph, eutroph, polytroph und hypertroph gebildet (Tabelle 6).

Tabelle 6: Vereinfachte Trophie-Klassengrenzen für Chlorophyll-a angelehnt an die Vorgaben der LAWA
(Riedmüller et al. 2014; aus Laue et al. 2025)

Obere Klassengrenze Chlorophyll-a Saison- mittelwert ($\mu\text{g/L}$)	Trophie-Index	Trophiekasse	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

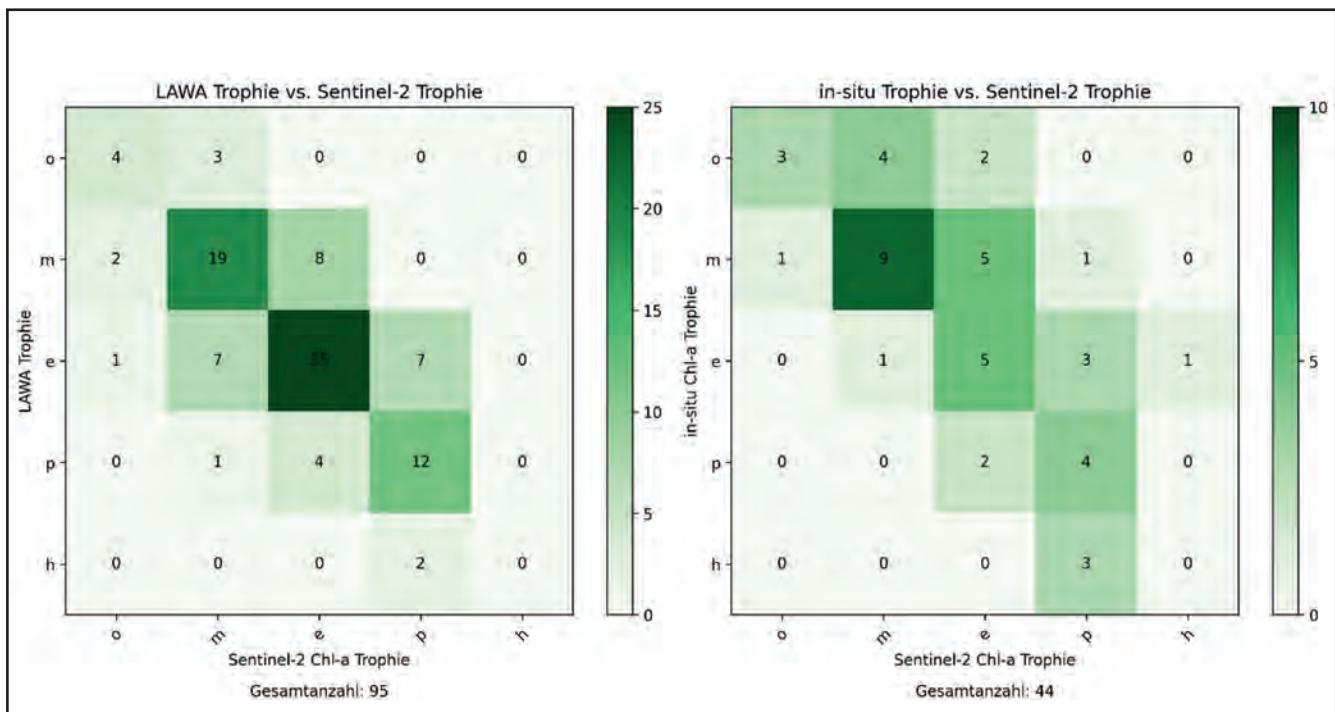
Konfusionsmatrizen

Für den Vergleich der Trophie-Indices nach LAWA und Chlorophyll-a Labor- bzw. Satellitenbasiert werden 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.

Den Vergleich zwischen der LAWA- und der Satellitenbasierten (Sentinel-2) Trophieklassifizierung zeigt Abbildung 20 (links). Die Satelliten-Daten repräsentieren die Klassifizierungsergebnisse für 95 Gewässer mit den Chlorophyll-a-Saisonmittelwerten aus 2020, bei denen sowohl die LAWA-Trophie (berechnet aus Chlorophyll-a, Sichttiefe und Phosphor) als auch Sentinel-2-Daten vorlagen. Gute Übereinstimmungen bei der trophischen Klassifizierung, basierend auf Satellitendaten, wurden für Gewässer mit mittlerem bis hohen Nährstoffgehalt festgestellt. Im Gegensatz dazu zeigte sich bei nährstoffarmen (oligotrophen) Gewässern eine tendenzielle Überschätzung der trophischen Einstufung durch Satellitendaten.

In der Abbildung 20 (rechts) wird die Trophieklassifizierung von 44 Gewässern, basierend auf *in situ* Chlorophyll-a Messungen (y-Achse), mit der Satellitenbasierten Trophieklassifizierung verglichen. Im Vergleich zum LAWA-basierten Ansatz (Abbildung 20, links) sind hier bei nährstoffreichen wie nährstoffarmen Seen weniger Übereinstimmungen zu finden. Bei meso- und polytropfen Seen zeigen sich in Einzelfällen Abweichungen von bis zu zwei Trophieklassen. Trotzdem ist in beiden Ansätzen die überwiegende Mehrheit der Gewässer korrekt durch die Satellitenbasierten Chlorophyll-a Werte klassifiziert. Die systematischen Überschätzungen bei nährstoffärmeren Seen durch den Satellitenbasierten Ansatz deuten auf eine ungenaue Detektion von sehr niedrigen Chlorophyll-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.

Abbildung 20: Konfusionsmatrizen der LAWA-Trophie (links) und der Trophie aus Chlorophyll-a Saisonmittelwerten von *in situ* Messungen (rechts) im Vergleich zur Trophie berechnet aus den



Chlorophyll-a-Saisonmittelwerten des Sentinel-2 Satelliten (aus Laue et. al. 2025)

Die aus den Chlorophyll-a-Saisonmittelwerten des Sentinel-2-Satelliten abgeleiteten Trophieklassifizierungen bieten eine neue, vielversprechende Methode in der ökologischen Gewässerbewertung. Diese Methode ist kostengünstig und erlaubt eine großflächige Überwachung von Gewässern. Außerdem bietet sie die Möglichkeit, 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, d.h. 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 die Trophie-Index-Berechnung nach LAWA oder die Aufstellung einer neuen Berechnungsformel des Index, speziell für Chlorophyll-a und Sichttiefe aus Satellitendaten. In dieser Studie wurden Daten der Fernerkundung in eine Gleichung eingesetzt, die für *in situ* Daten empirisch entwickelt wurde. Mit diesem Verfahren zeigt die Berechnung der Trophie eine Stärke für die Anwendung von Satellitendaten für Landesumweltämter auf.

5. Vom Satellitenbild zu den Wasserqualitätsprodukten

Im Folgenden wird die Nutzung des Copernicus Data Space Ecosystems (CDSE) und die Verarbeitung von Daten mit dem ESA-Softwaretool in SNAP gezeigt. Mit Hilfe des CDSE und SNAP lässt sich auch ein gutes Verständnis für die Prozessierung der Satellitendaten gewinnen. Dies unterstützt dann auch bei der Überlegung, welche der Produkte des Produktkatalogs (siehe Kapitel 6) die optimale Lösung für die tägliche Arbeit im Landesumweltamt darstellen könnte.

Neben dem CDSE gibt es noch andere Möglichkeiten, um an die Datensätze zu gelangen. Wie weiter oben erwähnt, ist dies auch über die deutsche Plattform CODE-DE möglich. CODE-DE ist Teil der Geoinformationsstrategie Deutschlands und stellt Copernicus-Daten und Cloud-Prozessierung für deutsche Behörden bereit. Die meisten Inhalte dieses Kapitels wurden auch auf dem 2. BIGFE Statusseminar vorgestellt. Die Präsentation ist unter <https://www.ufz.de/bigfe/index.php?de=48770> einsehbar.

Vom Sentinel-2 Satelliten zum Produkt

Die zwei Sentinel-2 Satelliten umkreisen unsere Erde auf polumlaufenden Bahnen und zeichnen Daten auf. Wegen der größtmöglichen Reflektanzen des Sonnenlichts, werden die Daten zur Mittagszeit aufgezeichnet, dies liefert die bestmöglichen Messsignale.

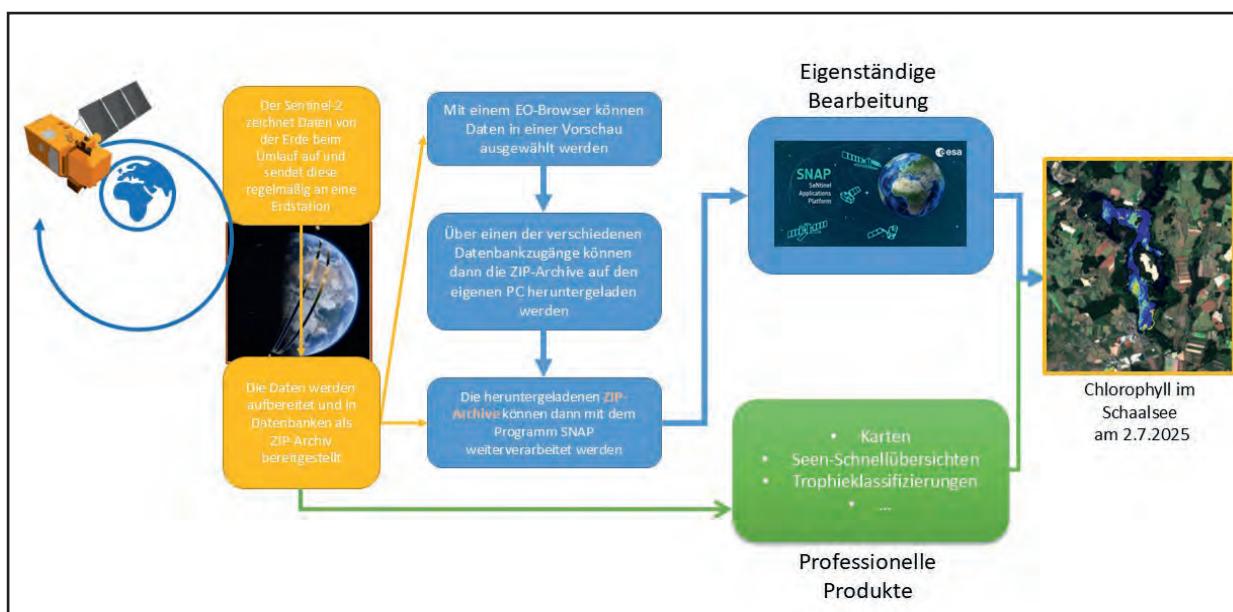


Abbildung 21: Vom Satelliten zum fertigen Bilder einer FE-Szene

Regelmäßig senden die Sentinel-Satelliten ihre Daten an eine Erdstation. Die gesendeten Daten werden dann in verschiedenen Leveln (<https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-processing>) aufbereitet und in Datenbanken als ZIP-Archive breitgestellt (Abbildung 21). In der Regel stehen die Daten noch am selben Tag zum Download bereit. Die Level L1C und L2A sind öffentlich zugänglich.

Copernicus Data Space Ecosystems (CDSE)

Die Datenbereitstellung (u.A. ZIP-Archive) steht über das Copernicus Data Space Ecosystem zur Verfügung (<https://dataspace.copernicus.eu/explore-data>). Das CDSE bietet ein offenes System, das kostenlosen und sofortigen Zugang zu einer Vielzahl von Daten und Diensten aus den Copernicus-Sentinel-Missionen anbietet. Im CDSE ist der Copernicus EO-Browser integriert. Dieser Browser erlaubt eine einfache Vorschau auf die aktuell zur Verfügung stehenden Satellitendatensätze. Ebenso ist für registrierte Nutzer auch direkt der Download der ausgewählten Datensätze möglich, die dann in SNAP weiterverarbeitet werden können. Die Registrierung beim CDSE ist kostenlos.

EO-Browser des CDSE

Insgesamt werden große Datenmengen bewegt. Jedes ZIP-Archiv ist ca. 800MB groß, die Verarbeitung braucht recht leistungsstarke PCs. Das entpackte ZIP-Archiv ist dann ca. 7 GB groß, am Ende der hier gezeigten Prozesskette liegen ca. 9 GB Daten auf dem lokalen PC.

Die Daten werden immer in sogenannten UTM-Kacheln bereitgestellt. Diese Kacheln decken eine Fläche von je 100x100 km ab und beinhalten alle für die Verarbeitung der georeferenzierten Daten notwendigen Informationen.

ESA-Softwaretool SNAP

Die Sentinel Application Platform (SNAP) ist eine gemeinsame Architektur für alle Sentinel-Toolboxen. Auf der offiziellen Seite der ESA steht SNAP (<https://step.esa.int/main>) zum Download bereit. Die Software wurde von Brockmann Consult (Hamburg) mitentwickelt. Die SNAP-Architektur ist für die Verarbeitung und Analyse von Erdbeobachtungen (EO) entwickelt worden. SNAP und die enthaltenen Sentinel Toolboxen unterstützen neben den Sentinel-Sensoren, zahlreiche andere Satelliten und deren Sensoren.

Das SNAP-Benutzertool mit den Sentinel Toolboxen sind Open-Source-Software und werden unter der GNU GPL-Lizenz frei vertrieben.

Datenprozessierung mit SNAP im Detail

Im Anhang dieser Broschüre ist beispielhaft eine Datenprozessierung für eine Szene um den Ratzeburger See, den Schaalssen und dem Schweriner See sowie deren Umgebung anhand einer Aufnahme vom 2.7.2025 aufgezeigt.

6. Handlungsempfehlungen für Behörden und Anwender

Konzept einer Operationalisierung

Die Integration von Satellitenfernerkundungsdaten in das behördliche Gewässermonitoring unter Einsatz der aktuellen technisch-wissenschaftlichen Möglichkeiten kann einerseits mit fachkundig ausgebildeten Mitarbeitern in den Behörden selbst oder durch Dienstleister aus dem privaten Sektor, die auf die Verarbeitung von Satellitendaten spezialisiert sind, bereitgestellt werden.

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 Monitoringinformationen aus der Fernerkundung abbilden als auch den praktischen Bedarf der Landesämter erfassen. Diese Servicemodelle sind in BIGFE in vier Kategorien/Dienste aufgeteilt worden: Bereitstellungsdienst, Datendienst, Berichtsdienst und Echtzeitdienst (Abbildung 22). Sie zeigen mögliche und unterschiedliche Arbeitsverteilungen zwischen Dienstleistern und Lan-



Abbildung 22: Servicemodelle mit abgestuften Produktkategorien, die im BIGFE-Projekt für die Implementierung der Satellitendaten im behördlichen Gewässermonitoring auf Grundlage von Nutzerbefragungen entwickelt wurden (verändert nach Laue et al., 2025)

desämtern auf (Tabelle 7). Diese Kategorien berücksichtigen auch unterschiedliche Arten des Datenzugriffs auf die Satellitenbasierten Umweltinformationen. Die kategorisierten Servicemodelle sind nicht starr, sondern beliebig modifizierbar und kombinierbar. Auch weitere alternative Herangehensweisen wie z.B. 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).

Tabelle 7: Mögliche Aufgabenverteilungen zwischen Dienstleistern und Landesämtern der im BIGFE-Projekt entwickelten Servicemodelle (verändert nach Laue et al. 2025)

Kategorie	Bereitstellungs-	Daten-Service	Berichts-Service	Echtzeit-Service
	Service			
Datenbeschaffung	Landesamt	Dienstleister	Dienstleister	Dienstleister
Prozessierung	Landesamt	Dienstleister	Dienstleister	Dienstleister
Auswertung	Landesamt	Landesamt	Dienstleister	Dienstleister
Qualitätssicherung	Landesamt	Landesamt	Dienstleister	Landesamt
Visualisierung	Landesamt	Landesamt	Dienstleister	Landesamt
Berichte	Landesamt	Landesamt	Dienstleister	Landesamt
Kartendienste	Landesamt	Landesamt	Dienstleister	Dienstleister
Berichte	Landesamt	Landesamt	Dienstleister	Dienstleister

Bereitstellungsdienst

Der Bereitstellungsdienst richtet sich an Nutzende, die eigene Prozessierungsketten aufbauen und den gesamten Datenverarbeitungsprozess, von der Validierung bis zur Berichtserstellung selbst übernehmen können. Diese Nutzer sind unabhängig von externen Dienstleistern, benötigen jedoch erhebliche Fachkenntnisse und personelle 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.

Datendienst

Der Datendienst bietet eine gewisse Entlastung der Fachbehörden, indem aus vordefinierten Prozessierungen fertige Produkte vom Serviceprovider ausgewählt werden können. Während die Prozessierung extern durchgeführt wird, verbleiben Verarbeitungsschritte, wie die Datenanalyse und Visualisierung in den Landesämtern. Eine Auswertung wie die eigene Trophieklassifizierung wäre beispielsweise möglich. Dies reduziert den internen Aufwand, führt jedoch zu zusätzlichen Kosten für die Nutzung externer Prozessierungsplattformen.

Berichtsdienst

Der Berichtsdienst geht einen Schritt weiter und umfasst die komplette Auslagerung der Datenprozessierung einschließlich statistischer Analyse und Visualisierung 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 erreichen, erfordert jedoch die Akzeptanz eines geringeren Einflusses auf die Datenverarbeitung und den höheren externen Kostenaufwand.

Echtzeitdienst

Der Echtzeitdienst 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 zum Berichtsdienst und erlaubt ein „Near-Real-Time“-Monitoring. Diese Daten sind über eine browserbasierte Anwendung vom Serviceprovider zugänglich, können online eingesehen und bewertet sowie in GIS-Systeme der Landesämter übertragen werden, was eine operationelle Nutzung der Informationen ermöglicht. Eine Kombination mit kontinuierlichen Messreihen ist hier ebenfalls denkbar. Diese Lösung erfordert nur geringfügig interne Ressourcen, führt jedoch zu einem vollständigen Outsourcing der Datenverarbeitung und entsprechenden Kosten. Für Badegewässer oder hoch-prioritäre Gewässer wie zum Beispiel große Trinkwassertalsperren könnte aber auf diese Weise ein sehr umfassendes Wassergütemonitoring, beziehungsweise sogar ein Frühwarnsystem für kritische Entwicklungen, etabliert werden.

Empfehlung

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

Grundsätzlich wäre es sinnvoll, wenn die zweckmäßigsten Auswertungen von Satellitendaten unter den Ländern in der LAWA abgestimmt würden. Das könnte dann helfen harmonisierte Daten zu erfassen und für die Zukunft zu nutzen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Nutzung der Sentinel-Satelliten S2 und S3 hat sich als hilfreich für die Überwachung von Seen und Talsperren in Deutschland erwiesen. Die Vor- und Nachteile der Fernerkundung sind gut bekannt (Tabelle 8). Die kontinuierliche Verfügbarkeit und die großflächige Abdeckung der Satellitendaten ermöglichen eine effiziente Überwachung der Wasserqualität, insbesondere bei der Erfassung von Sichttiefe, Trübung und Chlorophyll-a.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">• Gute zeitliche Abdeckung (täglich für Sentinel-3; 2- bis 5-tägig für Sentinel-2)• Hohe räumliche Auflösung (300 m für Sentinel-3 und 10-60 m für Sentinel-2)• Flächenhafte Erfassung des gesamten Gewässers anstatt von nur punktuellen in situ Proben• Schnelle und für Level 1C und 2 kostenfreie Datenbereitstellung• Globale Abdeckung• Sinnvolle Ergänzung des in situ Monitorings• Automatisierbarkeit und operationeller Betrieb realisierbar	<ul style="list-style-type: none">• Bei Wolkenbedeckung keine Ergebnisse• Nur Werte aus Integration bis Sichttiefe ableitbar• IT-intensive Datenprozessierung• Nur ausgewählte Messgrößen verfügbar (z.B. Temperatur, Chlorophyll, Sichttiefe, Trübung)• Unsicherheiten in der Messgenauigkeit höher als bei klassischen Verfahren.• Stellenweise nicht-korrigierbare Störungen durch Effekte wie Spiegelungen, Randeffekte oder Schattenwürfe

Tabelle 8: Zusammenstellung von Vor- und Nachteilen der Satelliten-basierten Fernerkundung der Wasserqualität (aus Friese et al., 2025)

Die Stärken der Satelliten-basierten Methoden liegen in der hohen räumlichen Auflösung und verhältnismäßig hohen zeitlichen Abdeckung (vor allem bei S3). Grenzen des Satelliten-basierten Monitorings sind in der überwiegenden Erfassung der oberen Gewässerschichten (Integration der Information bis zur Sichttiefe) und auch in den teilweise hohen Fehlern in Einzelmessungen (oftmals bedingt durch nicht korrigierbare Effekte wie Sonnenlichtreflektion oder Signalstreuung in der Atmosphäre) zu sehen, sowie in der Abhängigkeit von Wolken-freien Bedingungen. Für verlässliche quantitative bzw. belastbare Bewertungen sind daher weiterhin in situ Beprobungen unerlässlich, z.B. im Rahmen von judikativen oder ordnungspolitischen Verfahren oder bei der Auslösung Kosten-intensiver Maß-

nahmen, die aber durch Satelliten-basierte Informationen räumlich und zeitlich ergänzt und erweitert werden können.

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 Messreihen oder der Tropfieklassifizierung 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 Seen zu erweitern – auch für jene Seen, die wenig oder gar nicht überwacht werden können.

Zukünftige Entwicklungen in der Satellitentechnologie, einschließlich neuer Sensoren mit verbesselter spektraler Auflösung sowie höherer räumlicher und vor allem zeitlicher Auflösung, aber auch weiterentwickelte Algorithmen und die Verknüpfung mit Methoden des „machine learning“ bzw. der „Künstlichen Intelligenz“, werden voraussichtlich die Genauigkeit und Häufigkeit der Datenerfassung weiter verbessern (Meng et al. 2023; Park et al. 2024).

Das Projekt BIGFE hat gezeigt, dass es lohnenswert ist, die vielen Vorteile der Satellitendaten für die Aufgaben in der Gewässerüberwachung auszuschöpfen. Es wurde an Beispielen und Schnittstellen aufgezeigt, 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.

D. Literaturverzeichnis

- [1.] Alikas, K., Kangro, K., Kõks, K.-L., Tamm, M., Freiberg, R., Laas, A. (2023) *Consistency of six in situ, in vitro and satellite-based methods to derive chlorophyll a in two optically different lakes*. *Frontiers in Environmental Science*. 10, 989671.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.989671>.
- [2.] Badegewässerrichtlinie (2006): Richtlinie 2006/7/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Februar 2006 über die Qualität der Badegewässer und deren Bewirtschaftung und zur Aufhebung der Richtlinie 76/160/EWG. Amtsblatt Nr. L 64 vom 04/03/2006 S. 0037 – 005.
- [3.] Bailey, S.W., Werdell, P.J. (2006) *A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products*. *Remote Sensing of Environment*. 102(1-2), 12-23.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.015>.
- [4.] Baschek, B., Fricke, K., Dörnhöfer, K. and Oppelt, N. (2018). *Grundlagen und Möglichkeiten der passiven Fernerkundung von Binnengewässern*. In *Handbuch Angewandte Limnologie: Grundlagen - Gewässerbelastung - Restaurierung - Aquatische Ökotoxikologie - Bewertung - Gewässerschutz* (eds W. Calmano, M. Hupfer, H. Fischer and H. Klapper): 1-28. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim
<https://doi.org/10.1002/9783527678488.hbla2018001>
- [5.] Dörnhöfer, K., Oppelt, N. (2016) *Remote sensing for lake research and monitoring – Recent advances*. *Ecological Indicators*. 64, 105–122.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.009>.
- [6.] Dörnhöfer, K., Scholze, J., Stelzer, K., Oppelt, N. (2018) *Water colour analysis of Lake Kummerow using time series of remote sensing and in situ data*. *PFG – Journal of Photogrammetry Remote Sensing and Geoinformation Science*. 86, 103–120.
<https://doi.org/10.1007/s41064-018-0046-3>.
- [7.] EUMETSAT (2021) *Recommendations for Sentinel-3 OLCI Ocean Colour Product Validations in Comparison with in situ Measurements – Matchup Protocols*. No. EUM/SEN3/DOC/19/1092968.
https://user.eumetsat.int/s3/eup-strapi-media/Recommendations_for_Sentinel_3_OLCI_Ocean_Colour_product_validations_in_comparison_with_in_situ_measurements_Matchup_Protocols_V8_B_e6c62ce677.pdf (zuletzt aufgerufen am 28.7.2025)
- [8.] European Space Agency (ESA) (2017a) *Sentinel-2 Factsheet*.
https://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/SENTINEL-2_sheet_170125.pdf [abgerufen am 28.7.2025].
- [9.] European Space Agency (ESA) (2017b) *Sentinel-3 Factsheet*.
https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Sentinel-3_factsheet_jan2017.pdf [abgerufen am 28.7.2025].
- [10.] Friese K, Schmidt Sl, Schröder T, Laue P, Kutzner RD, Dietrich D, Wolf T, Blohm W, Rinke K (2025) Nutzung von Satellitendaten in der behördlichen Überwachung der Gewässer-

güte von Seen und Talsperren in Deutschland – Ergebnisse eines Projekts zum Binnengewässer-Monitoring mit Satellitenfernerkundung (BIGFE). Korrespond. Wasserwirt. 18: 17–24.

[11.] Kuhn, M. (2008) *Building predictive models in R using the caret package*. Journal of Statistical Software
<https://doi:10.18637/jss.v028.i05>

[12.] Laue P, Blohm W, Schmidt Sl, Schröder T, Kutzner RD, Wolf T, Dietrich D, Friese K, Rinke K (2025) *Satellitenbasierte Überwachung der Wasserqualität von Stand- und Fließgewässern in Deutschland – Beispiele, Schnittstellen und Wege zur behördlichen Integration (BIGFE)*. Korrespond. Wasserwirt. 18: 77–86.

[13.] Lehmann, M.K., Schütt, E.M., Hieronymi, M., Dare, J., Krasemann, H. (2021) *Analysis of recurring patchiness in satellite-derived chlorophyll a to aid the selection of representative sites for lake water quality monitoring*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 104, 102547.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102547>.

[14.] Llodrà-Llabrés, J., Martínez-López, J., Postma, T., Pérez-Martínez, C., Alcaraz-Segura, D. (2023) *Retrieving water chlorophyll-a concentration in inland waters from Sentinel-2 imagery: Review of operability, performance and ways forward*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 125, 103605.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103605>.

[15.] Meng, D., Mao, J., Li, W., Zhu, S., Gao, H. (2023) *An Integrated Framework for Remote Sensing Assessment of the Trophic State of Large Lakes*. Remote Sensing. 15(17), 4238.
<https://doi.org/10.3390/rs15174238>.

[16.] Ogashawara, I. (2019) *The use of Sentinel-3 imagery to monitor cyanobacterial blooms*. Environments. 6, 60.
<https://doi.org/10.3390/environments6060060>.

[17.] Pahlevan, N., Mangin, A., Balasubramanian, S.V., Smith, B., Alikas, K., Arai, K., et al. (2021) ACIX-Aqua: A global assessment of atmospheric correction methods for Landsat-8 and Sentinel-2 over lakes, rivers, and coastal waters. Remote Sensing of Environment. 258, 112366.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112366>.

[18.] Park, J., Khanal, S., Zhao, K., Byun, K. (2024) *Remote Sensing of Chlorophyll-a and Water Quality over Inland Lakes: How to Alleviate Geo-Location Error and Temporal Discrepancy in Model Training*. Remote Sens. 16, 2761.
<https://doi.org/10.3390/rs16152761>

[19.] Riedmüller, U., Hoehn, E., Mischke, U. (2014) *Trophie-Klassifikation von Seen. Richtlinie zur Ermittlung des Trophie-Index nach LAWA für natürliche Seen, Baggerseen, Talsperren und Speicherseen*. Hrsg. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), 34 S.; Kulturbuch-Verlag, Berlin. ISBN 978-3-88961-345-5

[20.] Schmidt, S.I., Schröder, T., Kutzner, R.D., Laue, P., Bernert, H., Stelzer, K., et al. (2024) *Evaluating satellite-based water quality sensing of inland waters on basis of 100+ German water bodies using two complementary processing chains*. Remote Sensing. 16, 3416.
<https://doi.org/10.3390/rs16183416>

- [21.] Schröder, T., Schmidt, S.I., Kutzner, R.D., Bernert, H., Stelzer, K., Friese, K., et al. (2024) Exploring spatial aggregations and temporal windows for water quality match-up analysis using Sentinel-2 MSI and Sentinel-3 OLCI data. *Remote Sensing*. 16, 2798.
<https://doi.org/10.3390/rs16152798>.
- [22.] Seegers, B.N., Stumpf, R.P., Schaeffer, B.A., Loftin, K.A., Werdell, P.J. (2018) Performance metrics for the assessment of satellite data products: an ocean color case study. *Optics Express*. 26(6), 7404–22.
<https://doi.org/10.1364/OE.26.007404>.
- [23.] Soomets, T., Uudeberg, K., Jakovels, D., Brauns, A., Zagars, M., Kutser, T. (2020) Validation and Comparison of Water Quality Products in Baltic Lakes Using Sentinel-2 MSI and Sentinel-3 OLCI Data. *Sensors*. 20(3), 742.
<https://doi.org/10.3390/s20030742>.
- [24.] Steinmetz, F., Deschamps, P.-Y., Ramon, D. (2011) Atmospheric correction in presence of sun glint: application to MERIS. *Opt. Express*, OE 19, 9783–9800. <https://doi.org/10.1364/OE.19.009783>
- [25.] Topp, S.N., Pavelsky, T.M., Jensen, D., Simard, M., Ross, M.R.V. (2020) Research Trends in the Use of Remote Sensing for In-land Water Quality Science: Moving Towards Multidisciplinary Applications. *Water*. 12(1), 169.
<https://doi.org/10.3390/w12010169>.
- [26.] Wang, S., Li, J., Zhang, B., Spyракος, E., Tyler, A. N., Shen, Q., ... & Peng, D. (2018). Trophic state assessment of global inland waters using a MODIS-derived Fo-rel-Ule index. *Remote sensing of environment*, 217, 444-460
- [27.] Werther, M., Odermatt, D., Simis, S.G.H., Gurlin, D., Jorge, D.S.F., Loisel, H., et al. (2022) Characterising retrieval uncertainty of chlorophyll-a algorithms in oligotrophic and mesotrophic lakes and reservoirs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. (190), 279–300.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.06.015>.
- [28.] WRRL Wasserrahmenrichtlinie (2000): 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. Bl. L 327/1 vom 22. Dezember 2000. Amtsblatt Nr. L 327 vom 22/12/2000 S. 0001 – 0073.
- [29.] Wulder, M.A., Roy, D.P., Radeloff, V.C., Loveland, T., Anderson, M.C., Johnson, D.M., et al. (2022) Fifty years of Landsat science and impacts. *Remote Sensing of Environment*. 280, 113195.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113195>

E. Abkürzungen

BIGFE:	Erfassung der Wasserqualität und Wasserflächenausdehnung von Binnengewässern durch Fernerkundung
BfG:	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
CDOM:	Colored dissolved organic matter (im Wasser gelöste, farbgebende Kohlenstoffverbindungen, sog. Gelbstoffe)
CDSE:	Copernicus Data Space Ecosystem
CODE-DE:	Copernicus-Daten und Cloud-Prozessierung für deutsche Behörden
ESA:	European Space Agency (Europäische Weltraumagentur)
ESA/ESRIN:	Europäisches Exzellenzzentrum für die Nutzung von Erdbeobachtungsmissionen.
IGB:	Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Berlin
LAWA:	Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft Wasser
MAE:	mean absolute error
MSI:	Multi Spectral Instrument (Sensor auf Sentinel-2)
NASA:	National Aeronautics and Space Administration
OLCI:	Ocean and Land Color Imager (Sensor auf Sentinel-3)
RMSE:	root mean squared error
S2:	Sentinel-2
S3:	Sentinel-3
SWIR:	short wave infrared
UBA:	Umwelbundesamt Dessau
VNIR:	visible and near infrared
WRRL:	Wasserrahmenrichtlinie

F. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Absorptionsspektren für Wasser, Gelbstoff (CDOM: coloured dissolved organic matter) und Chlorophyll-a. Die maximale Absorption für Chlorophyll-a liegt im blauen Bereich bei 430 nm und im roten Bereich bei 662 nm (aus Baschek et al. 2018)	10
Abbildung 2:	Spektralbänder des MSI von Sentinel-2 mit einer räumlichen Auflösung von 10 m: B2 (490 nm), B3 (560 nm), B4 (665 nm) und B8 (842 nm)	11
Abbildung 3:	Spektralbänder des MSI von Sentinel-2 mit einer räumlichen Auflösung von 20 m: B5 (705 nm), B6 (740 nm), B7 (783 nm), B8a (865 nm), B11 (1610 nm) und B12 (2190 nm)	11
Abbildung 4:	Spektralbänder des MSI von Sentinel-2 mit einer räumlichen Auflösung von 60 m: B1 (443 nm), B9 (940 nm) und B10 (1375 nm)	11
Abbildung 5:	Beispiele für mögliche Störeffekte des rückgestreuten Sonnenlichtes am Satellitensor durch Absorptionen und Streuungen (aus Baschek et al. 2018]	14
Abbildung 6:	UTM-Kacheleinteilung und -bezeichnung über Deutschland wie es für Sentinel-2 genutzt wird (Quelle: CODE-DE)	15
Abbildung 7:	Stark vereinfachtes, generalisiertes Schema eines Prozessierungsablaufs von Satellitendaten (verändert nach Friese et al., 2025)	15
Abbildung 8:	Referenzgewässer in BIGFE - 109 Seen und Talsperren in Deutschland (verändert nach Schröder et al. 2024)	16
Abbildung 9:	Prozentuale Verteilung von Gewässertiefe und trophischer Einstufung der BIGFE-Referenzgewässer (109 Seen und Talsperren in Deutschland)	17
Abbildung 10:	Gleichungen der statistischen Fehlermaße	17
Abbildung 11:	Darstellung von Makropixeln von S2 bei einer räumlichen Auflösung mit 60 m Kantenlänge pro Pixel am Beispiel des Barleber See in Magdeburg (rote Punkte = Messstellen); verändert nach Schröder et al. (2024)	18
Abbildung 12:	Schematische Darstellung des Vergleichs von in situ Probenahme und Satellitenüberflügen	20
Abbildung 13:	Ergebnisse der Regressionsanalysen für die Sichttiefe und Chlorophyll-a von in situ Werten (X-Achse) und Satellitenauswertungen Sentinel-2 (Y-Achse) (aus Schmidt et al. 2024)	22
Abbildung 14:	Ergebnisse der Regressionsanalysen für die Sichttiefe und Chlorophyll-a von in situ Werten (X-Achse) und Satellitenauswertungen Sentinel-3 (Y-Achse) (aus Schmidt et al. 2024)	22
Abbildung 15:	Schematische Darstellung des Flächen- und Volumenvergleichs einer punkthaften in situ Probenahme mit der räumlichen Auflösung von Sentinel-2 (bei Kanälen mit 10 m Auflösung) und Sentinel-3 (Signalinformationen am Satelliten bis maximal Sichttiefe; im Beispiel = 2m)	24
Abbildung 16:	RGB-Bild des Ratzeburger See, Schaalsee und Schweriner See sowie Umgebung. Sentinel-2 Aufnahme vom 2. Juli 2025	25
Abbildung 17:	Beispiel für eine Messwertverdichtung von Chlorophyll-a Laboranalysen durch Satellitendaten von Sentinel-2 und Sentinel-3 für die Jahre 2016 bis 2020 in der Talsperre Quitzdorf (Sachsen)	26
Abbildung 18:	Beispiel für die Darstellung von saisonalen Mustern anhand des Chlorophyll-a in der Talsperre Quitzdorf aus Laborwerten (grün) und Satellitendaten (Sentinel-3, orange) von 2016 bis 2020 im Vergleich (Satellitenauswertung Gewässerweit); Darstellung als geglättete Interpolation (GAM-Analyse)	27
Abbildung 19:	Beispiel für einen „Seensteckbrief“ aus dem BIGFE-Projekt aus der Kombination von Zeitreihen (Laborwerte, Sentinel-2- und Sentinel-3-Daten), statistische Basiskenngrößen in Tabellenform und deren grafische Darstellung in Violinplots für das Steinhuder Meer (verändert nach Laue et al. 2025)	28
Abbildung 20:	Konfusionsmatrizen der LAWA-Trophie (links) und der Trophie aus Chlorophyll-a Saisonmittelwerten von in situ Messungen (rechts) im Vergleich zur Trophie berechnet aus den Chlorophyll-a-Saisonsmittelwerten des Sentinel-2 Satelliten (aus Laue et. al. 2025)	31
Abbildung 21:	Vom Satelliten zum fertigen Bilder einer FE-Szene	32
Abbildung 22:	Servicemodelle mit abgestuften Produktkategorien, die im BIGFE-Projekt für die Implementierung der Satellitendaten im behördlichen Gewässermonitoring auf Grundlage von Nutzerbefragungen entwickelt wurden (verändert nach Laue et al., 2025)	34

Anhang:

Abbildung A1:	Startbildschirm des EO-Browsers	48
Abbildung A2:	Zoom auf den Bereich Ratzeburger See und Schaalsee mit umliegenden kleineren Seen	49
Abbildung A3:	Auswählen der Filtereinstellungen.....	50
Abbildung A4:	Download des ZIP-Archivs Starten.....	50
Abbildung A5:	RGB-Bild vom ZIP-Archiv öffnen.....	52
Abbildung A6:	Maske zum wählen des Subsets	52
Abbildung A8:	Menüführung zum IdePix-Prozessor.....	53
Abbildung A7:	Das Resampling.....	53
Abbildung A9:	Teilprodukte IDEPIX	54
Abbildung A10:	RGB-Bild und die Masken IDEPIX_WATER der Wasserflächen (weiß)	54
Abbildung A11:	Menüführung zum C2RCC Prozessor	55
Abbildung A12:	Eingabemasken für den C2RCC-Prozessor	56
Abbildung A13:	Einstellungen in der Maske Expression Editor	57
Abbildung A15:	Kolorierter Layer für Chlorophyll.....	58
Abbildung A14:	Bild vom Layer conc_chl erzeugen.....	58
Abbildung A16:	Maske die Add Layer	59
Abbildung A17:	Vereinte Produkte aus RGB-Bild und Chlorophyll-Band von den Schweriner Seen	59
Abbildung A18:	Bildmontage - die Szene Subset UTM Kachel T32UPE mit Legende (als Screenshot eingefügt) vom 2.7.2025.....	60

G. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der Sentinel-Satelliten im Copernicus-Programm, die in BIGFE verwendet wurden (https://sentiwiki.copernicus.eu/web/?l=en); s.a. aSentinel-2 Factsheet (ESA 2017a) und Sentinel-3 Factsheet (ESA 2017b).....	12
Tabelle 2:	Ergebnis der Fehlermaße MAE, Bias und RMSE bei verschiedenen räumlichen Aggregationen (Makropixel) unter Verwendung taggenauer Übereinstimmung von Satellitenüberflug und in situ Probenahme mit getrennten MSI- (Sentinel-2) und OLCI-Daten (Sentinel-3) für die drei Messgrößen Chlorophyll-a, Trübung und Sichttiefe (N = Anzahl der Gewässer; Gw = Gewässerweit). Dunkelgrüne Schattierungen zeigen ein schlechteres Ergebnis der Variante an, während die hellsten Schattierungen das beste Ergebnis darstellen (verändert nach Schröder et al. 2024).....	19
Tabelle 3:	Ergebnis der Fehlermaße MAE, Bias und RMSE bei verschiedenen zeitlichen Abständen von Satellitenüberflug und in situ Probenahme für die drei Messgrößen Chlorophyll-a, Trübung und Sichttiefe (N = Anzahl der Gewässer; d = Tag). Dunkelgrüne Schattierungen zeigen ein schlechteres Ergebnis der Variante an, während die hellsten Schattierungen das beste Ergebnis darstellen (verändert nach Schröder et al. 2024)	20
Tabelle 4:	Statistische Ergebnisse des Vergleichs von Satellitendaten von Sentinel-2 und Sentinel-3 für Sichttiefe und Chlorophyll-a mit in situ Werten von 109 Gewässern im Zeitraum 2016 bis 2020 (verändert nach Schmidt et al. 2024).....	21
Tabelle 5:	Flächen- und Volumenvergleich einer punkthaften in situ Probenahme mit der räumlichen Auflösung von Sentinel-2 und Sentinel-3 (Signalinformationen am Satelliten bis maximal Sichttiefe; im Beispiel = 2m)	23
Gleichung 1:	Berechnung des Chlorophyll-a Trophie-Index (TIChl-a).....	29
Tabelle 6:	Vereinfachte Trophie-Klassengrenzen für Chlorophyll-a angelehnt an die Vorgaben der LAWA (Riedmüller et al. 2014; aus Laue et al. 2025).....	30
Tabelle 7:	Mögliche Aufgabenverteilungen zwischen Dienstleistern und Landesämtern der im BIGFE-Projekt entwickelten Servicemodelle (verändert nach Laue et al. 2025)	35
Tabelle 8:	Zusammenstellung von Vor- und Nachteilen der Satelliten-basierten Fernerkundung der Wasserqualität (aus Friese et al., 2025)	37

H. Anhang:

Eine ausführliche Beschreibung der Prozesskette in SNAP

Wie in Kapitel 5 angekündigt, wird hier im Anhang eine ausführliche Beschreibung der Prozesskette für den Bereitstellungsdienst aufgezeigt, die dabei helfen soll, die Verarbeitung der ZIP-Archive aus dem CDSE oder CODE-DE nachzuvollziehen. Dies ermöglicht mit ein wenig Übung die eigene Bearbeitung von beliebigen Sentinel-2 UTM Kacheln.

Mit Hilfe des EO-Browsers des CDSE und SNAP wird am Beispiel der UTM-Kachel T32UPE vom 2.7.2025 die Prozessierung mit möglichen Einstellungen für die einzelnen Prozessschritte gezeigt.

Kurze Übersicht über den Prozessablauf

Grob lässt sich der Ablauf wie folgt beschreiben:

1. Zunächst muss mit dem EO-Browser eine geeignete Szene für ein Gewässer gesucht werden. In diesem Beispiel die Szene der Kachel-UTM T32UPE vom 2.7.2025.
2. Ist der Ausschnitt gefunden, muss dass ZIP-Archiv im Format Sentinel-2 L1C für die gewählte Kachel und den Zeitpunkt heruntergeladen werden.
3. Dieses ZIP-Archiv wird dann mit Hilfe von SNAP geladen.
4. Der erste Schritt ist das Erzeugen eines RGB-Bildes für die ganze Kachel in SNAP.
5. Aus dem geladenem Archiv werden die für die Erzeugung des Layer für Chlorophyll und TSM (-> Trübung) nötigen Prozessschritte ausgeführt.
6. Folgende Schritte sind in dieser Reihenfolge notwendig: 1. Resampling, 2. Masking und abschließend 3. der C2RCC-Prozessor für die Erzeugung der beiden oben erwähnten Layer Chlorophyll und TSM ausgeführt.

Anmerkung: Vor dem Resampling kann auch ein Subset erzeugt werden um den Rechenaufwand zu verringern. Ein Subset ist aber nicht zwingend erforderlich.

7. Nachdem die beiden Layer für Chlorophyll und TSM erzeugt wurden, werden diese noch mit dem RGB-Bild zusammengeführt um die Ergebnisse dann in einem Bild zu speichern.
8. Damit wären die grundlegenden Schritte für eine einfache Prozessierung und dem Speichern des abschließenden Bildes ausgeführt.

Weitere Beschreibungen und Tutorials finden sich im Internet sowohl bei STEP der Scientific Toolbox Exploitation Platform der ESA (Link: <https://step.esa.int/main/>), sowie in anderen Quellen. Hier lassen sich sehr viele Inspirationen und viele weitere Prozessierungen für die Copernicus Satelliten finden.

Anmerkung: Die Systemvoraussetzungen für SNAP sind hoch und in vielen Behörden ist das Installieren von externer Software schwierig. Dafür gibt es, wie oben gezeigt, einen Ausweg. CODE-DE ermöglicht es, sogenannte virtuelle Maschinen zu nutzen. Weitere Informationen dazu sind auf der Webseite von COD-DE verfügbar.

Insgesamt werden große Datenmengen bewegt. Jedes Sentinel-2-ZIP-Archiv ist ca. 800MB groß, die Verarbeitung braucht recht leistungsstarke PCs. Das entpackte ZIP-Archiv ist ca. 7 GB groß, am Ende der hier gezeigten Prozesskette liegen ca. 28 GB Daten auf dem lokalen PC.

Die Sentinel-2-Daten werden immer in sogenannten UTM-Kacheln (siehe Kapitel 3) bereitgestellt. Diese Kacheln decken eine Fläche von je 100x100 km ab und beinhalten alle für die Verarbeitung der georeferenzierten Daten notwendigen Informationen.

EO-Browser des CDSE (Link: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>)

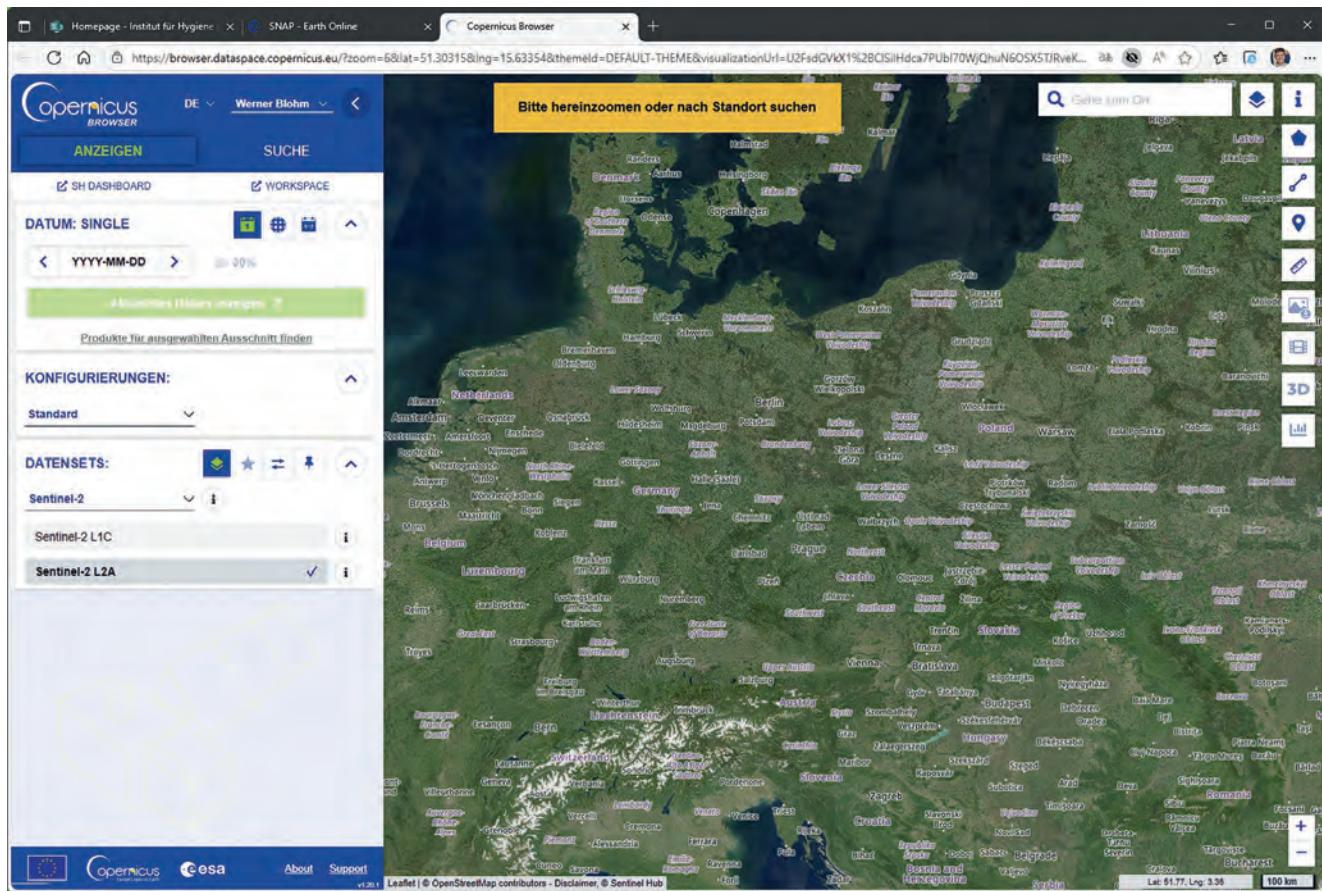


Abbildung A1: Startbildschirm des EO-Browsers

Allgemeine Bedienung des CDSE

Nach dem Öffnen des EO Browser im CDSE zeigt sich etwa folgendes Bild (Abbildung A1).

Die linke Spalte zeigt die möglichen (Filter-) Einstellungen in mehreren Reitern. In der rechten Bildhälfte wird ein Übersichtsbild angezeigt. Mit der Maus oder den Schaltflächen rechts unten, kann jetzt der Bereich (Abbildung A2) gezoomt werden, für den die Daten heruntergeladen werden sollen. Oben rechts befinden sich einige weitere Tools.

Jetzt mit der Maus oder den +/- Schaltflächen grob den Bereich wählen, in dem die gesuchte Wasserfläche liegt.

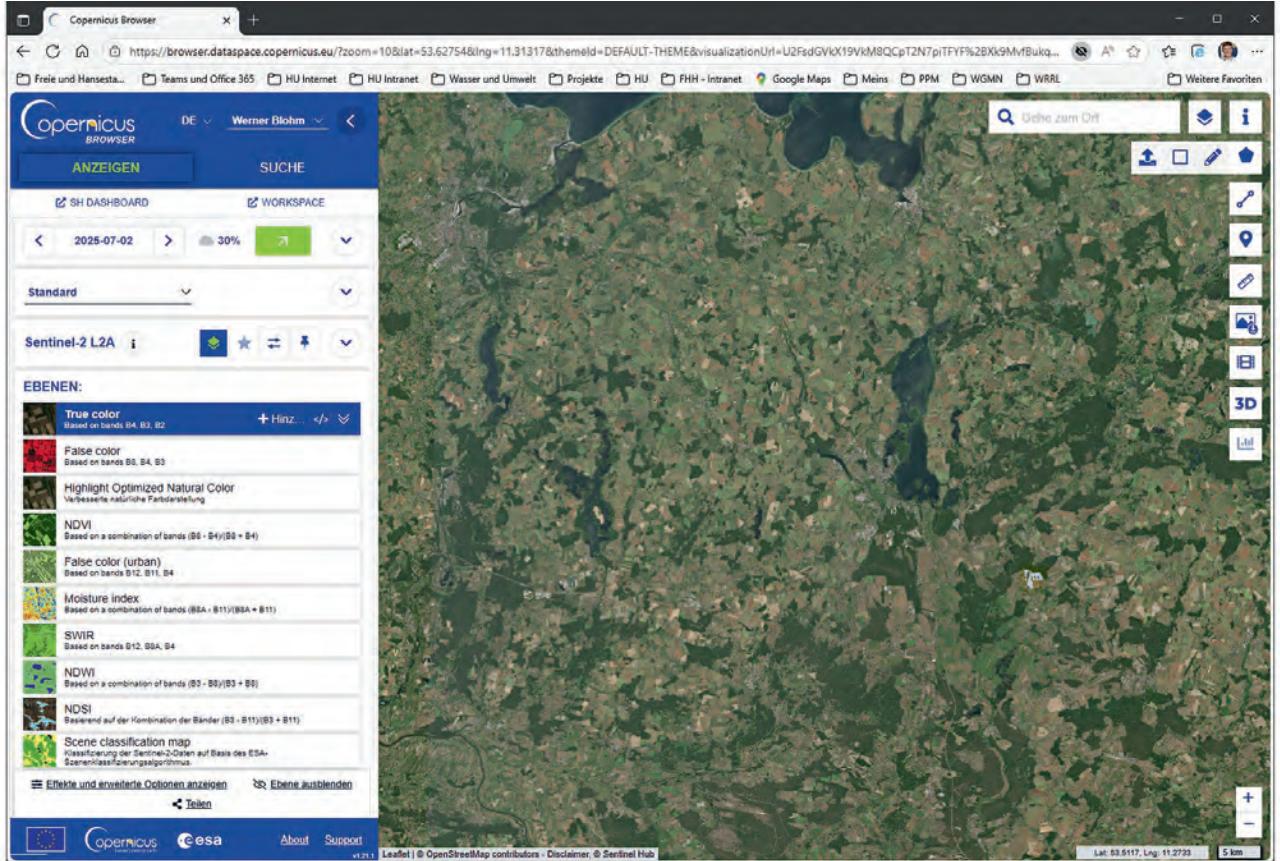


Abbildung A2: Zoom auf den Bereich Ratzeburger See und Schaalsee mit umliegenden kleineren Seen

Filtereinstellungen - Suche des ZIP-Archivs

Nun sind die Suchkriterien einzustellen (Abbildung A3). Im Vorschaubild und der linken Spalte kann von oben nach unten folgendes gewählt werden: Suchbereich - Level Sentinel-2 L1C - Datum bzw. Datumsbereich - Wolkenbedeckung – Produkte für ausgewählten Ausschnitt finden.

1. Mit dem rot markierten Werkzeug (oben rechts in der Vorschau) einen Bereich wählen für den Sentinel-2-Daten gesucht werden sollen bzw. in dem das zu betrachtende Gewässer liegt.
2. **Level L1C wählen.** Dieses „Level“ wird für die Prozessierung in SNAP benötigt
3. **Datum bzw. Datumsbereich wählen** oder 4. Aktuelles Datum wählen.
5. **Wolkenbedeckung wählen.** Die Voreinstellung 30% reicht in der Regel aus.
6. **Produkte für diese Filteneinstellungen finden** anklicken. Oder mit 7. einen etwas aufführlicheren Filter einstellen. Dann sucht der EO-Browser nach Datensätzen, die den Filter einstellungen entsprechen.

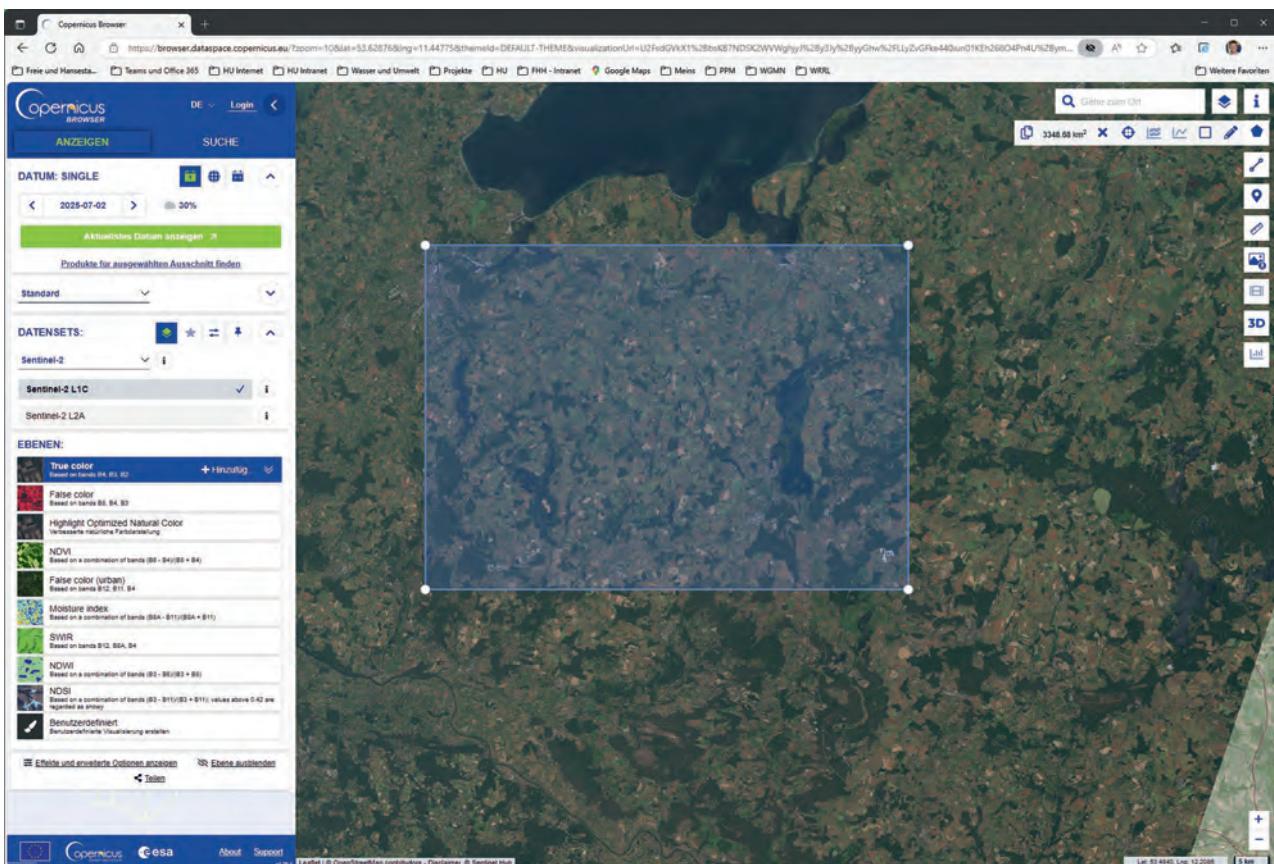


Abbildung A3: Auswählen der Filtereinstellungen

In der unteren linken Spalte erscheinen jetzt auch die Ebenen, für die es vorprozessierte Ansichten gibt. Diese Ebenen können helfen zu entscheiden, ob die Auswahl für die Prozessierung in SNAP geeignet ist.

Ebenenvoransicht - Beispiel NDVI

Im Bereich „Ebenen“ können schon vorprozessierte Vorschauen gewählt werden, die dann im Bild rechts erscheinen. Rechts neben der Ebenenauswahl lassen sich durch Klicken auf die nach unten zeigenden Doppelpfeile (dazu die Maus auf den Titel der Ebene bewegen) Erläuterungen zur Ebene anzeigen.

Die Bilder der Ebenenvoransicht lassen sich als registrierter Benutzer im Format JPG oder PNG als hochauflösendes Bild herunterladen. Dazu den Button benutzen.

Download des ZIP-Archivs

Nachdem Download kann das ZIP-Archiv im SNAP verarbeitet werden. Der Download kann über den Button in Abbildung A4 ausgelöst werden.



Abbildung A4: Download des ZIP-Archivs Starten

ESA-Softwaretool SNAP

(Quelle: <https://earth.esa.int/eogateway/tools/snap>)

Die Sentinel Application Platform (SNAP) ist eine gemeinsame Architektur für alle Sentinel-Toolboxen für die verschiedenen Prozessierungen der Copernicus Satelliten. Die Software wurde von Brockmann Consult (Hamburg) und anderen Firmen im Auftrag der ESA entwickelt. Die SNAP-Architektur ist für die eigene Verarbeitung und Analyse von Erdbeobachtungen (EO) geeignet. SNAP und die einzelnen Sentinel Toolboxes unterstützen zudem zahlreiche weitere Sensoren, nicht nur die Sentinel-Sensoren. ESA/ESRIN stellt der Erdbeobachtungsgemeinschaft das SNAP-Benutzertool kostenlos zur Verfügung. ESA-ESRIN widmet sich den Erdbeobachtungsaktivitäten der ESA und ist das europäische Exzellenzzentrum für die Nutzung von Erdbeobachtungsmissionen.

Die Sentinel Toolboxes sind Open-Source-Software und werden unter einer GNU GPL-Lizenz frei vertrieben. Auch der Quellcode ist frei verfügbar. Auf der offiziellen Seite der ESA zu Snap (<https://step.esa.int/main>) steht Snap unter „TOOLBOX“ zum Download bereit.

Anmerkung: Es empfiehlt sich für jede Prozessierung ein eigenes Verzeichnis anzulegen. Die Datenmengen sind groß, die Datei- und Verzeichnisnamen sind lang und ähnlich, jeder Prozessschritt legt eine *.dim Datei und ein Verzeichnis (siehe Abbildung unten) an, da ist schnell ein Durcheinander erzeugt.

Name	Größe	Typ
S2B_MSIL1C_20250702T1025_R108_T32UPE.data		Dateiordner
S2B_MSIL1C_20250702T1025_R108_T32UPE_resampled.data		Dateiordner
S2B_MSIL1C_20250702T1025_R108_T32UPE_resampled_idepix.data		Dateiordner
S2B_MSIL1C_20250702T1025_R108_T32UPE_resampled_idepix_C2RCC.data		Dateiordner
S2B_MSIL1C_20250702T1025_R108_T32UPE.dim	42.257 KB	SNAP standard I/O file (BEAM-DIMAP format)
S2B_MSIL1C_20250702T1025_R108_T32UPE_resampled.dim	42.052 KB	SNAP standard I/O file (BEAM-DIMAP format)
S2B_MSIL1C_20250702T1025_R108_T32UPE_resampled_idepix.dim	41.784 KB	SNAP standard I/O file (BEAM-DIMAP format)
S2B_MSIL1C_20250702T1025_R108_T32UPE_resampled_idepix_C2RCC.dim	41.858 KB	SNAP standard I/O file (BEAM-DIMAP format)
S2B_MSIL1C_20250702T102559_N0511_R108_T32UPE_20250702T122604.SAFE.zip	783.954 KB	ZIP-komprimierter Ordner

Verzeichnisse SNAP

SNAP - Prozessschritte

Um die Daten, die in der Abbildung A2 vom Ratzeburger See und Schaalsee mit umliegenden kleinen Seen zu sehen sind, in weitere Produkte umwandeln zu können, sind einige vorbereitende Prozessschritte in SNAP auszuführen.

Nach dem Start von SNAP muss das oben beschriebene ZIP-Archiv aus Abbildung A4 geladen werden. Vom geladenem ZIP-Archiv sollte dann ein RGB-Bild erzeugt werden, um eine Übersicht über die Szene zu bekommen. In der Maske „Select RGB-Image Channels“ (Abbildung A5) sollten keine Änderungen vorgenommen werden.

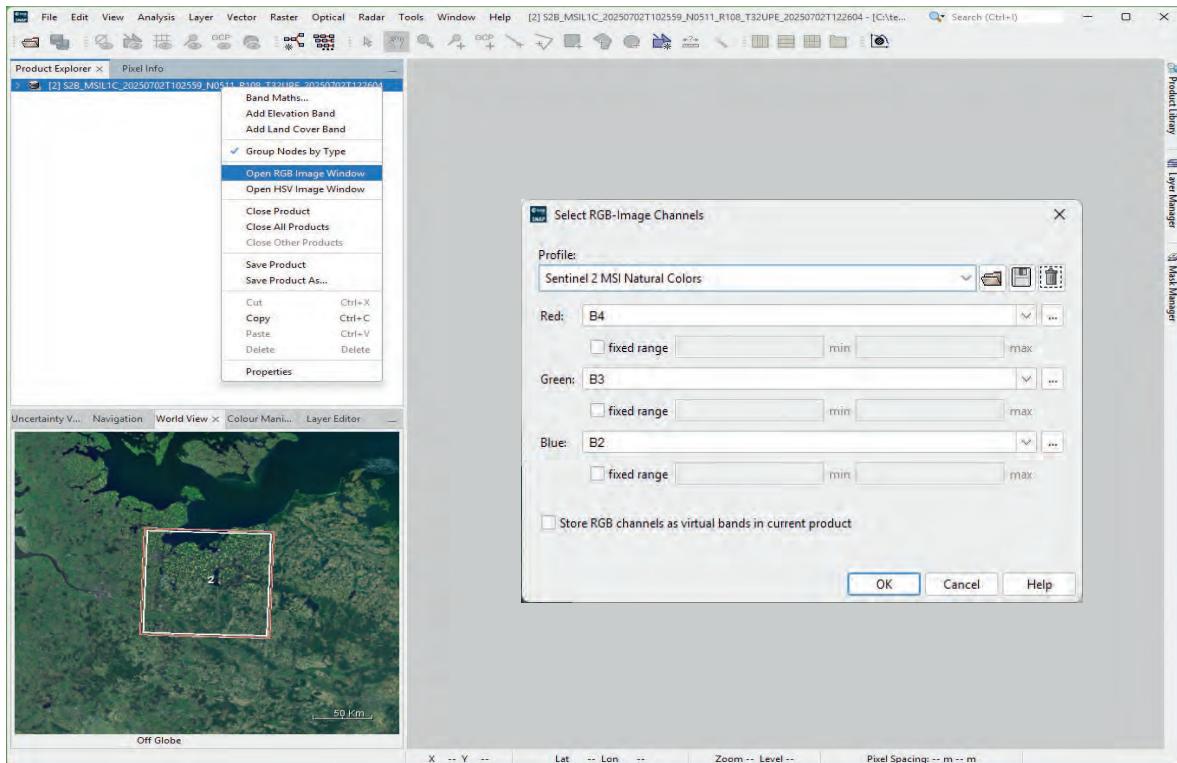


Abbildung A5: RGB-Bild vom ZIP-Archiv öffnen

Subset erzeugen

Um die Arbeit auf einen kleinen Teil der Szene zu begrenzen, kann ein Subset erzeugt werden. Damit kann die zu verarbeitende Datenmenge erheblich verkleinert werden.

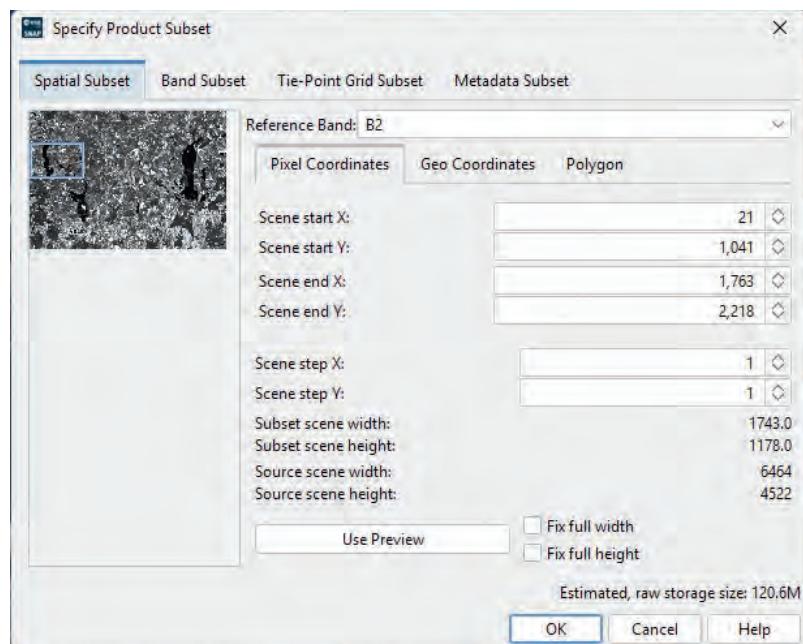


Abbildung A6: Maske zum wählen des Subsets

In diesem Beispiel wird im Weiteren ein Subset (benannt: S2B_MSIL1C_20250702T1025_R108_T32UPE) verwendet, dass den Ratzeburger See und Schaalsee mit umliegenden kleineren ent-

hält. Dieses Subset wird nun in weiteren Prozessierungen verarbeitet. Je nach dem beabsichtigten Produkt sind unterschiedliche Schritte (Prozessierungen) anzuwenden, hier sollen Layer vom Chlorophyllgehalt und den Trübstoffen (TSM) erzeugt und im RGB-Bild eingefügt werden.

Resampling

Im ersten Schritt müssen für dieses Produkt die Pixel der Bänder auf eine einheitliche Größe gebracht werden. Die Bänder enthalten die (Roh-) Daten von den einzelnen Wellenlängen. Dieser Schritt wird Resampling genannt. Es gibt zwei Werkzeuge, die das Resampling durchführen. Beide finden sich in den Menüs Optcal ⇒ Geometric.

Um in der nachfolgenden Prozessierung mit den richtigen Winkeln weiterrechnen zu können, muss der Optcal ⇒ Geometric ⇒ **S2-Resampling Prozessor** verwendet werden. Der andere Resampler würde hier falsche Ergebnisse liefern.

Beim S2 Resamplings muss die Größe der Pixel im Reiter „Prozessinge Parameters“ (Abbildung A7) gewählt werden, die für die weitere Prozessierung benötigt wird.

Für Chlorophyll und TSM sollte die Pixelgröße 20m (bzw. das Band B5) gewählt werden, da in dieser Pixelgröße die Daten für die beiden Messgrößen vorliegen. Es können auch 60m ausgewählt werden, das beschleunigt den Prozessierungsprozess.

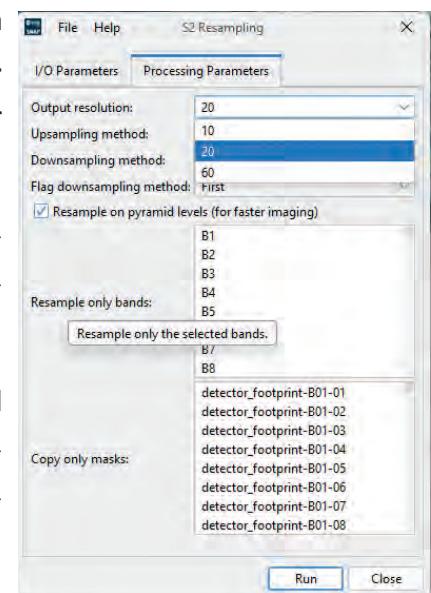


Abbildung A7: Das Resampling

Masking

Im folgenden Schritt wird das Masking angewendet. Diese Maskierung erlaubt es Pixel (Flächen) in der Szene auszuwählen. Jetzt werden hier jetzt in Masken (Name: IDEPIX_xxx) erstellt, mit denen dann die zu verarbeitenden Daten weiter eingegrenzt werden.

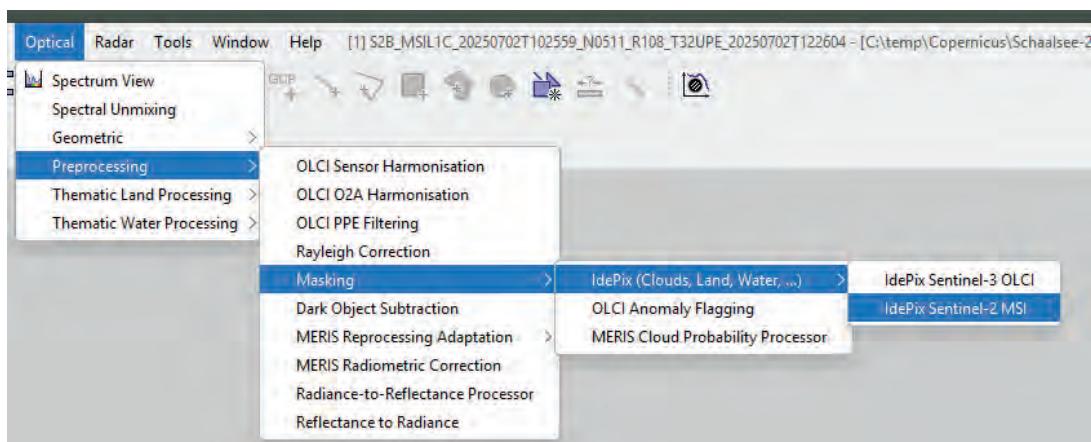


Abbildung A8: Menüführung zum IdePix-Prozessor

Der Prozessor IDEPIX-Sentinel-2-MSI ist über das Menü „Optical ⇒ Preprocessing ⇒ Masking IdePix (C,L,W..) ⇒ IDEPIX-Sentinel-2-MSI“ (Abbildung A8) erreichbar. In der sich öffnenden Maske sind keine weiteren Einstellungen nötig und das Werkzeug kann einfach ausgeführt werden.

Im Produktxplorer von SNAP (Abbildung A9) sollten jetzt für das Subset die Ebene des ZIP-Archivs und drei Teilprodukte zu sehen sein.

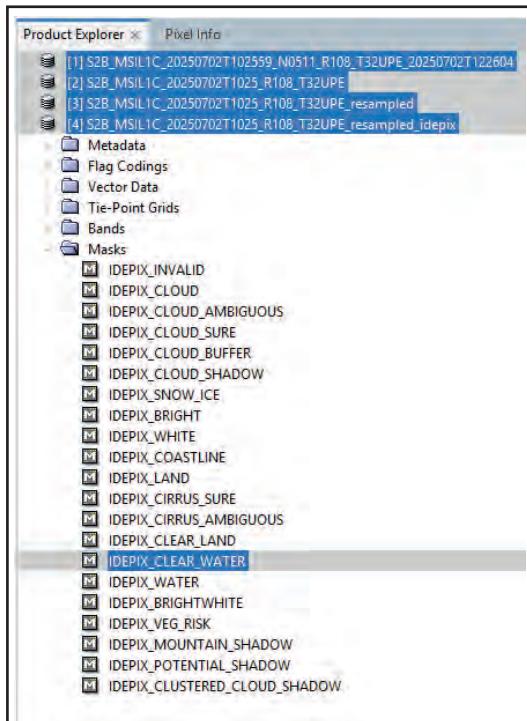


Abbildung A9: Teilprodukte IDEPIX

- [1] ZIP-Archiv
- [2] Subset
- [3] Resampling des Subsets
- [4] IDEPIX von Resampling des Subsets und die Maske IDEPIX_CLEAR_WATER sind markiert.

Die Masken von „[4] IDEPIX von Resampling des Subsets“ lassen sich alle als Bild darstellen, sofern sie Inhalte haben. In Abbildung A10 ist die Maske IDEPIX_WATER dargestellt.

Mit dem Werkzeug lassen sich jetzt die Fenster anordnen. Das ist nützlich um zu entscheiden, welche Maske für den nächsten Prozessschritt am Besten geeignet ist.

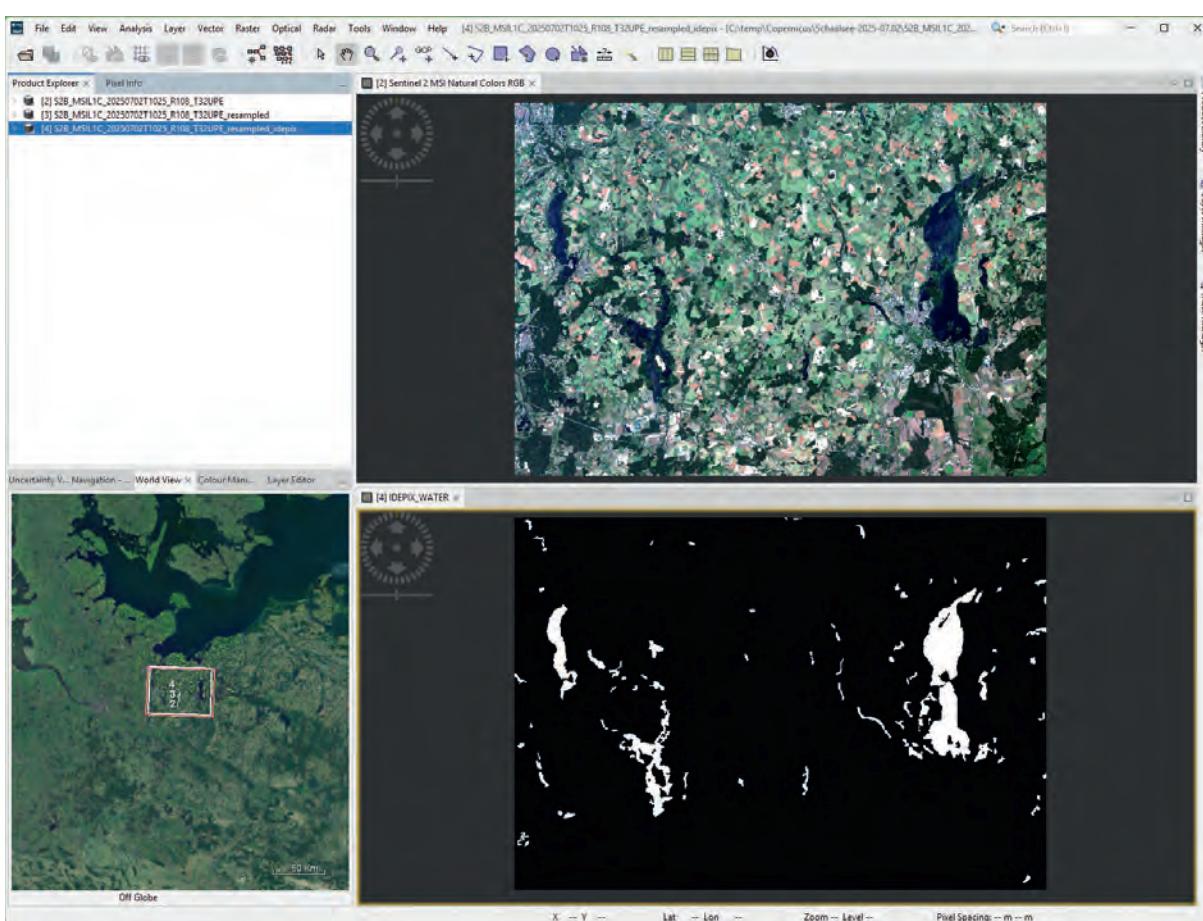


Abbildung A10: RGB-Bild und die Masken IDEPIX_WATER der Wasserflächen (weiß)
Seite 54

C2RCC-Prozessor

Es folgt nun der letzte Schritt der die Bänder für Chlorophyll und TSM erzeugt. Dabei wird der C2RCC-Prozessor eingesetzt. Der Prozessor führt sowohl eine Atmosphärenkorrektur als auch die Berechnung der Wasserinhaltstoffe auf Basis von Neurolen Netzen durch. Derzeit sind in SNAP drei Versionen der neuronalen Netze implementiert. Die drei Versionen der Neuronalen Netze gelten für verschiedene optische Wasserkategorien. Während das C2RCC v.1.0 in offenen Gewässern von Nord- oder Ostsee optimiert ist, ist C2X ist für schwefelstoffhaltige Küstengewässer optimiert. Die Version C2X-Complex ist für die meisten Binnengewässer gut geeignet. Ein Abgleich mit in situ Daten sollte auf jeden Fall erfolgen.

Anmerkung (aus <https://c2rcc.org/>): Die atmosphärische Korrektur von **Case 2 Regional CoastColour (C2RCC)** ist eine Vollspektrumversion, die eine Reihe von neuronalen Netzen verwendet, die mit einem simulierten Reflexionsgrad am oberen Rand der Atmosphäre trainiert werden. Der C2RCC-Prozessor basiert auf Deep-Learning-Ansätzen. Neuronale Netze werden trainiert, um die Umkehrung des Spektrums für die atmosphärische Korrektur durchzuführen, d.h. die Bestimmung der Strahlung des Wassers, die von der Spitze der Atmosphärenstrahlung austritt, sowie die Gewinnung der inhärenten optischen Eigenschaften des Wasserkörpers. C2RCC ist ein Prozessor für die atmosphärische Korrektur und den Abruf von Wasserbestandteilen aus optischen Satellitenbildern, die von einer Vielzahl von Sensoren erfasst werden. Die algorithmischen Grundlagen von C2RCC wurden von Schiller & Doerffer (1999) gelegt, die Pionierarbeit für eine Methodik leisteten, um das Problem der atmosphärischen Korrektur und des Rückholens im Wasser mit Hilfe von Techniken des maschinellen Lernens anzugehen. Sie trainierten künstliche neuronale Netze mit repräsentativen Spektren, die durch Strahlungstransportmodellierung erzeugt wurden. Netzwerke wurden zunächst im Case-2-Regional-Prozessor für spezifische und generische Binnengewässer implementiert, der sich später, im Zuge von ESA DUE CoastColour, zum C2RCC-Prozessor entwickelte (Brockmann et al., 2016).

Das Menü zum Starten des C2RCC-Sentinel-2-MSI-Prozessors findet sich im Menü Optical ⇒ Thematic Water Processing ⇒ C2RCC Processors ⇒ S2 MSI (Abbildung A11).

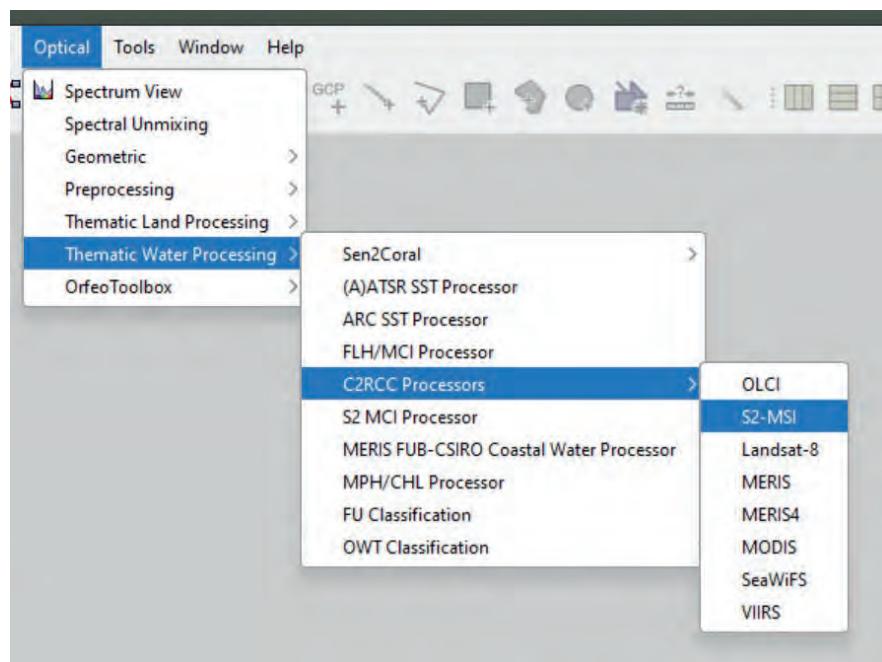


Abbildung A11: Menüführung zum C2RCC Prozessor

Die Eingaben bei den Masken zum „S2 C2RC Prozessor“ sind etwas aufwändiger.

Im Reiter „I/O Parameters“ sollte im Reiter „Target Product“ wieder der Pfad überprüft werden. Im Reiter „Processing Parameters“ sind einige Einträge zu machen. Salinity muss in PSU eingegeben werden. Für Süßwasser kann hier 0,01 PSU angenommen werden. Weiter wird die Temperatur im Gewässer zur Zeit der Aufnahme benötigt. Alle anderen Einstellungen sollten nicht geändert werden (Abbildung A12).

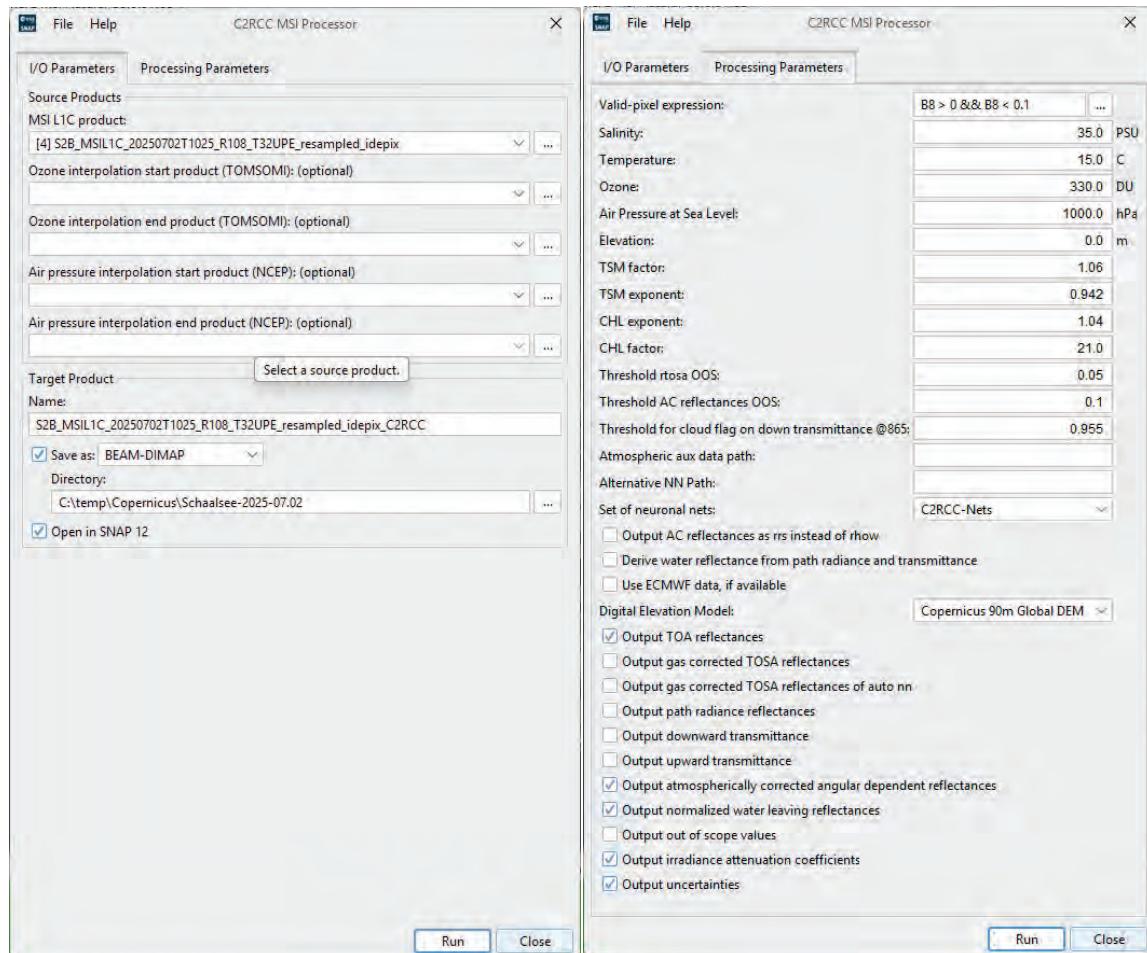


Abbildung A12: Eingabemasken für den C2RCC-Prozessor

Jetzt sind zwei Felder / Einstellungen von besonderer Bedeutung:

1. Das Feld „Valid-pixel expression“ entscheidet darüber, welche Pixel bzw. Flächen genutzt werden um die Layer für Chlorophyll und TSM zu berechnen.
2. Das Feld „Set of neuronal nets“ entscheidet darüber, welches der drei oben beschriebenen neuronalen Netze für beide Layer Chlorophyll und TSM genutzt wird. Für die Anwendung „Binnengewässer“ ist das C2x-COMPLEX Netz die empfohlene Version der Neuronalen Netze.

Im Feld „Valid-pixel expression“ ⇒ Expression Editor sind folgende Einstellungen zu wählen, um den Prozessor anzuleiten, dass nur Pixel ausgewertet werden, die auch in der IDEPIX Maske CLEAR_Water (oder die Maske verwenden, die am Besten passt) enthalten sind.

Nach einem Klick auf öffnet sich die folgende Maske „Expression Editor“ (Abbildung A13):

Der Ausdruck „B8 > 0 && <0.1“ definiert, welcher Wertebereich der Rohdaten genutzt wird. Der Ausdruck sollte vorerst nicht verändert werden.

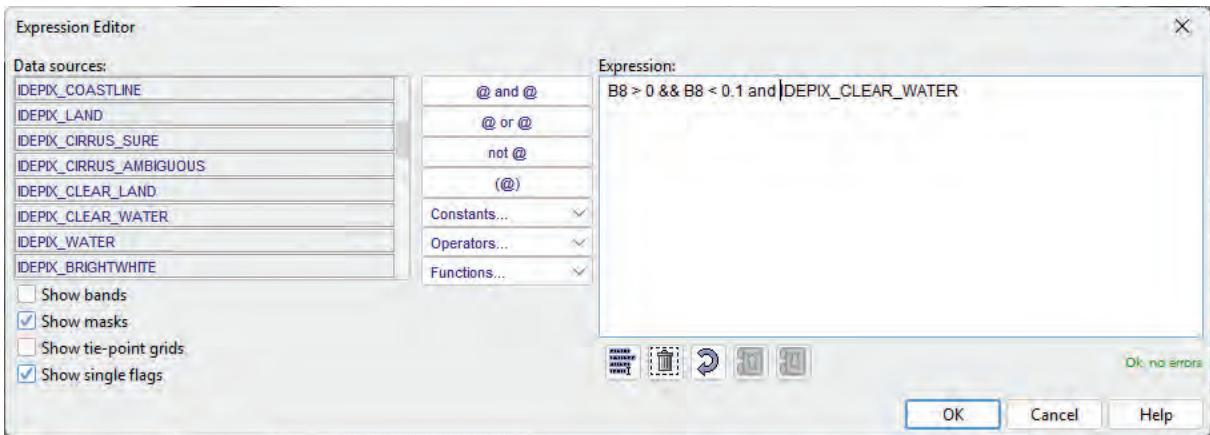


Abbildung A13: Einstellungen in der Maske Expression Editor

An diesen Ausdruck wird über eine UND-Verknüpfung die Maske für die Wasserflächen angehängt. Diese Maske wurde im Prozessschritt Masking erzeugt und kann aus dem Feld links im Editor ausgewählt werden, wenn das Kästchen „Show Masks“ aktiviert ist. Typisch sind hier die Masken „IDEPIX_Water“, „IDEPIX_CLEAR_Water“ oder auch „not IDEPIX_VEG_RISK“ (das „not“ muss dann im Feld Expression der Maske voran gestellt werden) je nachdem welche Maske am Besten passt.

Wenn alle Einstellungen in den Processing Parameters vollständig sind, kann der C2RCC-Prozess gestartet werden.

Nachdem der Prozessschritt abgeschlossen ist, gibt es im Product Explorer eine neue Zeile, in der an den Datenatz der Zusatz „_C2RCC“ angehängt ist.

Der Datensatz hat jetzt folgenden Namen:

[x] S2B_MSIL1C_20250702T102559_N0511_R108_T32UPE_20250702T122604_resampled_idepix_C2RCC

Der Name setzt wie folgt zusammen:

- Name des Satelliten - hier S2B
- Name des Sensor mit Level - hier MSIL1C
- Zeitpunkt der Aufnahme - hier 20250702T102559
- Angaben über den Orbit - N0511_R108
- Name der UTM-Kachel - T32UPE
- Fertige Prozessierungen - hier resampled, idepix und C2RCC

Im Abschnitt Bands \Rightarrow conc \Rightarrow „conc_tsm“ und „conc_chl“ finden sich die Layer, die nun weiter bearbeitet werden können. Zunächst ist je ein Bild mit „Open Image Window“ aus dem Kontextmenü von den Layern zu erzeugen.

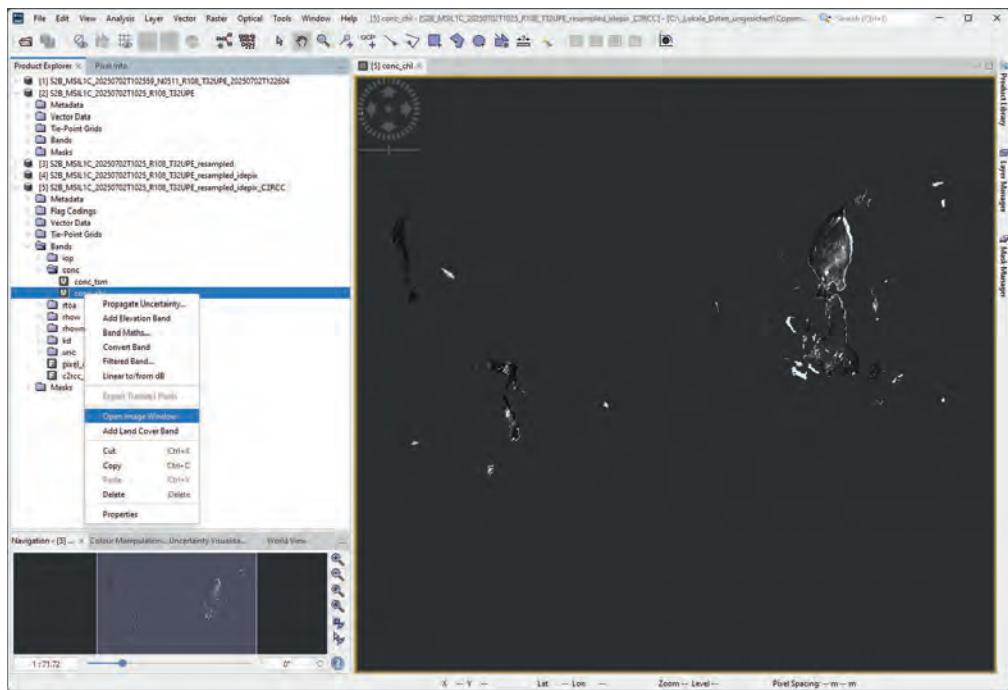


Abbildung A14: Bild vom Layer *conc_chl* erzeugen

In der Abbildung A14 ist das Bild für Chlorophyll schon geladen. Die Chlorophyll-Konzentrationen werden standardmäßig in Graustufen angezeigt. Im unteren Abschnitt der linken Spalte findet sich der Reiter „Color Manipulation“. In diesem Reiter stehen verschiedene Palletten zur Auswahl. Diese können auch bearbeitet und dann auch gespeichert werden (Abbildung A15).

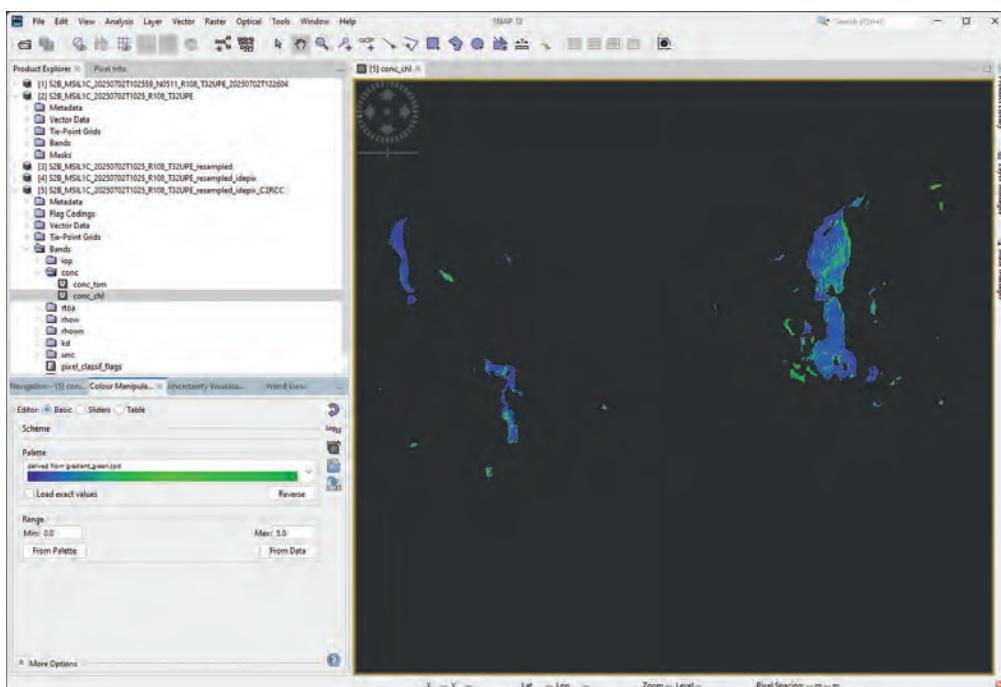


Abbildung A15: Kolorierter Layer für Chlorophyll

RGB-Bild und die Bänder zusammenfügen

Die Prozessierung ist jetzt abgeschlossen. Die einzelnen Produkte (RGB-Bild und die Bilder von „conc_chl“ und „conc_tsm“) können noch mit dem Layer-Manager vereint werden. Über das +-Zeichen rechts oben im Layer Manager gelangt man zur Maske Add Layer.

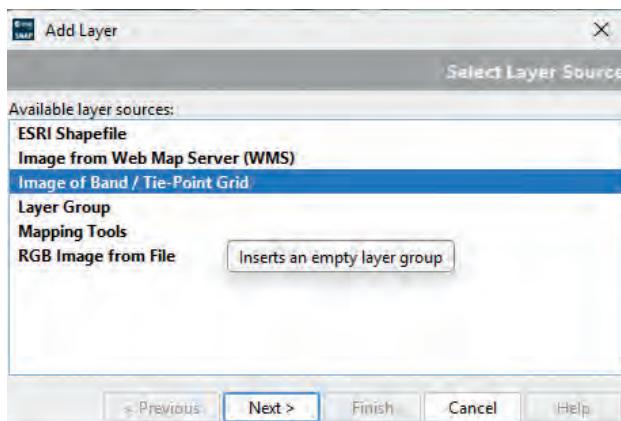


Abbildung A16: Maske die Add Layer

Die Bänder sind über die Auswahl „Image of Band / Tiepoint Grid“ erreichbar (Abbildung A16).

In Abbildung A17 ist der zweite Schritt aus „Add Layer“ zu sehen. Hier können jetzt, wie schon in Bild A14 gezeigt, die beiden Bänder für Chlorophyll und TSM dem Layer des RGB-Bildes hinzugefügt werden.

Von dem dann entstandenen Produkt lässt sich noch ein Bild in verschiedenen Ausprägungen und Formaten (Abbildung A18) erstellen.

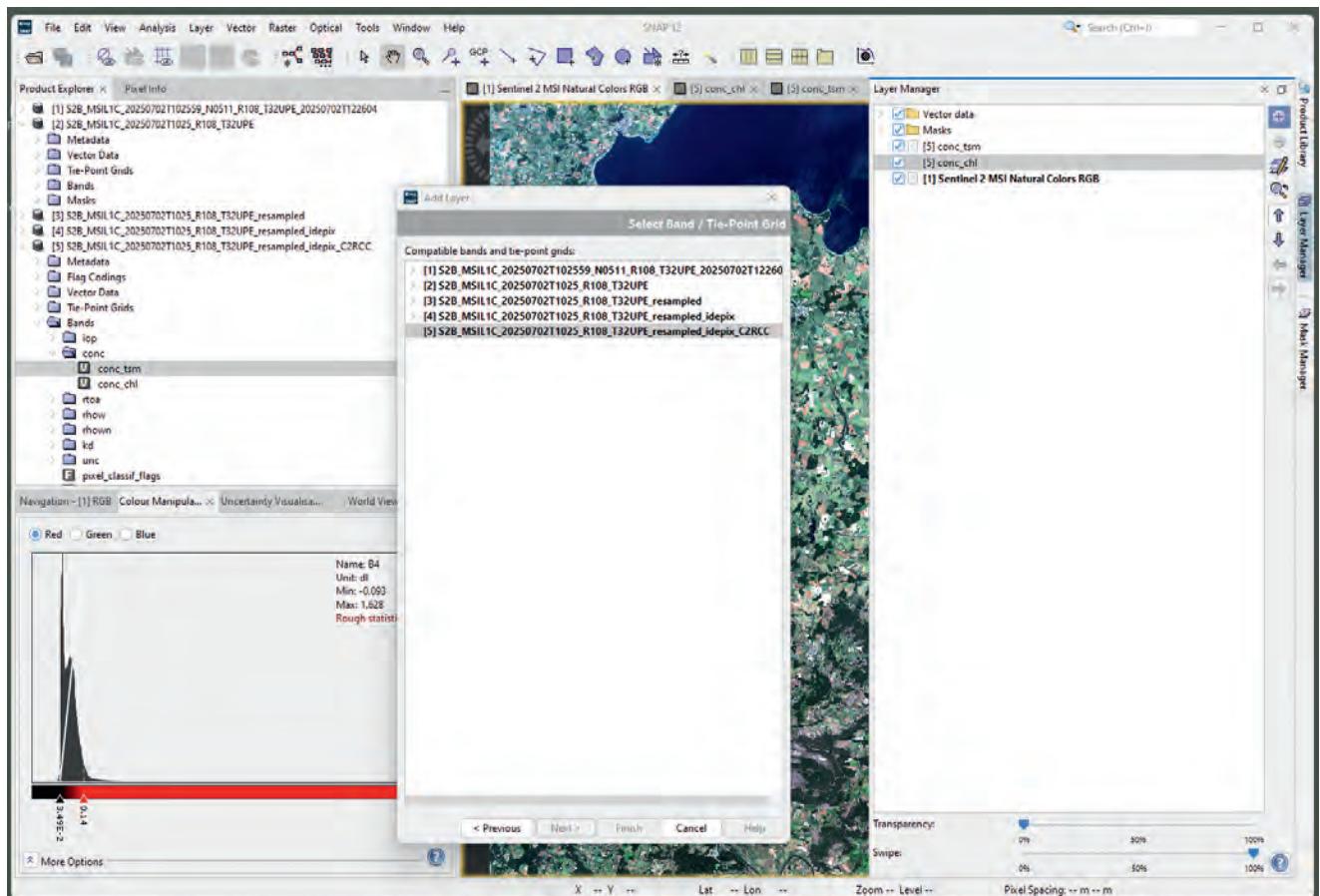


Abbildung A17: Vereinte Produkte aus RGB-Bild und Chlorophyll-Band von den Schweriner Seen

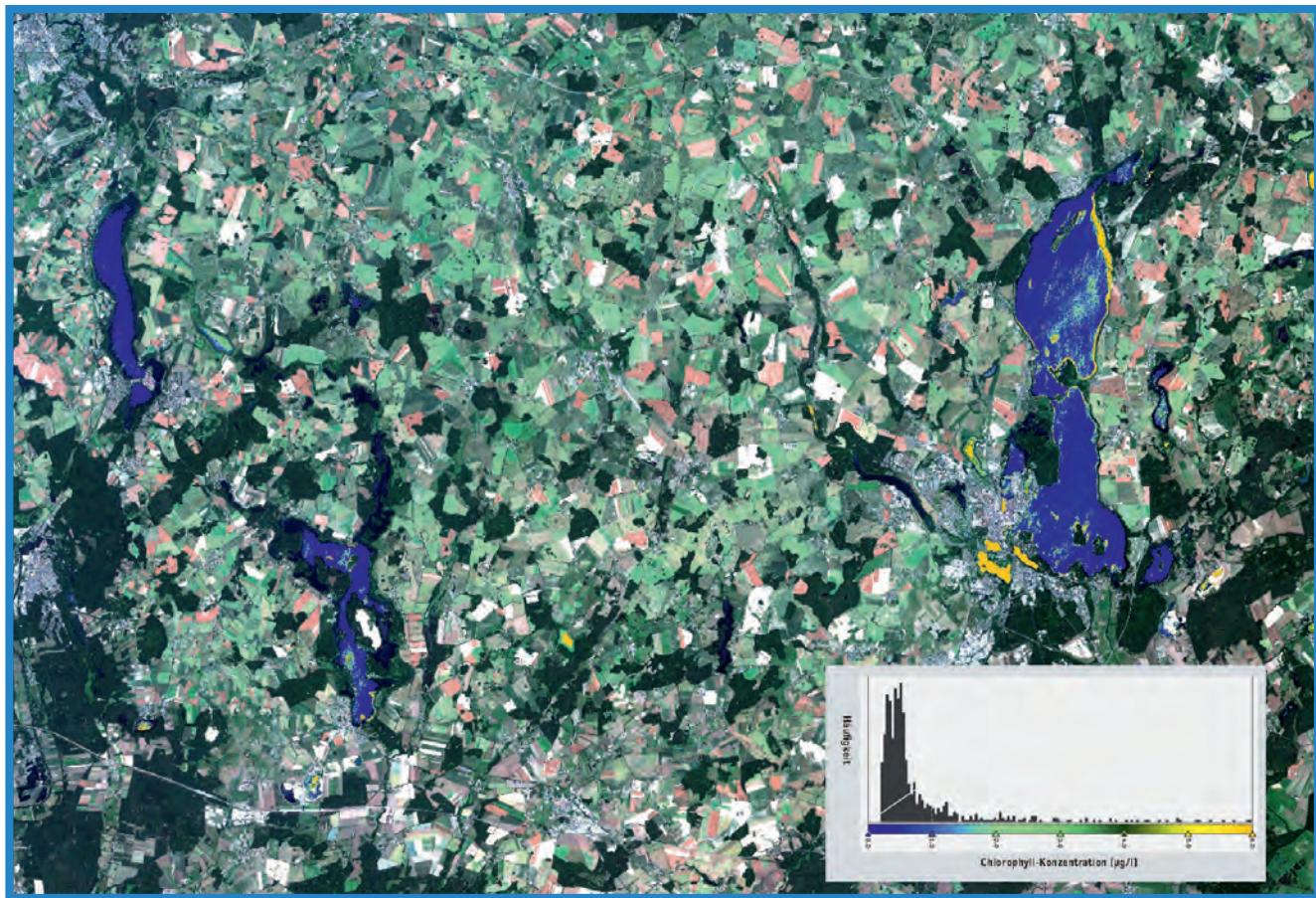


Abbildung A18: Bildmontage - die Szene Subset UTM Kachel T32UPE mit Legende (als Screenshot eingefügt) vom 2.7.2025

Weitere Prozessierungen

Bis hier wurde eine Einführung in die Prozessierungen mit SNAP gezeigt um einen Einblick in die Verarbeitung von Sentinel-2-Daten zu geben. Hieran müssen gegebenenfalls weitere Schritte bis zum endgültigen Produkt folgen. So könnten zum Beispiel Flächen ausgewählt werden um statistische Angaben für die Fläche(n) zu erhalten. In Kapitel 6 wurden die verschiedenen Servicemodelle (Bereitstellungsdienst, Datendienst, Berichtsdienst und Echtzeitdienst) gezeigt, die Einführung hier im Anhang beschreibt die Arbeiten für den Bereitstellungsdienst und die eigenständige Bearbeitung der Fernerkundungsdaten in den Landesämtern.

Für weitere Prozessierungen und Auswertungen stehen in SNAP zahlreiche Tools zur Verfügung. Ebenso ist die Bearbeitung von Daten anderer Satelliten aus dem Copernicus Programm möglich. Mit dem Suchbegriff „*ESA SNAP Sentinel-2 tutorial*“ finden sich im Internet eine Reihe von Tutorials für die erweiterte Nutzung von SNAP.

Die Qualität von Fernerkundungsprodukten werden von vielerlei Faktoren beeinflusst und es gibt eine Vielzahl verschiedener Auswerteroutinen. Die Anwendung und Interpretation der Ergebnisse sollte daher mit ausreichend Hintergrundwissen sowohl für die *in situ* Daten als auch für die Fererkundungsdaten erfolgen.