

Detektion von Algenblüten in Fließgewässern mittels Vegetationsindizes anhand einer Fallstudie zur Oder-Katastrophe 2022

BASTIAN HABEL¹, RICARDA BAY¹, MAXIMILIAN RÖDEL¹,
JANIK STEIER², & DOROTA IWASZCZUK²

*Zusammenfassung: Im Sommer 2022 kam es in der Oder aufgrund einer Algenblüte der toxischen Brackwasseralge *Prymnesium parvum* zu einem Fischsterben. In dieser Fallstudie wird untersucht, wie sich die räumliche Verteilung der daraus resultierenden Chlorophyll *a* Konzentration monitoren lässt. Des Weiteren wird überprüft, ob die Spektralindizes Normalized Difference Vegetation Index und Surface Algal Bloom Index in Korrelation mit den Vorkommnissen gesetzt werden können. Für die Untersuchungen wurde ein Oder-Abschnitt entlang der deutsch-polnischen Grenze gewählt; als Bildquelle für eine Zeitreihenanalyse von Juli bis September dienen Multispektralaufnahmen der SuperDove Satelliten. Die zeitliche und räumliche Ausdehnung der Algenblüte kann an wolkenfreien Tagen anhand der Indizes objektiv präzise abgebildet werden. Es kann im Vergleich zu ABSALON et al. (2023) ein ähnlicher und stärker sichtbarer Trend aufgezeigt werden.*

1 Einleitung

Im Sommer 2022 kam es in der Oder zu einem massenhaften Fischsterben (TAGESSCHAU 2023). Als Ursache gilt eine Algenblüte der Brackwasseralge *Prymnesium parvum* u.a. als Folge einer erhöhten Salzwasserkonzentration durch Bergbauabwässer (SCHULTE et al. 2022; PAZDERSKI et al. 2023). Eine Algenblüte führt unweigerlich zu einer Erhöhung der Chlorophyll *a* Konzentration im Gewässer. Ein solches Ereignis in Echtzeit zu monitoren und Ursachen schnell aufzuspüren ist ein aufwendiges Unterfangen.

Mittels Fernerkundungstechnik können große Areale voll automatisiert gemonitort und durch punktuelle in situ Messungen ergänzt werden. Hierbei ermöglichen die Kombination von in situ Referenzdaten mit Spektralindizes eine genaue Beobachtung des ökologischen Zustands von Gewässern. (ABSALON et al. 2023; ALHARBI 2023).

Bereits diverse Studien haben die Detektion von Algenblüten mittels Spektralen-Indizes nachgewiesen (ABSALON et al. 2023; AHN & SHANMUGAM 2006; CÂNDIDO et al. 2016; KIM et al. 2016). So zeigt ABSALON et al. (2023) eine Korrelation zwischen dem *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) mit der in situ Chlorophyll *a* Konzentration während der Oder-Katastrophe 2022 auf. Der *Surface Algal Bloom Index* (SABI) liefert ebenfalls vielversprechende Ergebnisse beim Quantifizieren von Algenwachstum (ALHARBI 2023; PLICHKO et al. 2021).

In dieser Studie wird die Korrelation, zwischen der in situ Chlorophyll *a* Konzentration im Flusslauf der Oder im Sommer 2022 mit den Indizes NDVI und SABI untersucht. Des Weiteren

¹ Technische Universität Darmstadt, Franziska-Braun-Str. 3, 64287 Darmstadt, Deutschland, E-Mail: bastian.habel@posteo.de, ricarda.bay@gmail.com, max.roedel@live.com

² Technische Universität Darmstadt, FG Fernerkundung und Bildanalyse, Franziska-Braun-Str. 7, 64287 Darmstadt, Deutschland, E-Mail: [janik.steier, dorota.iwaszczuk]@tu-darmstadt.de

ren werden die auf den räumlich hochauflösenden SuperDove Satellitendaten basierenden Ergebnissen mit den auf Sentinel-2 Daten basierenden Ergebnissen von ABSALON et al. (2023) zu dem Ereignis verglichen.

2 Material und Methoden

2.1 Projekt: Untersuchungszeit & -raum

Das Ziel des Monitorings ist es, Katastrophen wie das Fischsterben im Sommer 2022 schnell zu erkennen sowie das Ausmaß der Umweltfolgen abschätzen zu können. Eine erhöhte Leitfähigkeit des Wassers als Maß für den Salzgehalt wurde am 01.08.2022 in Frankfurt an der Oder als auch zwei Tage später flussabwärts im ca. 80 km entfernten Hohenwutzen gemessen. Zwischen dem 07. und dem 14. August wiesen erhöhte Sauerstoffkonzentrationen, ein erhöhter pH-Wert sowie eine erhöhte Chlorophyll *a* Konzentration bei absinkender Nitrat-Konzentration auf eine Algenblüte hin. Die von der Brackwasser-alge produzierten Toxine sind die wahrscheinlichste Ursache für das Fischsterben. (SCHULTE et al. 2022)

Als Untersuchungszeitraum werden die Monate Juli bis September näher betrachtet. Der Fokus liegt auf der ersten Augushälfte, in der die Messstation in Frankfurt erhöhte Werte aufweist. Bei der Analyse von Zeitreihen ist auf saisonale Veränderungen der Vegetation zu achten, daher werden über den Untersuchungszeitraum hinaus Referenzwerte aus Mai und Juni sowie aus Dezember betrachtet. Da die Multispektralaufnahmen stark von wolkenfreien Bedingungen abhängen, können nicht alle Satellitenaufnahmen für den betrachteten Zeitraum genutzt werden, wie im nächsten Kapitel näher erläutert wird.

Die Oder entspringt in Tschechien, fließt durch den südwestlichen Teil Polens, bevor sie zum Grenzfluss von Polen und Deutschland wird und in der Ostsee mündet. Das Einzugsgebiet der Oder beträgt insgesamt ca. 118.900 km², wovon der weit größte Teil auf polnischer Seite liegt (ca. 106.000 km²), gefolgt von Tschechien (ca. 7.200 km²) und Deutschland (ca. 5.600 km²) (POVODÍ ODRY 2007). Nördlich von Frankfurt (Oder) wurde aufgrund der Vermischung mit verschiedenen Zuflüssen ein verringerter Effekt des oben beschriebenen Prozesses nachgewiesen, im Mündungsbereich des Stettiner Haffs wurden keine veränderten Werte nachgewiesen (SCHULTE et al. 2022).

Als Untersuchungsgebiet wird daher ein Abschnitt stromaufwärts der Messstation in Frankfurt an der Oder bei Flusskilometer 222.8 gewählt (LUBW 2013). Dies ermöglicht auch eine Vergleichbarkeit mit in situ Daten (SCHULTE et al. 2022). Bei Flusskilometer 252.7 in Eisenhüttenstadt bietet ein Pegel mit Wasserstands-Abfluss-Beziehungen Aufschluss über den mittleren Abfluss, welcher bei 297 cm Wasserstand 289 m³/s aufweist (LUBW 2014). Im Sommer liegt der mittlere Abfluss bei 206 m³/s (LUBW 2014), zum Meldepunkt des Fischsterbens in Deutschland am 09.08.2022 lag jedoch ein Niedrigwasserabfluss von 80-90 m³/s vor (SCHULTE et al. 2022). Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich über 48 km flussaufwärts Richtung Süden entlang der Deutsch-Polnischen Grenze hinein in den polnischen Krzesin Nationalpark, wie in Abb. 1 dargestellt.

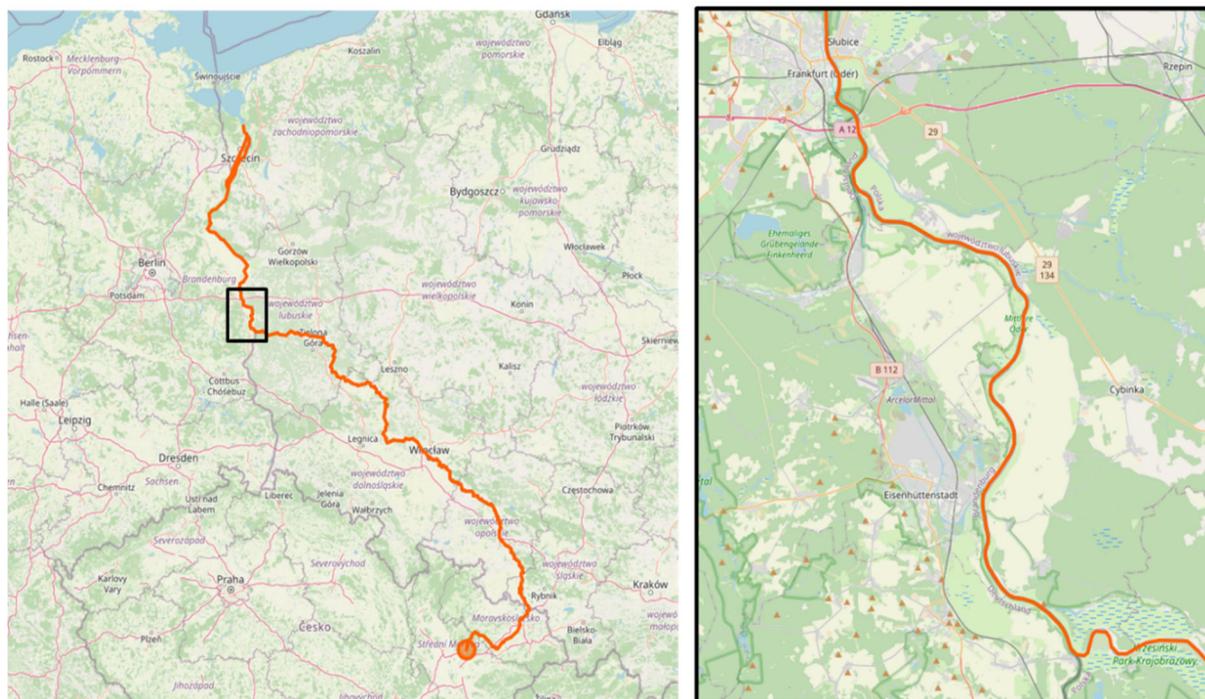


Abb. 1: Verlauf der Oder, Untersuchungsgebiet in schwarzer Markierung (OPENSTREETMAP 2024)

2.2 Daten

Seit April 2022 werden Multispektralaufnahmen von Planet Labs von der dritten Generation Mikrosatelliten, SuperDove genannt, aufgenommen (PLANET LABS 2024a). Die aktuell ca. 200 SuperDove Satelliten ermöglichen eine flächige Auflösung von 3 m je Pixel mit einer *Ground Sampling Distance* von 3.7-4.2 m. Das Untersuchungsgebiet wird täglich befliegen. Für möglichst unverfälschte Ergebnisse werden nur Aufnahmen mit einer Wolkenbedeckung von maximal 5 % ausgewählt. Die spektrale Auflösung ist auf 8 Bänder aufgeteilt, wobei für die Untersuchung mittels Indizes NDVI und SABI lediglich die Bänder B1_{blau} (465-515 nm), B2_{grün} (574-583 nm), B3_{rot} (650-680 nm) sowie B4_{Nahinfrarot} (NIR) (845-885 nm) benötigt werden. Des Weiteren stehen noch die Bänder *Red Edge*, *Yellow*, *Green I* und *Coastal Blue* zur Verfügung. Diese werden jedoch nicht weiterverwendet, da sie keine Verbesserung der Ergebnisse bewirken. (PLANET LABS 2024b, 2024c, 2024d)

Die SuperDove Aufnahmen werden von Planet Labs unter den Korrektur-Einstellungen *Surface Reflectance* orthorektifiziert sowie radiometrisch korrigiert (PLANET LABS 2024b). Für die radiometrische Korrektur werden u.a. globale Informationen über Wasserdampf und Aerosolzusammensetzung zum Aufnahmezeitpunkt am Aufnahmeort verwendet, um Veränderungen durch Reaktion von Sonnenstrahlen mit der Atmosphäre zurückzurechnen.

Für den Untersuchungsraum müssen mehrere Aufnahmen zu einem Mosaik zusammengesetzt werden. Es ist zu beachten, dass zwischen den Aufnahmestreifen Änderungen sichtbar sein können, da jeder Streifen einer Satellitenpassage entspricht. Während der Aufnahme zu unterschiedlichen Tageszeiten ändern sich der Zustand der Atmosphäre sowie der Sonnenstand, was Unterschiede in der Bildkomposition verursachen kann.

Um eine Vergleichbarkeit der hochauflösenden Mikrosatellitendaten mit anderen Aufnahmen zu ermöglichen, stellt Planet Labs die Option der Harmonisierung zur Verfügung. Noch bevor die Daten zum Download zur Verfügung gestellt werden, wird jede einzelne Aufnahme bzw. Szene einzeln kalibriert. Basierend auf einer monatlich saisonal angepassten *Basemap*, erstellt

mit Sentinel-2 Daten, wird ein lineares Modell für jedes Band und jede Szene angefertigt, um Unterschiede zwischen einzelnen Szenen und Sensoren zu minimieren. (KINGTON & COLLISON 2018)

2.3 Methodik

In Folgendem wird erläutert, wie die SuperDove Rasterbilder mit den vier Bändern weiterverarbeitet werden (Abb. 2). Ziel ist es, im ausgewählten Untersuchungsabschnitt die NDVI- und SABI-Werte für den Wasserkörper der Oder zu berechnen. Anhand dieser Rasterdaten wird die Auswertung durch Vergleich von Histogrammen und Karten des untersuchten Flussgebietes in der ausgewählten Zeitreihe durchgeführt.

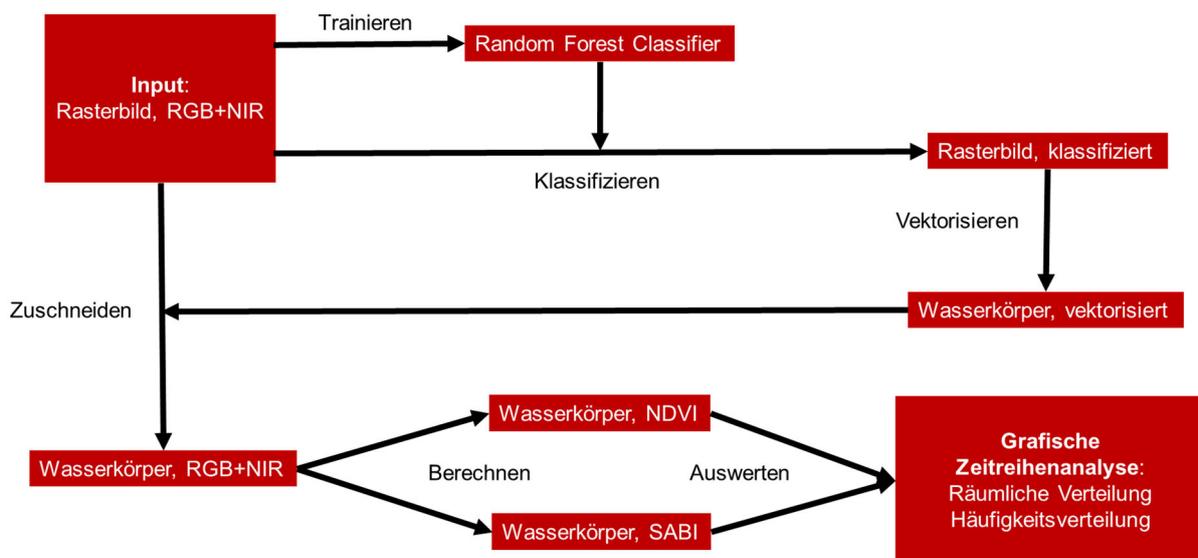


Abb. 2: Workflow

2.3.1 Software

Es wird die Software QGIS Version 3.30.3-'s-Hertogenbosch verwendet. Für den *Random Forest* Klassifikator wird in QGIS das *Semi-Automatic Classification Plugin* Version 7.10.11 – Matera eingesetzt (CONGEDO 2021).

2.3.2 Extraktion des Wasserkörpers mittels *Random Forest* Klassifikator

Das Klassifikationsverfahren *Random Forest* besteht aus unabhängig voneinander trainierten Entscheidungsbäumen. Hierbei wird beim sogenannten *Bootstrapping* jeder Entscheidungsbaum mit zufällig ausgewählten und möglicherweise doppelt vorkommenden Trainingsdaten gespeist. Des Weiteren wird jeder Entscheidungsbaum mit einem eigens zufällig ausgewählten *Feature Subset* trainiert. Es handelt sich somit um eine *supervised Machine Learning* Methode. Die Klassifikationsmethode weist gute Ergebnisse in Relation zu dem Implementierungsaufwand auf. (ZHOU 2021; REBALA et al. 2019)

Für diese Arbeit wird der *Random Forest* Klassifikator anhand von ausgewählten Trainingsdaten des Rasterbildes vom 11.08.2022 der Zeitreihe trainiert. Mit dem so erstellten Klassifikator wird jenes Rasterbild klassifiziert, um den Wasserkörper verglichen mit den Daten von CO-RINE Land Cover exakter abbilden zu können (COPERNICUS 2024).

Das so klassifizierte Rasterbild wird vektorisiert. Um die Wasserkörper aus den ursprünglichen Rasterdaten mit vier Bändern zu extrahieren, wird das Rasterbild mit den Wasserkörper-Polygonen zugeschnitten.

Auf Grundlage der so extrahierten Rasterdaten des Wasserkörpers werden die weiteren Index-Berechnungen durchgeführt.

2.3.3 Vegetationsindizes

Der NDVI wurde von ROUSE et al. (1974) ursprünglich für eine automatisierte Quantifizierung von saisonaler Vegetationsveränderung entwickelt. Die spektraldifferenzierte Reflektion von elektromagnetischen Wellen an photosynthetisch aktiver Vegetation wird genutzt, um Vegetation von anderen grünen Oberflächen zu unterscheiden: Während rot erscheinende Wellen mit einer Länge um 650 nm von den Pflanzen absorbiert werden, was zur grünen Erscheinung durch die Reflektion beiträgt, werden Wellen im Nahinfrarotbereich um 800 nm herum überwiegend reflektiert (BALDENHOFER 2024). Der Vegetationsindex nach ROUSE et al. (1974) wird folgendermaßen berechnet:

$$\text{Gl. 1} \quad NDVI = \frac{NIR-Rot}{NIR+Rot}$$

Die Formel wird seitdem vielseitig angewendet, unter anderem großskalig im Copernicus Projekt zum Monitoring globaler Vegetationsperioden auf Grundlage des Sentinel-3 Satelliten (JRC 2024). Der Index wurde außerdem bereits von Landpflanzen auf oberflächennahe Wasserpflanzen übertragen (KAHRU et al. 1993). ABSALON et al. (2023) wenden den NDVI mit Daten der Copernicus Sentinel-2 Mission an, um mit einer räumlichen Auflösung von 10 m Aufschlüsse über den Verlauf der Oder-Katastrophe zu erzielen: Es wurde eine Klassifizierung der Indexwerte in drei Klassen vorgenommen. Die Pixel weisen Werte unter 0, von 0 bis 0,2 und über 0,2 auf, wobei höhere Werte mit einem erhöhten Algenvorkommen im Gewässer in Verbindung gesetzt werden. Der NDVI kann durch die Normalisierung theoretisch Werte zwischen -1 und 1 erreichen.

Ein Vorteil der Normalisierung ist, dass Störungen wie verschiedene Helligkeiten, atmosphärische Turbulenzen sowie Oberflächenneigung weitgehend herausgerechnet werden können (BALDENHOFER 2024). Für diese Studie werden die Aufnahmen des SuperDove Satelliten mit den Bändern B_{3rot} und B_{4NIR} verwendet; sie sind auf die Sentinel-2 Bänder B_{4rot} und B_{8aNIR} abgestimmt (PLANET LABS 2024c).

Der *Surface Algal Bloom Index* ist speziell auf Meeresalgen angepasst (ALAWADI 2010). Da es sich bei der Algenblüte in der Oder nach SCHULTE et al. (2022) um eine Brackwasseralge handelt, wird Index SABI auf seine Anwendbarkeit hin in dieser Studie untersucht. Vorteilhaft ist, dass der Index sich unter Einbezug von kürzeren, wasserspezifischen Wellenlängen direkt auf die Detektion von oberflächennahen Wasserorganismen spezialisiert hat und sich robust gegenüber *Rayleigh Scattering* und Sonnenreflektionen erweisen soll (ALAWADI 2010). Zum Monitoring von Eutrophierung stadtnaher Gewässer wurde er von PLICHKO et al. (2021) ebenfalls erfolgreich angewendet. Der Algenblütenindex nach ALAWADI (2010) wird folgendermaßen berechnet:

$$\text{Gl. 2} \quad SABI = \frac{NIR-Rot}{Blau+Grün}$$

Als Wellenlängen werden B1_{blau}, B2_{grün}, B3_{rot} & B4_{NIR} der Bilddatei verwendet, welche mit den Sentinel-2 Bändern B2_{blau}, B3_{grün}, B4_{rot} & B8_{NIR} abgestimmt sind (PLANET LABS 2024c). Der SABI kann Werte zwischen -1 und 3 erreichen, positive Werte werden mit oberflächennaher photosynthetischer Aktivität in Verbindung gesetzt (ALAWADI 2010).

3 Ergebnisse

In den Abb. 3 bis Abb. 6 sind die Ergebnisse der Berechnungen von NDVI und SABI über den Zeitraum vom 25.07.2022 bis 30.09.2022 dargestellt. Im Untersuchungszeitraum liegt eine Auswertung von zehn Satellitenbildern vor. Es werden zudem Bilder vom 02.05.2022 und 30.12.2022 verwendet, um einen saisonalen Verlauf der photosynthetischen Aktivität nachzuvollziehen. Für die Darstellung der Ergebnisse werden hier zur besseren Übersichtlichkeit nur sechs Bilder aus dem Untersuchungszeitraum aufgeführt.

Um die Ergebnisse verständlich darstellen zu können, wird eine Farbskala zur Hilfe genommen, die in Abb. 3 zu sehen ist. Beim NDVI werden Werte zwischen -0,8 und 1 errechnet, wohingegen beim SABI Werte zwischen -1 und 3 aufzufinden sind. Um beide Indizes besser miteinander vergleichen zu können, wurden die Farben so angepasst, dass dieselben Werte die möglichst gleiche Farbe aufweisen, was beispielsweise bei dem Wert 1 in dunkelblau zu sehen. Ist die Farbgebung der räumlichen Verteilung rot-orange, liegt keine auffällige photosynthetische Aktivität vor. Ist sie jedoch gelb, nimmt diese zu. Eine grüne oder gar blaue Farbe repräsentiert eine erhöhte photosynthetische Aktivität.

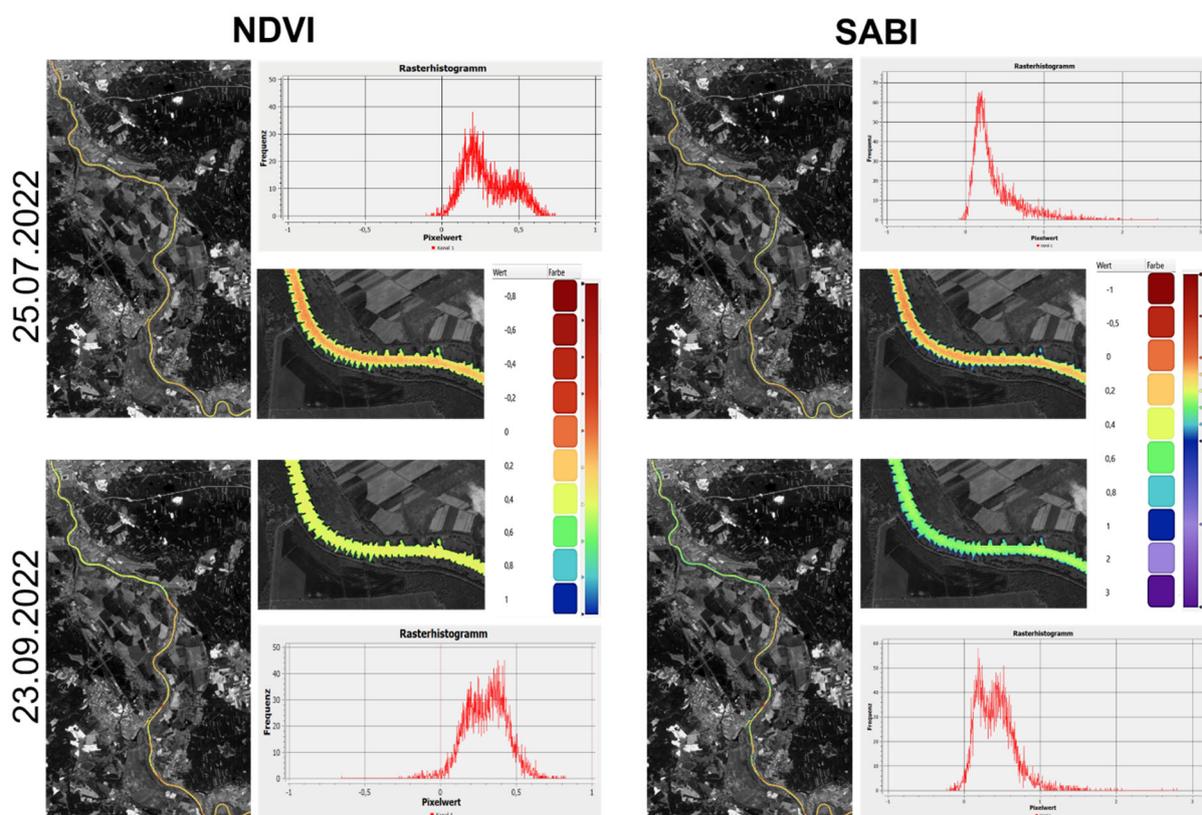


Abb.3: Gegenüberstellung der Ergebnisse von NDVI und SABI vom 25.07.2022 und 23.09.2022. Ganzes Untersuchungsgebiet, Histogramm, Teilausschnitt und Farbskala.

In Kapitel 3.1 werden die Ergebnisse des NDVI und des SABI miteinander verglichen. In den Abb. 4 und 5 wird sich ausschließlich auf den NDVI bezogen, da dieser robustere Ergebnisse liefert, wie in der Diskussion in Kapitel 4 erläutert wird.

3.1 Vergleich NDVI und SABI

In der Abb. 3 werden die Ergebnisse von NDVI und SABI gegenübergestellt. Hierfür werden 25. Juli sowie 23. September ausgewählt. Des Weiteren wird das gesamte Untersuchungsgebiet mit dazugehörigem Histogramm sowie einen Teilausschnitt dargestellt, sodass die farbliche Auswertung genauer erkennbar ist. Es wird deutlich, dass bei den Indizes eine unterschiedliche Differenz des niedrigsten und höchsten Wertes vorliegt. Außerdem ist in den Teilausschnitten zu erkennen, dass am 25. Juli eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Indizes vorliegt. Am 23. September hingegen unterscheiden sich die Zahlen und der SABI zeigt mehr Werte im Bereich $> 0,5$ als der NDVI.

3.2 Zeitreihe NDVI

Im oberen Bereich der Abb. 4 ist die Zeitreihe der räumlichen Verteilung des NDVIs im gesamten Untersuchungsgebieten visualisiert. Mithilfe der Einfärbung ist der zeitliche Verlauf und die räumliche Ausdehnung der Algenblüte zu erkennen. Es ist ein Bild vor (25. Juli), drei Bilder während (04. & 11. & 26. August) sowie zwei Bilder nach (23. & 30. September) dem ermittelten Algenblütenereignis abgebildet. Innerhalb der Zeitreihe lässt sich im untersuchten Flussverlauf eine Veränderung des definierten Farbspektrums feststellen. Anhand dieser Veränderung lässt sich beobachten, dass die photosynthetische Aktivität kontinuierlich zunimmt, am 26.08. ihr Maximum erreicht (hellgrüne Einfärbung des Flussverlaufs) und ab diesen Zeitpunkt wieder rückläufig ist (orangene Einfärbung am 30.09.2022). Die farbliche Darstellung der Veränderung der photosynthetischen Aktivität über die Zeit wird im unteren Bereich der Abb. 4 anhand eines Teilabschnitts des Untersuchungsgebieten verdeutlicht; zudem ist die eine präzise räumliche Abgrenzung zum bewachsenen Ufer genau zu erkennen.

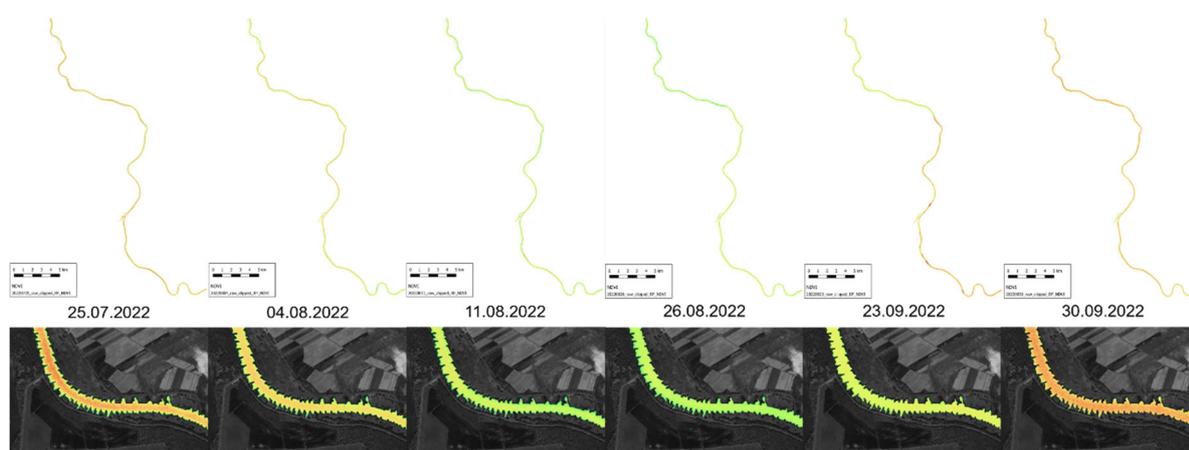


Abb. 4: Zeitreihe NDVI des gesamten Untersuchungsgebietes vom 25.07.2022 bis 30.09.2022 (oben) sowie eines Teilausschnittes (unten)

Die zum gesamten Untersuchungsgebiet gehörigen Histogramme sind in Abb. 5 zu sehen. Auch hier ist die Verschiebung der maximalen Häufigkeiten der Frequenzen ab dem

04.08.2022 in Richtung des Wertes 1 und den rückläufigen Trend ab dem 23.09.2022 zu erkennen. Im Allgemeinen ist die Verteilung der Häufigkeit der errechneten NDVI-Werte ersichtlich.

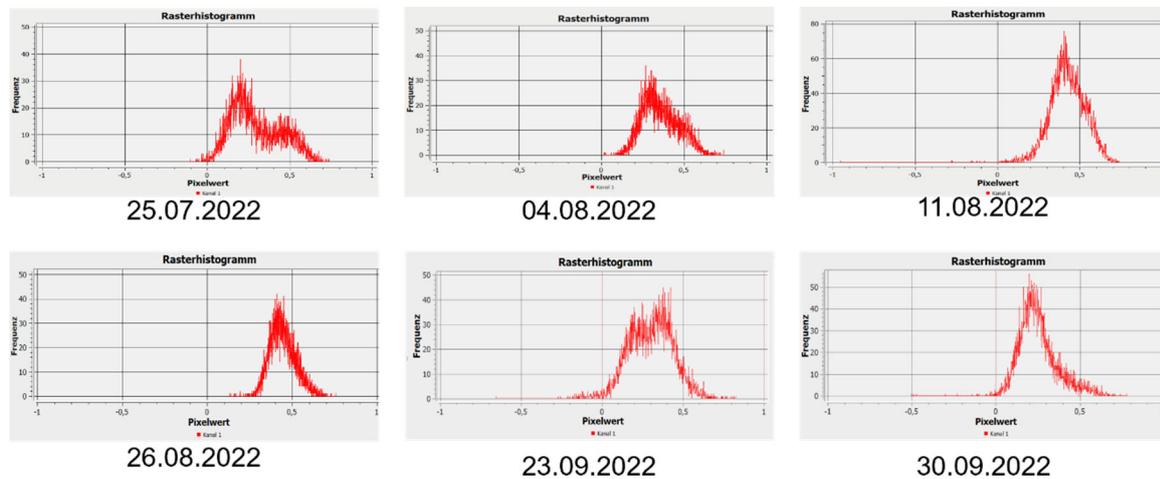


Abb. 5: Zeitreihe der Histogramme des NDVIs vom 25.07.2022 bis 30.09.2022

4 Diskussion

In Kapitel 4.1 werden die Ergebnisse auf Plausibilität, mögliche Fehler sowie Ungenauigkeiten überprüft. Des Weiteren werden in Kapitel 4.2 die Ergebnisse mit anderen Studien in Bezug gesetzt.

4.1 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse werden entsprechend der Bearbeitungsschritte diskutiert. Zunächst wird die Klassifizierung und damit verbundene Vektorisierung des Gewässerausschnittes analysiert, im zweiten Abschnitt die Indexberechnung. Anschließend wird anhand der grafischen Zeitreihenanalyse auf radiometrische Spezifikationen und mögliche Optimierungen eingegangen.

4.1.1 Klassifizierung des Wasserkörpers

Die Extraktion des Wasserkörpers mithilfe der *Random Forest* Klassifizierung und anschließenden Klassifizierung liefert plausible Ergebnisse. Diese erscheinen aufgrund der hohen räumlichen Auflösung wesentlich genauer als beispielsweise jene der CORINE Landcover Klassifizierung (COPERNICUS 2024). Das gewählte Datum für die Klassifizierung, der 11.8.2022, ist passend für die Analyse des Katastropheneignisses. An Tagen mit niedrigem Wasserstand ist in den Randbereichen des Polygons für den Wasserkörper unter anderem Ufervegetation zu erkennen. Dies verfälscht die Ergebnisse. Der SABI-Wert liegt zwischen 1 und 2, während der NDVI-Wert über 0,6 liegt. Die durch Ufervegetation verursachten Streuwerte machen zwar nur einen kleinen Teil der Gesamtwerte aus, aber dennoch unerwünscht. Sie verursachen in den nach Histogrammen den nach rechts flach auslaufenden Graphen (siehe Abb. 5) und sind somit von der Algenblüte unterscheidbar. Eine tagesgenaue Aktualisierung mithilfe des bereits trainierten *Random Forest* Klassifikators ist mit gewissem Rechenaufwand möglich. Insgesamt lässt sich festhalten, dass die hohe räumliche Auflösung des Flussbetts nur einen geringen Anteil an Mischpixeln aufweist. Zusammen mit der präzisen Vektorisierung

bildet dies eine solide Grundlage für eine isolierte Häufigkeitsanalyse der Indexwerte im Fluss innerhalb der Landschaft.

4.1.2 Indizes

Sowohl der NDVI als auch der SABI zeigen die Algenblüte in der Oder. Die Wertebereiche sind unterschiedlich, was auf die fehlende Normalisierung des SABI zurückzuführen ist. Eine Vergleichbarkeit wird durch die Anpassung der Farbskalen ermöglicht. Der SABI-Index zeigt eine höhere Sensitivität für atmosphärische Interferenzen. Für die Untersuchung des Flusses bietet es keinen Mehrwert, den blauen und grünen Farbkanal mit einzubeziehen. Dies könnte an dem hohen Trübungsgrad der Oder im Vergleich zu Ozeanen liegen. Der NDVI zeigt robustere Ergebnisse, obwohl er für die Landvegetation gedacht ist.

4.1.3 Grafische Zeitreihenanalyse: Räumliche Verteilung

Der Verlauf der Algenblüte ist in einer grafischen Zeitreihenanalyse sowohl räumlich verteilt auf der Karte (siehe Abb. 4) als auch häufigkeitsverteilt im Histogramm (siehe Abb. 5) nachvollziehbar. Aufgrund der Zusammensetzung der Szenen sind auf der Karte teilweise die Nähte der Aufnahmestreifen erkennbar. Diese Unterschiede sind zum einen auf unterschiedliche Aufnahmezeitpunkte der Szenen zurückzuführen, die mit abweichendem Sonnenstand, Aufnahmewinkel und atmosphärischer Zusammensetzung einhergehen. Zum anderen sind sie auf inkonsistente Radiometrie der SuperDove Daten zurückzuführen (LATTE & LEJEUNE 2020). Beim Vergleich der spektralen Bandbreiten fällt auf, dass der SuperDove Satellit im Vergleich zum Sentinel-2 eine wesentlich geringere spektrale Auflösung aufweist. Dies führt zu einer erschwerten Vergleichbarkeit der Indexergebnisse (LATTE & LEJEUNE 2020). Die Normalisierung der Daten auf Sentinel-2 Radiometrie erfolgt für die SuperDove Aufnahmen bei Planet Labs mithilfe eines linearen Modells für jede einzelne Szene auf Grundlage einer Basiskarte, was bei großflächigen Abweichungen zu einer Überkorrektur von einzelnen Szenen und damit zu inkonsistenten Daten innerhalb eines Mosaiks führen kann (KINGTON & COLLISON 2018). Nach LATTE & LEJEUNE (2020) können die Datensätze zwar weiterhin verwendet werden, jedoch muss die radiometrische Streuweite bei den Ergebnissen berücksichtigt werden. KINGTON & COLLISON (2018) schlagen eine Harmonisierung nach Landnutzungstyp anstelle nach Szenen vor, was die Streifenbildung jedoch auch nicht ganz löst. Die Anwendung eines Neuronalen Netzwerks mit Sentinel-2 und SuperDove als Basisdaten bietet räumlich und spektral hochauflösende Bilder, welche eine erhöhte Konsistenz aufweisen, jedoch erhöht sich die zeitliche Auflösung von einem Tag auf fünf Tage (LATTE & LEJEUNE 2020).

4.1.4 Grafische Zeitreihenanalyse: Häufigkeitsverteilung

Ein Histogramm der Indexwerte ist hilfreich, um den Verlauf der Algenblüte im Flussgebiet zu quantifizieren. Veränderungen sind besser ersichtlicher als auf einer Karte, da die Wasserflächen im Vergleich zur Landschaft sehr schmal sind. Die genaue Klassifizierung und Vektorisierung bietet räumlich klar definierte Ergebnisse. Der Wandel ist für den Flussabschnitt gut sichtbar, jedoch können aufgrund der oben beschriebenen unterschiedlich kalibrierten Streifen Verzerrungen der Ergebnisse auftreten.

Die linearisierte Harmonisierung von Planet Labs basiert auf einem saisonalen Modell, das in Monate unterteilt ist. Dadurch kann es zu einer Verschiebung der Werte zwischen den Monaten, beispielsweise zwischen Juli und August, kommen. Diese Verschiebung hängt vom Kalibrierungsmodell ab und nicht von den Gegebenheiten vor Ort. (KINGTON & COLLISON 2018).

Nach CÂNDIDO et al. (2016) können im Gewässer gelöste Stoffe die Reflektion erhöhen, während organisches Material die Absorption erhöht. Auch die Schwebstoffkonzentration hat Einfluss auf das Verhältnis von Reflektion im sichtbaren und Nahinfraroten Bereich des Wellenspektrums (DOXARAN et al. 2002). Diese Effekte können Einfluss auf das Ergebnis haben, insgesamt ist jedoch das Vorhandensein der Algenblüte auch mit Bildern des SuperDove Satelliten zu erkennen.

4.2 Einordnung der Ergebnisse in Fachliteratur

4.2.1 Vergleich zu in situ Messungen bei Frankfurt (Oder)

In einem Statusbericht vom Umweltbundesamt zum Fischsterben in der Oder werden die in situ Messwerte der Chlorophyll *a* Konzentration an der Messstation Frankfurt (Oder) während dem Zeitraum vom 28.07.2022 bis 30.08.2022 dargestellt (siehe Abb. 6) (SCHULTE et al. 2022). Mit diesen Messwerten können die in dieser Studie ermittelten Ergebnisse verglichen werden. In der linken oberen Ecke der Abb. 6 ist das Untersuchungsgebiet zu sehen und in Rot der südliche Teil von Frankfurt (Oder) verdeutlicht. Die Messwerte der Messstation Frankfurt (Oder) sind als schwarzer Graphen-Verlauf dargestellt. Die Meldung des Fischsterbens in Deutschland wird mit der roten Linie am 9. August markiert. Daraufhin folgt eine Datenlücke, die mit einer Messbereichsüberschreitung und einem Stromausfall begründet wird. Das Maximum der Chlorophyll *a* Konzentration an der Messstation Frankfurt (Oder) wurde zwischen dem 7. und 17. August erreicht, kann jedoch aufgrund der Datenlücke nicht genauer identifiziert werden.

Innerhalb des abgebildeten Zeitraumes liegen vier Zeitpunkte, an denen Satellitenbilder zur Auswertung vorliegen (rechts in Abb. 6 zu sehen). Es handelt sich um 1) 31.07.2022, 2) 04.08.2022, 3) 11.08.2022 und 4) 26.08.2022, welche mit Pfeilen und Kreisen, wenn Daten vorhanden sind, im Diagramm gekennzeichnet sind.

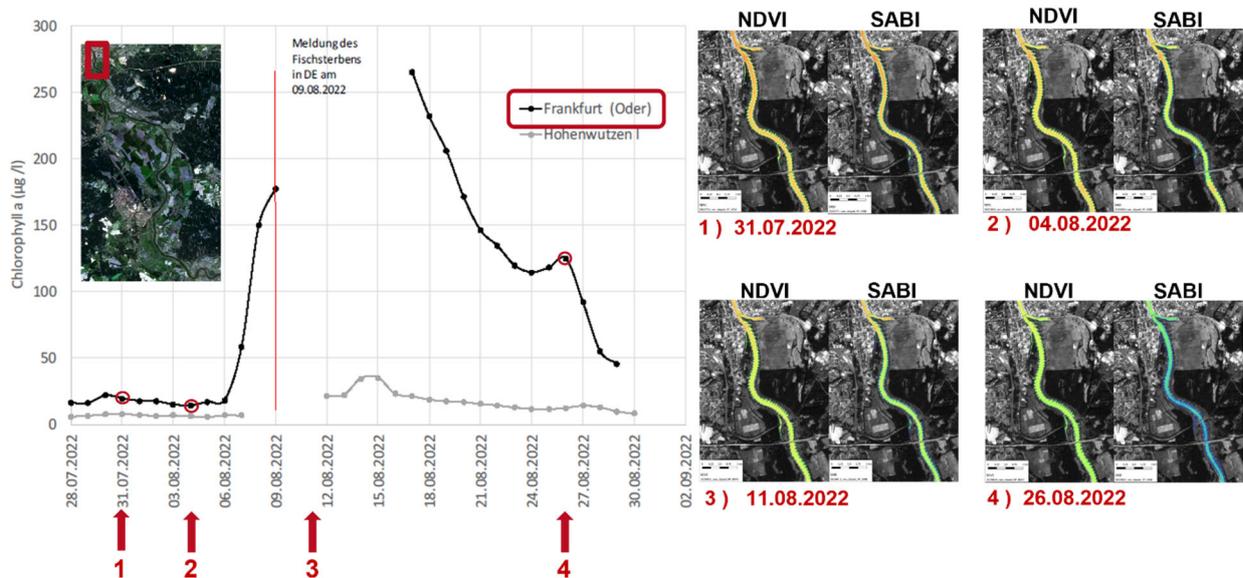


Abb. 6: Vergleich der ausgewerteten Satellitenbilder aus dem Untersuchungsgebiet mit den gemessenen Chlorophyll *a* Konzentrationen an der Messstation Frankfurt (Oder) (eigene Darstellung nach SCHULTE et al. (2022))

Außerdem werden sowohl die Ergebnisse vom NDVI, als auch SABI, als Ausschnitt des Untersuchungsgebiet abgebildet. Anhand der Auswertung der Bilder, bei denen ein Wechsel der Farben vom Orange in Grün-Blau zu erkennen ist (siehe Farbskala in Abb. 3), und auch der Histogramme (siehe Abb. 5), ist ein Anstieg der Werte beider Indizes gegen 1 zu erkennen. Dies deutet auf eine erhöhte Biomassenproduktion hin und die Schlussfolgerung einer Algenblüte ist möglich.

Die Auswertung der in dieser Studie errechneten Ergebnisse zeigen den höchsten Wert am 26.08.2022, welches die höchste Chlorophyll *a* Produktion und somit stärkste Algenblüte aus sagt. Im Vergleich zu den gemessenen Werten zeigt sich, dass bereits am 09.08.2022 eine höherer Chlorophyll *a* Konzentration vorliegt und einen ansteigenden Trend aufweist als am 26.08.2022. Somit müssten errechnet Werte am 11.08.2022 auch höhere Werte aufweisen, was jedoch nicht der Fall ist. Dies lässt die Vermutung ableiten, dass nicht nur bei den Messwerten, sondern auch bei den Ergebnissen der Satellitenbilderauswertung zwischen dem 09./11. und 26. August eine höhere Konzentration vorliegen muss. Innerhalb dieses Zeitraums können keine Satellitenbilder ausgewertet werden, da eine zu hohe Wolkenbedeckung oder andere Irritationen vorliegen. Dadurch, dass zusätzlich in diesem Zeitraum keine gemessenen Chlorophyll *a* Daten vorliegen, ist es schwierig eine sichere Aussage zu treffen und es sind nur Vermutungen zu treffen. (SCHULTE et al. 2022)

4.2.2 Vergleich mit Studie von ABSALON et al. (2023)

Zusätzlich werden die Ergebnisse aus dieser Auswertung auch mit den Ergebnissen aus der Studie von ABSALON et al. (2023) verglichen. Da ABSALON et al. (2023) nicht das gleiche Untersuchungsgebiet betrachtet, werden die nächstgelegenen Gebiete stromauf- und abwärts begutachtet. In beiden Untersuchungen liegen Ergebnisse vom 11. und den 26. August vor (in Abb. 7 und Abb. 8 rot umrandet).

Unterschiede zwischen ABSALON et al. (2023) und dieser Auswertung sind, dass unterschiedliche Satellitendaten verwendet wurden. ABSALON et al. (2023) verwendet Sentinel-2 Daten, welche zu den SuperDove Aufnahmen unterschiedliche Auflösungen aufweisen. Zusätzlich werden bei ABSALON et al. (2023) weitere Tage in die Auswertung einbezogen. Zudem wird in ebd. Studie lediglich der NDVI berechnet (ABSALON et al. 2023).

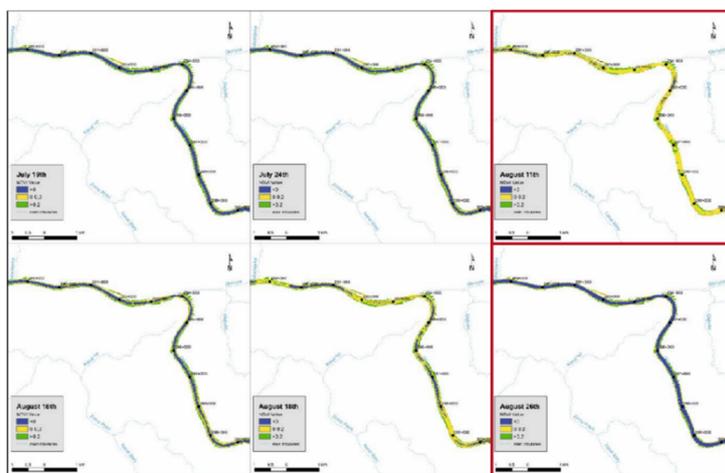


Abb. 7: Sektion Nr. 9 – die Oder Nähe Cigacice – flussaufwärts des Untersuchungsgebietes dieser Studie (ABSALON et al. 2023)

Eine hohe räumlich-zeitliche Auflösung ermöglicht eine bessere Detektion von kleinräumigen Algenblüten-Vorkommnissen (ALHARBI 2023). Die räumliche Auflösung der Sentinel-2 Daten ist für die von dieser Studie vergleichbaren Bänder 10 m je Pixel. Des Weiteren ist die maximale temporale Auflösung der verfügbaren Aufnahmen fünf Tage, verglichen mit den SuperDove Daten also deutlich niedriger aufgelöst (EUROPEAN SPACE AGENCY 2024). Aber auch bei einer Auflösung von 3 m je Pixel der SuperDove Satelliten lassen entsprechende Fluss- und Uferelemente Mischpixel in den Aufnahmen entstehen. Dennoch ermöglicht verglichen mit den von ABSALON et al. (2023) verwendeten Sentinel-2 Daten die zeitlich und räumlich höhere Auflösung der SuperDove Satelliten eine genauere Analyse des Gewässers. So führt die höhere zeitliche Auflösung zu einer größeren Auswahl an potenziell verwertbarem Bildmaterial. Durch die höhere räumliche Auflösung lässt sich der Umriss des Wasserkörpers besser erfassen sowie das Vorkommen von Mischpixeln im Fluss- und Uferbereich minimieren.

In Abb. 7 ist das erste zu vergleichende Gebiet aus ABSALON et al. (2023) zu sehen, welches stromaufwärts, süd-östlich in der Nähe der Stadt Cigacice gelegen ist. Hier ist zu erkennen, dass die höchsten Werte des NDVI vor dem 26.08.2022 vorliegen, was mit der Fließrichtung der Oder begründbar ist.

Das zweite zu vergleichende Gebiet liegt stromabwärts, nördlich von Frankfurt (Oder) im Grenzgebiet an der Mündung der Warta bei Kostrzyn und ist in Abb. 8 zu sehen. Hier kann die größte Ähnlichkeit zu den berechneten Ergebnissen aus diesem Beitrag beobachtet werden, denn auch hier sind die Maximalwerte am 26.08.2022 abzulesen.

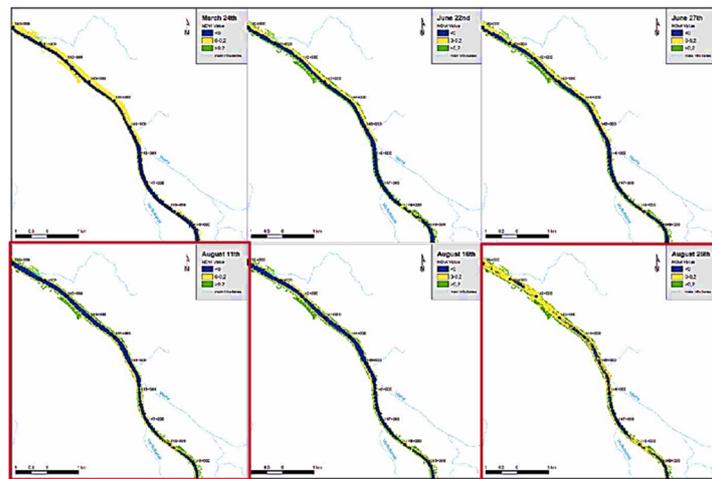


Abb. 8: Sektion Nr. 14 – Grenzregion der Oder an der Mündung der Warta (Kostrzyn) – flussabwärts des Untersuchungsgebietes dieser Studie (ABSALON et al. 2023)

In Abb. 9 sind die Ergebnisse des NDVI am 11. und 26. August von dieser Arbeit und die von ABSALON et al. (2023) im Verlauf der Oder dargestellt. Hier ist zum einen der räumliche Verlauf der Algenblüte stromabwärts zu sehen, da die höchsten NDVI-Werte am 11. August weiter stromaufwärts zu sehen sind als am 26. August. Zum anderen erkennt man, dass die Werte am 11. August ein intensiveres Gelb aufzeigen und eine stärkere Algenblüte anzunehmen ist. Dies bestärkt die These, dass der Ursprung der Algenblüte in einem Abschnitt stromaufwärts zu finden ist.

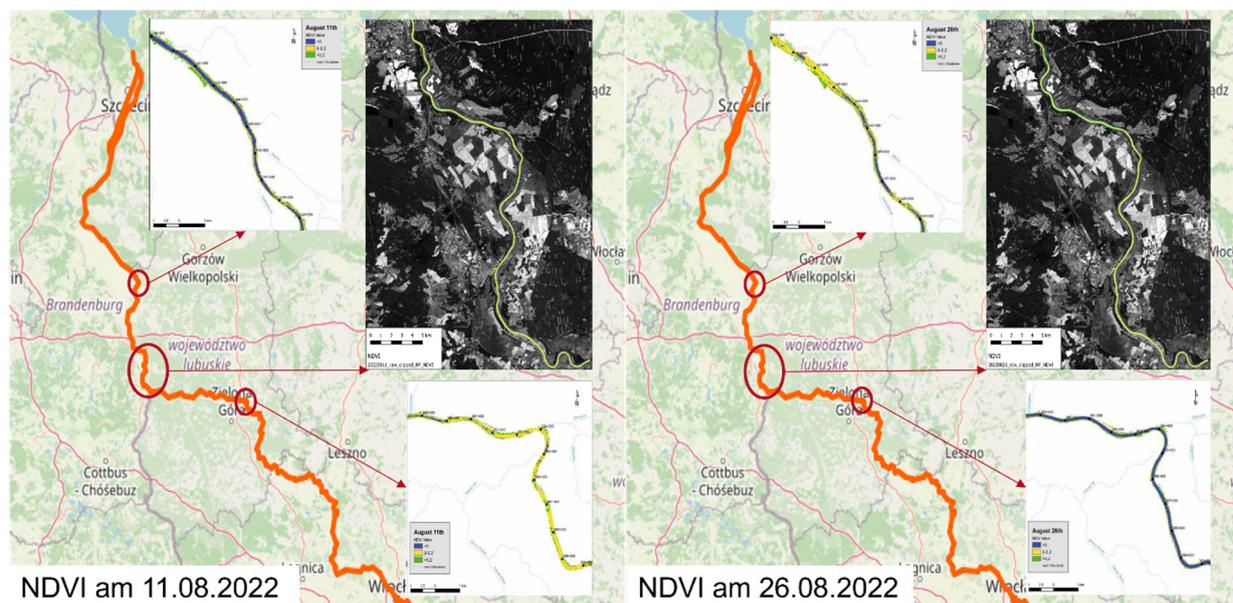


Abb. 9: Zusammenstellung der Ergebnisse des NDVIs von ABSALON et al. (2023) und dieser Arbeit im Verlauf der Oder (eigene Darstellung nach (ABSALON et al. (2023), OPENSTREETMAP (2024))

Im Allgemeinen kann anhand der Abb. 7 und 8 festgestellt werden, dass ein leicht ähnlicher Trend des NDVI bei ABSALON et al. (2023) wie bei den Ergebnissen aus der Analyse dieses Beitrages zu beobachten ist, welcher jedoch nicht sehr signifikant ist. Gründe hierfür können die unterschiedliche Auflösung der Bilder oder andere Ursachen sein. Zudem ist anzumerken, dass die Studie von ABSALON et al. (2023) Satellitenbilder von Tagen auswertet, bei denen in dieser Studie keine sinnvolle Auswertung stattfinden kann, da die Bilder von diesen Tagen Wolken oder andere Probleme aufweisen.

Des Weiteren gibt es über den in dieser Studie untersuchten NDVI und SABI hinaus noch viele weitere Vegetationsindizes, die bzgl. der Algenblütendetektion untersucht werden. Der von KIM et al. (2016) für Flüsse entwickelte *Algal Bloom Detection Index* verwendet, wie der NDVI, die Wellenlängenbereiche rot und NIR. Die hieraus gewonnen Ergebnisse der Studie weisen eine hohe Korrelation zu Algenblütenvorkommen auf, wobei das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgleichung des Zusammenhangs zwischen Index und gemessenen Zell-Konzentration sich nur auf rund 0,72 beläuft.

Der von AHN & SHANMUGAM (2006) untersuchte *Red Tide Index* hingegen weist eine hohe Korrelation zur in situ gemessenen Chlorophyll-Konzentration in Salzwasser-Gewässern auf. Die von ihnen ausgearbeitete Regressionsgleichung hat ein Bestimmtheitsmaß von 0,92.

ALHARBI (2023) hat die Detektion von Algenblüten im roten Meer anhand verschiedenster Spektralindizes untersucht. Der NDVI und SABI waren mit über knapp 80 % Klassifizierungs-Genauigkeit im Mittelfeld der fünf untersuchten Indizes. Am besten schnitt der *Surface Scum Index* (SSI) mit einer Genauigkeit von rund 87 % ab.

Verglichen mit den in dieser Studie untersuchten Indizes gibt es somit noch weitere Vegetationsindizes, deren Korrelation zur Chlorophyll *a* Konzentration in Gewässern hoch ist.

Über den Vergleich zwischen Vegetationsindizes hinaus erachtet CÂNDIDO et al. (2016) ein Monitoring von Algenblüten mittels Fernerkundung für ein vielversprechendes Anwendungs-

gebiet. Demnach kann die Chlorophyll *a* Konzentration anhand ausgearbeiteter Zusammenhänge zu Vegetationsindizes auch in Gewässern mit ähnlichen Bedingungen gemonitort werden. (CÂNDIDO et al. 2016)

Die in dieser Studie gewonnenen Erkenntnisse stützen diese Annahme insoweit, als dass der NDVI eine Korrelation zur in situ Chlorophyll *a* Konzentration in der Oder aufwies.

5 Fazit & Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass *Random Forest* Klassifizierung eine präzise Isolation der Wasserflächen für weitere Untersuchungen ermöglicht. Im Vergleich zum SABI produziert der NDVI robustere Ergebnisse. Die geringe spektrale Auflösung der SuperDove Satelliten führt zu Ungenauigkeiten bei der Quantifizierung der Algenblüte. Allgemein können trotzdem an wolkenfreien Tagen die Indizes objektiv gut ausgewertet werden, eine räumliche und zeitliche Entwicklung der Algenblüte ist erkennbar. Es zeigt sich zudem eine Korrelation zwischen den in situ Messdaten bei Frankfurt (Oder) und denen in dieser Arbeit errechneten Ergebnisse von einem erhöhten Chlorophyll *a* Wert, der tatsächlich im Zeitraum August 2022 vorliegt. Jedoch stimmen die Tage, an denen die Maximalwerte gemessen wurden, aufgrund von Datenlücken sowie nicht verwendbaren Satellitenbildern nicht überein. Im Vergleich zu ABSALON et al. (2023) zeigt sich, dass die Ergebnisse dieser Arbeit sich dort gut einbinden und dass die höhere Auflösung der SuperDove Aufnahmen eine bessere Abgrenzung des Wasserkörpers, Verringerung der Mischpixel und somit teilweise klarere Ergebnisse der Indizes ermöglichen. Zudem ist deutlich zu erkennen, dass stromaufwärts höhere Chlorophyll *a* Werte aufzufinden sind und beide Arbeiten den höchsten Wert in nahe gelegenen Gebieten am gleichen Tag (26.08.22) aufweisen (ABSALON et al. 2023). Abschließen kann gesagt werden, dass der Nachweis der Algenblüte mittels Fernerkundung praktikabel und als durchaus sinnvoll einzustufen ist, begründbar anhand von Messdaten von SCHULTSCHULTE et al. (2022) und einem ähnlichen Trend in der bereits vorliegenden Studie von ABSALON et al. (2023).

Um präzisere Ergebnisse zu erlangen, könnte eine Klassifizierung des Wasserkörpers mittels *Random Forest* für jeden Tag vorgenommen werden. Die Auffälligkeiten durch die geringe spektrale Auflösung der SuperDove Daten könnten mittels Anwendung eines neuronalen Netzwerkes zwischen diesen und der Sentinel-2 Daten verbessert werden, jedoch auf Kosten der zeitlichen Auflösung. Außerdem können z.B. durch ein Chlorophyll-Konzentrations-Monitoring, gestützt von in situ Messungen sowie Fernerkundungsdaten, eine bessere Korrelation erreicht werden, um eine toxische Algenblüte schneller zu detektieren. Weitere Analysen zu unterschiedlichen Indizes in Bezug auf photosynthetische Aktivität in Binnengewässern wären hilfreich, um eine bessere Vergleichbarkeit für dieses Anwendungsgebiet zu erhalten. Darüber hinaus wären auch weitere Analysen an der Oder stromaufwärts, zur genaueren Untersuchung der Quelle für die Veränderungen im Wasser und der folgenden Algenblüte und dem Fischsterben sinnvoll. Eine automatisierte Häufigkeitsanalyse der NDVI-Werte für den Wasserkörper könnte frühzeitige Warnungen bei einer Algenblüte ermöglichen. Im Falle der Grenzwertüberschreitung kann die hochaufgelöste räumliche Analyse dabei unterstützen, Ursachen zu finden.

All dies könnte das Ziel des Monitorings unterstützen, sodass eine ähnliche Umweltkatastrophe in einem Binnengewässer schneller erkannt, entsprechend gehandelt sowie Schlussfolgerungen für präventive Maßnahmen abgeleitet werden können.

6 Literaturverzeichnis

- ABSALON, D., MATYSIK, M., WOŹNICA, A. & JANCZEWSKA, N., 2023: Detection of changes in the hydrobiological parameters of the Oder River during the ecological disaster in July 2022 based on multi-parameter probe tests and remote sensing methods. *Ecological Indicators*, **148**, 110103.
- AHN, Y.-H. & SHANMUGAM, P., 2006: Detecting the red tide algal blooms from satellite ocean color observations in optically complex Northeast-Asia Coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, **103**(4), 419-437.
- ALAWADI, F., 2010: Detection of surface algal blooms using the newly developed algorithm surface algal bloom index (SABI). *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions*, **7825**, 45-58.
- ALHARBI, B., 2023: Remote sensing techniques for monitoring algal blooms in the area between Jeddah and Rabigh on the Red Sea Coast. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **30**, 100935.
- BALDENHOFER, K. G., 2024: NDVI - Lexikon der Fernerkundung, <https://www.fe-lexikon.info/lexikon/ndvi>, letzter Zugriff 13.01.24.
- CÂNDIDO, A. K. A. A., FILHO, A. C. P., HAUPENTHAL, M. R., DA SILVA, N. M., SOUSA CORREA, J. DE & RIBEIRO, M. L., 2016: Water Quality and Chlorophyll Measurement Through Vegetation Indices Generated from Orbital and Suborbital Images. *Water Air Soil Pollut*, **227**(7).
- CONGEDO, L., 2021: Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *JOSS*, **6**(64), 3172.
- COPERNICUS, 2024: CORINE Land Cover. <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover>, letzter Zugriff 14.01.24.
- DOXARAN, D., FROIDEFOND, J.-M. & CASTAING, P., 2002: A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters. *International Journal of Remote Sensing*, **23**(23), 5079-5085.
- EUROPEAN SPACE AGENCY, 2024: Sentinel2: Resolution and Swath - Spatial and Spectral Resolutions. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload/resolution-and-swath>, letzter Zugriff 13.01.24.
- JRC, 2024: Copernicus Global Land Service. Providing bio-geophysical products of global land surface, <https://land.copernicus.eu/global/products/ndvi>, letzter Zugriff 13.01.24.
- KAHRU, M., LEPPANEN, J.-M. & RUD, O., 1993: Cyanobacterial blooms cause heating of the sea surface. *Marine Ecology Progress Series*, **101**(1/2), 1-7.
- KIM, H.-M., YOON, H.-J., JANG, S. W., KWAK, S. N., SOHN, B. Y., KIM, S. G. & KIM, D. H., 2016: Application of Unmanned Aerial Vehicle Imagery for Algal Bloom Monitoring in River Basin. *IJCA*, **9**(12), 203-220.
- KINGTON, J. & COLLISON, A., 2018: Scene Level Normalization of Planet Dove Imagery, 29 S.
- LATTE, N. & LEJEUNE, P., 2020: PlanetScope Radiometric Normalization and Sentinel-2 Super-Resolution (2.5 m): A Straightforward Spectral-Spatial Fusion of Multi-Satellite Multi-Sensor Images Using Residual Convolutional Neural Networks. *Remote Sensing*, **12**(15), 2366.
- LUBW, 2013: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch im Internet. DGJ-Pegeldaten für Pegel Frankfurt (Oder) Nr. 6030300. <https://www.dgj.de/>, letzter Zugriff 09.01.24.

- LUBW, 2014: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch im Internet. DGJ-Pegeldaten für Pegel Eisenhüttenstadt Nr. 6030000. <https://www.dgj.de/>, letzter Zugriff 09.01.24.
- OPENSTREETMAP, 2024: Karten. <https://www.openstreetmap.org/relation/387605>, letzter Zugriff 13.01.24.
- PAZDERSKI, L., PAZDERSKA-SZABŁOWICZ, M. & MERES, A., 2023: Greenpeace Report: Salinisation Of Poland's Two Major Rivers by Mining Companies. A Greenpeace Study 2022/2023, 16 S., Warschau.
- PLANET LABS, 2024a: Education and Research Program. <https://www.planet.com/markets/education-and-research/>, letzter Zugriff 09.01.24.
- PLANET LABS, 2024b: PlanetScope. <https://developers.planet.com/docs/data/planetscope/>, letzter Zugriff 13.01.2024.
- PLANET LABS, 2024c: Understanding PlanetScope Instruments. <https://developers.planet.com/docs/apis/data/sensors/>, letzter Zugriff 13.01.24.
- PLANET LABS, 2024d: 36 Planet SuperDoves Successfully Launch on SpaceX's Falcon 9 Rocket. <https://www.planet.com/pulse/36-planet-superdoves-successfully-launch-on-spacexs-falcon-9-rocket/>, letzter Zugriff 13.01.2024.
- PLICHKO, L., ZATSERKOVNYI, V., KHILCHEVSKYI, V., ILCHENKO, A. & NIKOLAIENKO, O., 2021: Using the Surface Algal Bloom Index to assess the ecological state of a small river an urbanized area and the possibility of its revitalization. *Geoinformatics*. **2021**(1), 1-6.
- POVODÍ ODRY, 2007: Einzugsgebiet der Oder. Internationales Odereinzugsgebiet. https://www.pod.cz/planovani/de/oblast_povodi_odry.html, letzter Zugriff 13.01.2024.
- REBALA, G., RAVI, A. & CHURIWALA, S., 2019: An introduction to machine learning, 77 S., Cham: Springer.
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., DEERING, D. W., SCHELL, J. A. & HARLAN, J. C., 1974: Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation, 390 S.
- SCHULTE, C., ABBAS, B., ENGELKE, C., FISCHER, H., HENNEBERG, S., HENTCHEL, H., JEKEL, H., JESKE, R., PIETSCH, K., SCHÖLL, F., SCHÖNFELDER, J., TERNES, T. & VÖLKER, J., 2022: Fischsterben in der Oder, August 2022. Statusbericht, Stand 30.09.2022.
- TAGESSCHAU, 2023: Ein Jahr nach dem Fischsterben: Lage in der Oder weiter kritisch. <https://www.tagesschau.de/inland/gesellschaft/oder-fischsterben-katastrophe-100.html>, letzter Zugriff 13.01.24.
- ZHOU, Z.-H., 2021: Machine Learning, 460 S., Singapore: Springer Singapore.