



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



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

Umweltbeobachtung am Beispiel von Copernicus Satellitendaten im Wassergütemessnetz Hamburg: Ein Vergleich von Chlorophylldaten

Bachelorarbeit

Im Studiengang Umwelttechnik

Vorgelegt von

Stephan Griep

Matrikel-Nr. [REDACTED]

Hamburg, den 20. Dezember 2018

Erstgutachter: Prof. Dr. Olaf Elsholz (HAW Hamburg)

Zweitgutachter: Dipl. –Ing. Werner Blohm (Institut für Hygiene und Umwelt)

Die Bachelorarbeit wurde betreut und erstellt in Zusammenarbeit

mit dem Institut für Hygiene und Umwelt, Hamburg

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Ausführungen, die fremden Quellen wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, sind kenntlich gemacht. Die Arbeit war in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht Bestandteil einer Veröffentlichung, Studien- oder Prüfungsleistung.

Hamburg, den 20. Dezember

Stephan Griep

Danksagung

Zuerst möchte ich an dieser Stelle allen danken, die diese Bachelorarbeit durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung begleitet und zu ihrem Gelingen beigetragen haben.

Besonders möchte ich mich ganz herzlichst bei Dipl. Ing. Werner Blohm bedanken. Er übernahm die umfangreiche Betreuung meines Praktikums und der anschließenden Arbeit. Dabei unterstützte er mich durch seine hilfreichen Anregungen und Ratschläge. Zudem gilt mein Dank auch Herrn Prof. Dr. Olaf Elsholz, der mir als Erstkorrektor unterstützend mit Rat und Motivation zur Seite stand.

Außerdem danke ich dem gesamten Team des Wassergütemessnetzes, welches durch konstruktive Kritik und Unterstützung diese Bachelorarbeit erst ermöglichten. Weiter möchte ich Frau Dr. Ehlert vom BSH und Frau Stelzer von Brockmann Consult danken.

Vielen Dank euch allen.

Zusammenfassung

Das Wassergütemessnetz in Hamburg untersucht seit 1988 die Gewässergüte der Hamburger Gewässer. Durch ständige Entwicklung hat es sich immer weiterentwickelt. Durch eine Entwicklung der Europäischen Union in Kombination mit der Europäischen Weltraumorganisation entstand für das Wassergütemessnetz eine neue Möglichkeit zur Erfassung zusätzlicher Daten: die Fernerkundung.

Die Europäischen Union in Kombination mit der Europäischen Weltraumorganisation startete ein Projekt für ein, durch Satelliten gestütztes, Messprogramm: das Copernicus-Programm. Dieses Programm liefert Umweltmessdaten für jeden frei und kostenlos. Dies möchte sich das Wassergütemessnetz in Hamburg zunutze machen.

Chlorophyll wird als eine von vielen Messgrößen in vier Messstationen der Hamburger Gewässer im 10-Minutentakt, als auch mehrfach im Jahr durch Hafentourfahrten erfasst.

Die folgende Bachelorarbeit befasst sich mit einem Vergleich der In-Situ-Daten des Wassergütemessnetzes und den Datensätzen der Sentinel-2-Satelliten. Sie liefert erste Ergebnisse, ob die Chlorophyllmesswerte der Sentinels geeignet sind, um die Chlorophyllkonzentration des Alsterlaufs und natürliche Ereignisse, wie Algenblüten in den Seen des Hamburger Umlands, darzustellen.

Die Ergebnisse des Vergleichs zeigen, dass sowohl Satelliten-, als auch In-Situ-Messungen Abweichungen unterliegen. Trotz dessen zeigt ein Vergleich der Messdaten einen nahezu linearen Zusammenhang. So haben 30 der 47 auf der Hafentourfahrt am 4. Juli 2018 gemessenen Werte eine Abweichung von unter 30 % gegenüber den Satellitenmesswerten. Ebenfalls übereinstimmend sind die Ergebnisse des Vergleichs der Messungen der Messstationen des Wassergütemessnetzes mit den Satellitendaten. Auch dort herrscht bei vielen Messungen ein erkennbarer Zusammenhang.

Allerdings zeigen auch einige Satellitenmesswerte eine sehr schlechte Übereinstimmung gegenüber den In-Situ-Messwerten. Um eine verbesserte Vergleichbarkeit gegenüber den In-Situ-Daten zu schaffen, will das Wassergütemessnetz in Zukunft an Verbesserungen bezüglich der Berechnung und Fehlerbehebung der Sentinel-2-Daten arbeiten.

Summary

The Wassergütemessnetz in Hamburg investigates the water quality of Hamburg's waters since 1988. The European Union in combination with the European Space Agency has created a new way of collecting additional data for the Wassergütemessnetz: remote sensing.

The European Union in combination with the European Space Agency launched a project for a satellite-based measurement program: the Copernicus Programme. This program provides environmental measured data for everyone at no charge. Consequently, the Wassergütemessnetz would like to take advantage of this.

Chlorophyll is one of many measured variables in the water monitoring stations of Hamburg. It is measured in the monitoring stations in 10-minute-cycles as well as several times a year via port measure boat trips.

The following bachelor thesis compares In-Situ-Data of the Wassergütemessnetz and data sets of the Sentinel-2-Satellites. The goal is to provide first insights about the Sentinel-2 measurements and if they are suitable to display chlorophyll concentrations and algae blooms in the river Elbe and in lakes in and around Hamburg.

The results of the comparison show that satellite and in-situ measurements are subject to deviations. Despite this, the comparison of the measured data shows a nearly linear relationship. For example, 30 out of 47 measured values of the in-situ measurement, measured on the 4th July 2018 via port measure boat trip, have a deviation of less than 30% from the satellite measurements. In addition, the results of the comparison between the measurements of the stations of the Wassergütemessnetz with the satellite data had recognizable correlation in many measurements.

However, some measurements also show a very poor correlation between the data sets, which is why the Wassergütemessnetz wants to work on improvements in the calculation and debugging of Sentinel 2 data in the future, to provide improved comparability with the original in-situ measurements of the Wassergütemessnetz.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	9
1.1 Das Wassergütemessnetz	9
1.2 Anlass für das Thema	12
1.3 Aktuelle Messmethoden	14
1.4 Zielsetzung	15
2. Material & Methoden	16
2.1 Copernicus allgemein	16
2.1.1 Satelliten und Bodensysteme	17
2.1.2 In-Situ-Daten	21
2.1.3 Copernicus Dienste	23
2.2 Untersuchungsrahmen	26
2.2.1 Untersuchungsgebiet	26
2.2.2 Untersuchungsflächen	28
2.2.3 Untersuchungszeitraum	31
2.3 Messprinzip Sentinel-2	33
2.4 In-Situ Messmethoden im WGMN	39
2.5 Die Software SNAP	41
2.5.1 Allgemeine Informationen über SNAP	41
2.5.2 Berechnung aus Rohdaten zu Messwerten	41
2.6 Messdatenerstellung fürs WGMN	43
3. Ergebnisse	49
3.1 Vergleich Messstationen	51
3.1.1 Vergleich Bunthaus	52
3.1.2 Vergleich Lombardsbrücke	54
3.1.3 Vergleich Seemannshöft	56
3.2 Vergleich Hafenmessfahrt	58
4. Diskussion	59
4.1 Beeinflussungen der Ergebnisse	59
4.1.1 Messungenauigkeit In-Situ-Messungen	59
4.1.2 Messungenauigkeit Sentinel-2	60
4.2 Interpretation der Ergebnisse	61
4.3 Fazit	62
4.4 Zukunftsausblick	63
5. Literaturverzeichnis	64
6. Anhang	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: In-Situ Themenfelder (Übersetzt aus dem Englischen vom https://insitu.copernicus.eu/observations)	22
Tabelle 2: Relevante Datensätze für den Vergleich (Ausschnitt)	50
Tabelle 3a: Messergebnisse an der Messstation Bunthaus (Abschnitt).....	52
Tabelle 4: Messergebnisse der Messstationen Seemannshöft und Bunthaus im Vergleich mit Kreis- und Kachelmittelwerten des Sentinel-2.....	75
Tabelle 5: Vergleich der Chlorophyllmittelwerte der Hafennessfahrt am 7.5.2018 mit den Sentinel-2 Mittelwerten	76

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Standorte der Messstationen des Wassergütemessnetzes (Blohm, 2018)	10
Abbildung 2: ENMO-Ablauf (Blomesystem, 2018)	11
Abbildung 3: Hafenprofil - Messpunkte 2018 (Blohm, 2018).....	15
Abbildung 4: Sentinel Familie (European Space Agency, 2014).....	19
Abbildung 5: Themengebiete von Copernicus (Copernicus, 2018)	23
Abbildung 6: Sentinel-2A Aufnahme vom 05.05.2018 (Copernicus, 2014).....	27
Abbildung 7: Sentinel-2-B-Aufnahme vom 23.05.2018 (Copernicus, 2014)	28
Abbildung 8: Messfelder der Messstation Lombardsbrücke.....	29
Abbildung 9: Messfelder der Messstation Seemannshöft	30
Abbildung 10: Messfelder der Messstation Bunthaus.....	30
Abbildung 11: Sentinel-2A Aufnahme vom 18.05.2018 - Wolkendecke über Norddeutschland (Copernicus, 2014).....	32
Abbildung 12: Unterschied Messsysteme Satelliten (Copernicus Academy, 2018).....	33
Abbildung 13: Sentinel-2 Colour Vision For Copernicus (European Space Agency, 2018)	34
Abbildung 14: Realer Messorbit der Sentinel-2a und Sentinel-2b (erstellt in der offiziellen Copernicus Sentinel-App, Google Playstore)	35
Abbildung 15: Bänderübersicht des Sentinel-2 (Copernicus Academy, 2018).....	36
Abbildung 16: Passives Messsystem (Copernicus Academy, 2018)	37
Abbildung 17: Elbabschnittaufnahme vom 8.6.2018 (Sentinel-2) mit Einflüssen durch Schiffsverkehr (rot), Schattenwurf (gelb), Abgasfahnen (grün) und Kielwasser(blau)	38
Abbildung 18: Küvetten-Fluorometer (bbe Moldaenke GmbH, 2018).....	39
Abbildung 19: Algenklassen (Blohm, 2018).....	40
Abbildung 20: Klassifizierung von Oberflächen (Science Education through Earth Observation for High Schools (SEOS), 2008-2018)	42
Abbildung 21: Resampling SNAP	44
Abbildung 22: Preprocessing IdePix SNAP.....	45
Abbildung 23: Prozessor C2RCC MSI SNAP	47
Abbildung 24: Prozessierter Datensatz vom 9.7.2017 in SNAP.....	48
Abbildung 25: Sentinel 2B Aufnahme vom 4.12.2018 (Copernicus, 2014)	49
Abbildung 26: Vergleich der Kreismittelwerte des Sentinel-2 mit der Messstation Bunthaus.....	53
Abbildung 27: Vergleich der Kachelmittelwerte des Sentinel-2 mit der Messstation Bunthaus	53
Abbildung 28: Prozessierter Satellitendatensatz vom 1.8.2018 in SNAP.....	54
Abbildung 30: Vergleich der Kachelmittelwerte des Sentinel-2 mit der Messstation Lombardsbrücke.....	55

Abbildung 29: Vergleich der Kreismittelwerte des Sentinel-2 mit der Messstation Lombardsbrücke	55
Abbildung 31: Vergleich der Kreismittelwerte des Sentinel-2 mit der Messstation Seemannshöft	57
Abbildung 32: Vergleich der Kachelmittelwerte des Sentinel-2 mit der Messstation Seemannshöft	57
Abbildung 33: Vergleich der Hafennessfahrt am 4.7.2018 und Sentinel-2 mit farblich dargestellten Abweichungen	58
Abbildung 34: Sentinel-2 Aufnahme vom 8.6.2018 mit Chlorophyllkonzentration der Außenalster	60

1. Einleitung

In der vorliegenden Bachelorarbeit werden erste Erkenntnisse zum Thema Fernerkundung für das Wassergütemessnetz gewonnen. Die Chlorophyllkonzentrationen in der Elbe und einigen Nebengewässern in Hamburg werden durch verschiedene In-Situ-Messungen mit den Fernerkundungsdaten der Sentinel-2-Satelliten verglichen. Bei den In-Situ-Messungen handelt es sich einerseits um kontinuierliche Messungen in den Messstationen des Wassergütemessnetzes (WGMN), um die Messungen von Chlorophyll bei Hafentourfahrten des Institutes für Hygiene und Umwelt, als andererseits Messungen von Chlorophyllgehalten ermittelt durch Sentinel-2-Satelliten aus dem Copernicus-Programm der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) und der Europäischen Union (EU).

Im Verlauf dieser Bachelorarbeit werden bei diversen Textabschnitten sowohl Anschlussfragen, als auch neue Themenfelder auftauchen, die nicht im zeitlichen Umfang dieser Bachelorarbeit, beleuchtet werden können. Deshalb wurde ein Untersuchungsrahmen gezogen, um die relevantesten Daten, zugeschnitten auf die Bedürfnisse des WGMN, zu betrachten.

1.1 Das Wassergütemessnetz

In der Vergangenheit haben Unfälle sowie Umweltphänomene immer wieder zu Veränderungen des aquatischen Lebensraumes geführt. Um diese Phänomene oder akute Gewässerverunreinigungen zu begrenzen und Gegenmaßnahmen schnell einleiten zu können, ist eine kontinuierliche und weitreichende Überwachung von Fließgewässern von großer Wichtigkeit. Zusätzlich zur Früherkennung von illegalen Einleitungen und dem Schutz der Grund- und Trinkgewässer kann die kontinuierliche Überwachung das Ausmaß der Verschmutzung und den Verursacher identifizieren. In Hamburg übernimmt das WGMN diese Aufgabe (Institut für Hygiene und Umwelt, 2014).

Das Hamburger WGMN wurde 1988 eingerichtet und unterhält zurzeit neun feste Messstationen und kann bei Bedarf eine mobile Messstation an Gewässer aufstellen. Mit diesen Stationen wird der Großteil der Hamburger Fließgewässer überwacht. Es befinden sich Stationen an der Elbe, an der Alster, an der Ammersbek, an der Tarpenbek, an der Wandse und der Bille (Institut für Hygiene und Umwelt, 2014). Die Standorte der Messstationen des WGMN sind in Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Standorte der Messstationen des Wassergütemessnetzes (Blohm, 2018)

In den Messstationen werden kontinuierlich physikalische, chemische und biologische Messgrößen ermittelt und ausgewertet. Zu diesen Messgrößen gehören unter anderem Sauerstoffgehalt, pH-Wert, Leitfähigkeit, Trübung und Temperatur der Gewässer. Alle zusammen geben einen Überblick über den aktuellen Zustand des zu überwachenden Fließgewässers. An wichtigen Standorten weisen Messstationen einen größeren Umfang an Analyseverfahren auf. So haben zum Beispiel die Stationen Bunthaus und Seemannshöft an der Elbe sowohl ein biologisches Frühwarnsystem, als auch Spektralphotometer zum Messen des gesamten organischen Kohlenstoffes und der UV-Absorption des Wassers. Im biologischen Frühwarnsystem sind ebenfalls Algenmessungen implementiert, womit die Algenkonzentration als auch die Algenklassen bestimmt werden können (Institut für Hygiene und Umwelt, 2014).

Die Messstationen sind mit der Schaltzentrale des WGMN im Institut für Hygiene und Umwelt, sowie untereinander durch die Messnetzsoftware ENMO@hydro verbunden. Die Software agiert automatisiert und trägt einen großen Teil zur effizienten Steuerung des WGMN bei. Sie lässt sich in drei Hauptbestandteile unterteilen:

- ENMO@hydro Site
- ENMO@hydro Server
- ENMO@hydro Client

Mit Hilfe von ENMO@hydro Site werden alle Messwerte der Stationen, sowie Status- und Störungsmeldungen der Sonden oder Messgeräte zusammengeführt. Computer innerhalb der Messstationen speichern diese Datensätze zwischen und übermitteln sie via Internet an den ENMO@hydro Server. Auf diesen, im Institut befindlichen Server, kann jeder Mitarbeiter über seinen Rechner mittels ENMO@hydro Client zugreifen (Blomesystem, 2018).

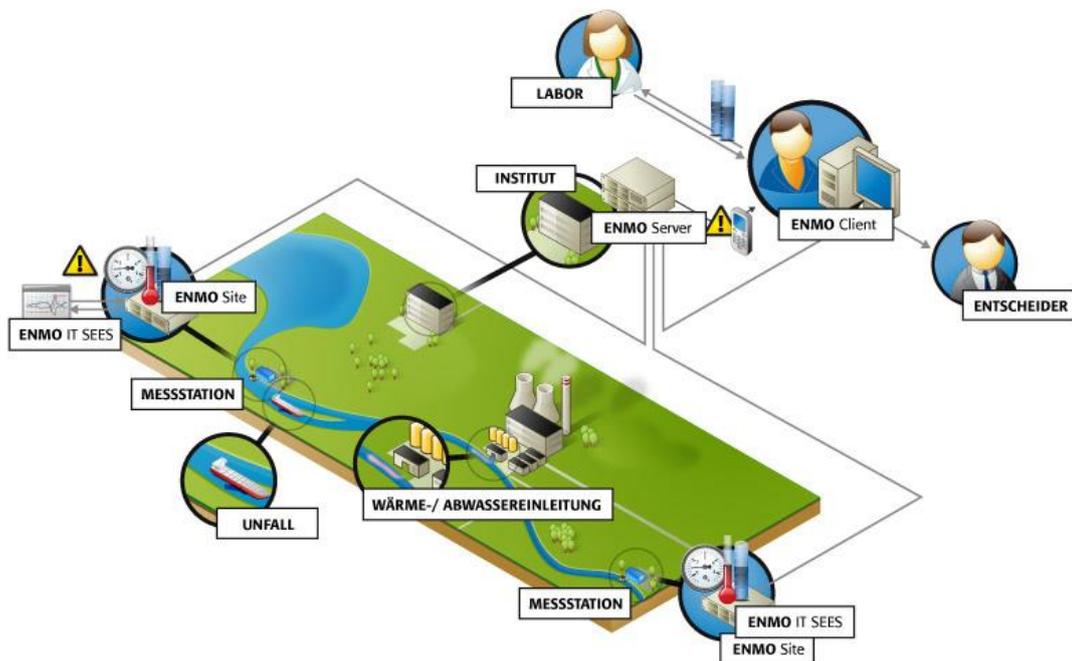


Abbildung 2: ENMO-Ablauf (Blomesystem, 2018)

Liegen mehrere gemessenen Daten außerhalb des statistischen Schwankungsbereiches, erfolgt eine Alarmmeldung an die Mitarbeiter via SMS und im ENMO@hydro Client. Gleichzeitig wird für die weitergehende Untersuchung eine automatische Probe genommen und es wird eine schnelle Veranlassung von Gegenmaßnahmen nach Prüfung der

Plausibilität des Alarmes empfohlen (Blomesystem, 2018) (Institut für Hygiene und Umwelt, 2014).

Unabhängig von den Alarmmeldungen können alle übermittelten Datensätze über den Client dargestellt, ausgewertet und für Statistiken, Diagramme oder Vergleiche benutzt werden (Blomesystem, 2018). Das gesamte System rund um ENMO@hydro und dem Institut für Hygiene und Umwelt ist in Abbildung 2 verdeutlicht.

1.2 Anlass für das Thema

Umweltveränderungen sind seit Anbeginn der Zeit ein Teil der Geschichte der Erde. Die Menschheit nahm seit jeher einen großen Einfluss auf diese Veränderungen, sowohl im positiven, wie im negativen Sinne. Um Problemen wie der Umweltverschmutzung oder der Ausschöpfung natürlicher Ressourcen durch den Menschen entgegenzuwirken, müssen diese Veränderungen erkannt werden. Lösungsvorschläge auf diese globalen und regionalen Problematiken zu finden, ist Gegenstand des Umweltmonitorings. Das Monitoring und das Management von Gewässern in Stadtgebieten wie Hamburg liegt in der Zuständigkeit der Länder und der kommunalen Verwaltungsebenen. Diese Behörden treffen ihre Entscheidungen zurzeit durch Informationen, welche sie durch In-Situ-Messungen oder Simulationen und Modellierungen erheben können. Oftmals scheitern Monitoringprojekte an zu geringen finanziellen oder personellen Mitteln. Eine angemessene flächendeckende Überwachung von Umweltkompartimenten leidet so unter einer zu niedrigen Frequenz von Messdatenerhebungen. Diese Problematik könnte durch Fernerkundung deutlich verbessert werden, indem die Fernerkundungsdaten und die Messungen der Behörden Vorort zusammengeführt werden (Stelzer & Blohm, 2018).

Diese Problematik war einer der Gründe, warum die EU seit 2001 vorbereitende Projekte zum Copernicus Weltraumprogramm durchführte und 2005 die Entwicklung eigener Satelliten zur Betrachtung der Erde in die Wege leitete. So unterstützt das Copernicus-Programm die Umweltbeobachtung. Es erfasst, speichert und analysiert Daten und erstellt daraus Produkte, mit deren Hilfe sinnvolle Entscheidungen getroffen werden sollen (Bundesregierung, 2017).

Das von sechs Satellitentypen, den sogenannten Sentinels, gestützte Programm erfasst unseren Planeten und greift zusätzlich auf Informationen von dutzenden dritten Parteien zu, um gekoppelt mit Sensoren am Boden ein gutes Gesamtbild der Ökosysteme zu erstellen. Aus diesem Pool von Informationen können Daten verwendet werden, um Statistiken,

Karten oder Analysen zu erarbeiten. Weil alle Informationen gespeichert werden, können aus den immensen Datenmengen Trends der Vergangenheit, der Gegenwart und auch Prognosen für die Zukunft geschaffen werden (Bundesregierung, 2017).

Die im Copernicus-Programm gesammelten Daten führen besonders im wissenschaftlichen Bereich zu vielen Erkenntnissen. Die Besonderheit des Programms ist jedoch, dass es für jeden einen vollständigen, freien und offenen Zugang zu sämtlichen erfassten Daten gewährt (Copernicus, 2018).

Um die Möglichkeiten der Verwendung von Satellitendaten einzugrenzen setzte die EU sich folgende sechs Ziele mit dem Copernicus-Programm:

- Landbeobachtung
- Katastrophen- und Krisenmanagement
- Klima Monitoring
- Atmosphären Monitoring
- Meeres- und Gewässerüberwachung
- Sicherheit

Mittlerweile sind vier von den sechs geplanten Satelliten im Einsatz und liefern Daten bezüglich diverser Parameter, wie zum Beispiel Vegetation, Landbedeckung, Eiskartierung, Bodenbewegung oder Ozean- und Wasserqualität (Copernicus, 2018). Die Erfassung der Wasserqualität im Binnenland möchte sich das Institut für Hygiene und Umwelt zu Nutzen machen und die Daten des Programms als zusätzliche Quelle nutzen.

Besonders im Sektor der Umweltuntersuchung sind viele Anwendungen mit den Copernicus-Daten möglich. So sind zum Beispiel die Zusammensetzung der Atmosphäre und die biologische Vielfalt gut zu veranschaulichen. Ebenso sind auch lokale Ereignisse, wie das Abschmelzen der Polkappen bei steigender Temperatur, aus dem Weltraum besser zu erkennen als von der Erde selbst. Auch eine Art Frühwarnsystem ist implementiert, sodass bei z.B. Entwaldung oder vorangehender Versteppung Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können (Copernicus, 2018).

Ein weiteres riesiges Anwendungsgebiet ist das Monitoring von Wasser und Luftqualität. Dies beinhaltet die Überwachung der Wasserqualität des Ozeans, von Küsten- und Binnengewässern, dem Anstieg des Meeresspiegels oder dem Einsatz für natürliche und anthropogene Gefahren wie Überschwemmungen oder Havarien. Dabei sind für die

verschiedenen Anwendungsbereiche unterschiedliche Fernerkundungstechniken geeignet (Copernicus, 2018).

Im Fünf-Tagesrhythmus überfliegen zwei Sentinel-2-Satelliten Hamburg und das Umland. Die hieraus entstehenden Daten können zur Betrachtung der Wasserqualität genutzt und als Ergänzung zu den Messstationen des WGMN behandelt werden. Da nicht alle Wasserflächen Hamburgs mit einer Messstation ausgestattet sind, würde das WGMN die Messdaten der Fernerkundung einerseits nutzen, um aus den Informationen herzuleiten, ob Messungen in einem Gewässer durchgeführt werden müssen. Zum anderen könnte für Hamburger Badeseen ein Mehrwert erzielt werden, indem man frühzeitig die Struktur von Algenblüten erkennt und damit potentielle Gefahren für Badestellen ableiten kann (Stelzer & Blohm, 2018).

1.3 Aktuelle Messmethoden

Das WGMN nutzt momentan ausschließlich kontinuierlich arbeitende Messsysteme für die Untersuchung der Wasserqualität der Elbe und Nebengewässer in Hamburg. Andere Abteilungen des Institutes für Hygiene und Umwelt nehmen zusätzlich Stichproben, welche im hauseigenen Labor durch Analysenverfahren, wie Ionenchromatographie, Fließinjektionsanalyse oder Massenspektrometrie analysiert werden.

Weiter werden zwei bis sechs Mal im Jahr Hafenmessfahrten in Kooperation mit Hamburg Port Authority durchgeführt. Die Hafenmessfahrt ist jeweils ein zweitägiges Projekt, bei dem ein Messschiff, zugeschnitten auf Messgeräte und Probenahme, entlang der Elbe und in diversen Hafenbecken im Hamburger Hafen fährt und an festgelegten Messflächen Messungen und Probenahmen vornimmt. Die zweitägige Messfahrt wird aufgeteilt in die Strecke beginnend an den Landungsbrücken über Blankenese bis zur Landesgrenze. Dann elbaufwärts über die Süderelbe bis zum Oortkatener Hafen und anschließend wieder zurück über die Norderelbe bis zu den Landungsbrücken. Am zweiten Tag werden alle geplanten Messfelder in den meisten Hafenbecken angefahren (Institut für Hygiene und Umwelt, 2018).

Auf dem Schiff werden über Sonden die Leitfähigkeit, Temperatur, Sauerstoffgehalt, pH-Wert und Trübung kontinuierlich gemessen. Ein Abbild aller Messfelder ist in Abbildung 3: Hafenprofil - Messpunkte 2018 zu sehen. Zusätzlich zu den genannten Messgrößen sind in den vergangenen Jahren verschiedene weitere Messaufgaben hinzugekommen, so werden diverse Probenahmen für Elementaranalytik, abfiltrierbare Stoffe, Nährstoffanalytik und Plankton durchgeführt. Für die Planktonmessungen auf der Hafenmessfahrt werden zwei

spezielle Messgeräte verwendet. Zum einen wird die Chlorophyllkonzentrationen und eine Algenklassenbestimmung mit dem Küvetten-Flourometer der Firma „bbe-moldaenke“ durchgeführt, welches durch verschiedene Arten von Lichteinstrahlung die Gesamtchlorophyllkonzentration und die Algenklassen bestimmt (siehe Kapitel 2.4). Zusätzlich wird mit einem FRRF-Flourometer die Aktivität der Algen durch ein Fluoreszenzverfahren gemessen, welches sich die Fluoreszenzenergie zu nutzen macht, die im Photosystem II der Alge beim Spalten von Wasser entsteht. Dieses Verfahren ist bekannt unter dem Namen **Fast Repetition Rate Fluorometry**, jedoch wird im weiteren Verlauf der Bachelorarbeit nicht weiter auf diese Messung oder Ergebnisse dieser Messung eingegangen (Stelzer & Blohm, 2018).

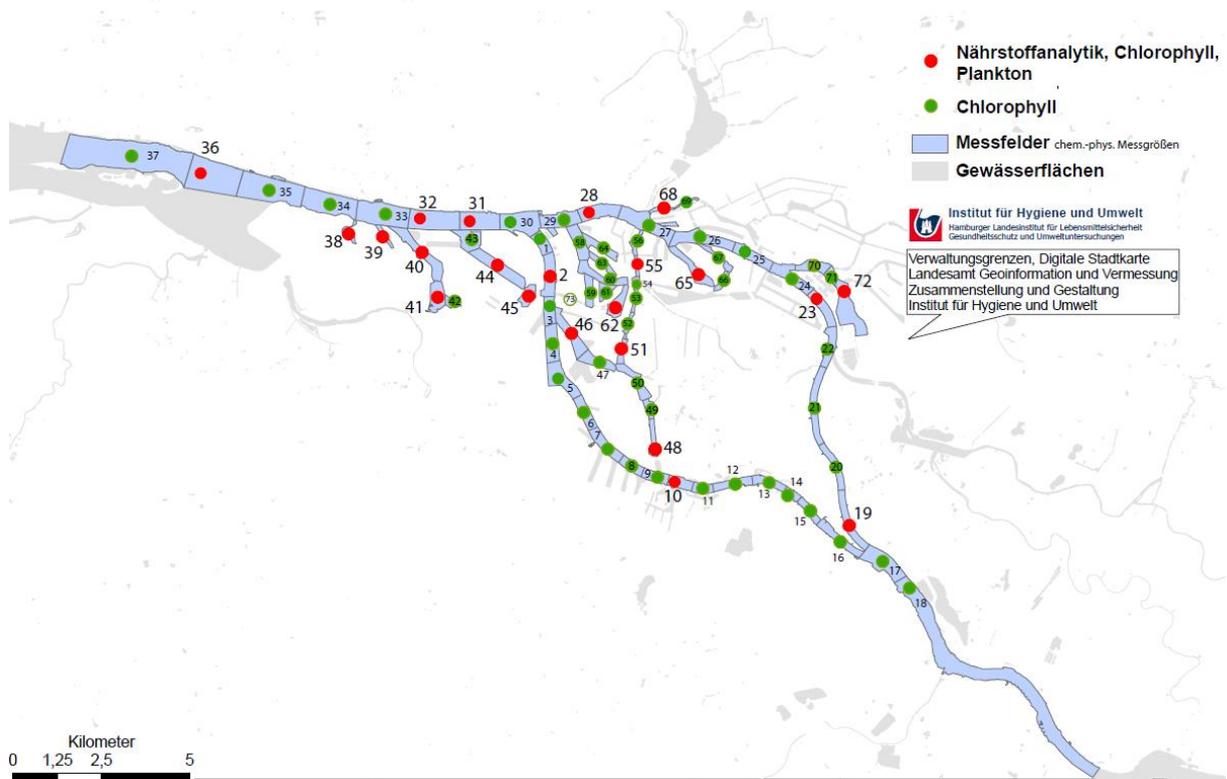


Abbildung 3: Hafenprofil - Messpunkte 2018 (Blohm, 2018)

1.4 Zielsetzung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es einen Vergleich zwischen Daten des Satelliten Sentinel-2 mit In-Situ-Daten des WGMN zu erstellen. Der Vergleich wird zwischen den Messdaten der Messgröße Chlorophyllkonzentration aus den Messstationen, den Hafenmessfahrten des WGMN und den Copernicus Satellitendaten erfolgen.

Bei einem positiven Verlauf der Ergebnisse wird das WGMN die Satellitendatensätze nutzen, um Ereignisse, wie die Algenblüte in Hamburger Badegewässern und Seen oder andere natürliche Ursachen, die zur Änderung des Chlorophyllgehaltes in Gewässern führen, zu bewerten.

Entscheidend für einen Mehrwert der Daten ist, dass die Messdaten der Sentinel-2-Satelliten validierbar und reproduzierbar sind. Falls die Ergebnisse weniger gute Übereinstimmungen zeigen, will das WGMN versuchen die Fehlerquellen zu lokalisieren und Lösungsansätze zu erarbeiten, sodass die Satellitendaten nutzbar werden.

Die aus den Satellitendaten entstandenen Karten, könnten in anderen Behörden und Projekten weitergenutzt werden, da das erstellte Format der Messergebnisse kompatibel zu den GIS Systemen der Hamburger Behörden ist.

2. Material & Methoden

Im folgenden Kapitel wird zuerst auf das Satelliten-Messprogramm des Copernicus Programms eingegangen und alle Aspekte grob angesprochen, beginnend mit den Beschreibungen der Satellitentypen, sowie den Anwendungsbereichen des Programms. Im Anschluss folgen die Beschreibung des Untersuchungsrahmen, sowie aller Messprinzipien und eine genauere Betrachtung des Zugangs zu den Daten der Satelliten und der Software SNAP zur Verarbeitung von Roh-Satellitendaten. Weiter wird eine Beschreibung des Workflows zur Darstellung der Chlorophylldaten aus den Sentinel-2 Roh-Daten als Karten gegeben. Mit diesem Workflow werden Karten erstellt, die dann im GIS System „ArcGIS“ weiterverwendet werden können. ArcGIS ist in der Freien Hansestadt Hamburg die Standard GIS Anwendung in Behörden und wird unter anderem für die Erstellung von Karten genutzt.

2.1 Copernicus allgemein

Copernicus oder „The European Earth Observation Programme“ ist ein Gemeinschaftsprojekt der EU, der ESA, der Europäischen Organisation für meteorologischen Satelliten und allen Mitgliedstaaten der EU. In diesem Projekt soll auf Grundlage von bereits bestehenden und neuen Erdbeobachtungstechnologien ein Geoinformationsdienst für Umweltüberwachung und zivile Sicherheit entstehen. Dieser Dienst ist speziell an die Bedürfnisse der Nutzer angepasst und beschäftigt sich mit den

Thematiken der Umwelt, des Klimaschutzes, der nachhaltigen Entwicklung, der humanitären Hilfe und der Sicherheit (Copernicus, 2018).

Wie im Kapitel 1.2 bereits erwähnt, sind alle Daten, die für das Programm erzeugt werden für jeden frei zugänglich und kostenlos verfügbar. Dies betrifft sowohl die Satellitendaten als auch die von Copernicus bereitgestellten Dienste, die auf den Satellitendaten basieren. Besonders genutzt werden die Daten und Dienste von Entscheidungsträgern und Behörden, welche aus den Informationen versuchen umweltschützende Entscheidungen zu fällen, um Notfälle oder Naturkatastrophen, sowie anthropogene Krisen zu vermeiden und zu bekämpfen (Copernicus, 2018).

2.1.1 Satelliten und Bodensysteme

Um alle gesetzten Ziele erreichen zu können und sich mit allen Themengebieten auseinandersetzen zu können ist eine große Auswahl an Messinstrumenten und Satelliten nötig. Das ist der Grund, warum das Copernicus-Programm sechs verschiedene Satelliten Familien in erdnahe Orbits platzieren möchte. Diese sind auf Abbildung 4 zu sehen und haben die Bezeichnungen Sentinel-1 bis Sentinel-6:

- **Sentinel-1A und Sentinel-1B** sind 2014 und 2016 in den Weltraum gestartet und umkreisen in rund 700 km die Erde. Sie haben Radartechnik an Bord und liefern Übersichtsaufnahmen von Land-, Eis und Meeresoberflächen und können durch die Radarmessungen sowohl tageszeitunabhängig, als auch bei Wolkenbedeckung Bilder aufnehmen (S. Jutz and MP Milagro-Pérez, 2017).
- **Sentinel-2A und Sentinel-2B** sind 2015 und 2017 gestartet und haben optische Messinstrumente an Bord, welche das reflektierte Licht der Sonne an der Erdoberfläche aufnimmt. Die Sentinel-2-Satelliten umfliegen ebenfalls die Erde, jedoch in einer Höhe von ca. 780 Kilometern. Die Messgeräte messen in Wellenlängen vom sichtbaren bis zum Infrarotbereich und mit einer Auflösung von bis zu 10 Metern bei einer Bildbreite von 290 Kilometern. Mit dieser hohen Abdeckungsrate werden vor allem Aufnahmen von Vegetationen, Erd- und Wasserbedeckungen oder Küstenbereichen gemacht. Zusätzlich dazu liefern sie auch

verlässlich Informationen für Notfälle und Katastrophen wie z.B. Überschwemmungen (S. Jutz and MP Milagro-Pérez, 2017).

- **Sentinel-3A und Sentinel-3B** sind mit drei unterschiedlichen Messinstrumenten an Bord ausgerüstet. Dadurch ist die Vielfalt der Aufgaben auch sehr unterschiedlich. Zum einen ist ein hochpräziser Radar-Höhenmesser (SRAL) zur Erfassung von Meeresspiegelhöhen verbaut, als auch ein Radiometer (SLSTR) zur Messung von Oberflächentemperaturen mit einer Genauigkeit von 0,3 Grad Celsius in einer räumlichen Auflösung von einem Kilometer. Durch diese außergewöhnliche Genauigkeit kombiniert mit einer sehr hohen Aufnahmebreite von 1270 Kilometern, eignet sich dieser Satellit besonders gut zum Identifizieren von Waldbränden oder zur globalen Erfassung der Temperatur der Ozeane. Im simultanen Betrieb von 2 Satelliten ist eine Abdeckung der Erde alle ein bis zwei Tage möglich. Ein weiteres wichtiges Instrument an Bord der Sentinel-3 Satelliten ist das „Ocean And Land Colour Instrument (OLCI)“, welches die Farbe von Oberflächengewässern aufnimmt. Hierdurch kann unter anderem die Photosyntheseleistung von Phytoplankton erfasst werden. Diese Messungen haben eine räumliche Auflösung von 300 Metern. Gestartet sind die Satelliten im Frühjahr 2016 und im Sommer 2018. Mit den genauen Messinstrumenten und den zu untersuchenden Parametern dienen diese Satelliten als wichtiger Indikator für den Klimawandel (S. Jutz and MP Milagro-Pérez, 2017).
- **Sentinel-4** ist ein Anbau an den geostationären Meteosat Sounder Satellit der dritten Generation, der in rund 36.000 Kilometern über dem Äquator platziert ist. Der Sentinel-4-Anbau ist für die Atmosphärenbetrachtung zuständig und liefert im Stundentakt Daten über die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre, darunter Spurengase, Schwefeloxide oder Aerosole. Diese Messwerte sind außerdem relevant für vulkanische Aschewolken (S. Jutz and MP Milagro-Pérez, 2017).
- **Sentinel-5** ist ebenfalls ein Anbau an einen anderen Satelliten und wird sich, wie Sentinel-4, mit der Atmosphäre beschäftigen. Er wird sich an Bord des MetOp Satelliten der zweiten Generation befinden und vor allem Stickstoffdioxid,

Schwefeldioxid, Kohlenstoffmonoxid, Formaldehyd und Ozon messen. Geplant ist der Start im Jahr 2022 (S. Jutz and MP Milagro-Pérez, 2017).

- Der **Sentinel-5 Precursor** oder **Sentinel-5P** ist ein Vorläufer der Sentinel-5 Serie. Er startete im Oktober 2017, damit bis zum Jahr 2022 keine Datenlücken entstehen. Er misst für die Atmosphäre und Klima relevante Gase und Aerosole (S. Jutz and MP Milagro-Pérez, 2017).
- **Sentinel-6** wird der vorläufig letzte Satellit im Weltraum des Copernicusprogramms sein. Er besitzt ein Radar-Höhenmesser, welches in Kombination mit den Sentinel-3-Instrumenten eine entscheidende Rolle für die exakte Meeresspiegeländerung und den Seegang spielen wird. Im Zusammenhang damit können auch Sturmfluten und Unwetter besser prognostiziert werden (S. Jutz and MP Milagro-Pérez, 2017).

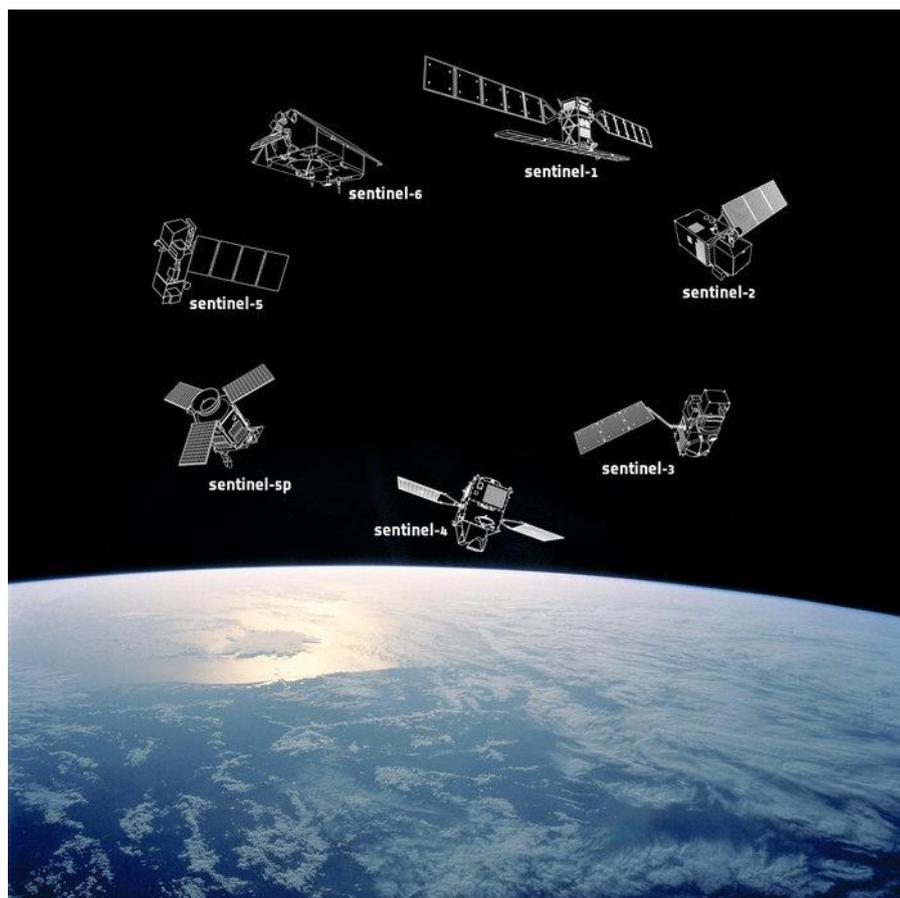


Abbildung 4: Sentinel Familie (European Space Agency, 2014)

Folgende vier Komponenten werden gemäß Webseite des DLR durch das Copernicus-Programm vernetzt:

- „Neue satellitengestützte Erdbeobachtungssysteme (die Sentinel-Satelliten) und die Nutzung von vorhandenen Erdbeobachtungssystemen in Europa
- Boden- und luftgestützte Beobachtungssysteme (In-Situ Komponente)
- Kontrollsegmente, Informations- und Datenmanagement
- Kern-Geoinformationsdienste“

Die Kontrollsegmente, also die an der Erdoberfläche befindliche Überwachung aller Satelliten, sowie die Informationstechnologie und Geoinformationsanwendungen befinden sich überall in Europa. Sie wurden durch das Earth Observation Center (EOC) auf nationaler und europäischer Ebene aufgebaut. Deshalb ist das EOC auch am Betrieb beteiligt. Die vier Kern-Bodenstationen befinden sich in Italien, Spanien und Norwegen. Für Deutschland werden Prozessoren, sowie Archivierungs- und Datenmanagement-Systeme der Satelliten im Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum betrieben. Zuvor wurden diese vom EOC entwickelt. Um elektronische Schnittstellen für die Datensätze bereitzustellen, unterstützt das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum diverse Firmen. Diese Schnittstellen wurden gemeinsam mit der ESA entwickelt und liefern für die Copernicus Dienste und andere Nutzer über diverse Portale (siehe Kapitel 2.6) Datensätze (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., 2018).

Nach Betrachtung aller Sentinel-Satellitentypen sollte besonders der Sentinel-3 im Vordergrund der Untersuchungen der WGMN stehen, da er unter anderem zur Messung der Photosyntheseleistung konzipiert wurde. Diverse Messinstrumente des Sentinel-3 sind zwar genau auf ähnliche Messgrößen wie das WGMN zugeschnitten, jedoch trat bei der Auswertung erster Sentinel-3-Daten ein Problem auf. Zwar weist die Elbe an den meisten Messflächen die Mindestgröße von 300 Metern auf, jedoch ist diese Fläche trotzdem nicht ausreichend, um genügend Messwerte zu generieren. Diese Problematik änderte die grundsätzliche Herangehensweise des WGMN. Eine Alternative zu den Datensätzen des Sentinel-3 waren die Aufnahmen des Sentinel-2. Der ursprüngliche für Landanwendungen, wie Vegetations- oder Oberflächenbetrachtungen, konzipierte Satellit, liefert zusätzlich auch Messdaten für kleinräumige Binnengewässer mit einer passenden Auflösung. Für den weiteren Verlauf dieser Bachelorarbeit und relevant für das Wassermessnetz, sind momentan lediglich die Daten der Sentinel-2-Satelliten, da diese die Grundlage für die Chlorophyllbestimmung liefern.

2.1.2 In-Situ-Daten

Zusätzlich zu den Satelliten und ihren Messwerten ergänzt ein weiteres großes Netzwerk das Copernicus-Programm: die In-Situ-Daten. Viele der Copernicus Dienste basieren auf In-Situ-Messungen. Diese sind unter anderem Wetterstationen, Luftqualitätsmessungen durch Wetterballons und Messbojen im Meer, sowie diverse weitere Messinstrumente auf der Erde. Sie sind integriert in das Copernicus-Netz und sind zum Beispiel für die Kalibrierung oder die Validierung der Sentinels essentiell (Copernicus, 2018).

In-Situ-Daten werden bereits seit Jahrhunderten gesammelt, weshalb eine große Vielfalt und Spannweite an Netzwerken existieren, welche von Investoren unterstützt werden. Dies macht sich Copernicus zu nutzen und analysiert, welche Daten benötigt werden, um Datenlücken oder Engpässe kompensieren zu können. Gegliedert ist dieser Bereich bei Copernicus in vier Wirkungsräume, dargestellt in Tabelle 1 (Copernicus In Situ Component, 2015):

Tabelle 1: In-Situ Themenfelder (Übersetzt aus dem Englischen vom <https://insitu.copernicus.eu/observations>)

<p>Meteorologie</p> 	<p>Verwendung von Echtzeitdaten sowie historischen Daten</p> <p>Am Boden: Wetterstationen zur Messung von Temperatur, Niederschlag, Wind, UV-Strahlung und diverse weitere Parameter.</p> <p>In der Atmosphäre: Temperaturen, Wind und Feuchtigkeit durch Wetterballons</p>
<p>Ozeanographie</p> 	<p>Physikalische Parameter: Messfahrten oder Bojen: Temperatur, Salinität, Meeresspiegel, Strömungen, Eisbedeckung, Mischschichttiefe</p> <p>Biologische Parameter: Chlorophyll, gelöster Sauerstoff, Nährstoffe, sowie viele weitere Parameter durch Messungen von Booten</p>
<p>Atmosphärische Zusammensetzung</p> 	<p>Daten gemessen über Sonden und Wetterballons: Konzentrationen von Luftschadstoffen wie beispielsweise Stickoxide, Feinstäube, Kohlenstoffmonoxid, Schwefeldioxid, Formaldehyd oder Benzol</p> <p>Gase in Verbindung mit dem Treibhauseffekt (Methan, Kohlenstoffdioxid und Stickstoffdioxid)</p>
<p>Terrestrisch</p> 	<p>Landbedeckung mit Vegetation, Leaf Area Index Schnee-, Eis- und Gletscherbetrachtung Biomasse über dem Erdboden Bodenfeuchtigkeit, Bodenkohlenstoffgehalt Grundwasser- und Gewässernutzung, Abwasserabläufe in Flüsse</p>

2.1.3 Copernicus Dienste

Wie in Kapitel 1.2 bereits angerissen ist das Programm in sechs Services und einen Zusatz eingeteilt worden. Zur Veranschaulichung ist dies auf Abbildung 5: Themengebiete von Copernicus dargestellt (Copernicus, 2018).

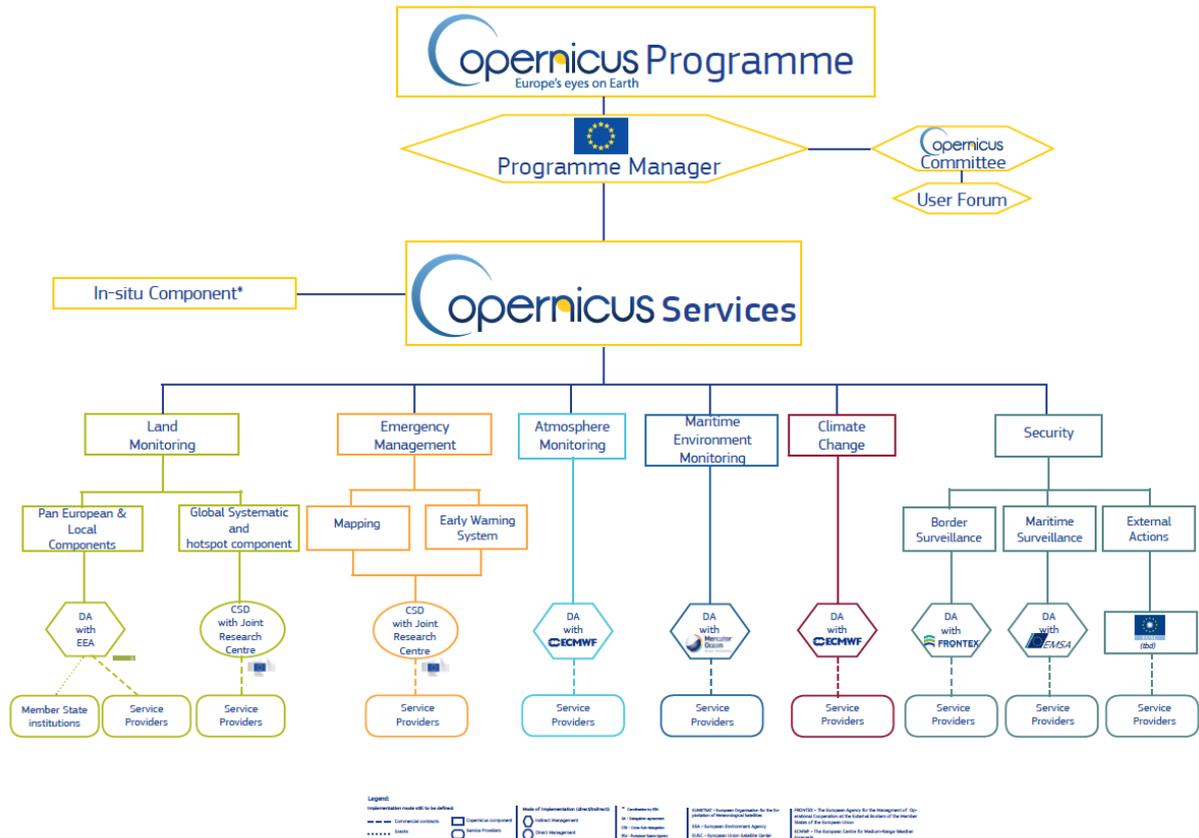


Abbildung 5: Themengebiete von Copernicus (Copernicus, 2018)

Die Möglichkeiten innerhalb jedes einzelnen Services von Copernicus sind sehr umfangreich. Die Dienste werden im Folgenden kurz beschrieben und es wird erklärt, wofür jeder Bereich zuständig ist.

- Das **Land Monitoring** ist unterteilt in Pan-Europäisch und Global. Der Pan-Europäische Bereich wird koordiniert von der European Environment Agency. Er beschäftigt sich mit Landbedeckung und Landbenutzung. Eingegangen wird hier zum Beispiel auf verdichtete Oberflächen wie Straßen oder Städte, aber auch auf Wälder, Moore oder Anbauflächen. Da die Aufnahmen mit hochauflösenden Objektiven gemacht werden, können aussagekräftige Messdaten aufgenommen werden, um beispielsweise in Waldflächen auch Baumarten unterscheiden zu können (Copernicus Land Monitoring Service, 2018).

Im Kontrast dazu steht der Copernicus Global Land Service, der wie folgt in drei Aufgabenbereiche aufgeteilt ist. Die höchste Priorität hat die systematische Beobachtung im globalen Ausmaß, also regelmäßige und verlässliche Echtzeitaufnahmen von bio-geophysikalischen Messgrößen, die konstant mit Langzeitstudien verglichen werden. Das zweite Themengebiet ist das Erstellen von Hot-Spot-Karten inklusive Validierung auf kleineren geographischen Abschnitten. Dies erfolgt meist durch Ereignisse wie Vulkanausbrüche oder auf Anfragen. Der letzte Aufgabenbereich beschäftigt sich hauptsächlich mit Validierungen (Copernicus Land Monitoring Service, 2018).

- Der **Emergency Management Service (EMS)** liefert Informationen für Notfallsituationen in Bezug auf verschiedene Arten von Katastrophen einschließlich meteorologischer und geophysikalischer Gefahren, als auch von Menschen verursachte Katastrophen. Außerdem werden Informationen zu Präventions-, Vorbereitungs-, Reaktions- und Wiederherstellungsaktivitäten geliefert. Auch die Bereitstellung von Schnellkarten für Notfallmaßnahmen, Frühwarn- und Überwachungskomponenten bei Bedarf, wie zum Beispiel für Überschwemmungen, Dürren und Waldbrände, sind ein Teil vom EMS. Notfallsituationen können sein (Copernicus Emergency Management Service, 2018):
 - Fluten
 - Tsunamis
 - Erdbeben
 - Landrutsche
 - Vulkanische Eruptionen
 - Feuer
 - Schwere Stürme
 - Technologische Desaster
- Der Service bezüglich der **Atmosphäre** wird in Zukunft viele Projekte, die in der Vergangenheit unter dem Namen „Monitoring atmospheric composition & climate“ (MACC) standen und ebenfalls von der EU gegründet und gefördert wurden, zusammenführen. Die MACC-Projekte brachten über die Jahre eine Vielzahl an Partnern zusammen, die sich mit Themen wie Umweltbeobachtungen und Vorhersagen, sowie der Untersuchung der Atmosphäre beschäftigten. An diese Partnerschaften anknüpfen und plant unter Anderem tägliche Echt-Zeit-Analysen und Vorhersagen für die globale Atmosphäre. Außerdem planen sie tägliche

Qualitätsanalysen der Luftzusammensetzung oder genauere Betrachtung relevanter Gase wie CO₂, CH₄ oder N₂O vorzunehmen, um eine zeitliche Entwicklung feststellen zu können. Auch Aerosole, anthropogene Emissionen oder durch Waldbrände hervorgerufene Emissionen werden eine große Rolle spielen (Copernicus Atmosphere Monitoring Service, 2018).

- Einer der größten Bereiche ist der Copernicus **Marine** Environment Monitoring Service (CMEMS), welcher entwickelt wurde, um Informationen zu maritimen Problemen im Bereich der Umwelt, der Wirtschaft und der Wissenschaft zu liefern. Diese Produkte werden aus einer Kombination aus Satellitendaten, In-Situ-Daten und Modellergebnissen erstellt und regelmäßig in einen Katalog implementiert. Alle Nutzer können diesen Katalog von CMEMS nutzen, um Analysen aus maritimen Bereichen, wie der Wasserverschmutzung oder beispielsweise Extrem-Ereignissen zu erstellen. Zurzeit liegt die geringste Auflösung der Datensätze zwischen einem und vier Kilometern (Copernicus Marine Environment Monitoring Service, 2018).
- Der Service für den **Klima-Wandel** ist zurzeit noch in der Entwicklungsphase und wird nach seiner Vollendung Daten aus der Vergangenheit, der Gegenwart und der Zukunft kombinieren, um Klimazustände in Europa zu betrachten. Die Hauptaufgabe des Services wird die Lieferung von Schlüsselindikatoren bezüglich Kohlenstoffdioxid und dessen Auswirkungen sein. Ein Beispiel hierfür ist das Abschmelzen von Gletschern. Mit diesen Indikatoren werden im Anschluss Anpassungs- und Eindämmungsstrategien auf Europa-Ebene entwickelt, um dem Klimawandel entgegen zu wirken (Copernicus Climate Change Service, 2018).
- Der Copernicus **Security-Service** soll als Unterstützung für die Europäische Politik und Sicherheit dienen, indem Informationen über folgende drei Bereiche bereitgestellt werden: Grenzüberwachung, Maritime Beobachtung und Hilfestellung der EU bei Externen Interaktionen. Die Hauptaufgabe bei zum Beispiel der Grenzüberwachung ist die Detektion der illegal Eingewanderten in die EU und die Rettung von Schiffsbrüchigen (Copernicus Security Service, 2018).

2.2 Untersuchungsrahmen

Es soll ein Vergleich der Fernerkundungsdaten und den In-Situ-Daten des WGMN erfolgen, d.h. dass zum Zeitpunkt eines Satellitenüberfluges einerseits die Chlorophylldaten aus den Satellitenmessungen, mit den Daten aus den automatischen Messstationen verglichen werden. Andererseits sollen die Daten der Hafennessfahrt am 4.7.2018 mit den Messwerten der Satellitenaufnahme vom 4.7.2018 verglichen werden.

2.2.1 Untersuchungsgebiet

Das Betrachtungsfeld eines Satelliten ist abhängig von seiner Flugbahn, der Flughöhe und dem Öffnungswinkel der jeweiligen Messinstrumente. So zeigt Abbildung 6 die Abdeckung der Sentinel-2-Satelliten mit Hamburg, sowie Teile von Schleswig-Holstein und Niedersachsen. In diesem Bereich können Messwerte von Gewässern ab einer Größe von einem Hektar gemessen werden. Verlässliche Aussagen können jedoch nicht von einem einzelnen Messwert getroffen werden, da Umgebungseinflüsse eine große Rolle spielen. Das Gewässer sollte deshalb eine deutlich größere Fläche aufweisen.

Auf der Strecke von ca. 100 Kilometern zwischen dem beginnenden Elbemündungsgebiet in Brunsbüttel und dem Elbverlauf auf Höhe von Lauenburg werden alle relevanten Werte für die Elbe erfasst. Nach der Universal Transverse Mercator, einem System welches die Erde in Zonen mit jeweils 100x100km und einer vertikalen Breite von 6° Längengrad, sowie einer horizontalen Breite von 8° Breitengrad einteilt, beschreibt die Abbildung 6 als die Kachel „32 UNE“ (European Space Agency, 2018).

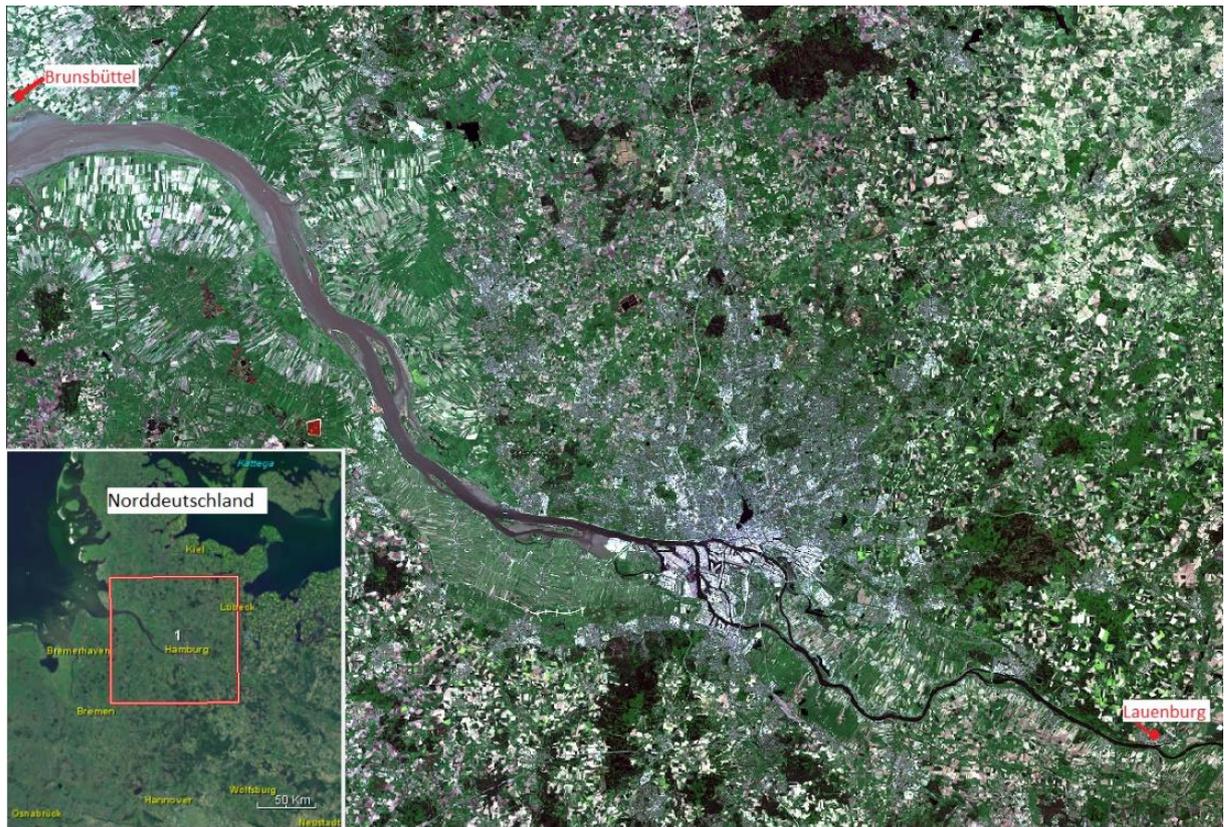


Abbildung 6: Sentinel-2A Aufnahme vom 05.05.2018 (Copernicus, 2014)

Es gibt zwei Orbits, in denen die Sentinel-2-Satelliten den Hamburger Raum erfassen. Der Orbit R008, der das gesamte Stadtgebiet abdeckt und den Orbit R108, der Hamburg ohne den Osten darstellt. Die Bildkachel, die Hamburg ohne den Osten abbildet ist in Abbildung 7 dargestellt. Es kann zwar noch ein beachtlicher Teil der Hafengebiete und der Elbe analysiert werden, jedoch kann bei diesem Überflug der Osten Hamburgs mit allen umliegenden Seen nicht betrachtet werden.

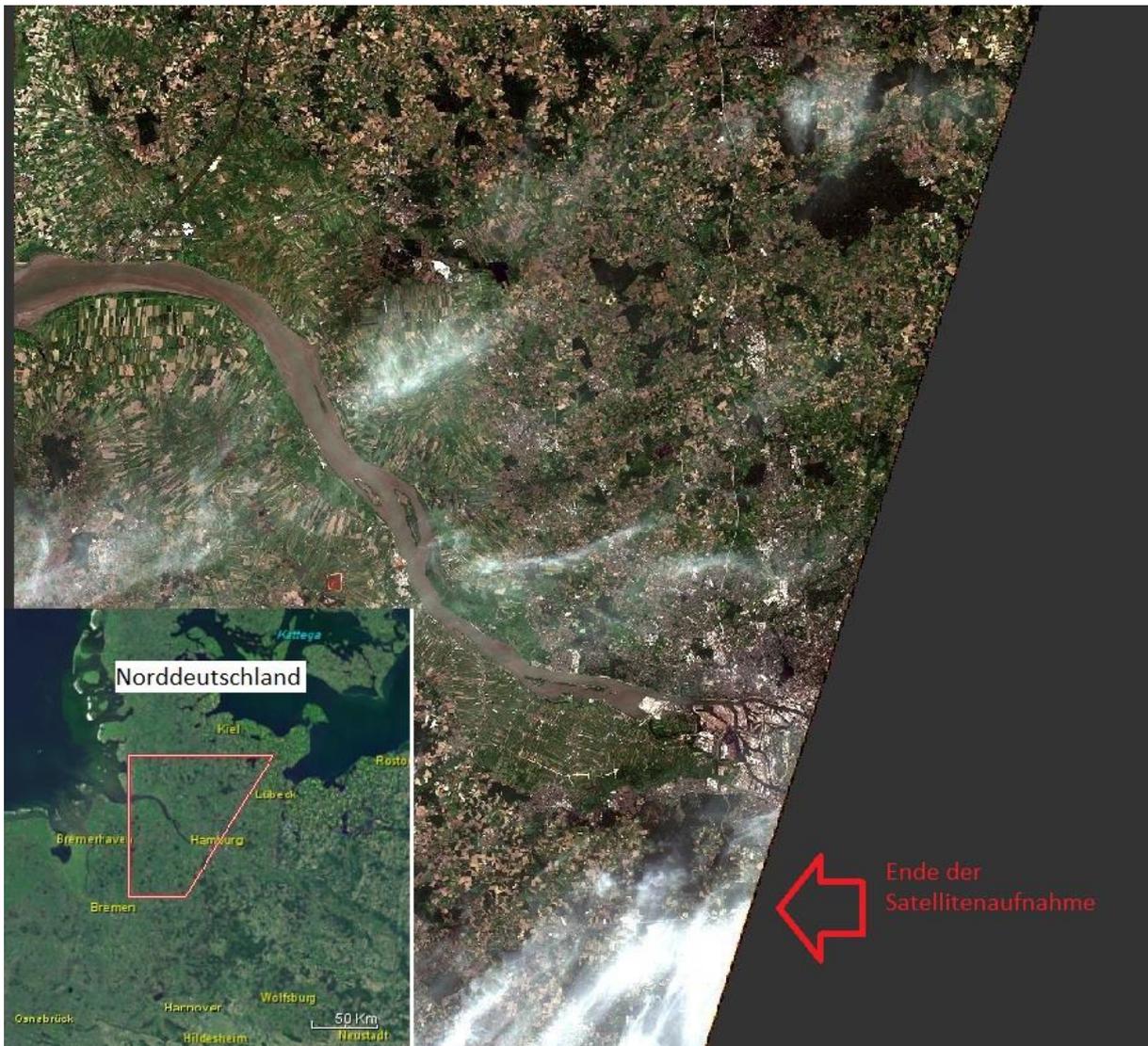


Abbildung 7: Sentinel-2-B-Aufnahme vom 23.05.2018 (Copernicus, 2014)

2.2.2 Untersuchungsflächen

Um die Vergleichbarkeit und Plausibilität aller Satellitenmesswerte zu gewähren, wurden um die betrachteten Messstationen mehrere Messfelder in Form von Kacheln und Kreisen gebildet. Aus diesen Flächen wurden in jedem Datensatz Mittelwerte gebildet. Ein Vergleich fand sowohl zwischen Kreisen und Kacheln, als auch an den Messstationen Bunthaus, Lombardsbrücke und Seemannshöft statt. Die Messfelder in Form von Kreisen und Kacheln wurden gewählt, um zu untersuchen, ob diese untereinander unterschiedliche Ergebnisse liefern. Es wurde besonders bei den Messfeldern für die Stationen Lombardsbrücke und Seemannshöft viel Platz zur Uferkante gewählt, um sicher zu stellen, dass keine Einflüsse durch den Uferbewuchs (Schilfgürtel, Sträucher und Bäume) die Chlorophyllmesswerte

verfälschen. Diese sind von den Satelliten nur schwer von den Algen in den Gewässern zu unterscheiden. Zur Veranschaulichung sind auf den Abbildungen 8 bis 10 die verwendeten Messfelder und die Standorte der Messstationen abgebildet. Die Standorte der Messstationen sind in den Abbildungen mit einem roten Kreuz gekennzeichnet.

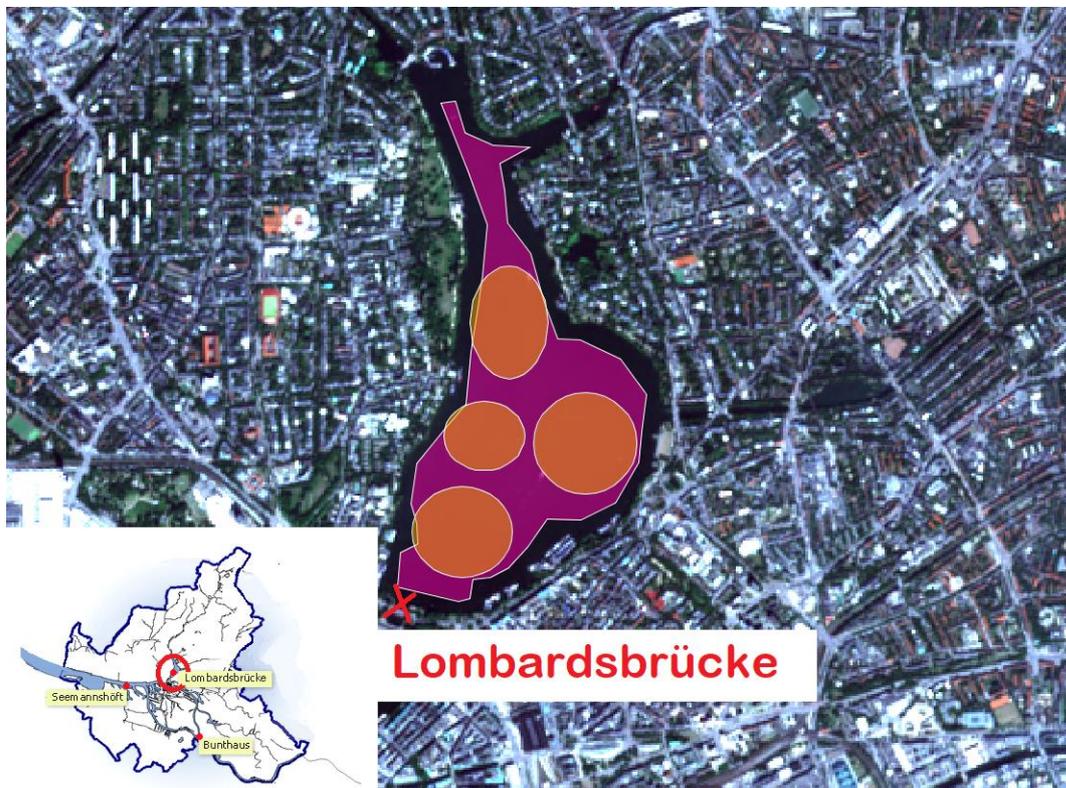


Abbildung 8: Messfelder der Messstation Lombardsbrücke

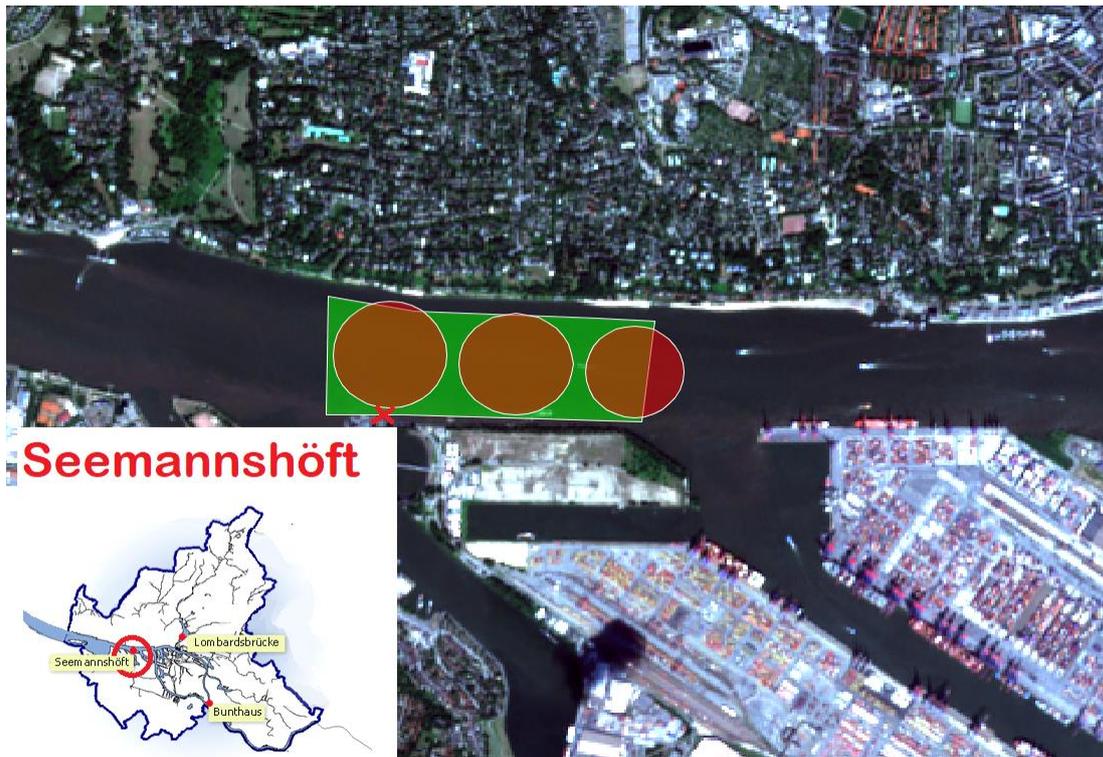


Abbildung 9: Messfelder der Messstation Seemannshöft

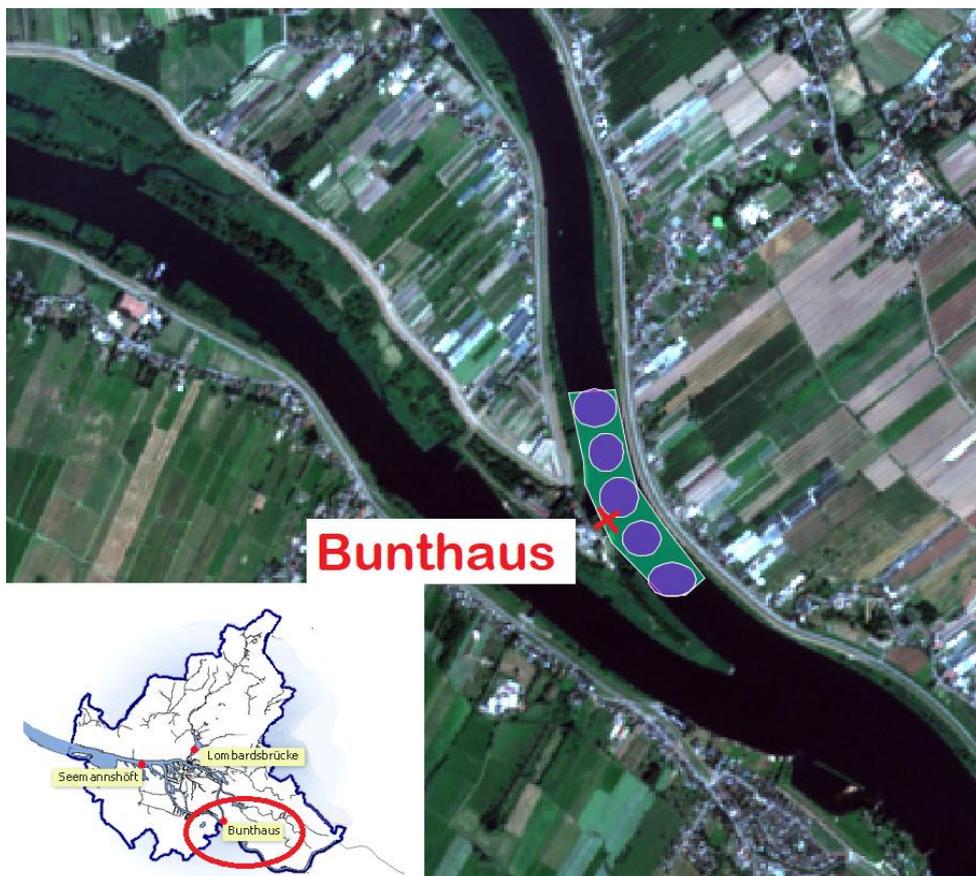


Abbildung 10: Messfelder der Messstation Bunthaus

2.2.3 Untersuchungszeitraum

Entscheidend für die Anzahl der Überflüge der Satelliten ist die Wiederholrate. Sentinel-2A und Sentinel-2B haben beide jeweils eine Wiederholrate von zehn Tagen. Dadurch, dass beide Satelliten als Tandem im Einsatz sind, reduziert sich die Wiederholrate auf fünf Tage. Hamburg liegt, wie im Kapitel 2.2.1 beschrieben, in zwei Orbits. Dadurch verringert sich die Zeit zwischen zwei Überflügen sogar auf nur drei Tage. (Copernicus, 2014).

Ein Phänomen, welches eine wichtige Rolle bei der Qualität der Daten spielt sind Wolken, wie Abbildung 11 veranschaulicht. Der Satellit zeichnet die Reflexionen des Sonnenlichts auf. Wolken verdecken häufig große Teile von Hamburg und machen die Aufnahmen damit unbrauchbar für eine Analyse. Die Messinstrumente, die für die Messung von Chlorophyll auf dem Sentinel-2 verwendet werden, können nicht durch die Wolken hindurch messen, was eine Analyse aus dem Weltall bei starker Wolkendecke unmöglich macht. In Abbildung 11 ist dies sehr deutlich dargestellt.

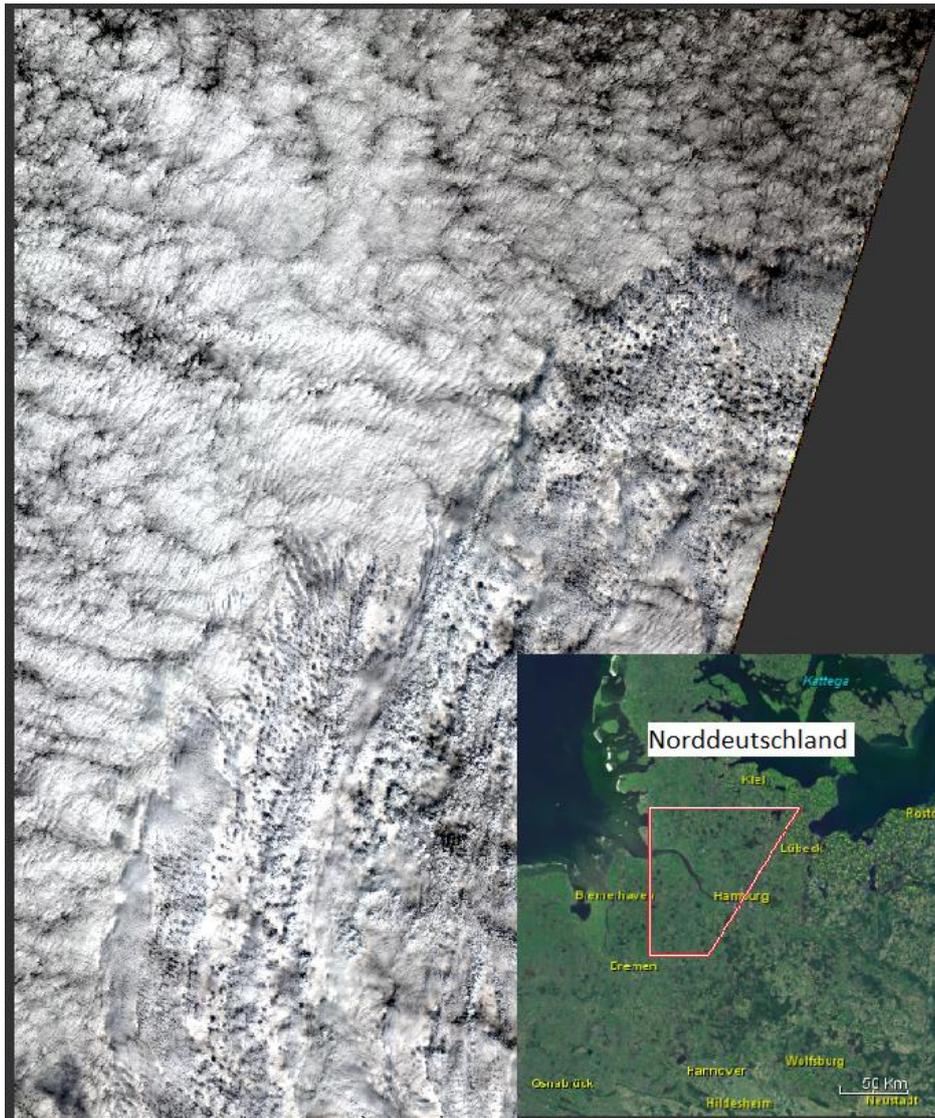


Abbildung 11: Sentinel-2A Aufnahme vom 18.05.2018 - Wolkendecke über Norddeutschland (Copernicus, 2014)

Nicht nur eine dichte Wolkendecke lässt eine Analyse aus dem Weltraum unmöglich machen, sondern auch vereinzelte Wolken stellen häufig ein Problem in der Analyse dar. Sowohl die Wolken selbst, als auch der Schattenwurf der Wolken verfälscht das Ergebnis der Berechnung von Chlorophyll enorm. Eine gute Erkennung von Wolken und Wolkenschatten im Vorfeld einer weiteren Analyse ist daher ein wesentlicher Schritt bei der Auswertung von Satellitendaten.

2.3 Messprinzip Sentinel-2

In der Fernerkundung unterscheidet man zwischen aktiven und passiven Messmethoden. Aktive Messmethoden senden zum Beispiel elektromagnetische Wellen aus und betrachten den reflektierten künstlichen Anteil der erzeugten Strahlung. Diese Methode ist durch die eigene Energiequelle und die verwendeten Frequenzen unabhängig von der Tageszeit, den Wolken, und anderen atmosphärischen Verhältnissen (Albertz, 2007).

Im Kontrast dazu steht ein passives System, welches ausschließlich die elektromagnetische Strahlung nutzt, die in der Natur vorhanden ist. Beim Beispiel Sentinel-2 ist dies die Sonnenstrahlung. Der Satellit empfängt die Reflektionen der Sonnenstrahlung in verschiedenen Wellenlängen und erfasst somit die spektralen Eigenschaften der betrachteten Oberflächen. Da alle Eigenschaften der Sonnenstrahlreflektion abhängig von Wolken, atmosphärischen Verhältnissen und vor allem der Tageszeit sind, ist der Messzeitraum im Vergleich zur aktiven Messmethode sehr eingeschränkt (Albertz, 2007). Verbildlicht ist der Unterschied zwischen passivem und aktivem System in Abbildung 12.

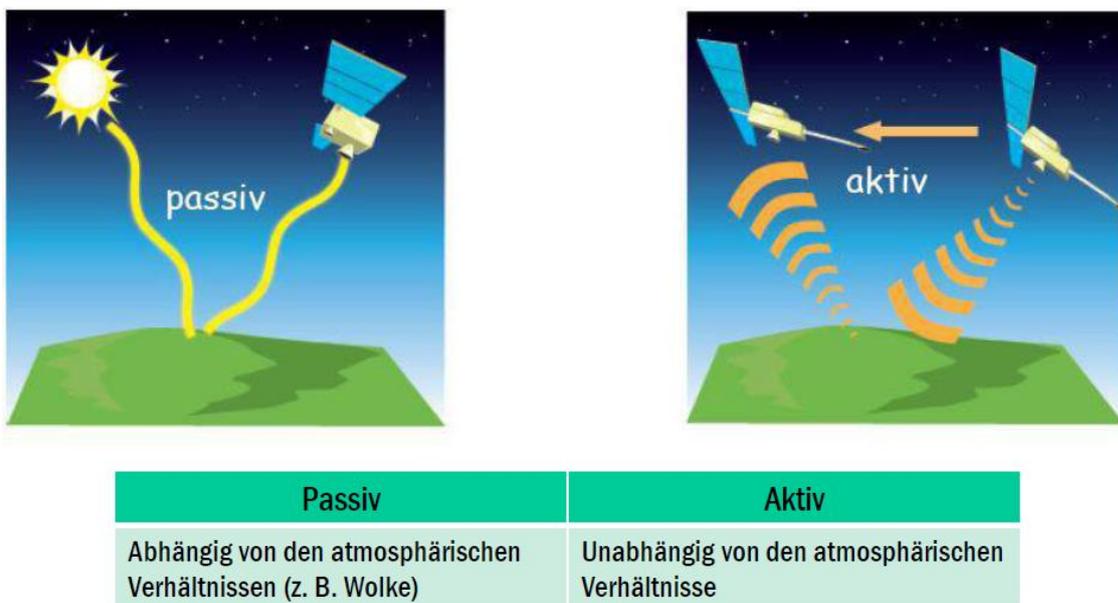


Abbildung 12: Unterschied Messsysteme Satelliten (Copernicus Academy, 2018)

Das Multi Spectral Instrument (MSI) des Sentinel-2 basiert auf Grundlagen, die bereits bei französischen und US-amerikanischen Missionen verwendet wurden. Zurückgeworfenes Licht der Atmosphäre und der Erde wird von einem Drei-Spiegelteleskop gesammelt und auf zwei Brennebenen fokussiert. Eine der beiden Brennebenen ist für die zehn Sichtbaren- und Nahinfrarotwellenlängen (VNIR) und die andere für die drei

Kurzwelleninfrarotwellenlängen (SWIR) zuständig. Um die Bilddaten reihenweise in einer gesamten Breite von 290 km pro Orbital zu sammeln, bestehen die Brennebenen der VNIR und der SWIR aus zwölf Detektoren, die in zwei horizontalen Reihen versetzt angeordnet sind. Die Bewegung des Satelliten wird benutzt, um so die gesamte Erde zu scannen. Dies ist schematisch auf Abbildung 13 dargestellt. Die realen Messorbits der Sentinel-2-Satelliten über Europa sind auf Abbildung 14 in grün und blau zu sehen.

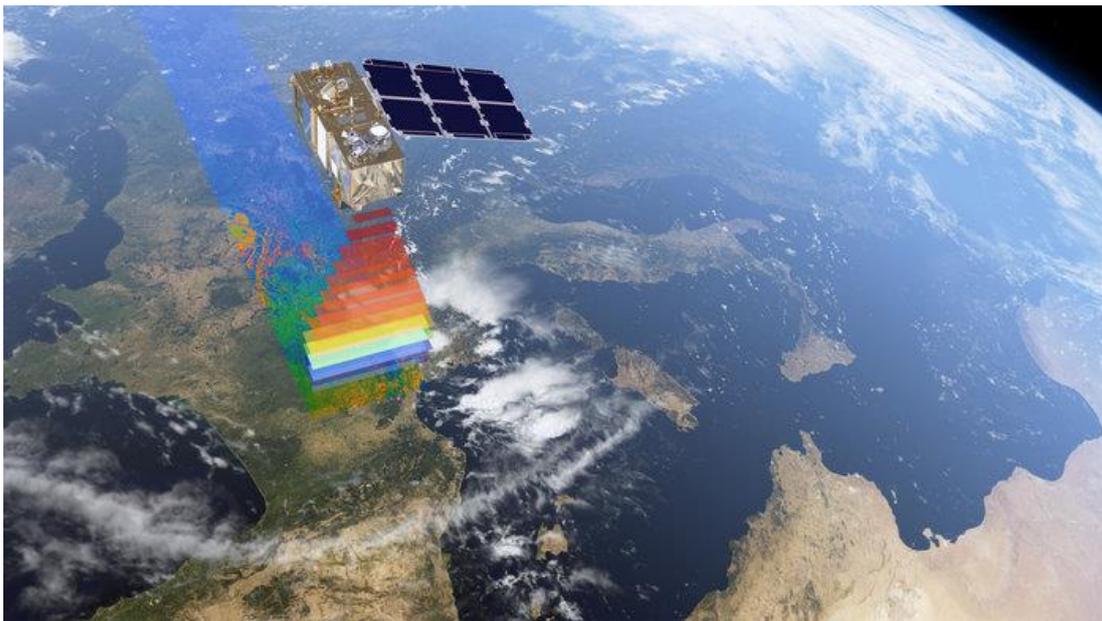


Abbildung 13: Sentinel-2 Colour Vision For Copernicus (European Space Agency, 2018)

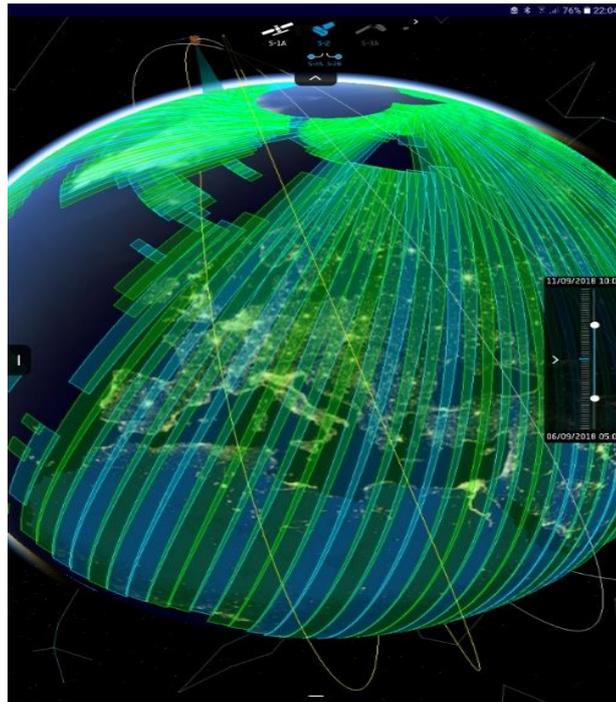


Abbildung 14: Realer Messorbit der Sentinel-2a und Sentinel-2b (erstellt in der offiziellen Copernicus Sentinel-App, Google Playstore)

Die 13 Spektralbänder haben eine spektrale Spannweite vom sichtbaren Licht bis zum Kurzwelleninfrarot und eine Auflösung von 10 bis 60 Meter. Vier der 13 Bänder besitzen eine Auflösung von zehn Metern und sind vor allem für die Klassifizierung der Erdoberfläche zuständig. Sechs Bänder haben eine 20-Meter-Auflösung und sind die ersten ihrer Art, da drei der sechs Bänder unter anderem Daten liefern, die sehr nützliche Informationen über die Vegetation liefern. Die restlichen drei Bänder mit einer Auflösung von 60 Metern sind hauptsächlich für die atmosphärischen Korrekturen und Wolkenklassifizierung verantwortlich. Abbildung 15 veranschaulicht den beschriebenen Zusammenhang zwischen den verschiedenen Bändern und der Wellenlänge des Sentinel-2.

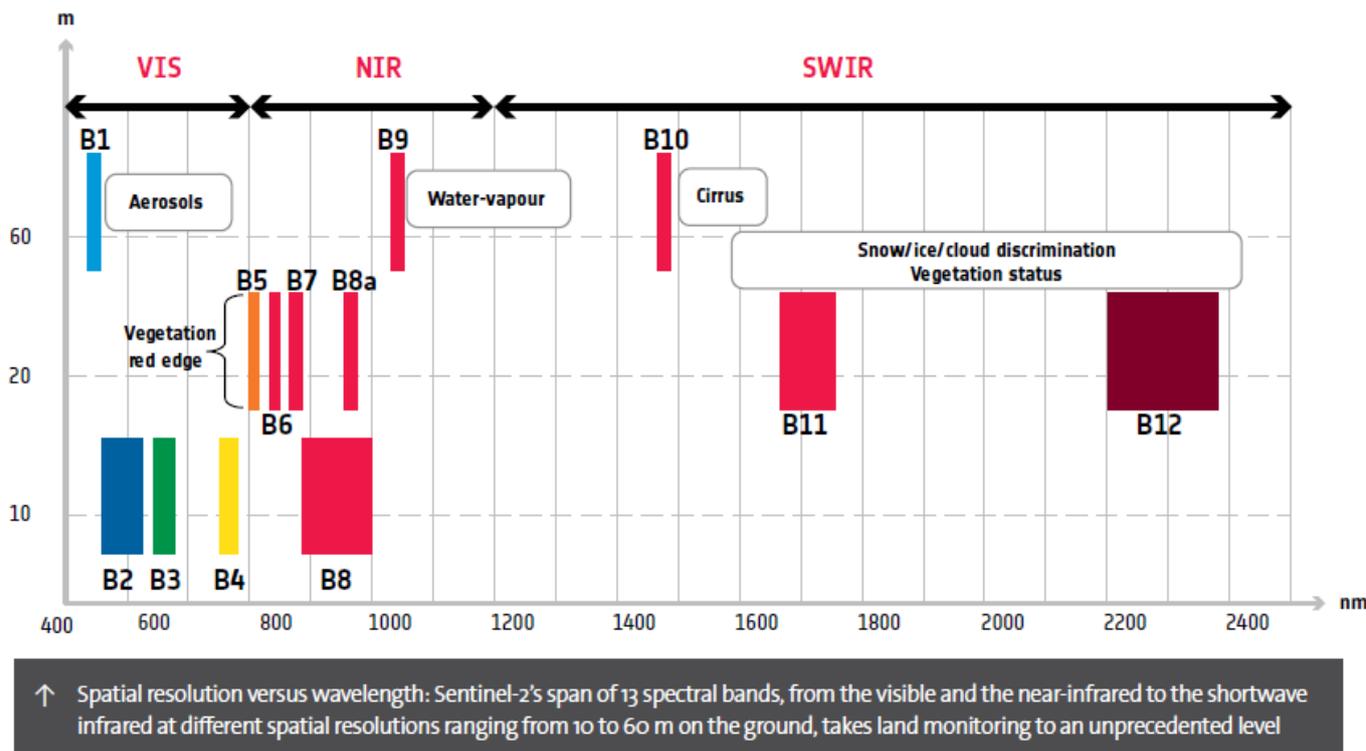


Abbildung 15: Bänderübersicht des Sentinel-2 (Copernicus Academy, 2018)

Wie im Kapitel 2.2.3 bereits beschrieben, können Wolken und Wolkenschleier die Messungen massiv beeinflussen. Bei der Messung der Sentinel-2 werden jedoch ausschließlich die Reflexionen der Sonnenstrahlen gemessen, weshalb diverse Faktoren ebenfalls eine Rolle spielen, wie Abbildung 16 veranschaulicht. Verfälschungen kommen durch die Streuung und Absorption der Sonnenstrahlen in der Atmosphäre und in Bodennähe zustande. Die Streuung in der Atmosphäre ist für die Beleuchtungsverhältnisse der Erdoberfläche essentiell, weshalb auch die Fernerkundung davon beeinflusst wird. Durch die Streuung wird die gesamte Atmosphäre mit diffuser Strahlung erfüllt, welche sich in alle Richtungen verteilt. Diese Strahlung wird Himmelsstrahlung genannt und ist ein Grund dafür, dass der Himmel blau und nicht schwarz erscheint. Bei klarem und wolkenlosem Himmel überwiegt der kurzwellige Anteil im ultravioletten und blauem Spektralbereich, weshalb der blaue Himmel entsteht. Allgemein unterliegt die gerichtete Sonnenstrahlung in Kombination mit der diffusen Himmelsstrahlung in Bezug auf Intensität und spektraler Zusammensetzung einer großen Schwankungsbreite. Abhängig ist diese Schwankung von

der Sonnenhöhe, dem Trübungszustand der Atmosphäre, der Neigung und Neigungsrichtung sowie der Höhe der betrachteten Fläche ab (Albertz, 2007).

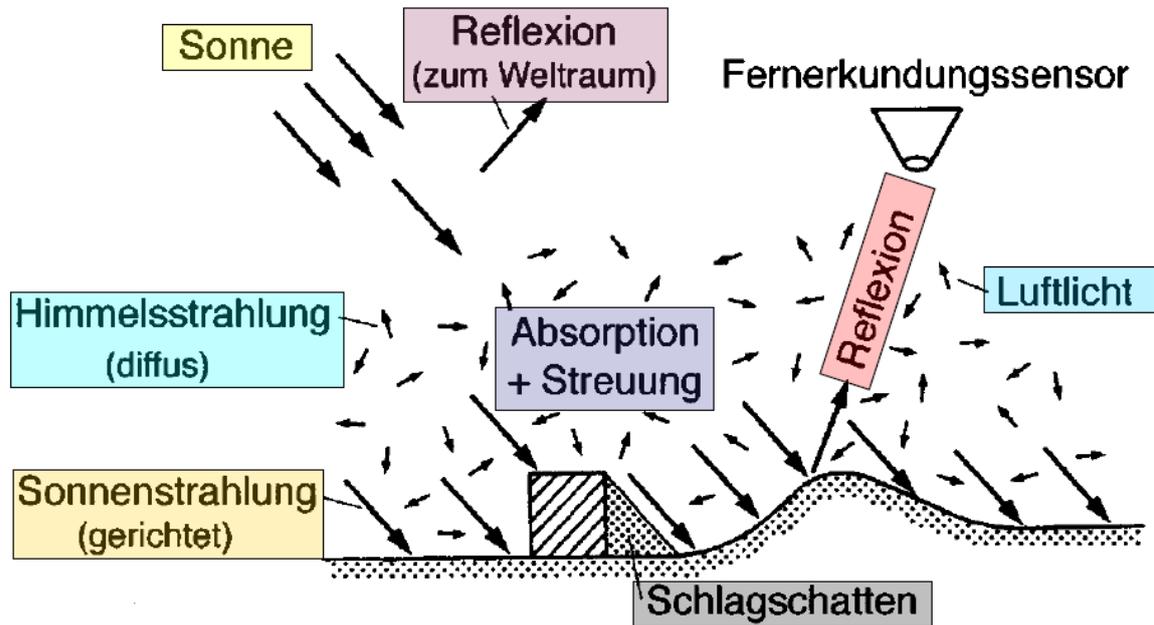


Abbildung 16: Passives Messsystem (Copernicus Academy, 2018)

Besonders im Stadtgebiet spielen zusätzlich zu Wolkenschatten auch Schlagschatten eine große Rolle. Große Gebäude, Kräne oder Lagertanks im Hafen werfen oftmals einen großen Schatten auf die Elbe. Das eigentliche Spektrum des Wassers wird durch den Schatten verändert und verfälscht. Somit wird auch die Messung des Chlorophyllgehaltes verfälscht. Ebenfalls einen Einfluss hat das Kielwasser der Schiffe im Hafen. Durch die aufgewirbelte Oberfläche des Wassers verändert sich die Reflexion im Kontrast zur normalen Gewässeroberfläche und die Messung wird verfälscht. Die Abgasfahnen der Schiffe verhalten sich ähnlich wie Wolken. Wenn besonders kleinere Schiffe nicht als solche in der

Prozessierung erkannt werden, kann dies auch zu großen Abweichungen führen. Veranschaulicht sind diese Fehlerquellen in Abbildung 17.



Abbildung 17: Elbabschnittaufnahme vom 8.6.2018 (Sentinel-2) mit Einflüssen durch Schiffsverkehr (rot), Schattenwurf (gelb), Abgasfahnen (grün) und Kielwasser(blau)

2.4 In-Situ Messmethoden im WGMN

In den Messstationen, sowie auf der Hafennessfahrt wird der Chlorophyllgehalt, die photosynthetische Aktivität und die Transmission von Mikroalgen durch ein AlgaeLabAnalyser der Firma bbe Moldaenke, gemessen. Während die Messtechnik der Geräte weitestgehend dieselbe ist, so bestehen einige Unterschiede in der Handhabung. In den Messstationen arbeiten die AlgaeOnlineAnalyser und Algentoximeter im kontinuierlichen Wasserstrom, wobei die Algen im Wasser kontinuierlich analysiert werden. Auf der Hafennessfahrt wird bei jeder Messstelle eine Probe im AlgaeLabAnalyser analysiert (s. Abbildung 18).



Abbildung 18: Kuvetten-Fluorometer (bbe Moldaenke GmbH, 2018)

Das Fluorometer liefert folgende Messwerte:

- Gesamtchlorophyllgehalt [$\mu\text{g/l}$]
- Chlorophyllgehalt [$\mu\text{g/l}$] von bis zu fünf Algenklassen (Blaualgen, Grünalgen, Cryptophyceae, Kieselalgen und Dinoflagellaten)
- Transmission der Probe bei fünf verschiedenen Wellenlängen
- Aktivität der Algen [%] (auch Genty Parameter genannt)
- Rohwerte der Algenklassenanalyse

Durch Anregungen der Algen mit verschiedensten LEDs können Algenklassen zugeordnet werden und die Proben können ungefiltert und ohne Aufbereitung gemessen werden. Die

Leuchtdioden mit Anregungslicht der Wellenlängen 470nm, 525nm, 570nm, 590nm und 610nm rufen in den Algen Fluoreszenzantworten hervor, welche gemessen werden können. Mit Hilfe dieses Spektrums der Algen kann rechnerisch die Photosyntheseaktivität ermittelt werden (bbe Moldaenke GmbH, 2018).

Die bbe-Fluorometer messen die Fluoreszenzantwort des Algenchlorophylls bei einer festen Emissionswellenlänge (650 nm).

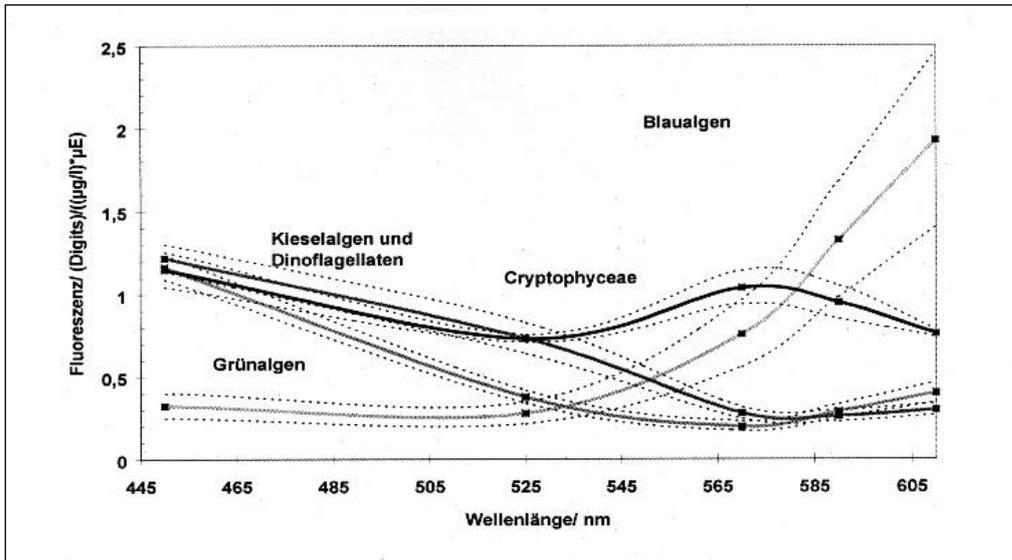


Abbildung 19: Algenklassen (Blohm, 2018)

Dieses Anregungsspektrum, bestehend aus fünf Fluoreszenzwerten, wird nun mit den im Gerät gespeicherten und normierten Anregungsspektren der verschiedenen Algenklassen verglichen (siehe Abbildung 19). Dabei wird das gemessene Anregungsspektrum der Wasserprobe mit eingespeicherten Anregungsspektren der verschiedenen Algenklassen verglichen. Hierfür wird eine Verteilung der Algenklassenkonzentration ermittelt, welche die geringste Abweichung vom gemessenen Spektrum zu den eingespeicherten Spektren hat. Die Funktion der AlgaeOnlineAnalyser ist identisch zum Küvettenfluorometer mit dem Unterschied der Probenbefüllung. Während in den Messstationen die AlgaeOnlineAnalyser kontinuierlich mit Proben versorgt werden, muss beim Küvettenfluorometer jede Probe in Form von einer Küvette in das Gerät gestellt werden (bbe Moldaenke GmbH, 2018).

2.5 Die Software SNAP

Im folgenden Kapitel werden sowohl allgemeine Informationen über die Software gegeben, womit die Satelliten-Datenpakete bearbeitet werden, als auch die Berechnung der Rohdaten in Messwerte erläutert.

2.5.1 Allgemeine Informationen über SNAP

Um Datenpakete der verschiedenen Satellitentypen verwenden zu können, stellt die European Space Agency (ESA) in Kooperation mit diversen Drittfirmen eine Software zur Verfügung. Diese Software heißt „Sentinel Application Platform“ (SNAP) und ist die führende Software der ESA in Bezug auf Satellitendatenauswertung. Diese Software bietet diverse Möglichkeiten, um die Datenpakete aller Sentinel Satelliten darzustellen, auszuwerten und für weitere Schritte vorzubereiten (European Space Agency, 2018).

SNAP bietet viele Möglichkeiten Daten zu betrachten und zu verarbeiten und stellt für Analysen und Auswertungen alle Tools, präzise zugeschnitten auf die Sentinel Daten, bereit. Es ist möglich diverse Arbeitsschritte zu automatisieren und Statistiken zum Beispiel in Microsoft-Excel zu übertragen. Eine Kompatibilität mit Programmierungen durch Python ist ebenfalls implementiert (European Space Agency, 2018).

In der Auswertung wurde SNAP benutzt. Um alle Daten auswerten zu können, wurden grundsätzlich die Arbeitsschritte Resampling, Masking mit dem Preprozessor IdePix-Sentinel-2-MSI und die Chlorophyllberechnung mit dem Prozessor C2RCC S2-MSI benutzt.

2.5.2 Klassifizierung von Oberflächen aus den Messwerten der Multispektralkamera

Das Auge nutzt die Tatsache, dass verschiedene Oberflächen das sichtbare Licht, in Form von elektromagnetischer Strahlung, bei verschiedenen Wellenlängen unterschiedlich stark absorbiert, transmittiert und reflektiert. Verschiedene Oberflächen weisen somit unterschiedliche Absorptions-, Transmissions- und Reflexionseigenschaften auf. Ähnlich wie beim Auge, werden diese Oberflächeneigenschaften auch in der Fernerkundung genutzt.

Die Tatsache, dass viele Oberflächen auf der Erde bei verschiedenen Wellenlängen individuelle Reflexionseigenschaften besitzen, wird ausgenutzt, um sie voneinander zu unterscheiden.

Die Farbe der Erdoberfläche wird durch viele Substanzen beeinflusst und die Messung der Farbspektren ermöglicht einen Einblick in die Vegetation, die Bodenbeschaffung und die Wasserqualität. Die hochempfindliche Multispektralkamera, die auf dem Sentinel-2 eingesetzt wird, ermöglicht eine Quantifizierung solcher Wasserkörper aus dem Weltraum auf globaler Ebene mit einer räumlichen Auflösung von bis zu 10 Metern. Um diese Spektren in geophysikalische Messwerte umzuwandeln, sind über Jahre diverse Algorithmen und Statistiken aufgestellt worden, welche aus den Wellenlängen eindeutige Zuweisungen zu Oberflächen machen. In Abbildung 20 werden die Bänder des Sentinel-2 als graue Balken dargestellt, die bestimmte Wellenlängen abdecken. Als blaue, grüne und rote Graphen, ist das spektrale Verhalten verschiedener Oberflächen dargestellt. Alle Oberflächen haben ein spezifisches Verhalten in mehreren Wellenlängen, sodass durch die Kombination von mehreren Bändern die Oberflächen identifiziert werden können (Science Education through Earth Observation for High Schools (SEOS), 2008-2018). Die genaue Berechnung wird über den Prozessor C2RCC vollzogen. Dieser wird im Kapitel 2.6 beschrieben.

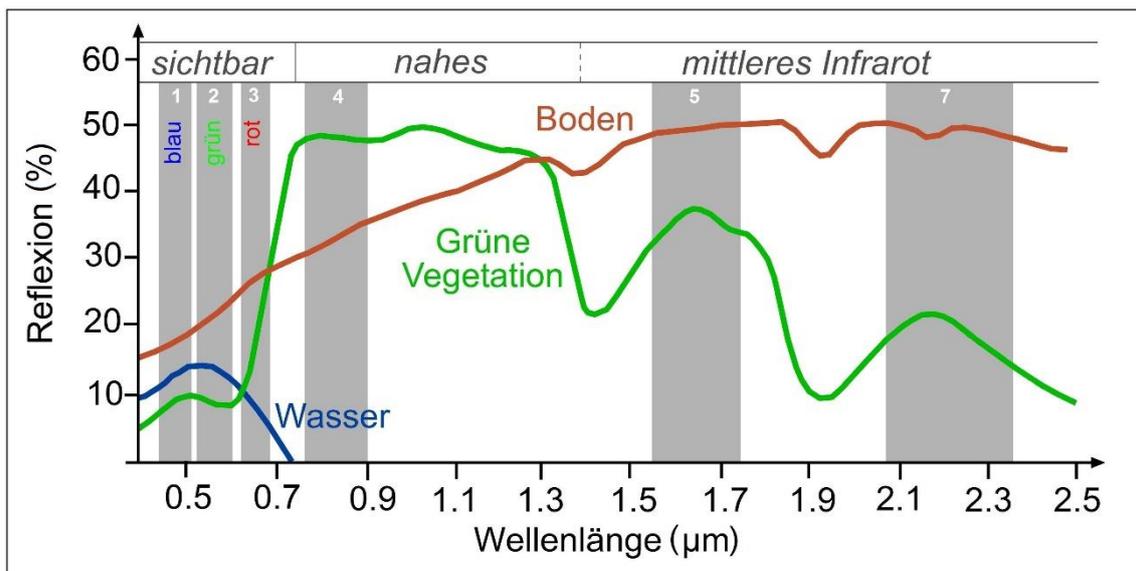


Abbildung 20: Klassifizierung von Oberflächen (Science Education through Earth Observation for High Schools (SEOS), 2008-2018)

2.6 Messdatenerstellung fürs WGMN

Im folgenden Abschnitt wird beschrieben, wie der Arbeitsvorgang vom Download der Sentinel-2-Rohdaten bis zum Endprodukt, also den Chlorophyll-Daten des Hamburger Einzugsgebiets, durchgeführt wurde.

Es gibt mehrere Plattformen zum Downloaden von Satellitendaten. Beispiele hierfür sind das Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>) oder der EO Browser Sentinel Hub von SINERGISE (<https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser>).

Über alle Downloadplattformen werden die Daten für den Download bereitgestellt, wobei sich die Filtermechanismen bei allen Plattformen unterscheiden. So ist es beim Sentinel Hub möglich nach Wolkenbedeckung zu filtern, d.h. wenn eine ausgewählte Wolkenbedeckung von z.B. 50 Prozent eingestellt wird, werden Datenpakete mit einer Bedeckung von mehr als 50 Prozent ausgeblendet. Auch die Auswahl der Satellitentypen ist verschieden. Während man im Copernicus Open Access Hub lediglich alle Datentypen der Sentinel-1, Sentinel-2 und Sentinel-3 Missionen herunterladen kann, so sind beim EO Browser auch andere Satellitenmissionen, wie zum Beispiel Landsat oder MODIS, implementiert. Dafür bietet das Copernicus Open Access Hub Möglichkeiten zur Automatisierung.

Nach dem Download der Rohdaten werden für die Berechnung der Chlorophylldaten die Rohdaten in SNAP hineingeladen und aus den Rohdaten werden neue Produkte erstellt. Nun sind sie bereit für die Bearbeitung und Prozessierung. Zur Veranschaulichung von Datensätzen kann jederzeit ein Red-Green-Blue-Image (RGB-Bild) erstellt werden, d.h. ein Farbbild der gesamten Kacheln zum Zeitpunkt des jeweiligen Überfluges (s. Abbildung 6, Abbildung 7 oder Abbildung 25). Damit können viele Fehlerquellen, wie zum Beispiel Wolkenschatten oder andere Störfaktoren, gut dargestellt werden.

Nach dem Einladen der Daten in SNAP ist der erste Schritt zur Erstellung der Chlorophylldaten das sogenannte Resampling. Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, haben nicht alle Bänder des Sentinel-2 die gleiche Auflösung. Sie variieren zwischen 10 und 60 Metern. Das Resampling löst dieses Problem, indem es Pixel mit einer vorgegebenen Methode auf die Ziel-Pixelgröße herunter- oder heraufrechnet. Bei einer eingestellten Auflösung von 20 Metern und einer angegebenen Mittelwert-Resample-Methode werden beispielsweise 4 Pixel mit einer Auflösung von 10x10 Metern zu einem Pixel von 20x20 Metern zusammengefasst. Es wird im Anschluss ein Mittelwert aus allen vier Pixeln berechnet, der

dann für den einen neuen Pixel gilt. Diese Methode funktioniert auch für die Bänder mit einer Auflösung von 60 Metern, indem ein Pixel in mehrere aufgespalten wird.

Als „downsampling method“ werden die Alternativen zur Mittelwertbildung pro Pixel beschrieben. Es ist möglich aus den vier 10x10 Pixeln auch den höchsten Wert oder den niedrigsten Wert auf den einen 20x20 Meter Pixel zu übertragen. Bei den Berechnungen der Datensätze für den Vergleich wurde jedoch die Einstellung „Mean“, also Mittelwert, gewählt. Zur Orientierung in SNAP wurde der Pfad zum Resampling in Abbildung 21 dargestellt. Für das Resampling der untersuchten Datensätze dieser Arbeit wurde das Resampling Tool in SNAP durchgängig mit den folgenden Parametern verwendet:

- By pixel resolution (in m): 20 (Größe pro Pixel im Satellitenbild)
- Downsampling method: Mean

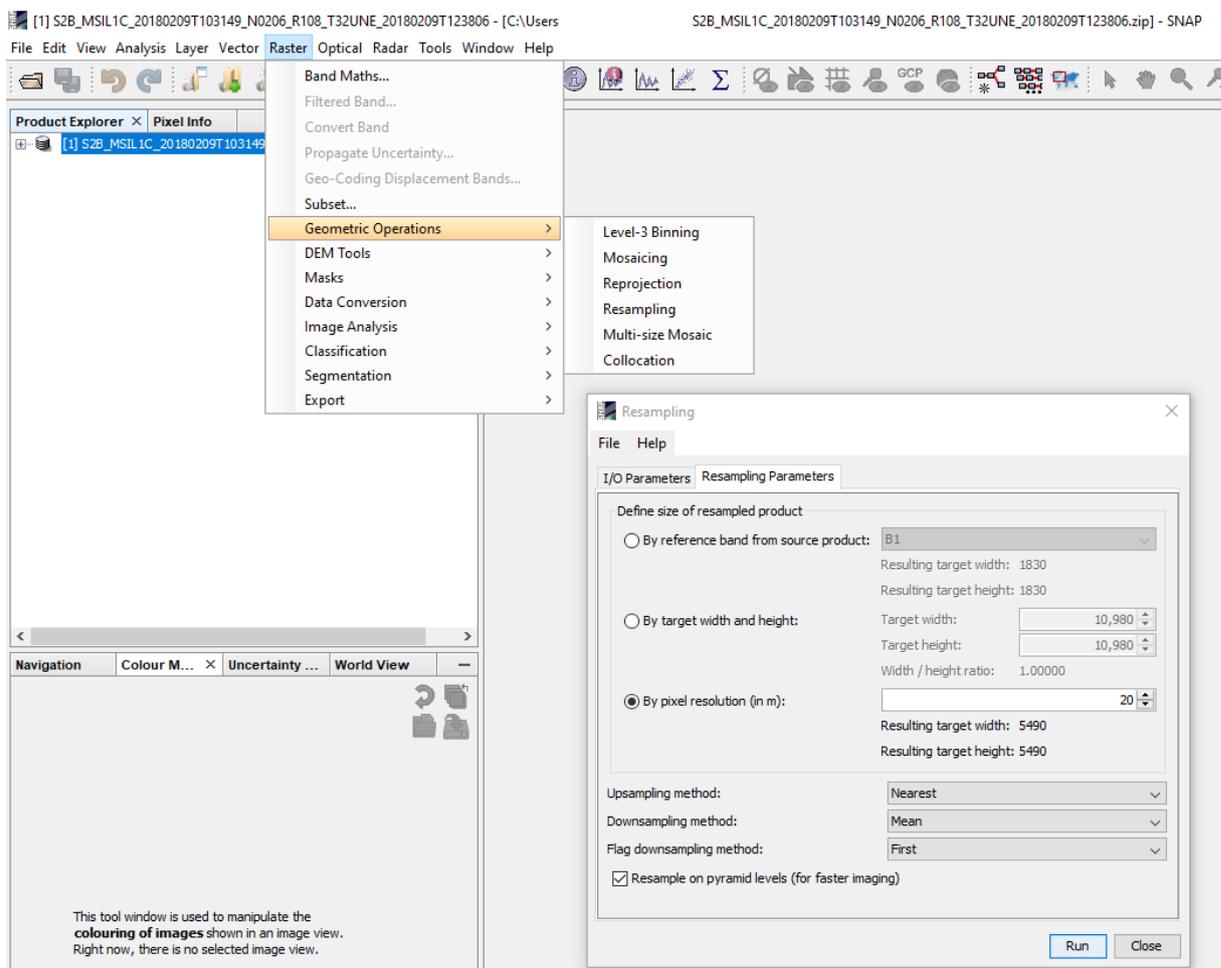


Abbildung 21: Resampling SNAP

Wenn alle Pixel dieselbe Auflösung besitzen, also das Resampling abgeschlossen ist, wird mit der Prozessierung fortgefahren. Als Vorprozessierungsschritt wurde der IdePix Operator in SNAP benutzt. Dieser Schritt dient der Identifikation von Wolkenpixeln und anderen „nicht-Wasser“ Pixeln. Der IdePix-Operator vergleicht, ähnlich wie in Kapitel 2.5.2 beschrieben, die verschiedenen Bänder und filtert ungültige Pixel für den abschließenden Arbeitsschritt heraus. Durch eine Kombination von neuronalen Netzen und spektralen Tests wird verglichen, welche Pixel von Wasser, Boden oder Wolken bedeckt sind. Zusätzlich dazu filtert das Programm, welche Pixel unsicher für die Berechnung sein könnten. Nach diesem Vorgang bleiben in der Regel ausschließlich verwendbare, von Wasser bedeckte, Pixel übrig, sodass die Rechenleistung für den abschließenden Vorgang minimiert wird. In SNAP wurden für den Preprozessor „IdePix Sentinel-2 MSI“ die Default-Parameter verwendet um die Datensätze für den Vergleich zwischen WGMN-Messwerten und den Sentinel-2 Messwerten erstellen. Der Pfad in SNAP zum IdePix-Preprozessor ist in Abbildung 22 dargestellt.

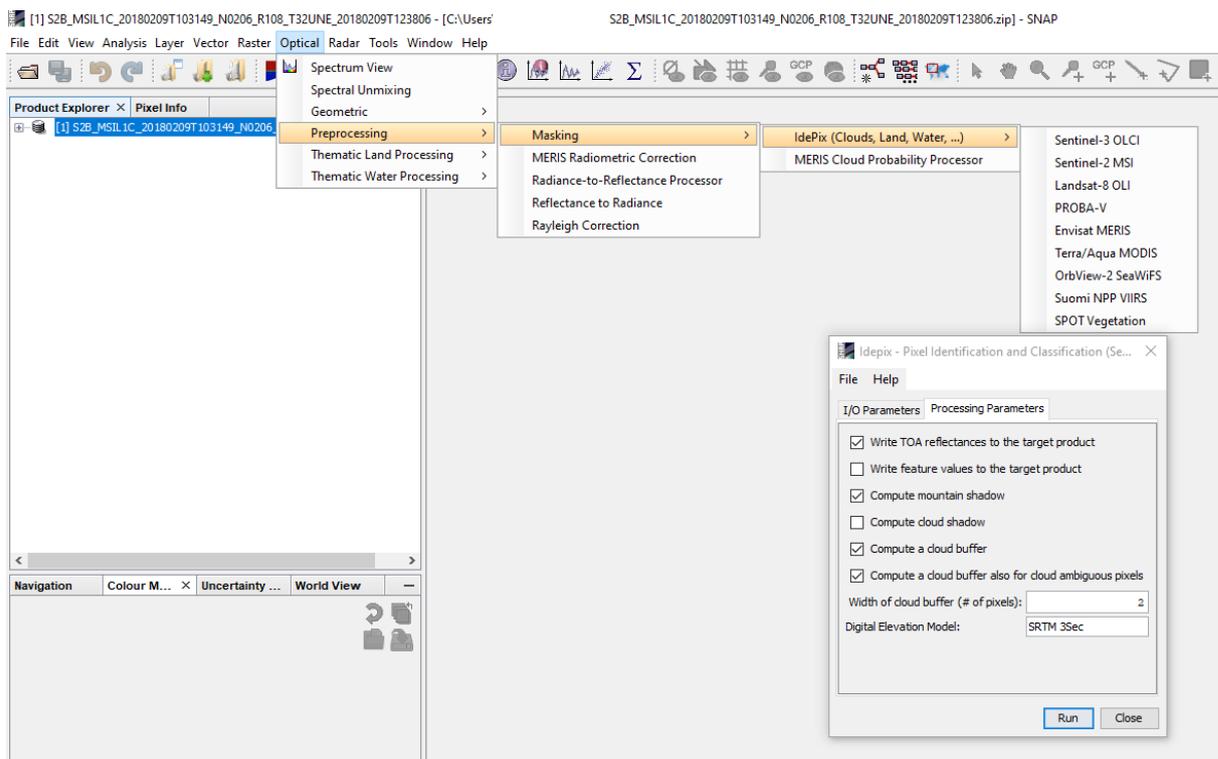


Abbildung 22: Preprozessing IdePix SNAP

Der letzte und größte Arbeitsschritt in SNAP ist die eigentliche Berechnung der Chlorophyllwerte. Hierfür wurde der der Case-2 Regional CoastColour (C2RCC) Prozessor verwendet. Dieser beinhaltet zwei Arbeitsschritte: die Atmosphärenkorrektur und einen Wasserberechnungsteil. Die Atmosphärenkorrektur befasst sich vor allem mit den Reflektions- und Absorptionsvorgängen in der Atmosphäre, die die Strahlung stark beeinflussen. Hier spielen viele Faktoren, wie zum Beispiel Luftdruck oder die Art und Konzentration des Aerosols eine Rolle in der Berechnung. Als Resultat der Atmosphärenkorrektur erhält man den Energieanteil der Strahlung, der das Gewässer wieder verlässt. Außerdem werden Masken erzeugt, die eine Qualitätsinformation über die jeweiligen Pixel enthält (z.B. ob die Atmosphäre optisch zu undurchlässig für einen verlässlichen Wasserwert war) (Brockmann et al., 2016).

Für den Wasserberechnungsteil werden die aus der Atmosphärenkorrektur ermittelten Reflektionen der Gewässer verwendet. Es wird überprüft, ob Werte außerhalb des Gültigkeitsbereiches des Algorithmus liegen. Im Anschluss werden die Spektren in sogenannte inherent optical properties (IOP) invertiert. Diese charakterisieren das Gewässer nach ihren Streu- und Absorptionseigenschaften. Aus diesen IOPs werden Mithilfe von Umrechnungsfaktoren die Chlorophyllkonzentrationen, sowie die zugehörigen Unsicherheiten errechnet. Die Berechnungen werden durch verschiedene neuronale Netze durchgeführt, welche mit simulierten Reflektionsspektren trainiert wurden. Validierung mit In-Situ Messungen und zahlreiche Studien zu optischen Eigenschaften der Gewässer haben die Methode über die vergangenen Jahre immer weiter verbessert (Brockmann et al., 2016).

Die Prozessoroberfläche in SNAP erlaubt die Einstellungen für verschiedene Einflussfaktoren sowie die Konvertierungskoeffizienten zu verändern (s. Abbildung 23). Für die Berechnung der Sentinel-2-Datensätze des Vergleichs wurden aber die Default-Einstellungen verwendet. Es gibt zwei Varianten der neuronalen Netze: eines ist für moderate Konzentrationen von Chlorophyll und Schwebstoff optimiert, ein anderes für höhere Konzentrationen. Um die hohen Schwebstoffgehalte der Elbe gut abbilden zu können wurden die Netze für die höheren Konzentrationen (C2X) verwendet. Verändert wurden ebenfalls die Parameter für die Salinität und zugelassene Pixel:

- Valid-pixel expression: $B8 > 0 \ \&\& \ B8 < 0.1 \ \text{AND NOT IDEPIX_VEG_RISK}$
- Salinity: 0.01 PSU
- Set of neuronal nets: C2X-Nets

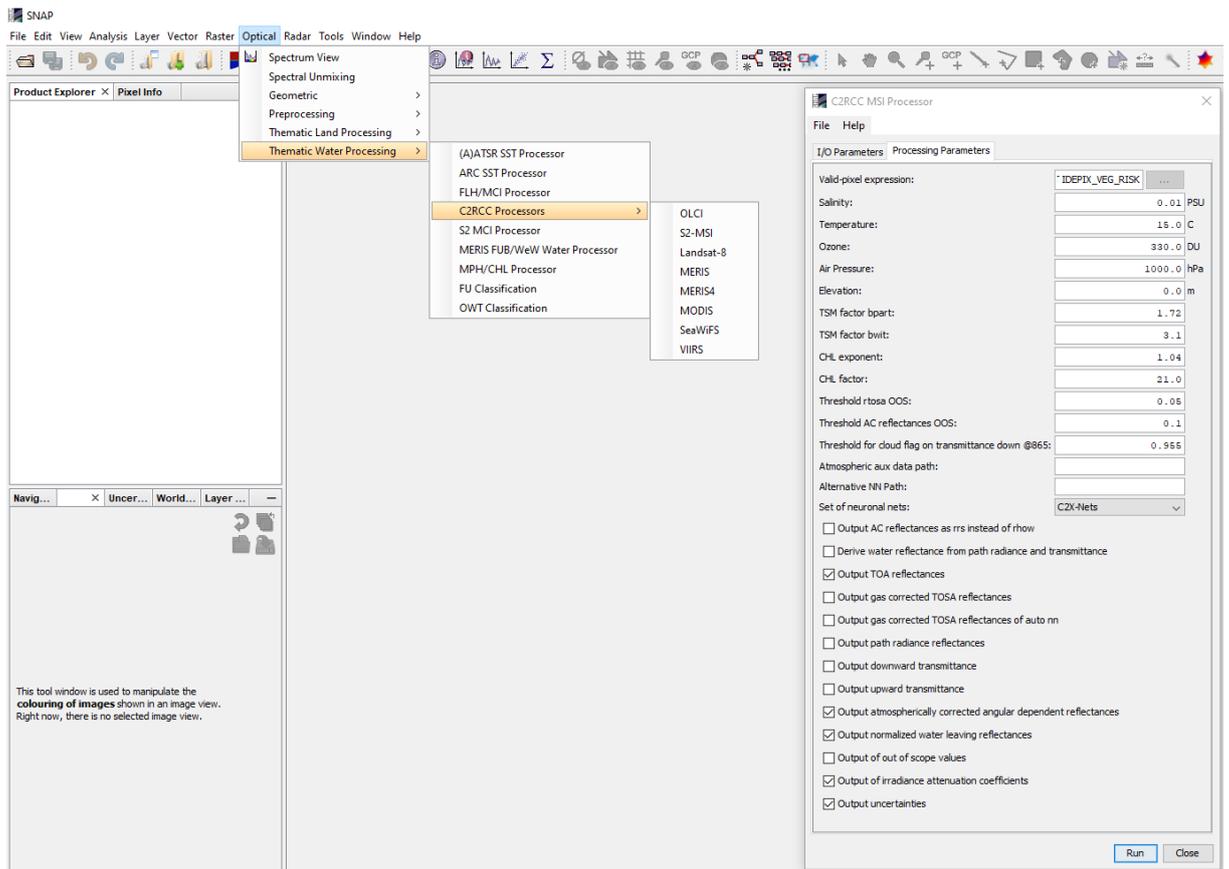


Abbildung 23: Prozessor C2RCC MSI SNAP

Nach dem Prozessieren entstehen diverse neue Elemente in einer neuen Datei in SNAP. Ein Teil der neuen Datei ist die Karte aller Gewässer mit den Chlorophyll-Messwerten.

Ein Datensatz in Form einer entstandenen Karte ist in Abbildung 24 veranschaulicht. Zur Orientierung wurden nachträglich diverse markante Gewässer beschriftet. In dieser Karten-Datei sind Messwerte in Form von bunten Pixeln angegeben. Die Farben der Pixel repräsentieren verschiedene Chlorophyllkonzentrationen und die restlichen Flächen sind Landflächen, die für die Binnengewässerbetrachtung nicht relevant sind und deshalb maskiert (dunkelgraue Flächen) wurden. Je kleiner der Parameter „pixel resolution“ im ersten Arbeitsschritt, dem Resampling, eingestellt wird, desto detaillierter ist die entstandene Karte. Für die Abbildung 24 wurde die größte Einstellung gewählt, um die gesamte Reichweite darzustellen. In dieser Karte kann je nach „pixel resolution“ beliebig hineingezoomt werden. Als eine detaillierte Einstellung der Messwerte ist Abbildung 34 gewählt worden. Bei ausreichender Vergrößerung können dann einzelne Messwerte mit dem Mauszeiger ausgewählt und deren Werte angezeigt werden. Es ist auch möglich Formen

einzufragen, mit deren Hilfe Statistiken erstellt werden. Aus diesen Formen wurden die Mittelwerte für den Vergleich entnommen. Nicht nur die detaillierte Ansicht, sondern auch die grobe Ansicht liefert Erkenntnisse bezüglich der Algenkonzentration entlang des Elbelaufes und innerhalb des Elbquerschnittes, die für das WGMN relevant sind.

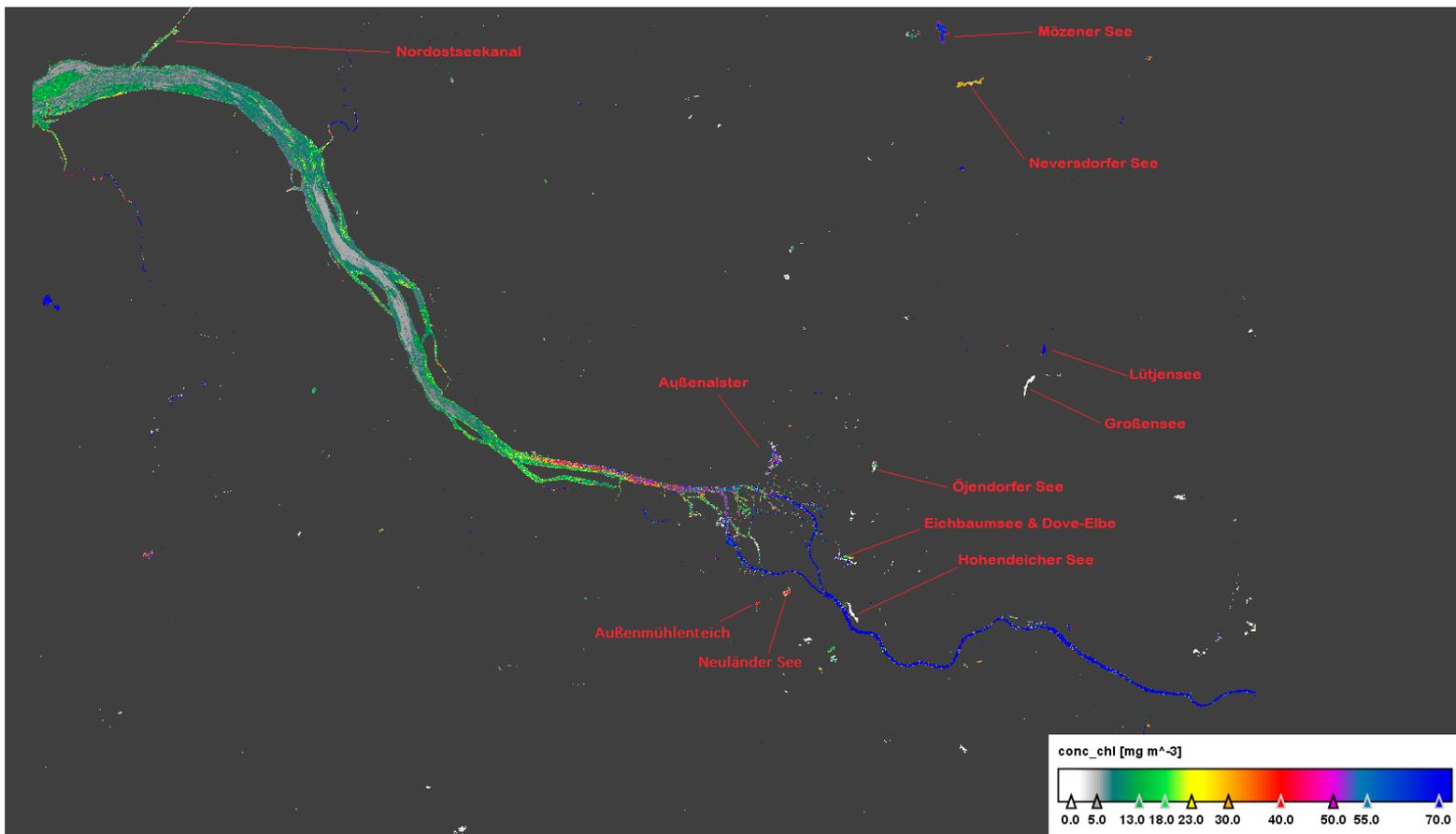


Abbildung 24: Prozessierter Datensatz vom 9.7.2017 in SNAP

3. Ergebnisse

Wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben werden Sentinel-2-Datensätze unter anderem durch Wolken beeinträchtigt und somit gegebenenfalls unbrauchbar. Da Hamburgs meteorologische Verhältnisse oftmals von vielen Wolken geprägt sind, reduziert sich die Anzahl der brauchbaren Aufnahmen deutlich. Die Messdaten der Messstationen und Sentinel-2-Daten wurden für alle Überflüge vom 5. Januar 2017 bis zum 6. August 2018 verglichen. In diesem Zeitraum fanden 232 Überflüge der Satelliten statt. Die Überflüge lieferten Datensätze, welche für den Vergleich im EO Browser vorgefiltert und manuell überprüft wurden. Es wurden Filtereinstellungen mit einer maximalen Wolkenbelastung von 10% gewählt. Als geeignet wurden Datensätze eingestuft, bei denen keine Wolkenbedeckung über Hamburg nach manueller Prüfung vorlag. Als unsicher eingestuft wurden jene Datensätze, bei denen eine sehr geringe optische Wolkenbedeckung über Hamburg vorlag. Bei diesen Datensätzen musste überprüft werden, ob die Wolkenschatten oder die Wolken selbst einen Einfluss auf die Gewässerberechnung haben. Als Beispiel hierfür ist Abbildung 25 verwendet worden. Es zeigt eine Abgasfahne des Kraftwerks Hamburg-Moorburg, die durch die Abgase selbst und den Schattenwurf der Abgase Teile der Prozessierung stören. Da in diesem Beispiel jedoch keine Daten an den Messstationen betroffen sind, wurde diese Aufnahme trotzdem verwendet. Alle 22 für den Vergleich verwendeten Datensätze sind aus dem Tabellenabschnitt der Tabelle 2 zu entnehmen. Die anderen 210 Datensätze sind für den Vergleich ungeeignet. Die gesamte Tabelle 2 ist dem Anhang zu entnehmen.



Abbildung 25: Sentinel 2B Aufnahme vom 4.12.2018 (Copernicus, 2014)

Tabelle 2: Relevante Datensätze für den Vergleich (Ausschnitt)

Datum des Überfluges	Orbital	über Wolkenbelastung gefiltert	Manuell überprüft	Vergleichsdatensatz des WGMN vorhanden
06.08.2018	R008	geeignet	✓	ja
01.08.2018	R008	geeignet	✓	ja
27.07.2018	R008	geeignet	✓	ja
24.07.2018	R108	geeignet	✓	ja
04.07.2018	R108	geeignet	✓	ja
07.06.2018	R008	geeignet	✓	ja
20.05.2018	R108	geeignet	✓	ja
13.05.2018	R008	geeignet	✓	ja
08.05.2018	R008	geeignet	✓	ja
05.05.2018	R108	geeignet	✓	ja
20.04.2018	R108	geeignet	✓	ja
18.04.2018	R008	geeignet	✓	ja
08.04.2018	R008	geeignet	✓	ja
19.03.2018	R008	geeignet	✓	ja (eingeschränkt)
09.02.2018	R108	geeignet	✓	ja (eingeschränkt)
08.01.2018	R008	geeignet	✓	ja
06.11.2017	R108	geeignet	✓	ja
30.10.2017	R008	geeignet	✓	ja
15.10.2017	R008	geeignet	✓	ja
23.08.2017	R108	geeignet	✓	ja
09.07.2017	R108	geeignet	✓	ja
02.06.2017	R008	geeignet	✓	ja (eingeschränkt)

3.1 Vergleich Messstationen

Für den Vergleich der Chlorophyllkonzentration zwischen den Messwerten aus den Dauermessstationen des WGMN und den Messwerten des Sentinel-2-Satelliten wurden, wie in Kapitel 2.2.1 dargestellt, für jede Messstation Messfelder in Form von Kreisen und Kacheln erstellt (Abbildung 8: Messfelder der Messstation Lombardsbrücke, Abbildung 9: Messfelder der Messstation Seemannshöft und Abbildung 10: Messfelder der Messstation Bunthaus). Aus diesen geometrischen Formen wurden in SNAP durch statische Auswertetools Mittelwerte, Abweichungen sowie Minima und Maxima gebildet, wovon die Mittelwerte mit den Werten aus den Messstationen (ENMO) tabellarisch und in Diagrammen verglichen wurden. Die drei Tabellen zu allen Messstationsvergleichen sind im Anhang zu finden. In allen Diagrammen sind sowohl lineare Trendlinien in Blau, als auch Abweichungsbereiche in Rot zur Orientierung eingezeichnet worden, um einen optischen Zusammenhang der Werte zu genießen. Es wurde in allen Diagrammen ein Abweichungsbereich von 30% der Trendlinien gewählt. Mit diesem Bereich kann abgeschätzt werden, wie viele Messwerte großen Abweichungen unterliegen. Abseits von den eingezeichneten Trendlinien und Abweichungsbereichen sind nach Vorgabe keine weiteren statistischen Auswertungen oder Plausibilitätsprüfungen vorgenommen worden.

Es war das Ziel der Bachelorarbeit erste Schritte der Auswertung vorzubereiten. Zu einem späteren Zeitpunkt soll an diese Ergebnisse in anderen Projekten angeknüpft werden. Die detaillierten statistischen Auswertungen sind dann Gegenstand dieser Projekte.

3.1.1 Vergleich Bunthaus

Für den Vergleich der Messstation Bunthaus sind acht Messwerte von den 22 angegebenen Überflügen in die Bewertung mit eingeflossen. An den anderen Terminen überflogen die Satelliten das Orbital R008 (siehe Abbildung 7: Sentinel-2-B-Aufnahme vom 23.05.2018), also das Orbital ohne die Abdeckung von Hamburgs Osten und somit liegen keine Messwerte für diesen Zeitraum vor. Ein weiterer Grund für fehlende Messwerte ist, dass bei zwei der 22 Überflügen das Chlorophyllmessgerät der Messstation in Wartung war und somit keine Vergleichsmesswerte liefern konnte. Daher liegen keine Werte für den Vergleich vor. Alle benutzten Messwerte sind im Tabellenabschnitt der Tabelle 3 dargestellt. Die gesamte Tabelle 3 ist im Anhang zu finden.

Messwerte, die im Konzentrationsbereich zwischen 0 und 70 µg/L liegen, weichen weniger von den Trendlinien ab, als die Wertepaare im Konzentrationsbereich von 70 bis 150 µg/L. Die Kreis- und Kachelmittelwerte der Messstation Bunthaus weisen geringe Unterschiede auf.

Tabelle 3: Messergebnisse an der Messstation Bunthaus (Abschnitt)

Bunthaus	09.07.2017	23.08.2017	06.11.2017	20.04.2018	05.05.2018	20.05.2018	04.07.2018	24.07.2018
Kreise	140,33	48,85	14,40	56,58	81,44	103,45	73,73	30,35
Kachel	136,11	49,78	16,01	56,38	83,77	101,03	75,89	31,44
ENMO	185,25	65,88	5,59	102,03	130,43	102,75	49,69	32,61

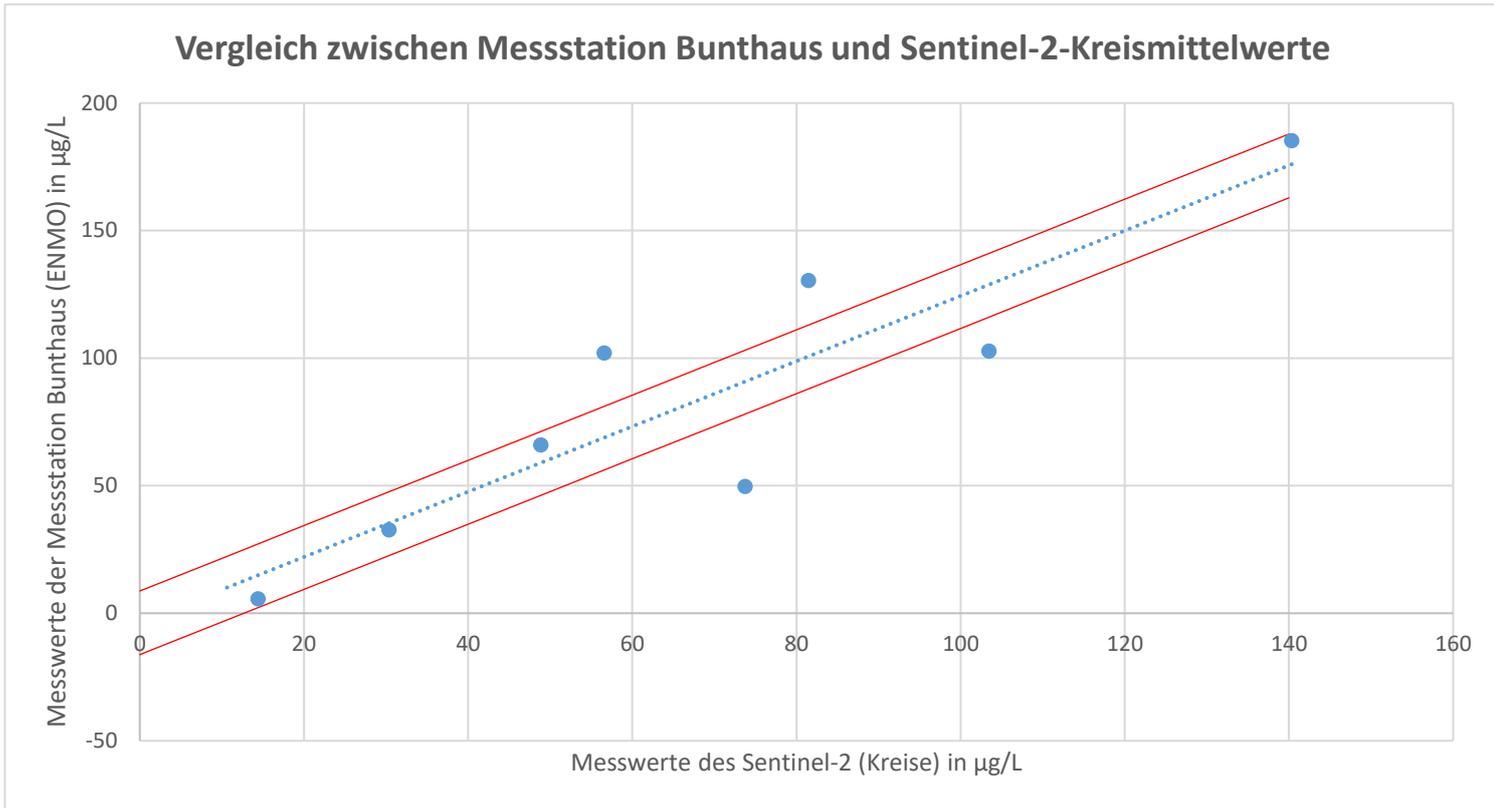


Abbildung 26: Vergleich der Kreismittelwerte des Sentinel-2 mit der Messstation Bunthaus

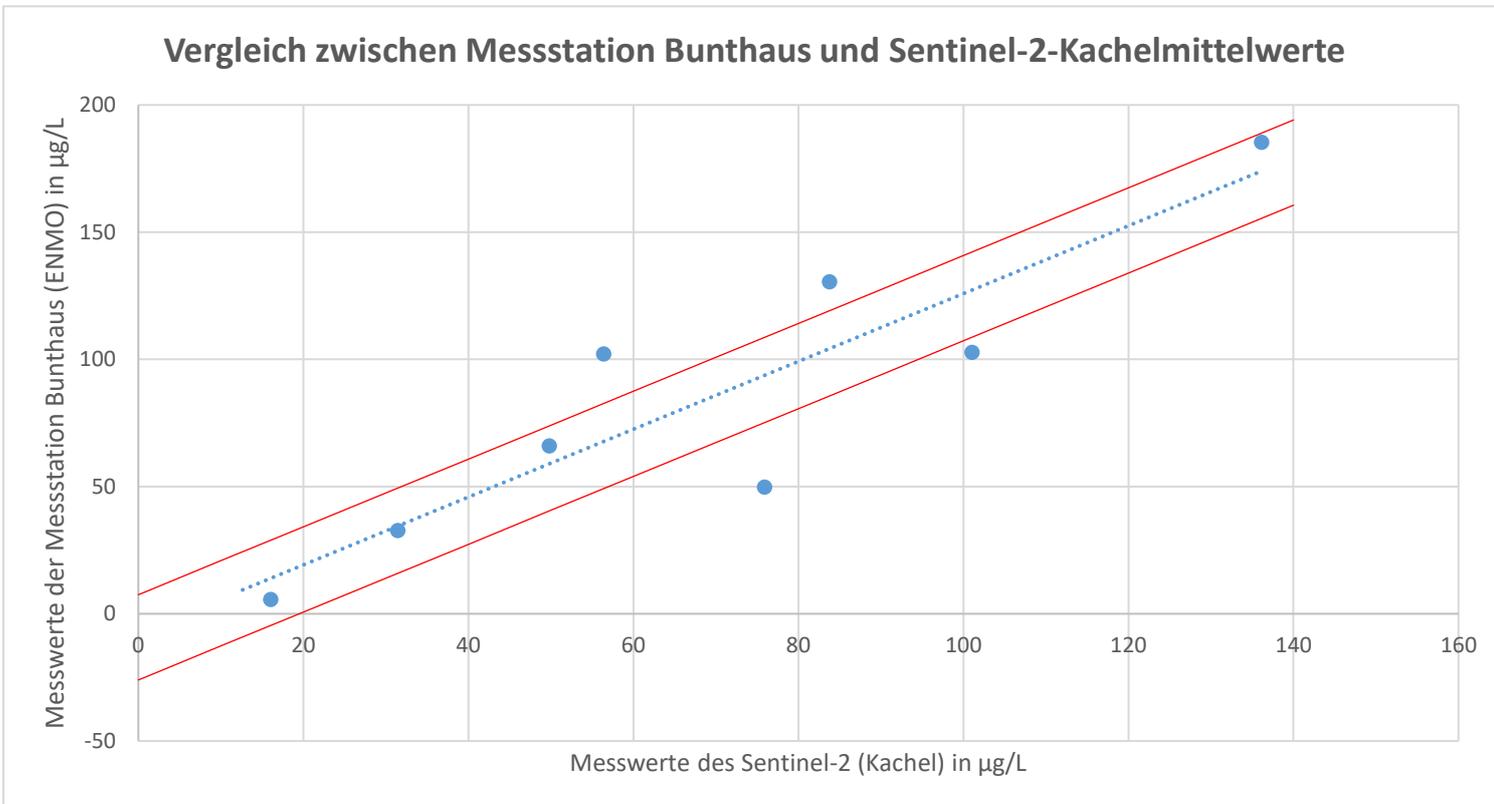


Abbildung 27: Vergleich der Kachelmittelwerte des Sentinel-2 mit der Messstation Bunthaus

3.1.2 Vergleich Lombardsbrücke

Ähnlich wie bei einigen Werten der Messstation Bunthaus, ist bei der Messung vom 02.06.2017 das Chlorophyllmessgerät der Station Lombardsbrücke in Wartung gewesen, weshalb der Messwert nicht zur Verfügung steht. Abbildung 26 zeigt, wie die prozessierten Satellitendaten vom 1.8.2018 für die Messstationen Lombardsbrücke und Seemannshöft in Kartenform dargestellt werden. Aus diesen wurden die Mittelwerte gebildet. Die Abbildung deutet die Inhomogenität der Chlorophyllverteilung in der Außenalster an. Trotz dieser Inhomogenität sind die Kreis- und Kachelmittelwerte bis auf geringfügige Unterschiede ebenfalls sehr ähnlich. Die Messwerte weisen im Konzentrationsbereich zwischen 0 und 10 $\mu\text{g/L}$ eine tendenziell höhere Abweichung gegenüber der Trendlinie, als in anderen Konzentrationsbereichen, auf. Trotzdem liegen mehr Werte innerhalb Abweichungsbereich, als außerhalb des Abweichungsbereiches.

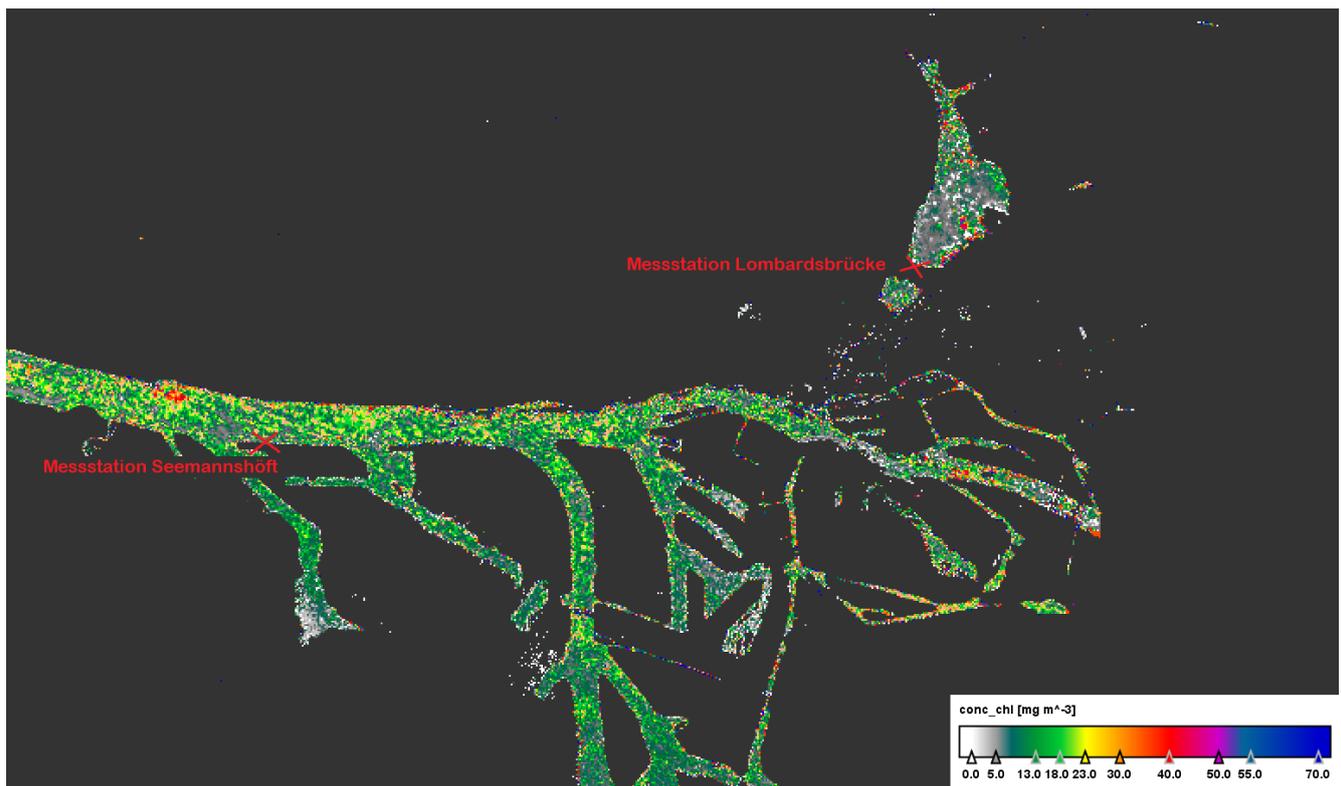


Abbildung 28: Prozessierter Satellitendatensatz vom 1.8.2018 in SNAP

Vergleich zwischen Messstation Lombardsbrücke und Sentinel-2- Kreismittelwerte

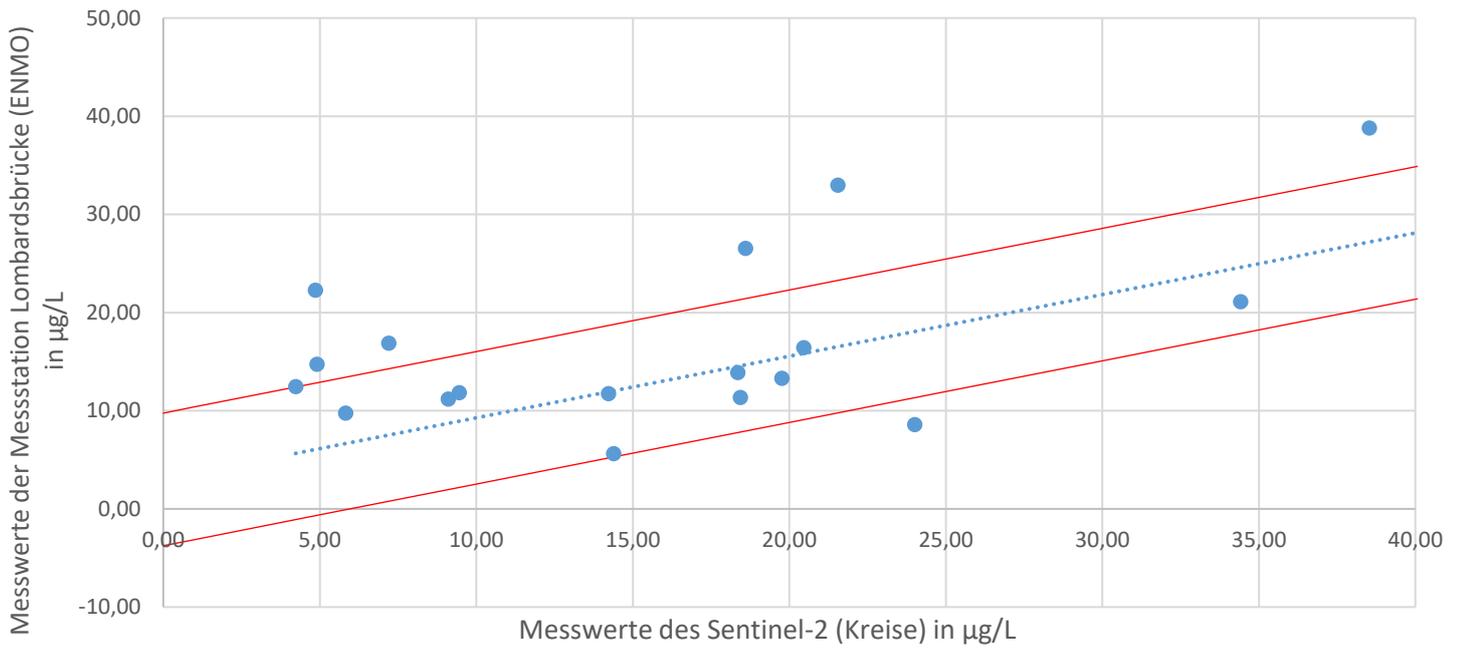


Abbildung 30: Vergleich der Kreismittelwerte des Sentinel-2 mit der Messstation Lombardsbrücke

Vergleich zwischen Messstation Lombardsbrücke und Sentinel-2- Kachelmittelwerte

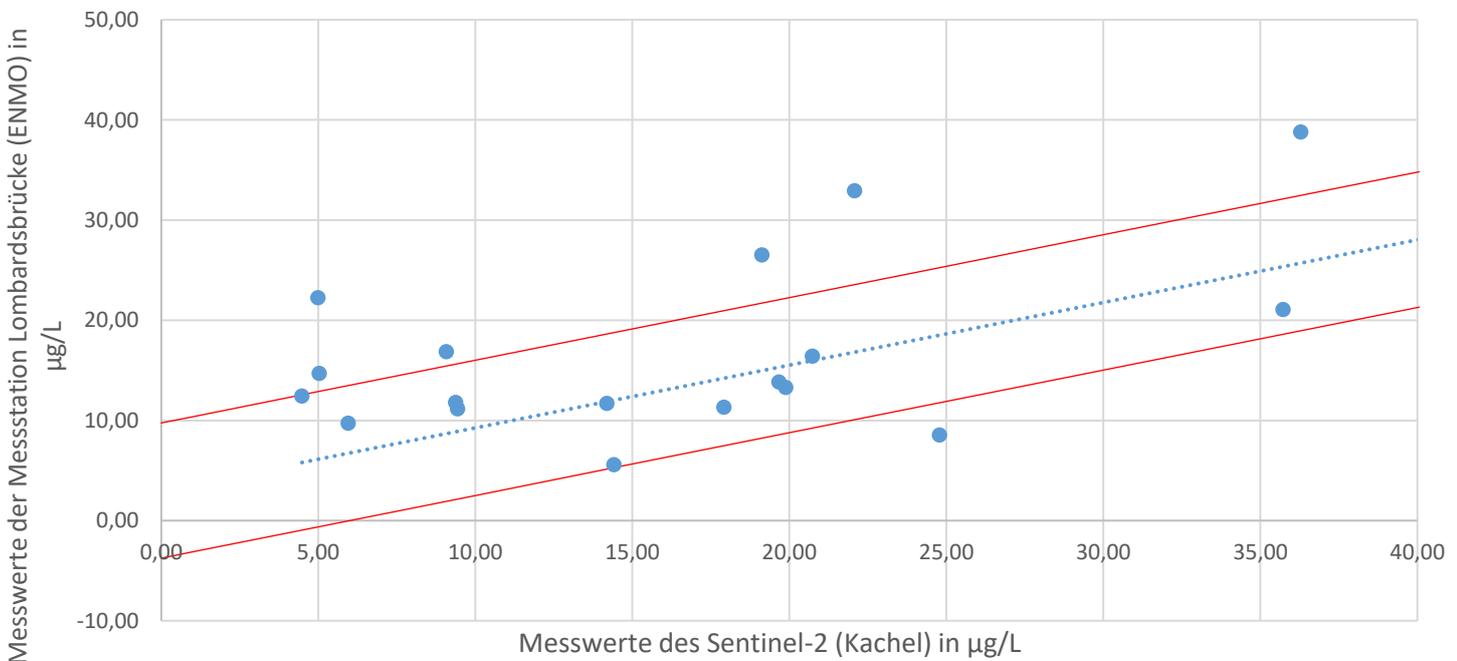


Abbildung 29: Vergleich der Kachelmittelwerte des Sentinel-2 mit der Messstation Lombardsbrücke

3.1.3 Vergleich Seemannshöft

Viele Messwerte der Messstation Seemannshöft sind im Konzentrationsbereich zwischen 0 und 10 µg/L. Diese müssen gesondert betrachtet werden, wie im folgenden Kapitel 4.1 beschrieben. Der ENMO-Messwert vom 19.03.2018 floss nicht in die Bewertung ein, da es sich offensichtlich um einen Messfehler handelt.

Im Gegensatz zu den anderen beiden Messstationen, liegen alle Messwerte der Station Seemannshöft im Konzentrationsbereich zwischen 0 und 30 µg/L Chlorophyll. Im Vergleich zur Messstation Lombardsbrücke scheinen die Vergleichswerte an der Station Seemannshöft in diesem niedrigerem Konzentrationsbereich weniger von der Trendlinie abzuweichen. Es liegen ebenfalls mehr Werte innerhalb Abweichungsbereich, als außerhalb des Abweichungsbereiches. Die Kreis- und Kachelmittelwerte der Messstation Bunthaus weisen ebenfalls nur geringe Unterschiede auf.

Vergleich zwischen Messstation Seemannshöft und Sentinel-2-Kreismittelwerte

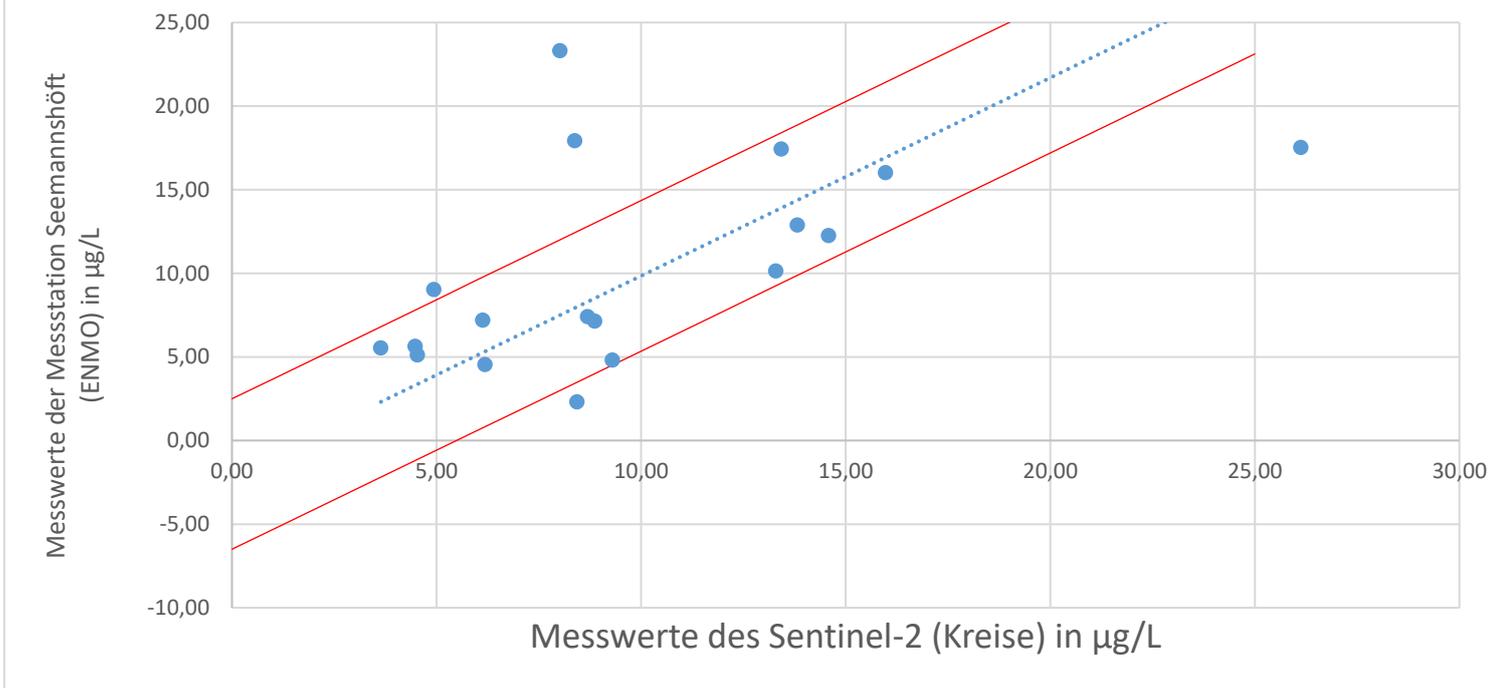


Abbildung 31: Vergleich der Kreismittelwerte des Sentinel-2 mit der Messstation Seemannshöft

Vergleich zwischen Messstation Seemannshöft und Sentinel-2-Kachelmittelwerte

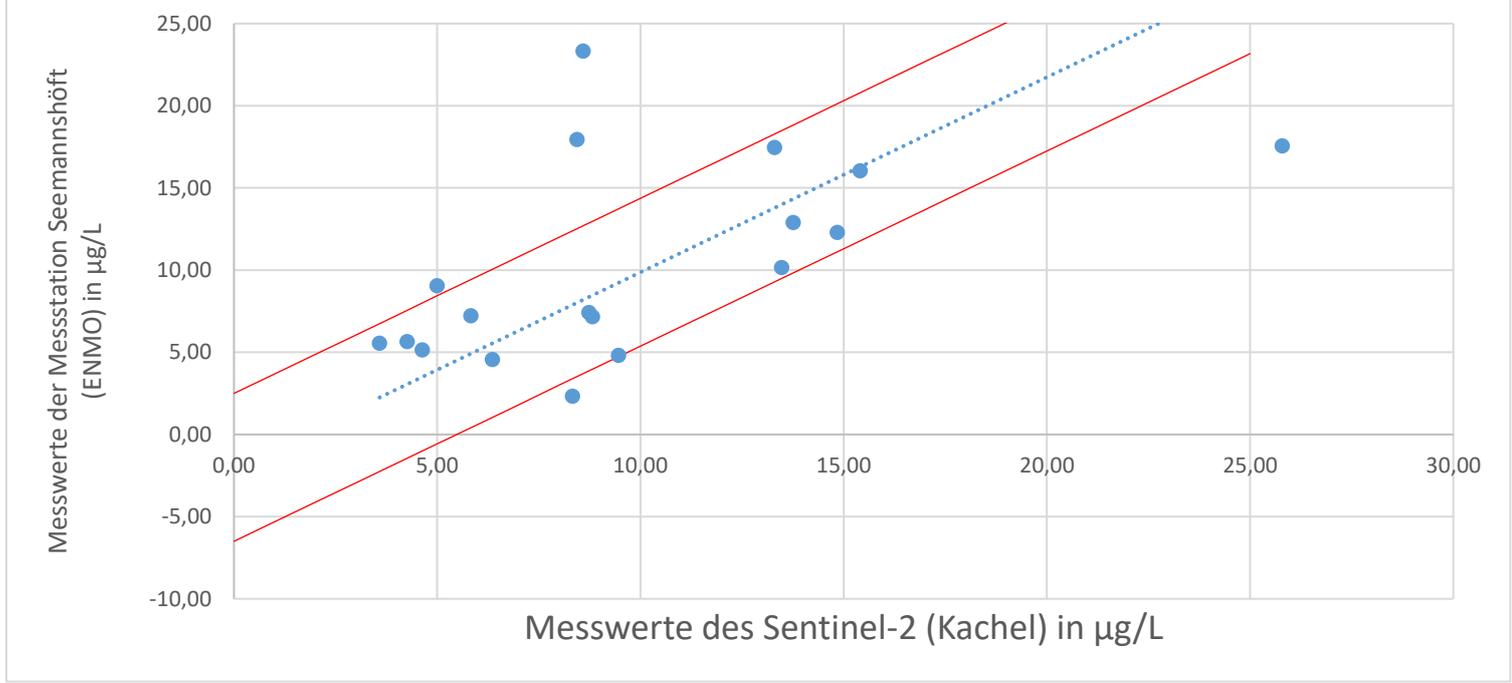


Abbildung 32: Vergleich der Kachelmittelwerte des Sentinel-2 mit der Messstation Seemannshöft

3.2 Vergleich Hafennessfahrt

Für den Vergleich der Hafennessfahrt mit den Satellitendaten wurden in SNAP für jede Messfläche der Messfahrt (s. Abbildung 3: Hafenprofil - Messpunkte 2018) eine identische Kachel in der Satellitenaufnahme des gleichen Tages erstellt. Beide Werte wurden verglichen und eine prozentuale Abweichung jedes Messwertes errechnet. Zur Veranschaulichung ist die Abweichung zwischen Messwert des Satelliten und der In-Situ-Messung in Abbildung 26 dargestellt. Eine Abweichung zwischen Null und 30 % ist Grün, eine Abweichung von 30 % bis 50 % Gelb und eine Abweichung über 50 % in Rot dargestellt. Die dazugehörige Tabelle 10 mit allen Messwerten ist dem Anhang zu entnehmen.



Abbildung 33: Vergleich der Hafennessfahrt am 4.7.2018 und Sentinel-2 mit farblich dargestellten Abweichungen

4. Diskussion

Im folgenden Kapitel wird auf alle Ergebnisse eingegangen und erläutert, welche Abweichungen der verschiedenen Messarten Einfluss auf die Ergebnisse nehmen können. Zum Schluss wird ein Ausblick gegeben, welche Möglichkeiten für das WGMN bestehen, um an diese Ergebnisse anzuknüpfen.

4.1 Beeinflussungen der Ergebnisse

Beim Vergleich zwischen den Messungen der Sentinel-2-Satelliten und den Messungen der Messstationen des WGMN finden sowohl innerhalb beider Messungen, als auch beim Vergleich zwischen den Ergebnissen Abweichungen und Beeinflussungen statt. So spielt zum Beispiel die zeitliche Differenz der Messungen bezüglich der Hafentour eine große Rolle. Die Satellitenaufnahme und somit auch die Satelliten-Messwerte haben um 10:30 Uhr stattgefunden. Die Messungen des WGMN auf dem Messschiff, haben jedoch zwischen 8:45 Uhr und 14:00 stattgefunden. Da Algen aber sehr empfindlich auf die Veränderung der Umgebungseinflüsse reagieren, verändern sich Messwerte teilweise über kurze Zeiträume deutlich.

Die Messungenauigkeiten der In-Situ- und der Sentinel-2 Messungen werden in den folgenden zwei Unterkapiteln betrachtet.

4.1.1 Messungenauigkeit In-Situ-Messungen

Für den Vergleich zwischen Satelliten- und In-Situ-Messungen sind alle Ergebnisse in der Einheit $\mu\text{g/L}$ angegeben. Die gemessenen Gesamtchlorophyllkonzentrationen mit den Messmethoden des WGMN in Hamburg liegen in der Größenordnung zwischen 0 und 200 $\mu\text{g/L}$. Bei Messwerten unter 10 $\mu\text{g/L}$ spielen die Abweichungen der In-Situ-Messungen, als auch die Abweichungen der Satellitenmessungen eine besonders große Rolle, weshalb diese Messwerte eingeschränkt zu bewerten sind.

Zusätzlich dazu führt ein weiteres Phänomen zu größeren Abweichungen: Algenkonzentrationen liegen nicht homogen verteilt im Gewässer vor, weshalb die stationäre Betrachtung an den Messstationen eine Momentaufnahme an der vorliegenden Messstation ist. Das Gleiche gilt für die Satellitenaufnahmen. Besonders an der Messstation Lombardsbrücke spielt dieses Phänomen eine große Rolle, da in der Außenalster Algen in Wolken verteilt über die Fläche auftreten. So kann es vorkommen, dass an einigen Teilen

der Außenalster sehr wenige Algen vorkommen und zur gleichen Zeit, in anderen Bereichen, eine hohe Konzentration auftritt, wie Abbildung 28 bestätigt.

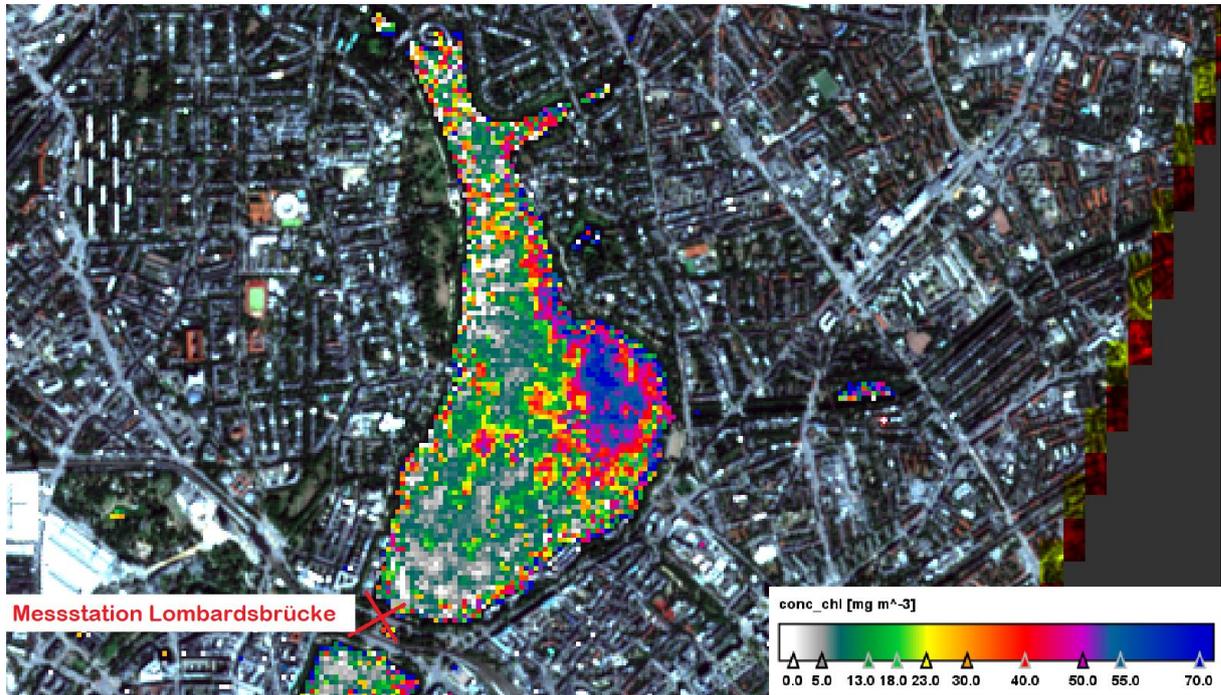


Abbildung 34: Sentinel-2 Aufnahme vom 8.6.2018 mit Chlorophyllkonzentration der Außenalster

Die In-Situ-Messungen des WGMN unterliegen ähnlich wie die Satellitenmesswerte ebenfalls relativ großen Abweichungen. Der AlgaeOnlineAnalyser, wie auch alle Algentoximeter des WGMN werden einmal im Jahr vom Hersteller mit laborkultivierten Algenkulturen neu kalibriert. Zusätzlich gleicht das WGMN einmal im Jahr alle ihre Messgeräte miteinander ab, wobei dort alle Algenklassen berücksichtigt werden und eine Fehlertoleranz von bis zu 30% eingehalten werden muss. Diese Abweichung und die Unterschiede zwischen den Messverfahren machen es schwierig zu definieren, welcher der verglichenen Messwerte genauer die wahre Chlorophyllkonzentration beschreibt.

4.1.2 Messungengenauigkeit Sentinel-2

Auch die Messungen via Satelliten unterliegen wie im Kapitel 2.3 schon angeschnitten großen Abweichungen. Sowohl Schattenwürfe, atmosphärische Verhältnisse, als auch die Bearbeitung in SNAP können große Einflüsse auf die prozessierten Daten haben und somit die Messwerte verändern. Da zur Vereinfachung alle Rohdaten mit den gleichen Einstellungen bearbeitet wurden, sind mit großer Wahrscheinlichkeit Abweichungen durch z.B. Luft- und Wassertemperatur, Trübung und Salinität des Gewässers aufgetreten.

Die Sentinels betrachten zudem wegen der Reflexion des Sonnenlichts ausschließlich die obersten Wasserschichten. Dies erfasst jedoch nicht alle Algenarten und Konzentrationen. Einige Algenarten, wie die Cyanobakterien (ugs. Blaualge), sind bevorzugt an der Oberfläche zu finden, jedoch sind andere Algenarten auch unterhalb der obersten Wasserschicht zu finden. Diese können von den Sentinel-2-Satelliten nicht ohne Abweichungen erfasst werden. Auch die Messungen des WGMN unterliegen ähnlichen Abweichungen, da die Probenahme für das Chlorophyllmessgerät in einem Meter Wassertiefe liegt und die Algenverteilung dort unterschiedlich zur Wasseroberfläche ist.

Allgemein ist beim Betrachten aller Datensätze der Sentinel-2 aufgefallen, dass Wasserflächen grundsätzlich immer erkannt werden. Fälschlicherweise werden jedoch in einigen Fällen beim Prozessieren in SNAP Wasserflächen erschaffen, welche ursprünglich keine Wasserflächen sind. Ebenfalls auffällig ist die Betrachtung von Wolkenschatten. Eigentlich sollten diese vom IdePix-Preprozessor herausgefiltert werden, jedoch tauchten in einigen Fällen trotzdem Messwerte unter den Wolken und Wolkenschatten auf.

4.2 Interpretation der Ergebnisse

Sowohl der Vergleich zwischen Messstationen und Sentinel-2, als auch der Vergleich zwischen Hafentourmessfahrt und Sentinel-2 sind weitestgehend positiv zu betrachten. Es sind viele Datensätze im gleichen Größenbereich, wie z.B. die Daten vom 20.05.2018 oder vom 09.07.2018. Hier liegen die Messwerte des Sentinel-2 und die Messungen der beiden Elbestationen nur wenige $\mu\text{g/L}$ auseinander. Einfacher zu veranschaulichen als der Vergleich der Zahlenwerte ist der Vergleich der Diagramme. In allen Diagrammen ist zu sehen, dass es einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen den Wertepaaren gibt. Zwar gibt es vereinzelt auch starke Abweichungen, jedoch ist in der Gesamtheit der Daten ein Zusammenhang zwischen In-Situ-Daten und Satellitendaten zu erkennen.

Ein ähnliches Bild zeigt sich beim Vergleich der Hafentourmessfahrt mit den Satellitendaten. Von 47 überprüften Kacheln, zeigen 30 Kacheln eine gute Übereinstimmung, zehn Kacheln eine mäßige Übereinstimmung und nur sieben Kacheln eine schlechte Übereinstimmung. In Anbetracht der zeitlichen Verschiebung über den gesamten Tag ist das Ergebnis sehr positiv zu bewerten. Obwohl bei einigen Messungen eine große zeitliche Differenz zwischen den Messungen der Hafentourmessfahrt und den des Satelliten stattgefunden hat, sind die Ergebnisse trotzdem zum Großteil im gleichen Größenbereich.

Auch der Vergleich zwischen Kreis- und Kachelmittelwerten zeigt, dass trotz willkürlicher Festlegung der geometrischen Formen, diese im Großen und Ganzen ähnliche Werte widerspiegeln. Somit ist es nicht zwingend nötig eine große Kachel, um die Fläche der Messstation zu ziehen, sondern es reichen auch willkürlich gewählte Kreise. Fraglich wird ein Vergleich zwischen Kreisen und Kacheln bloß in der Außenalster. Da ein Kreis die östliche Seite der Außenalster abdeckte, spielte die Inhomogenität der Algenkonzentrationen in diesem Fall keine größere Rolle. Falls jedoch dieser Kreis entfallen würde, könnte es zu sehr deutlichen Abweichungen zwischen den Kachelmittelwerten und den Kreismittelwerten kommen.

Im Kontrast zu den positiven Ergebnissen stehen unter anderem die Messdaten vom 19.03.2018, vom 08.04.2018 oder auch vom 13.05.2018, wo es sehr große Unterschiede zwischen Satelliten-Messungen und In-Situ-Messungen gibt. Hier waren die Messwerte der Messstationen mindestens doppelt so hoch, wie die Messwerte der Sentinels. Unter anderem sind die hohen Abweichungen der Satellitenmessung dem Schattenwurf, den atmosphärischen Verhältnissen oder der Prozessierung geschuldet.

4.3 Fazit

Mit der Betrachtung aller Ergebnisse fällt auf, dass die Mehrheit aller Messwerte übereinstimmen. Sowohl für die räumliche Verteilung von Chlorophylldaten, als auch für eine Aussage über die grobe Tendenz der Konzentrationen, sind die Sentinel-2 Datensätze geeignet. Alle Seen und Gewässer in und um Hamburg unterliegen, wie in Kapitel 4.1 beschriebenen, Abweichungen, jedoch stimmen die meisten der 22 Datensätze mit den Messungen der Messstationen des WGMN überein. Darüber hinaus haben Mitarbeiter des WGMN bestätigt, dass sowohl die Chlorophyllkonzentrationen des Elbverlaufs, sowie die Konzentrationen in den Seen in und um Hamburg von den Satelliten tendenziell richtig gemessen werden (Stelzer & Blohm, 2018).

Wie in der Zielsetzung beschrieben, sollten die Vergleichswerte eine Unterstützung für die Arbeit mit ENMO®hydro dienen und dem WGMN erste Erkenntnisse bezüglich Algenblüten oder ähnlichen natürlichen Ursachen liefern. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Datenauswertung der Aufnahmen des Sentinel-2 dafür geeignet ist, Änderungen des Chlorophyllgehaltes in Gewässern zu erfassen und diese als Kartenmaterial darzustellen, sodass ggf. andere Behörden damit weiterarbeiten können.

Ebenfalls ist durch die Auswertung der Messungen deutlich geworden, dass durch die verschiedenen Abweichungen eine genaue Übereinstimmung der In-Situ-Daten mit den Satellitendaten schwer zu erreichen ist. Diese Übereinstimmung und eine bessere Anpassung an Hamburger Gewässer ist ein Zukunftsprojekt des WGMN.

4.4 Zukunftsausblick

Die Ergebnisse und die Schlussfolgerungen des Vergleichs geben dem WGMN sehr viele Möglichkeiten sich dem Thema Fernerkundung in der Zukunft zu widmen. Da sowohl die Vergleichsdaten der Messstationen als auch die Vergleichsdaten der Hafennessfahrt mit den Satellitenmesswerten weitestgehend übereinstimmt, könnte an die Ergebnisse angeknüpft werden. Es könnten zum Beispiel genauere Fehleranalysen betrachtet werden, um genauere Übereinstimmungen zu schaffen. Ein Beispiel für Fehleranalysen sind die Algenklassen in den Gewässern. Es besteht die Möglichkeit, dass unterschiedliche Algenklassen die Reflektionen des Gewässers verändern und somit bei einer spezifischen Algenklassenzusammensetzung die Satellitenmessungen ungenauer werden lassen, als bei der Normalverteilung der Algen.

Eine weitere Zukunftsmöglichkeit für die Datensätze des Vergleichs ist die Anschlussnutzung des GIS-Systems vieler Hamburger Behörden. Durch die Kompatibilität, der aus SNAP generierten Datensätze und dem GIS-Kartensystem der Freien Hansestadt Hamburg, können die Datensätze sehr viele Anwendungsmöglichkeiten in vielen Monitoring-Projekten der Behörde für Umwelt und Energie finden. Dies gilt nicht nur für das Gewässermonitoring, sondern für alle Umweltkompartimente, da durch die gesamte Sentinel-Familie sowohl Boden, Vegetation als auch Luft und Atmosphäre durch Messungen abgedeckt werden.

Die vielfältigen Erkenntnisse der Zwischenergebnisse gaben dem WGMN die Möglichkeit im Zusammenhang einer Projektförderung des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt ein Projekt anzumelden, um somit Gelder über zwei Jahre zu beantragen. Diese Gelder werden in Kooperation mit zwei Firmen und dem WGMN genutzt, um sich mit diversen Fehlerquellen und Abweichungen zu beschäftigen und neue Überprüfungsverfahren zu entwickeln. Ziel des Projektes ist es auch, die Integration von Fernerkundungsmethoden in behördliche Arbeiten zur Überwachung und Management von Gewässern in Städten voranzutreiben, um somit einen Grundstein für das komplexe System Hamburger Hafen, als auch für andere Städte zu legen. Die Messung vieler Messgrößen, wie zum Beispiel

Algengruppenerkennung oder Wassertemperatur mit anschließender Kartierung ist durch das städtische Umfeld mit besonderen Anforderungen verbunden, welche in SNAP durch Anpassungen der Prozessoren zu besseren Ergebnissen führen können. Diese Anpassungen verbunden mit einem flüssigem Automatisierungsprozess und anschließendem weiterleiten an zuständige Behörden, würde einen großen Mehrwert für alle Beteiligten bieten. Dieses Projekt namens „City Water Watch“ wird Aspekte der vorliegenden Bachelorarbeit aufgreifen (Stelzer & Blohm, 2018).

5. Literaturverzeichnis

- Albertz, J. (2007). *Einführung in die Fernerkundung: Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern* (Bde. 3., aktualisierte und erw. Aufl.). Darmstadt, Hessen, Deutschland: WBG (Wissenschaftliche Buchgesellschaft). Abgerufen am 14. November 2018
- bbe Moldaenke GmbH. (2018). *AlgaeLabAnalyser (Chlorophyll)*. Abgerufen am 6. November 2018 von <https://www.bbe-moldaenke.de/de/produkte/chlorophyll/details/algaelabanalyser.html>
- Blohm, W. (28. November 2018). Abbildungen aus dem Intranet des Wassergütemessnetzes. Hamburg, Deutschland: WGMN. Abgerufen am 3. November 2018
- Blomesystem. (2018). (BLOMESYSTEM GmbH, Member of GUS Group) Abgerufen am 4. August 2018 von <https://blomesystem.com/produkte-services/enmohydro-umweltmonitoring> und Link für die Abbildung: http://res.cloudinary.com/feelgood-at-work-de/image/upload/c_pad,h_768,w_1280/v1412013443/herggd2kv8g5fwqoviw0.jpg
- Brockmann et al. (9. Mai 2016). EVOLUTION OF THE C2RCC NEURAL NETWORK FOR SENTINEL 2 AND 3 FOR THE RETRIEVAL OF OCEAN COLOUR PRODUCTS IN NORMAL AND EXTREME OPTICALLY COMPLEX WATERS. *Living Planet Symposium*, S. 54. Abgerufen am 6. November 2018 von https://web.brockmann-consult.de/wp-content/uploads/2017/11/sco1_12brockmann.pdf
- Bundesregierung. (13. September 2017). Die Copernicus Strategie der Bundesregierung. *Copernicus für Deutschland und Europa – Strategie und Handlungsfelder der Bundesregierung für eine erfolgreiche Umsetzung des europäischen Erdbeobachtungsprogramms*, 14. (B. f. Infrastruktur, Hrsg.) Berlin, Berlin, Deutschland. Abgerufen am 6. August 2018 von https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/170913_Copernicus_Strategie_der_Bundesregierung.pdf
- Copernicus. (2014). *Copernicus Open Access Hub*. (Europäische Kommission / Serco) Abgerufen am 22. November 2018 von Copernicus Scihub: Scihub.copernicus.eu

- Copernicus. (2018). *Copernicus - Europe's eyes on Earth*. (Europäische Kommission) Abgerufen am 20. November 2018 von <http://www.copernicus.eu/>
- Copernicus. (2018). *Themengebiete von Copernicus (Copernicus Services)*. Abgerufen am 2. November 2018 von Themengebiete von Copernicus (Copernicus Services): http://copernicus.eu/sites/default/files/documents/Copernicus_Programme_Services.pdf
- Copernicus Academy. (7. - 8.. Februar 2018). Grundlagen der Satellitenfernerkundung. *Vortrag für die Behörde für Schifffahrt und Hydrographie*, 49. Hamburg, Hamburg, Deutschland: Rienow, Andreas. Abgerufen am 6. November 2018
- Copernicus Atmosphere Monitoring Service. (2018). *Copernicus Atmosphere Monitoring Service*. (E. Union, Produzent) Abgerufen am 20. November 2018 von Copernicus Atmosphere Monitoring Website: <https://atmosphere.copernicus.eu/about-cams>
- Copernicus Climate Change Service. (2018). *Copernicus Climate Change Service*. Abgerufen am 18. November 2018 von Copernicus Climate Change Website: <https://climate.copernicus.eu/about-c3s>
- Copernicus Emergency Management Service. (2018). *Copernicus Emergency Management Service*. Abgerufen am 2. November 2018 von Copernicus Emergency Management Website: <http://emergency.copernicus.eu/>
- Copernicus In Situ Component. (2. November 2015). *Copernicus In Situ Component*. (Europäische Kommission) Abgerufen am 16. November 2018 von Copernicus In Situ Component Website: <http://insitu.copernicus.eu/> (Tabelle aus <https://insitu.copernicus.eu/observations>)
- Copernicus Land Monitoring Service. (21. August 2018). *Copernicus Land Monitoring Service*. (Europäische Union) Abgerufen am 18. November 2018 von Copernicus Land Monitoring Website: <https://land.copernicus.eu/>
- Copernicus Marine Environment Monitoring Service. (2018). *Copernicus Marine Environment Monitoring Service*. (E. Union, Produzent) Abgerufen am 22. November 2018 von Copernicus Marine Environment Monitoring Website: <http://marine.copernicus.eu/>
- Copernicus Security Service. (2018). *Copernicus Security Service*. Abgerufen am 18. November 2018 von Copernicus Website: <http://copernicus.eu/main/security>
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (10. Juli 2018). DLR Earth Observation Center. Köln, Deutschland. Abgerufen am 19. November 2018 von https://www.dlr.de/eoc/desktopdefault.aspx/tabid-5367/9013_read-16792/
- European Space Agency. (29. April 2014). Sentinel Familie. *Sentinel Family*. Abgerufen am 4. November 2018 von http://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2014/04/sentinel_family/14493549-1-eng-GB/Sentinel_family_node_full_image_2.jpg
- European Space Agency. (2018). Colour Vision For Copernicus. *Colour Vision For Copernicus*. Abgerufen am 8. November 2018 von

https://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2015/02/colour_vision_for_copernicus/15250391-1-eng-GB/Colour_vision_for_Copernicus_node_full_image_2.jpg

European Space Agency. (2018). *esa Sentinel Online*. Abgerufen am 15. November 2018 von Sentinel ESA Website: <https://sentinel.esa.int>

European Space Agency Deutschland. (2000-2018). Copernicus - Die Weltraumkomponente. *Copernicus - Die Weltraumkomponente*. Deutschland. Abgerufen am 30. Oktober 2018 von http://www.esa.int/ger/ESA_in_your_country/Germany/Copernicus_-_die_Weltraumkomponente & https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4

European Space Agency. (o.J.). *United Space in Europe - esa*. Abgerufen am 2018 von European Space Agency-Website: http://www.esa.int/ger/ESA_in_your_country/Germany/Copernicus_-_die_Weltraumkomponente

Institut für Hygiene und Umwelt. (März 2014). Landesinstitut für Lebensmittelsicherheit, Gesundheitsschutz und Umweltuntersuchungen. *Flyer, Stand März 2014*. Hamburg, Hamburg, Deutschland. Abgerufen am 4. August 2018

Institut für Hygiene und Umwelt. (2018). *Offizielles Stadtportal für Hamburg*. Abgerufen am 2018 von Hamburg.de: <https://www.hamburg.de/bgv/hafenmessfahrten/>

Norddeutscher Rundfunk. (31. Juli 2018). Wieder eine Tonne toter Fische abtransportiert. Hamburg, Hamburg, Deutschland. Abgerufen am 4. November 2018 von <https://www.ndr.de/nachrichten/hamburg/Wieder-eine-Tonne-toter-Fische-abtransportiert,fischsterben292.html>

S. Jutz and MP Milagro-Pérez. (6. November 2017). Copernicus Program. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, S. 42. doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.10317-3

Science Education through Earth Observation for High Schools (SEOS). (2008-2018). *SEOS Tutorials*. (P. c.-o. Dr. Rainer Reuter, Hrsg.) Abgerufen am 17. November 2018 von <http://www.seos-project.eu/modules/classification/classification-c01-p05.de.html> & Abbildungs URL: http://www.seos-project.eu/modules/classification/images/spectral_signatures_landsat_450-de.jpg

Stelzer, K., & Blohm, W. (Oktober/November 2018). Mündliche Quelle/ Mündliche Informationen. *Informationen zu Fernerkundungsdaten in Bezug auf behördliche Organisationen*. Hamburg, Geesthacht, Hamburg, Deutschland: Brockmann Consult GmbH, Institut für Hygiene und Umwelt der Behörde für Gesundheit und Verbraucherschutz Stadt Hamburg. Abgerufen am 8. November 2018

6. Anhang

Tabelle 1: In-Situ Themenfelder (Copernicus In Situ Component, 2015)

<p>Meteorologie</p> 	<p>Verwendung von Echtzeitdaten sowie Historische Daten</p> <p>Am Boden: In Wetterstationen zur Messung von Temperatur, Niederschlag, Wind, UV-Strahlung und diverse weitere Parameter.</p> <p>In der Atmosphäre: Temperaturen, Wind und Feuchtigkeit durch Wetterballons</p>
<p>Ozeanographie</p> 	<p>Physikalische Parameter: Von Messfahrten oder Bojen Temperatur, Salinität, Meeresspiegel, Strömungen, Eisbedeckung, Mischschichttiefe</p> <p>Biologische Parameter: Chlorophyll, gelöster Sauerstoff, Nährstoffe sowie viele weitere Parameter durch Messungen von Booten</p>
<p>Atmosphärische Zusammensetzung</p> 	<p>Daten gemessen über Sonden und Wetterballons: Konzentrationen von Luftschadstoffen wie beispielsweise Stickoxide, Feinstäube, Kohlenstoffmonoxid, Schwefeldioxid, Formaldehyd oder Benzol</p> <p>Gase in Verbindung mit dem Treibhauseffekt (Methan, Kohlenstoffdioxid und Stickstoffdioxid)</p>
<p>Terrestrisch</p> 	<p>Landbedeckung mit Vegetation, Leaf Area Index</p> <p>Schnee-, Eis- und Gletscherbetrachtung</p> <p>Biomasse über dem Erdboden</p> <p>Bodenfeuchtigkeit, Bodenkohlenstoffgehalt</p> <p>Grundwasser- und Gewässernutzung, Abwasserabläufe in Flüsse</p>

Tabelle 2: Relevante Datensätze für den Vergleich

Datum des Überfluges	Orbital	über Wolkenbelastung gefiltert	Manuell überprüft	Vergleichsdatensatz des WGMN vorhanden
06.08.2018	R008	geeignet	✓	ja
03.08.2018	R108	unsicher	wolkig	nicht geprüft
01.08.2018	R008	geeignet	✓	ja
29.07.2018	R108	unsicher	wolkig	nicht geprüft
27.07.2018	R008	geeignet	✓	ja
24.07.2018	R108	geeignet	✓	ja
22.07.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
19.07.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
17.07.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
14.07.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
12.07.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
09.07.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
07.07.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
04.07.2018	R108	geeignet	✓	ja
02.07.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
29.06.2018	R108	geeignet	✓	ja
27.06.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
24.06.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
22.06.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
19.06.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
17.06.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
14.06.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
12.06.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
09.06.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
07.06.2018	R008	geeignet	✓	ja
04.06.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
02.06.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
30.05.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
28.05.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
25.05.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
23.05.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
20.05.2018	R108	geeignet	✓	ja
18.05.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
15.05.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
13.05.2018	R008	geeignet	✓	ja

10.05.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
08.05.2018	R008	geeignet	✓	ja
05.05.2018	R108	geeignet	✓	ja
03.05.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
30.04.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
28.04.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
25.04.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
23.04.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
20.04.2018	R108	geeignet	✓	ja
18.04.2018	R008	geeignet	✓	ja
15.04.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
13.04.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
10.04.2018	R108	unsicher	wolkig	nicht geprüft
08.04.2018	R008	geeignet	✓	ja
05.04.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
03.04.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
31.03.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
29.03.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
26.03.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
24.03.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
21.03.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
19.03.2018	R008	geeignet	✓	ja
16.03.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
14.03.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
11.03.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
09.03.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
06.03.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
04.03.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
01.03.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
27.02.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
24.02.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
22.02.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
19.02.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
17.02.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
14.02.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
12.02.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
09.02.2018	R108	geeignet	✓	ja (eingeschränkt)
07.02.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
04.02.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
02.02.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
30.01.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
28.01.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
25.01.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
23.01.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft

20.01.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
18.01.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
15.01.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
13.01.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
10.01.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
08.01.2018	R008	geeignet	✓	ja
05.01.2018	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
03.01.2018	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
31.12.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
29.12.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
26.12.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
24.12.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
21.12.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
19.12.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
16.12.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
14.12.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
11.12.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
09.12.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
06.12.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
04.12.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
01.12.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
29.11.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
26.11.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
24.11.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
21.11.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
19.11.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
16.11.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
14.11.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
11.11.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
09.11.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
06.11.2017	R108	geeignet	✓	ja
04.11.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
01.11.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
30.10.2017	R008	geeignet	✓	ja
27.10.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
25.10.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
22.10.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
20.10.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
17.10.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
15.10.2017	R008	geeignet	✓	ja
12.10.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
10.10.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
07.10.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
05.10.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft

02.10.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
30.09.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
27.09.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
25.09.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
22.09.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
20.09.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
17.09.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
15.09.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
12.09.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
10.09.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
07.09.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
05.09.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
02.09.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
31.08.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
28.08.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
26.08.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
23.08.2017	R108	geeignet	✓	ja
21.08.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
18.08.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
16.08.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
13.08.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
11.08.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
08.08.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
06.08.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
03.08.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
01.08.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
29.07.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
27.07.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
24.07.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
22.07.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
19.07.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
17.07.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
14.07.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
12.07.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
09.07.2017	R108	geeignet	✓	ja
07.07.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
04.07.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
02.07.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
29.06.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
27.06.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
24.06.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
22.06.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
19.06.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
17.06.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft

22.02.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
19.02.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
17.02.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
14.02.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
12.02.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
09.02.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
07.02.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
04.02.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
02.02.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
30.01.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
28.01.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
25.01.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
23.01.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
20.01.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
18.01.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
15.01.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
13.01.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
10.01.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
08.01.2017	R008	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft
05.01.2017	R108	Hohe Wolkenbelastung	wolkig	nicht geprüft

Tabelle 3: Messergebnisse an der Messstation Lombardsbrücke im Vergleich mit Kreis- und Kachelmittelwerten des Sentinel-2

Lombardsbrücke	Kreise in µg/L	Kachel in µg/L	ENMO in µg/L
02.06.2017	40,48	39,56	-
09.07.2017	45,23	45,07	18,35
23.08.2017	9,11	9,44	11,17
15.10.2017	4,92	5,03	14,72
30.10.2017	14,22	14,19	11,72
06.11.2017	18,44	17,92	11,33
08.01.2018	9,46	9,37	11,81
09.02.2018	14,38	14,42	5,60
19.03.2018	4,23	4,48	12,45
08.04.2018	4,86	4,99	22,26
18.04.2018	5,83	5,95	9,74
20.04.2018	18,60	19,13	26,53
05.05.2018	18,36	19,67	13,86
08.05.2018	21,55	22,07	32,95
13.05.2018	5,10	5,32	65,79
20.05.2018	40,04	40,17	16,30
07.06.2018	34,42	35,73	21,08
04.07.2018	24,00	24,78	8,56
24.07.2018	38,53	36,29	38,80
27.07.2018	20,46	20,74	16,42
01.08.2018	7,20	9,08	16,88
06.08.2018	19,77	19,88	13,29

Tabelle 4: Messergebnisse der Messstationen Seemannshöft und Bunthaus im Vergleich mit Kreis- und Kachelmittelwerten des Sentinel-2

Seemannshöft	Kreise in µg/L	Kachel in µg/L	ENMO in µg/L
02.06.2017	6,18	6,36	4,56
09.07.2017	47,18	47,13	43,87
23.08.2017	8,38	8,44	17,95
15.10.2017	4,48	4,26	5,65
30.10.2017	3,64	3,58	5,55
06.11.2017	9,30	9,46	4,82
08.01.2018	8,43	8,33	2,32
09.02.2018	4,54	4,64	5,14
19.03.2018	9,22	9,03	49,68
08.04.2018	11,33	11,07	25,53
18.04.2018	4,94	5,00	9,04
20.04.2018	6,13	5,83	7,21
05.05.2018	13,29	13,48	10,16
08.05.2018	14,59	14,85	12,28
13.05.2018	7,35	6,63	26,58
20.05.2018	8,69	8,74	7,42
07.06.2018	8,87	8,82	7,16
04.07.2018	26,13	25,79	17,55
24.07.2018	8,01	8,59	23,33
27.07.2018	13,82	13,76	12,90
01.08.2018	15,97	15,41	16,04
06.08.2018	13,43	13,30	17,45

Bunthaus	Kreise in µg/L	Kachel in µg/L	ENMO in µg/L
02.06.2017	-	-	57,30
09.07.2017	140,33	136,11	185,25
23.08.2017	48,85	49,78	65,88
15.10.2017	-	-	4,45
30.10.2017	-	-	10,39
06.11.2017	14,40	16,01	5,59
08.01.2018	-	-	5,00
09.02.2018	10,61	12,63	-
19.03.2018	-	-	-
08.04.2018	-	-	111,31
18.04.2018	-	-	93,61
20.04.2018	56,58	56,38	102,03
05.05.2018	81,44	83,77	130,43
08.05.2018	-	-	154,33
13.05.2018	-	-	170,44
20.05.2018	103,45	101,03	102,75
07.06.2018	-	-	26,96
04.07.2018	73,73	75,89	49,69
24.07.2018	30,35	31,44	32,61
27.07.2018	-	-	69,71
01.08.2018	-	-	39,02
06.08.2018	-	-	52,23

Tabelle 5: Vergleich der Chlorophyllmittelwerte der Hafennessfahrt am 7.5.2018 mit den Sentinel-2 Mittelwerten

Hafenness- fahrtskachel	Mittelwerte des Sentinel-2 in µg/L	Mittelwerte der Hafennessfahrt in µg/L	Abweichung in %
1	27,07	20,51	32
2	27,67	19,75	40
3	25,45	22,5	13
4	31,86	24,17	32
5	30,74	26,95	14
6	35,20	27,68	27
7	37,57	31,4	20
8	32,65	30,5	7
9	43,12	31,5	37
10	50,06	34,75	44
11	57,84	37,72	53
12	66,78	39,12	71
13	68,89	43,2	59
15	63,65	43,59	46
16	65,17	41,58	57
17	58,64	54,92	7
18	57,69	64,65	-11
19	77,42	54,2	43
20	73,51	48,89	50
21	72,60	40,6	79
22	61,62	37,49	64
23	54,54	33,36	63
24	46,39	33,04	40
25	38,32	46,68	-18
26	29,25	39,26	-25
27	28,11	27,74	1
28	30,04	21,22	42
29	27,57	21,26	30
30	27,17	28,46	-5
31	28,78	25,225	14
32	27,04	24,25	12
33	24,26	23,35	4
34	21,58	22,53	-4
35	20,15	22,11	-9
36	17,36	20,83	-17
37	20,90	20,76	1
38	27,78	22,27	25
39	26,72	22,46	19
40	24,71	22,59	9
41	27,20	32,795	-17
42	42,90	45,3	-5
43	23,98	24,89	-4
44	23,45	20,46	15
45	22,02	20,11	9
59	24,64	21,91	12
66	30,32	28,765	5
67	33,58	28,13	19