

Sachbericht

MESSREIHE WAKENITZ, KRÄHEN- UND MÜHLENTEICH 2023

BERICHT LABOR FÜR ÖKOLOGIE (AG REINTJES)

Verfassende: Christian Lohaus, Stina Krings, Norbert Reintjes
Version: 1.0
Stand: 2023-12-08

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Auftrag	4
1.1	Rückblick und Anlass	4
1.2	Auftrag	5
1.2.1	Arbeiten im Rahmen des Angebotes (AG Reintjes)	5
2	Herangehensweise, Methoden und Materialien	7
2.1	Monitoring	7
2.2	Fluorometer - BBE AlgaeTorch	9
2.3	Dokumentation und Messwertaufbereitung	9
2.3.1	Messprotokolle physikalische Parameter und Chlorophyll	9
2.3.2	Masterdateien physikalische Parameter und Chlorophyll	9
2.3.3	Verwendete Softwarepakete - Masterdateien, Visualisierung und statistische Kennwerte Chlorophyll	10
3	Ergebnisse	11
3.1	Messreihe 2023	11
3.2	Chlorophyll-Messungen	11
3.2.1	Gesamtchlorophyll	13
3.2.2	Cyanochlorophyll	15
3.2.3	Chlorophyll Zusammenfassung	16
3.3	Biomasse- und Chlorophyllabschätzung aus Nährstoffverfügbarkeit	18
4	Diskussion	20
4.1	Probenahme und Genauigkeit der Verortung	20
4.2	Chlorophyll	22
4.2.1	Kleiner See	22
4.2.2	Gewässerstruktur und Dynamik	22
4.2.3	Literatur, Einordnung und weiterführende Informationen	24
5	Zusammenfassung	26
6	Quellen/Literatur	28
7	Anhang	30

Danksagung

Die Arbeitsgruppe um Prof. Dr. Norbert Reintjes (Labor für Ökologie) möchte sich im Rahmen des vorliegenden Sachberichtes bei der Unteren Wasserbehörde (UWB) sowie der Lübeck Port Authority (LPA) für die Diskussionsbeiträge und nicht zuletzt praktische und technische Unterstützung bedanken. Insbesondere durch die Bereitstellung der Infrastruktur der LPA war es überhaupt erst möglich, die vorliegenden Ergebnisse der Messkampagne zu erzeugen.

1 Einführung und Auftrag

Im Folgenden wird zunächst ein Rückblick über bereits erfolgte Projekte und Aktivitäten der Stadt Lübeck und der Technischen Hochschule Lübeck (THL) geliefert. Anschließend wird auf den vorliegenden Auftrag und die Arbeiten im Jahr 2023 durch das Labor für Ökologie eingegangen.

1.1 Rückblick und Anlass

Seit 2021 werden am Mühlenteich, am Krähenteich und an der Wakenitz Untersuchungen zur Wasserqualität durchgeführt, um die Ursachen und Quellen der episodisch in den Sommermonaten auftretenden Sauerstoffarmut in diesen Gewässern zu verstehen und mögliche Gegenmaßnahmen zu entwickeln.

Die Untersuchungen der Wasserqualität der Wakenitz in den Jahren 2021 (Külls 2021) und 2022 (Külls 2023) haben bereits einige wesentliche Merkmale der Dynamik von Sauerstoffkonzentrationen, pH-Werten und Nährstoffkonzentrationen in der Wakenitz und im Krähen- und Mühlenteich zeigen können. Ab 2021 sind zwei Messgeräte zur Messung der Sauerstoffsättigung und Temperatur installiert und es werden regelmäßige Kampagnen zur Messung der Gewässergüteparameter durchgeführt. Es zeigte sich, dass einige Fragen (siehe Bericht AG Külls) bislang nicht geklärt werden konnten. Offene Fragestellungen bezüglich biologischer Aspekte bezogen sich auf

- Chlorophyllkonzentrationen differenziert nach Gesamt- und Cyanochlorophyll als Indikatoren für den trophischen Status
- Bedeutung und Rolle von Algen im Gewässersystem

Im Jahr 2023 wurde in Zusammenarbeit mit der Stadt Lübeck, repräsentiert durch die Untere Wasserbehörde (UWB), angestrengt weitere Messungen vorzunehmen. Zur Berücksichtigung biologischer Parameter ist in den Austausch Prof. Dr. Norbert Reintjes mit einbezogen worden, dessen Arbeitsgruppe im Rahmen des **AQUATOR-Projektes** in 2022 Chlorophyllkonzentrationen für Mühlen- und Krähenteich bestimmt hat. Chlorophyll stellt einen wichtigen Parameter für die Einschätzung des Gewässerzustandes dar und wird im Rahmen der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) neben chemischen Parametern als biologischer Indikator erfasst. Hierbei werden Chlorophyll-a-Werte für die Bestimmung des Trophiezustandes sowohl bei Seen (Phyto-See-Index) als auch für Fließgewässer (Gesamtindex Phytoplankton) herangezogen (LAWA-AO 2016; Mischke u. a. 2017; Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes

Schleswig-Holstein (LLUR SH) 2021). Weiterführende Informationen zur Methodik werden unter anderem unter [gewaesser-bewertung.de](https://www.gewaesser-bewertung.de) bereitgestellt, wo auch ein Methodenüberblick bezogen werden kann (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz o. J.). Für die Erfassung von Chlorophyllwerten steht der AG Reintjes ein mobil einsetzbares Fluoremeter (BBE AlgaeTorch) zur Verfügung, das in entsprechenden Untersuchungen zur Dynamik der Entwicklungen von Algen insbesondere über die Sommerperiode eingesetzt werden kann.

Der Austausch zwischen UWB und THL führte zu einer Beauftragung der THL für die Untersuchung der Wasserkörper Lübecks im Jahr 2023, bei dem hydrologische sowie chemische Messungen der AG Külls durch biologische Kennwerte der AG Reintjes ergänzt werden sollten. Die durchzuführenden Arbeiten sowie erklärten Ziele der Untersuchungen sind im Kapitel Auftrag aufgeführt.

1.2 Auftrag

Die Stadt Lübeck ist bemüht und sehr daran interessiert, die Gewässerqualität der Wakenitz zu verbessern, deren zeitliche Entwicklung und die räumliche Verteilung der Nährstoffquellen und weiterer Parameter der Wasserqualität zu verstehen, um damit kurz-, mittel- und langfristige Handlungsmöglichkeiten zur Verbesserung der Wasserqualität entwickeln zu können und um eine Stabilisierung des Gewässersystems zu erreichen.

Das Labor für Hydrologie (Prof. Dr. C. Külls) der Technischen Hochschule Lübeck ist mit hydrometrischen Instrumenten zur Messung der Wasserströme und mit einem hydrochemischen Labor ausgestattet, mit dem sowohl Parameter der Wasserqualität vor Ort mit Sensoren gemessen, als auch Parameter der Wasserqualität im Labor bestimmt werden können.

Das Labor für Ökologie (Prof. Reintjes) ermöglicht die Messung gewässerökologischer Parameter, insbesondere zur Quantifizierung der Konzentration an Mikroalgen in Gewässern.

Der Auftrag (Nr. 3.390.03.30.14.2 vom 12.05.23) umfasst ein Programm zur begleitenden wissenschaftlichen Untersuchung der Wasserqualität in Wakenitz, Mühlen- und Krähenteich während des Sommers 2023. Die im Auftrag der AG Reintjes klar zuzuordnenden Ziele sind, das Auftreten von Algen durch Messungen zu untersuchen und deren Rolle besser zu verstehen.

1.2.1 Arbeiten im Rahmen des Angebotes (AG Reintjes)

Auf Basis des vorliegenden Vertrages und der zuvor beschriebenen Inhalte wurden folgende Arbeiten durch die AG Reintjes vorgenommen

- Arbeiten zu Messungen der Wasserqualität in der Wakenitz, im Krähenteich und im Mühlenteich

- beginnend mit dem 15.05.2023 und 14 täglicher Beprobung an 11 Terminen
- Ermittlung von Chlorophyllkonzentrationen als Summenparameter an 23 Messstellen (siehe Karte in Abbildung 2.1)
 - Gesamtchlorophyll
 - Cyanochlorophyll
- Probenahme an 18 Messstellen für wasseranalytische Messungen
 - Übermittlung der Proben zur Analytik an das Labor für Hydrologie der AG Külls
- Messung an 23 Messstellen der vor-Ort-Parameter Temperatur, elektrische Leitfähigkeit, Sauerstoffsättigung und pH mittels einer Hana Sonde (siehe Karte in Abbildung 2.1).
 - Übermittlung der Daten zur weiteren Auswertung und Integration an die AG Külls
- Zusammenfassung und Auswertung der Chlorophyllmessungen
- Vorstellung der Zwischenergebnisse zu Chlorophyllmessungen als PowerPoint in einem Workshop.
- Bereitstellung der erzeugten Chlorophylldaten
- Erstellung einer Präsentation sowie Sachberichts zu den vorliegenden Chlorophyllmesswerten

Die Befahrung und Beprobung erfolgte mittels Boot der Lübeck Port Authority (LPA). Die LPA stellt sowohl Material als auch Personal zum Bootsführen. Für die Sicherheit an Bord hatte das Personal der TH den Anweisungen der LPA-Mitarbeitenden Folge zu leisten.

2 Herangehensweise, Methoden und Materialien

Zunächst wird auf das durchzuführende Monitoring der Lübecker Stadtgewässer im Rahmen der Messkampagne 2023 eingegangen. Anschließend sind das von der AG Reintjes verwendete Messgerät sowie die Arbeiten zur Dokumentation, Aufbereitung der Messdaten und genutzte Software beschrieben.

2.1 Monitoring

Die Messreihe zur Chlorophyllmessung in den Stadtgewässern Lübecks im Sommer 2023 ist im Zeitraum vom 17.05. bis zum 04.10. in zweiwöchigen Intervallen mit resultierenden 11 Messterminen geplant worden.

Durch die UWB und LPA wurde am 31.03.2023 ein Vorschlag für das Messnetz und zu untersuchende Messpunkte (MP) eingebracht. Die MP in der von der LPA vorgeschlagenen Nummerierung sowie die spätere angepasste Nummerierung sind in der Abbildung 2.1 dargestellt. Eine Umnummerierung erfolgte, um den stromabwärts verlaufenden Charakter zu verdeutlichen. Die folgenden MP-Bezeichnungen beziehen sich immer auf diese Nummerierung (MP-Nr.).

Gemäß der vereinbarten Ziele sollten stromabwärts Messpunkte insbesondere vor und hinter Zuläufen in die Wakenitz berücksichtigt werden. Dies betrifft die Zuläufe Schattiner Graben (MP-Nr. 1, 2), Grönau (MP-Nr. 3, 4), Lüdersdorfer Graben (MP-Nr. 5, 6), Herrenburger Landgraben (MP-Nr. 7, 8), Nienmarker Landgraben (MP-Nr. 9, 10) zusätzlich sollte besonderes Augenmerk auf das Areal um die Eisenbahnbrücke sowie Kleiner See gelegt (MP-Nr. 11, 12 und 13) werden.

Chlorophyllmessungen sollten an sämtlichen Messpunkten durchgeführt werden, während Probenahmen für weiterführende Laboranalysen an allen Messpunkten außer den MP-Nr. 21, 22 sowie 23 durchgeführt werden sollten.

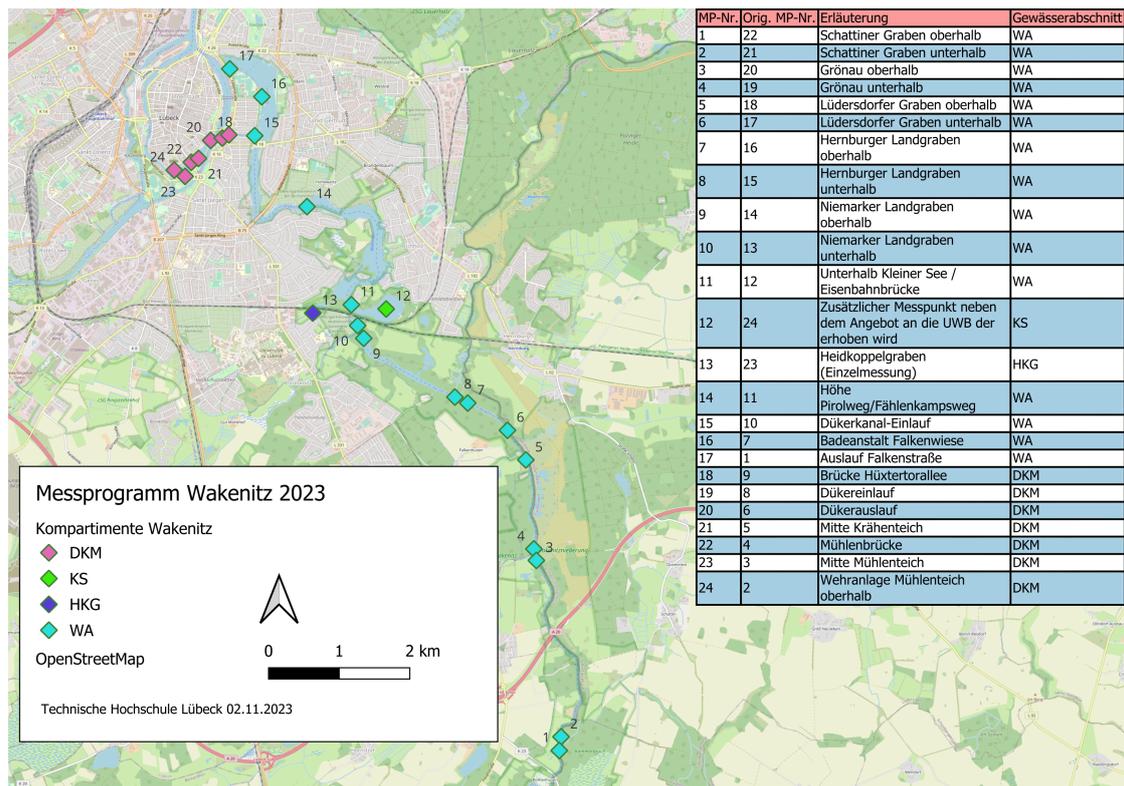


Abbildung 2.1: Übersicht über das geplante Messnetz in Absprache mit der Unteren Wasserbehörde Lübeck zu Beginn der Messkampagne 2023. Dargestellt sind die nach UWB zugordneten Messpunkte (MP) sowie die für die spätere Auswertung genutzten MP-Nr., die ebenfalls in der Kartenansicht eingetragen sind

2.2 Fluorometer - BBE AlgaeTorch

Die folgenden Informationen sind bbe Moldaenke GmbH (2020) entnommen. Bei der BBE AlgaeTorch handelt es sich um ein Fluorometer, das mittels der Anregung der Fluoreszenz einen Rückschluss auf den Chlorophyllgehalt *in-situ* innerhalb eines Gewässers ermöglicht. Das Gerät verfügt hierzu über 7 LEDs die Licht bei spezifischen Wellenlängen emittieren und diese Anregung hervorrufen. Zusätzlich werden durch das Messgerät ein Trübungswert in Form von Formazin Trübungseinheiten (FTU) als auch GPS Koordinaten festgehalten.

Bei der Messdatenerfassung werden die Messwerte in einer Datenbank gespeichert. Eine weiterführende Nutzung der Daten kann über den Export in ASCII- und/oder Excel-Dateien erfolgen.

2.3 Dokumentation und Messwertaufbereitung

Im Folgenden wird auf die Dokumentation während der Messungen eingegangen sowie Aspekte der weiterführenden Messdatenaufbereitung. Bei der Verarbeitung der Messdaten kamen insbesondere MS Office Excel sowie Skripte in den Programmiersprachen R und Python zur Anwendung.

2.3.1 Messprotokolle physikalische Parameter und Chlorophyll

Messprotokolle wurden während der Messtermine zunächst zusätzlich zu den digital erfassten Werten händisch durch das Messteam erstellt. Diese Originale wurden als Bilder für die Dokumentation abgelegt. Anschließend diente Excel zur Digitalisierung der erfassten Messprotokolle.

2.3.2 Masterdateien physikalische Parameter und Chlorophyll

Für die Zusammenführung der Messdaten zu physikalischen Parametern sowie Chlorophyllwerte in jeweils eine Gesamtdatei wurde ein R-Skript erstellt. Hieraus resultierten zwei Masterdateien in denen die Messwerte für die gesamte Messkampagne zusammengeführt wurden.

Dafür wurden die Chlorophyllmessungen aus dem Speicher der Algae-Torch extrahiert und in Excel überführt. Anschließend erfolgte die Messdatenauswahl in Abstimmung mit den Messprotokollen durch Mitarbeitende des Feldmessteams und bei Bedarf wurden Kommentare ergänzt. Die weitere Zusammenführung zu einer Masterdatei erfolgte mittels des in R zusammengestellten Skriptes. Der Masterdatensatz der Chlorophyllwerte wurde anschließend durch die Mitarbeitenden der AG-Reintjes nochmals auf Plausibilität geprüft.

Für die Messungen der physikalischen Parameter wurden die durch das Hanna-Messgerät erfassten Dateien mittels eines R-Skriptes zusammengeführt. Anschließend erfolgte die Zuordnung der Messpunkte über ein weiteres R-Skript, das die MP-Nr. auf Basis der Geokoordinaten automatisiert zuordnete, soweit möglich. Einzelne Messpunkte, die nicht über die Automatisierung zugewiesen werden konnten, wurden als Einzelergänzungen im R-Skript hinterlegt. Der Masterdatensatz der physikalischen Parameter wurde durch das Gesamtteam auf Plausibilität geprüft.

2.3.3 Verwendete Softwarepakete - Masterdateien, Visualisierung und statistische Kennwerte Chlorophyll

Die Erstellung der Masterdateien, Visualisierungen und Ermittlung statistischer Kennwerte der Chlorophyllwerte erfolgte unter Nutzung der Softwarepakete

- R, Version 4.3.0
- Python, Version 3.*
- pandas, Version 1.5.*
- matplotlib, Version 3.7.*
- seaborn, Version 0.12.*

mit Hilfe der Bibliotheken pandas und seaborn erfolgte insbesondere die Bestimmung statistischer Kennwerte, wie bspw. Minimum, Maximum, Median und Perzentile sowie Mittelwerte unter Verwendung der Chlorophyllmasterdatei.

3 Ergebnisse

Im Rahmen der Ergebnisvorstellung wird zunächst auf die Durchführung der Messreihe 2023 und das Untersuchungsgebiet eingegangen. Anschließend erfolgt die Darstellung der Ergebnisse der AG Reintjes zu den vorgenommenen Chlorophyllmessungen sowie Chlorophyllabschätzungen auf Basis von Literaturinformationen.

3.1 Messreihe 2023

Die von der UWB vorgelegten Messpunkte (MPs) (in der Karte Abbildung 3.1 als Orig.MP-Nr. angegeben) wurden nach besten Möglichkeiten angefahren. Die MP-Nr. 1 bis 17 wurden mit einem Boot der Lübeck Port Authority (LPA) beprobt, während die MP-Nr. 18 bis 24 mit dem Fahrrad angefahren wurden. Der MP-Nr. 13 im Heidkoppelgraben konnte nicht, wie ursprünglich vorgesehen, mitten im Verlauf des Grabens gemessen werden, da der Graben nicht mit dem Boot der LPA erreichbar war. Daher wurde im Auslauf des Heidkoppelgrabens gemessen. Die MP-Nr. 21 und 23 Mitte Krähenteich und Mitte Mühlenteich konnten ebenfalls nicht in der Mitte der Teiche gemessen werden, da ohne Boot vom Ufer gemessen werden musste.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass für die Beprobung zur Wasserqualität in der Wakenitz, im Krähen und Mühlenteich die Messkampagne fast vollständig gemäß geplantem Auftrag durchgeführt werden konnte und umfasste 11 Messtermine im angesetzten Beprobungszeitraum. Eine ausführliche Darstellung der Messwerte selbst erfolgt für eine bessere Übersichtlichkeit in den folgenden Kapiteln. Auf einzelne fehlende Messwerte, bspw. am Messtermin 2 (31.05.2023) wird im Detail unter Kapitel 4.1 eingegangen.

3.2 Chlorophyll-Messungen

Im folgenden werden die Ergebnisse der Gesamtchlorophyll- und Cyanochlorophyllwerte im Hinblick auf die Maximal-, Minimal- und Median-Werte, sowie Unterschiede entlang des Stromverlaufs und der Saison beschrieben. Die abgebildeten Werte sind in der Regel Einzelmessungen mit wenigen Ausnahmen an einzelnen Messpunkten an denen Mehrfachmessungen durchgeführt wurden. Für Letztere wurden für die weitere Betrachtung Mittelwerte gebildet. Zusätzlich wird eine Abschätzung von Biomasse- und Chlorophyllwerten, unter Berücksichtigung von gemessenen Nährstoffkonzentrationen für Nitrat durch die AG Külls, auf Basis von Literaturdaten vorgenommen.

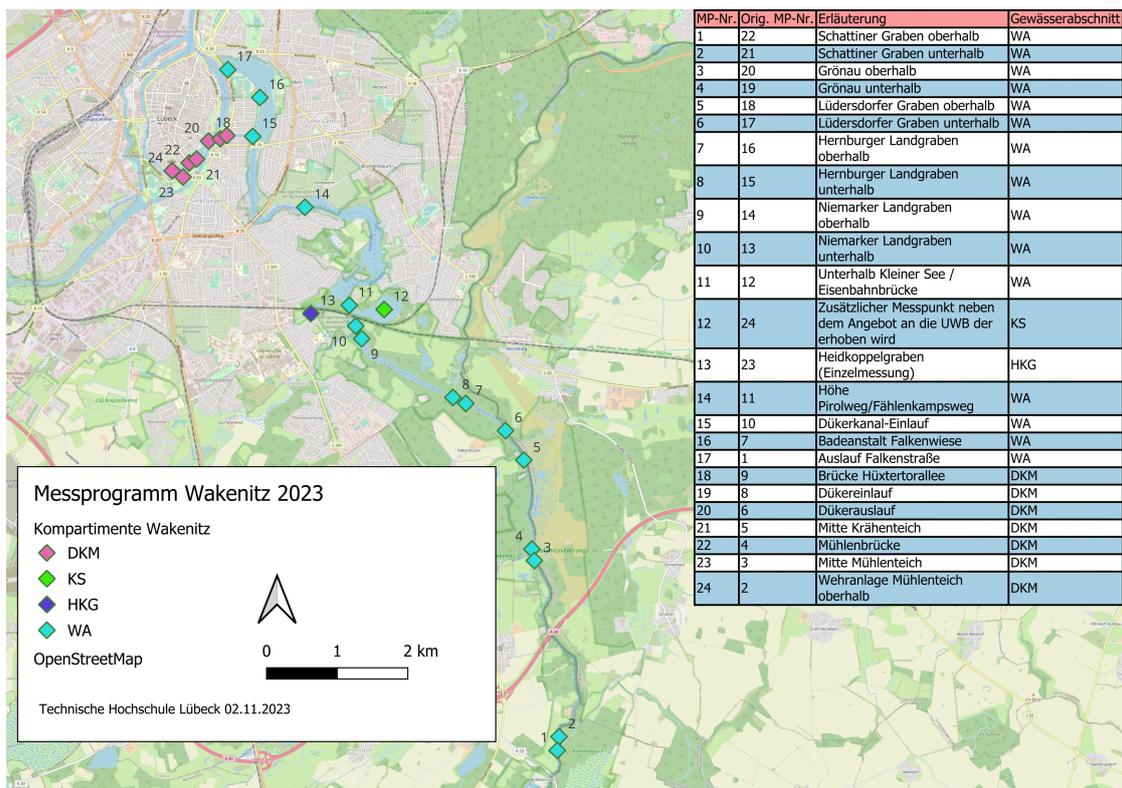


Abbildung 3.1: Übersicht über das Messnetz der Messkampagne 2023

3.2.1 Gesamtchlorophyll

Die Chlorophyllmessungen zeigen sowohl eine saisonale Veränderung als auch eine Veränderung entlang des Verlaufs der MP-Nr. Die niedrigsten Gesamtchlorophyllwerte von $0,1 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ wurden am 14.06.2023 am MP-Nr. 1 (Schattiner Graben oberhalb) und am 23.08.2023 am MP-Nr. 3 (Grönau oberhalb) gemessen. Der höchste Gesamtchlorophyllwert von $206,5 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ wurde am 26.07.2023 an MP-Nr. 16 (Badeanstalt Falkenwiese) gemessen. Der Median der Gesamtchlorophyllwerte über alle Messpunkte und den gesamten Messzeitraum liegt bei $16,6 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$.

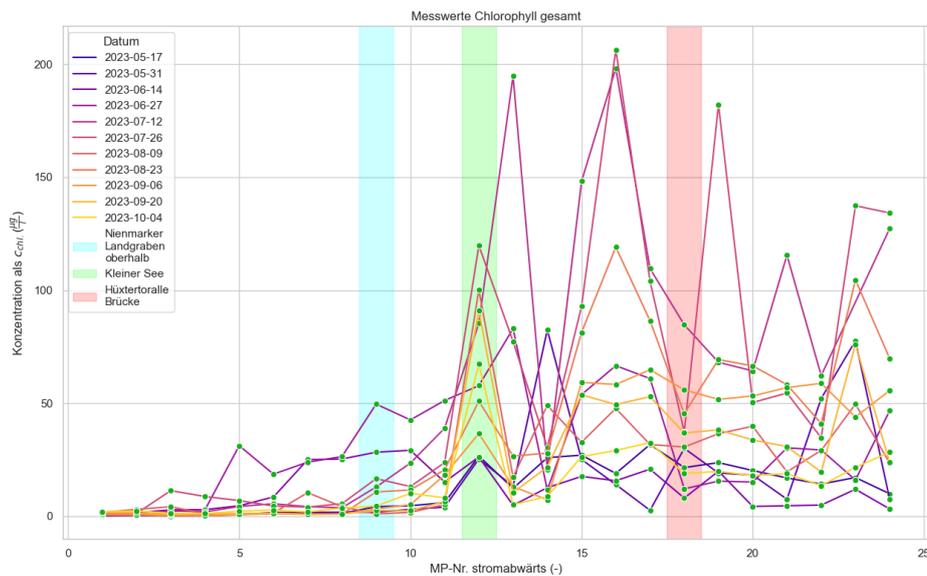


Abbildung 3.2: Gesamtchlorophyllmessungen

Es ist zu erkennen, dass an allen Messterminen die Gesamtchl.-Werte im oberen Verlauf der Wakenitz (bis MP-Nr. 10, unterhalb Nienmarker Landgraben) unter $50 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ liegen. Danach ergibt sich ein heterogeneres Bild.

Der MP-Nr. 12 (Kleiner See) zeigt bei allen Messterminen eine deutliche Erhöhung im Vergleich zu den davor liegenden Messpunkte. Bei fast allen Messterminen zeigen die Werte im Kleinen See eine deutlich höhere Chlorophyllkonzentration. Im Juli und August zeigen auch die Werte am MP-Nr. 16 (Falkenwiese) eine Erhöhung.

Im oberen Verlauf der Wakenitz bis MP-Nr. 8 (Hernburger Landgraben unterhalb) sind die Werte für Gesamtchlorophyll unter $12 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$, mit Ausnahme der Termine im Juni, wo die Werte am 14.06.2023 an MP-Nr. 7-8 über $25 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ liegen und am 27.06.2023 schon ab MP-Nr. 5

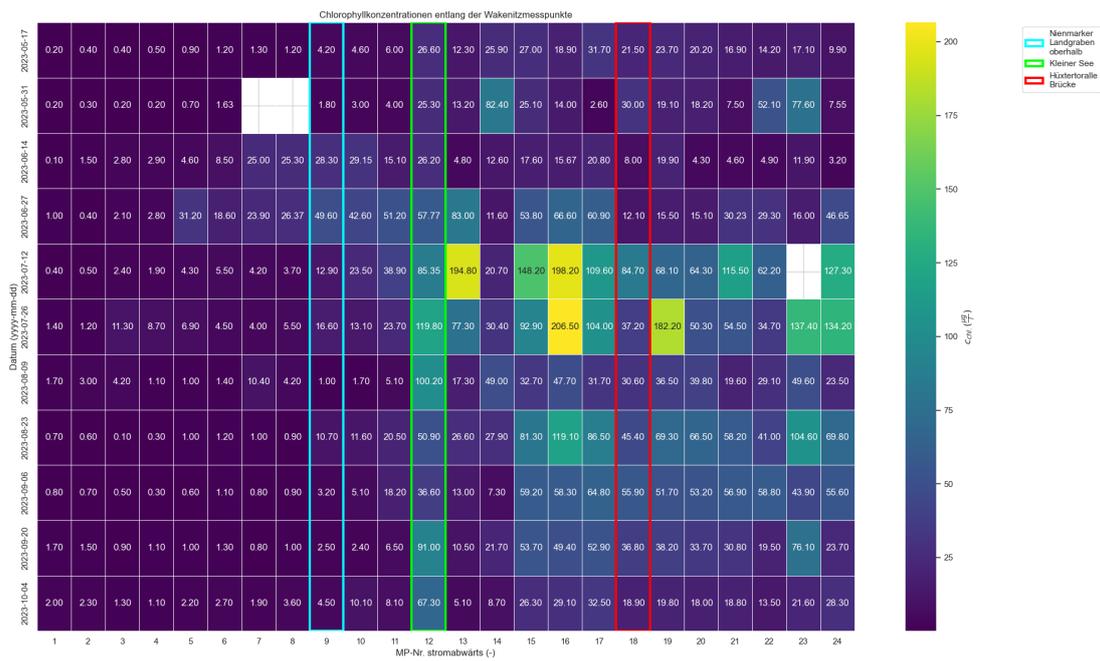


Abbildung 3.3: Die Abbildung zeigt die Gesamtchlorophyllkonzentrationen im Zeitverlauf der Messtermine (y-Achse) und Verlauf der Wakenitz (x-Achse) als Heatmap. Die Messpunkte (MP-Nr.) sind im Stromverlauf nummeriert.

(Lüdersdorfer Graben oberhalb). An den Messterminen im Juni sind die Konzentrationen bereits ab MP-Nr. 5 oberhalb des Lüdersdorfer Grabens höher als an den anderen Messterminen.

Außerdem fallen die Messwerte an den Terminen im Juli auf, da diese ab dem Kleinen See höhere Chlorophyllkonzentrationen haben. Werte an MP- Nr. 23-24 (Mühlenteich) liegen höher als an den folgenden MP-Nr. 20-22 (Krähenteich) .

3.2.2 Cyanochlorophyll

Die Cyanochlorophyll-Konzentration ist ebenfalls als Diagramm (Abbildung 3.4) und als Heatmap (Abbildung 3.5) dargestellt. Auch hier sind Veränderungen entlang des Verlaufs der Wakenitz und über den Zeitraum erkennbar. Die Cyanochlorophyll-Konzentration stellt einen Großteil der Gesamtchlorophyll-Konzentration dar.

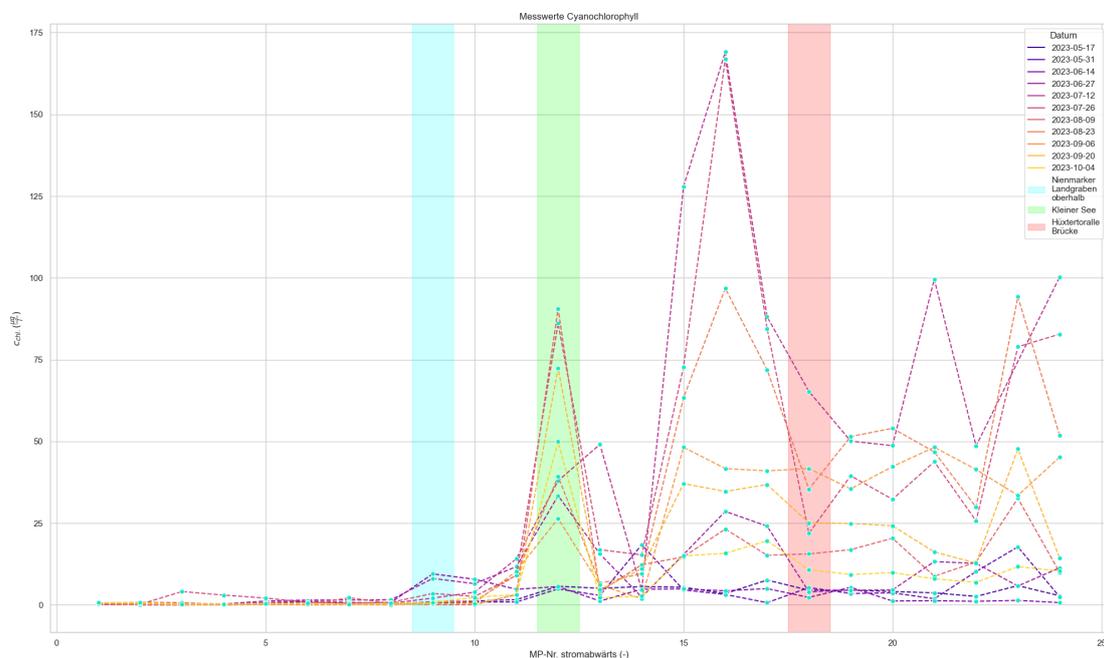


Abbildung 3.4: Darstellung der Messungen zu Cyanochlorophyll entlang der Wakenitz als Liniendiagramm

Der höchste Cyanochlorophyll-Wert von $169.1 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ wurde am 12.07.2023 an MP-Nr. 16 (Badeanstalt Falkenwiese) gemessen. Auch der zweithöchste Wert wurde ebenfalls im Juli an dieser Stelle gemessen. Die geringsten Werte von $0.0 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ wurden am 23.08.2023 an MP-Nr. 8, 6, 4 und 3, am 09.08.2023 ebenfalls am MP-Nr. 4 und am 27.06.2023 an MP-Nr. 2 und 3 gemessen. Somit liegen alle niedrigen Cyanochlorophyll-Werte vor dem Zulauf des Nienmarker Landgrabens.

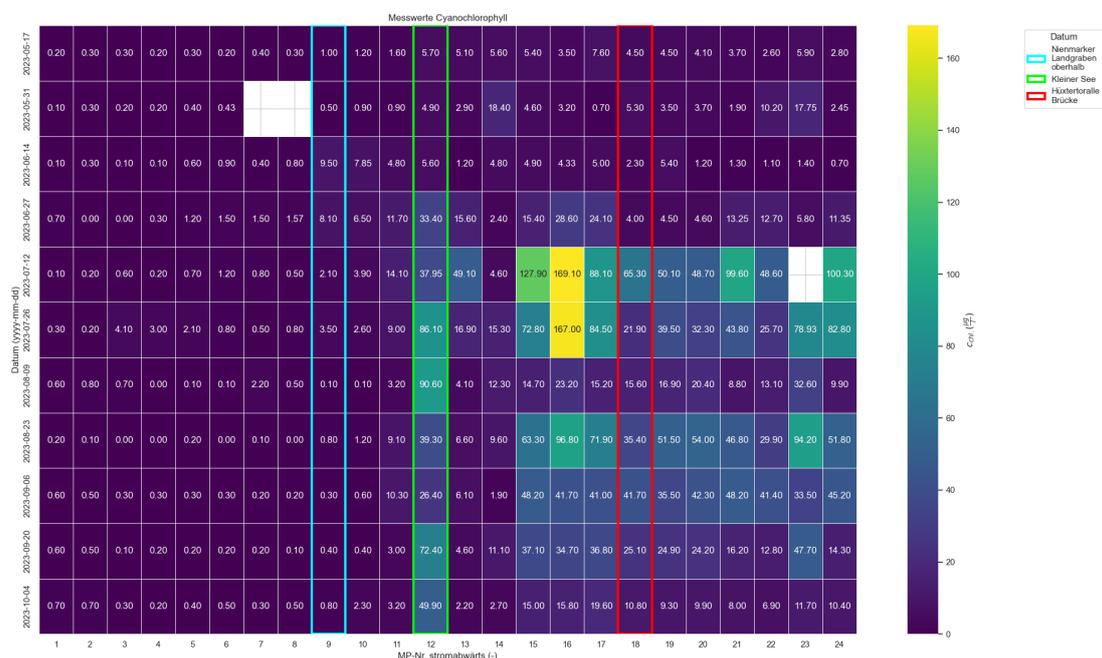


Abbildung 3.5: Darstellung der Messungen zu Cyanochlorophyll in der Wakenitz als Heatmap über den gesamten Messzeitraum

Wie bereits bei den Gesamtchlorophyllkonzentrationen ist wieder ein Peak bei den Werten im Kleinen See über den gesamten Zeitraum zu erkennen. Außerdem sind auch hier die Werte unterhalb der Eisenbahnbrücke ab dem Messtermin 27.06. erhöht. Der Median der Cyanochlorophyll-Werte beträgt $4,1 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$. Im Mai und Juni sind die Cyanochlorophyll-Werte noch relativ gering. Im Juli steigen diese dann, gefolgt von dem ersten Messtermin im August, der wieder relativ niedrig erscheint, woraufhin die Messtermine am 23.08.2023 und im September nochmal etwas höhere Werte aufweisen.

3.2.3 Chlorophyll Zusammenfassung

Die Abbildung 3.6 fasst die Messwerte über die gesamte Messkampagne in Form von Boxplots zur Darstellung der Percentile zusammen. Hierbei werden sowohl Gesamtchlorophyll (Chl. gesamt) als auch Cyanochlorophyll (Chl. cyano) visualisiert. Die Werte für Median und Interquartilabstand (IQD) sind im Anhang in Tabelle 7.1 zusätzlich aufgelistet.

MP-Nr. 12 (Kleiner See), MP-Nr. 15 (Dükerkanal Einlauf) und MP-Nr.17 (Auslauf Falkenstraße) zeigen die höchsten Medianwerte des Gesamtchlorophylls mit über $50 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$. Für Cyanochlorophyll sind die höchsten Medianwerte an den MP-Nr. 12 und 16 (Badeanstalt Falkenwiese) festzustellen und liegen über $25 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$. Cyanochlorophyll ist bei der

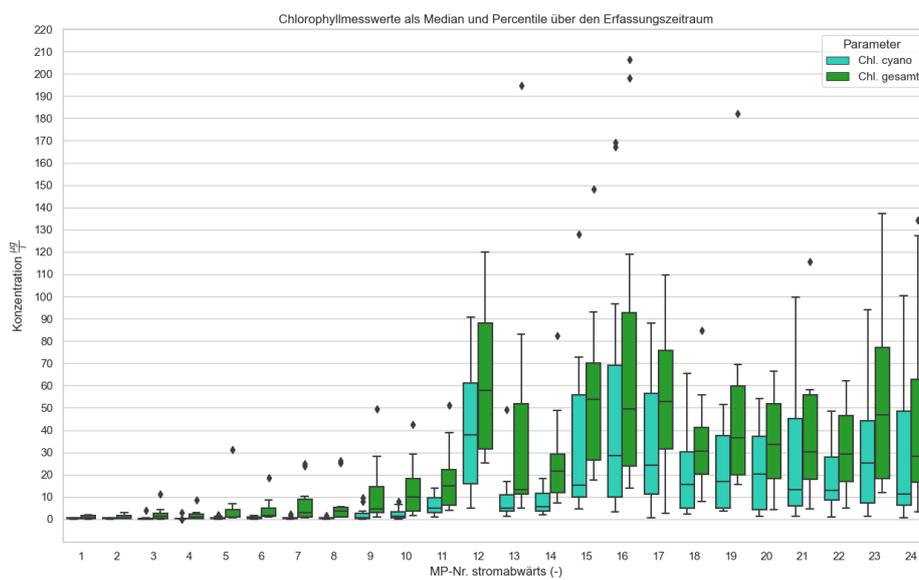


Abbildung 3.6: Dargestellt sind die Chlorophyllmesswerte Gesamtchlorophyll (Chl. gesamt) sowie Cyanochlorophyll (Chl. cyano) als Boxplots für den gesamten Erfassungszeitraum.

Quantifizierung von Gesamtchlorophyll enthalten. Folglich liegen die Cyanochlorophyllwerte unterhalb denen des jeweiligen Gesamtchlorophylls.

Mit Ausnahme von MP-Nr. 12 (Kleiner See) liegen die Konzentrationen im Median für Gesamt- und Cyanochlorophyll bis Messpunkt 14 jeweils unter $22 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ sowie $6 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$. Insbesondere für die Cyanochlorophyllkonzentrationen zeigt sich, dass im Anschluss an Messpunkt 14 die Mediankonzentrationen über $12 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ liegen und die Konzentrationen im oberen Gewässerverlauf mit mehr als der doppelten Konzentration überschreiten.

Mit Bezug zur Streuung der Messwerte lassen sich die meisten als rechtsschief (right-skewed) oder annähernd normalverteilt betrachten, wobei Cyanochlorophyll eine häufigere und stärkere Rechtsschiefheit aufweist.

Im oberen Verlauf der Wakenitz bis MP-Nr. 11, und an MP-Nr. 14 (Höhe Pirolweg) ist die Streuung der Werte geringer als an den anderen Messpunkten. Ab einschließlich MP-Nr. 12, mit Ausnahme von MP-Nr. 14, und MP-Nr.18, beträgt der Quartilabstand für Gesamtchlorophyll mehr als das Doppelte im Vergleich zum oberen Gewässerverlauf. Für Cyanochlorophyll zeigt sich ein mehr als dreifach so großer Quartilabstand, mit Ausnahme der MP-Nr. 13 und 14. An MP-Nr. 13 (Heidkoppelgraben) weist der Boxplot für Gesamtchlorophyll einen um ein Vielfaches höheren Interquartilabstand auf, als die Messwerte für Cyanochlorophyll.

3.3 Biomasse- und Chlorophyllabschätzung aus Nährstoffverfügbarkeit

Im Folgenden erfolgt eine überschlägige und idealisierte Abschätzung der potentiellen Biomasse- sowie Chlorophyllentwicklung aus den Nährstoffdaten. Dies dient der Plausibilitätsprüfung bzgl. der Algenmassen, die sich auf Basis der Nährstoffdaten einstellen können. Der im System auf Basis der Messwerte angenommene limitierende Nährstoff ist Stickstoff. Dies bedeutet, dass Algen in dem Maße wachsen, wie der erforderliche Stickstoff vorliegt.

Unter Zugrundelegung eines bestimmten Verhältnisses der Atome in Algen (Redfield-Verhältnis) und der Annahme der vollständigen Umsetzung des verfügbaren Stickstoffs, lässt sich auf Basis der stöchiometrischen Verhältnisse errechnen, dass aus 1 kg Stickstoff ca. 15,8 kg Algen gebildet werden können. Im Nitrat (NO_3^-) hat N aufgrund der Molmassen einen Massenanteil von ca. 22,6%. Daher kann aus 1 kg NO_3^- ca. 3,57 kg Algen produziert werden.

Nimmt man eine Nitratkonzentration von $c_{\text{NO}_3^-} = 0,75 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ an, wie sie im oberen Gewässerverlauf der Wakenitz festgestellt wurde, ergibt sich eine maximal produzierbare Algenbiomasse von ca. 2,68 mg/l. In der Literatur sind unterschiedliche Überschlagswerte sowie Berechnungsgrundlagen für die Beziehung zwischen Algenbiomasse und Chlorophyll zu finden. Die Angaben variieren von 0,1 – 9,7% der Feuchtmasse (Nicholls und Dillon 1978). Somit liegt die Spanne der zu erwartenden Chlorophyllkonzentrationen von 0,00268 bis $0,259 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$.

Unter der Verwendung einer weiteren Methode zur Abschätzung von Chlorophyllkonzentrationen nach Desortová (1981) lässt sich eine engere Spannweite berechnen von 5,4 bis 46,9 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$.

4 Diskussion

Im Rahmen der Diskussion wird zunächst auf die Probenahme und damit verbundene Herausforderungen während der Messkampagne eingegangen. Anschließend erfolgt die Betrachtung der Chlorophyllwerte mit Blick auf besondere Merkmale in der Gewässerlandschaft wie dem Kleinen See, der grundlegenden Gewässerstruktur sowie ein Überblick zu weiterführender Literatur und Informationen mit Bezug zu den vorliegenden Arbeiten der AG Reintjes.

4.1 Probenahme und Genauigkeit der Verortung

Die Geokoordinaten der Messgeräte, für die vor Ort erfassten physikalischen Parameter sowie Chlorophyllwerte, zeigten im Rahmen der Untersuchungen eine gute Übereinstimmung (Vergleiche Abbildung 4.1). Eine über einen visuellen Abgleich hinausgehende Analyse zur Übereinstimmung der von beiden Geräten gelieferten Geokoordinaten wurde in diesem Projekt jedoch nicht vorgenommen.

Mit Bezug zu den im Projekt ursprünglich geplanten Messpunkten lässt sich insbesondere für den mittleren Wakenitzabschnitt eine erhöhte Streuung der festgehaltenen Geokoordinaten beobachten (MP-Nr. 5, 6, 7, 8).

Die Streuungen sind nach Gesprächen und Erfahrungsberichten des Messteams nicht primär auf die Messgeräte zurückzuführen, sondern auf die praktische Herausforderung, Messpunkte gezielt anzusteuern. Die Gewässerstruktur und gewässernahe Landschaft in Form von Bewuchs insbesondere des mittleren Wakenitzverlaufes, machte es schwierig die Zuläufe gezielt bei jedem Messtermin zu erkennen und anzufahren, was sich in der erhöhten Streuung der Geokoordinaten und vereinzelt verworfener Messpunkte widerspiegelt. Zusätzlich ist bekannt, dass aus diesem Grund am Messtermin 31.05.2023 die MP-Nr. 7 und 8 nicht am richtigen Ort gemessen wurden und daher nicht in die Auswertung einfließen.

Durch starken Bewuchs konnte außerdem nicht immer der geforderte Abstand von Pflanzen zu den LEDs der AlgaeTorch eingehalten werden, woraufhin teilweise Mehrfachmessungen durchgeführt wurden oder die Werte ausgeschlossen werden mussten. Dadurch ergibt sich ein zusätzlich fehlender Wert am 12.07.2023 an MP-Nr. 23.

Die Entnahme von Wasserproben lief ebenfalls erfolgreich, abgesehen vom 31.05.2023 an dem die Zuordnung der Wasserproben für die MP-Nr. 7 und 8 nicht vorgenommen werden konnte.

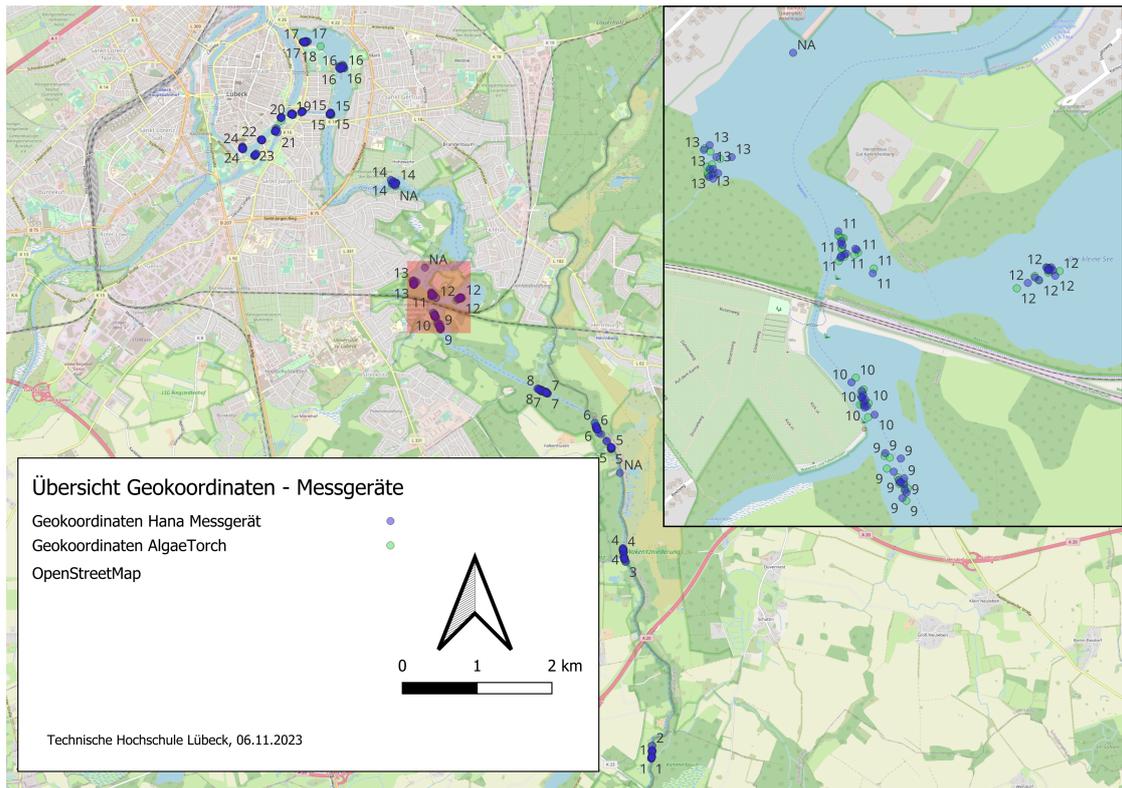


Abbildung 4.1: Übersichtsdarstellung der durch das Hana und AlgaeTorch festgehaltenen Geokoordinaten für die jeweiligen Messungen. Beispielhaft in der Ausschnittsvergrößerung zu erkennen, zeigte sich die größtenteils gute Übereinstimmung der erfassten Geokoordinaten, die eine visuelle Kontrolle zu den jeweiligen zugewiesenen Messpunkten ermöglichte.

Dies begründet sich wie schon bei den vor Ort Messungen durch die Schwierigkeiten beim Anfragen der Messpunkte.

4.2 Chlorophyll

Zunächst wird auf den Kleinen See als Messpunkt mit besonderen Eigenschaften im Gewässerverlauf eingegangen. Anschließend erfolgt die weitere Betrachtung der Chlorophyllmessungen unter Berücksichtigung der Gewässerstruktur, -dynamik und gemessenen Nährstoffkonzentrationen.

4.2.1 Kleiner See

Der Kleine See sticht als erster Punkt im Gewässerverlauf mit erhöhten Chlorophyllkonzentrationen hervor. Dies betrifft sowohl Gesamt- als auch Cyanochlorophyll, die über den gesamten Messzeitraum im Mittel hohe Konzentrationen aufweisen (Vergleiche MP-Nr.12 Abbildung 3.6). Die ermittelten Nährstoffkonzentrationen für den Kleinen See zeigen hingegen für Nitrat $c_{NO_3} < 0,25 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ und Phosphat $c_{PO_4} < 1,0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (Vergleiche präsentierte Informationen vom 21.11.2023 sowie Berichtsteil seitens AG Külls). Dies lässt darauf schließen, dass eingetragene Nährstoffe direkt im Kleinen See durch die Biologie verstoffwechselt werden und Stickstoff der limitierenden Nährstoff ist.

Aus den Ergebnissen lässt sich die Hypothese ableiten, dass der Kleine Sees als Bioreaktor für das angeschlossene Gewässersystem fungiert, der die vom Oberlauf zugeführten Nährstoffe bei verringerter Fließgeschwindigkeit und guten Lichtverhältnissen zu Biomasse verstoffwechselt. In den Untersuchungen wurden allerdings nicht die Umsatzraten, sondern nur Istzustände erfasst. Auch fehlte eine Quantifizierung und Bewertung der Verfrachtung von Biomasse entlang der Wasserkörper. So könnte auch noch untersucht werden, wie sich die Biomasseproduktion im Kleinen See auf den weiteren Gewässerverlauf der Wakenitz auswirkt.

4.2.2 Gewässerstruktur und Dynamik

Im oberen Gewässerverlauf bis MP-Nr. 8 werden die geringen mittleren Chlorophyllwerte von unter $5 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ durch Strömungs- und Verschattungseffekte erklärt. Die Erwartung ist, dass selbst wenn Algenbiomasse entsteht, diese in den unteren Gewässerbereich ausgetragen wird.

Die im Mittel erhöhten Chlorophyllmesswerte im unteren Gewässerabschnitt insbesondere ab MP-Nr. 15 fallen in ein Areal mit veränderter Gewässerstruktur. Die Wakenitz sowie angeschlossener Krähen- und Mühlenteich weisen im Verhältnis zum oberen Gewässerverlauf eine größere Breite auf, was zu geringeren Verschattungseffekten sowie einer reduzierten Fließgeschwindigkeit führt. Diese Aspekte führen zu veränderten Bedingungen für das Algenwachstum, was sich in erhöhten Chlorophyllwerten ausdrückt.

Berücksichtigt man zusätzlich die erhöhten Nitratkonzentrationen an einzelnen Messkampagnen von über $0,75 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$, insbesondere bei MP-Nr. 6 und 7, deutet es darauf hin, dass die anfallenden Nährstoffe im unteren Gewässerbereich durch die Biologie verstoffwechselt werden. Die erfolgte Abschätzung von Biomasse- sowie Chlorophyllwerten (siehe Kapitel 3.3) von $5,4 - 46,9 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ sind mit Blick auf die gemessenen Medianwerte von bis zu $57 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ (Tabelle 7.1) in der gleichen Größenordnung. In den sehr überschlägige Berechnungen bleiben viele für die Umsatzkalkulation erforderlichen Parameter unberücksichtigt, etwa Sedimentation oder strömungsbedingter Austrag der gebildeten Biomasse, Konsumption der Algen oder Nährstoffkonkurrenz durch Makrophyten. Auch wurden an einzelnen Stellen gemessene Nitrat- und Chlorophyllwerte als homogen vorliegende Konzentration angenommen. Die überschlägige Abschätzung zeigt aber dennoch, dass die gemessenen Chlorophyllwerten in Wasser mit $0,75 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ Nitrat als Ausgangsbasis plausibel sind.

Weiterhin zeigt sich eine Erhöhung aufeinanderfolgender Chlorophyllkonzentrationen in der Abfolge Krähen- und Mühlenteich bspw. an den Messterminen 5 und 6 (Abbildung 3.3). MP-Nr. 23 der an einem strömungsberuhigten Bereich des Mühlenteiches liegt, deutet darauf hin, dass geringere Fließgeschwindigkeiten vorliegen und Algenpopulationen hierdurch angereichert werden.

Darauf basierend könnte geprüft werden, ob durch die gegebenen Strömungsbedingungen der Mühlenteich als eine Art Sedimentationsfilter fungiert, was durch ein Absinken und Metabolisierung der Algenbiomasse durch Konsumenten und Destruenten zu Sauerstoffzehrungserscheinungen führt. Es gilt zu prüfen, ob die Durchströmung des Mühlenteiches soweit angepasst werden kann, dass das Gewässer auf der ganzen Breite durchflossen wird und so beruhigte Areale vermieden werden.

Neben den erhöhten mittleren Chlorophyllkonzentrationen insbesondere ab MP-Nr. 15 zeigt sich eine erhöhte Streuung um den Median. Diese lässt auf eine höhere Dynamik in den Algenpopulationen innerhalb des Messzeitraums in den jeweiligen Gewässerabschnitten schließen. Für strömungsberuhigte Areale, insbesondere mit urbanem Einfluss zeigten Minaudo u. a. (2015), dass Nährstoffkonzentrationen und Auftreten von hohen Chlorophyllkonzentrationen räumlich nicht zusammenfallen müssen. Hierfür werden unter anderem Gewässermorphologie sowie zusätzliche Einträge angeführt.

Als eine Maßnahme kann langfristig über eine Änderung der Gewässerstruktur nachgedacht werden, durch die die Strömungsgeschwindigkeiten erhöht und Verweilzeiten verringert werden. Dies birgt jedoch das Risiko, dass Effekte lediglich in angeschlossene Gewässer stromabwärts verlagert werden. Grundsätzlich sollten die Nährstoffeinträge entlang des gesamten Gewässerverlaufes, auch aus den im oberen Verlauf einspeisenden Bächen und Gräben, reduziert werden.

Weiterhin haben Minaudo u. a. (2015) empfohlen, den Einfluss von Muschelpopulationen auf den Gewässerzustand zu untersuchen. Dies kann auch für die Gewässer der Stadt Lübeck ein Ansatz sein, inwieweit die Unterstützung natürlicher Prozesse und Organismen zu einer Reduktion der Algenpopulation führen kann. Zusätzlich sollten weitere Ansätze zur Extraktion

von Nährstoffen aus dem Gewässer untersucht werden, bspw. durch die technische Extraktion von Mikroalgen oder Makrophyten (Pflanzen).

4.2.3 Literatur, Einordnung und weiterführende Informationen

Zunächst soll eingeordnet werden, welche Aussagen zum Eutrophierungszustand der Gewässer möglich sind. Der Trophiegrad eines Gewässers ist eine Aussage über dessen Produktivität, also eines Umsatzes. Dabei ist die Bildung von Biomasse durch Photosyntheseleistung (Primärproduktion durch Algen und Makrophyten) ausschlaggebend.

Die durchgeführten Messungen quantifizieren Ist-Zustände, aber keine Umsätze. Dennoch kann man aus gemessenen Nährstoff- und Chlorophyllwerten sowie der Sichttiefe auf die Produktivität schließen. Daraus lässt sich klar ableiten, dass das Gewässersystem ab dem Kleinen See als eutroph einzustufen ist. Zu den Zusammenhängen und Dynamiken zwischen Nährstoffen, Chlorophyllkonzentrationen und Biomasse sind im Einzelnen noch die folgende Anmerkungen zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse zeigen, dass hohe Chlorophyllkonzentrationen nicht mit gleichzeitig hohen gemessenen Nährstoffkonzentrationen einhergehen müssen. Auch die Abschätzung von Biomasse allein auf Basis von Chlorophyll-Messungen ist mit Unsicherheiten verbunden und hängt von der jeweiligen verwendeten Methode (Vergleiche Desortová 1981; Ramaraj, Tsai, und Chen 2013; Schmid, Bauer, und Stich 1998). Während Chlorophyllmessungen als Indikator für Biomasseentwicklungen verwendet werden (Mineeva u. a. 2008 ; Kasten und Michels 2008), haben weitere Studien gezeigt, dass das Thema komplex ist. Felip und Catalan (2000) haben Indikatoren dafür gefunden, dass diese Effekte durch veränderte Umweltbedingungen und Populationsdynamiken begründet sein können, die eine Entkopplung von Biomasse und Chlorophyllkonzentration zur Folge haben. Soll ein exakteres Bild über tatsächliche Algenbiomasse und deren Entwicklung erstellt werden, empfiehlt es sich ergänzend zu den Chlorophyllmessungen für weitere Untersuchungen Zählungen (Vergleiche Desortová 1981; Schmid, Bauer, und Stich 1998) sowie die Bestimmung von Kohlenstoffgehalten (Talling 1993) heranzuziehen, die allerdings einen um ein Vielfaches höheren Aufwand bedeuten.

Die Chlorophyllwerte liefern allerdings einen wertvollen Indikator für dynamische Effekte innerhalb der in den Gewässern vorliegenden Algenpopulationen, bei denen sich anhand der vorliegenden Ergebnisse besonders im unteren Gewässerabschnitt hohe Dynamiken feststellen lassen.

Das dynamische Verhalten der Chlorophyllkonzentrationen in den Lübecker Stadtgewässern spiegelt bekanntes Verhalten für Algenpopulationen wieder. Auch in anderen Regionen zeigt sich dynamisches Verhalten bei Chlorophyllverläufen im Jahresverlauf, wie unter anderem Talling (1993) am Beispiel von englischen Seen gezeigt hat.

Im weiterführenden Kontext norddeutscher Gewässer insbesondere in Schleswig-Holstein finden sich dokumentierte Untersuchungen zu Chlorophyllkonzentrationen in Kasten und

Michels (2008) und Nixdorf u. a. (2004). Deren Untersuchungen für Seen weisen Chlorophyll-a-Gehalte von unter $5 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ bis zu über $160 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ aus.

Mit Bezug zu den vorliegenden Messungen muss darauf hingewiesen werden, dass es sich bei der Ermittlung der Werte um eine andere Methodik handelt und die Werte für Seen ermittelt wurden. Durch die sehr niedrige Strömungsgeschwindigkeit der Wakenitz und verbundener Gewässer lassen sich allerdings Parallelen ziehen und die in der vorliegenden Messreihe erfassten Chlorophyllwerte sind in gleichen Größenordnungen festzustellen.

Über die unmittelbare Nutzung durch lokale Institutionen der Stadt Lübeck können die durchgeführten Untersuchungen mit Bezug zu Chlorophyllwerten als auch weiterer physikalischer und chemischer Parameter an mehreren Stellen einen wertvollen Beitrag leisten.

So gibt es Anstrengungen Modelle zu erstellen, die die Entwicklung von Gewässern und deren trophischen Zustandes vor dem Hintergrund des Klimawandels und damit verbundenen Änderungen vorherzusagen und in Folge dessen einen Anstieg der Chlorophyllwerte prognostizieren (Rolighed u. a. 2016).

Hinzu kommen Arbeiten mit Hilfe von Fernerkundungsdaten den Gewässerzustand zu ermitteln, unter anderem in Form des von der EU geförderten Water-ForCE Projektes mit dem Ziel eine Roadmap um Datenverfügbarkeit, -zugänglichkeit sowie -harmonisierung voranzutreiben (Vergleiche Simis, Horsburgh, u. a. 2021 ; Simis, Walker, u. a. 2021). In beiden Fällen haben *in-situ* ermittelte Datensätze eine Chance bei der Kalibration solcher Systeme einen Beitrag zu leisten.

5 Zusammenfassung

Mit Bezug zu den eingangs genannten Zielen

- das Auftreten von Algen durch Messungen zu untersuchen und deren Rolle besser zu verstehen,
- die Rolle des Kleinen Sees und der Zuflüsse der Nebengewässer als Nährstoffquelle zu untersuchen.

werden an dieser Stelle die durch die Arbeiten der AG Reintjes getätigten Beobachtungen und potenzielle Maßnahmen zusammengefasst.

Als Beobachtungen lassen sich festhalten, dass

- die Nährstoffe insbesondere im unteren Gewässerverlauf umgesetzt werden
- Stickstoff das Wachstum der Algen limitiert und somit dessen Eintrag ins Gewässer zum Aufbau von Biomasse und negativen Folgen für das Gewässer führt
- der Kleine See ein hohes Potential zur Anreicherung des Gesamtsystems mit Algen hat
- die Gewässer im Umfeld der Stadt Lübeck gute Bedingungen für Algenwachstum liefern und somit ein Großteil der anfallenden Nährstoffe aus den speisenden Quellen umgesetzt werden

Als Maßnahmen können hieraus abgeleitet werden

- insbesondere der Kleine See sollte weiter betrachtet werden
 - es sollten neben physikalisch-chemischen Parametern auch die Chlorophylldaten berücksichtigt werden
 - die Umsätze und der Verbleib der Biomasse sowie Konsequenzen für die Sauerstoffverhältnisse im Gewässer sollten untersucht werden
 - es sollte auch die Bildung von Methan im Kleinen See und somit der Beitrag zum Klimawandel betrachtet werden
- Strömungsbedingungen verändern und so Wachstumsbedingungen für Algen erschweren
 - es sollte geprüft werden, ob die Durchströmung von Krähen- und Mühlenteich verbessert werden kann
- Zentrale Ursachenbekämpfung setzt bei der Reduktion von Nährstoffeinträgen an
 - hier wird auf den parallelen Bericht der AG Külls verwiesen

- Ansätze zur Entnahme von Biomasse aus dem Gewässer untersuchen
 - Machbarkeitsuntersuchungen zur Unterstützung natürlicher Prozesse. Hierbei insbesondere die Filtrierleistung von Muscheln unterstützen
 - Entnahme von Mikroalgen durch technische Systeme (Bandfilter o.ä.)
 - Abschätzung der Wirkung von Maßnahmen zur Reduktion des Nährstoffeintrages auf die Algenkonzentrationen
 - Untersuchungen zum Bestand und Dynamik der Makrophyten

6 Quellen/Literatur

- bbe Moldaenke GmbH. 2020. *AlgaeTorch - Benutzerhandbuch*. Manual.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz. o. J. „Gewässerbewertung Gemäß WRRL“. Zugegriffen 6. November 2023. https://www.gewaesser-bewertung.de/index.php?article_id=425&clang=1.
- Desortová, Blanka. 1981. „Relationship Between Chlorophyll- α Concentration and Phytoplankton Biomass in Several Reservoirs in Czechoslovakia“. *Internationale Revue Der Gesamten Hydrobiologie Und Hydrographie* 66 (2): 153–69. <https://doi.org/10.1002/iroh.19810660202>.
- Felip, Marisol, und Jordi Catalan. 2000. „The Relationship between Phytoplankton Biovolume and Chlorophyll in a Deep Oligotrophic Lake: Decoupling in Their Spatial and Temporal Maxima“. *Journal of Plankton Research* 22 (1): 91–106. <https://doi.org/10.1093/plankt/22.1.91>.
- Kasten, Juliane, und Ute Michels. 2008. „Untersuchung Des Phyto-und Zooplanktons in Schleswig-Holsteinischen Seen 2007“. Berlin / Königs Wusterhausen. https://umweltanwendungen.schleswig-holstein.de/Seen/Berichte_Gutachten/Plankton_Seen/Bericht_Plankton_2007_Kasten_Michels.pdf.
- Külls, Dr Christoph. 2021. „Untersuchung der Wasserqualität von Krähenteich und Mühlenteich“. LaHy 2021-11. <https://uhydro.de/bericht/wqhl/>.
- . 2023. „Untersuchungen der Wasserqualität von Krähenteich und Mühlenteich im Jahr 2022“.
- Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR SH). 2021. „Chemisches und biologisches Monitoring der Gewässer zur Umsetzung der EG WRRL“, Dezember.
- LAWA-AO. 2016. „Rahmenkonzeption Monitoring Teil B Bewertungsgrundlagen Und Methodenbeschreibungen. Arbeitspapier III Untersuchungsverfahren Für Biologische Qualitätskomponenten (Stand 16.03.2016)“.
- Minaudo, C., M. Meybeck, F. Moatar, N. Gassama, und F. Curie. 2015. „Eutrophication Mitigation in Rivers: 30 Years of Trends in Spatial and Seasonal Patterns of Biogeochemistry of the Loire River (1980–2012)“. *Biogeosciences* 12 (8): 2549–63. <https://doi.org/10.5194/bg-12-2549-2015>.
- Mineeva, N. M., A. S. Litvinov, I. E. Stepanova, und M. Yu. Kochetkova. 2008. „Chlorophyll Content and Factors Affecting Its Spatial Distribution in the Middle Volga Reservoirs“. *Inland Water Biology* 1 (1): 64–72. <https://doi.org/10.1007/s12212-008-1010-5>.
- Mischke, Ute, Ursula Riedmüller, Eberhard Hoehn, und Brigitte Nixdorf. 2017. „Handbuch Phyto-See-Index - Verfahrensbeschreibung Für Die Bewertung von Seen Mittels Phytoplankton. Im Rahmen Des Länderfinanzierungsprogramms "Wasser, Boden Und Abfall". Stand 15. Dezember 2017.“

- Nicholls, K. H., und P. J. Dillon. 1978. „An Evaluation of Phosphorus-Chlorophyll-Phytoplankton Relationships for Lakes“. *Internationale Revue Der Gesamten Hydrobiologie Und Hydrographie* 63 (2): 141–54. <https://doi.org/10.1002/iroh.19780630203>.
- Nixdorf, Dr Brigitte, Mike Hemm, Anja Hoffmann, und Peggy Richter. 2004. „Abschlussbericht F&E Vorhaben FKZ 299 24 274 Im Auftrag Des Umweltbundesamtes“. <http://www.b-tu.de/fg-gewaesseroekologie/publikationen/projektberichte-gewaesserschutz>.
- Ramaraj, Rameshprabu, David DW Tsai, und Paris Honglay Chen. 2013. „Chlorophyll Is Not Accurate Measurement for Algal Biomass“. *Chiang Mai Journal of Science* 40 (4): 547–55. <https://www.thaiscience.info/journals/Article/CMJS/10886507.pdf>.
- Rolighed, J., E. Jeppesen, M. Søndergaard, R. Bjerring, J. H. Janse, W. M. Mooij, und D. Trolle. 2016. „Climate Change Will Make Recovery from Eutrophication More Difficult in Shallow Danish Lake Søbygaard“. *Water (Switzerland)* 8 (10, 10). <https://doi.org/10.3390/w8100459>.
- Schmid, Hans, Friedrich Bauer, und Hans Bernd Stich. 1998. „Determination of Algal Biomass with HPLC Pigment Analysis from Lakes of Different Trophic State in Comparison to Microscopically Measured Biomass“. *Journal of Plankton Research* 20 (9): 1651–61. <https://doi.org/10.1093/plankt/20.9.1651>.
- Simis, Stefan, Nicola Horsburgh, Peter Walker, Igor Ogashawara, Carmen Cillero, und Alo Laas. 2021. „Survey Response of the H2020 Water-ForCE Expert Meeting on In Situ Calibration and Validation of Satellite Products of Water Quality and Hydrology“, Juni. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5119010>.
- Simis, Stefan, Peter Walker, Igor Ogashawara, C. Cillero, und Alo Laas. 2021. „Outcomes of the Expert Workshop on in Situ Calibration and Validation of Satellite Products of Water Quality and Hydrology (H2020 Water-ForCE)“, Dezember. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5789232>.
- Talling, J. F. 1993. „Comparative Seasonal Changes, and Inter-Annual Variability and Stability, in a 26-Year Record of Total Phytoplankton Biomass in Four English Lake Basins“. *Hydrobiologia* 268 (2): 65–98. <https://doi.org/10.1007/BF00006879>.

7 Anhang

Tabelle 7.1: Median (\tilde{c}) und Interquartilabstand (IQD) der Chlorophyllemessungen über den gesamten Messzeitraum für den jeweiligen Messpunkt

MP-Nr.	$\tilde{c}_{chl.,gesamt}(\frac{\mu g}{l})$	$IQD_{chl.,gesamt}(\frac{\mu g}{l})$	$\tilde{c}_{chl.,cyano}(\frac{\mu g}{l})$	$IQD_{chl.,cyano}(\frac{\mu g}{l})$
1	0.80	1.25	0.30	0.45
2	0.70	1.05	0.30	0.30
3	1.30	2.15	0.30	0.35
4	1.10	1.95	0.20	0.10
5	1.00	3.50	0.40	0.40
6	1.63	3.75	0.43	0.65
7	2.95	7.78	0.40	0.50
8	3.65	4.12	0.50	0.50
9	4.50	11.90	0.80	2.35
10	10.10	14.50	1.20	2.50
11	15.10	15.85	4.80	6.60
12	57.77	56.58	37.95	45.10
13	13.20	40.55	5.10	7.60
14	21.70	17.05	5.60	8.05
15	53.70	43.60	15.40	45.70
16	49.40	68.85	28.60	59.18
17	52.90	43.95	24.10	45.05
18	30.60	21.10	15.60	25.35
19	36.50	40.05	16.90	32.55
20	33.70	33.65	20.40	32.95
21	30.22	37.85	13.25	39.45
22	29.30	29.70	12.80	19.25
23	46.75	59.00	25.18	36.80
24	28.30	46.00	11.35	42.15