



Labor für  
Hydrologie und  
Internationale  
Wasserwirtschaft

## Untersuchungen der Wasserqualität an Wakenitz, Krähenteich und Mühlenteich

Bericht zu den Messungen im Sommer und Herbst 2021

Prof. Dr. Christoph Külls







# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>5</b>
1.1	Danksagung . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Das Studiengebiet</b>	<b>7</b>
2.1	Das Einzugsgebiet der Wakenitz . . . . .	7
2.2	Wakenitz . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Auftrag</b>	<b>11</b>
3.1	Ziel der Untersuchungen . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Herangehensweise</b>	<b>13</b>
4.1	Ansatz . . . . .	13
4.2	Monitoring . . . . .	13
4.3	Abflussmessungen . . . . .	14
4.4	Sauerstoffsonde . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>15</b>
5.1	Sauerstoffmessungen . . . . .	15
5.2	Zusammenfassung der Sensordaten . . . . .	24
5.3	Messkampagnen . . . . .	25
5.4	Intensivkampagnen . . . . .	39
5.5	Auswertung der Kampagnen der Stadt . . . . .	44
5.6	Messung der Algenkonzentration . . . . .	45
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>49</b>
<b>7</b>	<b>Maßnahmen</b>	<b>51</b>
7.1	Kurzfristige und technische Lösungen . . . . .	51
7.2	Bewirtschaftungsmaßnahmen . . . . .	52
7.3	Mittelfristige Maßnahmen . . . . .	52
7.4	Langfristige Maßnahmen . . . . .	53



# 1. Einführung

In den vergangenen Jahren ist es im Spätsommer vereinzelt zu Fischsterben im Krähenteich (u.a. 14.8. 2018, Schwerpunkt Krähenteich) gekommen. Zudem wird eine starke Verkrautung mit Makrophyten beobachtet, vereinzelt wurde über einen fauligen Geruch im Krähenteich und im Mühlenteich berichtet.

Die unmittelbare Ursache des Fischsterbens liegt mit einer hohen Wahrscheinlichkeit im Mangel an Sauerstoff zumindest in einigen Bereichen der beiden Stadtgewässer. Die Hansestadt Lübeck ist bemüht und sehr daran interessiert, die systemische Entwicklung des Fischsterbens und der zu Grunde liegenden Ursachen im Zusammenhang mit der Wasserqualität der Zuflüsse beider Stadtgewässer zu verstehen, die zeitliche Entwicklung und räumliche Verteilung des Sauerstoffgehaltes und weiterer Parameter der Wasserqualität wie dem biologischen Sauerstoffbedarf und entscheidender Nährstoffe wie  $NO_3^-$  und  $PO_4^{-3}$  zu kennen und daraus kurzfristige, mittel- und langfristige Handlungsmöglichkeiten zur Verbesserung der Wasserqualität entwickeln zu können.

## 1.1 Danksagung

Diese Studie wurde von der Hansestadt Lübeck unterstützt. Für die sehr gute Zusammenarbeit mit allen Beteiligten bei der Stadt möchten wir uns bedanken.

Die Probenahmen wurden von Marcel Kock, Laboringenieur an der TH Lübeck im Labor für Hydrologie, Rafaela Schramm (Studentin) und Nina Krüger (Doktorandin) durchgeführt. Für die Gelände- und Laborarbeit bedanke ich mich ausdrücklich.

Studierende haben zu dieser Studie über Projektarbeiten beigetragen. Für diese Beiträge von Kimberly Kasischke, Lisa Osterhoff (siehe Kasischke and Osterhoff [2021]) sowie von Wencke Stabenow und Lisa Besser (Stabenow and Besser [2021]) bedanken wir uns.



## 2. Das Studiengebiet

### 2.1 Das Einzugsgebiet der Wakenitz

Das Einzugsgebiet der Wakenitz (Abb. 2.1) umfasst mit dem Einzugsgebiet der über den Schaalseekanal angebotenen Flächen des Schaalsees 445 km<sup>2</sup>. Die Abbildung zeigt die Verteilung der Landnutzung im Einzugsgebiet: Siedlungsflächen (rot), Waldflächen (grün mit Laubwald (hellgrün) und Nadelwald (dunkelgrün)), sowie Ackerflächen (hellbraun) und Weideflächen und Wiesen (braun). Die Landnutzung ist der CORINE Landnutzungskarte der EU entnommen. Die eigentliche Fläche des Ratzeburger Sees umfasst 12.57 km<sup>2</sup>, das Einzugsgebiet des Ratzeburger Sees betrug vor der Erstellung des Schaalseekanal 138 km<sup>2</sup> und hat sich durch die Überleitung von Wasser aus dem Schaalseekanal zur Stromerzeugung auf 320 km<sup>2</sup> erhöht.

### 2.2 Wakenitz

Die Wakenitz stellt den nordwärts verlaufenden Abfluss des Ratzeburger Sees dar. Die Wakenitz mündete ursprünglich über einen östlich verlaufenden Mäander über das Flussbett, in dem heute der Krähen- und Mühlenteich liegen, südlich der Altstadt in die Trave (Abb. 2.2), siehe Schalties [2009]. Zur Energiegewinnung durch Wassermühlen wurde die Wakenitz vor ihrer Einmündung in die Trave zurückgestaut.

Durch den Bau des Elbe-Lübeck-Kanals wurde der Unterlauf der Wakenitz durch den mehrere Meter tiefer liegenden Kanal getrennt. Die Entwässerung der Wakenitz wird nun über einen Dükerkanal sichergestellt, der die östlich des Elbe-Lübeck-Kanals gelegene Wakenitz mit Krähen- und Mühlenteich verbindet.

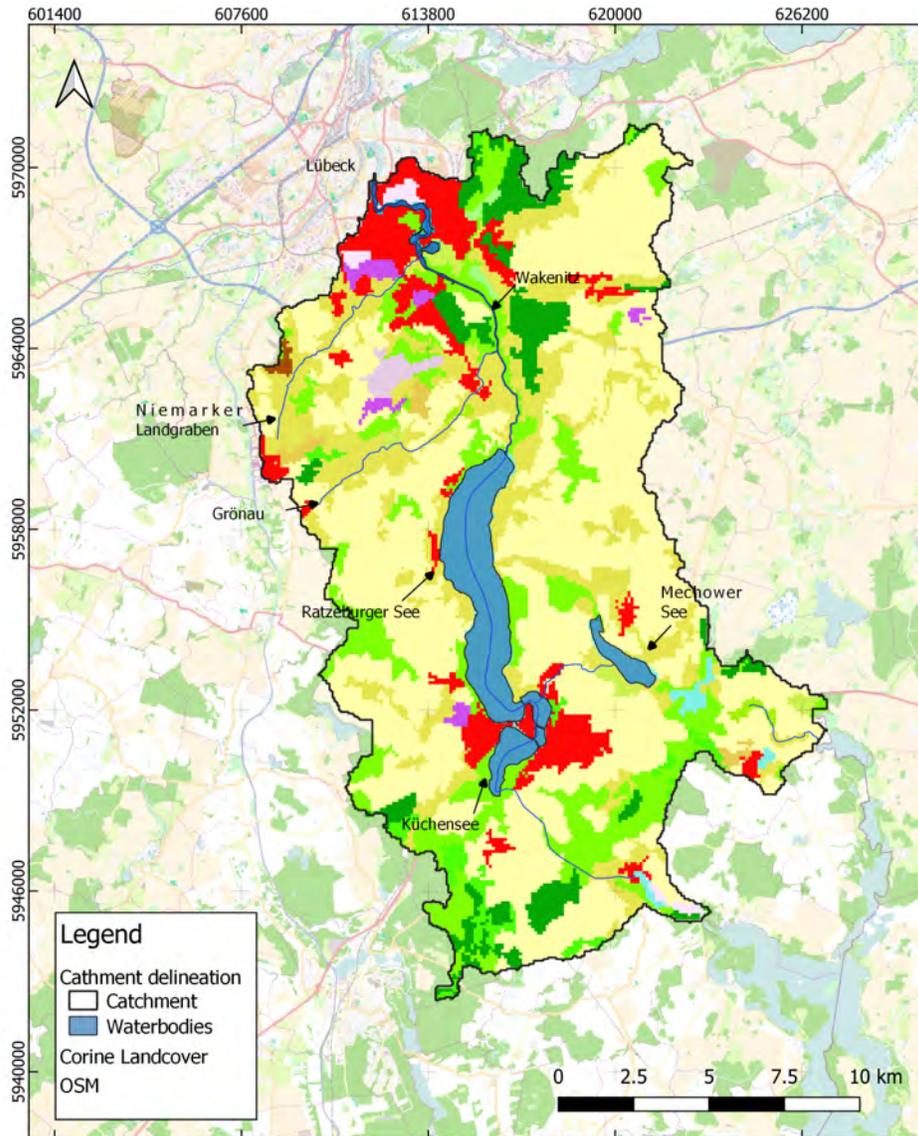


Abbildung 2.1: Das Einzugsgebiet der Wakenitz. Legende: Siedlungsflächen (rot), Waldflächen (grün mit Laubwald (hellgrün) und Nadelwald (dunkelgrün)), sowie Ackerflächen (hellbraun) und Weideflächen und Wiesen (braun). Quelle: CORINE Datenbank der EU, 2021.

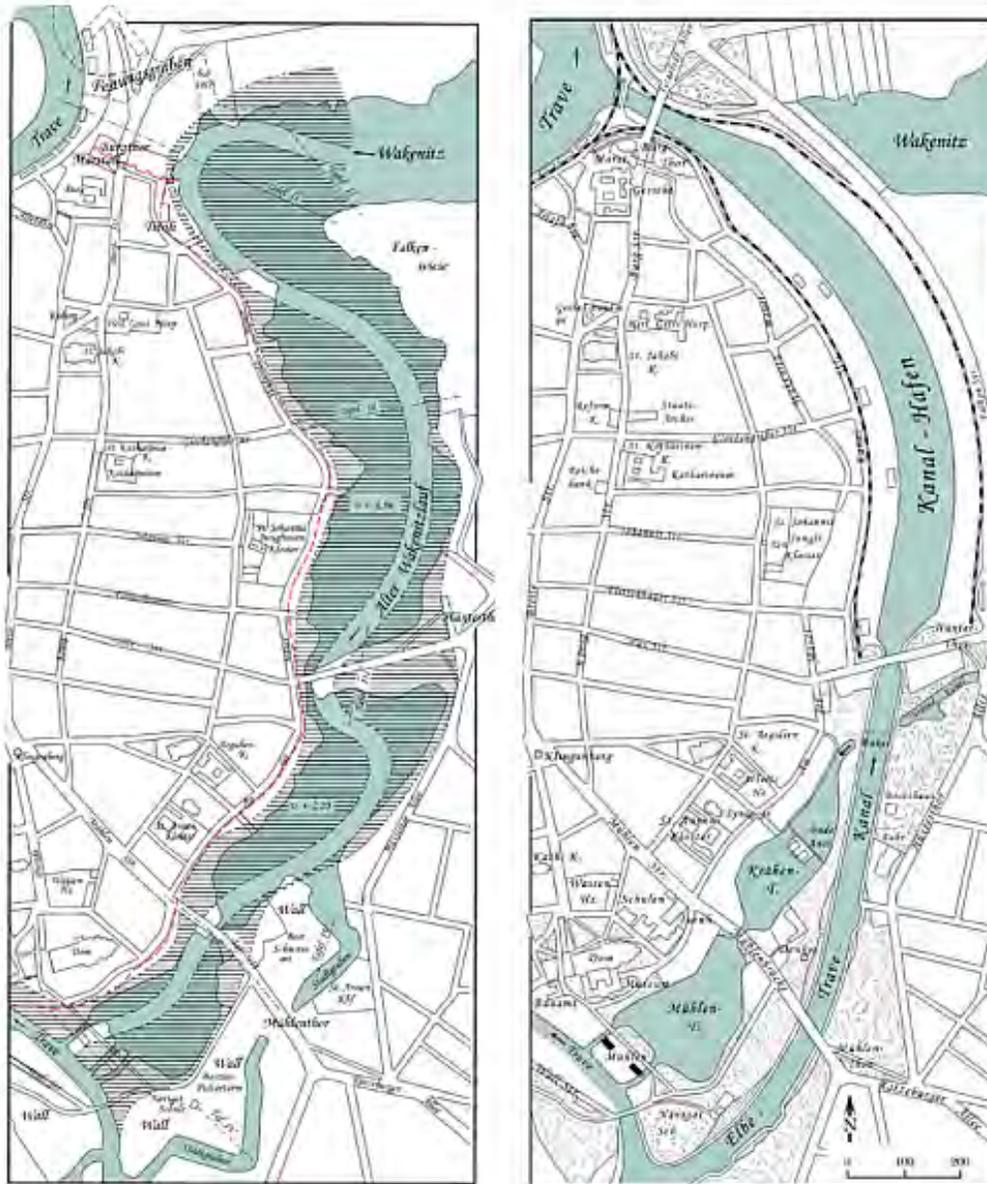


Abbildung 2.2: Wasserbauliche Veränderungen der Wakenitz



## 3. Auftrag

Die *Hansestadt Lübeck*, Bereich *Lübeck Port Authority* (LPA) sowie die Untere Wasserbehörde des Bereiches Umwelt-, Natur- und Verbraucherschutz (UNV) haben im Mai/Juni 2021 das Labor für Hydrologie der TH Lübeck, Prof. Dr. C. Külls beauftragt, Messungen am Krähenteich und Mühlenteich durchzuführen, um die möglichen Ursachen für die zeitweise Verschlechterung der Wasserqualität zu untersuchen. Dieser Auftrag umfasst ein Programm zur begleitenden wissenschaftlichen Untersuchung der Wasserqualität in Wakenitz, Mühlen- und Krähenteich während des Sommers 2021.

Das Labor für Hydrologie 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 werden können, als auch Parameter der Wasserqualität im Labor bestimmt werden können.

### 3.1 Ziel der Untersuchungen

Ziel der Untersuchung war es, die entscheidenden Parameter der Wasserqualität in den Zuflüssen zu Krähen- und Mühlenteich zu erfassen und zu überwachen.

Aus diesen Parametern soll der tiefenabhängige Zustand der Wasserqualität von Krähen- und Mühlenteich während der Sommermonate zeitnah für die Stadt Lübeck erkennbar sein. Daher sollen die Parameter innerhalb von wenigen Tagen nach der Probenahme mitgeteilt oder über ein internes Datenportal abrufbar sein.

Ein weiteres Ziel der Untersuchungen war es, die *Ursachen* des Absinkens der Sauerstoffkonzentrationen und ihre mögliche Abhängigkeit von hydrologischen Steuergrößen (Durchfluss durch den Dükerkanal bei unterschiedlicher Wasserqualität in der Wakenitz) zu ermitteln. Wenn sich daraus Handlungsmöglichkeiten zur besseren Steuerung der Wasserqualität in Krähenteich und Mühlenteich ergeben, wie die Steuerung des Zuflusses oder Abflusses aus Krähen- und Mühlenteich, so sollen diese Handlungsmöglichkeiten identifiziert werden.

Schließlich sollen auch mittel- und langfristige Maßnahmen zur Verbesserung

der Wasserqualität in Krähen- und Mühlenteich aufgezeigt werden. Dafür soll der Zustand der Wasserqualität der Wakenitz und ihrer Zuflüsse über ein Jahr dokumentiert und bewertet werden.

Das Projekt endete am 31. Oktober 2021. Ein Bericht sollte innerhalb von 30 Tagen erstellt werden, der alle Ergebnisse und Graphiken enthält. In diesem Bericht werden diese Untersuchungen im Kapitel 5 vorgestellt.

Aus der Untersuchung sollten Empfehlungen für die Verbesserung der Wasserqualität abgeleitet werden. Bereits während des Projektes wurden in Absprache mit der Stadt Hinweise auf kritische Bedingungen auf Grund der Messungen gegeben.

## 4. Herangehensweise

### 4.1 Ansatz

Die Wasserqualität des Krähenteiches und des Mühlenteiches wird

- durch die Strömungsvorgänge und die Verweilzeit des Wassers bestimmt, die von Zufluss, Abfluss und interner Hydrodynamik abhängen,
- von der chemischen und biologischen Beschaffenheit der Zuflüsse, Abflüsse und der Wasserkörper und schließlich
- von den Umwandlungsprozessen in den Gewässern als einem biochemischen System.

Für die Untersuchung wurde vorgeschlagen, hydrometrische Messungen des Abflusses und Untersuchungen der Wasserqualität zu verbinden. Die zeitliche Entwicklung der Wasserqualität sollte dargestellt werden, mögliche Unterschiede zwischen Epilimnion und Hypolimnion sollen für beide Gewässer beschrieben werden.

### 4.2 Monitoring

Es wurde vorgeschlagen, an der Wakenitz am Einlauf zum Dükerkanal, oberhalb und unterhalb des Dükers, im Krähenteich und im Mühlenteich die Gewässergüteparameter an zwölf Messpunkten in zwei Tiefen zu erfassen. Die genaue Festlegung der Probenahme- und Messstellen erfolgte in enger Absprache mit der Unteren Wasserbehörde und der Lübeck Port Authority. Diese Kampagnen konnten auch mit Unterstützung von Studierenden durchgeführt werden. Die Untersuchung erfolgte im Labor für Hydrologie.

Das Wasserlabor der TH Lübeck hat ausgewählte Probenahmepunkte in der Wakenitz, im Dükerkanal, im Krähenteich und im Mühlenteich in das zweiwöchentliche Messprogramm aufgenommen und an diesen Punkten in jeweils zwei Tiefen Messungen der Vor-Ort-Parameter, Temperatur, Trübung, elektrischen Leitfähigkeit, des Sauerstoffgehaltes und der Sauerstoffsättigung, sowie der Hauptionen  $Ca$ ,  $Mg$ ,  $Na$ ,  $K$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NH_4^+$  und  $o-PO_4^{3-}$  vorgenommen, ebenso wurde der biochemische Sauerstoffbedarf  $BSB_5$  bestimmt.

Die Ergebnisse wurden jeweils innerhalb einer Woche nach Probenahme (Hauptionen, Nährstoffe und  $BSB_5$ ) mitgeteilt.

Zudem wurde vorgeschlagen, dass an drei Intensivkampagnen die Verteilung der Vor-Ort-Parameter Sauerstoff, Temperatur, pH und Trübung im Krähen- und Mühlenteich bestimmt werden. Diese Kampagnen konnten mit Unterstützung von Studierenden durchgeführt werden.

### 4.3 Abflussmessungen

Über Projektarbeiten wurden Abflussmessungen an der Mühlentorbrücke durchgeführt und ausgewertet. Der Abfluss wurde mit einem akustischen Dopplerverfahren gemessen. Das Messgerät wurde an der Sohle der Verbindung zwischen dem Krähenteich und dem Mühlenteich mittig angebracht und hat den Abfluss stündlich erfasst.

### 4.4 Sauerstoffsonde

Die Anschaffung einer Sauerstoffsonde mit Datenübermittlung wurde empfohlen. Eine Messsonde wurde von der TH Lübeck angeschafft und dem Projekt über eine Miete bereitgestellt. In der Miete war die Wartung einer weiteren Sonde, beschafft über Lübeck Port Authority inbegriffen.

## 5. Ergebnisse

Die Messungen wurden seit Anfang Juni 2021 regelmäßig durchgeführt. Nachfolgend werden die Ergebnisse des Jahres 2021 vorgestellt.

### 5.1 Sauerstoffmessungen

Der Sauerstoffgehalt des Krähenteiches und des Mühlenteiches wird seit Juni 2021 mit zwei Sensoren kontinuierlich stündlich erfasst und direkt telemetrisch auf eine Datenbank übermittelt, aus denen der Zustand beider Gewässer für die Hansestadt Lübeck erkennbar ist. Mit diesen Daten können ggf. auch Maßnahmen ausgelöst werden. Beide Sensoren erfassen den Wasserstand, die Temperatur, den Sauerstoffgehalt und die Sauerstoffsättigung im obersten Meter des Krähen- und Mühlenteiches.

Die Sensoren waren zunächst noch am Ufer installiert und wurden ab August auf verankerte Schwimmbojen übertragen. Das erste provisorische System wurde installiert, da die Schwimmbojen noch nicht einsatzbereit waren. Dafür wurden Gewichte (Betonsteine) verwendet, die über eine Kette mit einem Auftriebskörper verbunden waren. An den Auftriebskörpern waren die Sensoren für Temperatur, Sauerstoffkonzentration und -sättigung und Wasserstand befestigt. Der Vorteil dieses Systems lag darin, dass damit auch der Wasserstand erfasst wurde. Der Nachteil lag darin, dass bei Schwankungen des Wasserstandes sich die Tiefe der Messung änderte. Obwohl eine Installationstiefe von ca. 50 cm unter der Wasseroberfläche geplant war, lagen die Sensoren im Krähenteich bei ca. 55 cm, im Mühlenteich lagen die Sensoren etwas tiefer bei ca. 75 cm.

Ab August 2021 waren die von der Lübeck Port Authority zur Verfügung gestellten Bojen einsatzbereit. Die Sensoren wurden auf die Bojen übertragen. Damit war eine konstante Messtiefe von ca. 50 cm Tiefe gegeben, allerdings konnte nun der Wasserstand nicht mehr erfasst werden, da die Bojen sich mit dem Wasserstand bewegen.



Abbildung 5.1: Sensoren im Krähenteich (links) und im Mühlenteich (rechts) von Juni bis August 2021



Abbildung 5.2: Sensoren im Krähenteich (links) und im Mühlenteich (rechts) ab August 2021

### 5.1.1 Sauerstoffkonzentrationen im Krähenteich

Die Messungen der Sauerstoffkonzentration im Krähenteich zeigten eine saisonale Veränderung, Tagesschwankungen und eine Reaktion auf einzelne Niederschlagsereignisse. Die Sauerstoffkonzentrationen im Krähenteich lagen zwischen ca. 2-3 mg/L im Minimum und erreichten maximale Werte von ca. 12.5 mg/L. Die häufigsten Werte lagen zwischen 6 und 8 mg/L.

Die Sensoren zeichneten die Sauerstoffkonzentrationen stündlich vom 18. Juni 2021 bis zum 31.10. 2021 im Krähenteich (siehe Abb. 5.3) und im Mühlenteich (siehe auch Abb. 5.7). Die Sonden wurden alle zwei Wochen gewartet. Insgesamt hat das Monitoringsystem zuverlässig gearbeitet und kann auch als Warnsystem verwendet werden. Die Daten werden automatisch auf einen Server übertragen und stehen der Hansestadt Lübeck zur Einsicht zur Verfügung. Warnmeldungen werden bei weniger als 2.5 mg/L gelöstem Sauerstoff ausgelöst.

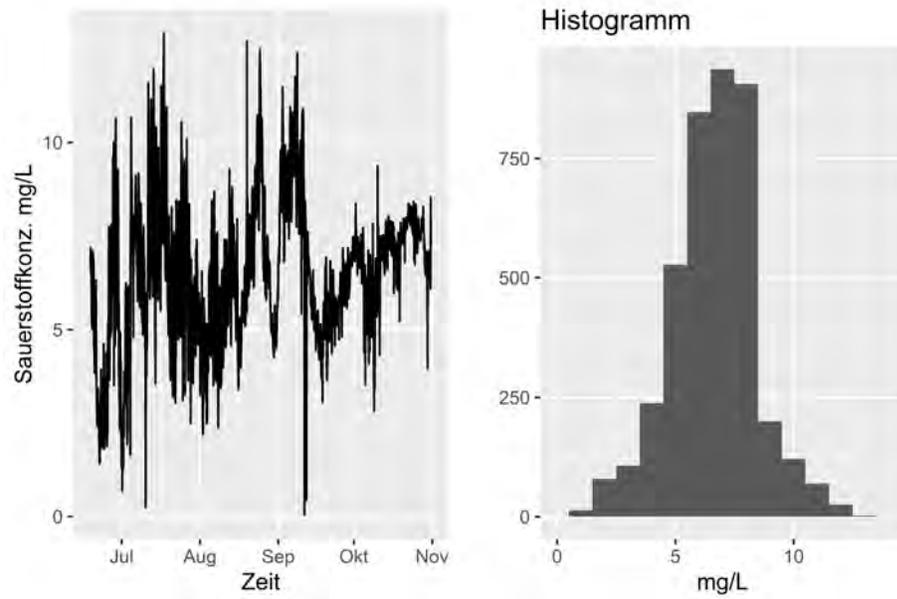


Abbildung 5.3: Zeitreihe der Sauerstoffkonzentrationen im Krähenteich vom 4. Juni bis zum 31.10. 2021

Die Zeitreihe zeigte im Krähenteich ausgeprägte Tagesgänge (siehe Abb. 5.4). Die Tagesgänge werden durch Photosynthese von Makrophyten und Phytoplankton tagsüber und Respiration während der Nacht verursacht. Die Werte der Sauerstoffkonzentration nehmen tagsüber im Sommer um ca. 2 mg/L zu und nachts um den gleichen Betrag ab. Die höchsten Werte werden in der Regel zwischen 14:00 und 16:00 erreicht, die geringsten Werte werden in den frühen Morgenstunden zwischen 4:00 und 7:00 gemessen. Wenn es zu akutem Sauerstoffmangel kommt, dann in den frühen Morgenstunden. In der Regel wird im

Sommer eine positive Nettowirkung erzielt, die jedoch gering ist und unter 0.1 bis 0.2 mg/L pro Tag liegt.

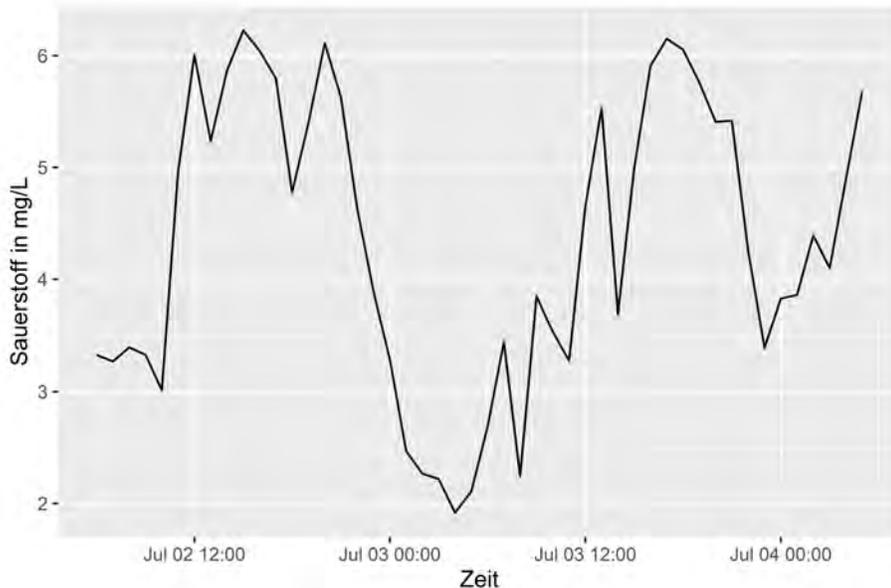


Abbildung 5.4: Tagesgänge der Sauerstoffkonzentrationen im Krähenteich

Neben den Tagesgängen werden Ereignisse der Sauerstoffzehrung beobachtet (Abb. 5.4). Diese Ereignisse sind jeweils 1-2 pro Monat aufgetreten. Es ist auffällig, dass diese Ereignisse in der Regel nach Starkregen zu beobachten sind und 5 bis 10 Tage andauern, in denen die Sauerstoffkonzentration über diesen Zeitraum um ca. 5 mg/L fällt. Diese Ereignisse wurden vom 20. bis zum 25.6., vom 29.6. bis 4.7., vom 31.7. bis zum 4.8. und vom 10.9. bis 22.9. 2021 beobachtet. Diese Episoden werden von Einträgen abbaubaren Materials in den Krähenteich und Mühlenteich verursacht und dauern in der Regel eine ca. Woche.

Die Sauerstoffkonzentrationen tags und nachts unterscheiden sich deutlich (Abb. 5.6). Werden von allen Messtagen jeweils die Werte um 6:00 morgens und um 14:00 nachmittags verglichen, so zeigt sich in den Häufigkeitsverteilungen der Unterschied zwischen den Minima und Maxima des Tagesganges.

### 5.1.2 Sauerstoffkonzentrationen im Mühlenteich

Die Messungen der Sauerstoffkonzentration im Mühlenteich zeigten ähnliche saisonale Veränderungen, Tagesschwankungen und Reaktionen auf einzelne Niederschlagsereignisse (Abb. 5.7). Vor allem in der 2. Juli-Hälfte 2021 gab es eine Phase starken Sauerstoffmangels im Mühlenteich, während der die Sauerstoffwerte deutlich unter 5 mg/L lagen. Die Sauerstoffkonzentrationen im Mühlenteich la-

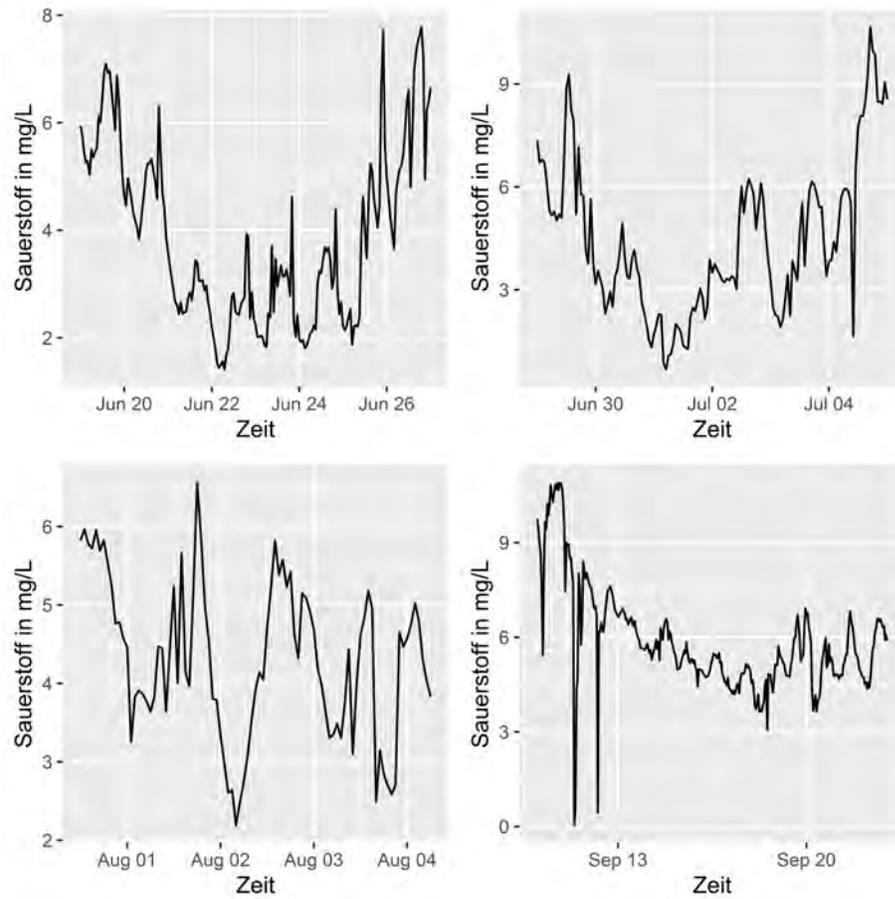


Abbildung 5.5: Ereignis mit Abnahme der Sauerstoffkonzentrationen im Krähenteich

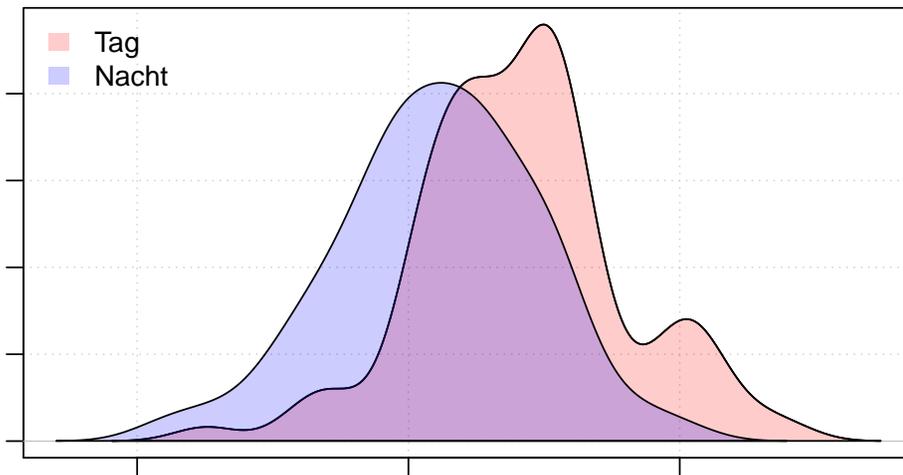


Abbildung 5.6: Vergleich der Sauerstoffkonzentrationen im Krähenteich in den frühen Morgenstunden (6 Uhr) und nachmittags (14 Uhr)

gen häufiger zwischen ca. 0.5-2 mg/L im Minimum und erreichten maximale Werte von ca. 10.5 mg/L. Die häufigsten Werte lagen zwischen 5 und 7 mg/L.

Die Zeitreihe zeigte im Mühlenteich ebenfalls ausgeprägte Tagesgänge. Insgesamt lagen die Werte niedriger als im Krähenteich. Die Häufigkeitsverteilungen von Tag- und Nachtwerten unterscheiden sich im Mühlenteich weniger als im Krähenteich.

Die Zeitreihe zeigte im Mühlenteich ebenfalls ausgeprägte Tagesgänge (Abb. 5.8). Insgesamt lagen die Werte niedriger als im Krähenteich. Die Häufigkeitsverteilungen von Tag- und Nachtwerten unterscheiden sich im Mühlenteich weniger als im Krähenteich.

Neben den Tagesgängen werden auch im Mühlenteich Ereignisse der Sauerstoffzehrung beobachtet (Abb. 5.9). Diese Ereignisse sind synchron mit denen im Krähenteich aufgetreten, waren aber deutlicher ausgeprägter und führten zu geringeren Sauerstoffkonzentrationen.

Der statistische Vergleich der Sauerstoffkonzentrationen im Krähen- und Mühlenteich zeigt, dass der Mühlenteich deutlich geringere Sauerstoffkonzentrationen aufweist. Dafür wurde eine Häufigkeitsverteilung der Sauerstoffkonzentrationen erstellt, die über die täglichen, episodischen und saisonalen Schwankungen mittelt und den zentralen Wert und die Streuung zeigt (Abb. 5.10).

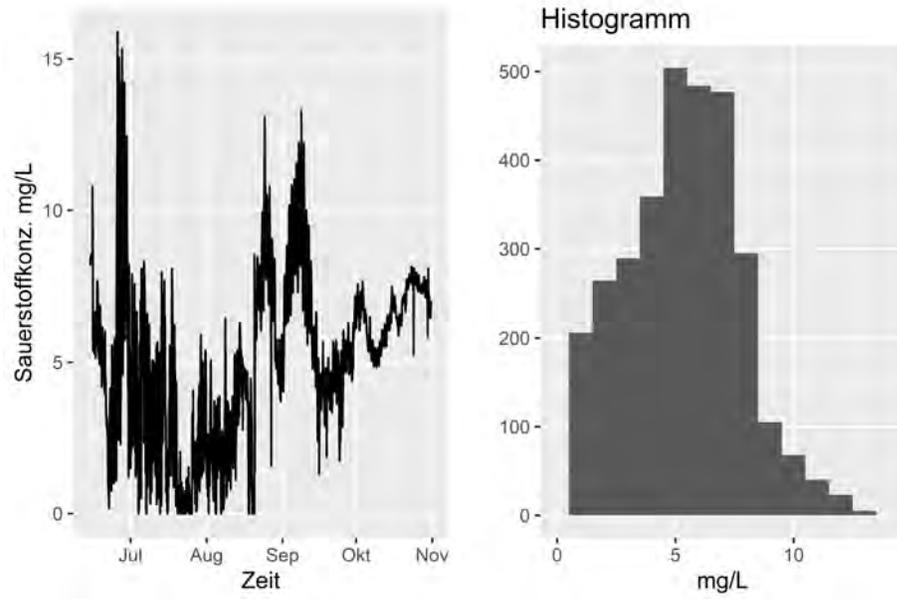


Abbildung 5.7: Zeitreihe der Sauerstoffkonzentrationen im Mühlenteich vom 4. Juni bis zum 31.10. 2021

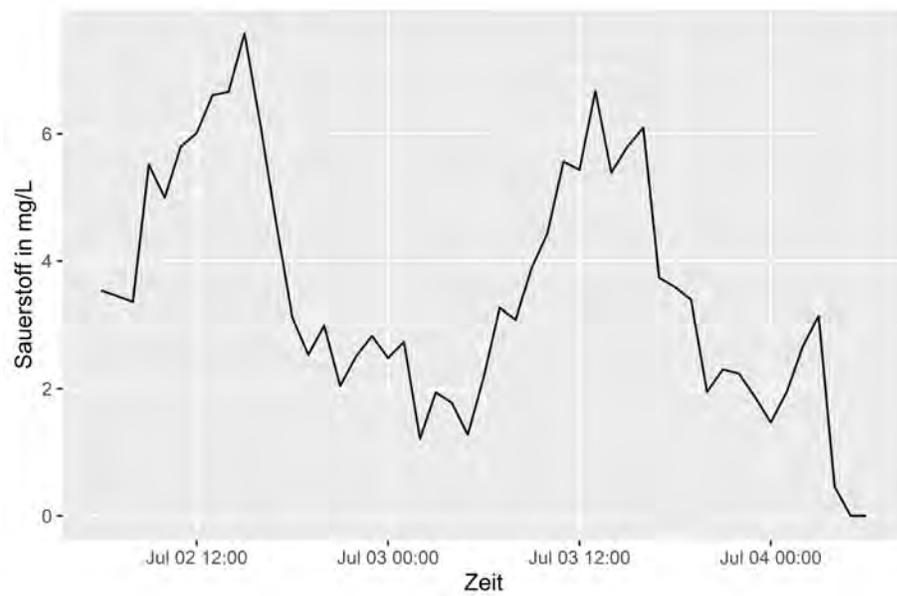


Abbildung 5.8: Tagesgänge der Sauerstoffkonzentrationen im Mühlenteich

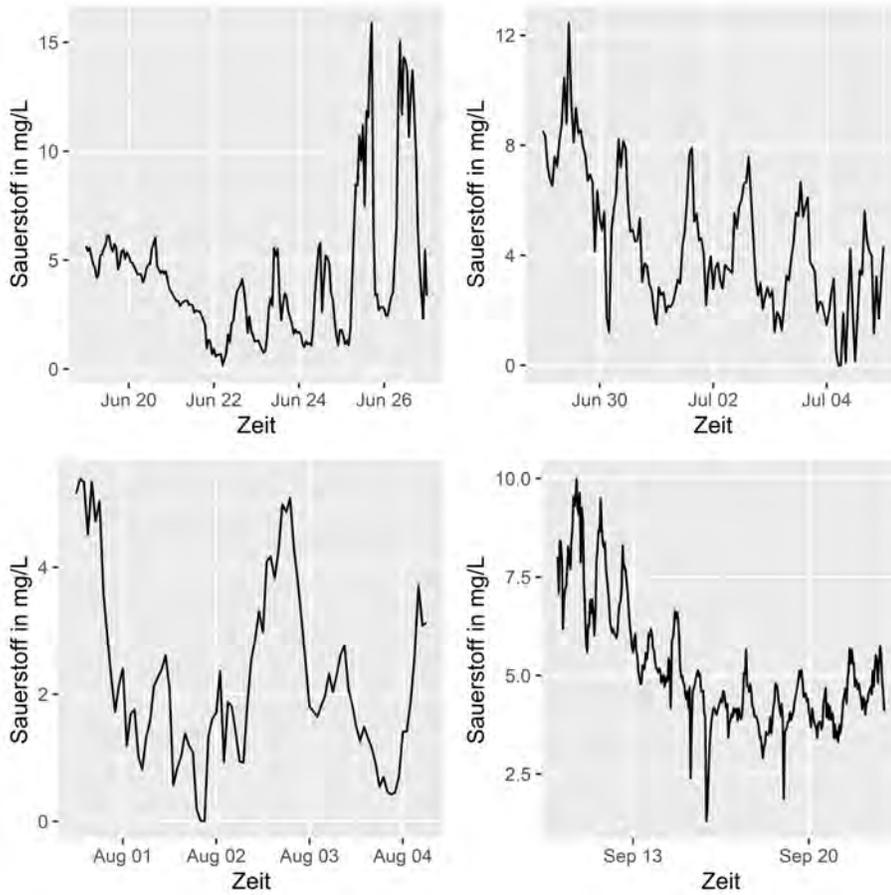


Abbildung 5.9: Ereignis mit Abnahme der Sauerstoffkonzentrationen im Mühlen-  
teich

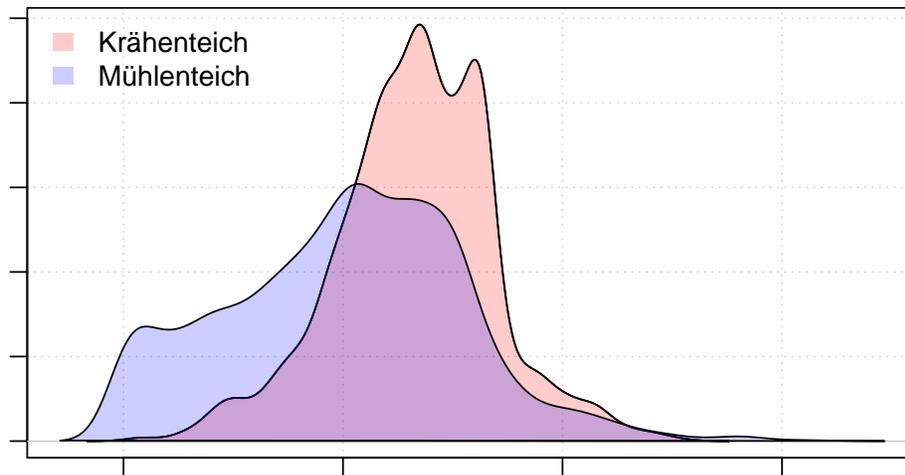


Abbildung 5.10: Vergleich der Sauerstoffkonzentrationen im Krähenteich und im Mühlenteich

## 5.2 Zusammenfassung der Sensordaten

Die Messungen zeigen einen starken Tagesgang mit einem Anstieg während des Tages und einem Abfall während der Nacht. Diese Schwankungen werden durch die Photosynthese der Wasserpflanzen verursacht. In der oberen Wasserschicht, die im Sommer wärmeres Wasser aufweist, liegen die Werte höher und schwanken stärker. In der tieferen Wasserschicht liegen die Werte konstant niedriger.

- Die Sauerstoffgehalte lagen im Juni im Mittel bei 6-8 mg/L und sind im Juli auf teilweise 2-4 mg/L gesunken. Die tägliche Schwankung beträgt ca. +/- 1.5 mg/L Sauerstoff.
- Die Messungen zeigen auch einen allmählichen Rückgang des Sauerstoffgehaltes in der Woche nach einem Starkregen. Dieses war vier mal, im Juni, Anfang Juli und je einmal im August und September der Fall.
- Die Ursache für diesen Rückgang liegt wahrscheinlich in einem Eintrag von leicht abbaubaren organischen Stoffen, die aus dem Einzugsgebiet der Wakenitz und über Nebengewässer über den Zufluss aus Wakenitz durch den Düker in den Krähenteich und Mühlenteich gelangen. Eindeutige Hinweise auf lokalisierbare Verschmutzungen einzelner Einleitungen konnten bisher nicht gefunden werden.
- Die Fracht von abbaubaren Material in den Krähenteich und Mühlenteich wird über den Biologischen Sauerstoffbedarf in 5 Tagen gemessen. Sie lag im Juni bei geringen Werten von 0 bis 1.5 mg/L und kann nach Starkregen Werte von 4.5 bis über 5 mg/L erreichen.
- Das Wasser verweilt einige Tage im Krähenteich und Mühlenteich. Die

mittlere Verweilzeit hängt stark vom Zufluss und Abfluss ab und beträgt je nach Zufluss im Mittel ca. 1 bis 4 Tage.

- Die mit dem erhöhten Abfluss nach Starkregen eingetragenen leicht abbaubaren Stoffe werden bei zunehmender Einstrahlung und Temperatur in Krähenteich und Mühlenteich abgebaut. Der Abbau über 5 Tage entspricht den gemessenen Belastungen von 4-5 mg/L. Dadurch kommt es zu geringen Sauerstoffkonzentrationen.

## 5.3 Messkampagnen

Das Wasserlabor der TH Lübeck hat ebenfalls regelmäßige Messkampagnen in Krähenteich und Mühlenteich durchgeführt. Bei insgesamt **12** Messkampagnen wurde eine Vielzahl an wasserchemischen Parametern gemessen, um die Wasserqualität genauer zu beurteilen.

### 5.3.1 Kampagne am 3.6. 2021

Die erste Kampagne wird detailliert mit Tabelle dargestellt. Die weiteren Kampagnen werden graphisch und teilweise tabellarisch in diesem Bericht dargestellt. Die Rohdaten Daten werden der Hansestadt Lübeck über die Datenportale und den Server der TH Lübeck bereitgestellt.

In der ersten Juni Woche am 3.6. 2021 wurde die erste Messkampagne durchgeführt. Dabei wurden an vier Messstellen in jeweils zwei Tiefen, einmal 30 bis 50 cm und einmal unter 150 cm im Gewässer die Vor-Ort-Parameter bestimmt und Proben für die Bestimmung der Nährstoff-Parameter  $BSB_5$ ,  $NH_4^+$ ,  $NO_2^-$  und  $PO_4^{3-}$  genommen. Zusätzlich wurde eine 100 ml Probe genommen, um nach Filtration durch einen 0,4 m Filter, die Hauptionen  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$  und  $Cl^-$  zu bestimmen. Der Parameter  $HCO_3^-$  wurde berechnet, um die Ladungsbilanz zu schließen.

Die Ergebnisse der Vor-Ort-Parameter sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Auffallend sind die pH-Werte über dem Gleichgewichtswert von 7.4, die auf Aufnahme von Kohlendioxid hindeuten und aktive Photosynthese anzeigen. Die Sauerstoffwerte steigen entsprechend entlang der Fließrichtung von der Wakenitz, über den Dükerkanal und Krähen- und Mühlenteich von 7.8 auf 12.2 mg/L an. Die Sauerstoffsättigung erhöht sich dabei von 86.8 % auf eine starke Übersättigung von 135.2 %.

Die Tabelle 5.2 zeigt die Hauptionen der ersten Kampagne. Hierbei fallen vor allem die geringen Nitrat-Konzentrationen auf, die anzeigen, dass der Stickstoff zum größten Teil über die Photosynthese in organischer Substanz gebunden wird. Die gleichmäßigen Konzentrationen von Chlorid, Bromid, Sulfat und Fluorid zeigen vor allem an, dass hier keine Zuflüsse (z. Bsp. von Regenwasser) oder Grundwasserzutritte zu deutlichen Veränderungen führen.

Die Tabelle 5.3 zeigt die Nährstoffe der ersten Kampagne. Die Phosphat-Werte

Tabelle 5.1: Vor Ort Parameter der ersten Kampagne am 3.6. 2021

Probe	Ort	°C		µS/cm	mg/L	%	°C	T.E.
		Luft-T.	pH	Leitf.	O2	Sättg.	Temp	Trübung
W 1.1	Mühlenteich	25	8.4	404	12.2	135.2	19.9	202
W 1.2	Mühlenteich	25	8.3	410	11.5	127.9	20.1	205
W 2.1	Krähenteich	25	8.0	426	10.8	117.3	19.4	213
W 2.2	Krähenteich	25	8.0	433	9.5	105.1	20.0	216
W 3.1	Düker	25	8.0	433	9.3	100.2	19.4	216
W 3.2	Düker	25	8.0	434	9.2	100.2	19.9	217
W 4.1	Wakenitz	25	8.0	434	8.4	92.0	20.0	217
W 4.2	Wakenitz	25	7.8	433	7.8	86.8	19.8	216

Tabelle 5.2: Haptionen der ersten Kampagne am 3.6. 2021

Probe	Ort	mg/L				
		Fluorid	Chlorid	Nitrat	Bromid	Sulfat
W 1.1	Mühlenteich	0.13	32.12	0.02	< 0,1	34.49
W 1.2	Mühlenteich	0.12	32.05	0.06	< 0,1	35.02
W 2.1	Krähenteich	0.14	32.43	0.04	< 0,1	34.59
W 2.2	Krähenteich	0.12	32.15	0.04	< 0,1	34.76
W 3.1	Düker	0.12	31.66	0.04	0	34.77
W 3.2	Düker	0.01	31.82	0.04	< 0,1	34.57
W 4.1	Wakenitz	0.14	32.05	0.04	< 0,1	34.39
W 4.2	Wakenitz	0.06	31.42	0.03	< 0,1	34.35

Tabelle 5.3: Nährstoffe der ersten Kampagne am 3.6. 2021

Probe	Ort	mg/L				
		Phosphat	Ortho-P.	Nitrit	NH4	BSB5
W 1.1	Mühlenteich	< 0,1	0.016	0.004	0.010	0.0
W 1.2	Mühlenteich	< 0,1	0.206	0.002	0.024	NA
W 2.1	Krähenteich	< 0,1	0.057	0.000	0.049	0.0
W 2.2	Krähenteich	< 0,1	0.032	0.003	0.029	NA
W 3.1	Düker	< 0,1	0.036	0.000	0.044	0.0
W 3.2	Düker	< 0,1	0.032	0.002	0.027	NA
W 4.1	Wakenitz	6.3E-2	0.095	0.004	0.088	0.6
W 4.2	Wakenitz	6.3E-2	0.084	0.000	0.067	NA

liegen unter 0.1 mg/L. Die Werte für gelöstes Orthophosphat zeigen einen erhöhten Wert im Hypolimnion des Mühlenteiches. Die Ammonium und die Nitritkonzentrationen sind gering und deuten an, dass keine Umwandlung von Stickstoff bei reduzierenden Bedingungen erfolgt und dass keine Verschmutzungsquelle mit Ammonium und Nitrit vorhanden ist. Die Biologische Sauerstoffzehrung in 5 Tagen liegt bei den meisten Proben bei 0.0, in der Wakenitz liegt ein geringer Wert von 0.6 mg/L vor.

### 5.3.2 Kampagnen vom 16.6.

Die zweite Messkampagne wurde nach einem Starkregen durchgeführt und gleichzeitig als detaillierte Intensivmesskampagne von Studierenden der TH Lübeck realisiert (siehe Stabenow and Besser [2021]). Bei dieser Kampagne wurde auch die Nummerierung und durchgehende Bezeichnung der Probenahmeorte entsprechend einer Karte festgelegt, die im Folgenden bei allen Kampagnen beibehalten wurde.

Die Proben wurden in allen Kampagnen an den hier dargestellten Punkten genommen. Bei Intensivkampagnen wurden jeweils 4 Proben aus Mühlenteich, Krähenteich, 3 Proben aus dem Dükerkanal am Anfang, in der Mitte und am Ende und eine Probe an der Moltkebrücke genommen. Bei den 2-wöchigen Kampagnen wurden Wakenitz (Moltkebrücke), Dükerkanal, Krähenteich und Mühlenteich je einmal beprobt.

Die zweite Kampagne am 16.6. zeigt einige wichtige Eigenschaften des Systems in Tab. 5.4. Die Vor-Ort Parameter elektr. Leitfähigkeit und Sauerstoff können zur ersten Charakterisierung verwendet werden. Die elektrische Leitfähigkeit aller Proben ist bis auf eine Ausnahme homogen, das heißt, dass hier keine anderen Quellen zum Beispiel von Regenwasser oder anderen Zuflüssen auftreten. Lediglich die Probenahmeort Mühlenteich 4 in der Nähe des Mühlentors unterscheidet sich. Hier findet ein Zutritt von Wasser geringerer Leitfähigkeit

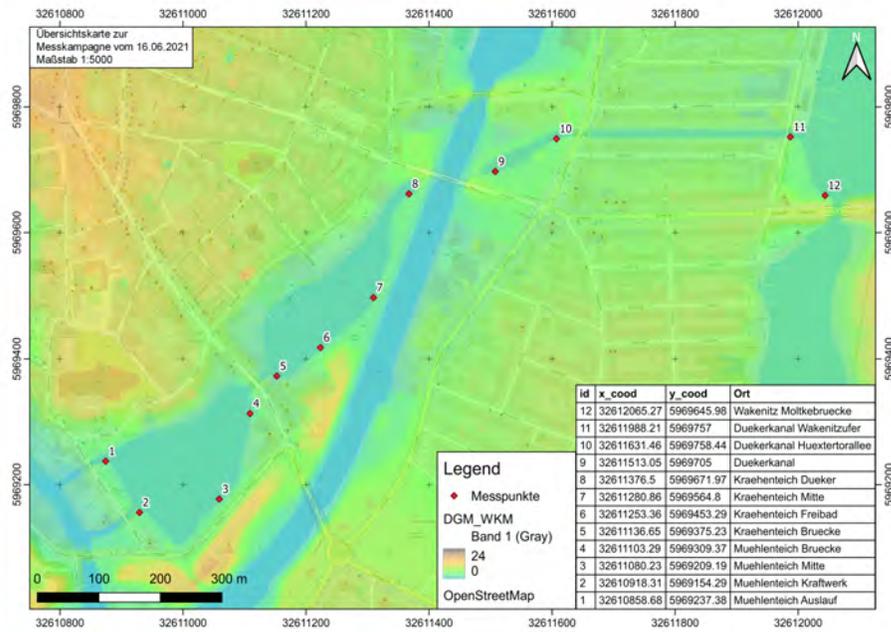


Abbildung 5.11: Probenahmepunkte ab Moltkebrücke bis zum Muehlenteich, Karte erstellt von W. Stabenow (2021)

Tabelle 5.4: Vor Ort Parameter der zweiten Kampagne am 16.6. 2021

Probe	Ort	°C		µS/cm	mg/L	%	°C	T.E.
		Luft-T.	pH	Leitf.	O2	Sättg.	Temp	Trübung
W1.1	Mühlenteich	21	7.7	465	5.2	60.2	22.1	233
W1.2	Mühlenteich	21	7.6	470	4.7	54.3	22.1	235
W2.1	Krähenteich	23	7.9	463	7.1	84.5	23.2	232
W2.2	Krähenteich	23	7.7	465	5.5	64.1	22.4	233
W3.1	Dükerkanal	22	8.1	463	10.0	115.0	22.9	231
W3.2	Dükerkanal	22	8.1	464	8.0	93.8	23.0	232
W4.1	Moltkebrücke	23	8.2	463	10.4	120.6	22.9	232
W4.2	Moltkebrücke	23	7.7	469	7.1	83.1	23.0	235

Tabelle 5.5: Nährstoffe der zweiten Kampagne am 16.6. 2021

Probe	Ort	mg/L				
		Phosphat	Ortho-P.	Nitrit	NH4	BSB5
W1.1	Mühlenteich	0.364	0.534	0.033	0.189	1.1
W1.2	Mühlenteich	0.493	0.595	0.036	0.287	NA
W2.1	Krähenteich	0.364	0.348	0.021	0.176	1.1
W2.2	Krähenteich	0.493	0.494	0.019	0.296	NA
W3.1	Dükerkanal	0.364	0.364	0.014	0.108	2.2
W3.2	Dükerkanal	0.493	0.493	0.011	0.114	NA
W4.1	Moltkebrücke	0.892	0.892	0.012	0.161	3.1
W4.2	Moltkebrücke	0.474	0.474	0.016	0.305	NA

statt. Dieser Zutritt wurde bei mehreren Kampagnen beobachtet. Er ist aber nicht auffällig in Bezug auf Nährstoffe oder Verschmutzungsparameter.

Die Ergebnisse der Vor-Ort-Parameter sind in Tabelle 5.4 dargestellt.

Die Tabelle 5.5 zeigt die Nährstoffe der zweiten Kampagne. Die Konzentrationen der Nährstoffe Phosphat und Ammonium zeigen höhere Werte in den tieferen Proben (H für Hypolimnion). Dies zeigt eine Freisetzung von Phosphat aus bodennahen Sedimenten im Krähenteich und im Mühlenteich an.

Die Kampagne vom 16.6. ist auch deswegen aufschlussreich, da sie mit einer Episode von Sauerstoffabnahme nach Starkregen einhergeht, siehe Abb. 5.12. Die Parameter, die die Verringerung der Sauerstoffkonzentration verursacht haben können, konnten mit dieser Kampagne untersucht werden. Hier ist vor allem auffällig, dass der  $BSB_5$  Wert, der biologische Sauerstoffbedarf in 5 Tagen durch leicht abbaubare organische Substanz, erhöht ist.

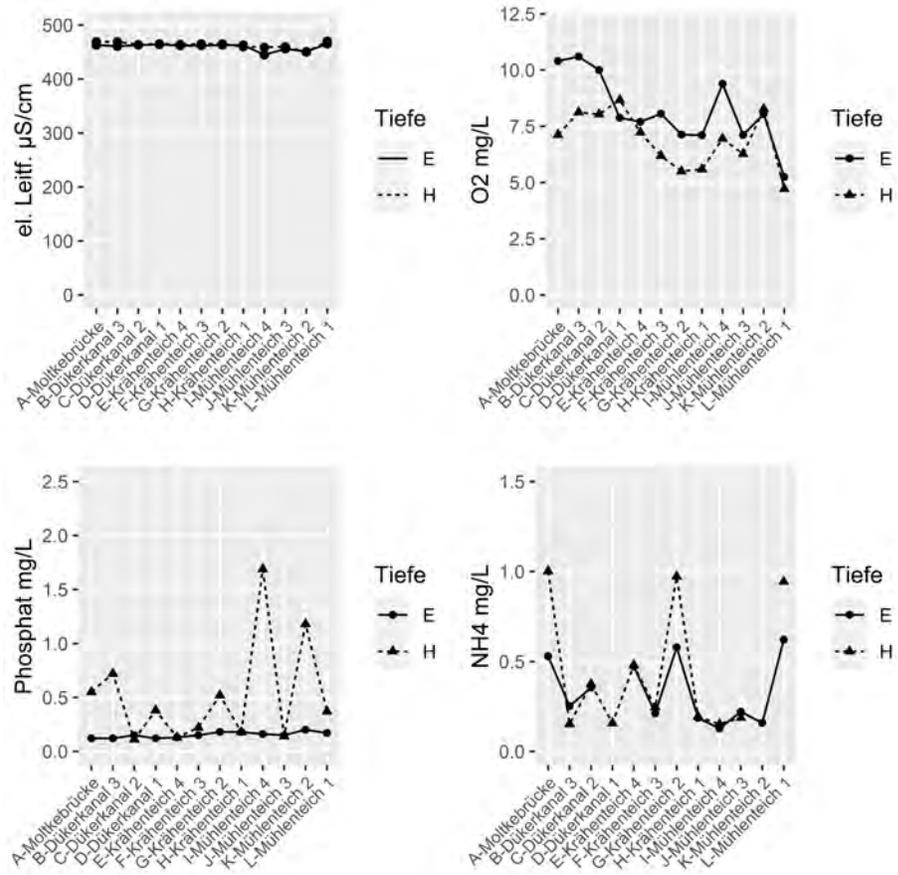


Abbildung 5.12: Nährstoffe, 2. Kampagne am 16.6. 2021

Es ist also davon auszugehen, dass durch den Starkregen Nährstoffe und organisches Material in den Krähenteich und Mühlenteich gelangt sind, die durch Abbau des organischen Materials die beobachtete Sauerstoffzehrung verursachen. Ortho-Phosphat wird durch die biologische Aktivität in der oberen Wasserschicht aufgenommen und nimmt daher entlang des Fließweges ab (Abb. 5.13).

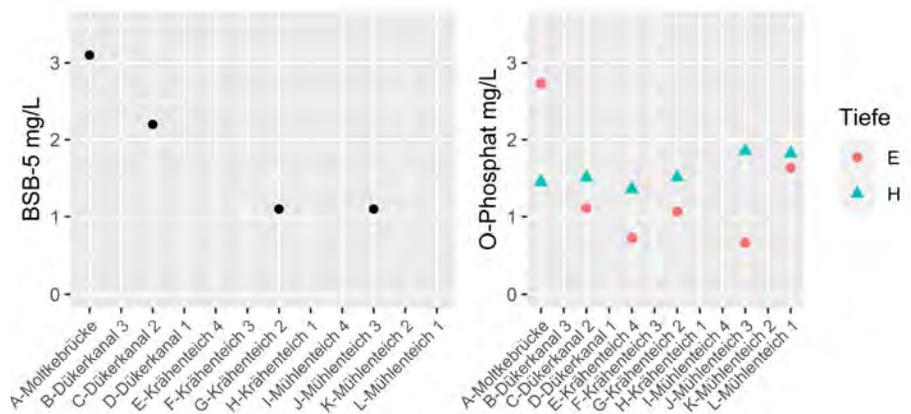


Abbildung 5.13: Nährstoffe, 2. Kampagne am 16.6. 2021

### 5.3.3 Kampagnen vom 24.6.

Die dritte Kampagne wurde am 24.6. durchgeführt. Es wurden die Wakenitz, der Dükerkanal, der Krähenteich und der Mühlenteich, jeweils am Ablauf beprobt. Die elektrische Leitfähigkeit zeigt homogene Verhältnisse ohne Zuflüsse an, siehe Abb. 5.14. Die Sauerstoffverhältnisse sind verbessert, die Konzentration liegt im Krähenteich bei ca. 5 mg/L. Es ist deutlich die Durchmischung durch den Dükerkanal zu erkennen. Am Ablauf des Mühlenteiches nimmt die Sauerstoffkonzentration durch die Photosynthese wieder zu, allerdings nur in der oberen Wasserschicht, im Hypolimnium ist eine leichte Abnahme beobachtet.

Die Kampagne vom 24.6. zeigte insgesamt geringere Belastungen von  $BSB_5$  und Nährstoffe. Dadurch wurde deutlich, dass der Zustrom von organischem Material nicht konstant sondern episodisch ist und von Zeiträumen abgelöst wird, in denen die  $BSB_5$  Belastung aus der Wakenitz sehr gering ist und unter 1 mg/L liegt. Im Krähenteich und Mühlenteich wurde ein  $BSB_5$  von unter 1 mg/L für den Krähenteich und unter 2 mg/L für den Mühlenteich gemessen, Abb. 5.15. Diese Werte können noch nicht abgebaute organische Substanz aus den Zuflüssen der vorangegangenen Tage darstellen oder aus internen Quellen stammen (Schwimmbad, Freisetzung von Organik aus dem Sediment oder aus dem Gewässer von Gewässerpflanzen und Organismen).

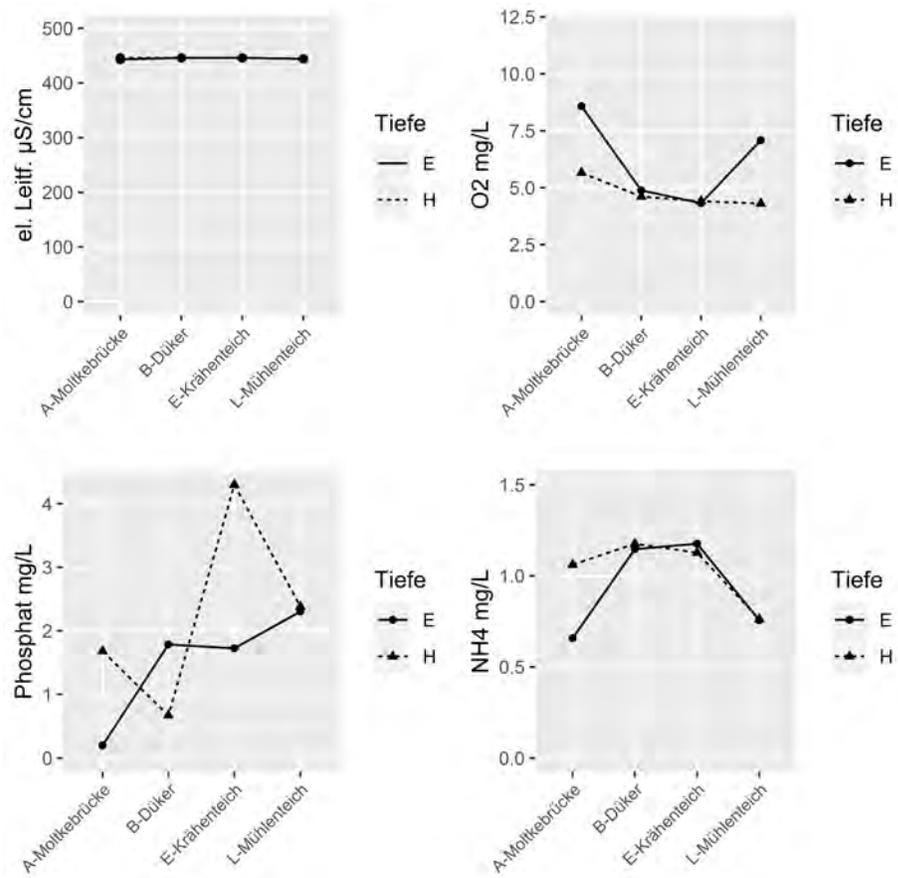


Abbildung 5.14: Nährstoffe, 3. Kampagne am 24.6. 2021

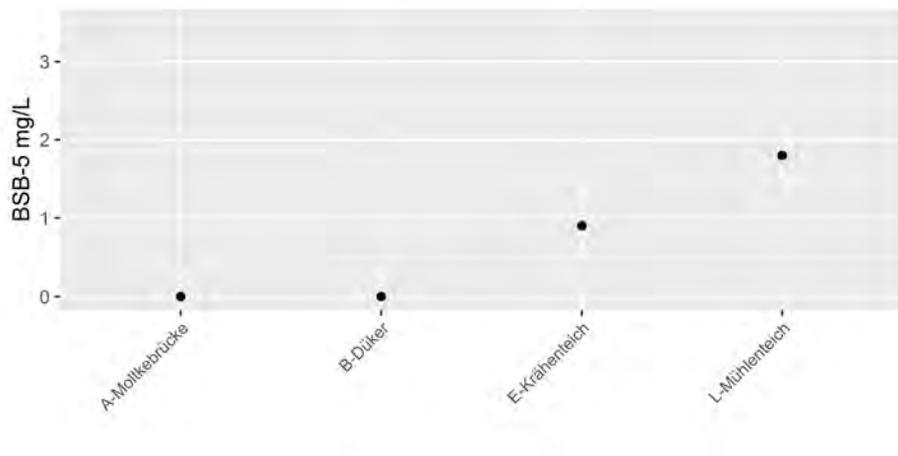


Abbildung 5.15: Nährstoffe, 3. Kampagne am 24.6. 2021

### 5.3.4 Die Kampagnen vom Juli 2021

Im Juli wurden zwei Kampagnen im Abstand von 2 Wochen durchgeführt. Die gesamten Ergebnisse beider Kampagnen für Vor-Ort Parameter, Nährstoffe und Hauptionen sind im Anhang angegeben.

Die Kampagne vom 8. Juli wies gute Sauerstoffsättigungswerte und geringe Belastungen auf (Abb. 5.16 und 5.17). Im Vorfeld dieser Kampagne hatte es keinen Starkregen gegeben. Zu Zuflüssen von  $BSB_5$  waren gering und lagen unter 5 mg/L.

Die Kampagne vom 23. Juli hingegen wies abnehmende Sauerstoffkonzentrationen im Krähen- und Mühlenteich auf und hohe  $BSB_5$  Belastungen im Zufluss an der Wakenitz und im Dükerkanal. Dies führte ebenfalls zu erhöhten  $BSB_5$  Werten im Krähen- und Mühlenteich, in denen das organische Material jedoch dann abgebaut wurde. Dadurch konnte eine genau dem  $BSB_5$  Wert entsprechende Zehrung von Sauerstoff beobachtet werden.

Die elektrische Leitfähigkeit zeigt keine Inhomogenitäten, daher ist davon auszugehen, dass keine Zuflüsse von Regenwasser direkt in den Krähen- und Mühlenteich auftreten, sondern, dass die Belastungen über Wakenitz und Dükerkanals in den Krähenreich und Mühlenteich gelangen.

Die Sauerstoffwerte liegen wegen der hohen Photosyntheseleistung noch im Bereich von 5 bis 10 mg/L im Krähenreich, sinken im Mühlenteich jedoch in der Tiefe (unter 1 m unter der Wasseroberfläche) auf unter 5 mg/L ab. Die Gesamtposphatkonzentrationen liegen sehr hoch. Vor allem in der oberen Wassersäule. Dies zeigt an, dass das Phosphat zumindest nicht allein aus der Mobilisierung aus den Bodensedimenten in den Gewässern stammt, sondern aus Zuflüssen. Vor allem im Mühlenteich wird ein deutlicher Anstieg von Ammoni-

um in der tieferen Wassersäule beobachtet. Das kann über das Gleichgewicht mit  $NH_3$  zu fischtoxischen Konzentrationen führen. Diese Bedingungen zeigen Abbau und Umwandlung von Stickstoff unter sauerstoffarmen Bedingungen an.

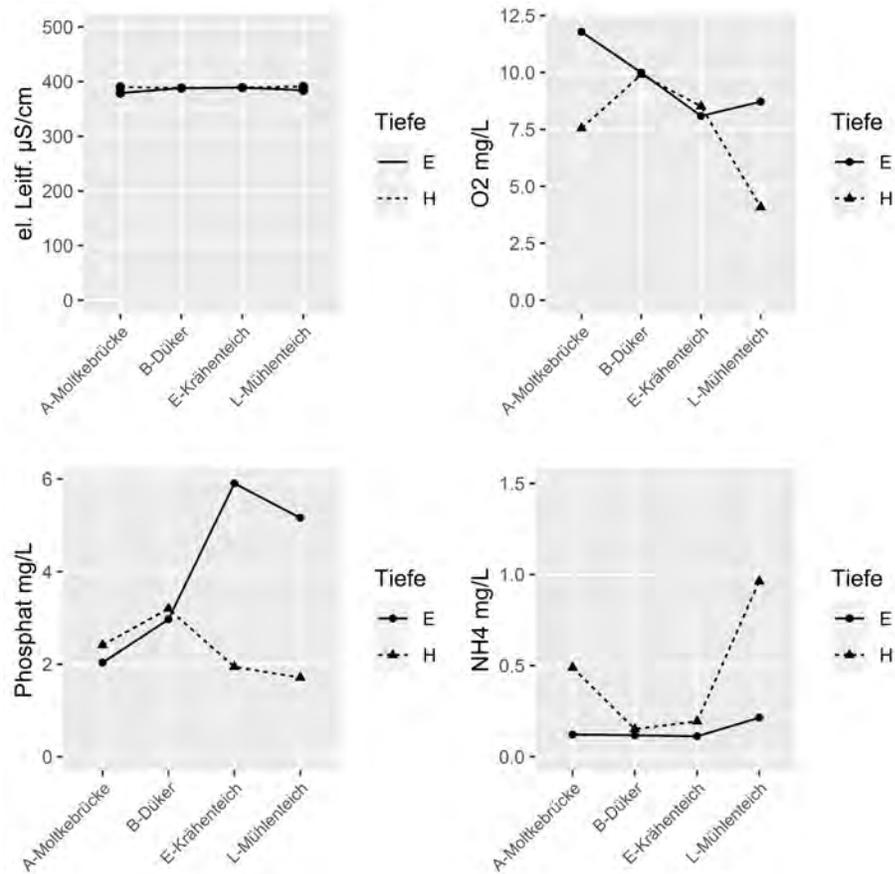


Abbildung 5.16: Nährstoffe, Kampagnen im Juli 2021

Die Kampagnen vom Juli sind aufschlussreich, da sie die Variabilität der Zuflüsse und die Reaktion des Systems Krähenteich und Mühlenteich auf diese veränderten Zuflüsse sehr deutlich zeigen. Vor allem die sehr hohen Konzentrationen von  $BSB_5$  zeigen eine Belastung mit organischem Material an. Die Werte nehmen von der Molkebrücke (10 mg/L) über den Dükerkanal (über 5 mg/L) in den Krähenteich ab und steigen im Mühlenteich wieder leicht an. Das organische Material wird im Krähen- und Mühlenteich unter Sauerstoffverbrauch abgebaut und führt zu Sauerstoffarmut. Gleichzeitig werden dadurch Nährstoffe in beiden Gewässern freigesetzt (Orthophosphat, Ammonium), die wiederum erneutes Algen- und Pflanzenwachstum auslösen.

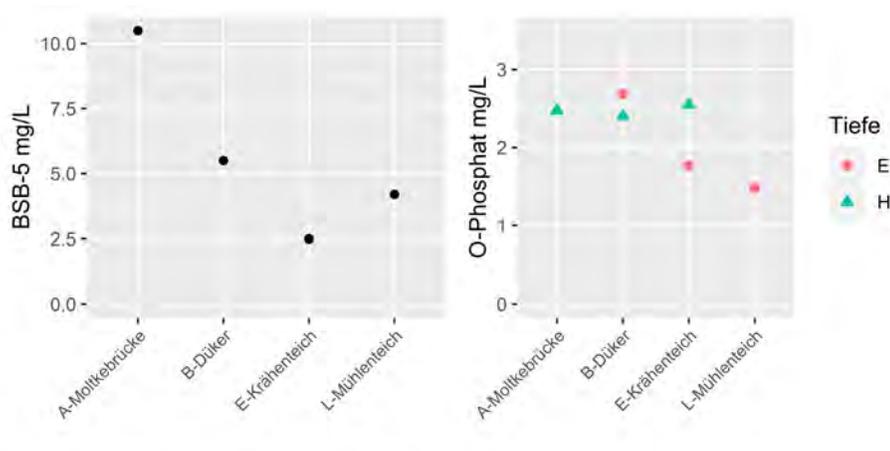


Abbildung 5.17: Nährstoffe, Kampagnen im Juli 2021

### 5.3.5 Die Kampagnen vom August 2021

Im August wurden zwei Kampagnen im Abstand von 2 Wochen durchgeführt. Die gesamten Ergebnisse beider Kampagnen für Vor-Ort Parameter, Nährstoffe und Hauptionen sind im Anhang angegeben.

Die Kampagne vom 2. August wies gegenüber dem Juli nur leicht verbesserte Sauerstoffsättigungswerte und Belastungen von organischer Substanz und Nährstoffen bei immer noch relativ hohen Werten auf (Abb. 5.18 und 5.19). Die Zuflüsse von  $BSB_5$  lagen zwischen 4,5 und 6,9 mg/L. Bei der ersten Kampagne lagen die  $BSB_5$  Werte in der Wakenitz unter denen im Krähen- und Mühlenteich. Dies deutet darauf hin, dass kurz vor der Kampagne ein erhöhter Zufluss erfolgt war, dessen Werte im Krähenteich- und Mühlenteich noch nicht vollständig abgebaut waren, während über die Wakenitz Wasser mit besserer Qualität zufluss.

Die Kampagne vom 18. August zeigte hingegen sehr geringe Belastungen mit organischer Substanz, messbar über den biologischen Sauerstoffbedarf in 5 Tagen. Diese lagen durchweg an allen Messstellen bei fast Null und waren nicht messbar. Die Sauerstoffwerte im Krähen- und Mühlenteich waren jedoch durch die Belastungen aus der ersten Augushälfte gering.

Die Kampagnen vom August bestätigen die Beobachtungen vom Juli 2021, da sie die Variabilität der Zuflüsse und die Reaktion des Systems Krähenteich und Mühlenteich auf diese veränderten Zuflüsse sehr bestätigen. Vor allem die Anfang August erneut erhöhten Konzentrationen von  $BSB_5$  zeigen eine Belastung mit organischem Material an. Die Reaktion auf diese Belastungen erfolgt träge und zeigt sich ca. 4 bis 10 Tage nach dem Zufluss in verringerten Sauerstoffwerten.

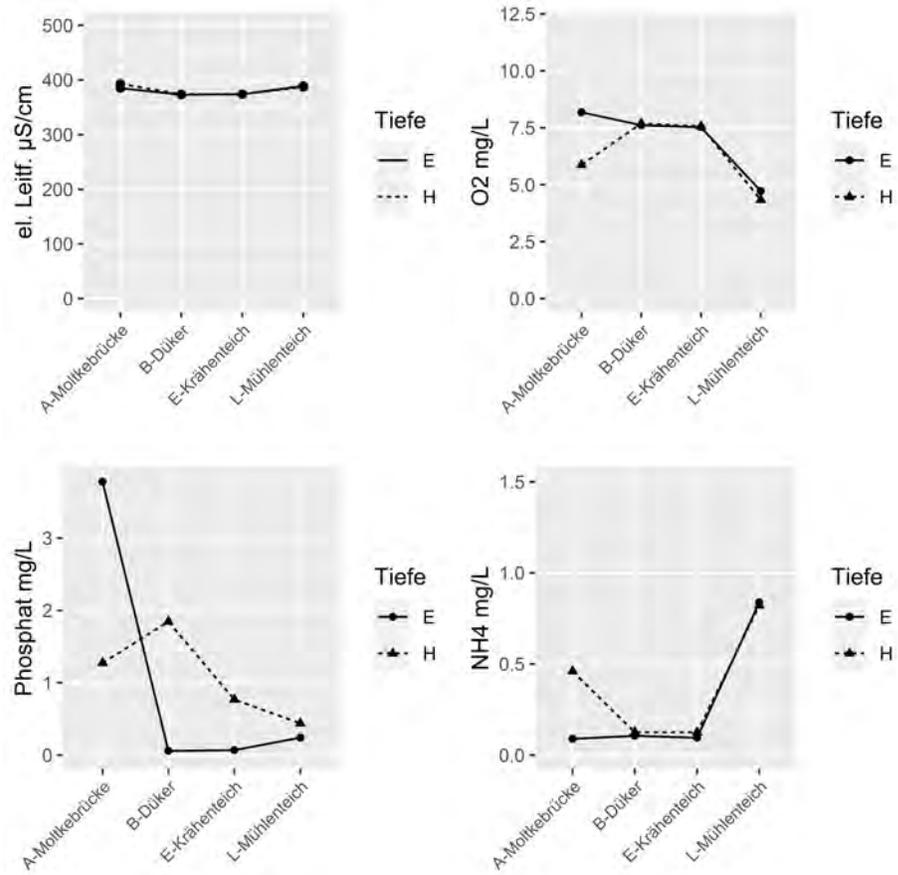


Abbildung 5.18: Nährstoffe, Kampagnen im August 2021

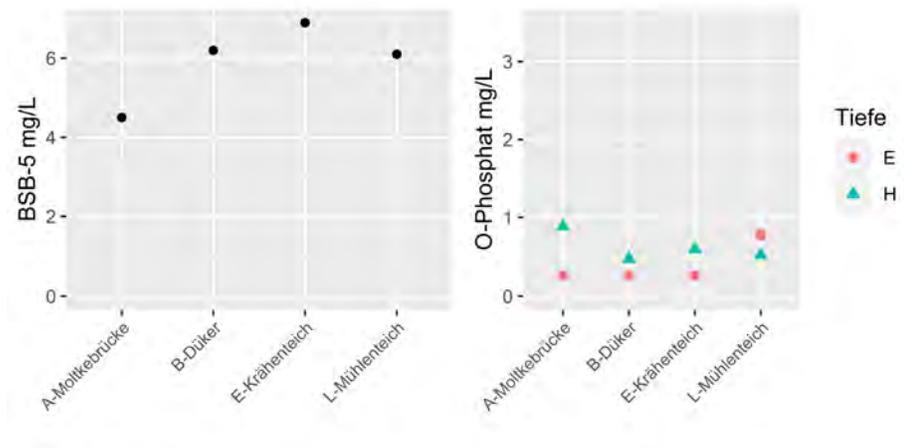


Abbildung 5.19: Nährstoffe, Kampagnen im August 2021

### 5.3.6 Die Kampagne vom September 2021

Die letzte Kampagne wurde am 1.9. 2021 durchgeführt. Erneut lagen hier erhöhte Werte von  $BSB_5$  im Zufluss an der Wakenitz (8 mg/L) vor. Die Werte im Dükerkanal, Krähenteich und Mühlenteich lagen bei ca. 2 mg/L und weniger und zeigen bereits einen weitgehenden Abbau an (Abb. 5.20 und 5.21). Entsprechend steigt die Konzentration der über den Abbau freigesetzten Nährstoffe in Krähenteich und Mühlenteich.

Die Sauerstoffkonzentrationen fallen entlang der Strecke von der Wakenitz über den Dükerkanal und über Krähenteich und Mühlenteich von 10 mg/L auf ca. 5 mg/L ab. Die Sauerstoffwerte im Epilimnion liegen durchweg höher als im Hypolimnion, im Krähenteich gibt es jedoch eine weitgehende Durchmischung, im Mühlenteich zeigt sich eine, wenn auch schwache Stratifizierung.

Die Kampagnen vom Juni bis September zeigen insgesamt ein konsistentes Bild von schwankenden Zuflüssen von  $BSB_5$  und einer verzögerten Reaktion von Krähenteich und Mühlenteich in den 5 bis 10 Tagen nach diesem Zufluss. In Folge von Abbau von organischer Substanz werden Nährstoffe wie Phosphat und Ammonium freigesetzt, die wiederum in die Synthese von organischer Substanz gehen. Die Sauerstoffwerte werden neben dem Tagesgang von Photosynthese und Respiration von diesen episodischen Ereignissen beeinflusst.

### 5.3.7 Synthese

Es wurden neben Sauerstoffgehalt, Temperatur, pH und Salzgehalt, auch die Hauptionen und Nährstoffe, insbesondere Nitrat, Ammonium, Phosphat bestimmt. Der Biologische Sauerstoffbedarf in 5 Tagen wurde als Maß für die Belastung mit leicht abbaubaren und sauerstoffzehrenden Substanzen im Labor

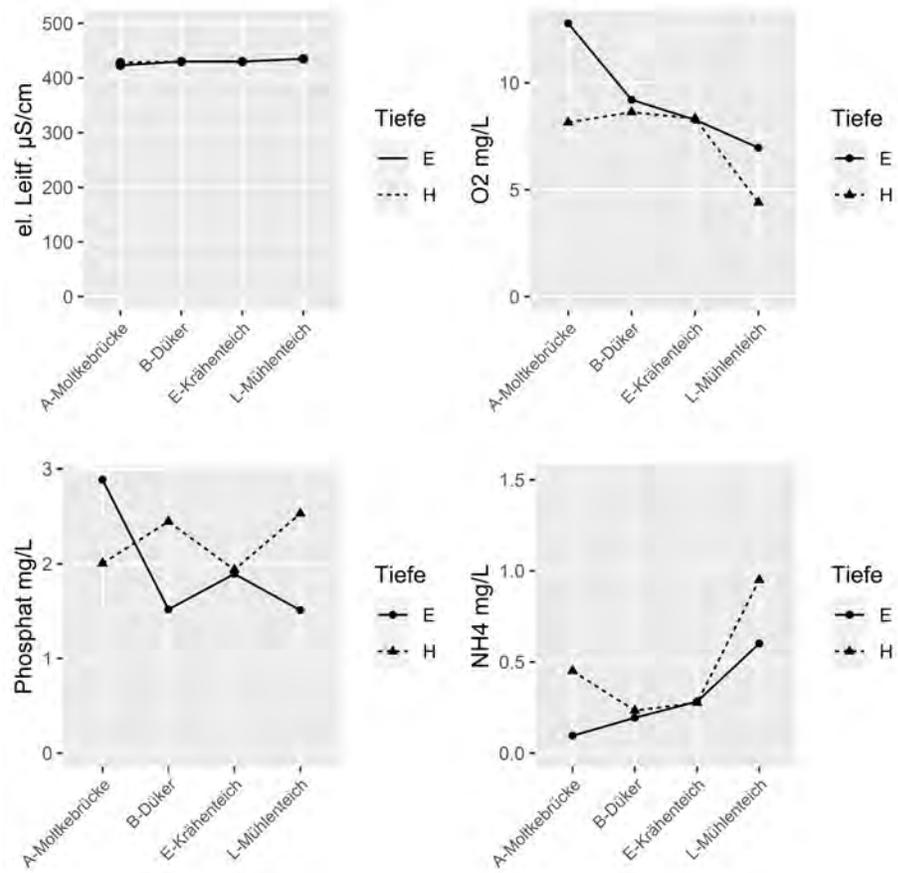


Abbildung 5.20: Nährstoffe, Kampagne im September 2021

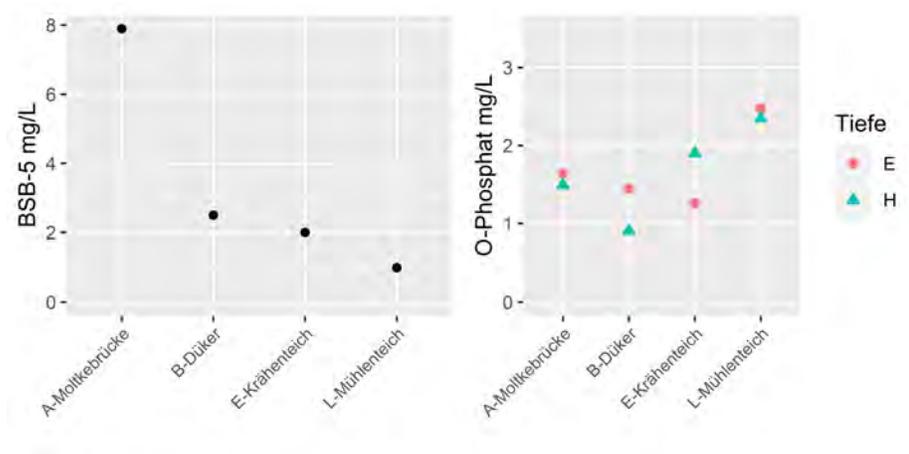


Abbildung 5.21: Nährstoffe, Kampagnen im September 2021

bestimmt.

- Der bestimmende Prozess für die Wasserqualität in Krähenteich und Mühlenteich sind die Zuflüsse organischen Material über die Wakenitz. Die Zuströme von Wasser mit erhöhten  $BSB_5$  Werten sind episodisch und an Starkregenereignisse gekoppelt.
- Diese Ergebnisse zeigten eine erhöhte Fracht von Phosphat aus dem Ratzeburger See. Diese Belastung ist durch frühere Untersuchungen für die Wasserrahmenrichtlinie bekannt. Der Abfluss aus dem Ratzeburger See enthält kaum Nitrat.
- Aus den Nebenflüssen der Wakenitz Lüdersdorfer Graben, Herrenburger Graben, Grönau und Niemarker Landgraben erfolgt ein Eintrag von Wasser, das wenig Phosphate enthält, aber mittlere Konzentrationen von Nitrat aufweist.
- Durch die Kombinationen beider Nährstoffe kommt es bei Sonneneinstrahlung und vorhandenen Kohlenstoffquellen zur verstärktem Pflanzen und Algenwachstum, da es keinen begrenzenden Minimumfaktor mehr gibt. Das starke Pflanzen- und Algenwachstum wird also durch eine Kombination und Mischung von Nährstoffen in der Wakenitz aus unterschiedlichen Quellen verursacht.

## 5.4 Intensivkampagnen

Es wurden gezielt Intensivkampagnen durchgeführt, um für die Fragestellung wichtige Fragen zu beantworten. Die Kampagne vom 16.6. 2021 hat die Verteilung der Einträge direkt nach einem Starkregen erfasst. Diese Kampagne hat gezeigt, dass der Haupteintrag aus der Wakenitz selbst und wahrscheinlich nicht

aus Fehleinleitungen erfolgt. Diese Kampagne ist bereits detailliert beschrieben worden.

Eine weitere Kampagne sollte klären helfen, ob es am Dükerauslass zu einer Entgasung von Sauerstoff kommt. Dazu wurden detaillierte Profile der Sauerstoffkonzentration erfasst. Zudem wurde ab Juli durch die Stadt Lübeck eine Belüftung am Zufluss in den Krähenteich installiert. Die detaillierten Messungen von Profilen der Sauerstoffkonzentration sollten zeigen, ob und wie stark diese Belüftung die Sauerstoffkonzentrationen erhöht.

Die Intensivkampagne wurde am 19. August ganztägig im Krähenteich und Mühlenteich mit 2 Kajaks durchgeführt (Abb. 5.22). Auf beiden Kajaks waren Messgeräte für Sauerstoff und Temperatur installiert. Mit den Kajaks wurden Querprofile über den Krähen- und Mühlenteich sowie Tiefenprofile von Temperatur und Sauerstoffkonzentration gemessen.



Abbildung 5.22: Intensivkampagne in Krähenteich und Mühlenteich am 19. August 2021

Die gemessenen Profile im Krähenteich werden in Abb. 5.23 gezeigt. Es wurden zwischen 14:05 und 15:06 insgesamt 10 Profile gemessen. Die Messung erfolgt mit einem Sauerstoffsensor von WTW direkt vom Kajak aus. Dabei wurde der Sensor ins Wasser abgesenkt und die Messung durchgeführt.

Die Daten der 10 Profile zeigen jeweils oben in rot die Wassertiefe - daran ist zu erkennen, wann der Sensor im Wasser war und in welcher Tiefe die Messung erfolgt - die untere blaue Kurve zeigt die Sauerstoffsättigung (Abb. 5.24). Die Daten zeigen deutlich den Sauerstoffeintrag durch die Belüftung (siehe Sauerstoffwerte des Profils 3 in Abb. 5.24). Das Sauerstoffniveau vor der Belüftung lag zudem an den Profilen 1 und 2 niedriger. Eine Erhöhung der Sauerstoffsättigung um ca. 5 bis 7 % kann beobachtet werden. Dies entspricht einem absoluten Eintrag von ungefähr 0.5 mg/L. In den Profilen unterhalb der Belüftung kann eine geringfügige aber abnehmende Erhöhung in Folge noch nicht vorhandener

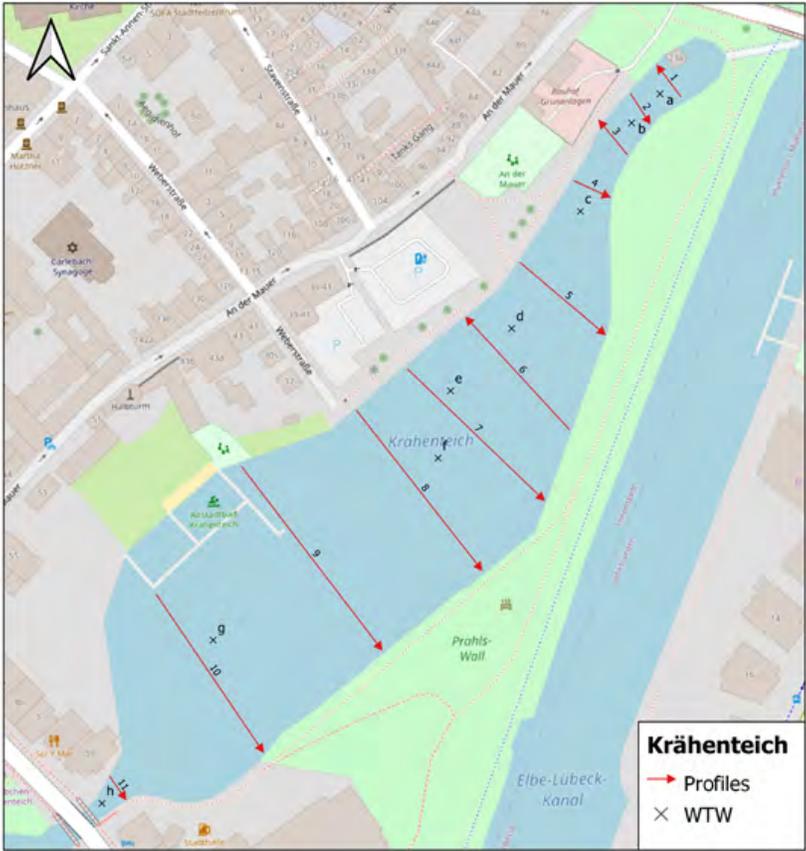


Abbildung 5.23: Intensivkampagne in Krähenteich und Mühlenteich am 19. August 2021, Messprofile Krähenteich

Durchmischung beobachtet werden. Im unteren Bereich des Krähenteiches in Richtung Mühlentor nehmen die Sauerstoffsättigungen ab.

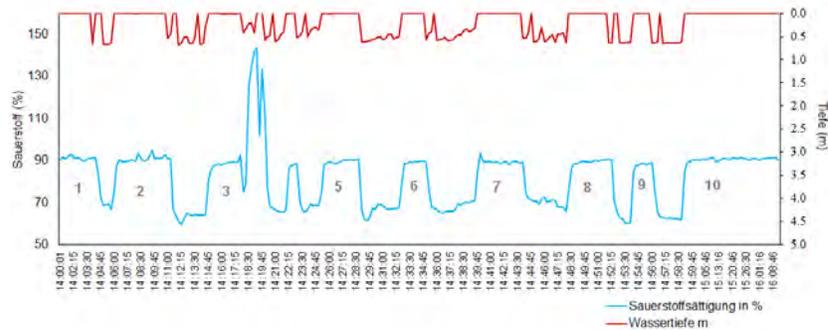


Abbildung 5.24: Intensivkampagne in Krähenteich und Mühlenteich am 19. August 2021, Daten der Messprofile am Krähenteich

Die Messungen im Mühlenteich umfassten die sechs Querprofile. Mit zusätzlichen Tiefenprofilen sollten die Tiefenabhängigkeit der Sauerstoffkonzentrationen im Mühlenteich untersucht werden. Die Karte zeigt die Lage der Quer- und der Tiefenprofile, die mit Buchstaben gekennzeichnet sind (i bis p), siehe Abb. 5.25.

Die Querprofile (QP14 und QP16) zeigten eine geringe Variabilität der Sauerstoffwerte über ein Querprofil, Abb. 5.26. Die Messwerte in Profil 14 reichten von 8 bis 6.5 mg/L, höhere Werte wurden dabei im Bereich der stärksten Verkräutung am Anfang des Profils (in Fahrtrichtung des Kajaks) am westlichen Ufer gemessen. Am Profil 16 wurde ein ähnlicher Wert über das gesamte Profil in der oberen Wasserschicht von ca. 7 mg/L gemessen.

Sehr aufschlussreich waren die Tiefenprofilmessungen an den Profilen TP k,l,m und n die in Abb. 5.26 gezeigt werden. Die Sauerstoffkonzentration nahm in allen Profilen mit der Tiefe ab und erreicht am Grund des Mühlenteiches in ca. 2-3 Meter Tiefe 0 bis 2 mg/L (Profil m). Dies zeigt deutlich, dass es am Grund des Mühlenteiches durch Abbau von organischer Substanz zu Sauerstoffzehrung kommt. Die Beobachtung ist umso erstaunlicher als eine klare und deutliche Temperaturschichtung nicht beobachtet werden kann. Die Temperatur- und Dichteschichtung ist labil. Dennoch kann von deutlich geringeren Sauerstoffwerten im Mühlenteich unterhalb einer Tiefe von 1 m unter Wasseroberfläche ausgegangen werden.

Die folgenden Schlussfolgerungen konnten aus den Intensivkampagnen gezogen werden:

- Die Entgasung am Düker durch Druckentlastung ist gering und beträgt maximal 0.2 bis 0.4 mg/L und ist damit nicht für ein mögliches Fischerben verantwortlich. Die Sauerstoffkonzentration wird im wesentlichen durch den Zufluss aus der Wakenitz über den Dükerkanal und durch in-

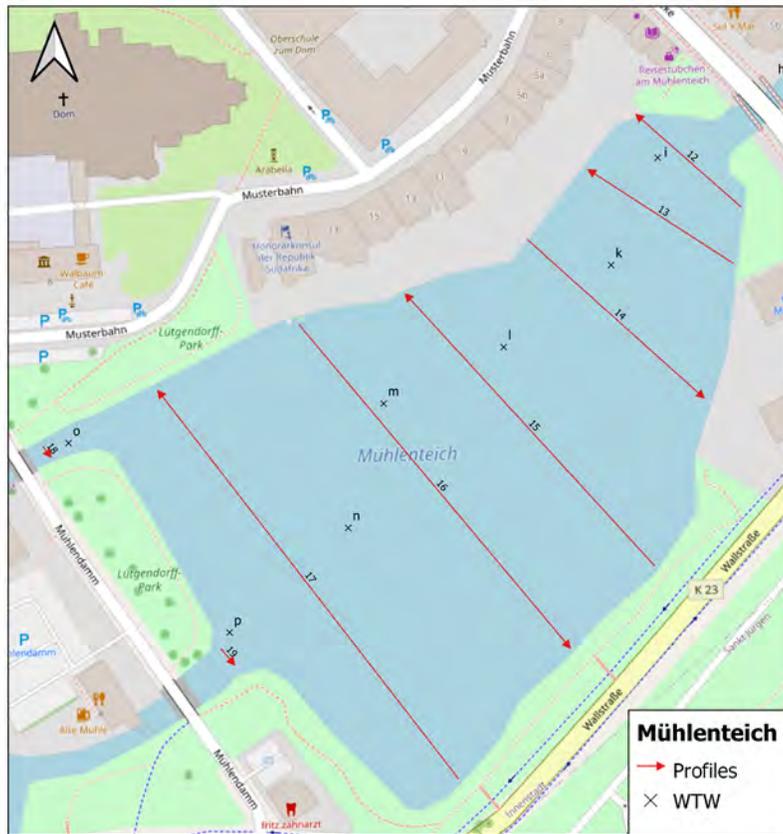


Abbildung 5.25: Intensivkampagne in Krähenteich und Mühlenteich am 19. August 2021, Karte der Messprofile im Mühlenteich

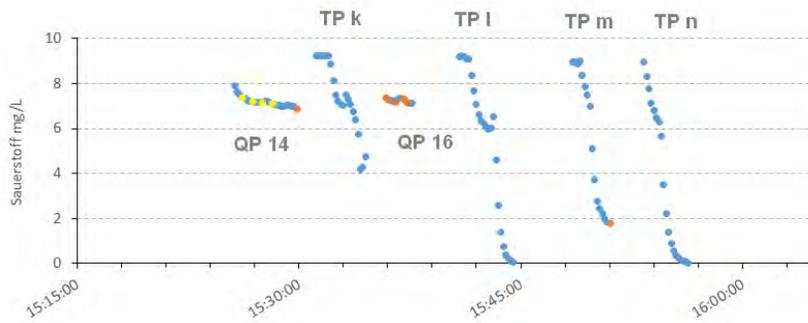


Abbildung 5.26: Intensivkampagne in Krähenteich und Mühlenteich am 19. August 2021, Daten der Messprofile im Mühlenteich

terne Prozesse beeinflusst.

- Die Belüftung bewirkt eine geringe aber messbare Verbesserung der Sauerstoffkonzentration im Krähenteich. Bisher sind 90 m Schlauchlänge verlegt. Die Wirkung der Belüftung beträgt ca. 0.2 bis 0.5 mg/L. Um eine Belüftung des Krähenteiches in kritischen Situationen zu gewährleisten, wären ca. 500 m Schlauchlänge erforderlich, mit denen eine Erhöhung um 2.5 mg/L erreicht werden könnte.
- Die Sauerstoffkonzentration nimmt mit der Tiefe ab und erreicht vor allem im MÜhlenteich in den Sommermonaten am Grund sehr geringe Werte von unter 2 mg/L. Die deutet eine Respiration und Verarbeitung von organischem Material am Grund beider Teiche an.

## 5.5 Auswertung der Kampagnen der Stadt

Die Daten der Messkampagnen der Lübeck Port Authority entlang der Wakenitz wurden ebenfalls ausgewertet, auch wenn dies nicht Teil des Auftrages war. Die Protokolle der Messungen entlang der Wakenitz wurden digitalisiert und dargestellt. Die Kilometrierung ist in 5.27) angegeben.

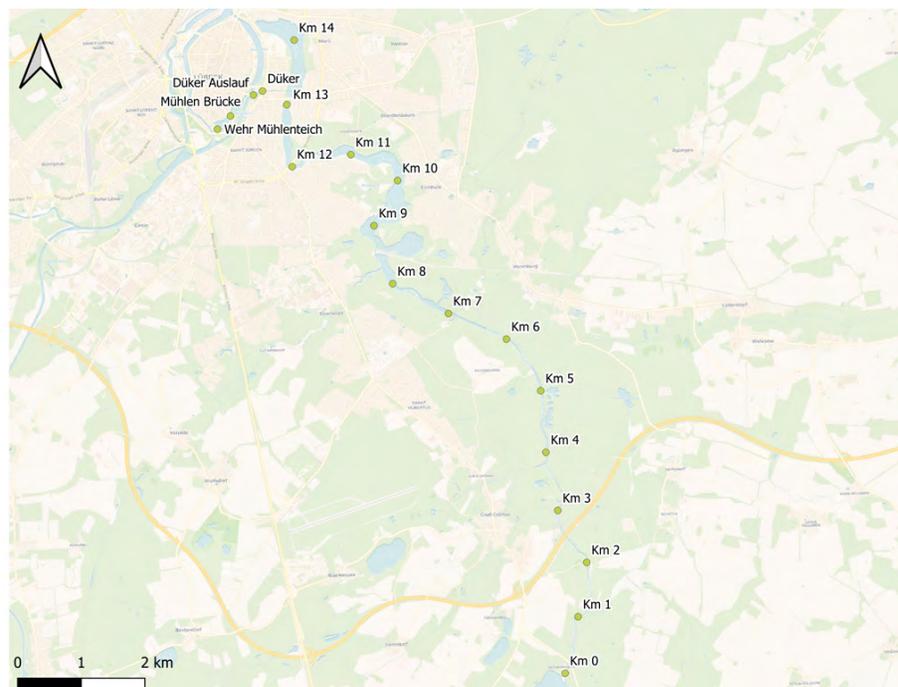


Abbildung 5.27: Messungen der Wasserqualität entlang der Wakenitz

Die Messungen zeigen für die verschiedenen Monate in 2021 zunächst eine Abnahme der Sauerstoffgehalte ab dem Ratzeburger See bis km 7 (Abb. 5.28).

Durch die kartierte Zunahme der Makrophyten ab km 7, ungefähr ab dem Zulauf aus dem Lüdersdorfer Landgraben, steigt im Sommer die Sauerstoffkonzentration tagsüber durch Photosynthese deutlich an. Es ist davon auszugehen, dass die Werte ebenso wie im Krähen- und Mühlenteich nachts durch Respiration abfallen. Ab dem Düker bis in den Krähen- und Mühlenteich nehmen die Werte dann entweder zu, wenn Makrophyten Sauerstoff produzieren oder ab, wenn es durch Respiration oder durch eine Belastung mit organischer Substanz in den Teichen zu einer Abnahme des Sauerstoffs kommt.

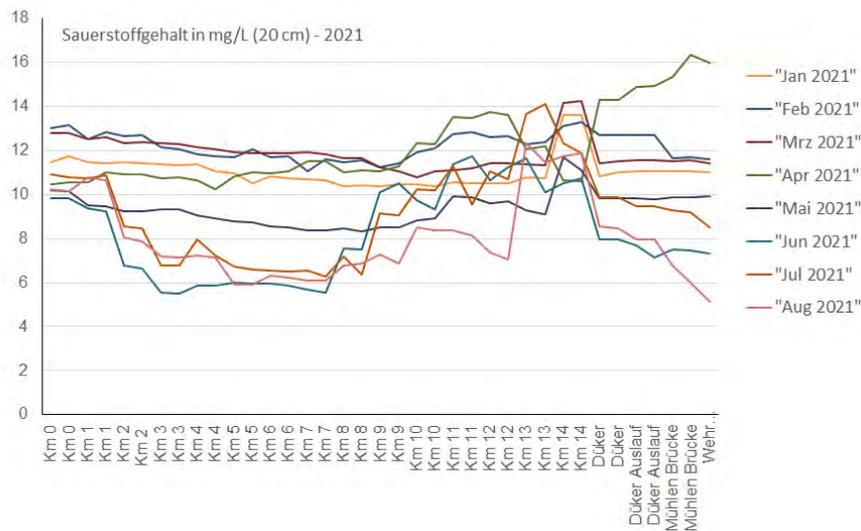


Abbildung 5.28: Messungen der Wasserqualität entlang der Wakenitz

Die Daten aus 2020 bestätigen dieses Bild (Abb. 5.29) und zeigen im September eine starke Abnahme der Sauerstoffkonzentrationen im Dükerkanal, Krähenteich und Mühlenteich und im Dezember eine Stabilisierung auf dem Wert, der an der Moltkebrücke in der Wakenitz gemessen wurde.

## 5.6 Messung der Algenkonzentration

Im August 2021 wurde von der Firma BBB Moldaenke ein Algenmessgerät geliehen. Dieses Gerät bestimmt die Konzentration von Grünalgen und Blaualgen /Cyanobakterien durch Messungen der Fluoreszenzanregung mit unterschiedlichen Dioden). Die Messungen mit dem Gerät wurden während eines Bootsfahrung der Wakenitz Ende August durchgeführt. Dabei wurden mit hoher zeitlicher Auflösung die Konzentrationen von Blaualgen gemessen und dann kartographisch dargestellt, siehe Abb. 5.30.

Die Darstellung der Blaualgenkonzentration zeigt, dass zunächst ab dem Ablauf

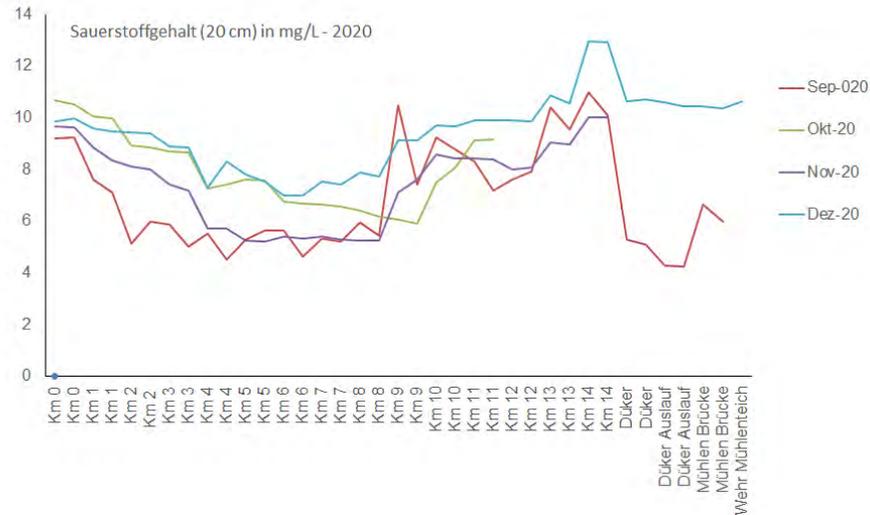


Abbildung 5.29: Messungen der Wasserqualität entlang der Wakenitz

des Ratzeburger Sees sehr geringe Konzentrationen von unter  $5 \mu\text{g/L}$  beobachtet werden. Bei km 3 (Absalonshorst) gibt es eine erste deutliche Zunahme der Konzentration auf über  $10 \mu\text{g/L}$ . Diese Zunahme liegt im Bereich von zwei westlichen Zuflüssen zur Wakenitz.

Die Konzentrationen fallen wieder und bleiben bis km 7 unter  $10 \mu\text{g/L}$  steigen hier jedoch flussabwärts des Lüdersdorfer Landgrabens stark an und erreichen im Bereich des Kleinen Sees Konzentrationen von mehr als  $100 \mu\text{g/L}$ .

Die Konzentrationen fallen dann wieder auf Werte unter  $10 \mu\text{g/L}$  ab. Unterhalb der Moltkebrücke steigt der Wert schließlich erneute auf über  $35 \mu\text{g/L}$  an. Insgesamt lassen sich drei Zonen mit erhöhten Werten bei km 3, 7 bis 9 und 11 bis 14 erkennen.

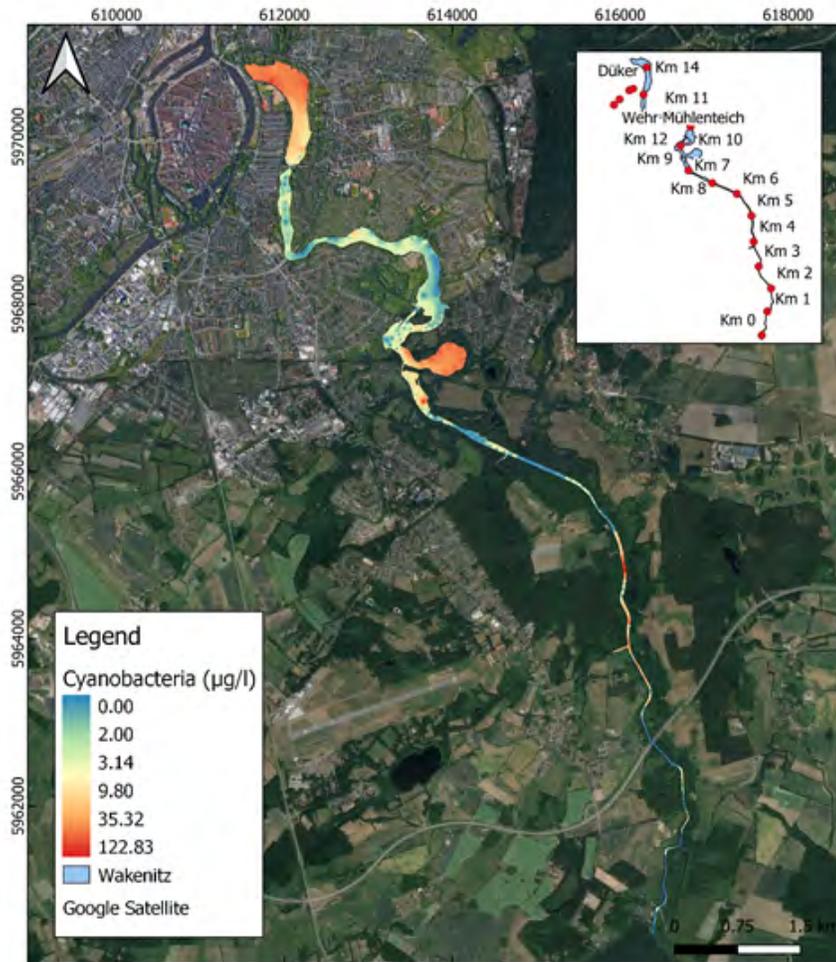


Abbildung 5.30: Messungen der Wasserqualität entlang der Wakenitz, Bestimmung der Konzentration von Blaualgen



## 6. Diskussion

Die Untersuchungen sollten dazu dienen, mögliche Maßnahmen zu definieren, mit denen die Wasserqualität von Krähenteich und Mühlenteich verbessert werden kann.

Grundlegend war es zunächst, ein besseres Verständnis der Prozesse zu erlangen. Das ist mit der Kampagne 2021 gelungen. Die Ursachen der Sauerstoffarmut konnten durch die Kampagnen besser verstanden und dargestellt werden. Grundlegend ist der Zufluss von leicht abbaubarem organischem Material und von Nährstoffen vor allem nach Starkregen, auch wenn die Quellen dieser organischen Substanz und die Eintragspfade und Prozesse noch nicht geklärt werden konnten.

Ebenso konnte die interne Dynamik besser erkannt werden. Im Krähenteich und Mühlenteich kommt es zum Abbau der leicht abbaubaren Substanzen, deren Menge über den  $BSB_5$  messbar ist. Dadurch werden erneut Nährstoffe freigesetzt.

Es konnte auch gezeigt werden, dass es am Grund vor allem des Mühlenteiches aber in geringerem Maße auch des Krähenteiches zu einer Zehrung von Sauerstoff kommt. Die Schichtung des Wassers ist nur schwach ausgeprägt, daher kann es bei Fließprozessen zu einer Durchmischung von flacherem, sauerstoffreicherem Wasser mit sauerstoffarmem Wasser aus der Tiefe kommen.

Die Makrophyten zeigen im Sommer einen deutlichen Tagesgang von Photosynthese und Respiration. Am Tage werden dadurch hohe Sauerstoffkonzentrationen erreicht. Dadurch wird ebenfalls Kohlendioxid gebunden und der pH-Wert kann auf Werte deutlich über 8 ansteigen. Das ist relevant da der pH-Wert auch das Gleichgewicht von Ammonium, einem Pflanzennährstoff und Ammoniak beeinflusst.

Die Belüftung von Krähenteich und Mühlenteich durch Wind ist wegen der Lage, Größe und Tiefe stark eingeschränkt. Den Verlusten durch Respiration am Grund und Zehrung durch Abbau organischer Substanz kann also nicht viel Reaerationsrate entgegengesetzt werden.

Eine große Rolle spielt die Verweilzeit des Systems Krähenteich und Mühlenteich. Diese wird durch das Verhältnis von Durchfluss zu Volumen bestimmt und liegt

ca. bei 4-5 Tagen. Eine Rechnung zeigt die Relevanz: Erfolgt ein Zufluss von biologisch leicht abbaubaren Material, messbar als  $BSB_5$  in Höhe von mehr als 5 mg/L, so wird dieses nach Definition in 5 Tagen abgebaut und erzeugt eine Zehrung von 5 mg/L (oder mehr bei höheren Werten). Der mittlere Wert der Sauerstoffkonzentration beträgt 5 bis 7 mg/L. Somit kann es in den fünf Tagen nach dem Eintrag zu einer Verringerung von 5 mg/L Sauerstoff im Wasser kommen, wenn keine Erhöhung aus anderen Quellen oder Prozessen erfolgt. Eine Erhöhung kann durch die sogenannte Reaeration über Wind und Wellen über die Oberfläche erfolgen. Wegen der geringen Fließgeschwindigkeit und der für einen ursprünglichen Fluss relativ großen Tiefe erfolgt über diesen Weg nur eine geringe Belüftung. Eine weitere Quelle ist die Photosynthese, diese wird jedoch über Nacht durch Respiration wieder weitgehend aufgezehrt. Dahingegen gibt es eine weitere Senke, die in der Zehrung von Sauerstoff über die Bodensedimente erfolgt.

Insgesamt ist das System Krähenteich und Mühlenteich damit ein sehr labiles System, das durch Belastungen leicht in Sauerstoffarmut geraten kann.

## 7. Maßnahmen

Mit der ersten Studie sollten auf der Basis der Ergebnisse erste mögliche Maßnahmen beschrieben werden.

### 7.1 Kurzfristige und technische Lösungen

Kurzfristige und technische Lösungen könnten innerhalb eines Jahres umgesetzt werden und für die folgende Saison eine Verbesserung bringen. Sie erfordern aber Investitionen und stellen eine ‘end-of-pipe’ Lösung dar, die ein vorhandenes Problem teilweise durch Gegenmaßnahmen kuriert. Sie sollten daher in Verbindung mit mittelfristigen Steuerungs- und langfristigen Bewirtschaftungsmaßnahmen gesehen werden.

- Eine kurzfristig wirksame Maßnahme besteht in der Belüftung am Auslass des Dükers. Eine Versuchsanlage zur Belüftung über einen Kompressor wurde unter Federführung der LPA und mit technischer Hilfe der Entsorgungsbetriebe erstellt, die ab 16.8. 2021 in Betrieb ging. Die Anlage wurde mit Messdaten der Messkampagne dimensioniert. Mit der Belüftung kann bei Bedarf Sauerstoff in den Krähenteich und Mühlenteich eingebracht werden. Nach ersten Daten der Sauerstoffsensoren ist die Wirksamkeit der Belüftung erkennbar. Die Belüftung trägt ca. 0.2 bis 0.5 mg/L Sauerstoff in den Krähenteich ein. Auch wenn diese Menge gering ist, so kann sie doch helfen, in kritischen Situationen ein Fischsterben zu verhindern, wenn durch die Belüftung eine Unterschreitung eines kritischen Wertes von 2.5 mg/L vermieden werden kann.
- Es wird empfohlen, die Schlauchlänge von ca. 90 m auf 500 m zu erhöhen. Ebenso müsste eine technische Anpassung der Luftzufuhr vorgenommen werden, um Energie zu sparen. Eine feste Einrichtung mit Lärmschutz wird empfohlen.
- Es wird empfohlen die Sensoren mit Messbojen beizubehalten und weiter zu betreiben. Das Messsystem hat sich sehr bewährt und ermöglicht eine stündliche Überwachung des Zustandes. Das Messsystem könnte und sollte verwendet werden, die Belüftung zu steuern und gezielt bei Sauerstoffarmut zu belüften.

- Es ist empfehlenswert, auch für den Mühlenteich eine Belüftung zu installieren. Auch diese sollte mit Lärmschutz realisiert werden und könnte ebenfalls mit den Sensoren gezielt gesteuert werden.
- Eine Untersuchung der Strömungsverhältnisse mit umweltfreundlichen Markierstoffen (Tracern) wird empfohlen, um die Verteilung von Sauerstoff nach der Einspeisung und Belüftung sowie die Strömungsverhältnisse besser zu verstehen.

## 7.2 Bewirtschaftungsmaßnahmen

Verbesserungen können auch durch bessere Steuerung erreicht werden.

- Es wird empfohlen, die Abflussverhältnisse am Krähen- und Mühlenteich wesentlich besser zu erfassen und zu messen. Die Daten können verwendet werden, um die Abflüsse und damit auch die Verweilzeit besser zu steuern und damit eine Verarmung an Sauerstoff in den beiden Teichen zu vermeiden. In Zukunft sollten die Aspekte der Wasserqualität dabei wenn möglich berücksichtigt werden.
- Es ist bekannt, dass die Zuflüsse von  $BSB_5$  haltigem Wasser über den Dükerkanal ein wichtiger Faktor sind. Bei hohen  $BSB_5$  Werten in der Wakenitz könnte auch erwogen werden, das Wasser über den Falkendamm abzulassen und nicht über den Dükerkanal in Krähen- und Mühlenteich zu lassen.
- Für eine bessere Bewirtschaftung wird empfohlen, ein Modell der Sauerstoffkonzentration von Mühlenteich und Krähenteich zu entwickeln, das mit den vorhandenen Messdaten kalibriert wird. Dieses Modell kann die schon qualitativ vorhandenen Prozesse Reaeration, Seebodenatmung, Zehrung, Photosynthese, Respiration quantitativ bestimmen und damit eine Vorhersage der Sauerstoffkonzentrationen ermöglichen. Mit dem Modell können Maßnahmen auf ihre erwartete Wirkung evaluiert und bewertet werden. Mögliche Sauerstoffarmut kann frühzeitig erkannt und prognostiziert werden.

## 7.3 Mittelfristige Maßnahmen

Als mittelfristige Maßnahme wäre auch die Schaffung von Rückhalteräumen an den Zuflüssen zu erwägen. Eine Machbarkeitsstudie für Retentionsräume für Nährstoffe wurde von Studierenden der TH Lübeck erstellt (siehe Kasichke and Osterhoff [2021]). Mit Rückhalteräumen für Nährstoffe könnte der Eintrag von Phosphat, der aus Erosion über landwirtschaftliche Flächen und Partikeltransport bei Hochwasser erfolgt, verringert werden. Eine erste Abschätzung zeigt, das mit diesen Maßnahmen der Eintrag von Phosphat und organischer Substanz um 25 bis 35 % verringert werden könnte (Abb. 7.1). Es wird empfohlen, die Machbarkeit und das Verhältnis von Kosten zu Wirkung für solche dezentralen Maßnahmen zu prüfen.

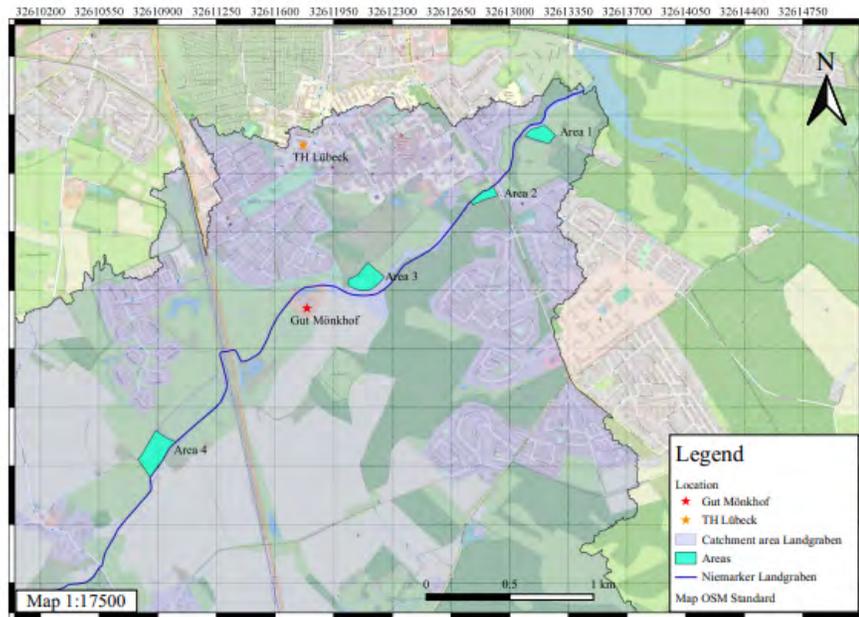


Abbildung 7.1: Rückhaltemaßnahmen für Nährstoffe am Niemarker Landgraben

## 7.4 Langfristige Maßnahmen

Eine zentrale langfristige Maßnahme besteht in der Reduzierung von Nährstoffeinträgen aus dem Einzugsgebiet, für welche die Quellen durch die Messungen inzwischen teilweise bekannt sind. Weitere Messungen werden empfohlen, um die Quellen auf einzelne Zuflüsse noch näher eingrenzen zu können. Eine enge Zusammenarbeit mit den Wasser- und Bodenverbänden bei der Umsetzung der Ziele der Wasserrahmenrichtlinie bezüglich der Nährstoffeinträge wird empfohlen.



# Literaturverzeichnis

Kimberly Kasichke and Lisa Osterhoff. Artificial wetland design for niemarker landgraben. Report, TH Lübeck, 2021.

Ingrid Schalies. Wasserbaumaßnahmen im mittelalterlichen und neuzeitlichen lübeck. *Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Archäologie des Mittelalters und der Neuzeit*, 21:73–86, 2009. ISSN 1619-1471.

Wencke Stabenow and Lisa Besser. Water quality of lübeck city lakes krähenteich and mühlenteich. Report, TH Lübeck, 2021.