



universität
wien

DIPLOMARBEIT / DIPLOMA THESIS

Titel der Diplomarbeit / Title of the Diploma Thesis

**„Synthetische Eisenkomplexe als Modelle für
natürliche aquatische Huminstoffe: Untersuchung der
Bioverfügbarkeit des Eisens für einzellige marine
Algen“**

Verfasst von / submitted by

Alexander Valda

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of

Magister der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat.)

Wien, 2017

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears
on the student record sheet:

A 190 412 423

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Lehramtsstudium UF Physik UF Chemie

Betreut von / Supervisor:

ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. Regina Krachler

Danksagung

Für die Betreuung dieser Diplomarbeit und die hilfreichen Rückmeldungen bedanke ich mich sehr herzlich bei ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. Regina Krachler.

Ein besonderer Dank gilt Ewelina Orlowska, MSc für ihre Unterstützung und die gute Zusammenarbeit im Zuge dieser Diplomarbeit.

Bei Mag. Dr. Franz Jirsa und Christof Plessl, MSc bedanke ich mich für ihre Hilfsbereitschaft und ihre Unterstützung bei der Eisenbestimmung der Huminstoffproben.

Weiters möchte ich mich bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Umwelt- und Radiochemie für die zuvorkommende Atmosphäre bedanken.

Für das Korrekturlesen dieser Arbeit bedanke ich mich bei Maximilian Fritsche.

Des weiteren bedanke ich mich für die Zusammenarbeit in diversen Praktika, Seminaren, Übungen und bei der Vorbereitung auf Prüfungen bei
Andrea Schreiber, Claudia Sommer, Doris Glatz, Dorothea Lübke, Flavio del Santo, Florian Schmidt, Gregor Brunner, Günter Pollak, Ivana Nenadovic, Julia Pieler, Lukas Perner, Marie-Theres Kalab, Martin Krikl, Maximilian Fritsche, Michael Wind, Mirella Rangger, Nikolas Knotz, Oliver Gajsek, Philipp Petti, Stefan Amlacher.

Zusammenfassung

Huminsäuren erfüllen wichtige Funktionen in Böden und Gewässern. Unter anderem dienen sie als natürliche Chelatliganden für Übergangsmetallionen. Sie greifen durch Komplexbildung in die Verwitterung der Minerale ein und beeinflussen stark die Löslichkeit und Bioverfügbarkeit von Mangan, Kupfer, Zink und anderen Metallen, besonders aber von Eisen. Eisen ist essentiell für fast alle Lebewesen, seine Bioverfügbarkeit in Böden und Gewässern wird durch pH und Sauerstoffgehalt reguliert. Unter den Bedingungen des offenen Ozeans bildet sich sehr schwerlösliches $\text{Fe}(\text{OH})_3$, d.h. das Eisen neigt dazu, auszufallen, zu sedimentieren und die durchlichtete Zone rasch zu verlassen. Die Primärproduktion im Ozean hängt daher von der Anwesenheit organischer Komplexliganden ab, die das Eisen in Lösung halten, sodass es in der durchlichteten Zone in ausreichender Konzentration vorhanden und bioverfügbar bleibt. Besonders in Küstengewässern spielen - aus terrestrischen Lebensräumen stammende - Huminsäuren eine große Rolle. Diese bilden sehr stabile, im Meerwasser gut lösliche Komplexe mit $\text{Fe}(\text{III})$. Allerdings ist über die Bioverfügbarkeit des an Huminsäuren gebundenen Eisens sehr wenig bekannt. Es wird wegen der großen Stabilität dieser Komplexe (deren Molekülmassen im Bereich 2000 – 3000 Da liegen) oft angenommen, dass das Huminstoff-Eisen von Phytoplankton-Organismen nicht genutzt werden kann. Die Erforschung der Fe-Huminstoff-Komplexe wird dadurch erschwert, dass es sich bei den natürlichen Huminsäuren um ein kompliziertes Stoffgemisch recht variabler Zusammensetzung handelt.

Im Rahmen der Diplomarbeit sollen unterschiedliche, als Huminstoff-Modellsysteme geeignete Eisen(III)komplexe sowie die Bioverfügbarkeit des an die Modell-Liganden gebundenen Eisens für marine Phytoplankton-Algen anhand von Wachstumsexperimenten mit den Meeresalgen *Chlorella salina* und *Diatronema lutheri* untersucht werden. Parallel sollen die entsprechenden Algen-Wachstumsexperimente auch mit natürlichen Huminstoffen, gewonnen aus Bächen und Flüssen Nord-Schottlands, durchgeführt werden.

Durch Vergleich der Ergebnisse der Algen-Wachstumsexperimente mit synthetischen Komplexbildnern mit jenen Algen-Wachstumsexperimenten mit natürlichen Huminstoffen ist eine Aussage darüber möglich, ob die untersuchten synthetischen Komplexbildner als Modellsubstanz für natürliche Huminstoffe geeignet sind. Zu beachten ist jedoch, dass Ergebnisse von Experimenten mit einer Meeres-Algen-Art nicht ohne weiteres auf andere Meeres-Algen-Arten übertragbar sind.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Komplexverbindungen	1
1.2	Huminstoffe	2
1.3	Eisen	3
1.4	Siderophore	4
1.5	Phytoplankton im Ozean	5
1.6	Spezifische Wachstumsrate	6
2	Material und Methoden	7
2.1	Experimenteller Aufbau	11
2.2	Synthetische Komplexbildner	13
3	Ergebnisse und Diskussion	15
3.1	<i>Chlorella salina</i> 09.12.2016 - 27.12.2016	15
3.2	<i>Diacronema lutheri</i> 24.01.2017 - 10.02.2017	19
3.3	<i>Chlorella salina</i> 10.03.2017 - 29.03.2017	22
3.4	<i>Chlorella salina</i> 09.06.2017 - 26.06.2017	26
3.5	Schlussfolgerung	29
4	Anhang	30
4.1	Kalibrierkurve Flammen-AAS	30
4.2	Elementanalyse	31
4.3	Wachstumskurve <i>Chlorella salina</i> (09.12.2016 - 27.12.2016)	32
4.4	Daten Wachstumskurve <i>Chlorella salina</i> (09.12.2016 - 27.12.2016)	33
4.5	Wachstumskurve <i>Diacronema lutheri</i> (24.01.2017 - 10.02.2017)	35
4.6	Daten Wachstumskurve <i>Diacronema lutheri</i> (24.01.2017 - 10.02.2017)	36
4.7	Wachstumskurve <i>Chlorella salina</i> (10.03.2017 - 29.03.2017)	38
4.8	Daten Wachstumskurve <i>Chlorella salina</i> (10.03.2017 - 29.03.2017)	39
4.9	Wachstumskurve <i>Chlorella salina</i> (09.06.2017 - 26.06.2017)	41
4.10	Daten Wachstumskurve <i>Chlorella salina</i> (09.06. - 26.06.2017)	42
	Literatur	43
	Abbildungsverzeichnis	45
	Tabellenverzeichnis	46

1 Einleitung

1.1 Komplexverbindungen

„Ein Komplex-Ion oder Komplex-Molekül, häufig einfach Komplex genannt, besteht aus einem Metall-Ion oder -Atom als Zentralatom, an welches mehrere Moleküle oder Ionen, die Liganden, angelagert sind. Ein Ligand verfügt über wenigstens ein Elektronenpaar, das er dem Zentralatom zur Verfügung stellen kann“ (Mortimer und Müller, 2015 S. 477).

Um eine Komplexverbindung formal darzustellen wird das Zentralatom zusammen mit seinen gebundenen Liganden in eckige Klammern geschrieben (Weber, 2014 S. 13). Bilden beispielsweise Fe^{3+} und EDTA^{4-} eine Komplexverbindung, so wird diese wie folgt angeschrieben: $[\text{Fe}(\text{EDTA})]^-$ (rsc online¹). Die Strukturen sind in Abbildung 1 (rsc online¹) dargestellt.

Des Weiteren bilden Zentralatom und Liganden einen geometrischen Körper, zum Beispiel ein Oktaeder. Komplexverbindungen können elektrisch neutral, negativ oder positiv geladen sein (Beyer und Cornejo, 2012 S. 11). Manche Liganden können eine Bindung, andere Liganden können zwei oder mehrere Bindungen mit dem Zentralatom eingehen. Liganden welche eine Bindung eingehen, werden als einzähnig bezeichnet, Liganden welche zwei Bindungen eingehen werden als zweizähnig bezeichnet, usw. (Weber, 2014 S. 25-28).

Eine Komplexverbindung mit zwei- oder mehrzähnigen Liganden wird als Chelat (griechisch *chele* - Krepsschere) bezeichnet (Mortimer und Müller, 2015 S. 480). Beispielsweise gibt es zwei- oder mehrzähnige organische Liganden (z.B.: Huminsäuren, Fulvinsäuren, Siderophore), welche mit Eisen(III) relativ stabile Chelate bilden. „In diesen Fe(III)-Chelaten wird Fe(III) durch mehrere Koordinationsbindungen eines mehrzähnigen zusammenhängenden Ligandenmoleküls (z. B. Citrat) scherenförmig eingefasst“ (Ottow, 2011).

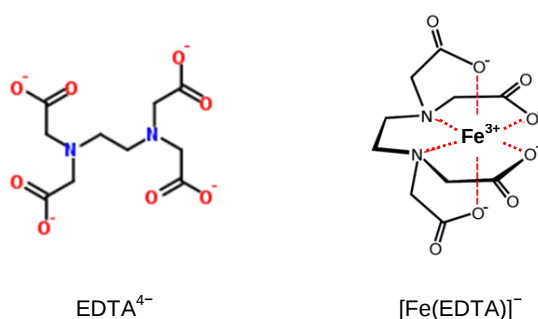


Abbildung 1: Linke Seite: Struktur von EDTA^{4-} , ein sechszähniger Ligand. Rechte Seite: Struktur von $[\text{Fe}(\text{EDTA})]^-$, (rsc online¹).

¹<http://www.rsc.org/learn-chemistry/resource/download/res00000903/cmp00001155/pdf>
(Zugriff: 12.07.2017).

Komplexe mit einzähnigen Liganden sind im Allgemeinen weniger stabil als Chelatkomplexe (Mortimer und Müller, 2015 S. 480).

1.2 Huminstoffe

Huminstoffe sind natürliche Makromoleküle (Bliefert, 2002 S. 332), welche vor allem bei der Verrottung von Pflanzenmaterial (Bahadir et al., 2000 S. 575-578), sowie aus toten Bodentieren und Mikroorganismen (Blume et al., 2010 S. 55) entstehen. Sie sind langlebig (Tipping, 2002 S. 1) und in der Geosphäre und Hydrosphäre weit verbreitet - etwa 10^{11} Tonnen organisch gebundener Kohlenstoff liegt in Form von Huminstoffen vor (Bahadir et al., 2000).

Im Boden gebildete Huminstoffe gelangen durch den Lateralabfluss² in die Fließgewässer und in weiterer Folge auch in die Ozeane (Opsahl und Benner, 1997). Dadurch gewährleisten Huminstoffe den Transport von Eisen vom Festland in die Ozeane (Blazevic et al., 2016).

Huminsäuren, Fulvinsäuren und Humine sind die Hauptgruppen der Huminstoffe. Huminsäuren sind in verdünnten Alkalilaugen löslich, in Säuren unlöslich und besitzen die Fähigkeit zum Kationenaustausch; Fulvinsäuren, in verdünnten Alkalilaugen und in Säuren löslich, sind zudem wasserlöslich und haben komplexierende Eigenschaften. Humine hingegen sind in verdünnten Alkalilaugen und in Säuren nicht löslich (Bahadir et al., 2000).

Polyvalente Metallionen können von Huminstoffen komplexiert werden. Vor allem die Anzahl an Carbonsäuregruppen bestimmt das Fassungsvermögen für Metallionen der Humin- und Fulvinsäuren (Bahadir et al., 2000). Fulvinsäuren sind Aufgrund ihrer vielen funktionellen Gruppen gute Chelatbildner für Übergangsmetalle, vor allem Eisen (Orlowska, 2017 S. 11). Eine allgemeine Struktur der Huminstoffe ist bisher nicht bekannt, Huminsäuren und Fulvinsäuren besitzen komplexe Molekülstrukturen (Bahadir et al., 2000; Bliefert, 2002; Zwirnmann, 2009). Sie bestehen vorwiegend aus den Elementen Kohlenstoff und Sauerstoff, sowie aus Wasserstoff, Stickstoff und Schwefel (Bahadir et al., 2000; Bliefert, 2002), wobei Fulvinsäuren einen höheren Anteil an Sauerstoff aufweisen als Huminsäuren (Bahadir et al., 2000).

²Lateralabfluss: „Nicht bis zum Grundwasser absinkendes Niederschlagswasser, das Oberflächenparallel im Boden dem Fließgewässer zuströmt“ (Bahadir et al., 2000 S. 692).

1.3 Eisen

Eisen ist ein essentielles Element, es übernimmt eine wichtige Rolle als Redoxüberträger in Zytochromen und Eisen-Schwefel-Zentren. Zytochrome sind Proteine, in denen ein bis vier Tetrapyrrolringe gebunden sind und kommen in fast allen Organismen vor (Heldt und Piechulla, 2015 S. 89). Eisen-Schwefel-Zentren sind ebenfalls Eielektronenüberträger und spielen beim Elektronentransport der Photosynthese eine wichtige Rolle (Heldt und Piechulla, 2015 S. 90).

Eisen ist ein wichtiger Mikronährstoff für das Wachstum von Phytoplankton (Liu und Millero, 2002). Zwar ist Eisen das vierthäufigste Element und das zweithäufigste Metall in der Erdkruste (Riedel, 2011 S. 840), jedoch ist die Eisen-Konzentration im Meerwasser sehr gering, daher ist Eisenmangel in weiten Teilen der Ozeane der limitierende Faktor für die biologische Produktivität. Dies liegt daran, dass Eisen in Gegenwart von Sauerstoff zu schwerlöslichem Eisen(III) oxidiert wird (Kendall et al., 2012; Laglera et al., 2011). Wobei das Redoxgleichgewicht ($\text{Fe}^{2+} \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+} + \text{e}^-$) stark pH-Wert-abhängig ist (Riedel, 2011 S. 838), sowie von komplexbildenden Liganden beeinflusst wird (Riedel, 2011 S. 850).

Eisen(II) ist zwar leicht löslich (Laglera et al., 2011), in sauerstoffhaltigem Meerwasser wird es aber zu schwerlöslichem Eisen(III) oxidiert (Rose und Waite, 2003). Unter dem Einfluss von organischen Liganden und Sonnenlicht unterliegt Eisen einem dynamischen Redox-Zyklus (Rose und Waite, 2003). Durch Sonnenlicht kann das thermodynamisch stabile Eisen(III) zu Eisen(II) reduziert werden (Laglera et al., 2011).

Wichtig für das Pflanzenwachstum ist nicht nur das Vorhandensein von Eisen, sondern vor allem ob dieses aufgenommen und verwertet werden kann. Bioverfügbares Eisen wird unter anderem über Flüsse in die Ozeane transportiert, daher werden Flüsse als eine der wichtigsten Quellen von bioverfügbarem Eisen für Küstengewässer angesehen (Krachler et al., 2010). Aus Torfmooren stammende Huminstoffe haben eine wichtige Transportfunktion für Eisen in Flüssen (Krachler et al., 2012). Organische Komplexbildner, welche aus Böden von Torfgebieten stammen, erhöhen die Eisen-Transportkapazität von Flusswasser. Untersuchungen von Krachler et al. zeigen, dass der globale Eiseneintrag in Ozeane durch Flüsse höher ist als bisher angenommen. Die Eisenkonzentration von Flüssen welche Torfgebiete durchfließen ist zudem um 10-50-Fach höher als jene eines 'durchschnittlichen Flusses'. Während 95 Prozent des ursprünglich gelösten Eisens eines 'durchschnittlichen Flusses' bei Mischung mit Meerwasser ausfallen, bleiben 22 Prozent des Eisens aus Flüssen welche Torfgebiete durchfließen in Lösung (Krachler et al., 2010).

Ein Großteil des Eisens im Flusswasser fällt bei der Durchmischung mit Meerwasser im Mündungsgebiet, aufgrund der starken Änderung des pH-Wertes und der Ionenstärke, aus. Daher wurde der Eisen-Eintrag aus Flüssen als Quelle für bioverfügbares Eisen in den Ozeanen lange Zeit als minimal angesehen (Krachler et al., 2005). Vor allem in küstenfernen Gebieten wird der Eintrag durch Staubpartikel, die über Windströme verteilt werden, als Hauptquelle von Eisen betrachtet (Kendall et al., 2012).

Entscheidend für die Bioverfügbarkeit von Eisen für Meeresalgen ist die Oxidationsstufe des Eisens. Meeresalgen können Eisen(II) gut aufnehmen, allerdings liegt Eisen im Meerwasser hauptsächlich in Form von schwerlöslichen Eisen(III)-Hydroxiden³ vor und ist dadurch für Algen nicht verfügbar. Zwar bildet sich Eisen(II) durch Photoreduktion aus organischen Eisen(III)-Komplexen, allerdings in zu geringer Konzentration um den Eisenbedarf in den Ozeanen abdecken zu können. Auch gelöstes Eisen(III) liegt nur in geringen Konzentrationen vor (Orlowska, 2017).

Ungefähr 99,9 Prozent des gelösten Eisens in den Ozeanen liegen in Form von organischen Komplexen vor. Organische Komplexbildner spielen eine wichtige Rolle bei der Bioverfügbarkeit von Eisen. Primärproduzenten können komplex gebundenes Eisen aufnehmen, dies hängt jedoch von der Stabilität der Komplexe und deren Redox Verhalten ab. Nachdem Primärproduzenten Eisen-Komplexe aufgenommen haben, ändert sich das Ligand-Eisen Gleichgewicht; durch Reduktion von Eisen(III) wird die Bindung zwischen Eisen und Ligand geschwächt und das Eisen wird frei (Orlowska, 2017). Die Photoreduktion von Eisen-Huminstoff-Komplexen ist für die Bioverfügbarkeit von Eisen in den Ozeanen wesentlich (Blazevic et al., 2016), aber auch Selbstreduktion spielt eine Rolle (Orlowska, 2017).

Die Reduktion von Fe(III) zu Fe(II) ist für die Aufnahme von Eisen entscheidend, da die Affinität der Liganden zu Fe(II) geringer ist als zu Fe(III), dadurch kann Eisen freigesetzt und in weiterer Folge von Mikroorganismen aufgenommen werden (Orlowska et al., 2016).

1.4 Siderophore

Siderophore sind Fe(III)-freie organische Liganden mit niedrigem Molekulargewicht und einer sehr hohen Affinität, sowie Spezifität für Eisen(III) (Kraemer, 2004; Ottow, 2011). Es gibt Mikroorganismen und Pflanzen, welche bei Eisenmangel (z. B. in kalkhaltigen Böden mit pH > 7) Siderophore produzieren, um Eisen aufnehmen zu können (Ottow, 2011). Steht Bakterien kein Eisen(II) zur Verfügung, synthetisieren sie Siderophore, welche Eisen(III) stark

³Eisen(III)-Hydroxide: Eisenoxide, Eisenoxyhydroxide und Eisenhydroxide.

binden (Braun und Killmann, 1999). Das, an ein Siderophor gebundene, Eisen(III) wird zu Eisen(II) reduziert. Da Fe(II) weniger stark an das Siderophor gebunden ist als Fe(III), kann dieses vom Organismus verwertet werden (Ottow, 2011).

Eisen liegt im Meerwasser fast ausschließlich durch organische Liganden komplexiert vor. Möglicherweise handelt es sich bei diesen organischen Liganden um Siderophore. Phytoplankton scheint es zu gelingen dieses stark gebundene Eisen aufnehmen und verwerten zu können. Das an ein Siderophor gebundene Eisen kann auf zwei Arten bioverfügbar werden: Durch die Reduktion an der Zelloberfläche oder durch Photoreduktion des gebundenen Fe(III), welches unter den Bedingungen im Meerwasser in anorganisches Eisen umgewandelt werden kann. Auch an andere organische Liganden gebundenes Eisen kann möglicherweise direkt über Reduktion an der Zelloberfläche aufgenommen werden oder durch Photoreduktion anorganisch vorliegen (Hopkinson und Morel, 2009). In Abbildung 2 ist Ferrioxamin E (sigma aldrich online⁴), ein Siderophor, dargestellt.

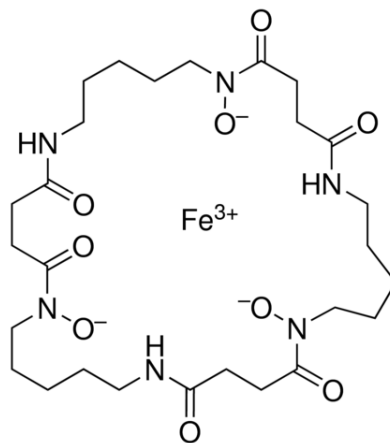


Abbildung 2: Ferrioxamin E (sigma aldrich online⁴).

1.5 Phytoplankton im Ozean

Meeresalgen produzieren durch Photosynthese Sauerstoff und fixieren CO₂, sie sind daher eine wichtige CO₂ -Senke⁵ (Hempel et al., 2017 S. 108; Ottow, 2001 S. 248). Wobei sich durch Lichtmangel in tieferen Schichten die Photosynthese im Wesentlichen auf die oberen 100 Meter der Ozeane beschränkt (Townsend et al., 2009 S. 165).

Neben Algen sind auch Cyanobakterien, Diatomeen und Flagellaten an der CO₂ -Fixierung im Meer beteiligt. Der limitierende Faktor für die photosynthetische Aktivität dieser Mikroorganismen ist Eisen (Ottow, 2001 S. 248). Abgesehen von Eisen spielen auch andere

⁴<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/38266?lang=de®ion=AT> (Zugriff: 27.07.2017).

⁵Insgesamt fixieren einzellige Meerespflanzen fast genauso viel CO₂ wie die Landbiomasse (Hempel et al., 2017 S. 15).

Parameter wie die Temperatur des Wassers, Sonneneinstrahlung und weitere Nährstoffe wie Stickstoff, Phosphor und Silizium eine wichtige Rolle (Hempel et al., 2017; Townsend et al., 2009).

In den Bereichen der Ozeane mit idealen Bedingungen (Temperatur, Sonneneinstrahlung, Nährstoffangebot) ist die Produktivität des Phytoplanktons am höchsten. Die Verteilung der Nährstoffe über die Ozeane ist sehr unterschiedlich. Da Nährstoffe über Flüsse oder durch Umwälzbewegungen an die Oberfläche der Ozeane gelangen, herrschen vor allem in Mündungsbereichen von Flüssen gute Wachstumsbedingungen (Townsend et al., 2009).

In den meisten Teilen der Ozeane ist Eisen, aufgrund seiner geringen Löslichkeit in sauerstoffhaltigem Meerwasser und einer minimalen externen Versorgung, in einer subnanomolaren Konzentration vorhanden. Für das Wachstum von Phytoplankton ist Eisen in ca. einem Drittel der Meeresoberfläche limitierend (Hopkinson und Morel, 2009).

Ist das Nährstoffangebot zu hoch, kann dies zu einem massenhaften Wachstum von Phytoplankton führen, es entstehen sogenannte Algen-Blüten. Einige Algenarten produzieren dabei starke Gifte, die unter anderem auch für Menschen gefährlich oder sogar tödlich sein können (Hempel et al., 2017). Algentoxine können sich im Wasser, sowie in Meerestieren wie Muscheln, Krebsen, Seeigeln oder Fischen anreichern (Rheinbaben, 2015).

Es gibt eine Vielzahl an verschiedenen Arten von Phytoplankton, zwei davon sind die einzelligen Meeresalgen *Chlorella salina* (Guiry, 2017) und *Diacronema lutheri* (Miranda, 2017). *C. salina* ist eine Grünalge, sie gehört zur Familie der Chlorellaceae und zum Stamm der Chlorophyta (marinespecies online⁶). *D. lutheri* ist Teil der Familie der Pavlovaceae, diese gehören dem Stamm der Haptophyta an (marinespecies online⁷).

C. salina und *D. lutheri* sind im Nord-Atlantik verbreitet und kommen in Mündungsgebieten von Flüssen mit einem hohen Gehalt an aquatischen Huminstoffen vor (Orlowska, 2017).

1.6 Spezifische Wachstumsrate

Die spezifische Wachstumsrate ist als Zunahme der Zellmasse pro Zeiteinheit, bezogen auf die vorhandene Zellmasse definiert (thieme online⁸).

⁶<http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=627696> (Zugriff: 06.07.2017).

⁷<http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=590558> (Zugriff: 06.07.2017).

⁸<https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-19-03273#Literatur> (Zugriff: 27.07.2017).

2 Material und Methoden

Für die Proben der Algen-Wachstumsexperimente wurde synthetisches Meerwasser (Kester et al., 1967) mit einer Salinität von 35 ‰ und einem pH-Wert von 8,3, versetzt mit modifiziertem f/2-Medium (Guillard, 1975), verwendet. Die Zusammensetzung des synthetischen Meerwassers ist in Tabelle 1 dargestellt, die Zusammensetzung des f/2-Mediums ist der Tabelle 2 zu entnehmen.

Alle eingesetzten Lösungen sind mit Milli-Q® Wasser hergestellt und durch einen 0,2 µm Filter (Sartorius Sartobran 300®) filtriert worden. Algenwachstumsversuche wurden im Idealmedium (Volles f/2-Medium); in einem f/2-Medium ohne Eisen; einem f/2-Medium ohne EDTA; einem f/2-Medium ohne EDTA, ohne Eisen; sowie in f/2-Medien ohne EDTA, mit synthetischen Komplexbildnern; f/2-Medien ohne EDTA, ohne Eisen, mit Huminstoffen durchgeführt. Die Probenbezeichnung ist in Tabelle 3 zu finden. Die Tabelle 4 beinhaltet die Eisenkonzentration und die Konzentration an Komplexbildner der Proben.

Die eingesetzten Huminstoffproben wurden im August 2016 im Norden Schottlands gezogen, vor Ort durch 0,2 µm Filter filtriert und danach in sterilen Glasflaschen bei 4 °C im Dunkeln gelagert. Eine Elementanalyse und die Koordinaten der Probenahmestellen sind in Tabelle 13 zu finden (siehe Anhang 4.2).

Für die Algenwachstumsversuche sind die Algen *Chlorella salina* (Stamm SAG 8.86) und *Diacronema lutheri* (Stamm SAG 926-1) zum Einsatz gekommen. Von den Algen wurden jeweils Erhaltungskulturen im Idealmedium angesetzt und diese dann für die Wachstumsexperimente herangezogen. Wobei den Proben jeweils so viel Algenkultur zugegeben wurde, dass sie eine ungefähre Anfangskonzentration von 10^5 Zellen pro Milliliter (*C. salina*) bzw. $1,5 \cdot 10^5$ Zellen pro Milliliter (*D. lutheri*) enthielten.

Bei den zur Auswertung erstellten Wachstumskurven ist die Anzahl der Zellen (10^5 Zellen pro ml) gegen die Zeit (in Tagen) aufgetragen.

Tabelle 1: Zusammensetzung des synthetischen Meerwassers.

Substanz	Konzentration [mol/L]
NaCl	$4,1 \cdot 10^{-1}$
Na ₂ SO ₄	$2,8 \cdot 10^{-2}$
KCl	$9,1 \cdot 10^{-3}$
NaHCO ₃	$2,3 \cdot 10^{-3}$
KBr	$8,2 \cdot 10^{-4}$
H ₃ BO ₃	$4,0 \cdot 10^{-4}$
NaF	$7,1 \cdot 10^{-5}$
CaCl ₂ · 2H ₂ O	$1,0 \cdot 10^{-2}$
MgCl ₂ · 6H ₂ O	$5,3 \cdot 10^{-2}$
SrCl ₂ · 6H ₂ O	$9,0 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 2: Zusammensetzung des f/2-Mediums.

Substanz	Konzentration [mol/L]
NaNO ₃	$8,82 \cdot 10^{-4}$
Na ₂ SiO ₃ · 9H ₂ O	$1,06 \cdot 10^{-4}$
NaH ₂ PO ₄ · H ₂ O	$3,62 \cdot 10^{-5}$
MnCl ₂ · 4H ₂ O	$9,10 \cdot 10^{-7}$
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	$7,65 \cdot 10^{-8}$
CoCl ₂ · 6H ₂ O	$4,20 \cdot 10^{-8}$
CuSO ₄ · 5H ₂ O	$3,93 \cdot 10^{-8}$
Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O	$2,60 \cdot 10^{-8}$
Thiamin Hydrochlorid	$2,96 \cdot 10^{-7}$
Biotin	$2,05 \cdot 10^{-9}$
Cyanocobalamin	$3,69 \cdot 10^{-10}$
Na ₂ EDTA	$1,17 \cdot 10^{-5}$
FeCl ₃ · 6H ₂ O	$1,17 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 3: Probenbezeichnung.

Probenbezeichnung	Inhalt
Idealmedium	Volles f/2-Medium
Ohne Eisen	f/2-Medium ohne Eisen
Ohne EDTA	f/2-Medium ohne EDTA
Ohne Eisen, ohne EDTA	f/2-Medium ohne Eisen, ohne EDTA
Sphagnumsäure	f/2-Medium ohne EDTA, mit Sphagnumsäure
Brenzcatechin	f/2-Medium ohne EDTA, mit Brenzcatechin
Gallussäure	f/2-Medium ohne EDTA, mit Gallussäure
EWOR760	f/2-Medium ohne EDTA, mit EWOR760
EWOR790	f/2-Medium ohne EDTA, mit EWOR790
EWOR761	f/2-Medium ohne EDTA, mit EWOR761
EWOR792	f/2-Medium ohne EDTA, mit EWOR792
EWOR772	f/2-Medium ohne EDTA, mit EWOR772
EWOR772 2-fach	f/2-Medium ohne EDTA, mit EWOR772
EWOR772 3-fach	f/2-Medium ohne EDTA, mit EWOR772
Ferrioxamin E	f/2-Medium ohne EDTA, mit Ferrioxamin E
Melanin	f/2-Medium ohne EDTA, mit Melanin
Ferrioxamin E + Craggie Burn	f/2-Medium ohne EDTA, ohne Eisen, mit Ferrioxamin E, mit Craggie Burn
Allt na Cleite	f/2-Medium ohne Eisen, ohne EDTA, mit Huminstoffen aus dem Allt na Cleite
Craggie Burn	f/2-Medium ohne Eisen, ohne EDTA, mit Huminstoffen aus dem Craggie Burn
River Thurso	f/2-Medium ohne Eisen, ohne EDTA, mit Huminstoffen aus dem River Thurso
Sletill Burn	f/2-Medium ohne Eisen, ohne EDTA, mit Huminstoffen aus dem Sletill Burn

Tabelle 4: Konzentration an Eisen und Komplexbildner.

	Eisengehalt [mol/L]	Komplexbildner [mol/L]
Idealmedium	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (1)	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (3)
Ohne EDTA	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (1)	-
Ohne Eisen	-	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (3)
Sphagnumsäure	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (1)	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (4)
Brenzcatechin	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (1)	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (4)
Gallussäure	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (1)	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (4)
EWOR760	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (1)	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (4)
EWOR790	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (1)	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (4)
EWOR761	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (1)	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (4)
EWOR792	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (1)	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (4)
EWOR772	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (1)	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (4)
EWOR772 2-fach	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (1)	$2,34 \cdot 10^{-5}$ (4)
EWOR772 3-fach	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (1)	$3,51 \cdot 10^{-5}$ (4)
Ferrioxamin E	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (1)	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (4)
Melanin	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (1)	0,75 mg/L Melanin (5)
Ferrioxamin E + Craggie Burn	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (2)	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (6)
Allt na Cleite	$0,57 \cdot 10^{-5}$ (2)	DOC 19,3 mg/L (7)
Craggie Burn (1/16)	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (2)	DOC 48,0 mg/L (7)
Craggie Burn (2/16)	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (2)	DOC 44,0 mg/L (7)
River Thurso (a)	$0,51 \cdot 10^{-5}$ (2)	DOC 19,7 mg/L (7)
River Thurso (b)	$1,17 \cdot 10^{-5}$ (2)	DOC 19,7 mg/L (7)
Sletill Burn	$0,16 \cdot 10^{-5}$ (2)	DOC 10,5 mg/L (7)

(1) $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

(2) Huminstoff gebunden

(3) EDTA

(4) Komplexbildner: vgl. Probenbezeichnung

(5) Synthetisches Melanin, Molekulargewicht unbekannt

(6) Ferrioxamin E und Craggie Burn 1/16 (DOC 48,0 mg/L (7))

(7) DOC vgl. Tabelle 13 (4.2)

2.1 Experimenteller Aufbau

Die Wachstumsexperimente wurden in 250 ml Schottflaschen durchgeführt, wobei der Füllstand 200 ml betrug. Von jeder Probenkultur wurden je 600 ml hergestellt und diese auf drei Flaschen aufgeteilt, um Triplets zu erhalten. Zur Auswertung dienten Mittelwerte daraus. Alle Proben standen für die Versuchsdauer unter ständigem Rühren (300 U/min), versorgt mit gefilterter Luft, in einem temperierten Wasserbad mit $21\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ und wurden belichtet.

Für die Belüftung wurden Pasteurpipetten verwendet, die über ein Loch im Deckel der Probengefäße in die Probe reichten. Die Pasteurpipetten wurden über Silikonschläuche mit Druckluft versorgt, welche durch einen $0,2\text{ }\mu\text{m}$ Filter (Sartorius Sartobran 300®) und Aktivkohle gefiltert war. Zur Abdichtung und Verbindung der einzelnen Bauteile wurde Parafilm® verwendet. Der Aufbau ist in Abbildung 3 exemplarisch dargestellt.

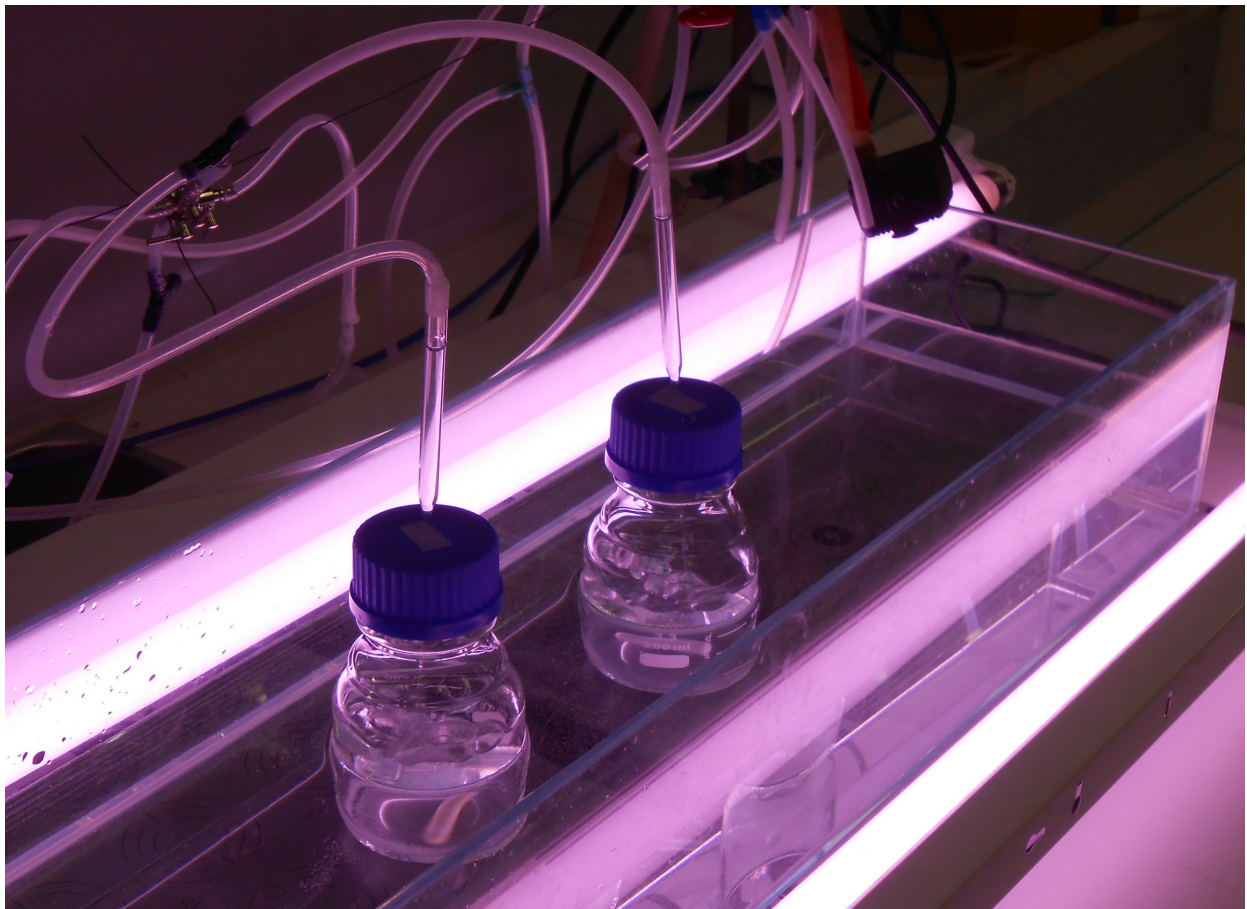


Abbildung 3: Experimenteller Aufbau, exemplarisch mit 2 Probengefäßen.

Die Belichtung erfolgte über Leuchtstoffröhren (Osram Fluora[®] 77) mit einem 16:8 Licht-Dunkel-Zyklus. Die spektrale Strahlungsverteilung der Leuchtstoffröhren ist der Abbildung 4 (osram online⁹) zu entnehmen.

Die Huminstoff-Proben wurden für die Wachstumsversuche aufkonzentriert. Dies erfolgte durch einrotieren von jeweils 1 Liter Wasserprobe auf 20 ml. Im Anschluss wurde das Konzentrat mit synthetischem Meerwasser auf 50 ml aufgefüllt, über einen 0,2 μm Filter (Sartorius Sartobran 300[®]) filtriert und der Eisengehalt bestimmt.

Zur Bestimmung der Eisenkonzentration der eingesetzten Huminstoffe diente eine Flammen-AAS¹⁰, die Kalibrierfunktion ist im Anhang (4.1, Abbildung 12) zu finden. Die Eisenbestimmung war notwendig, um die Eisenkonzentration in den jeweiligen Proben berechnen zu können. Nicht alle Huminstoff-Proben erreichten die Ziel-Konzentration von $1,17 \cdot 10^{-5} \text{ mol/L}$ (vgl. Tabelle 4).

Die Zellzahl der Algenkulturen wurde während der Wachstumsphase der Algen (2-3 Wochen) mit einer Neubauer Zählkammer unter einem Lichtmikroskop bestimmt. Die erste Zählung erfolgte jeweils nach 6-7 Tagen, da erst nach einer Woche ein bemerkbarer Anstieg der Zellzahl festzustellen war. Danach erfolgte die Zählung in Abständen von 2 bis 3 Tagen, in Ausnahmefällen auch in Abständen von 1-4 Tagen. Die Zählung erfolgte so lange, bis die Wachstumsphase vorbei war und die Zellzahl zurückging. Dieser Zeitraum variierte bei den jeweiligen Versuchen. Zur Zählung der *D. lutheri* war es notwendig diese zu immobilisieren. Dazu diente eine Formalin-Lösung (10 %) von welcher der entnommenen Probe (0,6 ml) jeweils 1 μl zugesetzt wurde.

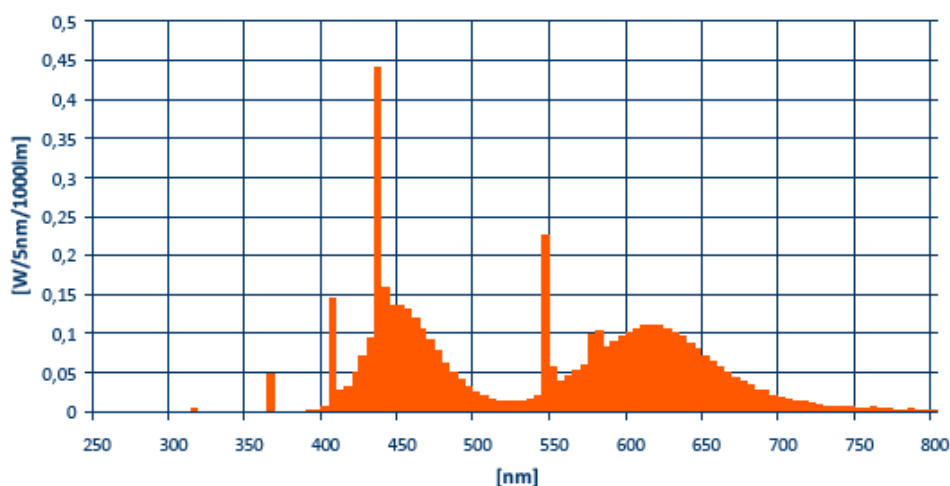


Abbildung 4: Spektrale Strahlungsverteilung Fluora[®] 77; Lichtstrom: 2250 lm, (Osram online⁹).

⁹<http://www.osram.at/media/resource/HIRES/349833/5231442/single-and-double-cappedfluorescent-lamps-attachments-deutsch-teil-2.pdf> (Zugriff: 22.07.2017).

¹⁰Perkin Elmer, A Analyst 200, Atomic Absorption Spectrometer.

2.2 Synthetische Komplexbildner

Die synthetischen Komplexbildner mit der Bezeichnung EWOR7xx wurden von Ewelina Orlowska hergestellt. Die Struktur von EWOR772 ist der Abbildung 5 zu entnehmen. Die beiden OH-Gruppen, in 3,4-Position am Benzen, binden das Eisen. EWOR760 (Abbildung 6) unterscheidet sich von EWOR772 nur durch die 2,3-Position der OH-Gruppen. EWOR790 (Abbildung 7) hat eine Methoxy-Gruppe, anstelle der OH-Gruppe in Position 4 am Benzen. EWOR761 ist der gleiche Komplex wie EWOR760, aber EWOR760 ist nur ein Diastereoisomer und EWOR761 ein Gemisch von zwei. EWOR792 ist ein zweikerniger Komplex von EWOR772 mit der Summenformel: $\text{Fe}_2(\text{C}_{16}\text{H}_{17}\text{O}_6)_2(\text{C}_{16}\text{H}_{16}\text{O}_6)_2$. Die genaue Struktur ist nicht bekannt, da keine Strukturaufklärung vorliegt.

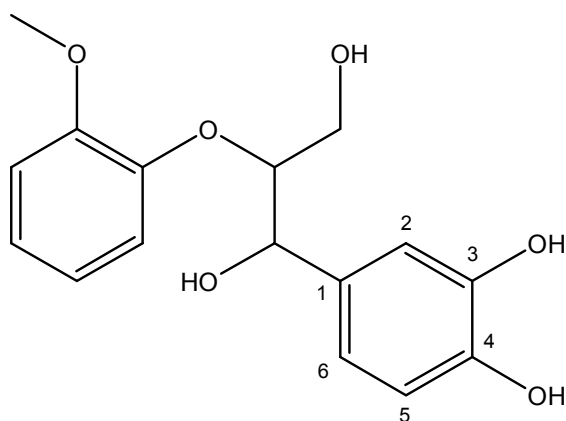


Abbildung 5: Struktur von EWOR772.

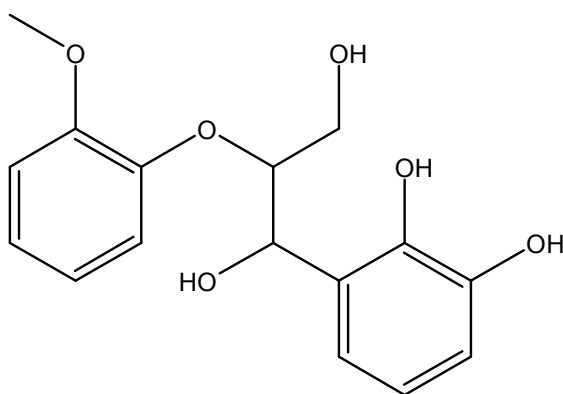


Abbildung 6: Struktur von EWOR760.

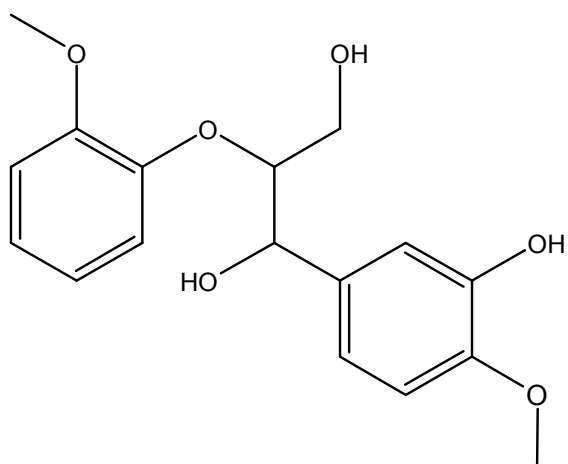


Abbildung 7: Struktur von EWOR790.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 *Chlorella salina* 09.12.2016 - 27.12.2016

Die Wachstumskurve der Meeresalge *C. salina* im Zeitraum von 09.12.2016 bis 27.12.2016 in verschiedenen Medien und unter Laborbedingungen ist in Abbildung 8 dargestellt, sowie im Anhang (4.3, Abbildung 13) zu finden. Die Zellzahl, in 10^5 Zellen/ml, ist gegen die Zeit, in Tagen, aufgetragen.

Folgende Proben kamen, jeweils als Triplet, zum Einsatz: Idealmedium (Volles f/2-Medium); Ohne Eisen (f/2-Medium ohne Eisen); Ohne EDTA (f/2-Medium ohne EDTA); Huminstoffproben: Craggie Burn und Allt na Cleite (f/2-Medium ohne Eisen, ohne EDTA, mit Huminstoff); EWOR772, EWOR790, EWOR760 (f/2-Medium ohne Eisen, ohne EDTA, mit EWOR7xx); Brenzcatechin (f/2-Medium ohne Eisen, ohne EDTA, mit Brenzcatechin); Gallussäure (f/2-Medium ohne Eisen, ohne EDTA, mit Gallussäure), (vgl. Tabelle 3 und 4). Die bei diesem Wachstumsversuch eingesetzten Huminstoffproben Craggie Burn (1/16) und Allt na Cleite (5/16) wurden am 19.08.2016 bzw. am 28.08.2016 gezogen, Details zu den Proben sind im Anhang (4.2, Tabelle 13) zu finden.

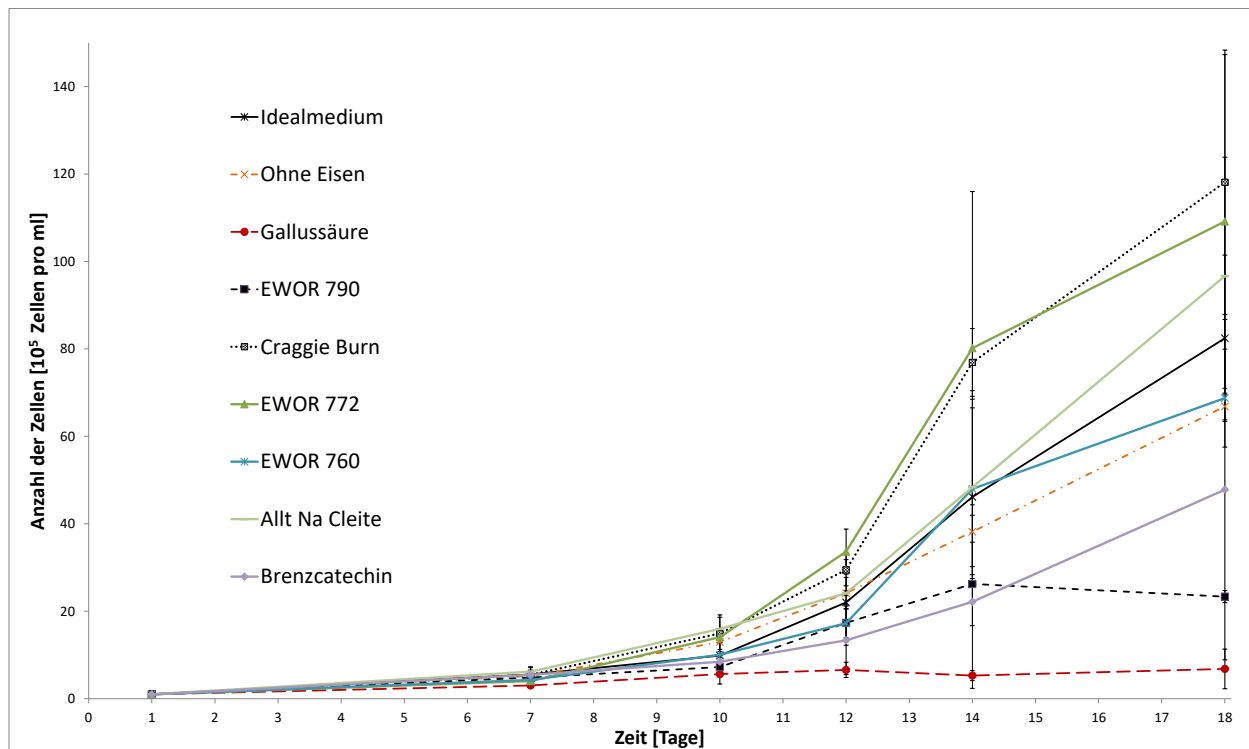


Abbildung 8: Verlauf des Algenwachstums von *Chlorella salina* im Zeitraum von 09.12.2016 - 27.12.2016.

Die Proben wurden in synthetischem Meerwasser nach Kester et al. (1967) hergestellt und mit *C. salina* Algen aus der Erhaltungskultur versetzt, die Anfangskonzentration an *C. salina* betrug 10^5 Zellen/ml. Die ermittelten Zellzahlen sind im Anhang (4.4, Tabelle 14 und 15) zu finden. Die spezifischen Wachstumsraten nach 18 Tagen sind in Tabelle 5, die Zellzahlen in den Proben nach 18 Tagen in Tabelle 6 gegenübergestellt.

Tabelle 5: Spezifische Wachstumsraten der Proben Craggie Burn, Ohne Eisen, EWOR772, Brenzcatechin, Allt na Cleite, Idealmedium, EWOR790, EWOR760 und Gallussäure nach 18 Tagen (27.12.2016).

Probe	Spezifische Wachstumsrate	Probe	Spezifische Wachstumsrate
Craggie Burn	0,265	Ohne Eisen	0,233
EWOR772	0,261	Brenzcatechin	0,215
Allt na Cleite	0,254	EWOR790	0,175
Idealmedium	0,245	Gallussäure	0,107
EWOR760	0,235		

Die Probe 'Ohne EDTA' wurde aufgrund der zu hohen Standardabweichung bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

Tabelle 6: Maximum der Anzahl an Zellen in den Proben Craggie Burn, Ohne Eisen, EWOR772, Brenzcatechin, Allt na Cleite, Idealmedium, EWOR790, EWOR760 und Gallussäure nach 18 Tagen (27.12.2016).

Probe	Anzahl der Zellen [10^5 Zellen/ml]	Probe	Anzahl der Zellen [10^5 Zellen/ml]
Craggie Burn	$118,1 \pm 30,2$	Ohne Eisen	$66,8 \pm 3,0$
EWOR772	$109,1 \pm 38,2$	Brenzcatechin	$47,8 \pm 38,9$
Allt na Cleite	$96,7 \pm 27,2$	EWOR790	$23,3 \pm 1,4$
Idealmedium	$82,4 \pm 19,0$	Gallussäure	$6,8 \pm 4,5$
EWOR760	$68,8 \pm 11,2$		

Die Probe 'Ohne EDTA' wurde aufgrund der zu hohen Standardabweichung bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

Craggie Burn

Die Probe Craggie Burn (1/16 Craggie Burn, gezogen am 19.08.2016) beinhaltet bereits natürlich gebundenes Eisen und Huminstoffe als natürliche Komplexbildner, daher wurde hier mit dem f/2 Medium ohne Eisen und ohne EDTA gearbeitet. Die *C. salina* Algen erzielten im Craggie Burn Medium, im Vergleich mit den anderen Medien, die höchsten Zellzahlen (vgl. Tabelle 6), eine längere Wachstumsphase und die höchste spezifische Wachstumsrate (vgl. Tabelle 5). Unter Berücksichtigung der Standardabweichung, schneiden das Medium mit EWOR772 und das Medium mit Allt na Cleite genauso gut ab. Das gute Wachstum der *C. salina* im Craggie Burn Medium stimmt mit vorhergehenden Versuchen (Krachler et al., 2016) überein. Das Ergebnis lässt darauf schließen, dass die Huminstoffe aus dem Craggie Burn einen positiven Einfluss auf die Bioverfügbarkeit des Eisens für *C. salina* haben.

EWOR772

Bei EWOR772 handelt es sich um einen synthetischen Komplexbildner. Die Struktur ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Proben wurden mit dem f/2-Medium ohne EDTA angesetzt. *C. salina* wächst in diesem Medium vergleichbar gut wie im Craggie Burn Medium. Wird die Standardabweichung berücksichtigt, kann kein Unterschied zwischen dem Medium mit Craggie Burn und dem mit EWOR772 festgestellt werden. Das ähnlich gute Abschneiden von EWOR772 deutet darauf hin, dass dieser Komplex ein geeignetes Modell für die Struktur von Huminstoffen sein könnte.

Allt na Cleite

Allt na Cleite ist eine Wasserprobe aus Nordschottland und beinhaltet natürliche Huminstoffe, sowie gebundenes Eisen. Daher wurde auch hier das f/2-Medium ohne Eisen und ohne EDTA verwendet. Im Vergleich zu den anderen Proben enthielt das Allt na Cleite Medium eine geringere Eisenkonzentration $0,57 \cdot 10^{-5}$ mol/L, die Zielkonzentration von $1,17 \cdot 10^{-5}$ mol/L konnte nicht erreicht werden. Obwohl die Eisenkonzentration im Allt na Cleite Medium nur halb so hoch war wie in den anderen Medien, ist das Wachstum, innerhalb der Standardabweichung, gleich gut wie bei Craggie Burn und EWOR772. Wobei zwischen Tag 10 und 14 ein deutlich geringerer Anstieg der Wachstumskurve, im Vergleich zu Craggie Burn und EWOR772, zu erkennen ist. Die am Tag 14 bestimmten Zellzahlen sind, auch unter Berücksichtigung der Standardabweichung, niedriger als im Craggie Burn Medium. Der flachere Anstieg der Wachstumskurve lässt auf ein verzögertes Wachstum, bedingt durch den niedrigeren Eisengehalt, schließen. Andere Faktoren können nicht ausgeschlossen werden.

Idealmedium

Im Idealmedium (Volles f/2-Medium) sind die *C. salina* Algen nicht ganz so gut gewachsen wie in den Huminstoff-Medien und dem EWOR772. Allerdings zeigt die Wachstumskurve dennoch, dass die *C. salina* Eisen, welches durch EDTA komplexiert ist, gut aufnehmen kann.

EWOR760

EWOR760 ist ein synthetischer Komplexbildner. Die Proben wurden daher mit dem f/2-Medium ohne EDTA angesetzt. Die Wachstumskurve von EWOR760 ist vom Idealmedium nicht zu unterscheiden. Die Struktur von EWOR760 ist der von EWOR772 ähnlich (vgl. Abbildung 5 und 6), nur die Hydroxy-Gruppen sind in einer anderen Position (2,3 anstelle von 3,4) angeordnet. Die Anordnung der Hydroxy-Gruppen in EWOR772 scheint besser geeignet, als die Anordnung in EWOR760.

Ohne Eisen

Das Wachstum im f/2-Medium ohne Eisen bewegt sich im Rahmen von EWOR760 und dem Idealmedium. Auch in vorhergehenden Versuchen (Orlowska et al, 2017) wurden teilweise ähnliche Ergebnisse erzielt. Die Bezeichnung 'Ohne Eisen' ist nur bedingt richtig, es wurde dem Medium zwar kein Eisen zugegeben, allerdings kann bei der Zugabe der Algen aus der Erhaltungskultur noch vorhandenes Eisen mit in das Medium ohne Eisen eingebracht werden. Zudem können die Algen noch einen Vorrat an Eisen haben. Eiseneinträge aus der Umgebung sind, trotz diverser Vorsichtsmaßnahmen, nicht gänzlich auszuschließen.

EWOR790

EWOR790 ist ein synthetischer Komplexbildner, die Struktur ist der von EWOR772 sehr ähnlich, nur an Stelle der Hydroxy-Gruppe in Position 4 (vgl. Abb. 5 und 7) befindet sich dort eine Methoxy-Gruppe. Aufgrund des schlechten Wachstums, auch im Vergleich zum Medium ohne Eisen, scheint dies kein geeignetes Modell für Huminstoffe zu sein. Die Proben wurden mit dem f/2-Medium ohne EDTA angesetzt.

Gallussäure

Die Gallussäure Proben wurden mit dem f/2-Medium ohne EDTA angesetzt. Im Medium mit Gallussäure als Komplexbildner wuchsen die Algen am wenigsten gut. Gallussäure bildet möglicherweise sehr stabile Komplexe mit Eisen, dadurch ist das Eisen für die *C. salina* nicht bioverfügbar.

Brenzcatechin (1,2-Dihydroxybenzol)

Die Algenzahlen der drei angesetzten Brenzcatechin Proben haben sehr unterschiedliche Werte. Aufgrund der hohen Standardabweichung der Proben ist keine qualifizierte Aussage über diese Probe möglich.

Ohne EDTA

Die Probe ist zwar untersucht, aber aber nicht ausgewertet worden.

3.2 *Diacronema lutheri* 24.01.2017 - 10.02.2017

Die Wachstumskurve der Meeresalge *D. lutheri* im Zeitraum von 24.01.2017 bis 10.02.2017 in verschiedenen Medien und unter Laborbedingungen ist in Abbildung 9 dargestellt, sowie im Anhang (4.5, Abbildung 14) zu finden. Folgende Proben kamen, jeweils als Triplet, zum Einsatz: Idealmedium (Volles f/2-Medium); Ohne Eisen (f/2-Medium ohne Eisen); Ohne EDTA (f/2-Medium ohne EDTA); Huminstoffproben: Craggie Burn und River Thurso (a) (f/2-Medium ohne Eisen, ohne EDTA, mit Huminstoff); EWOR772, EWOR790, EWOR792, EWOR761 (f/2-Medium ohne Eisen, ohne EDTA, mit EWOR7xx); Sphagnumsäure (f/2-Medium ohne Eisen, ohne EDTA, mit Sphagnumsäure), (vgl. Tabelle 3 und 4). Die bei diesem Wachstumsversuch eingesetzte Craggie Burn Probe (2/16) wurde am 22.08.2016, die Probe River Thurso (6/16) am 29.08.2016 gezogen. Details zu den Huminstoffproben sind im Anhang (4.2, Tabelle 13) zu finden. Die Proben wurden in synthetischem Meerwasser nach Kester et al. (1967) hergestellt und mit *D. lutheri* Algen aus der Erhaltungskultur versetzt, die Anfangskonzentration an *D. lutheri* betrug $1,5 \cdot 10^5$ Zellen/ml. Die ermittelten Zellzahlen sind im Anhang (4.6, Tabelle 16 und 17) zu finden. Die spezifischen Wachstumsraten nach 17 Tagen sind in Tabelle 7, die Zellzahlen in den Proben nach 17 Tagen in Tabelle 8 gegenübergestellt.

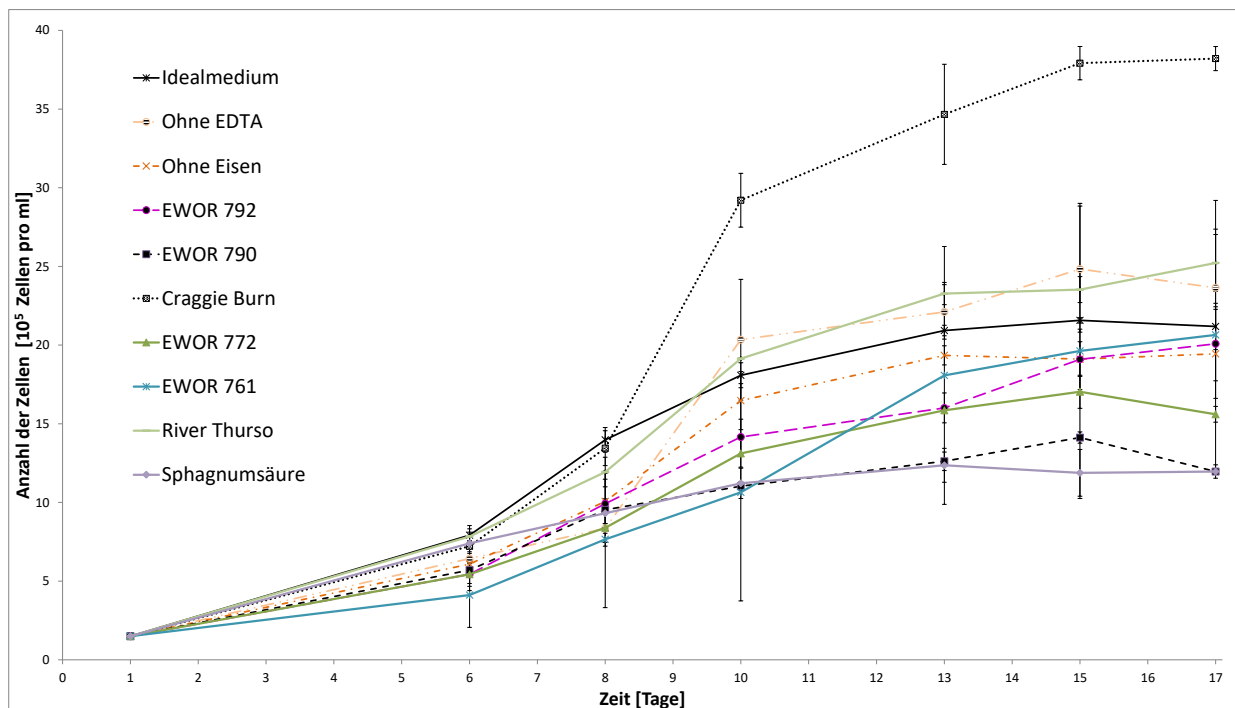


Abbildung 9: Verlauf des Algenwachstums von *Diacronema lutheri* im Zeitraum von 24.01.2017 - 10.02.2017.

Tabelle 7: Spezifische Wachstumsraten der Proben Craggie Burn, River Thurso (a), Ohne EDTA, Idealmedium, EWOR761, EWOR792, Ohne Eisen, EWOR772, EWOR790 und Sphagnumsäure nach 17 Tagen (10.02.2017).

Probe	Spezifische Wachstumsrate	Probe	Spezifische Wachstumsrate
Craggie Burn	0,190	EWOR792	0,153
River Thurso (a)	0,166	Ohne Eisen	0,151
Ohne EDTA	0,162	EWOR772	0,138
Idealmedium	0,156	EWOR790	0,122
EWOR761	0,154	Sphagnumsäure	0,122

Tabelle 8: Maximum der Anzahl an Zellen in den Proben Craggie Burn, River Thurso (a), Ohne EDTA, Idealmedium, EWOR761, EWOR792, Ohne Eisen, EWOR772, EWOR790 und Sphagnumsäure nach 17 Tagen (10.02.2017).

Probe	Anzahl der Zellen [10 ⁵ Zellen/ml]	Probe	Anzahl der Zellen [10 ⁵ Zellen/ml]
Craggie Burn	38,2 ± 0,8	EWOR792	20,1 ± 8,5
River Thurso (a)	25,2 ± 1,8	Ohne Eisen	19,4 ± 2,8
Ohne EDTA	23,6 ± 3,8	EWOR772	15,6 ± 0,5
Idealmedium	21,2 ± 1,5	EWOR790	12,0 ± 0,4
EWOR761	20,6 ± 2,4	Sphagnumsäure	12,0 ± 0,0

Craggie Burn

Bei diesem Versuch kam die Wasserprobe Craggie Burn (2/16, gezogen am 22.08.2016) zum Einsatz, die Probe beinhaltet bereits natürlich gebundenes Eisen und Huminstoffe als natürliche Komplexbildner, daher wurde mit dem f/2-Medium ohne Eisen und ohne EDTA gearbeitet. Im Medium mit Craggie Burn ist *D. lutheri*, unter Berücksichtigung der Standardabweichungen, deutlich besser gewachsen als in den anderen Medien. Der Höchstwert der Zellzahlen und die spezifische Wachstumsrate liegen deutlich über den Höchstwerten der anderen Medien (vgl. Tabelle 7 und 8). Dies deutet darauf hin, dass synthetische Komplexbildner toxisch auf *D. lutheri* wirken könnten.

Ohne EDTA

Für die Probe 'Ohne EDTA' wurde das f/2-Medium ohne EDTA verwendet. Da in diesem Medium kein Komplexbildner vorhanden ist, ist es möglich, dass *D. lutheri* Eisen besser nutzen kann als *C. salina*, bzw. auf ausgefallenes Eisenhydroxid zugreifen kann. Unter Berücksichtigung des Ergebnisses im Idealmedium (mit EDTA) und den Proben mit anderen synthetischen Komplexbildnern, kann es möglich sein, dass sich synthetische Komplexbildner negativ auf die *D. lutheri* auswirken und eventuell toxisch wirken.

River Thurso (a)

Die Eisenkonzentration im River-Thurso(a)-Medium, bestehend aus der River Thurso Probe und dem f/2-Medium ohne Eisen und ohne EDTA, war mit $0,51 \cdot 10^{-5}$ mol/L nur in etwa halb so hoch wie die Eisenkonzentration im Craggie Burn Medium. Dadurch kann das schlechtere Wachstum im Vergleich zu Craggie Burn erklärt werden.

Idealmedium

Das Idealmedium schneidet bei diesem Versuch schlechter ab als die Vergleichsprobe ohne synthetischen Komplexbildner (ohne EDTA). EDTA könnte für diese Alge toxisch sein.

Ohne Eisen

Das Wachstum im f/2-Medium ohne Eisen ist vergleichbar mit allen anderen verwendeten Medien. Auch hier kann die Alge aus der Erhaltungskultur einen Eisenvorrat mitgenommen haben, zudem sind Eiseneinträge aus der Umgebung nicht ganz auszuschließen.

EWOR772, EWOR761, EWOR790, EWOR792

Die Proben EWOR772, EWOR761, EWOR790, EWOR792 bestehen aus dem f/2-Medium ohne EDTA, mit EWOR7xx als synthetischen Komplexbildner. Innerhalb der Standardabweichung ist das Wachstum in den EWOR-Medien als gleich anzusehen. Auch der Vergleich mit dem Idealmedium, dem Medium ohne EDTA und dem Medium ohne Eisen lässt darauf schließen, dass die *D. lutheri* empfindlicher auf Komplexbildner mit nicht natürlicher Struktur reagiert als *C. salina* (vgl. 3.1 und 3.3).

Sphagnumsäure

Die Sphagnumsäure wurde dem f/2-Medium ohne EDTA zugegeben. Das schlechte Wachstum im Sphagnumsäure-Medium liegt möglicherweise daran, dass die Algen das mit Sphagnumsäure komplexierte Eisen nicht aufnehmen können. Zudem kommt Sphagnumsäure in den Ozeanen nicht vor und könnte daher auch toxisch auf *D. lutheri* wirken.

3.3 *Chlorella salina* 10.03.2017 - 29.03.2017

Die Wachstumskurve der *C. salina* im Zeitraum von 10.03.2017 bis 29.03.2017 in verschiedenen Medien und unter Laborbedingungen ist in Abbildung 10 dargestellt, sowie im Anhang (4.7, Abbildung 15) zu finden. Folgende Proben kamen, jeweils als Triplet, zum Einsatz: Idealmedium (Volles f/2-Medium); Ohne Eisen (f/2-Medium ohne Eisen); Ohne EDTA (f/2-Medium ohne EDTA); Huminstoffproben: Craggie Burn, Sletill Burn und River Thurso (b) (f/2-Medium ohne Eisen, ohne EDTA, mit Huminstoff); EWOR772, EWOR772 2-fach, EWOR772 3-fach (f/2-Medium ohne Eisen, ohne EDTA, mit EWOR772); Ferrioxamin E (f/2-Medium ohne Eisen, ohne EDTA, mit Ferrioxamin E), (vgl. Tabelle 3 und 4). Bei diesem Wachstumsversuch wurden die Huminstoffproben Craggie Burn (1/16, gezogen 19.08.2016), River Thurso (6/16, gezogen am 29.08.2016) und Sletill Burn (3/16, gezogen 27.08.2016) eingesetzt. Details zu den Proben sind im Anhang (4.2, Tabelle 13) zu finden. Die Proben wurden in synthetischem Meerwasser nach Kester et al. (1967) hergestellt und mit *C. salina* Algen aus der Erhaltungskultur versetzt, die Anfangskonzentration an *C. salina* betrug 10^5 Zellen/ml. Die ermittelten Zellzahlen sind im Anhang (4.8, Tabelle 18 und 19) zu finden. Die spezifischen Wachstumsraten nach 19 Tagen sind in Tabelle 9, die Zellzahlen in den Proben nach 19 Tagen in Tabelle 10 gegenübergestellt.

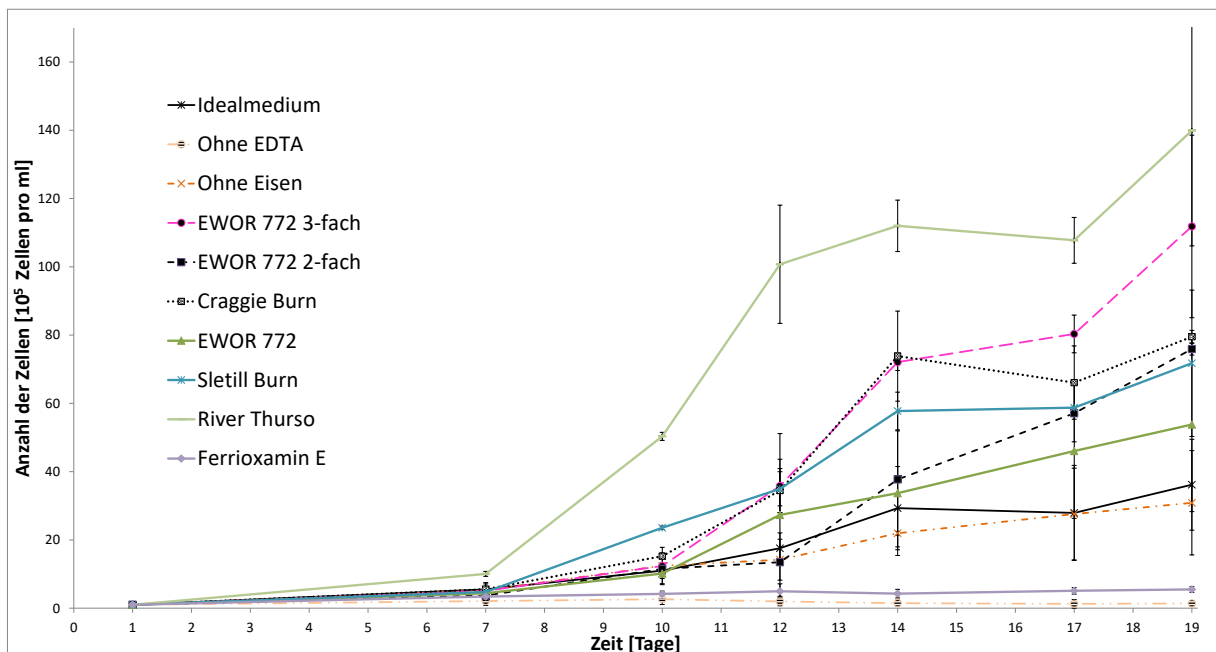


Abbildung 10: Verlauf des Algenwachstums von *Chlorella salina* im Zeitraum von 10.03.2017 - 29.03.2017.

Tabelle 9: Spezifische Wachstumsraten der Proben Craggie Burn, River Thurso (b), Sletill Burn, Ohne EDTA, Ohne Eisen, Idealmedium, EWOR772 3-fach, EWOR772 2-fach, EWOR772 und Ferrioxamin E nach 19 Tagen (29.03.2017).

Probe	Spezifische Wachstumsrate	Probe	Spezifische Wachstumsrate
River Thurso (b)	0,260	EWOR772	0,210
EWOR772 3-fach	0,248	Idealmedium	0,189
Craggie Burn	0,230	Ohne Eisen	0,180
EWOR772 2-fach	0,228	Ferrioxamin E	0,090
Sletill Burn	0,225	Ohne EDTA	0,017

Tabelle 10: Maximum der Anzahl an Zellen in den Proben Craggie Burn, River Thurso (b), Sletill Burn, Ohne EDTA, Ohne Eisen, Idealmedium, EWOR772 3-fach, EWOR772 2-fach, EWOR772 und Ferrioxamin E nach 17 Tagen (29.03.2017).

Probe	Anzahl der Zellen [10 ⁵ Zellen/ml]	Probe	Anzahl der Zellen [10 ⁵ Zellen/ml]
River Thurso (b)	139,9 ± 33,8	EWOR772	53,8 ± 25,5
EWOR772 3-fach	111,8 ± 21,4	Idealmedium	36,2 ± 13,3
Craggie Burn	79,5 ± 1,9	Ohne Eisen	30,9 ± 15,3
EWOR772 2-fach	75,9 ± 1,8	Ferrioxamin E	5,5 ± 0,8
Sletill Burn	71,8 ± 26,8	Ohne EDTA	1,4 ± 0,7

River Thurso (b)

Im Vergleich zu den Wachstumsversuchen von 24.01.2017 - 10.02.2017 mit River Thurso (a) und *D. lutheri* wurde dieses Mal die gewünschte Eisenkonzentration von $1,17 \cdot 10^5$ mol/L erreicht. Es handelt sich zwar um dieselbe Wasserprobe, jedoch wurde die doppelte Menge für die Versuche herangezogen, deshalb auch die Bezeichnung (b). Die Probe River Thurso (b) beinhaltet bereits natürlich gebundenes Eisen und Huminstoffe als natürlich vorkommende Komplexbildner, daher wurde hier mit dem f/2-Medium ohne Eisen und ohne EDTA gearbeitet. Die Wachstumskurve der Algen im River-Thurso-Medium zeigt nach 7 Tagen einen deutlich steileren Anstieg als alle anderen Proben, sowie allgemein ein deutlich besseres Wachstum als alle anderen Proben.

EWOR772 3-fach

Die Probe EWOR772 3-fach hat nach River Thurso (b) am zweitbesten abgeschnitten. Hier kommt der Komplexbildner EWOR772 in 3-facher Konzentration vor. Die Proben wurden mit dem f/2-Medium ohne EDTA angesetzt. Die *C. salina* scheint diesen synthetischen Komplexbildner gut zu vertragen, bei höheren Konzentrationen von EWOR772 ist auch das Wachstum besser. Das unterstreicht die gute Eignung dieses Komplexes als Modell für natürliche Huminstoffe.

EWOR772 2-fach

Im Vergleich zu EWOR772 3-fach weniger gut gewachsen, aber dennoch ist ein gutes Wachstum zu erkennen. Die Proben wurden mit dem f/2-Medium ohne EDTA angesetzt.

EWOR772

Die Algen sind in EWOR772 mit einfacher Konzentration weniger gut gewachsen als in zweifacher und dreifacher Konzentration. Dennoch ist ein gutes Wachstum zu erkennen.

Craggie Burn

Hier wurde wieder die 1/16 Craggie Burn Probe verwendet. Die Probe Craggie Burn beinhaltet bereits natürlich gebundenes Eisen und Huminstoffe als natürliche Komplexbildner, daher wurde hier mit dem f/2-Medium ohne Eisen und ohne EDTA gearbeitet. Im Vergleich zu vorhergehenden Versuchen hat die Probe ein weniger gutes Wachstum erreicht. Der Vergleich der einzelnen Versuchsreihen zu einander ist nur bedingt aussagekräftig, die Probe Craggie Burn könnte sich seit der Probenahme verändert haben.

Sletill Burn

Die Probe Sletill Burn beinhaltet bereits natürlich gebundenes Eisen und Huminstoffe als natürliche Komplexbildner, daher wurde hier mit dem f/2-Medium ohne Eisen und ohne EDTA gearbeitet. Allerdings ist zu beachten, dass die Eisenkonzentration im Sletill-Burn-Medium nur $0,16 \cdot 10^{-5}$ mol/L betrug, das sind lediglich 14 Prozent der Eisenkonzentration der anderen Proben. Dennoch ist die *C. salina* in diesem Medium besser gewachsen als im Idealmedium und bewegte sich im Bereich von EWOR772 und EWOR772 2-fach.

Idealmedium

Im vollen f/2-Medium haben sich die Algen erwartungsgemäß besser vermehrt als im Medium ohne Eisen, im Medium ohne EDTA und im Medium mit Ferrioxamin E.

Ohne Eisen

Im Medium ohne Eisenzusatz wuchs die Alge besser als im Medium ohne EDTA. Eiseneintrag durch Zugabe der Alge aus der Erhaltungskultur und auch weitere unerwünschte Eiseneinträge können nicht ausgeschlossen werden.

Ohne EDTA

Die Alge wuchs im Medium ohne EDTA noch weniger als im Medium mit Ferrioxamin E. Das vorhandene, kolloidale Eisen konnte nicht aufgenommen werden.

Ferrioxamin E

Ferrioxamin E ist ein Siderophor. Es bindet Eisen so gut, dass es von der Alge *C. salina* nicht aufgenommen werden kann. Die Probe setzt sich aus dem f/2-Medium ohne EDTA, mit Ferrioxamin E zusammen.

3.4 *Chlorella salina* 09.06.2017 - 26.06.2017

Die Wachstumskurve der Meeresalge *C. salina* im Zeitraum von 09.06.2017 bis 26.06.2017 in verschiedenen Medien und unter Laborbedingungen ist in Abbildung 11 dargestellt, sowie im Anhang (4.9, Abbildung 16) zu finden. Folgende Proben kamen, jeweils als Triplet, zum Einsatz: Idealmedium (Volles f/2-Medium); Ohne Eisen (f/2-Medium ohne Eisen); Ohne EDTA (f/2-Medium ohne EDTA); Huminstoffproben: Craggie Burn (f/2-Medium ohne Eisen, ohne EDTA, mit Huminstoff); Ferrioxamin E + Craggie Burn (f/2-Medium ohne Eisen, ohne EDTA, mit Huminstoff und Ferrioxamin E); Melanin (f/2-Medium ohne Eisen, ohne EDTA, mit Melanin); Ferrioxamin E (f/2-Medium ohne Eisen, ohne EDTA, mit Ferrioxamin E), (vgl. Tabelle 3 und 4). Bei diesem Wachstumsversuch wurde die Huminstoffprobe (1/16, gezogen 19.08.2016) verwendet. Die Proben wurden in synthetischem Meerwasser nach Kester et al. (1967) hergestellt und mit *C. salina* Algen aus der Erhaltungskultur versetzt, die Anfangskonzentration an *C. salina* betrug 10^5 Zellen/ml. Die ermittelten Zellzahlen sind im Anhang (4.10, Tabelle 20) zu finden. Die spezifischen Wachstumsraten nach 14 Tagen sind in Tabelle 11, die Zellzahlen in den Proben nach 14 Tagen in Tabelle 12 gegenübergestellt.

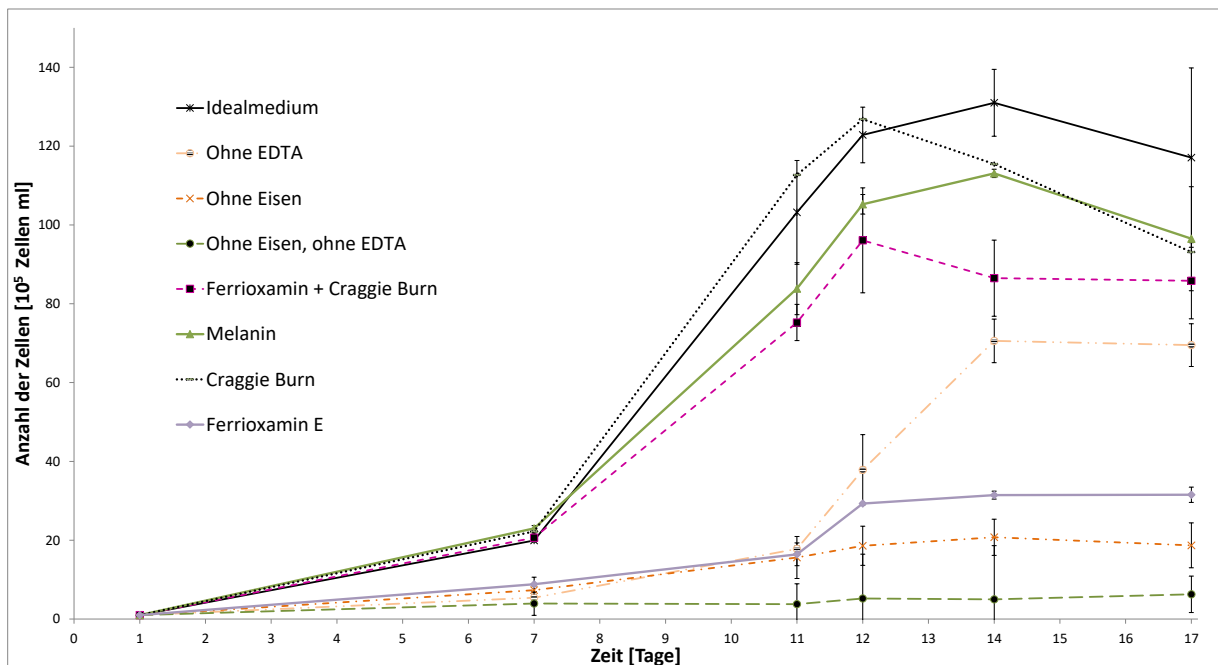


Abbildung 11: Verlauf des Algenwachstums von *Chlorella salina* im Zeitraum von 09.06.2017 - 26.06.2017.

Tabelle 11: Spezifische Wachstumsraten der Proben Craggie Burn; Ohne EDTA; Ohne Eisen; Idealmedium; Ferrioxamin E; Ferrioxamin E + Craggie Burn ; Ohne Eisen, ohne EDTA; sowie Melanin nach 14 Tagen (23.06.2017) bzw. nach 12 Tagen (21.06.2017).

Probe	Spezifische Wachstumsrate	Probe	Spezifische Wachstumsrate
Idealmedium	0,348	Ohne EDTA	0,304
Craggie Burn	0,339	Ferrioxamin E	0,247
Melanin	0,338	Ohne Eisen	0,217
Ferrioxamin E + Craggie Burn	0,319	Ohne Eisen, ohne EDTA	0,115
Craggie Burn (nach 12 Tagen)	0,404	Ferrioxamin E + Craggie Burn (12)	0,380

Tabelle 12: Maximum der Anzahl an Zellen in den Proben Craggie Burn; Ohne EDTA; Ohne Eisen; Idealmedium; Ferrioxamin E; Ferrioxamin E + Craggie Burn ; Ohne Eisen, ohne EDTA; sowie Melanin nach 14 Tagen (23.06.2017) bzw. nach 12 Tagen (21.06.2017).

Probe	Anzahl der Zellen [10 ⁵ Zellen/ml]	Probe	Anzahl der Zellen [10 ⁵ Zellen/ml]
Idealmedium	131,0 ± 8,5	Ohne EDTA	70,6 ± 5,5
Craggie Burn	115,4 ± 13,6	Ferrioxamin E	31,5 ± 1,0
Melanin	113,1 ± 1,1	Ohne Eisen	20,8 ± 4,6
Ferrioxamin E + Craggie Burn	86,5 ± 9,7	Ohne Eisen, ohne EDTA	5,0 ± 0,8
Craggie Burn (nach 12 Tagen)	126,8 ± 11,3	Ferrioxamin E + Craggie Burn (12)	96,1 ± 13,3

Im Vergleich zu den vorhergehenden Wachstumsversuchen wurde dieses Mal eine neu hergestellte Erhaltungskultur (2 Wochen alt) herangezogen, welche sich gerade in der exponentiellen Wachstumsphase befand. Die bei den vorhergehenden Wachstumsversuchen eingesetzten Kulturen waren schon Wochen bis Monate alt, sodass auch die Zellzahlen konstant blieben. Aus der neuen Erhaltungskultur wurden mit der Alge noch Nährstoffe in die Proben eingebracht, zudem befand sich die Alge in einer exponentiellen Wachstumsphase. Dies führte zu einem sehr starken Wachstum zu Beginn des Versuchs, allerdings hielt dieses Wachstum nicht lange an. Durch das schnelle Wachstum wurden wahrscheinlich die Nährstoffe schnell verbraucht; gegebenenfalls war das Volumen im Probengefäß auch zu gering für die große Anzahl an Algen. Somit endete das Wachstum frühzeitig.

Craggie Burn

Die *C. salina* Algen wuchsen im Craggie Burn Medium in den ersten 12 Tagen sehr stark, dies ist auch an der spezifischen Wachstumsrate zu erkennen. Danach war die Wachstumsphase vorbei. Das Wachstum in den ersten 12 Tagen ist ähnlich dem Wachstum im Idealmedium. Die Craggie Burn Wasserprobe wurde bereits im August 2016 gezogen, daher könnte zu diesem Zeitpunkt nicht mehr der Ursprungsgehalt an natürlichen Komplexbildnern vorhanden gewesen sein. Die Probe Craggie Burn beinhaltet bereits natürlich gebundenes Eisen und Huminstoffe als natürliche Komplexbildner, daher wurde hier mit dem f/2-Medium ohne Eisen und ohne EDTA gearbeitet.

Idealmedium

Das Wachstum der Alge war in den ersten 12 Tagen sehr stark, wuchs aber im Vergleich zum Craggie Burn noch bis Tag 14 weiter. Wie auch im Craggie Burn Medium vermehrte sich die Alge zu Beginn sehr stark.

Ferrioxamin E + Craggie Burn

Diese Probe enthielt zusätzlich zum Craggie Burn Medium noch Ferrioxamin E, ansonsten war sie von der Zusammensetzung her mit der Craggie Burn Probe ident. Auch hier war das Wachstum zu Beginn sehr stark und die Zellzahlen erreichten nach 12 Tagen das Maximum. Die Alge ist hier etwas weniger gut gewachsen als im Craggie Burn Medium. Das Maximum nach 12 Tagen erreichte 76 % des Wertes im Craggie Burn Medium ohne Ferrioxamin E. Ferrioxamin E beeinflusste zwar das Wachstum negativ, konnte es aber nicht unterbinden. Dies lässt darauf schließen, dass zwar ein Ligandenaustausch zwischen Craggie Burn und Ferrioxamin E stattfindet, aber nur geringfügig.

Melanin

Die Proben wurden mit dem f/2-Medium ohne EDTA angesetzt. Melanin sollte die Funktion als Komplexbildner einnehmen. Die Alge wuchs, wie auch die bereits erwähnten Proben in den ersten 12 Tagen sehr stark, im Gegensatz zu jenen mit natürlichen Huminstoffen allerdings noch bis Tag 14 weiter. So wie das Idealmedium auch, allerdings erreichten die Zellzahlen um ca. 15-20 % geringere Werte in den Tagen 11 bis 17. Das untersuchte Melanin eignet sich also gut als Modellsubstanz für natürliche Huminstoffe.

Ohne EDTA

Im f/2-Medium ohne EDTA wuchs die Alge anfangs kaum, nach Tag 11 aber stark.

Ferrioxamin E

Auch im Medium mit Ferrioxamin E begann die Alge nach 11 Tagen stärker zu wachsen.

Ohne Eisen

Die Alge wuchs in diesem Medium weniger gut als in der Probe ohne EDTA und der Probe mit Ferrioxamin E.

Ohne Eisen, ohne EDTA

Für diese Probe wurde das f/2 Medium ohne Eisen und ohne EDTA verwendet. Das Wachstum in diesem Medium war, wie erwartet, niedrig.

3.5 Schlussfolgerung

Die Algen - Wachstumsversuche mit den Meeresalgen *Chlorella salina* und *Diacronema lutheri* haben gezeigt, dass sich Ergebnisse einer Meeres-Algen-Art nicht auf alle Meeres-Algen verallgemeinern lassen. Im Vergleich mit Huminstoffen als Komplexbildner und Eisenlieferant hat der synthetische Komplexbildner EWOR772 bei Versuchen mit *Chlorella salina* gut abgeschnitten, die Ergebnisse der einzelnen Wachstumsversuche mit *C. salina* im EWOR772 Medium sind einander ähnlich. Die Struktur von EWOR772 (vgl. Abbildung 5) scheint nah an die Strukturen von Huminstoffen heran zu kommen, zumindest was den Eisen-bindenden Teil betrifft. Aber nicht nah genug um auch für *Diacronema lutheri* gut geeignet zu sein.

Natürlich vorkommende Huminstoffe haben ein deutlich höheres Molekulargewicht als die Modell-Substanzen. Möglicherweise hat der komplexe Rest dieser Moleküle auch einen Einfluss auf die Bioverfügbarkeit.

4 Anhang

4.1 Kalibrierkurve Flammen-AAS

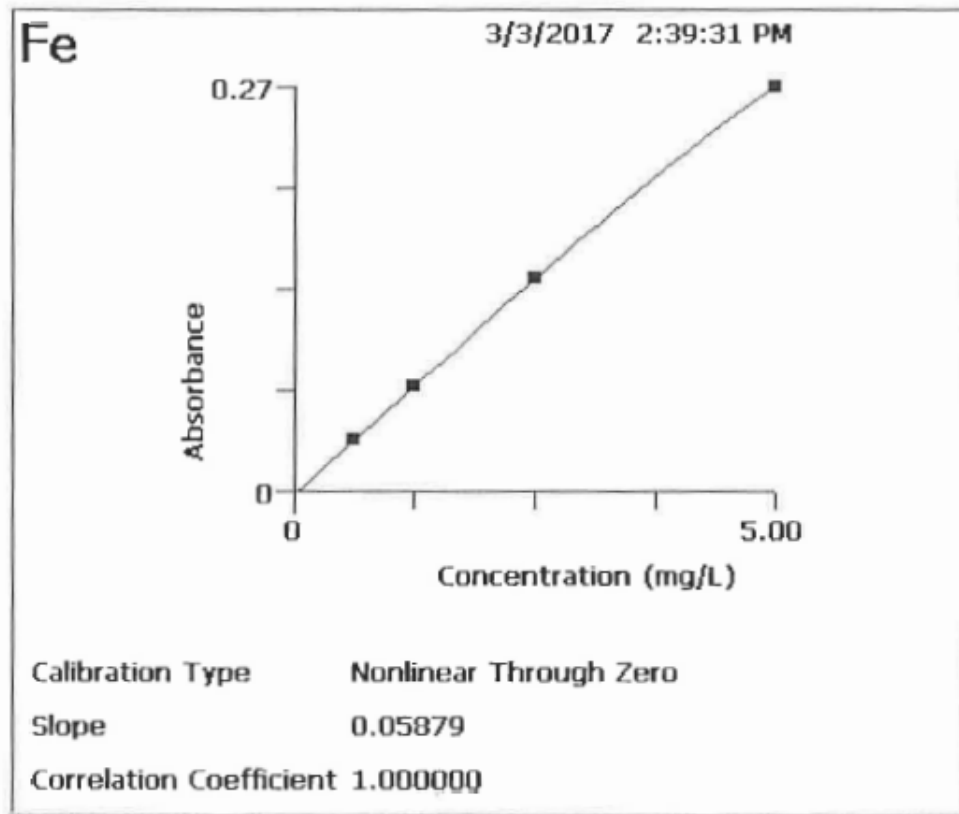


Abbildung 12: Kalibrierkurve der Flammen-AAS (Perkin Elmer, A Analyst 200, Atomic Absorption Spectrometer) zur Eisenbestimmung.

4.2 Elementanalyse

Probe	Datum der Proben- nahme	Koordinaten	Temp. °C	Wetter	Leitfähigkeit µS/cm	pH	Eisen mg/L*	DOC mg/L*	DN mg/L*	Mg mg/L*	Ca mg/L*	Na mg/L*	K mg/L*
1/16 Craggie Burn	19.08.2016	N 58°25'48,7" W 03°54'19,3"	14,4	bewölkt, windig	127,5	6,7	4,57	48,0	1,04	3,2	11,1	14,4	1,5
2/16 Craggie Burn	22.8.2016	N 58°25'48,7" W 03°54'19,3"	14,7	bewölkt, schwacher Wind	139,7	6,8	4,53	44,0	1,00	3,6	11,0	15,0	1,7
3/16 Sletill Burn	27.08.2016	N 58°23'28" W 03°49'21"	14,6	sonnig, windstill	144,0	6,8	3,69	10,5	0,27	4,5	2,3	14,0	0,8
5/16 Allt na Cleite	28.08.2016	N 58°33'30,8" W 03°56'35,3"	17,3	sonnig, schwacher Wind	142,6	7,4	2,52	19,3	0,37	3,7	3,3	19,8	0,8
6/16 River Thurso	29.08.2016	N 58°26'46,54" W 03°29'28,42"	14,6	sonnig, schwacher Wind	79,3	7,2	1,25	19,7	0,42	2,1	5,3	8,8	0,3

*In der 0,2µm filtrierten Probe

Tabelle 13: Elementanalyse.

4.3 Wachstumskurve *Chlorella salina* (09.12.2016 - 27.12.2016)

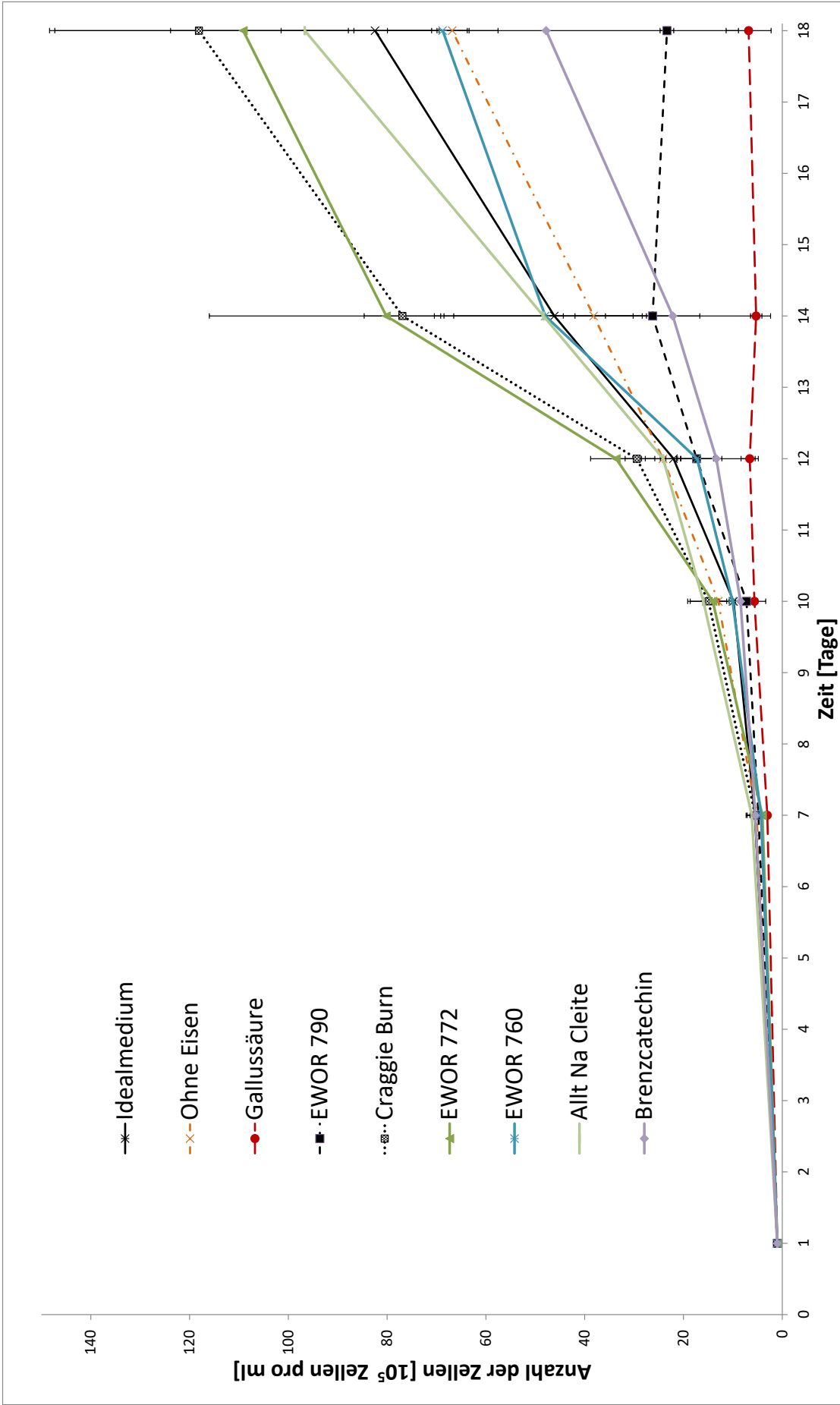


Abbildung 13: Wachstumskurve *Chlorella salina* (09.12.2016 - 27.12.2016).

4.4 Daten Wachstumskurve *Chlorella salina* (09.12.2016 - 27.12.2016)

Datum	09.12.2016	16.12.2016	19.12.2016	21.12.2016	23.12.2016	27.12.2016
EWOR772-1	100000	476667	1323333	3730000	10550000	13612500
EWOR772-2	100000	4933333	1406667	5073333	9566667	12433333
EWOR772-3	100000	330000	1490000	3000000	5483333	8216667
Mittelwert	100000	403333	1406667	3365000	8016667	10914583
Standardabweichung %	0	25,71	8,38	15,34	44,69	34,96
Standardabweichung	0	103709	117851	516188	3582674	3815430
ohne Fe 1	100000	576667	1140000	2373333	3123333	6466667
ohne Fe 2	100000	460000	463333	403333	383333	363333
ohne Fe 3	100000	460000	1453333	2453333	4510000	6900000
Mittelwert	100000	518333	1296667	2413333	3816667	6683333
Standardabweichung %	0	15,92	17,09	2,34	25,69	4,58
Standardabweichung	0	82496	221560	56569	980521	306413
Craggie Burn 1	100000	470000	1893333	3353333	6887500	10400000
Craggie Burn 2	100000	656667	1426667	2643333	7750000	9750000
Craggie Burn 3	100000	510000	1163333	2843333	8433333	15283333
Mittelwert	100000	545556	1494444	2946667	7690278	11811111
Standardabweichung %	0	18,01	24,74	12,42	10,07	25,61
Standardabweichung	0	98282	369690	366106	774645	3024545
Allt Na Cleite 1	100000	750000	1953333	2676667	4460000	12783333
Allt Na Cleite 2	100000	566667	1336667	2000000	3236667	7783333
Allt Na Cleite 3	100000	536667	1496667	2560000	6810000	8433333
Mittelwert	100000	617778	1595556	2412222	4835556	9666667
Standardabweichung %	0	18,69	20,06	15,00	37,56	28,12
Standardabweichung	0	115486	320006	361729	1816028	2718609
Tag	1	7	10	12	14	18

Tabelle 14: Daten Wachstumskurve *Chlorella salina* (09.12.2016 - 27.12.2016) Seite 1.

Datum	09.12.2016	16.12.2016	19.12.2016	21.12.2016	23.12.2016	27.12.2016
Ideal 1	100000	623333	1463333	2583333	6326667	8483333
Ideal 2	100000	460000	596667	1090000	1833333	6233333
Ideal 3	100000	586666,6667	896666,667	2933333,333	5683333	10016667
Mittelwert	100000	556667	985556	2202222	4614444	8244444
Standardabweichung %	0	15,40	44,66	44,45	52,66	23,08
Standardabweichung	0	85700	440118	978981	2429898	1902946
Brenzcatechin 1	100000	470000	770000	780000	816667	2027778
Brenzcatechin 2	100000	623333,3333	920000	1890000	3616667	7533333
Brenzcatechin 3	100000	513333	546667	626667	493333	500000
Mittelwert	100000	546667	845000	1335000	2216667	4780556
Standardabweichung %	0	19,83	12,55	58,79	89,32	81,43
Standardabweichung	0	108423	106066	784889	1979899	3893016
Gallussäure 1	100000	513333	786667	1833333	6783333	6366667
Gallussäure 2	100000	290000	403333	536667	446667	360000
Gallussäure 3	100000	313333	726667	783333	610000	1003333
Mittelwert	100000	301667	565000	660000	528333	681667
Standardabweichung %	0	5,47	40,47	26,43	21,86	66,73
Standardabweichung	0	16499	228631	174420	115494	454905
EWOR760-1	100000	430000	1000000	1490000	3350000	6083333
EWOR760-2	100000	430000	1010000	1963333,333	6250000	7666667
EWOR760-3	100000	543333	1993333	2106667	5483333	6400000
Mittelwert	100000	430000	1005000	1726667	4800000	6875000
Standardabweichung %	0	0,00	0,70	19,38	42,72	16,28
Standardabweichung	0	0	7071	334697	2050610	1119586
EWOR790-1	100000	323333	563333	1443333	1950000	2433333
EWOR790-2	100000	643333	883333	2023333	3300000	2237500
EWOR790-3	100000	410000	456667	596667	523333	826667
Mittelwert	100000	483333	723333	1733333	2625000	2335417
Standardabweichung %	0	46,82	31,28	23,66	36,37	5,93
Standardabweichung	0	226274	226274	410122	954594	138475
Tag	1	7	10	12	14	18

Tabelle 15: Daten Wachstumskurve *Chlorella salina* (09.12.2016 - 27.12.2016) Seite 2.

4.5 Wachstumskurve *Diacronema lutheri* (24.01.2017 - 10.02.2017)

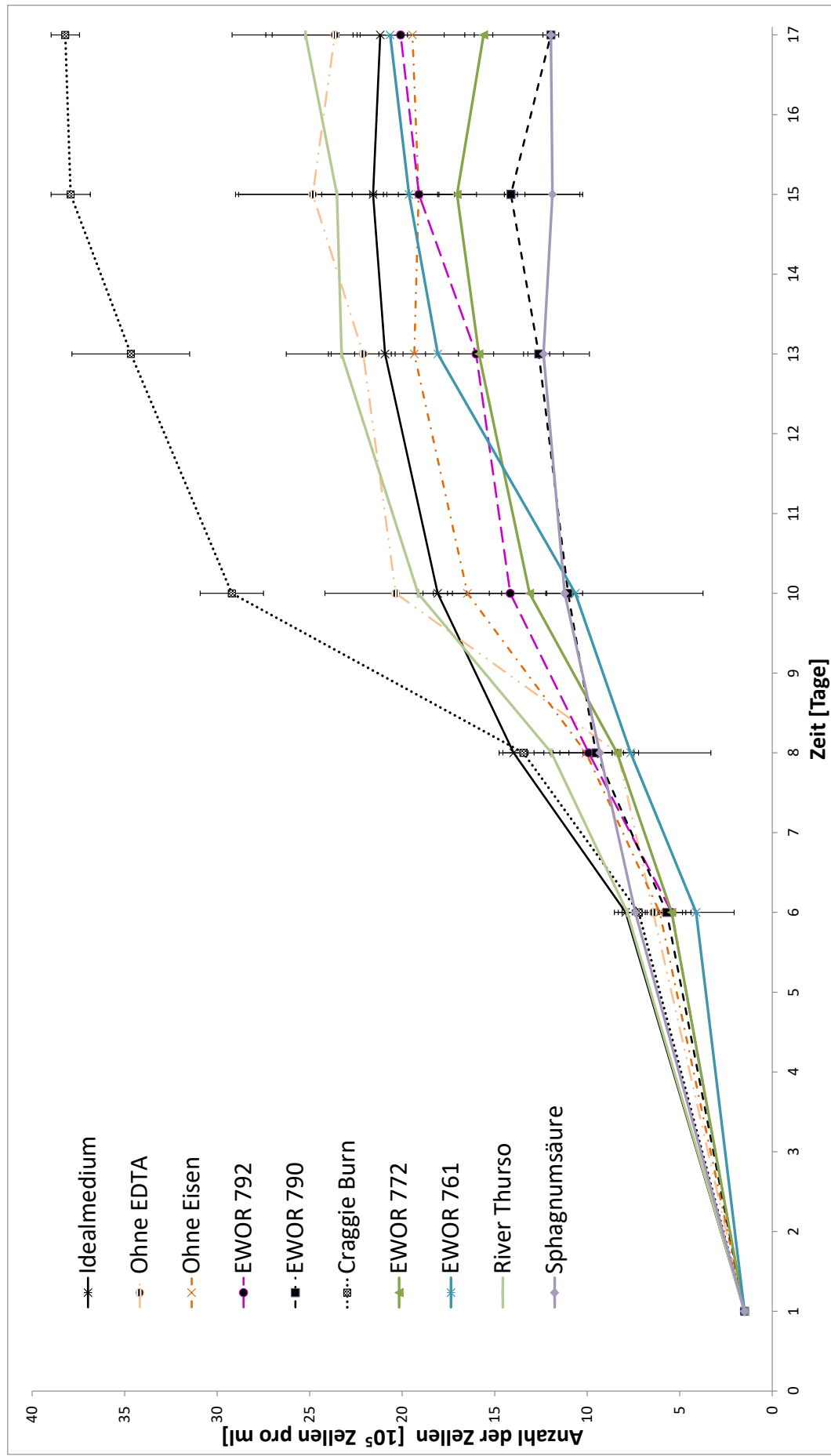


Abbildung 14: Wachstumskurve *Diacronema lutheri* (24.01.2017 - 10.02.2017).

4.6 Daten Wachstumskurve *Diacronema lutheri* (24.01.2017 - 10.02.2017)

Datum	24.01.2017	30.01.2017	01.02.2017	03.02.2017	06.02.2017	08.02.2017	10.02.2017
EWOR772-1	150000	546667	556667	716667	803333	1390000	923333
EWOR772-2	150000	470000	903333	1373333	1583333	1629167	1595833
EWOR772-3	150000	616666,6667	773333	1250000	1587500	1777778	1525000
Mittelwert	150000	543333	838333	1311667	1585417	1703472	1560417
Standardabweichung %	0	19,09	10,97	6,65	0,19	6,17	3,21
Standardabweichung	0	103709	91924	87210	2946	105084	50087
ohne EDTA 1	150000	550000	580000	793333	1076667	1300000	1641667
ohne EDTA 2	150000	666667	856667	2305556	2333333	2766667	2100000
ohne EDTA 3	150000	620000	813333	1763333	2088889	2200000	2627778
Mittelwert	150000	643333	835000	2034444	2211111	2483333	2363889
Standardabweichung %	0	5,13	3,67	18,85	7,82	16,14	15,79
Standardabweichung	0	32998	30641	383409	172848	400694	373195
ohne Fe 1	150000	640000	770000	2033333	2145833	2433333	2483333
ohne Fe 2	150000	573333	906667	1516667	1891667	1833333	1744444
ohne Fe 3	150000	643333	1106667	1777778	1977778	1988889	2144444
Mittelwert	150000	608333	1006667	1647222	1934722	1911111	1944444
Standardabweichung %	0	8,14	14,05	11,21	3,15	5,76	14,55
Standardabweichung	0	49497	141421	184633	60890	109994	282843
Craggie Burn 1	150000	696666,6667	1266667	3041667	3691667	3716667	3766667
Craggie Burn 2	150000	746667	1423333	2800000	3241667	3866667	3875000
Craggie Burn 3	150000	640000	1313333	2372222	2377778	2438889	3258333
Mittelwert	150000	721666,6667	1345000	2920833,333	3466666,667	3791666,667	3820833,333
Standardabweichung %	0	4,90	8,24	5,85	9,18	2,80	2,00
Standardabweichung	0	35355	110780	170884	318198	106066	76603
River Thurso 1	150000	673333	1050000	1966667	3016667	2688889	3675000
River Thurso 2	150000	763333	1126667	1916667	2277778	2294444	2650000
River Thurso 3	150000	803333	1260000	1911111	2377778	2411111	2394444
Mittelwert	150000	783333	1193333	1913889	2327778	2352778	2522222
Standardabweichung %	0	3,61	7,90	0,21	3,04	3,51	7,16
Standardabweichung	0	28284	94281	3928	70711	82496	180705
Tag	1	6	8	10	13	15	17

Tabelle 16: Daten Wachstumskurve *Diacronema lutheri* (24.01.2017 - 10.02.2017) Seite 1.

Datum	24.01.2017	30.01.2017	01.02.2017	03.02.2017	06.02.2017	08.02.2017	10.02.2017
Ideal 1	150000	790000	1320000	1854167	2061111	2172222	2222222
Ideal 2	150000	833333,3333	1396667	1716667	2127778	2161111	2183333
Ideal 3	150000	753333	1476667	1854167	2088889	2138889	1950000
Mittelwert	150000	792222	1397778	1808333	2092593	2157407	2118519
Standardabweichung %	0	5,05	5,60	4,39	1,60	0,79	6,95
Standardabweichung	0	40046	78339	79386	33487	16973	147231
Sphagnumsäure 1	150000	660000	873333	1053333	1312500	1293333	1196667
Sphagnumsäure 2	150000	810000	1603333,33	1504167	1755556	1708333	1337500
Sphagnumsäure 3	150000	820000	990000	1190000	1160000	1083333	1196667
Mittelwert	150000	740000	931667	1121667	1236250	1188333	1196667
Standardabweichung %	0	15,29	8,85	8,62	8,72	12,50	0,00
Standardabweichung	0	113137	82496	96638	107834	148492	0
EWOR761-1	150000	350000	800000	1153333	1761111	2172222	2333333
EWOR761-2	150000	386667	753333	936667	1744444	1794444	1894444
EWOR761-3	150000	496667	743333	1103333	1916667	1922222	1966667
Mittelwert	150000	411111	765556	1064444	1807407	1962963	2064815
Standardabweichung %	0	18,57	3,95	10,66	5,26	9,79	11,40
Standardabweichung	0	76328	30246	113448	94988	192156	235331
EWOR792-1	150000	780000	1283333	1855556	2250000	2808333	2925000
EWOR792-2	150000	430000	1200000	1772222	1872222	1983333	1866667
EWOR792-3	150000	420000	493333	620000	680000	936667	1233333
Mittelwert	150000	543333	992222	1415926	1600741	1909444	2008333
Standardabweichung %	0	48,24	51,27	57,73	64,21	64,25	55,14
Standardabweichung	0	205020	434055	690550	819452	938018	854685
EWOR790-1	150000	630000	1116667	1123333	1303333	1387500	1166667
EWOR790-2	150000	510000	790000	1083333	1220000	1437500	1226667
EWOR790-3	150000	690000	740000	816667	833333	1013333	910000
Mittelwert	150000	570000	953333	1103333	1261667	1412500	1196667
Standardabweichung %	0	14,89	24,23	2,56	4,67	2,50	3,55
Standardabweichung	0	84853	230988	28284	58926	35355	42426
Tag	1	6	8	10	13	15	17

Tabelle 17: Daten Wachstumskurve *Diacronema lutheri* (24.01.2017 - 10.02.2017) Seite 2.

4.7 Wachstumskurve *Chlorella salina* (10.03.2017 - 29.03.2017)

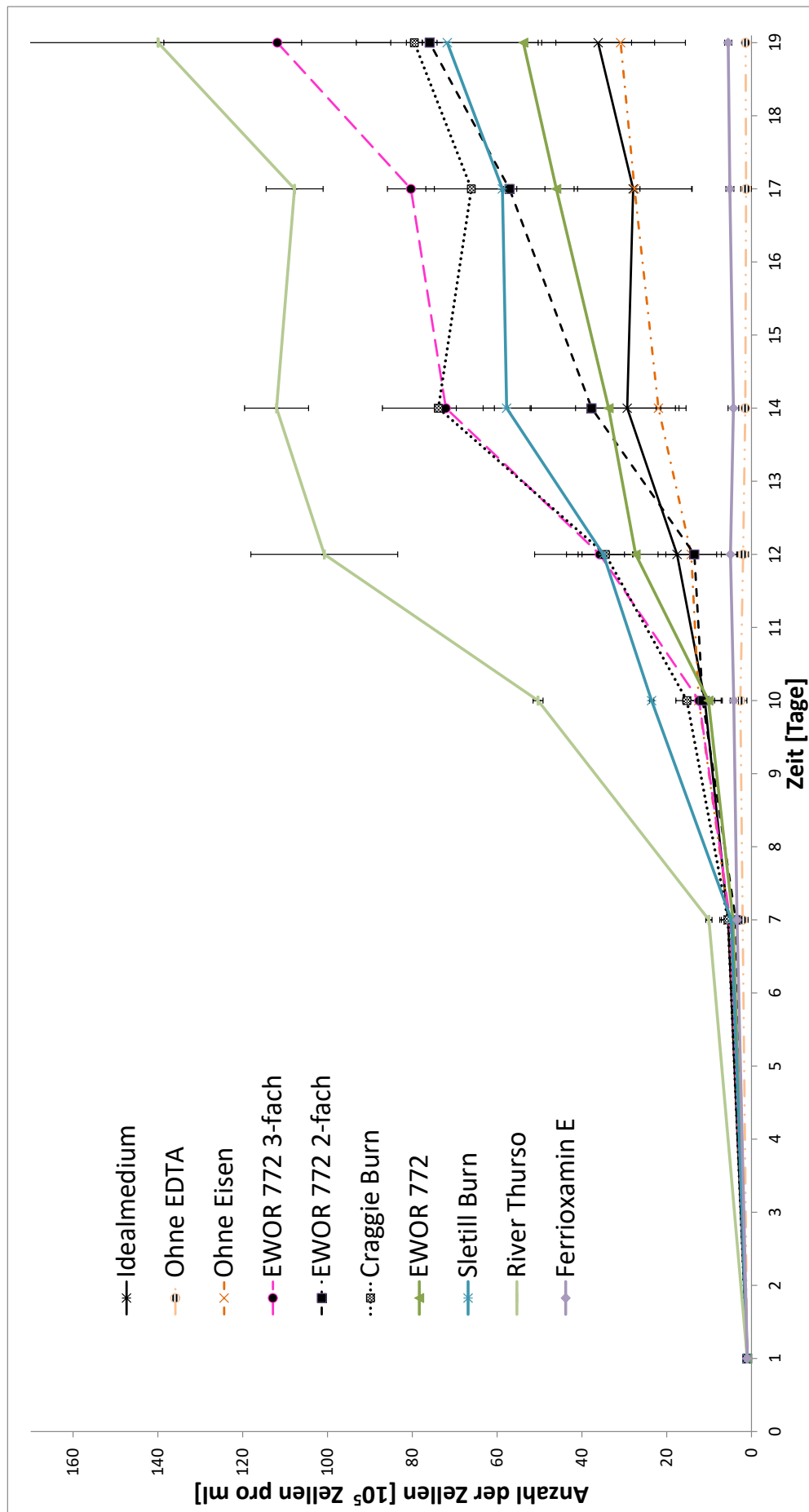


Abbildung 15: Wachstumskurve *Chlorella salina* (10.03.2017 - 29.03.2017).

4.8 Daten Wachstumskurve *Chlorella salina* (10.03.2017 - 29.03.2017)

Datum	10.03.2017	17.03.2017	20.03.2017	22.03.2017	24.03.2017	27.03.2017	29.03.2017
EWOR772-1	100000	496667	476667	483333	713333	1712500	3291667
EWOR772-2	100000	510000	1226667	4416667	4658333	6000000	7183333
EWOR772-3	100000	366666,667	803333	1046667	2077778	3208333	3575000
Mittelwert	100000	438333	1015000	2731667	3368056	4604167	5379167
Standardabweichung %	0	23,12	29,49	87,23	54,18	42,87	47,43
Standardabweichung	0	101352	299342	2382950	1824728	1974006	2551477
ohne EDTA 1	100000	106666,667	123333	140000	96667	56667	110000
ohne EDTA 2	100000	166667	233333	106667	96667	53333	83333
ohne EDTA 3	100000	350000	430000	340000	246667	273333	223333
Mittelwert	100000	207778	262222	195556	146667	127778	138889
Standardabweichung %	0	61,01	59,25	64,53	59,05	98,66	53,52
Standardabweichung	0	126769	155361	126198	86603	126066	74337
ohne Fe 1	100000	453333	980000	996667	2155556	3708333	4166667
ohne Fe 2	100000	390000	706667	803333	1179167	1030000	1620833
ohne Fe 3	100000	600000	1510000	1844444	2233333	1805556	2005556
Mittelwert	100000	526667	1245000	1420556	2194444	2756944	3086111
Standardabweichung %	0	19,69	30,10	42,20	2,51	48,80	49,52
Standardabweichung	0	103709	374767	599469	54997	1345467	1528136
Craggie Burn 1	100000	663333,333	1554167	3900000	6450000	5850000	7816667
Craggie Burn 2	100000	443333	1491667	2991667	8316667	7366667	8083333
Craggie Burn 3	100000	1103333	4100000	9200000	10333333	8800000	9816667
Mittelwert	100000	553333,333	1522916,67	3445833,33	7383333,33	6608333,33	7950000
Standardabweichung %	0	28,11	2,90	18,64	17,88	16,23	2,37
Standardabweichung	0	155563	44194	642289	1319933	1072445	188562
River Thurso 1	100000	1056667	5116667	11300000	11733333	10300000	11600000
River Thurso 2	100000	953333	4950000	8850000	10666667	11250000	16383333
River Thurso 3	100000	520000	1876667	5233333	8133333	8733333	7733333
Mittelwert	100000	1005000	5033333	10075000	11200000	10775000	13991667
Standardabweichung %	0	7,27	2,34	17,20	6,73	6,23	24,17
Standardabweichung	0	73068	117851	1732412	754247	671751	3382327
Tag	1	7	10	12	14	17	19

Tabelle 18: Daten Wachstumskurve *Chlorella salina* (10.03.2017 - 29.03.2017) Seite 1.

Datum	10.03.2017	17.03.2017	20.03.2017	22.03.2017	24.03.2017	27.03.2017	29.03.2017
Ideal 1	100000	690000	1003333	2072222	3791667	3775000	458333
Ideal 2	100000	320000	310000	720833	793333	2005556	3150000
Ideal 3	100000	410000	1193333	1441667	2066667	1805556	2675000
Mittelwert	100000	550000	1098333	1756944	2929167	2790278	3616667
Standardabweichung %	0	36,00	12,23	25,38	41,64	49,91	36,82
Standardabweichung	0	197990	134350	445870	1219759	1392608	1331718
Ferrioxamin E 1	100000	336667	513333	710000	486667	616667	500000
Ferrioxamin E 2	100000	370000	383333,333	500000	510000	470000	646667
Ferrioxamin E 3	100000	313333	356667	280000	280000	440000	500000
Mittelwert	100000	340000	417778	496667	425556	508889	548889
Standardabweichung %	0	8,38	20,06	43,29	29,75	18,58	15,43
Standardabweichung	0	28480	83821	215019	126594	94536	84678
Sletill Burn 1	100000	866667	2841667	9383333	10450000	12250000	13600000
Sletill Burn 2	100000	376667	1966667	2941667	5600000	5483333	5283333
Sletill Burn 3	100000	570000	2741667	4050000	5950000	6266667	9066667
Mittelwert	100000	473333	2354167	3495833	5775000	5875000	7175000
Standardabweichung %	0	28,88	23,28	22,42	4,29	9,43	37,29
Standardabweichung	0	136707	548008	783710	247487	553900	2675221
EWOR772 3x -1	100000	463333	1200000	3225000	6816667	8016667	9666667
EWOR772 3x -2	100000	430000	1813333,33	7966667	8933333	8800000	11116667
EWOR772 3x -3	100000	553333	1270000	3933333	7600000	8050000	12700000
Mittelwert	100000	508333	1235000	3579167	7208333	8033333	11183333
Standardabweichung %	0	12,52	4,01	13,99	7,68	0,29	19,18
Standardabweichung	0	63640	49497	500867	553900	23570	2144891
EWOR772 2x -1	100000	353333	1213333	1358333	5166667	6300000	7466667
EWOR772 2x -2	100000	443333	1200000	5333333	10683333	10600000	10550000
EWOR772 2x -3	100000	386667	1086667	1337500	2372222	5116667	7716667
Mittelwert	100000	370000	1150000	1347917	3769444	5708333	7591667
Standardabweichung %	0	6,37	7,79	1,09	52,42	14,66	2,33
Standardabweichung	0	23570	89567	14731	1975971	836743	176777
Tag	1	7	10	12	14	17	19

Tabelle 19: Daten Wachstumskurve *Chlorella salina* (10.03.2017 - 29.03.2017) Seite 2.

4.9 Wachstumskurve *Chlorella salina* (09.06.2017 - 26.06.2017)

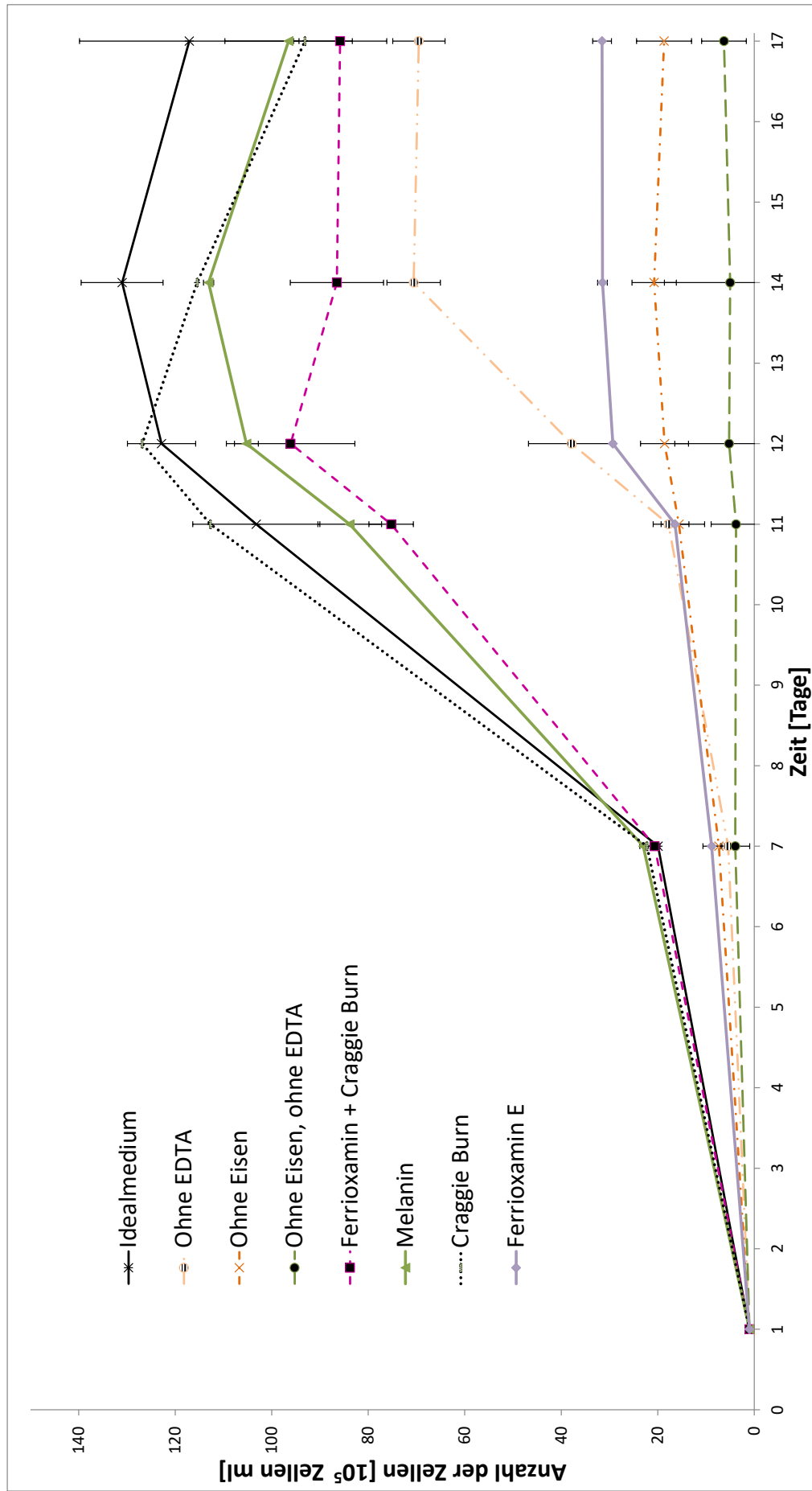


Abbildung 16: Wachstumskurve *Chlorella salina* (09.06.2017 - 26.06.2017).

4.10 Daten Wachstumskurve *Chlorella salina* (09.06. - 26.06.2017)

Datum	09.06.2017	16.06.2017	20.06.2017	21.06.2017	23.06.2017	26.06.2017
Ideal 1	100000	863333	2625000	4758333	6900000	6366667
Ideal 2	100000	1966666,67	11250000	12783333	13700000	13316667
Ideal 3	100000	2022222	9387500	11783333	12500000	10100000
Mittelwert	100000	1994444	10318750	12283333	13100000	11708333
Standardabweichung %	0,00	1,97	12,76	5,76	6,48	19,43
Standardabweichung	0	39284	1316986	707107	848528	2274527
Ferrioxamin E 1	100000	750000	1253333	1570833	1612500	1604167
Ferrioxamin E 2	100000	753333	1845833,33	2950000	3216667	3291667
Ferrioxamin E 3	100000	1010000	1437500	2908333	3075000	3016667
Mittelwert	100000	881667	1641667	2929167	3145833	3154167
Standardabweichung %	0	20,58	17,59	1,01	3,18	6,16
Standardabweichung	0	181491	288735	29463	100173	194454
Craggie Burn 1	100000	2305556	11150000	11583333	10066667	9650000
Craggie Burn 2	100000	1888889	10825000	13833333	12750000	9500000
Craggie Burn 3	100000	2472222	11833333	12633333	11816667	8783333
Mittelwert	100000	2222222	11269444	12683333	11544444	9311111
Standardabweichung %	0	13,52	4,57	8,88	11,80	4,97
Standardabweichung	0	300463	514669	1125833	1362222	463181
Ohne Eisen, ohne EDTA 1	100000	346667	303333	453333	423333	546667
Ohne Eisen, ohne EDTA 2	100000	356667	350000	486667	503333	783333
Ohne Eisen, ohne EDTA 3	100000	480000	483333	623333	573333	553333
Mittelwert	100000	394444	378889	521111	500000	627778
Standardabweichung %	0,00	18,83	24,65	17,29	15,01	21,47
Standardabweichung	0	74262	93413	90082	75056	134756
Ferrioxamin E + Craggie Burn 1	100000	1313333	4091667	10150000	7750000	7583333
Ferrioxamin E + Craggie Burn 2	100000	2133333	7200000	10550000	7966667	9266667
Ferrioxamin E + Craggie Burn 3	100000	1994444	7850000	8666667	9333333	7900000
Mittelwert	100000	2063889	7525000	9608333	8650000	8583333
Standardabweichung %	0	5,41	7,20	13,60	11,57	11,71
Standardabweichung	0	98209	459619	1331718	966379	966379
Melanin 1	100000	1310000	6333333	10150000	10866667	8283333
Melanin 2	100000	2350000	7916667	10700000	11383333	8716667
Melanin 3	100000	2250000	8850000	10350000	11233333	10583333
Mittelwert	100000	2300000	8383333	10525000	11308333	9650000
Standardabweichung %	0	3,07	7,87	2,35	0,94	13,68
Standardabweichung	0	70711	659966	247487	106066	1319933
ohne EDTA 1	100000	633333,333	1725000	4416667	6666667	6566667
ohne EDTA 2	100000	650000	2516667	3705556	4225000	3183333
ohne EDTA 3	100000	450000	1833333	3150000	7450000	7333333
Mittelwert	100000	541667	1779167	3783333	7058333	6950000
Standardabweichung %	0	23,93	4,31	23,67	7,85	7,80
Standardabweichung	0	129636	76603	895669	553900	542115
ohne Fe 1	100000	656667	1185000	1508333	1750000	1466667
ohne Fe 2	100000	806667	1938889	2211111	2400000	2272222
ohne Fe 3	100000	1300000	3500000	5250000	5416667	6216667
Mittelwert	100000	731667	1561944	1859722	2075000	1869444
Standardabweichung %	0,00	14,50	34,13	26,72	22,15	30,47
Standardabweichung	0	106066	533080	496939	459619	569614
Tag	1	7	11	12	14	17

Tabelle 20: Daten Wachstumskurve *Chlorella salina* (09.06.2017 - 26.06.2017).

Literatur

- [1] Bahadir M., Parlar H., Spiteller M. (Hrsg.), 2000. Springer Umweltlexikon, 2. Auflage.
- [2] Beyer L., Cornejo J.A., 2012. Koordinationschemie, Grundlagen – Synthesen – Anwendungen.
- [3] Blazevic A., Orlowska E., Kandioller W., Jirsa F., ; Keppler B., Tafli-Kryeziu M., Linert W. Krachler R. F., Krachler R., Rompel A., 2016. Photoreduction of Terrigenous Fe-Humic Substances Leads to Bioavailable Iron in Oceans. *Angewandte Chemie International Edition*, 23 May 2016, Vol.55(22), pp.6417-6422.
- [4] Bliefert C., 2002. Umweltchemie, 3. Auflage.
- [5] Braun V., Killmann H., 1999. Bacterial solutions to the iron-supply problem. *Trends Biochem. Sci.* 1999, 24, 104 - 109.
- [6] Ewelina Orlowska, Eva A. Enyedy, Marc Pignitter, Franz Jirsa, Regina Krachler, Wolfgang Kandioller and Bernhard K. Keppler: β -O-4 type dilignol compounds and their iron complexes for modeling of iron binding to humic acids: synthesis, characterization, electrochemical studies and algal growth experiments. *New J. Chem.*, (2017), DOI: 10.1039/c7nj02328f.
- [7] Guillard R.R.L., 1975. Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates. Smith W.L. and Chanley M.H (Eds.) *Culture of Marine Invertebrate Animals*. Plenum Press, New York, USA. S. 26-60.
- [8] Heldt H.-W., Piechulla B., 2015. Pflanzenbiochemie, 5. Auflage. Springer Spektrum.
- [9] Hempel G., Bischof K., Hagen W. (Hrsg.), 2017. Faszination Meeresforschung - Ein ökologisches Lesebuch. 2. Auflage, Springer-Verlag GmbH Deutschland 2017.
- [10] Hopkinson B., Morel F., 2009. The role of siderophores in iron acquisition by photosynthetic marine microorganisms. *Biometals* (2009), 22:659–669 DOI 10.1007/s10534-009-9235-2.
- [11] Hunter K.A., Leonard M.R., Carpenter P.D., Smith J.D., 1997. Aggregation of iron colloids in estuaries: a heterogeneous kinetics study using continuous mixing of river and sea waters. *Colloids Surf A Physiochem Eng Aspects* 1997; 120:111–21.
- [12] Kendall, B., Anbar, A. D., Kappler, A. and Konhauser, K. O. (2012). The Global Iron Cycle, in *Fundamentals of Geobiology* (eds A. H. Knoll, D. E. Canfield and K. O. Konhauser), John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. doi: 10.1002/9781118280874.ch6.
- [13] Kester R. D., Duedall I.W., Connors D.N., Pyktowicz, R.M., 1967. Preparation of Artificial Seawater. *Limnology and Oceanography* 12(1), S.176-179.
- [14] Krachler R., Krachler R.F., Wallner G., Steier P., El Abiead Y., Wiesinger H. Jirsa F., Keppler B., 2016. Sphagnum-dominated bog systems are highly effective yet variable sources of bio-available iron to marine waters. *Science of the Total Environment* 556 (2016) 53–62.

- [15] Krachler R., von der Kammer F., Jirsa F., Süphandag A., Krachler R.F., Plessl C., Vogt M., Keppler B., Hofmann T., 2012. Nanoscale lignin particles as sources of dissolved iron to the ocean. *Global Biogeochemical cycles*, VOL. 26, GB3024, doi:10.1029/2012GB004294, 2012.
- [16] Krachler R., Jirsa F., and Ayromlou S., 2005. Factors influencing the dissolved iron input by river water to the open ocean. *Biogeosciences*, 2, 311–315, 2005.
- [17] Krachler R., Krachler R. F., Von Der Kammer F., Süphandag A., Jirsa F., Ayromlou S., Hofmann T., Keppler B. K., 2010. Relevance of peat-draining rivers for the riverine input of dissolved iron into the ocean. *Science of the Total Environment*, 2010, Vol.408 (11), pp.2402-2408.
- [18] Kraemer, S.M. *Aquat. Sci.* (2004) 66: 3. doi:10.1007/s00027-003-0690-5
- [19] Laglera L., Battaglia G., van den Berg C., 2011. Effect of humic substances on the iron speciation in natural waters by CLE/CSV. *Marine Chemistry* 127 (2011), p. 134–143.
- [20] Liu X, Millero F., 2002. The solubility of iron in seawater. *Marine Chemistry* (2002), Volume 77, Issue 1, Pages 43-54.
- [21] M.D. Guiry in Guiry, M.D. & Guiry, G.M. 2017. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org>; searched on 06 July 2017.
- [22] Mortimer C., Müller U., Beck J., 2015. *Chemie : das Basiswissen der Chemie*.
- [23] Opsahl, S., Benner, R., 1997. Distribution and cycling of terrigenous dissolved organicmatter in the ocean. *Nature* (1997) 386, 480–482.
- [24] Orlowska E., 2017. Synthesis, characterization and algal growth studies of iron complexes with aquatic humic acid models.
- [25] Ottow J. C. G., 2011. *Mikrobiologie von Böden - Biodiversität, Ökophysiologie und Metagenomik*. Seite 367-370.
- [26] Rheinbaben, F. V., 2015. Algen und ihre Bedeutung für die Humanhygiene. *Krankenhaus-Hygiene + Infektionsverhütung*, June 2015, Vol.37(3), pp.103-108.
- [27] Riedel E., Janiak C., 2011. *Anorganische Chemie 8. Auflage*, de Gruyter.
- [28] Rose A.L., Waite T.D., 2003. Predicting iron speciation in coastal waters from the kinetics of sunlight-mediated iron redox cycling. *Aquat. Sci.* 65 (2003) 375–383
- [29] Salvador Valenzuela Miranda in Guiry, M.D. & Guiry, G.M. 2017. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org>; searched on 06 July 2017.
- [30] Townsend C.R., Begon M., Harper J.L., 2009. *Ökologie*, 2. Auflage.
- [31] Weber B., 2014. *Koordinationschemie*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [32] Zwirnmann E., 2009. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*. Vol.21(3), pp.252-255

Internetquellen

- (1) www.marinespecies.org, Zugriff: 06.07.2017.
- (2) www.rsc.org, Zugriff: 12.07.2017.
- (3) www.osram.at, Zugriff: 22.07.2017.
- (4) www.sigmaaldrich.com, Zugriff: 27.07.2017.
- (5) roempp.thieme.de, Zugriff: 27.07.2017.

Abbildungsverzeichnis

1	Struktur von EDTA, (rsc online).	1
2	Struktur von Ferrioxamin E (sigma aldrich online)	5
3	Experimenteller Aufbau (exemplarisch).	11
4	Spektrale Strahlungsverteilung Fluora [®] 77	12
5	Struktur von EWOR772.	13
6	Struktur von EWOR760.	13
7	Struktur von EWOR790.	14
8	Wachstumskurve <i>Chlorella salina</i> 09.12.2016 - 27.12.2016.	15
9	Wachstumskurve <i>Diacronema lutheri</i> 24.01.2017 - 10.02.2017.	20
10	Wachstumskurve <i>Chlorella salina</i> 10.03.2017 - 29.03.2017.	23
11	Wachstumskurve <i>Chlorella salina</i> 09.06.2017 - 26.06.2017.	26
12	Kalibrierkurve der Flammen-AAS zur Eisenbestimmung.	30
13	Wachstumskurve <i>Chlorella salina</i> (09.12.2016 - 27.12.2016).	32
14	Wachstumskurve <i>Diacronema lutheri</i> (24.01.2017 - 10.02.2017).	35
15	Wachstumskurve <i>Chlorella salina</i> (10.03.2017 - 29.03.2017).	38
16	Wachstumskurve <i>Chlorella salina</i> (09.06.2017 - 26.06.2017).	41

Tabellenverzeichnis

1	Zusammensetzung des synthetischen Meerwassers.	8
2	Zusammensetzung des f/2-Mediums.	8
3	Probenbezeichnung.	9
4	Konzentration an Eisen und Komplexbildner.	10
5	Spezifische Wachstumsraten 27.12.2016	16
6	Zellzahlmaxima 27.12.2016	16
7	Spezifische Wachstumsraten 10.02.2017.	20
8	Zellzahlmaxima 10.02.2017.	20
9	Spezifische Wachstumsraten 29.03.2017.	23
10	Zellzahlmaxima 29.03.2017.	23
11	Spezifische Wachstumsraten 23.06.2017 bzw. 21.06.2017	27
12	Zellzahlmaxima 23.06.2017 bzw. 21.06.2017	27
13	Elementanalyse.	31
14	Daten Wachstumskurve <i>Chlorella salina</i> (09.12.2016 - 27.12.2016) Seite 1. . .	33
15	Daten Wachstumskurve <i>Chlorella salina</i> (09.12.2016 - 27.12.2016) Seite 2. . .	34
16	Daten Wachstumskurve <i>Diacronema lutheri</i> (24.01.2017 - 10.02.2017) Seite 1. .	36
17	Daten Wachstumskurve <i>Diacronema lutheri</i> (24.01.2017 - 10.02.2017) Seite 2. .	37
18	Daten Wachstumskurve <i>Chlorella salina</i> (10.03.2017 - 29.03.2017) Seite 1. . .	39
19	Daten Wachstumskurve <i>Chlorella salina</i> (10.03.2017 - 29.03.2017) Seite 2. . .	40
20	Daten Wachstumskurve <i>Chlorella salina</i> (09.06.2017 - 26.06.2017).	42