

Abschlussbericht

zum Vorhaben

Stoffflüsse in offenen Aquakulturanlagen

Zukunft Meer

Dr. Kai Ahrendt
Büro für Umwelt und Küste
Steinstraße 25
24118 Kiel
Fördernummer: 122 14 002

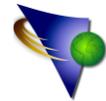
in Zusammenarbeit mit:

Dr. Wilhelm Windhorst
Institut für Ressourcen- und Naturschutz
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Olshausenstraße 70
24118 Kiel
Fördernummer: 122 14 01

sowie

Dr. Peter Krost
Coastal Research and Management (CRM)
Thiessenkai 12
24159 Kiel
Fördernummer: 122 14 03

Kiel, den 30.12.2014

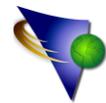


Inhaltsverzeichnis:

Zusammenfassung

Vorwort

1	Einleitung	... 1
2	Technologie	... 3
3	Modellstruktur	... 9
4.	Untersuchungsgebiete	...16
4.1	Bookniseck	...16
4.2	Innenförde	...20
5.	Messprogramm Innenförde	...23
5.1	Aufbau	...23
5.2	Ergebnisse	...27
6.	Modellierung	...30
6.1.	Bookniseck	...30
6.1.1	Hydronumerisches Model	...30
6.1.2	Faeces Transport Modul	...31
6.1.3	Advection-Dispersion Modul	...33
6.2.	Innenförde	...34
6.2.1	Hydronumerisches Model	...35
6.2.2	Faeces Transport Modul	...36
6.2.3	Advection-Dispersion Modul	...39
7	Diskussion	...41
8	Weiteres Vorgehen	...44
9	Literatur	...47



Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Schematische Darstellung einer multitrophen Null-Emissions-Anlage	... 3
Abbildung 2: Ein Modul mit 1.250T Fischbesatz ohne multitrophe Einheit	... 5
Abbildung 3: Ein Modul mit 1.250T Fischbesatz mit zweitem Netzgehege in 2m Abstand	... 6
Abbildung 4: Stickstoff und Phosphor Kreislauf	... 8
Abbildung 5: 2-dimensionales hydronumerisches Modell MIKE21 flexible mesh	...10
Abbildung 6: 2-dimensionales Transport Modul MIKE21 flexible mesh	...13
Abbildung 7: 2-dimensionales Faeces Transport Modul MIKE21 flexible mesh	...14
Abbildung 8: 2-dimensionales ökologisches Modul MIKE21 EcoLab flexible mesh	...15
Abbildung 9: Tiefenstruktur Bookniseck	...17
Abbildung 10: Pegel Schleimünde	...18
Abbildung 11: Stickstoffkonzentration Bookniseck von 2008 bis 2013	...19
Abbildung 12: Phosphorkonzentration Bookniseck von 2008 bis 2013	...19
Abbildung 13: Tiefenstruktur Kieler Förde	...20
Abbildung 14: Pegel Kiel Holtenau	...21
Abbildung 15: Stickstoffkonzentration Kieler Förde von 2008 bis 2013	...22
Abbildung 16: Phosphorkonzentration Kieler Förde von 2008 bis 2013	...22
Abbildung 17: Lage der bestehenden Aquakulturanlage	...23
Abbildung 18: Aquakulturanlage von Tassilo Jäger-Kliniecke	...24
Abbildung 19: Faeces-Sammler	...25
Abbildung 20: Schema der Faeces-Sammel-Anlage	...26
Abbildung 21: Aufbau der Faeces-Sammler an der Aquakulturanlage in der Innenförde	...28
Abbildung 22: Stickstoff- und Kohlenstoffverteilung	...28
Abbildung 23: Stickstoffverteilung	...28
Abbildung 24: Strömungsbild der Eckernförder Bucht	...31
Abbildung 25: Verdriftung der Faeces	...32
Abbildung 26: Detailansicht der Verdriftung der Faeces	...32
Abbildung 27: Überblick über die Verdriftung gelöster Nährstoffe	...33
Abbildung 28: Detailansicht über die Verdriftung gelöster Nährstoffe	...34
Abbildung 29: Korrelation zwischen gemessenen und modellierten Pegelständen am Pegel Geomar	...35
Abbildung 30: Strömungsbild Innenförde	...36
Abbildung 31: Überblick über die Verdriftung der Faeces	...37
Abbildung 32: Detailansicht über die Verdriftung der Faeces	...38
Abbildung 33: Übersicht über die Verdriftung gelöster Nährstoffe	...40
Abbildung 34: Detailansicht über die Verdriftung gelöster Nährstoffe	...41

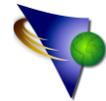
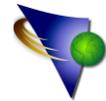


Abbildung 35: Schema einer multitrophen Aquakulturanlage mit Absaugvorrichtung	...42
Abbildung 36: Multitrophe Aquakulturanlage mit integrierter Algenlangeinkultur	...43

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Zusammensetzung des Futters Biomar Eficio Enviro	... 7
Tabelle 2: Zusammensetzung <i>Laminaria digitata</i>	... 9
Tabelle 3: Mittelwerte aus den Sammelbehältnissen	...27
Tabelle 4: Einzelwerte aus den Sammelbehältnissen	...28
Tabelle 5: Wasserparameter	...29



Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht liefert einen Beitrag zur Bewertung von Umwelteinflüssen durch multitrophe offene Aquakulturanlagen in den Küstengewässern Schleswig-Holsteins. Zwei Standorte wurden näher analysiert. Dies sind ein Standort vor Bookniseck und ein Standort innerhalb der Kieler Förde in der sich bereits eine herkömmliche Anlage befindet.

Es wurde die Ausbreitung von Faeces sowie die Verbreitung der Nährstoffe Phosphor und Stickstoff aus den Anlagen analysiert. Hierfür wurde das hydronumerische Model MIKE21/MIKE3 eingesetzt.

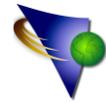
Wie die Analysen zeigen, verdriften die Faeces aufgrund der Sinkgeschwindigkeit, der Wassertiefe und der Strömungsgeschwindigkeiten nur geringfügig. In Bookniseck sind dies max. 100m um die Anlage. Eine eindeutige Verdriftungsrichtung ist nicht festzustellen. In der Innenförde kann max. eine Ausbreitung von 75m nachgewiesen werden.

Ähnlich verhält es sich mit den freigesetzten Nährstoffen. In Bookniseck liegen die Werte für die Stickstoffkonzentration in 10m Entfernung unter 0,05mg/l und in 150m Entfernung unter 0,0005mg/l. Die Werte für Phosphor liegen entsprechend darunter. Die Werte liegen weit unterhalb der natürlichen Hintergrundkonzentration. In der Innenförde liegen die Stickstoffkonzentrationen in 100m Entfernung unter 0,004mg/l und in 150m um 0,003mg/l. Hier entsteht aufgrund der nach Norden gerichteten Strömung eine Fahne in diese Richtung.

Eine Produktion von 1.250T Lachsforellen setzt ca. 44.400kg Stickstoff und ca. 6.500kg Phosphor frei. Über eine komplette Faecesentnahme können dem System ca. 4.000kg Phosphor und ca. 12.150kg Stickstoff entzogen werden. Gelöst müssen ca. 32.250kg Stickstoff und ca. 2.500kg Phosphor kompensiert werden. Dies kann über Muschel- oder Algenkulturen erfolgen. Für die Kompensation durch Muscheln ergibt sich für Phosphor ein Flächenbedarf von 35ha und durch Algen von ca. 14ha. Für die Stickstoffbindung durch Muscheln werden ca. 20ha benötigt und durch Algen ca. 32ha.

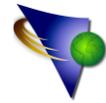
Innerhalb einer Aquakulturanlage stehen ca. 84.000m² Fläche für die Kultur von Algen oder Muscheln zur Verfügung. Für die Bindung von Stickstoff nur durch Algen werden 32ha benötigt. Ca. 25% Stickstoff können somit in der Aquakulturanlage gebunden werden. Ca. 15ha Fläche werden für die Fixierung des verbleibenden Stickstoffes durch Muscheln benötigt.

Für die Fixierung von Phosphor nur durch Algen werden 14ha benötigt. 43% verlassen die Aquakultur und müssen durch Muscheln aufgenommen werden. Hierfür werden ca. 15ha Muschelkultur benötigt. Die Ausgleichsfläche durch Muscheln hätte somit eine Ausdehnung von 500m x 300m.



Durch ein entsprechendes intelligentes Design einer multitrophen Aquakulturanlage lassen sich die Umwelteinflüsse minimieren und eine Verschlechterung des Umweltzustandes verhindern. Hier liegt ein großes ökonomisches Potential welches auch ökologisch vertretbar erscheint. Um diese Annahmen zu spezifizieren wird dringend ein entsprechendes Forschungsprojekt mit einer realen Anlage vorgeschlagen.





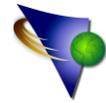
Vorwort

Fisch und Meeresfrüchte gehören als wichtige und günstige Proteinquelle zur festen Nahrungsbasis des Menschen. Allein in Deutschland werden pro Kopf und Jahr durchschnittlich gut 15 Kilogramm Fisch verbraucht. Jährlich werden 152 Millionen Tonnen Fischereiprodukte vermarktet wovon 60 Millionen Tonnen aus Aquakultur stammen. Die Aquakultur hat im internationalen Maßstab jährliche Wachstumsraten von 5 - 8% (FAO, 2012). Im Vergleich zur Erzeugung von tierischem Eiweiß weist die Aquakultur die beste „Ökobilanz“ auf. Da aufgrund des Bevölkerungswachstums und der positiven wirtschaftlichen Entwicklung in vielen Schwellenländern der Eiweißbedarf der Weltbevölkerung nicht durch eine Ausweitung der herkömmlichen Fischerei gedeckt werden kann, da die Ressourcen endlich und viele Arten überfischt sind, kommt der Aquakultur eine zunehmende Bedeutung zu. Dies hat auch die EU erkannt und mit der Vorlage „strategischer Leitlinien“ klare Hinweise zu aktuellen Entwicklungshemmnissen und erforderliche Maßnahmen seitens der Mitgliedsstaaten gegeben.

Deutschland importiert inzwischen rund 88% der hierzulande verzehrten Meeresfrüchte und Fische. Obwohl Deutschland eine lange Küstenlinie aufweist findet offene Aquakultur, mit Ausnahme von Muschelkulturen, so gut wie nicht statt. Schleswig-Holstein als das Land zwischen den Meeren hat vielfältige naturräumliche Eignungsgebiete anzubieten.

Die Küstengewässer weisen allerdings zurzeit nicht den rechtlich vorgeschriebenen „guten Umweltzustand“ im Sinne von der WRRL und der MSRL auf und die Aquakulturanlagen dürfen keine zusätzliche Belastung für die Küstengewässer (Verschlechterungsverbot) darstellen.

Vor diesem Hintergrund hat sich das Konsortium aus Büro für Umwelt und Küste, Coastal Research and Management sowie das Institut für Ressourcen- und Naturschutz auf eine Ausschreibung im Rahmen von „Zukunft Meer“ im Jahre 2013 beworben. Das vorliegende Projekt wurde mit Zuwendungsbescheid vom 24.03.2014 vom Land Schleswig-Holstein bewilligt. Aufgrund von einer Ausdehnung des Untersuchungs-umfanges wurde zum 02.09.2014 ein Antrag auf kostenneutrale Projektverlängerung gestellt und mit Schreiben vom 19.09.2014 bewilligt. Die Laufzeit wurde auf den 30.11.2014 ausgedehnt.



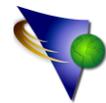
1 Einleitung

Die Aquakultur gehört weltweit zu den am stärksten wachsenden Wirtschaftszweigen, bedingt durch den stetig steigenden Eiweißbedarf der anwachsenden Weltbevölkerung. Die Versorgung von Eiweißmangelgebieten ist eine globale Aufgabenstellung der Weltgemeinschaft im Sinne der Agenda 21 und des Johannesburg-Gipfels. Aquakultur kann hierbei einen nicht unerheblichen Beitrag leisten. Bei Verwendung moderner Futtermittel kann die Aquakultur einen wichtigen Beitrag zur Entlastung der stark genutzten Wildfischbestände leisten; sie besitzt im Gegensatz zur Befischung natürlicher Ressourcen ein großes Wachstumspotential. Die tierische Eiweißproduktion mit Hilfe der Marikultur ist um ein Vielfaches effektiver (günstigerer Futterquotient, hohe Produktivität) und deutlich umweltschonender als die terrestrischen Mastformen z. B. von Geflügel und Säugetieren, und das Fischeiweiß insbesondere marin gezogener Fische ist physiologisch wertvoller als z. B. bei Geflügel. Die Staaten der europäischen Gemeinschaft und insbesondere auch Deutschland nehmen an diesem Aufschwung der Aquakultur bislang nicht teil. Die Gründe dafür sind vielfältig. Die EU hat dies seit längerem erkannt und Strategien zur Entwicklung der Aquakultur entwickelt (2002) sowie fortgeschrieben (2009) (Mitteilung der Kommission an den Rat und an das Europäische Parlament vom 19. September 2002). Auch Schleswig-Holstein kann durch seine Lage zwischen zwei Meeren multitrophe Marikulturanlagen betreiben.

Üblicher Weise werden im Meer offene Aquakulturanlagen betrieben von denen durch Futterreste, Exkremate und Medikamente Umweltbelastungen ausgehen. Trotz heutiger hocheffizienter Futtermittel mit Futterquotienten von 1,1 oder geringer erfolgt nach wie vor ein Nährstoffeintrag in die marine Umwelt. Gerade die westliche Ostsee unterliegt einer Eutrophierung aus terrestrischen Quellen, vor allem aus der Landwirtschaft. Die WRRL schreibt vor, dass keine neuen zusätzlichen Nährstoffquellen auftreten dürfen (Verschlechterungsverbot). Daher müssen auch für Aquakulturanlagen Ausgleichsmaßnahmen stattfinden.

Anhand von Vergleichen der Nährstoffe in der Futtermittelzugabe und der Entnahme von Zuchtfisch lässt sich ermitteln, wie viel Nährstoffe in der See zurück bleiben. Dies lässt sich z. Zeit aber nur quantitativ bestimmen. Multitrophe Aquakulturanlagen (Abbildung 1) können rein theoretisch Abhilfe schaffen. Praktiziert werden diese Anlagen bisher jedoch nicht.

Durch den Einsatz von hydronumerischen Modellen können die Nährstoffumsätze besser analysiert werden. Das hydronumerische Modell MIKE21/MIKE3 ist ein Teil der kommerziell verfügbaren Modellfamilie MIKE vom Danish Hydraulic Institut und modular aufgebaut. Das Modell findet weltweit Einsatz und wird ständig weiterentwickelt. Grundlage der in diesem Projekt eingesetzten Module ist MIKE21HD bzw. MIKE3HD (2-



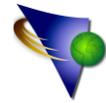
und 3-dimensionales hydronumerisches Modell). In diesem Modul werden die Strömungskomponenten nach Ort und Zeit für ein vorgegebenes Seegebiet ermittelt. Zahlreiche Steuerungsparameter wie Meeresspiegelauslenkung, Temperatur, Salzgehalt, Wind, Corioliskraft etc. finden hierbei Berücksichtigung. Das add-on Modul MIKE21PT (Particle Tracking) nutzt diese quasi 3D Strömungsinformation zur Berechnung von Transportwegen von in der Wassersäule enthaltenen Partikeln (im vorliegenden Falle Faeces) beruhend auf Sinkgeschwindigkeit, Dichte (Wasser wie Partikel), Temperatur, Salzgehalt etc. Ein weiteres hier eingesetztes Modul ist MIKE21AD/MIKE3AD (Advection-Dispersion). Ebenfalls auf dem Strömungsmodell MIKE21HD/MIKE3HD aufbauend werden hier die Transportwege und Verdünnungseffekte von gelösten Substanzen berechnet. Das dritte auf MIKE21HD/MIKE3HD aufbauende Modul ist MIKE EcoLab. In dieser Komponente werden Stoffumsätze durch Organismen wie Muscheln und Algen u. a. aufgrund von Nährstoffverfügbarkeit ermittelt. Weiterführende Informationen sind unter <http://www.mikebydhi.com> abrufbar.

Für den Bereich der Kieler Bucht und der Kieler Förde konnte MIKE21HD/PT bereits erfolgreich angewendet werden.

Numerische Ökosystemmodelle werden im marinen Bereich überwiegend für die Ausbreitung und Bindung von vom Land eingetragenen Nähr- und Schadstoffen eingesetzt. Allerdings lassen sich derartige physikalisch-ökologische Modelle auch für die Beurteilung und vor allem für die Optimierung von multitrophen Aquakulturanlagen in modifizierter Form einsetzen. Durch intelligente Kopplung von Fischbesatz und Nährstoffbindeorganismen sowie der Modifikation der Faeces (Dichte) und numerischer Modellierung lässt sich ein innovatives optimiertes Design von multitrophen Aquakulturanlagen entwickeln.

In offenen Aquakulturanlagen werden zwangsläufig Nährstoffe in die marine Umwelt abgegeben, auch wenn es unterschiedliche Maßnahmen gibt, dies zu reduzieren. Durch Manipulation des Futters für die Zielorganismen kann der Kot (Faeces) schwerer oder leichter als das Wasser gemacht werden und anschließend abgefischt oder abgesaugt und damit ein Teil der Nährstoffe entfernt werden. Je nach Strömungsgeschwindigkeit wird der Kot verfrachtet werden, so dass die Auffangbehältnisse hieran angepasst werden müssen. Die in diesem Projekt eingesetzten hydronumerischen Modelle MIKE21/MIKE3 geben hierüber Auskunft.

Gelöste Nährstoffe lassen sich so nicht entfernen. Es besteht aber die Möglichkeit durch Kultivierung weiterer Organismenarten, wie z. B. Algen oder Muscheln diese Nährstoffe dem System zu entnehmen. Bisher wurden entsprechende mathematische Rechnungen für eine Nullemission statisch vorgenommen, d. h. es wurden nur Massenbilanzen erstellt. Hierüber erlangt man eine Mengenabschätzung der zu kultivierenden Organismen. Über ein echtes hydronumerisches Modell lassen sich Senken



und Quellen der Nährstoffe jedoch dynamisch berechnen, d.h. die Nährstofffrachten können im Modell verfolgt werden. Hierüber lassen sich bessere Massenbilanzen und vor allem Standorte für Ausgleichsmaßnahmen ermitteln. Das Modell MIKE21/EcoLab berücksichtigt neben Quellen und Senken auch weitere Parameter wie Wassertemperatur, Trübung, Lichtverhältnisse, zusätzliche Nährstoffquellen etc. Durch den Einsatz eines derartigen Modelles kann eine multitrophe Nullemissionsanlage optimiert und besser wirtschaftlich betrieben werden.

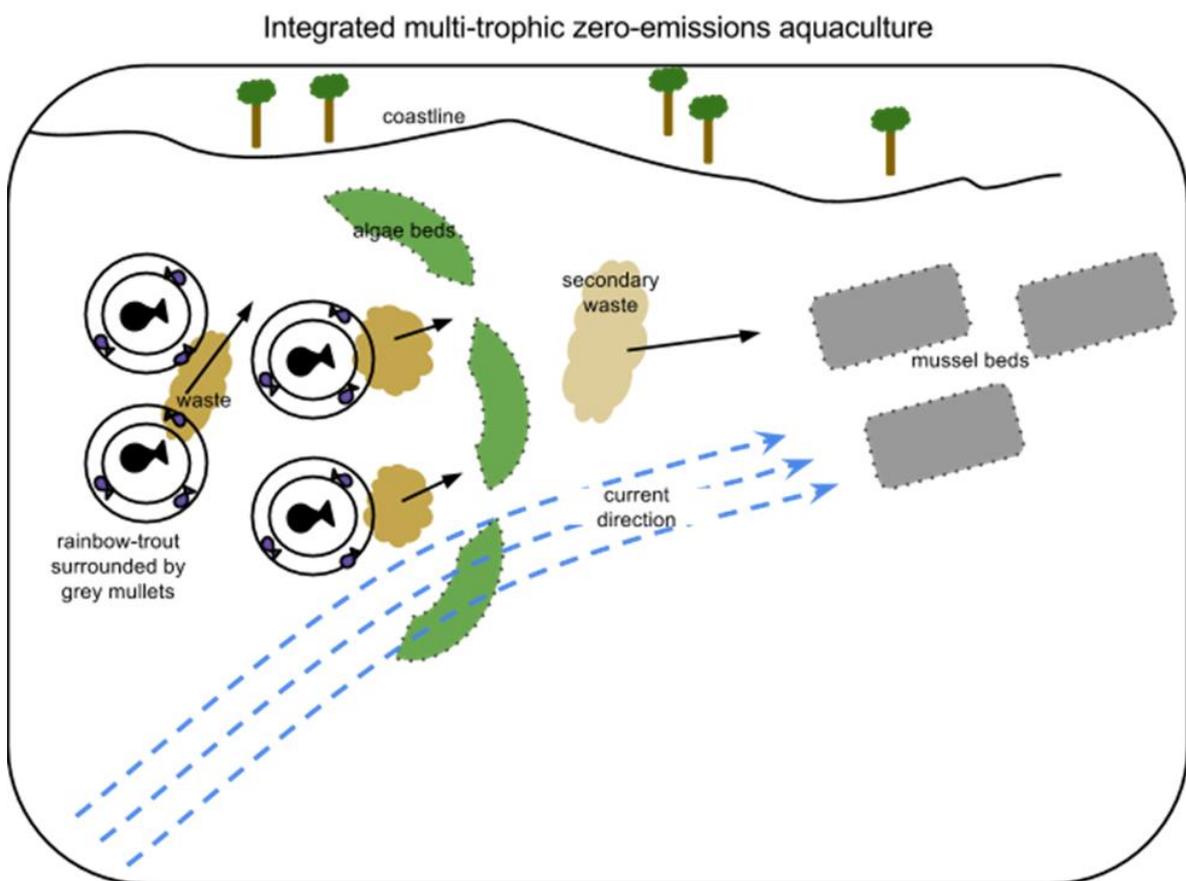
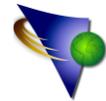


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer multitrophen Null-Emission-Anlage

2 Technologie

Die grundlegende Technologie einer offenen Aquakulturanlage soll an einem konkreten Beispiel einer ehemals geplanten Aquakulturanlage in der Kieler Bucht erörtert werden.

SNAPTUN, ein dänisches Aquakulturunternehmen, betreibt mehrere „Teichwirtschaften“ mit Brutproduktion und Aufzucht der Lachsforellen in Süßwasser bis zu einem Gewicht von ca. 0,6 - 1kg. In April werden die Lachsforellen von den Teichen in Netzgehege im Meer umgesetzt und dort auf etwa 3 - 4kg bis Herbst-Vorweihnachtszeit gemästet. Sie werden dann allesamt geschlachtet. Der Fischbesatz ist „all female“ und trägt



bei der Schlachtung Rogen. Der Rogen ist neben dem Fischfleisch ein wichtiges Produkt. Im Winter werden die Netzgehege auf Land geholt, um im April wieder ausgelegt zu werden, damit die Produktion im neuen Jahr von vorne beginnen kann.

SNAPTUN's Vorhaben in Schleswig-Holstein zielte auf eine Meeresproduktion unter Einsatz von 4 x 1.250 Tonnen Futter ab.

SNAPTUN plante anfangs die Forellen für die April-Bestockung aus SNAPTUN's dänischer Teichwirtschaft zu entnehmen, wollte aber gerne die Möglichkeiten einer küstennahen Smoltproduktion in Schleswig-Holstein erörtern.

Die Schlachtung könnte teilweise in Schleswig-Holstein erfolgen und auf längere Sicht erscheint es sinnvoll die Schlachtung und Verarbeitung ganz in Schleswig-Holstein vorzunehmen.

Die Gesamtanlage war in 2 Module mit der Gesamtproduktionskapazität von je 2.500 Tonnen bestehend aus 24 Netzgehegen mit je einem Durchmesser von 26 Meter aufgeteilt. Die Netzgehege werden in Gehegemodulen in Reihen von je 3 Netzgehegen aufgebaut. Der Abstand zwischen den Gehegen in den Gehegemodulen beträgt 25 Meter. Die 2 Verankerungen am jeweiligen Ende haben eine Länge von ca. 100 Metern vom Verankerungspunkt am Meeresboden bis zu den Gehegeringen. Die Reihen haben somit eine Länge von 328 Metern.

Um keine zu große zusammenhängende Fläche zu beanspruchen, sollten 4 Felder zu jeweils 1.250T eingerichtet werden, wobei zwei Felder als eine Anlage gesehen werden. Im Folgenden beziehen sich die Aussagen auf eine 1.250T Fischproduktionsanlage als kleinste Einheit.

Die Abstände zwischen den Gehegemodulen sollten mindestens 100 Meter betragen. Hieraus ergeben sich folgende Maße (Abbildung 2):

$328\text{m} \times 404\text{m} = 132.512\text{m}^2$ für 12 Gehege für 1.250T, davon 4, insgesamt 530.048m^2 (53ha).

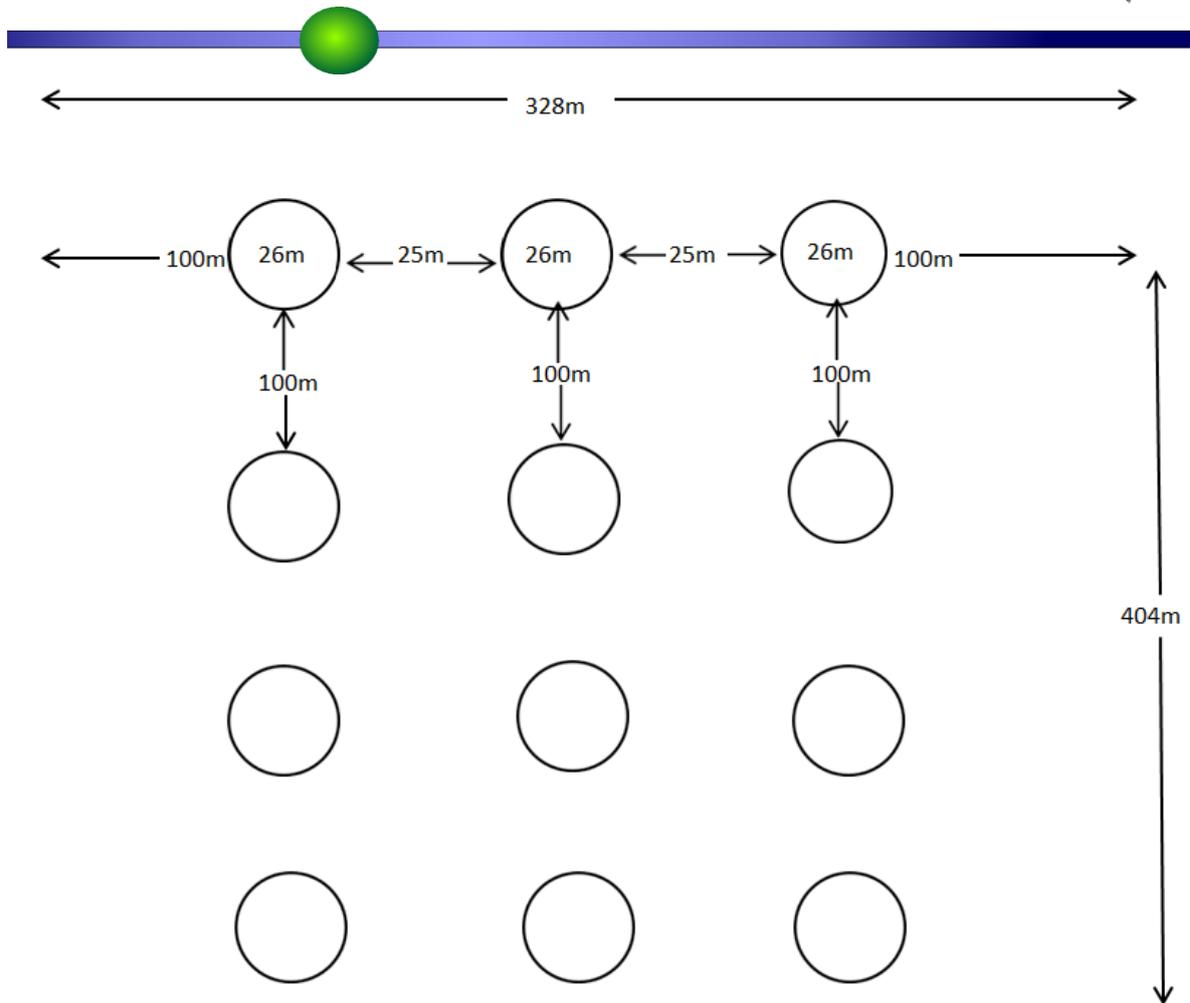
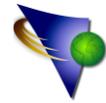


Abbildung 2: Ein Modul mit 1.250T Fischbesatz ohne multitrophe Einheit

Eine multitrophe Einheit hat zwangsläufig andere Ausmaße, da ein zweites Netz das Lachsforellennetz umschließt (Abbildung 3). Hier sollte die Meeräsche als Kandidat getestet werden. Diese Art kann durch ihre Nahrungsaufnahme die Netzgehege der Lachsforelle von Bewuchs sauber halten.

Diese Anlagen lassen sich in unterschiedlicher Ausführung anlegen:

Bei 30m Außendurchmesser (26m innen für Lachsforelle) ergibt sich eine Fläche von 340m x 420m entsprechend 142.800m². Bei 36m Außendurchmesser (26m Innendurchmesser für Lachsforelle) ergibt sich eine Fläche von 358m x 444m entsprechend 158.952m².

Die Wassertiefe am Gehegestandort sollte 15 Meter nicht unterschreiten. Mehr als 25 Meter wären nachteilig.

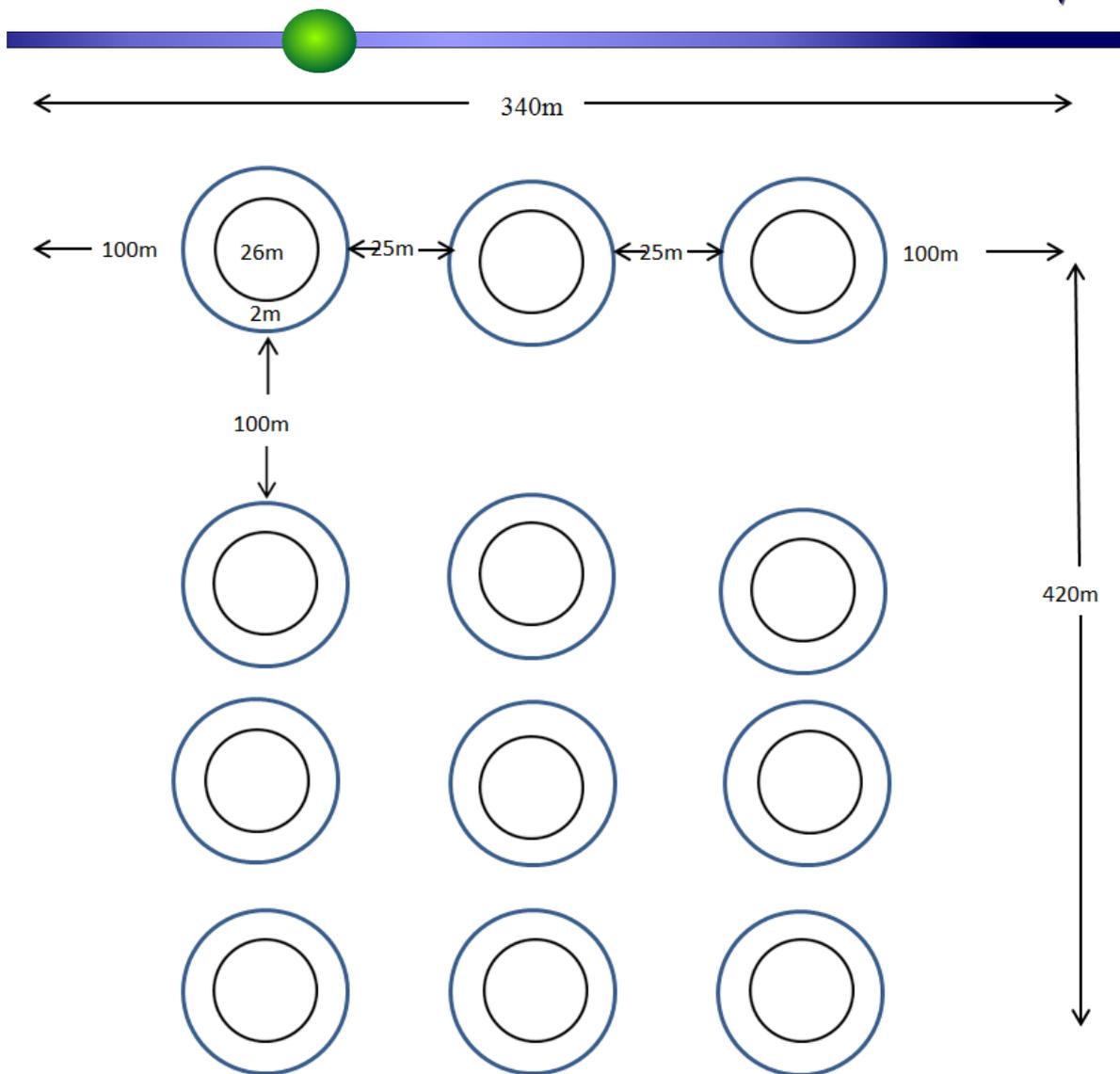
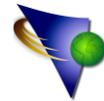
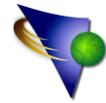


Abbildung 3: Ein Modul mit 1.250T Fischbesatz mit zweitem Netzgehege in 2m Abstand



Als Futter wird zur Zeit z. B. Biomar Efcio Enviro verwendet. Die Inhaltsstoffe nach Herstellerangaben sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Zusammensetzung des Futters Biomar Efcio Enviro

Constituents	unit	6, 8 and 10 mm pellets	Average fish feed according to literature review ¹
Crude protein	%	37-39	40
Crude lipid	%	34-37	17
Carbohydrates (NFE)	%	14	19
Fibre	%	2	
Ash	%	5.6	14
Total phosphorus (P)	%	0.8	1
Gross energy	MJ/kg	24-27	
Digestible energy	MJ/kg	22.2	

Für eine Ernte von 1.250T Fisch ergeben sich somit folgende Werte:

Der Fisch wiegt 3,5kg bei der Entnahme, so dass 360.000 Fische entnommen werden. Die Jungfische wiegen ca. 0,5kg bei der Eingabe, so dass ein Zuwachs von 1.070.000kg zu verzeichnen ist. Der Futterquotient liegt bei ca. 1,1. Somit werden 1.177.000kg Futter eingebracht. Nach Auskunft von Netzgehegebetreibern geht kein Futter ungefressen verloren.

Im Futter sind 38% Proteine enthalten, was einer Menge von 447.260kg entspricht. In diesen Proteinen sind 16% Stickstoff vorhanden, was einer Menge von 71.560kg entspricht. Der Phosphorgehalt beträgt 0,8%, entsprechend 9.460kg.

Vom Stickstoff werden 38% und vom Phosphor 31% in den Fischen gebunden (Abbildung 4 nach OLSEN et al., 2008).

Partikulär gehen 20% (14.300kg) Stickstoff verloren und 42% (30.100kg) Stickstoff in Lösung. Von dem partikulär im Kot gebunden Stickstoff geht wiederum nach Ausscheiden in den ersten 5-10 Minuten 15% (2.150kg) in Lösung. Es verbleiben somit 12.150kg partikulär und 32.250kg gelöster Stickstoff.

Vom Phosphor werden 50% partikulär im Kot gebunden (4.700kg) wovon ebenfalls 15% (710kg) nach Ausscheiden in den ersten Minuten freigesetzt werden. 1.800kg Phosphor (19%) gehen direkt in Lösung. Es verbleiben somit 4.020kg partikulär und 2.510kg gelöster Phosphor.

¹ OLSEN et al. 2008 "Perspectives of nutrient emission from fish aquaculture in coastal waters" - Literature review with evaluated state of knowledge

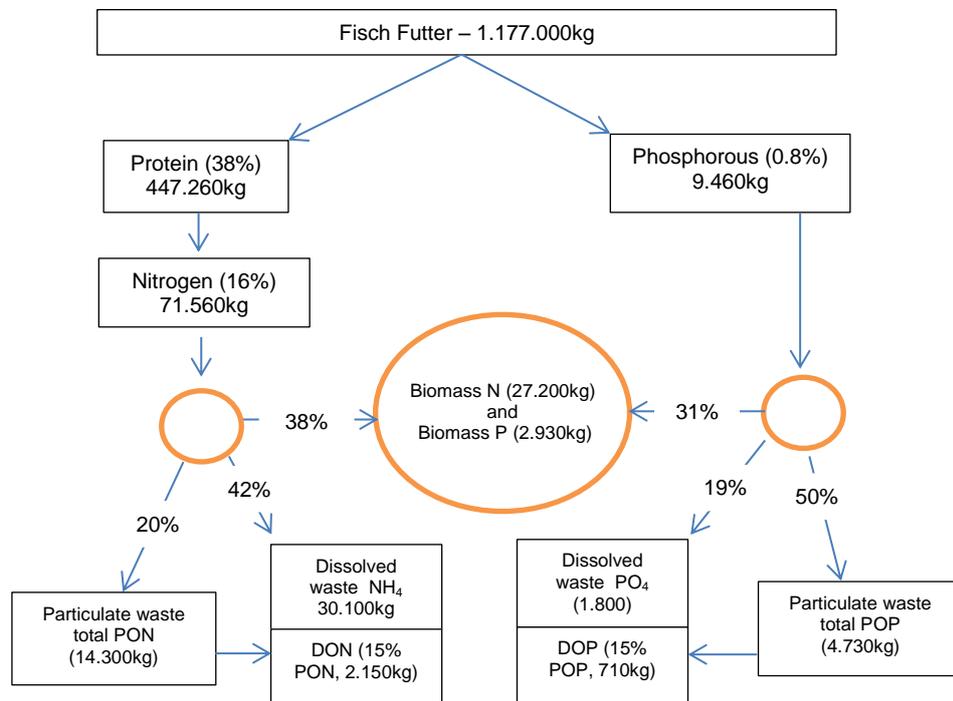
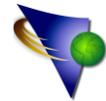


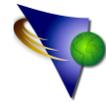
Abbildung 4: Stickstoff und Phosphor² Kreislauf

Eine Produktion mit 1.250T Lachsforelle setzt somit ca. 44.400kg Stickstoff und ca. 6.500kg Phosphor frei. Über eine komplette Faecesentnahme können ca. 4.000kg Phosphor und ca. 12.150kg Stickstoff dem System entzogen werden.

Gelöst müssen somit ca. 32.250kg Stickstoff und ca. 2.500kg Phosphor entnommen werden.

Eine Möglichkeit ist die Kompensation über Muschelkulturen. In Miesmuscheln beträgt der Stickstoffgehalt ca. 16g/kg. Bei einer angenommenen Erntemenge von 100T/ha können somit 1.600kg/ha dem System entzogen werden. Für ca. 32.000kg werden somit 20ha für die Muschelkulturen benötigt. Nach GREN et. al. (2009) können bis zu 300T pro Hektar in 12 bis 18 Monaten geerntet werden. Diese Werte beziehen sich auf Kulturen im Kattegat. Bei Salzgehalten von nur 12 - 14psu liegt die Ernte zwischen 100T und 120T in zwei Jahren. Der Salzgehalt im betrachteten Modellgebiet beträgt ca. 16psu, so dass 100T je Hektar als oberster Wert angenommen werden können.

² Verändert nach OLSEN et al. 2008. "Perspectives of nutrient emission from fish aquaculture in coastal waters" - Literature review with evaluated state of knowledge, 2008.



Der P-Gehalt in Muscheln beträgt ca. 0,7g/kg. Bei einer Erntemenge von 100T/ha von Muscheln können 70kg/ha entnommen werden. Hieraus ergibt sich ein Flächenbedarf von 35ha.

Im Zuckertang sind ca. 0,52% Stickstoff und 0,09% Phosphor im Nassgewicht vorhanden (Tabelle. 2). Nach SKJERMO et al. (2014) können zwischen 170 - 220T *Saccharina latissima* (max. 300T/ha) pro Hektar geerntet werden. Unter der Annahme von 200T je Hektar Erntemenge und einem Phosphorgehalt von 0,09% können somit 0,18T Phosphor pro Hektar dem System entnommen werden, welches einer Fläche von ca. 14 Hektar entspricht.

Für Stickstoff mit 0,5% im Nassgewicht ergeben sich 1T je Hektar, somit 32ha.

Diese Werte hängen allerdings stark von der Technologie der Kultivierung ab (vertikal Länge der Leinen, Abstand der Leinen, Strömungsgeschwindigkeit des Wassers etc.) und stellen somit nur Anhaltswerte dar.

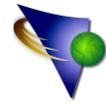
Tabelle 2: Zusammensetzung *Laminaria digitata*

	Lami	
	vom Nassgewicht	vom Trockengewicht
Water	81,50%	
Solid	18,5	100,00%
C	5,11	27,65
N	0,52	2,83
P	0,09	0,5
C/N	9,77	9,77
N/P	5,66	5,66

3 Modellstruktur

Das hydronumerische Modell MIKE ist modular aufgebaut. Je nach Fragestellung können zum grundlegenden Strömungsmodell zusätzliche Module eingesetzt werden. Im vorliegenden Fall sind dies das Transportmodul bzw. das Advection/Dispersion Modul, das Particle Tracking Modul und das Modul EcoLab.

Das Modell MIKE21HD stellt hierbei den 2-dimensionalen hydronumerischen Lösungsansatz dar, d. h., die ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten sind vertikal über sie Wassersäule integriert. Es findet somit kein vertikaler Massenaustausch statt. Für



Seegebiete ohne ausgeprägte Sprungschichten ist dieser Ansatz aufgrund von Rechenzeitkapazitäten dem 3-dimensionalen Lösungsansatz durch MIKE3HD vorzuziehen. In MIKE3HD lassen sich unterschiedliche Schichten definieren und es findet ein horizontaler Massenaustausch statt.

Die für die Modellierung zugrunde liegende Topographie kann als Gitterstruktur (Grid), also als regelmäßiges Raster der Tiefendaten oder aber als flexible mesh angegeben werden. Vorteil des Flexible Mesh ist, dass sich die Dichte der Tiefeninformationen der Topographie anpassen lässt und somit in Bereichen von kleinräumigen Höhenunterschieden eine Verdichtung des Mesh stattfindet sowie auch in Bereichen, in denen höher aufgelöste Informationen, wie z. B. in Bereichen von Aquakulturanlagen, notwendig sind. Dies reduziert die Rechenzeit signifikant.

Abbildung 5 zeigt das Startmenue für einen MIKE21HD flexible mesh Lauf.

Grundlegende Parameter sind die exakte Topographie sowie die Wasserpiegelauslenkungen (Pegeldaten) an den offenen Rändern. Die Topographie wird mit einem entsprechenden Editor erzeugt. Zugrunde liegen hier die offiziellen Vermessungsdaten des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie, die digital zur Verfügung gestellt wurden.

Die Pegeldaten wurden als Zeitreihe im Minutenintervall von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung ebenfalls digital zur Verfügung gestellt.

Für die Modellierung wurde ein Zeitraum von mehreren Tagen, der die üblichen Wasserstandsschwankungen repräsentiert, angesetzt. Aus Stabilitätsgründen muss der CFL-Wert (eine Kombination aus Gitterabstand und Zeitschritt) unter 1 liegen. Hieraus ergibt sich die zeitliche Auflösung der Modellierung. Im vorliegenden Fall liegen die Zeitschritte der Modellierung zwischen 3 und 30 Sekunden, was zu Rechenzeiten für die Modellierung des hydrologischen Regimes für 5 Tage zu Rechenzeiten von 72 Stunden führt.

Weitere Parameter die in die Modellierung einfließen sind u. a. die Coriolis-Kraft und der Wind. Die Coriolis-Kraft wird anhand der geographischen Lage des Modellgebietes errechnet. Winddaten können als Zeitreihe von einer nahegelegenen Windmessstation oder als konstanter Wert eingegeben werden. Weitere Parameter sind z. B. die Bodenrauhigkeit, Temperatur, Salzgehalt etc. und fließen ebenfalls in die Berechnung ein. Temperatur und Salzgehalt können als Konstante oder als Zeitreihe für das Modellgebiet und für den offenen Rand angegeben werden.

Im vorliegenden Falle wurden Salzgehalt (16psu) und Temperatur (10°) als konstant angegeben, da sich diese Parameter nicht innerhalb weniger Tage signifikant ändern. Der Wind wurde aus 245° mit einer Geschwindigkeit von 10m/s angenommen.

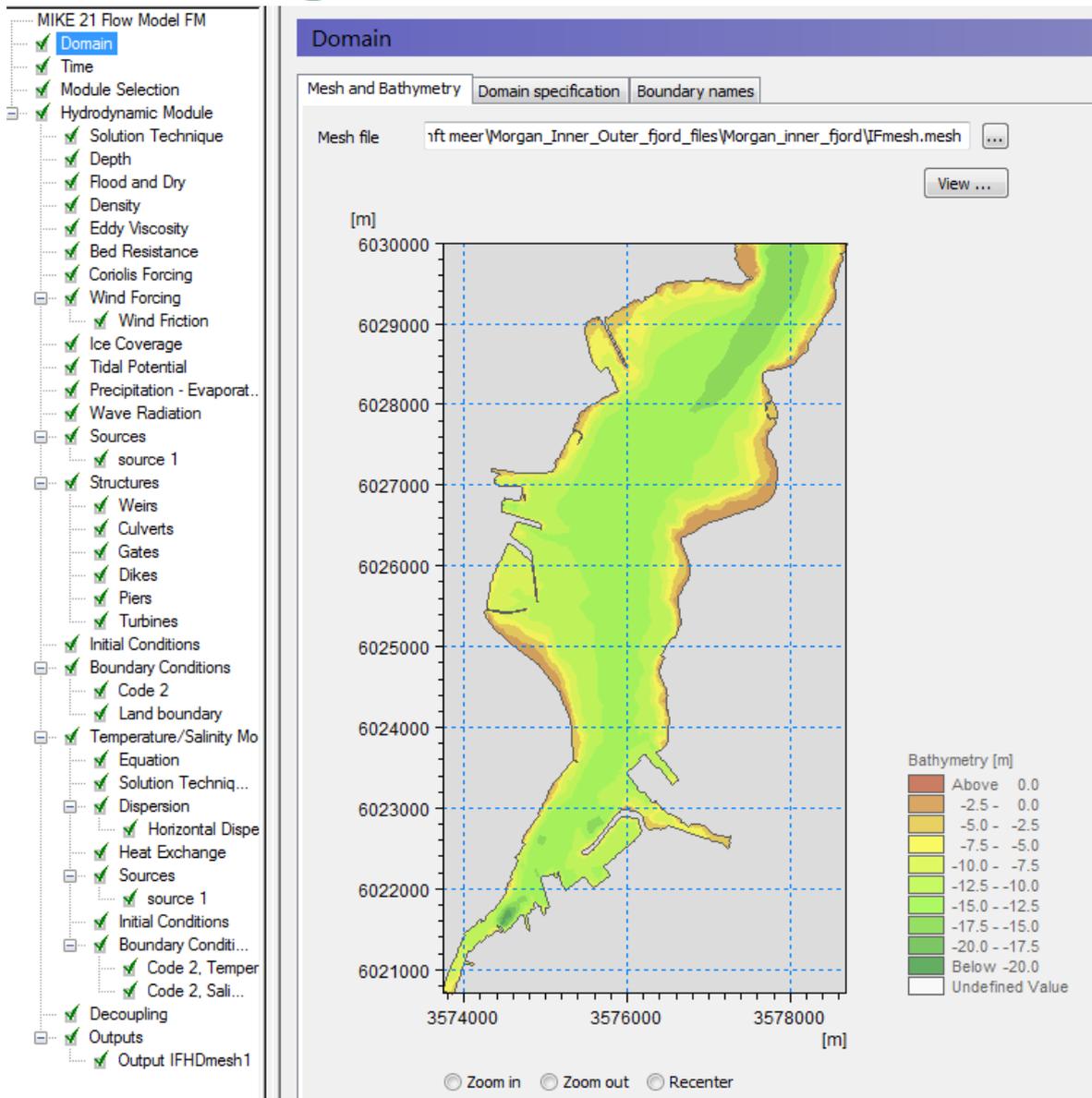
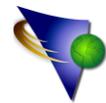
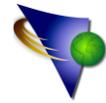


Abbildung 5: 2-dimensionales hydronumerische Modell MIKE21flexible mesh

Abbildung 6 stellt die Eingabemaske für das Transport Modul dar. Hier werden die Komponenten, die es zu betrachten gilt, spezifiziert. Im vorliegenden Falle sind dies die gelösten Stickstoff- und Phosphoranteile aus der Aquakultur die in den Wasserkörper eingetragen werden. Der Ort der Quelle wurde bereits im MIKE21HD Modell spezifiziert. Die Hintergrundwerte sowie die Werte am offenen Rand von Stickstoff und Phosphor wurden nicht mit berücksichtigt, da sich diese in wenigen Tagen Modulierzeit nicht verändern, somit als konstant angenommen werden können und keinen Einfluss auf die Ausbreitung der Nährstoffe aus der Aquakultur haben. Chemisch-biologische Prozesse werden bei dem Transport Modul nicht betrachtet. Für die Abschätzung der Stickstoff- und Phosphormenge aus der Aquakultur wurde eine konstante Freisetzung über den gesamten



Zeitraum der Hälterung der Fische in der Anlage angenommen obwohl diese im Laufe der Zeit variiert. Die Ergebnisse können somit nur als Mittelwerte angesehen werden.

Es wurde von 8 Monaten Hälterung ausgegangen. Bei 30 Tagen je Monat ergeben sich 240 Tage. Dies entspricht 5.760 Stunden bzw. 345.600 Minuten. Da das Modell im Sekundentakt rechnet wurde die Konzentration auf Sekunden umgerechnet. Dies sind 20.736.000 Sekunden. Pro Sekunde werden somit $32.250.000\text{g}/20.736.000\text{s} = 1,5\text{g}$ Stickstoff und $2.510.000\text{g}/20.736.000\text{s} = 0,12\text{g}$ Phosphor freigesetzt. Diese Werte gehen als Quelle in das Modell für Bookniseck ein. In der Innenförde lässt sich eine 1.250T Aquakulturanlage nicht realisieren. Hier wurde von max. 125T ausgegangen und die Werte entsprechend angepasst.

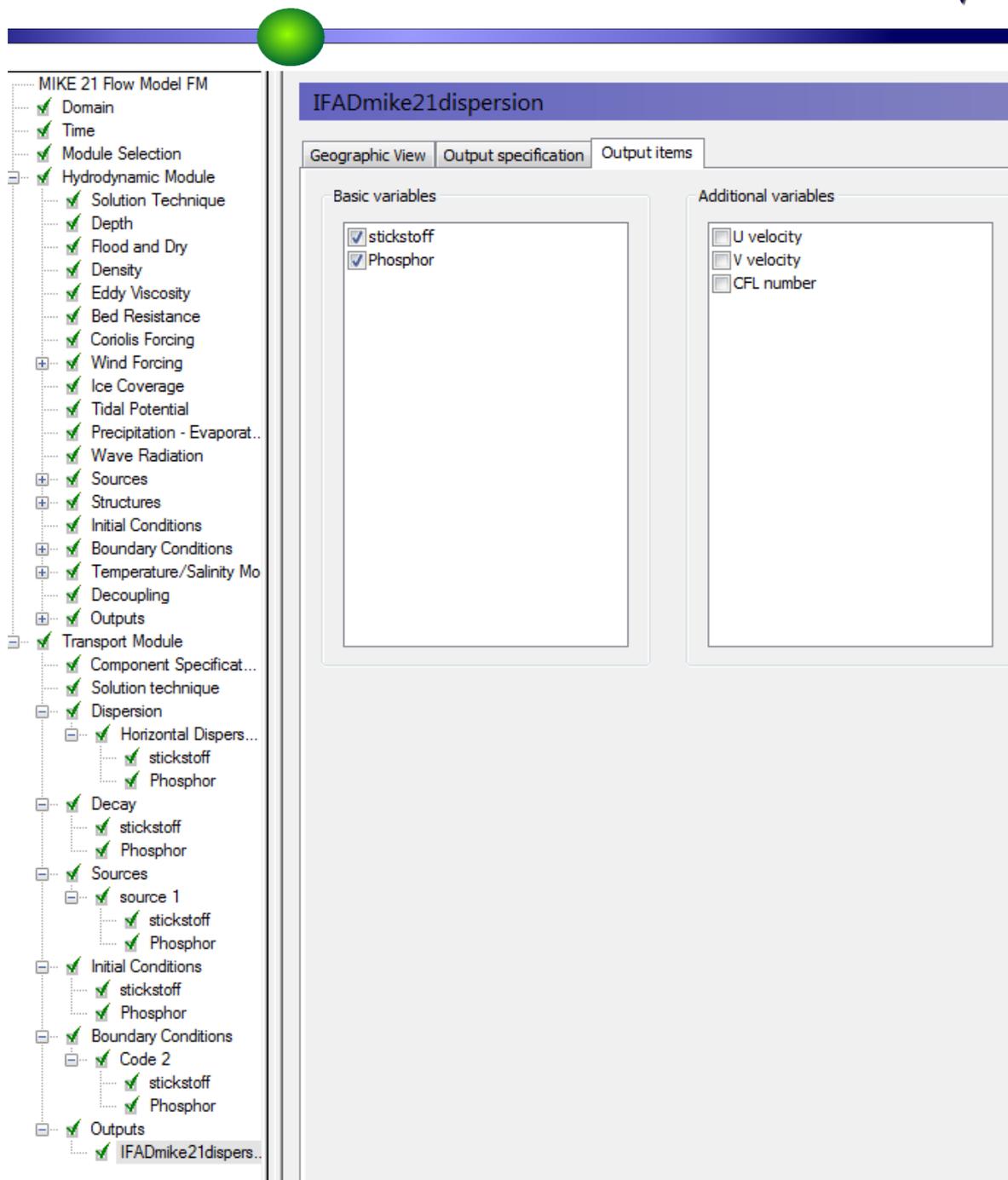
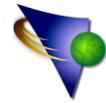
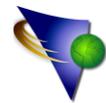


Abbildung 6: 2-dimensionales Transport Modul MIKE21flexible mesh

Abbildung 7 stellt die Eingabemaske für die Berechnung des Transportes der Faeces dar. Nach Literaturangaben (REID et al., 2008) beträgt die Sinkgeschwindigkeit von Faeces 0,02m/s - 0,06m/s. Für die Transportberechnung wurde die ungünstigste Annahme von 0,02m/s betrachtet.

Bei einer Wassertiefe von 20m und einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,01m/s haben die Faeces 1000 Sekunden Zeit sich Abzusetzen und können somit nur 10m verdriftet werden. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit 0,1m/s beträgt die Verdriftung dann 100m.



Realistische Werte für Strömungsgeschwindigkeiten in den Untersuchungsgebieten liegen zwischen 0,01m/s - 0,1m/s bei einer Wassertiefe kleiner 20m (Bookniseck ca.15m und Innenförde ca. 8m).

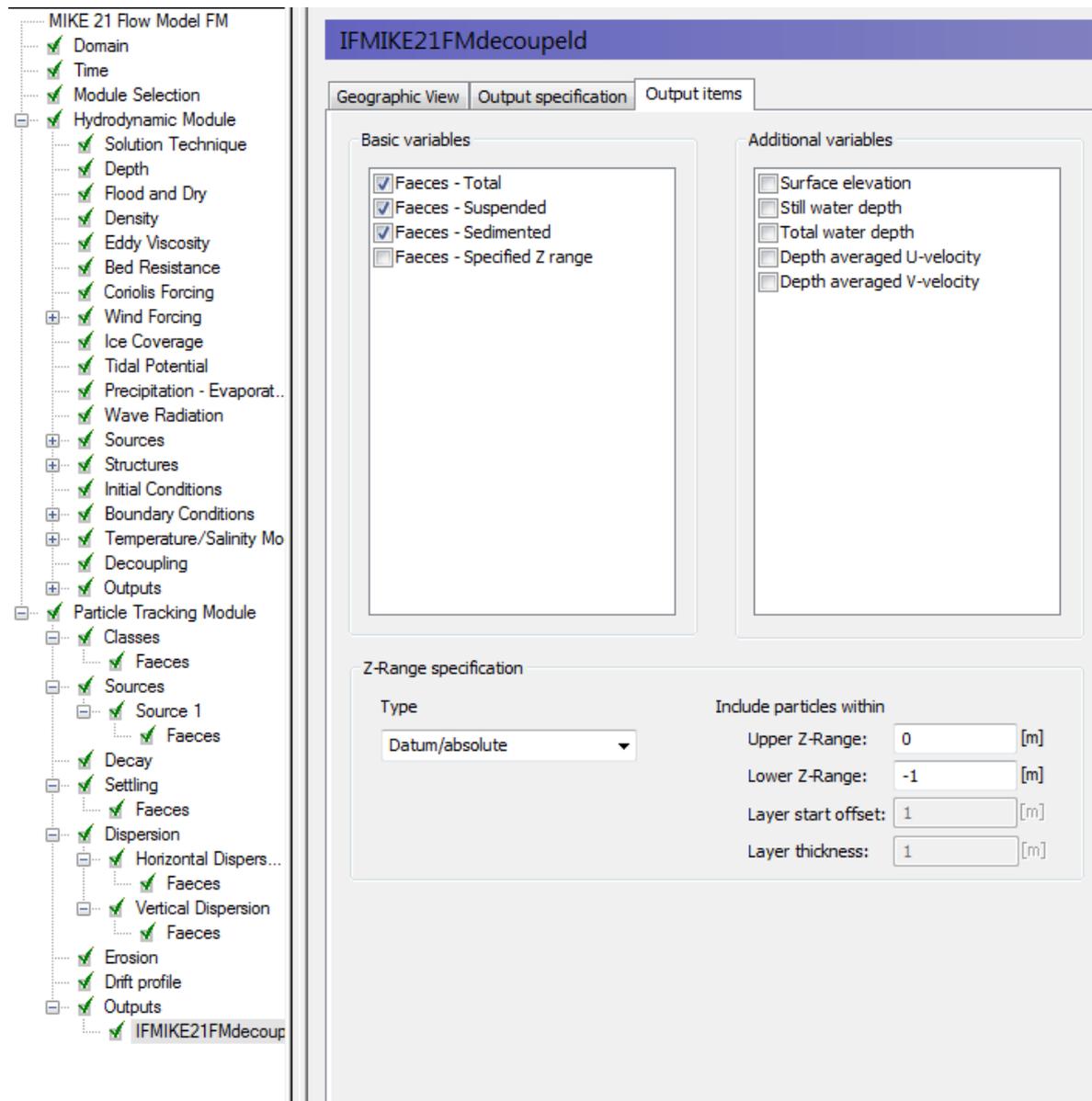
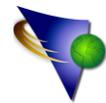


Abbildung 7: 2-dimensionales Faeces Transport Modul MIKE21flexible mesh

Abbildung 8 zeigt die Eingabemaske für das ökologische Stoffumsatzmodul EcoLab.

Wie erkennbar werden hier zahlreiche Parameter für einen sinnvollen Einsatz des Moduls benötigt. Insgesamt werden 25 Variable sowie 122 Konstanten benötigt. Diese Daten liegen für die Untersuchungsgebiete nur sehr sporadisch vor. Eine belastbare Modellierung kann somit nicht sichergestellt werden. Die Rechenzeiten für einen 8 monatigen Zeitraum sind derart hoch, das sich der Einsatz des Moduls als unrealistisch herausstellte.



The screenshot displays the MIKE21EcoLab software interface. On the left is a tree view of the model structure, and on the right is the 'Model Definition' window.

Model Definition Window:

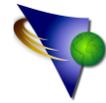
- Template Selection:** Eutrophication Model 1 incl. Sediment and Benthic Vegetation
- Path:** C:\Program Files (x86)\DHI\2014\MIKE Zero\Templates\EcoLab\Ei...
- Summary:**

25	State Variables	79	Auxiliary
122	Constants	100	Processes
7	Forcings	4	Derived
0	Classes		
- Solution Parameters:**
 - Integration: Euler
 - Update Frequency: 1

Tree View Structure:

- Hydrodynamic Module
- ECO Lab / Oilspill Module
 - Model Definition
 - State Variables
 - Solution technique
 - Constants
 - Forcings
 - Dispersion
 - Horizontal Dispersion
 - Sources
 - Source 1
 - PC
 - PN
 - PP
 - CH
 - ZC
 - DC
 - DN
 - DP
 - IN
 - IP
 - DO
 - Initial Conditions
 - PC, Phytoplankton C, g C/m³
 - PN, Phytoplankton N, g N/m³
 - PP, Phytoplankton P, g P/m³
 - CH, Chlorophyll-a, g Chl/m³
 - ZC, Zooplankton C, g C/m³
 - DC, Detritus C, g C/m³
 - DN, Detritus N, g N/m³
 - DP, Detritus P, g P/m³
 - IN, Inorganic nitrogen, g N/m³
 - IP, Inorganic phosphorous, g P/m³
 - DO, Dissolved oxygen, g DO/m³
 - BC, Macroalga C, g C/m²
 - BN, Macroalga N, g N/m²/d
 - BP, Macroalga P, g P/m²/d
 - EC, Rooted vegetation, g C/m²
 - NNEC, Rooted vegetation, number of shoot:
 - KDOX, depth of NO₃ penetration in sediment
 - SOP, Sediment organic P, g P/m²
 - FESP, Sediment iron adsorped P, g P/m²
 - SIP, Sediment phosphate, g P/m²
 - SON, Sediment organic N, g N/m²
 - SNH, Sediment ammonia, g N/m²
 - SNO3, NO₃-N in Surface sediment pore wat
 - SPIM, Sediment P, immobile fraction, g P/...
 - SNIM, Sediment N, immobile fraction, g N/...
 - Boundary Conditions
 - Code 2
 - Outputs
 - 2D N P vel and WD
 - 2D all
 - mass budget
 - discharge

Abbildung 8: 2-dimensionales ökologisches Modul MIKE21EcoLab flexible mesh



4. Untersuchungsgebiete

Als Untersuchungsgebiete wurden zwei Standorte gewählt. Dies ist einerseits ein Gebiet vor Bookniseck und andererseits die existierende Lachsforellenfarm in der Innenförde. In Voruntersuchungen zum SNAPTUN-Projekt (AHRENDT, 2012) wurden bereits Standortanalysen durchgeführt. Hiernach kommt der Bereich östlich von Falshöft bis östlich Maasholm in ca. 2km Küstenentfernung für eine 5.000T Produktion in Frage. Diese Standorte liegen allerdings in Bereichen, in denen bei einer hydronumerischen Modellierung massive Randprobleme auftreten. Dies beruht vor allem auf schlechte Pegel- und Seegrundinformationen. Daher wurde der mögliche Anlagestandort in einen Bereich verlegt, in dem die notwendigen Informationen optimal sind und Randprobleme nicht auftreten.

Die Kieler Innenförde bot sich andererseits als Untersuchungsgebiet an, da hier sehr kontrollierte Randbedingungen vorliegen. Nur ein offener Rand (Leuchtturm Friedrichsort – Mönkeberg) und ein im Gebiet liegender Pegel sowie keine Überflutungsflächen stellen sehr kontrollierte Randbedingungen dar.

4.1 Bookniseck

Die Tiefeninformationen wurden digital vom Bundesamt für Hydrologie und Seeschifffahrt zur Verfügung gestellt. Die geographischen Koordinaten wurden in metrische Koordinaten des UTM32-Gitters umgerechnet. Diese Daten wurden mit Hilfe eines Regionalisierungsprogrammes (SURFER, <http://www.goldensoftware.com>) in ein 25m x 25m Raster überführt. In MIKE wurde ein mesh gewählt, welches im Bereich der Aquakulturfarm einem Gitter von 25m x 25m (Abbildung 9) entspricht (Grundfläche 625m²). Das Grid diente hierbei als Kontrolle des von MIKE erstellten mesh.

Die Wasserstandsschwankungen wurden digital vom Pegel Schleimünde übernommen. Die Daten liegen im Minutentakt vor (Abbildung 10).

Die Hintergrundwerte der Stickstoff- und Phosphorbelastung des Seegebietes wurden vom Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume zur Verfügung gestellt (Abbildung 11 und 12). Die Messstation liegt vor Bookniseck.

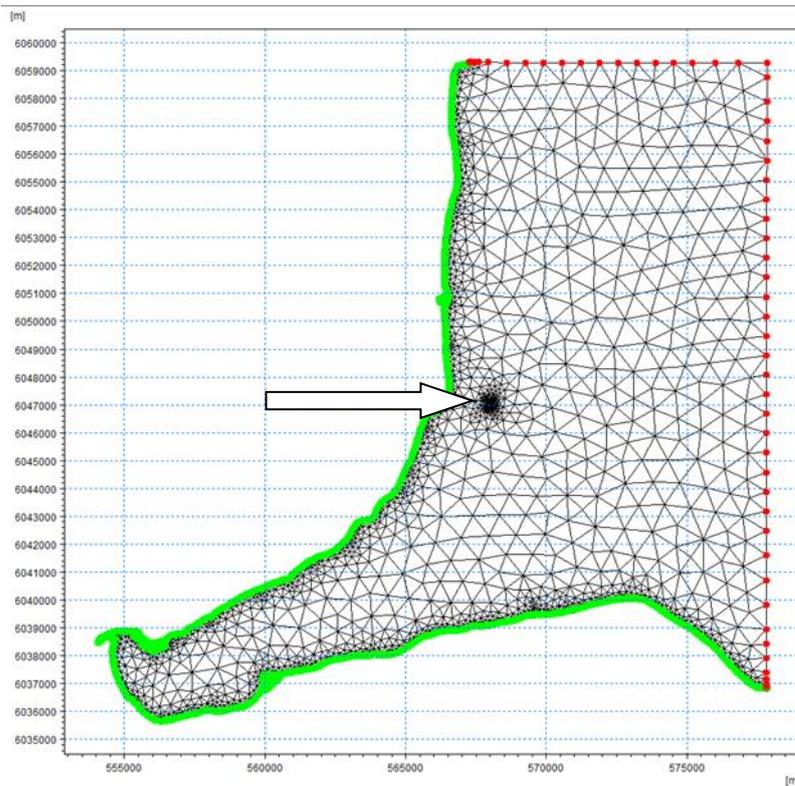
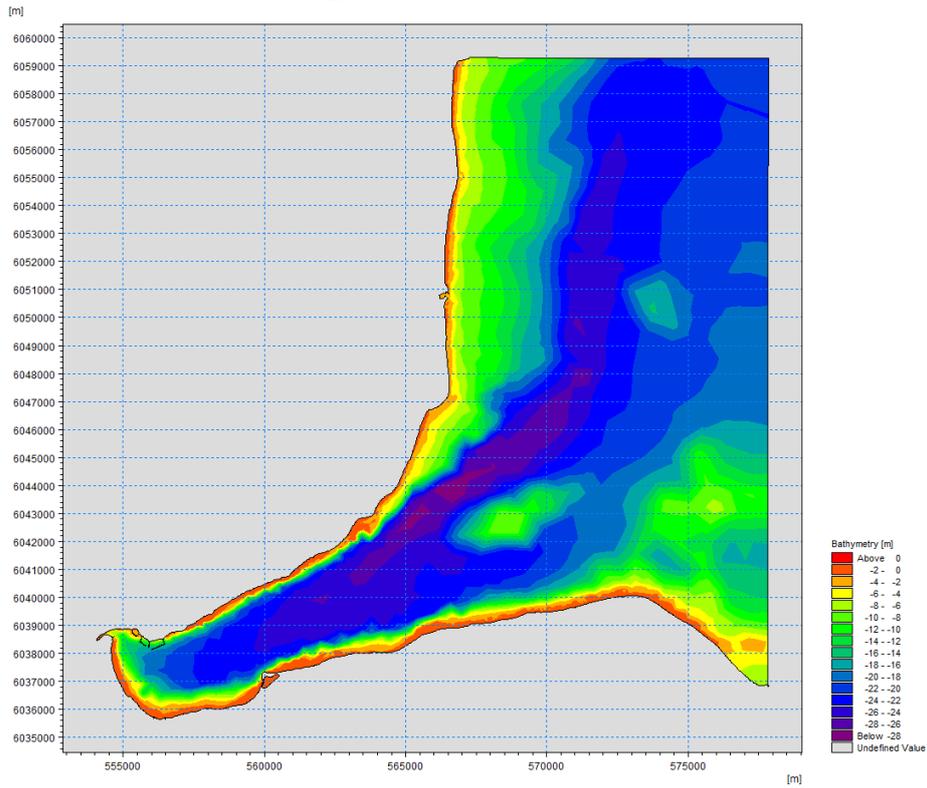
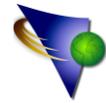


Abbildung 9: Tiefenstruktur Bookniseck, oben: Tiefenlinien, unten: flexible mesh mit Aquakulturstandort

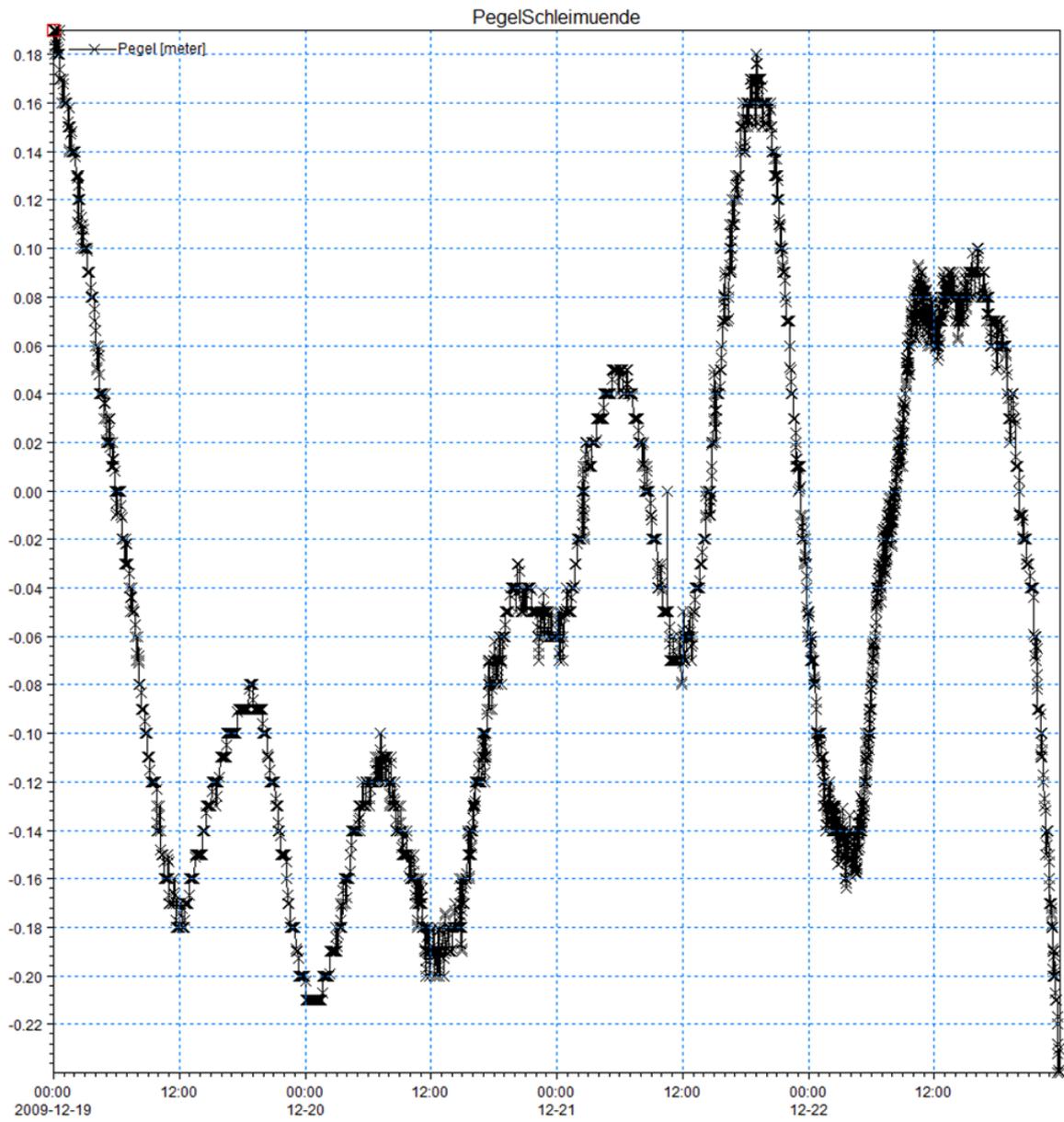
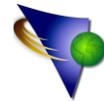


Abbildung 10: Pegel Schleimuede

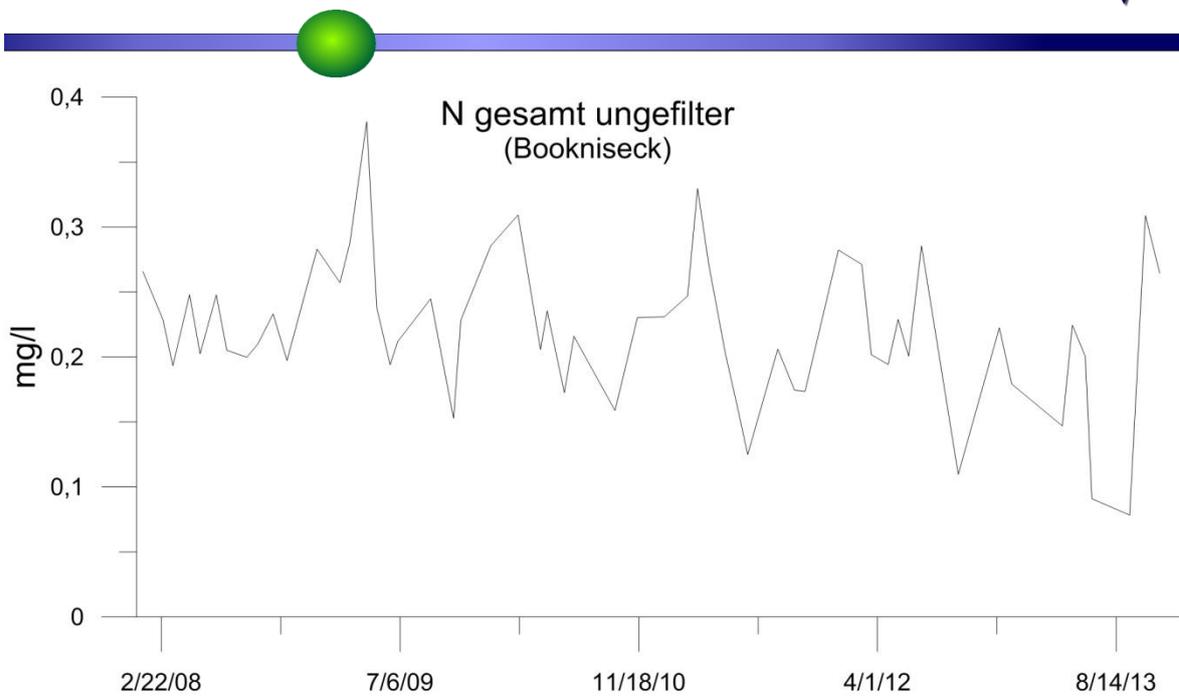
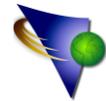


Abbildung 11: Stickstoffkonzentration Bookniseck von 2008 bis 2013

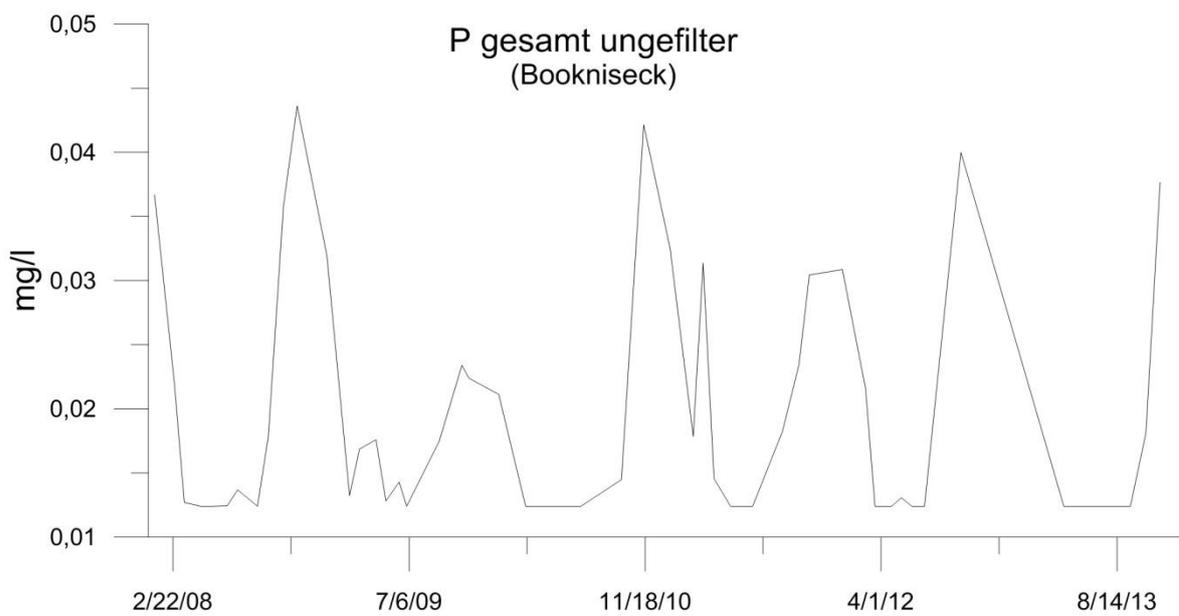
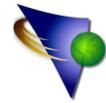


Abbildung 12: Phosphorkonzentration Bookniseck von 2008 bis 2013



4.2 Innenförde

Die Tiefeninformationen wurden digital vom Bundesamt für Hydrologie und Seeschifffahrt zur Verfügung gestellt. Die geographischen Koordinaten wurden in metrische Koordinaten des UTM32-Gitters umgerechnet. Diese Daten wurden mit Hilfe eines Regionalisierungsprogrammes (SURFER, <http://www.goldensoftware.com>) in ein 10m x 10m Raster überführt. In MIKE wurde ein mesh gewählt, welches im Bereich der Aquakulturfarm einem Gitter von 10m x 10m (Abbildung 13) entspricht (Grundfläche 100m²). Das Grid diente hierbei als Kontrolle des von MIKE erstellten mesh.

Die Wasserstandsschwankungen wurden digital vom Pegel Holtenau übernommen. Die Daten liegen im Minutentakt vor (Abbildung 14).

Die Hintergrundwerte der Stickstoff- und Phosphorbelastung des Seegebietes wurden vom Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume zur Verfügung gestellt (Abbildung 15 und 16). Die Messstation liegt zwischen Holtenau und Möltenort.

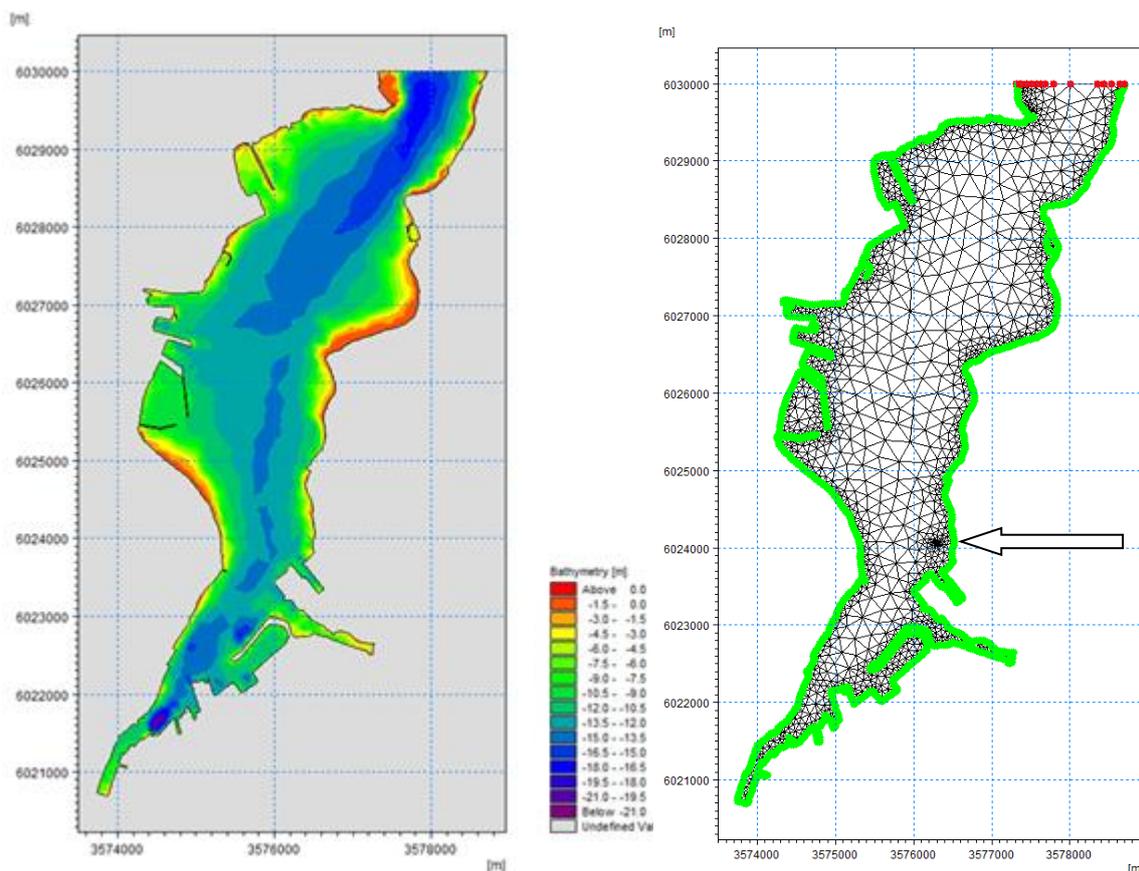


Abbildung 13: Tiefenstruktur Kieler Förde, links: Tiefenlinien, rechts: flexible mesh mit Aquakulturstandort

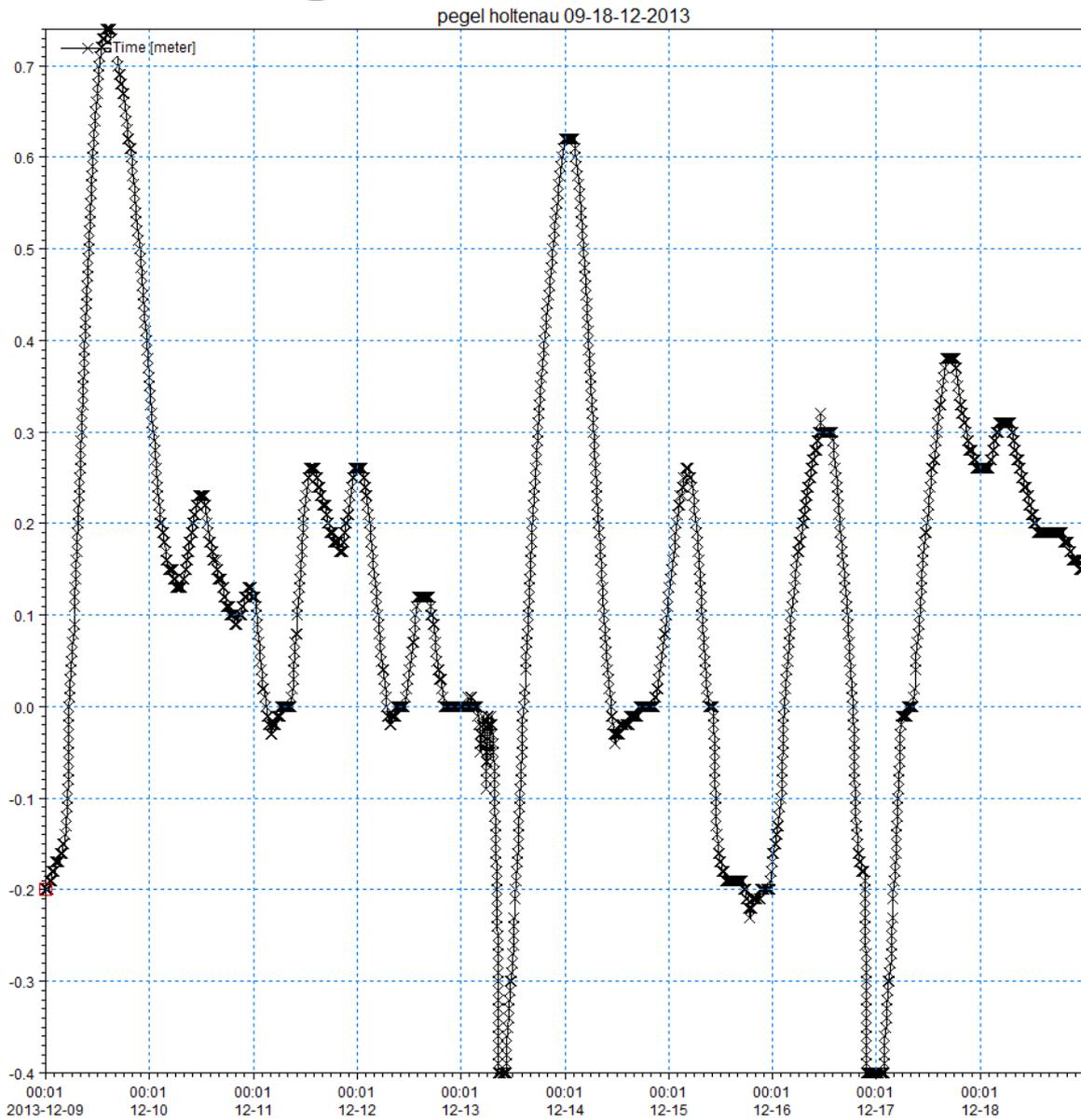
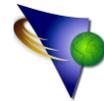


Abbildung 14: Pegel Kiel Holtenau

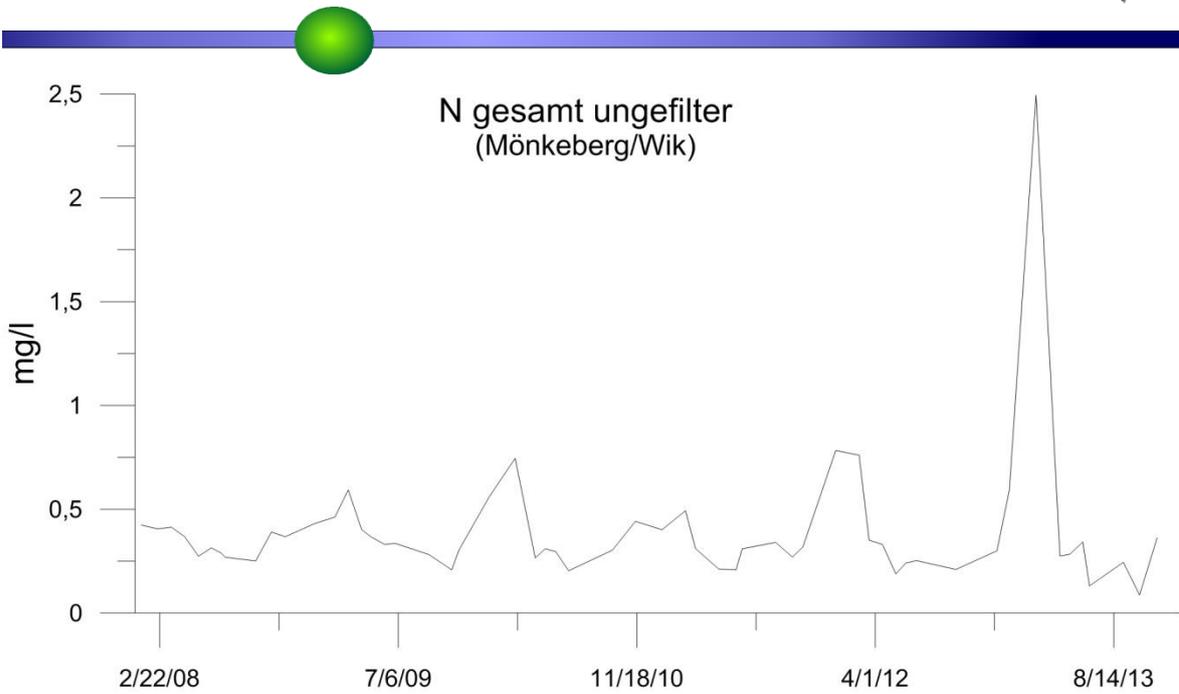
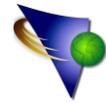


Abbildung 15: Stickstoffkonzentration Kieler Förde von 2008 -2013

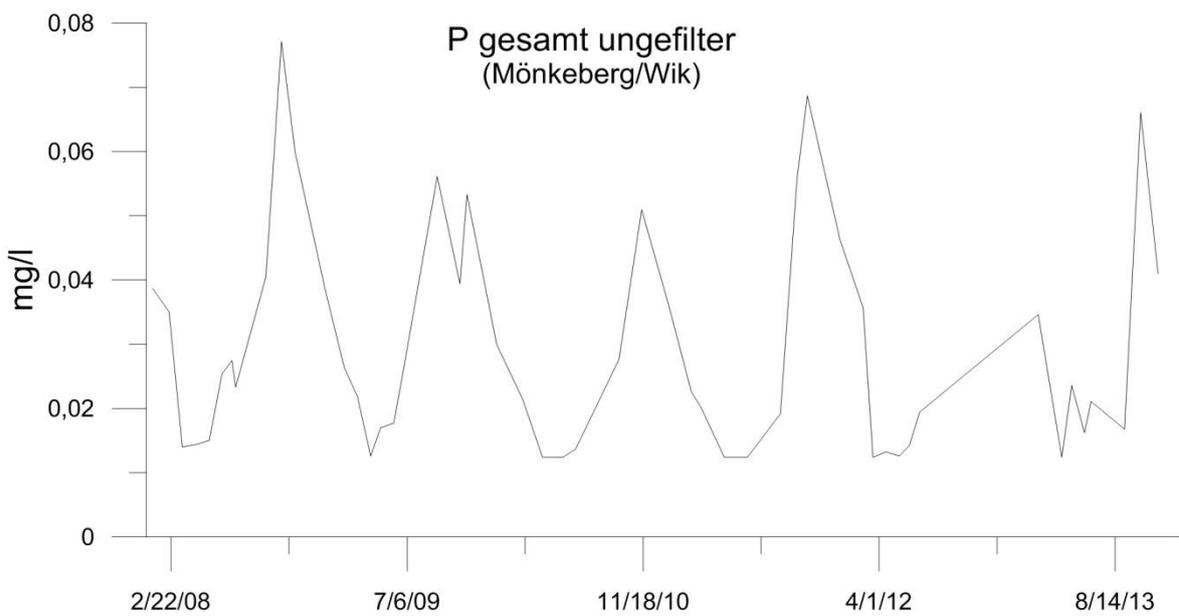
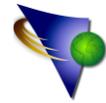


Abbildung 16: Phosphorkonzentration Kieler Förde von 2008 bis 2013



5. Messprogramm Innenförde

In der Innenförde wurden Naturmessungen im Sommer 2014 durchgeführt. Hierzu gehörten die Bestimmung von Wasserparametern sowie die Gewinnung von Faeces aus der vorhandenen Aquakulturfarm.

5.1 Aufbau

Abbildung 17 und 18 zeigen die Lage der Aquakulturfarm. Diese Anlage ist gegenüber den Planungen von Anlagen in der offenen See relativ klein. Zurzeit werden von 8 Netzgehegen nur zwei genutzt. Der Besatz lag im Sommer 2014 bei ca. 500kg Regenbogenforellen.

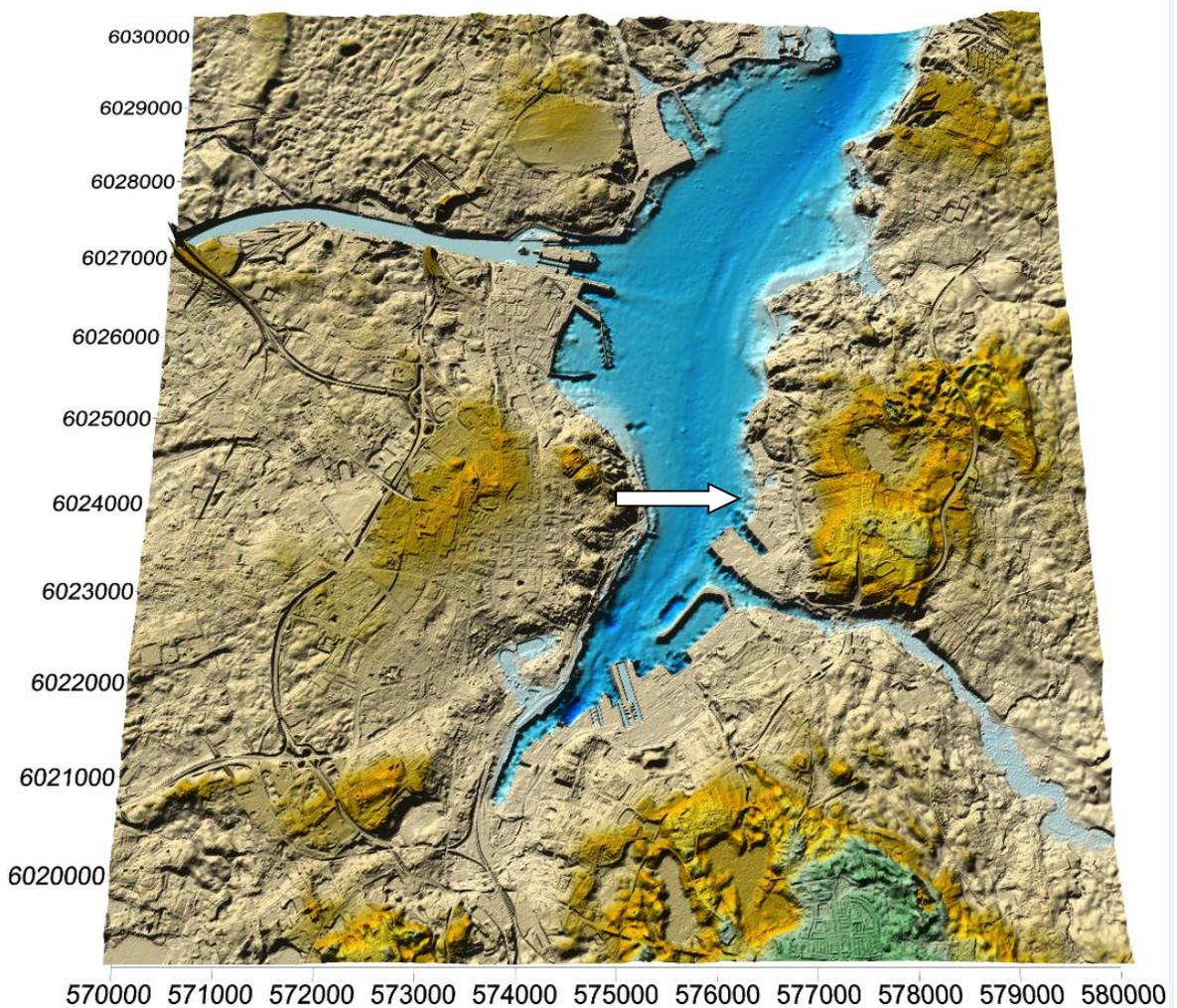


Abbildung 17: Lage der bestehenden Aquakulturanlage

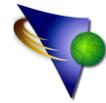
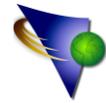


Abbildung 18: Aquakulturanlage von Tassilo Jäger-Kliniecke



Am 03.07.2014 wurden drei Faeces-Sammler (Abbildung 19) durch CRM zur Verfügung gestellt und in Zusammenarbeit mit dem Institut für Natur- und Ressourcenschutz der Universität zu Kiel ausgebracht. Die Sammler verfügen jeweils über vier senkrechte Röhren, die einen Durchmesser von 5 cm haben. In diese Röhren konnten die Fäkalien sowie Futterreste hineinfallen und mit einem angebrachten Becher unterhalb der Röhren nach einiger Zeit entnommen werden (Abbildung 20).

Um die Hintergrundbelastung der Kieler Förde ebenfalls zu überprüfen, wurde ein Sammler auch aus der Strömungsrichtung vor der Aquakultur hinuntergelassen, ein weiterer hinter der Aquakultur (Abbildung 21). Die Sammler wurden am 17.07. und am 31.07.2014 wieder eingeholt.

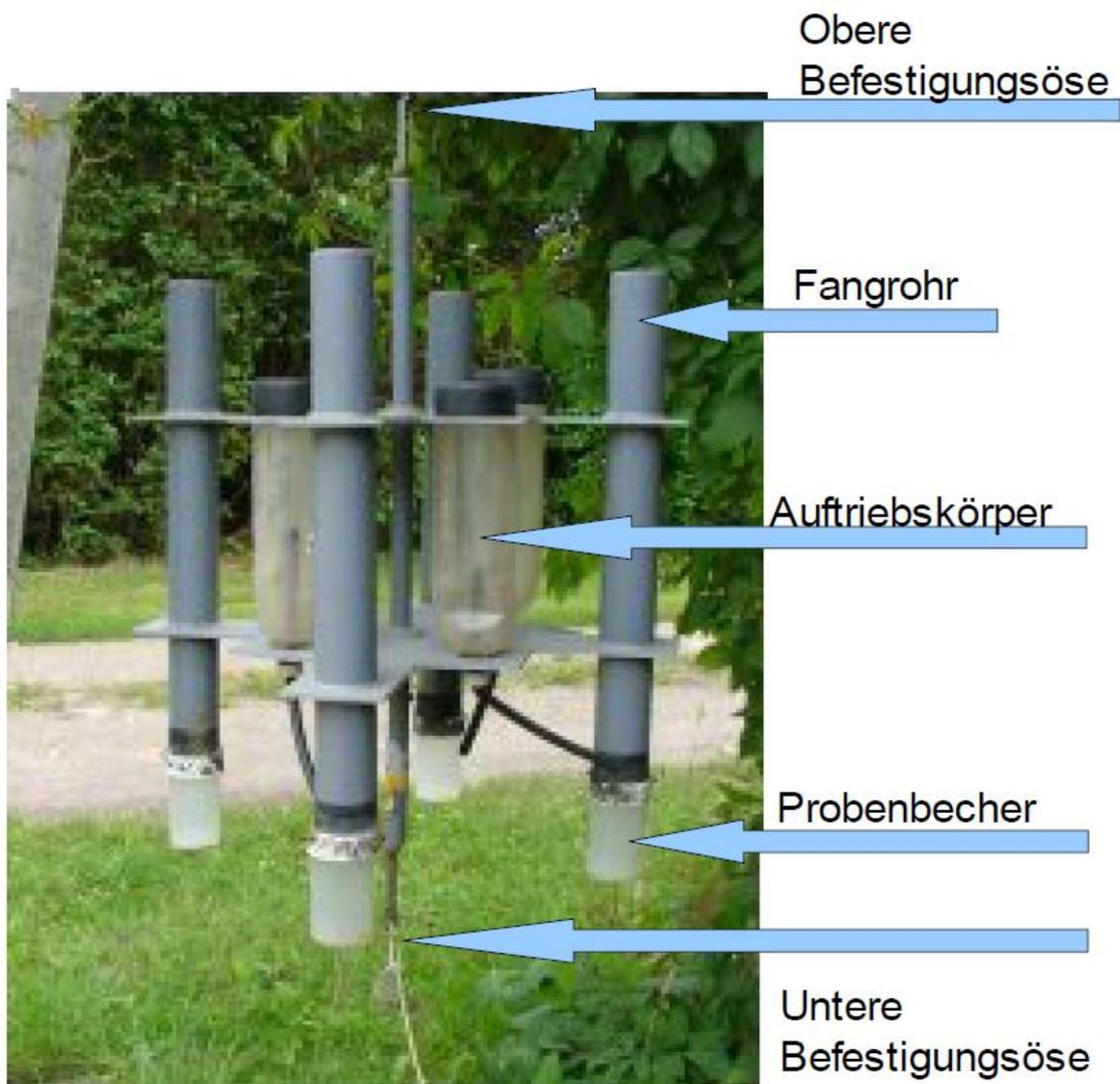
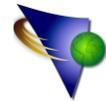


Abbildung 19: Faeces-Sammler



Der Inhalt der Sammler wurde anschließend tiefgefroren damit keine bio-chemischen Prozesse während der Lagerung auftreten konnten. Nach Auftauen wurden die Proben getrocknet, homogenisiert und am Institut für Natur- und Ressourenschutz auf die Anteile von Stickstoff und Kohlenstoff hin analysiert.

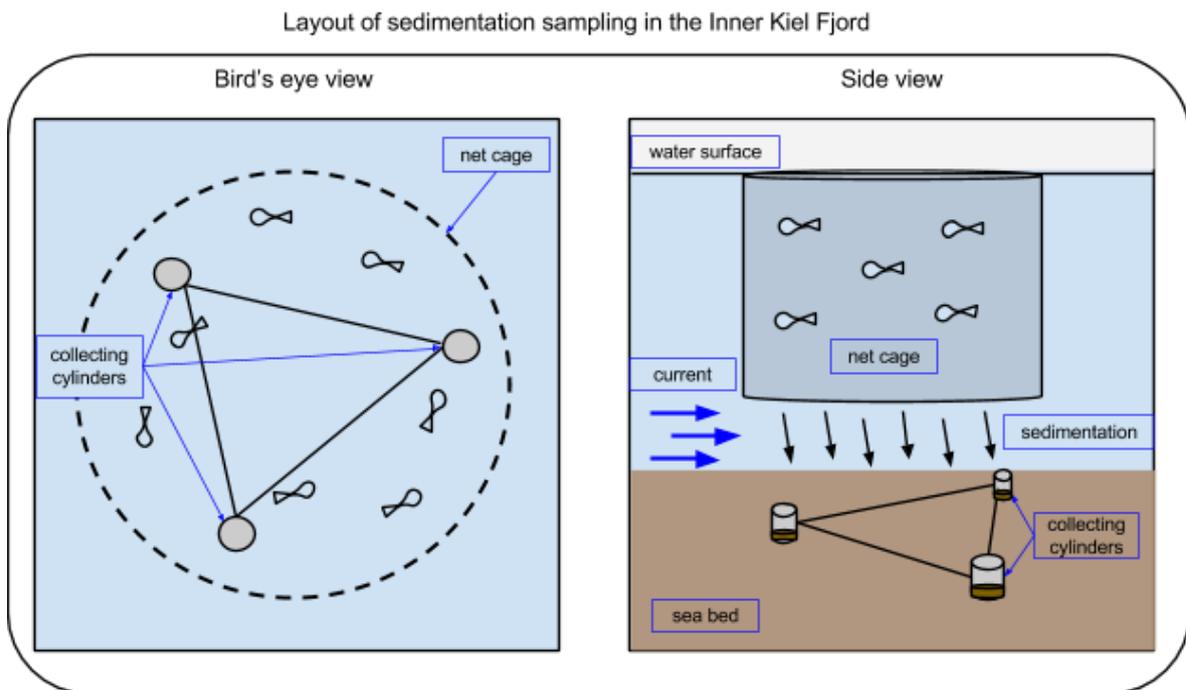


Abbildung 20: Schema der Faeces-Sammel-Anlage; links Draufsicht, rechts Ansicht

Aufbau der Probenahme

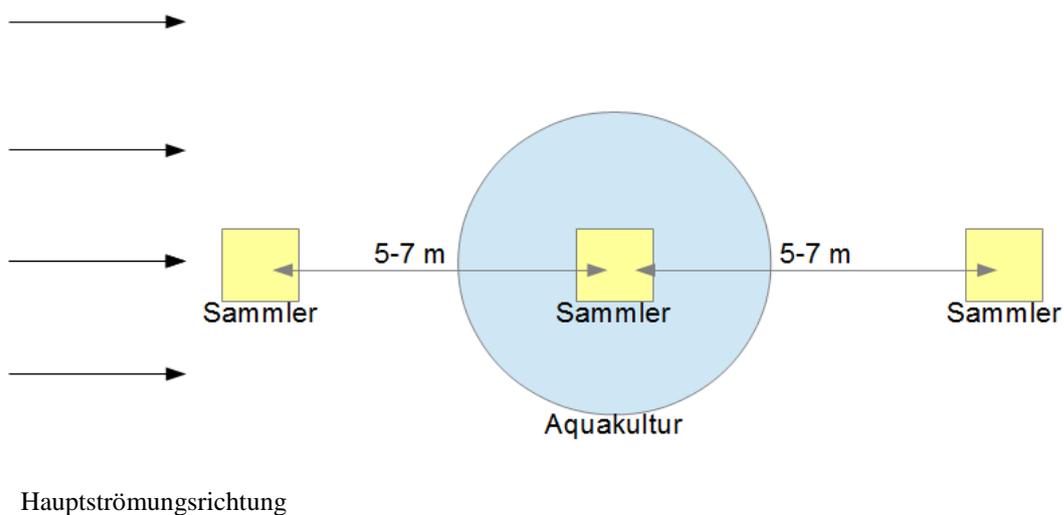
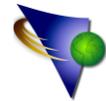


Abbildung 21: Aufbau der Faeces-Sammler an der Aquakulturanlage in der Innenförde



5.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse in Tabelle 3 sowie in Abbildung 22 und 23 sind ermittelte Mittelwerte von den bis zu vier Probenahmesammlern, umgerechnet auf die von der Aquakultur abgedeckte Wasseroberfläche (100m²). Um die Ergebnisse vergleichbar zu machen, wurden die anderen Probenahmestellen mit demselben Faktor umgerechnet. „Vorne“ und „Hinten“ bezieht sich auf die Strömungsrichtung der Kieler Förde, die fördeauswärts parallel entlang der Küste verläuft.

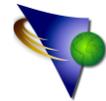
Die Ergebnisse beziehen sich jeweils auf einen Zeitraum von 14 Tagen. In dem Zeitraum befanden sich 500kg Lachsforellen in der Aquakultur, gefüttert wurde teilweise gar nicht, da die Temperaturen der Kieler Förde zu hoch waren und damit die Fische das Futter nicht hätten verdauen können.

Tabelle 3: Mittelwerte aus den Sammelbehältnissen

Datum/Lage	N [mg]	C [mg]
17.07. Vorne	3,5812	35,3139
17.07. Mitte	5,2107	59,9033
17.07. Hinten	2,6688	33,2801
31.0.7. Vorne	4,2131	43,9238
31.07. Mitte	4,0689	37,1063
31.07. Hinten	4,6239	53,9009

Tabelle 4: Einzelwerte aus den Sammelbehältnissen

Datum/Lage	N %	C %	Gewicht [mg]
17.7. Vorne	0,962	11,283	7,036
17.7. Vorne	1,453	11,604	5,215
17.7. Vorne	1,205	12,161	5,601
17.7. Mitte	1,668	18,587	7,319
17.7. Mitte	1,704	18,158	5,727
17.7. Mitte	1,656	21,41	5,27
17.7. Hinten	1,091	14,094	4,512
17.7. Hinten	0,99	11,952	5,614
31.7. Vorne	1,126	10,949	6,876
31.7. Vorne	1,271	11,23	8,056
31.7. Vorne	0,59	8,872	10,677
31.7. Vorne	1,33	12,758	6,623



31.7. Mitte	1,394	13,454	5,675
31.7. Mitte	1,68	15,366	5,502
31.7. Mitte	1,619	13,066	6,33
31.7. Mitte	1,296	13,611	3,514
31.7. Hinten	1,437	12,938	6,51
31.7. Hinten	1,437	11,876	11,419
31.7. Hinten	0,46	12,702	11,825
31.7. Hinten	1,398	14,574	3,657

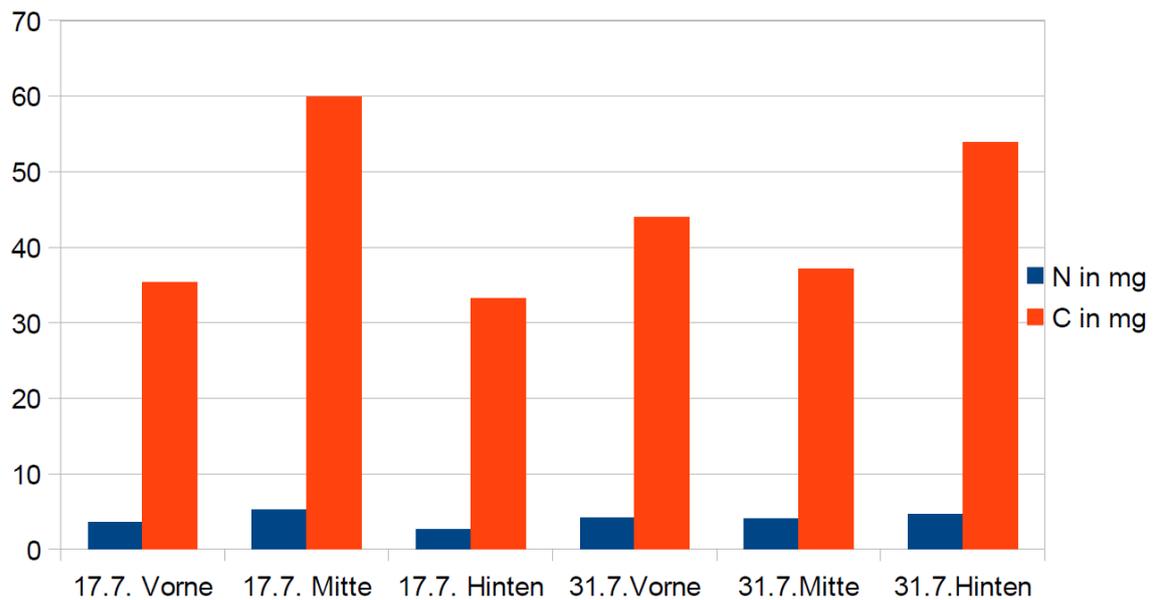


Abbildung 22: Stickstoff- und Kohlenstoff-Verteilung

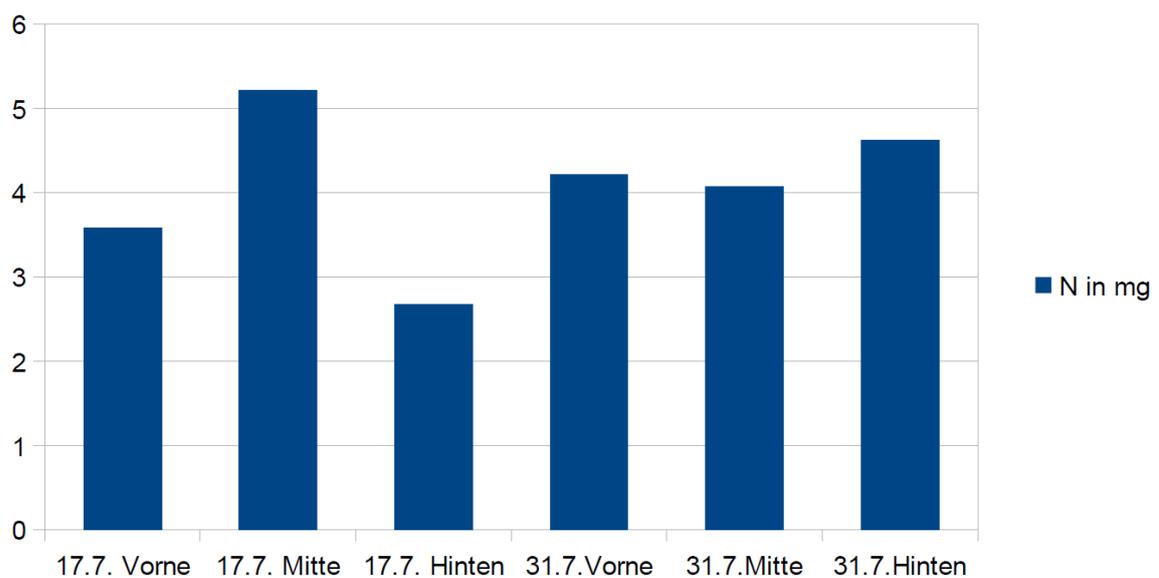
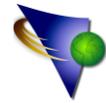


Abbildung 23: Stickstoff-Verteilung



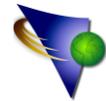
Am meisten reicherten sich Seepocken und Miesmuscheln direkt unterhalb der Aquakultur auf dem Sammler an.

Das aufgefangene Material wurde aus technischen Gründen nicht auf die konkrete Zusammensetzung hin untersucht. Es wurden nur die offensichtlichen Schalenreste aus dem Probenmaterial entfernt. Auffällig ist, dass die Konzentration von Stickstoff unterhalb der Anlage in den einzelnen Proben relativ konstant ist. Dies deutet darauf hin, dass das aufgefangene Material relativ homogen zusammengesetzt ist. Augenscheinlich handelt es sich hierbei ausschließlich um Faeces. Die großen Schwankungsbreiten in der Stickstoffkonzentration vor und hinter der Anlage in dem aufgefangenen Material deuten darauf hin, dass das Material nicht homogen zusammengesetzt ist. Hierbei kann es sich um unterschiedliches Detritus handeln. In der Aquakulturfarm werden Detritus und Plankton etc. von den Fischen aufgenommen und sollten somit in den Sammelbehältern ausgedünnt sein. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass der Stickstoffanteil im Kot bei ca. 1,6 - 1,7% liegt. Berücksichtigt werden muß allerdings, dass der Stickstoffgehalt in frischem Kot höher ist.

Die gemessenen Wasserparameter (in 1 Meter Intervallen gemessen) stellen die klassische Abfolge in der Kieler Förde dar. Die Temperatur nimmt zur Gewässersohle hin ab und der Salzgehalt zu. Eine Sprungschicht ist nicht vorhanden. Der pH-Wert ist vor der Anlage leicht höher als hinter der Anlage. Dies mag auf in der Anlage stattfindende Redoxvorgänge zurückzuführen sein.

Tabelle 5: Wasserparameter

	Redox in mV	korrigierter Redox	mS	Temp	pH	O ₂ in mg
H1	56	307,1	28,6	18,8	7,19	6,73
H2	44,6	295,7	28,7	18,4	7,19	7,26
H3	30,1	281,2	28,7	18,1	7,19	7,21
H4	36,3	287,4	29	18,1	7,21	7,43
H5	44,7	295,8	29,3	18	7,23	6,01
H6	28,1	279,2	31,5	17	7,24	5,61
H6,5	30,8	281,9	31,9	16,7	7,25	4,55
V1	98,7	349,8	28,8	18,4	7,26	6,92
V2	116,8	367,9	28,8	18,3	7,27	6,81
V3	65,9	317	29	17,5	7,28	6,87
V4	106,5	357,6	29,5	17,2	7,29	5,92
V5	127,9	379	36,9	16,9	7,29	5,38
V6	131,5	382,6	29,3	16,7	6,98	4,68



6. Modellierung

Nachdem alle Eingangsdaten für die Modellierung in dem vom Programm erforderlichen Formaten vorlagen, konnte mit der eigentlichen Modellierung begonnen werden. Die anfänglichen Läufe liefen nicht stabil. Erst nach Anpassung von entsprechenden Steuerungsparametern konnten stabil laufende Modellrechnungen durchgeführt werden.

6.1. Bookniseck

Für Bookniseck stand der Pegel Schleimünde zur Verfügung. Der gewählte Zeitraum für die Modellierung umfasste 4 Tage mit Wasserstandsauslenkungen von +/- 20cm. Buchtenstauereffekte wie in der inneren Kieler Förde treten hier nicht auf.

Für eine Verifizierung der Ergebnisse standen keine Strömungsmessungen zur Verfügung. Eine alternative Verifizierungsmöglichkeit ist der Vergleich gemessener und modellierter Wasserstandsauslenkungen. Hierfür kommen zwei Pegel in Betracht. Der Pegel Kiel Leuchtturm befindet sich außerhalb des Untersuchungsgebietes und der Pegel Hafen Eckernförde ist durch anthropogene Maßnahmen stark beeinflusst. Eine Verifizierung mit Naturdaten war daher nicht möglich.

Die Ergebnisse aus der hydronumerischen Modellierung weisen aber sehr realistische Werte auf.

6.1.1 Hydronumerisches Modell

Die Strömungsgeschwindigkeiten im Untersuchungsgebiet weisen Geschwindigkeiten zwischen 0,01cm/s und 0,1cm/s auf (Abbildung 24). In Spitzen können auch 0,02cm/s auftreten. Eine dominante Strömungsrichtung ist nicht festzustellen.

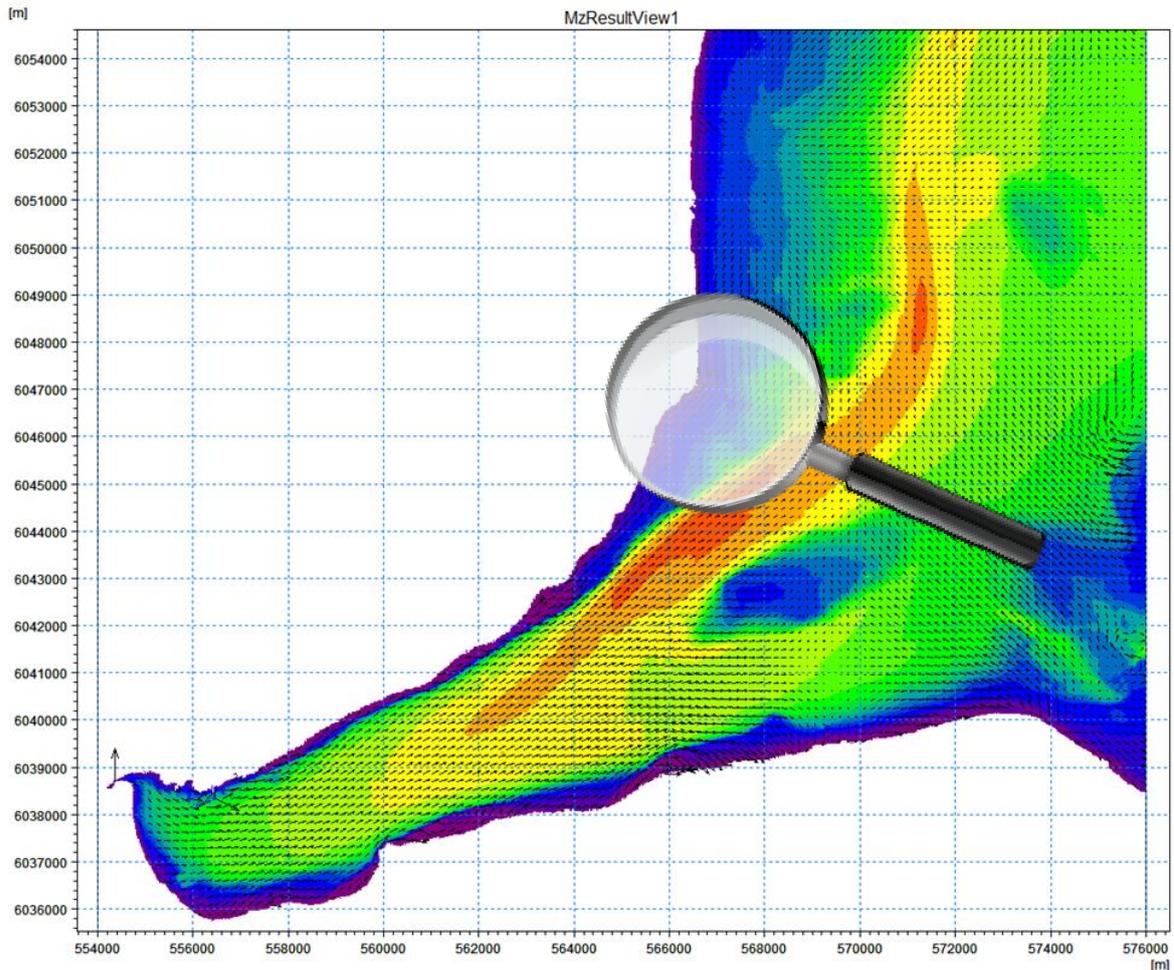
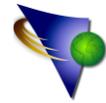


Abbildung 24: Strömungsbild der Eckernförder Bucht

6.1.2 Faeces Transport Modul

Aufbauend auf dem Strömungsmodell wurde die Modellierung der Verdriftung der Faeces durchgeführt.

Während des betrachteten Zeitraumes werden die Faeces max. 200m verdriftet, d. h. 100m nach Norden und 100m nach Süden vom Ausgangspunkt aus (Abbildung 25 und 26). Die Strömung verläuft während der Modellierungsphase überwiegen küstenparallel. Die West-Ost Verdriftung beträgt max. 50m. Zeitweilig kommt es während der Absinkphase strömungsbedingt auch zum Wechsel der Verdriftungsrichtung, also zu einem leichten Pendeln der Faeceswolke.

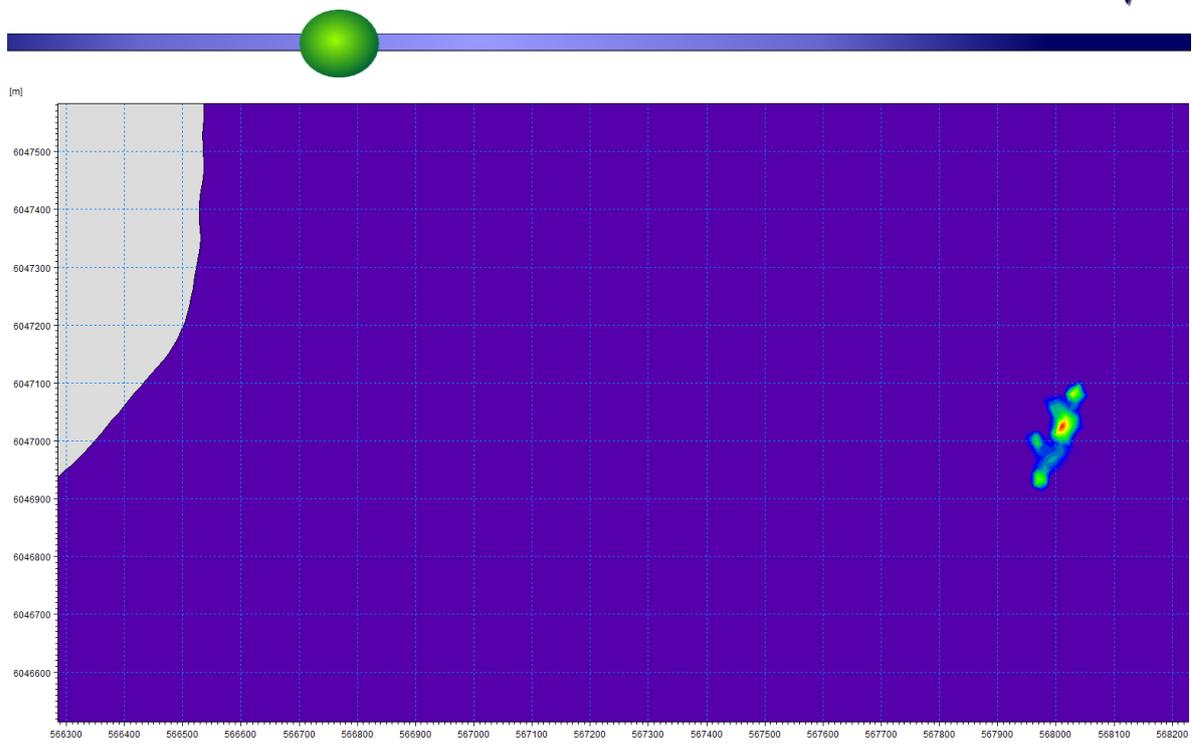
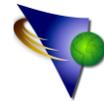


Abbildung 25: Verdriftung der Faeces

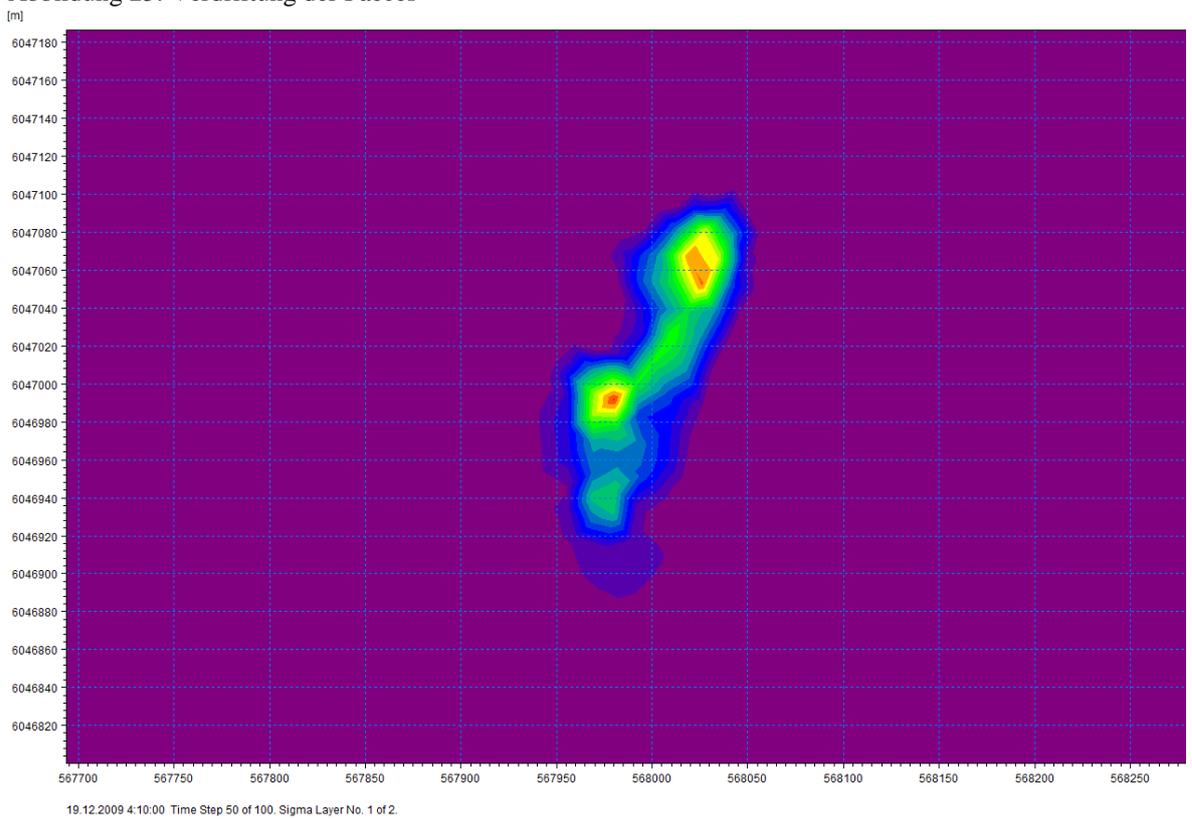
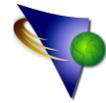


Abbildung 26: Detailansicht der Verdriftung der Faeces



6.1.3 Advection-Dispersion Modul

Die Verdünnung der gelösten Nährstoffe Stickstoff (1,5g/s) und Phosphor (0,12g/s) erfolgt relativ rasch. Für Stickstoff liegen die Werte in 10m Entfernung unter 0,05mg/l und in 150m Entfernung unter 0,0005mg/l (Abbildung 27 und 28). Die Werte für Phosphor sind entsprechend geringer und liegen in 100m Entfernung bei ca. 0,005mg/l. Diese Werte liegen weit unterhalb der natürlichen Hintergrundkonzentration (Abbildung 11 und 12).

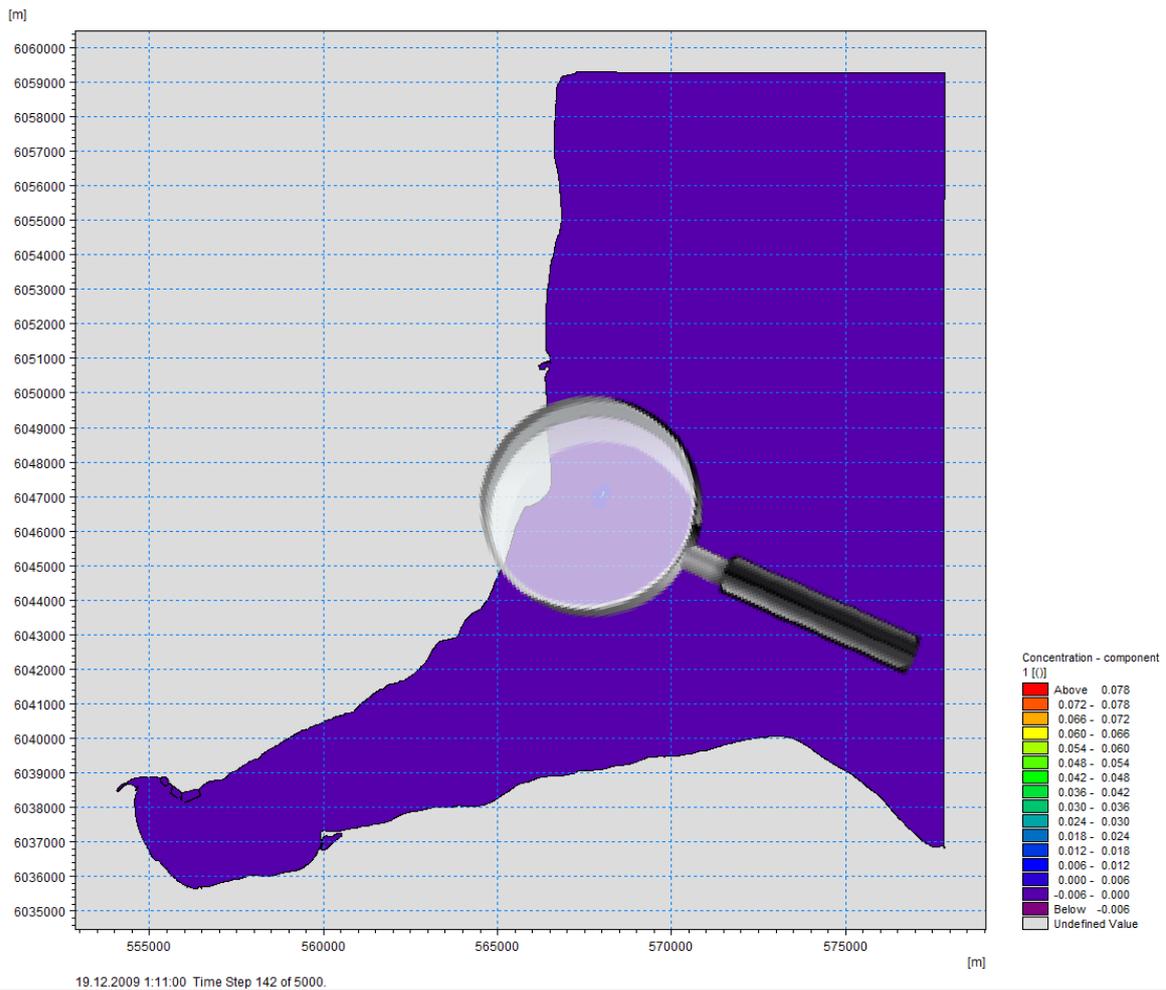


Abbildung 27: Überblick über die Verdriftung gelöster Nährstoffe, hier Stickstoff

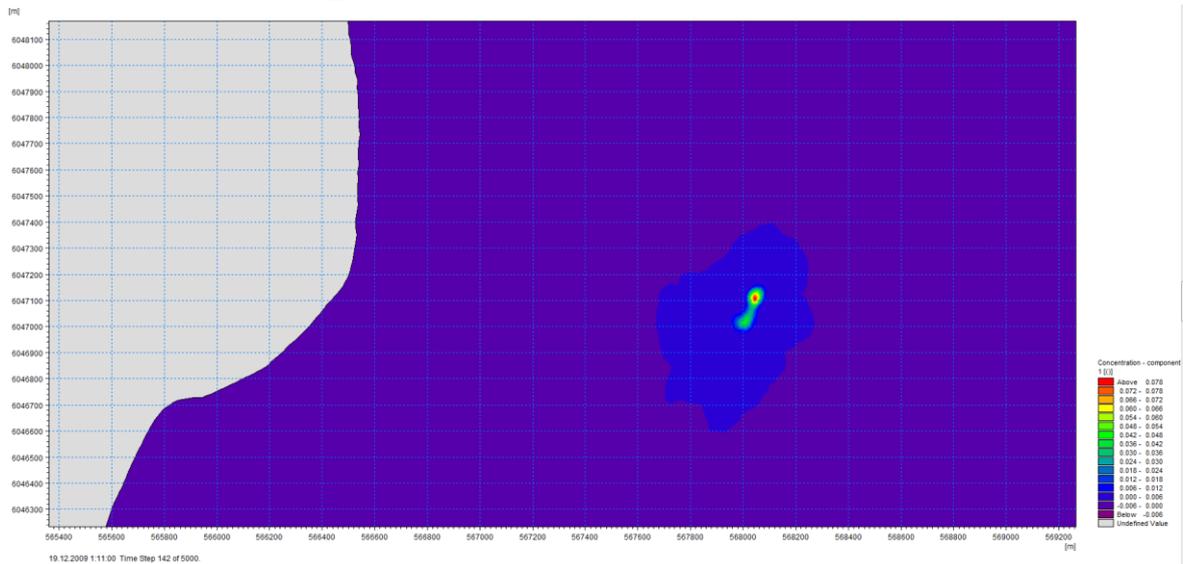
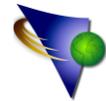


Abbildung 28: Detailansicht über die Verdriftung gelöster Nährstoffe, hier Stickstoff

6.2. Innenförde

Für die Innenförde stand der Pegel Holtenau zur Verfügung. Der gewählte Zeitraum umfasste 7 Tage mit Wasserstandsauslenkungen von +75cm bis -40cm. Buchtenstauereffekte sind hiermit enthalten.

Für eine Verifizierung der Ergebnisse stand der Pegel vom Geomar zur Verfügung. Mit diesen beiden Pegeln konnte die Qualität der hydronumerischen Modellierung bestimmt werden. Der Korrelationskoeffizient zwischen gemessenen Wasserständen und berechneten am Pegel Geomar beträgt 0,93 und die Modellierung der Wasserstände bzw. der Strömungsgeschwindigkeiten kann damit als ausreichend angesehen werden (Abbildung 29).

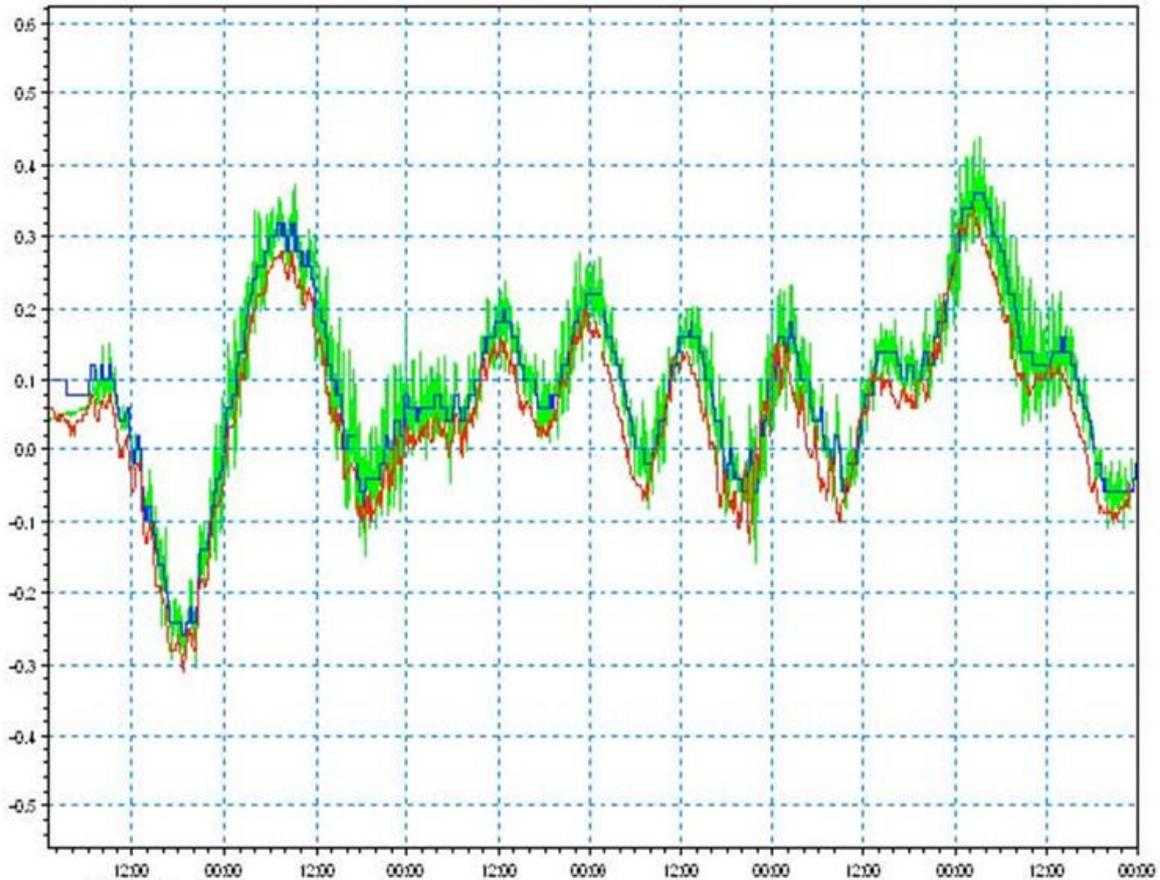
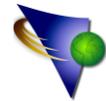


Abbildung 29: Korrelation zwischen gemessenen und modellierten Pegelständen am Pegel Geomar, Rot = Geomar, blau = Holtenau, grün MIKE21 für Geomar

6.2.1 Hydronumerisches Modell

Die Strömungsgeschwindigkeiten in der Innenförde liegen zwischen 0,05m/s und max. 0,15m/s (Abbildung 30) und sind damit etwas höher als vor Bookniseck. Im Gegensatz zu Bookniseck herrscht hier eine dominante Strömung, die am Westufer fördeinwärts und am Ostufer fördeauswärts gerichtet ist. Es muss zwischen Ein- und Ausstromlagen unterschieden werden.

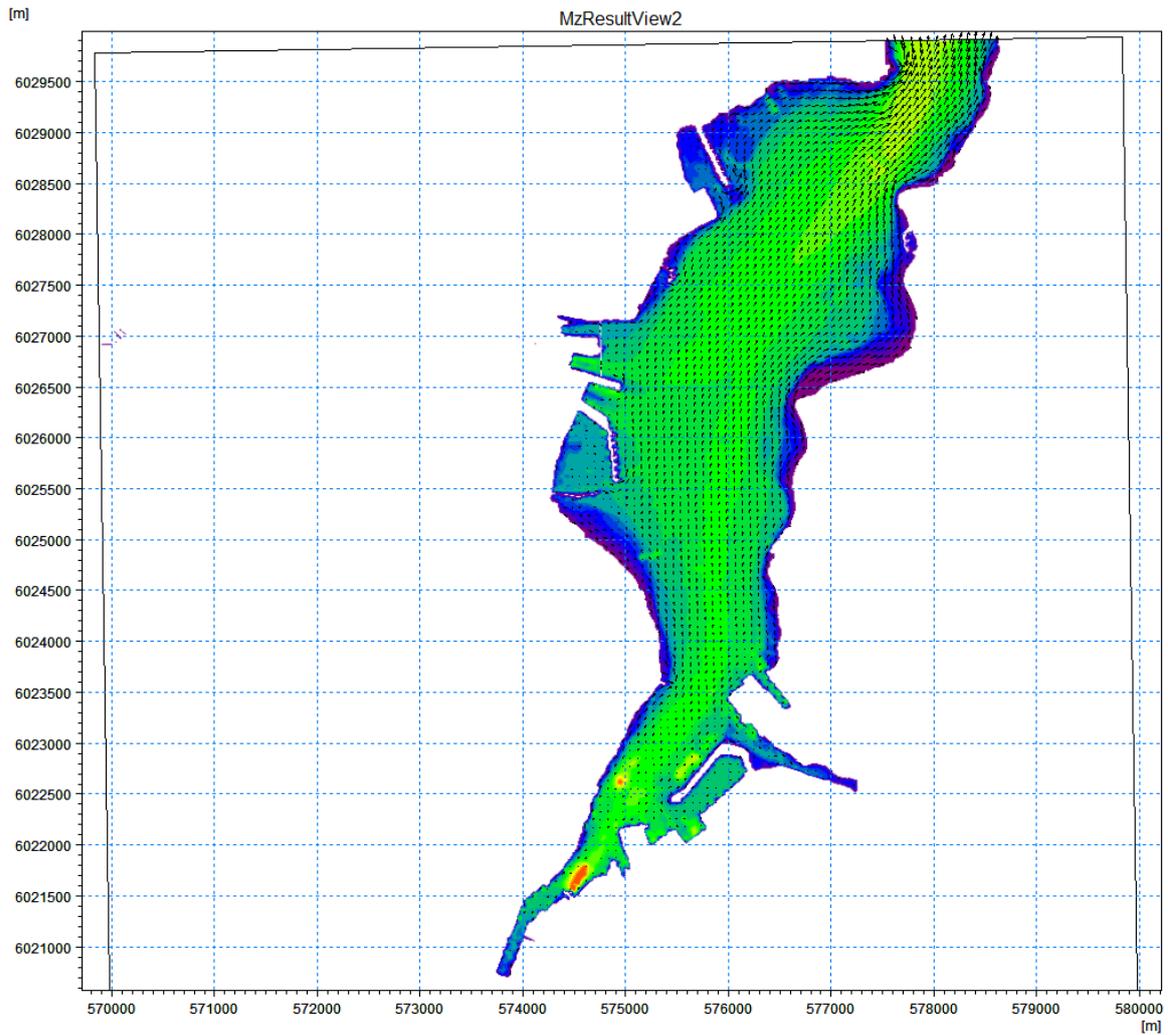
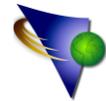


Abbildung 30: Strömungsbild Innenförde

6.2.2 Faeces Transport Modul

Trotz höherer Strömungsgeschwindigkeiten gegenüber Bookniseck werden die Faeces auch hier kaum verdriftet, da die Wassertiefe wesentlich geringer ist und damit auch die Absinkzeit. Maximal 75m um die Anlage herum können Faeces nachgewiesen werden (Abbildung 31 und 32). Ein Pendel der Faeceswolke ist nicht festzustellen.

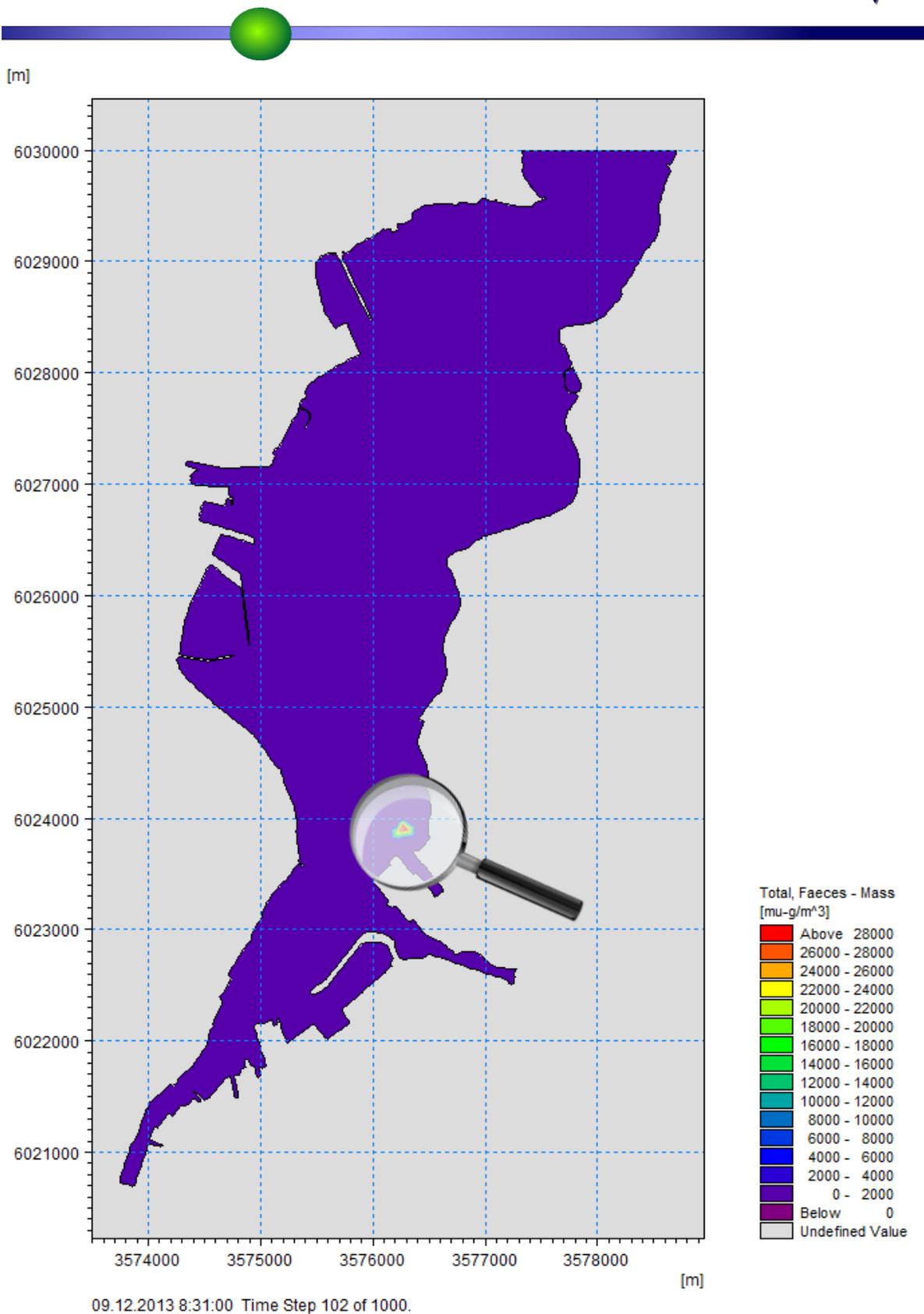
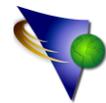


Abbildung 31: Überblick über die Verdriftung der Faeces

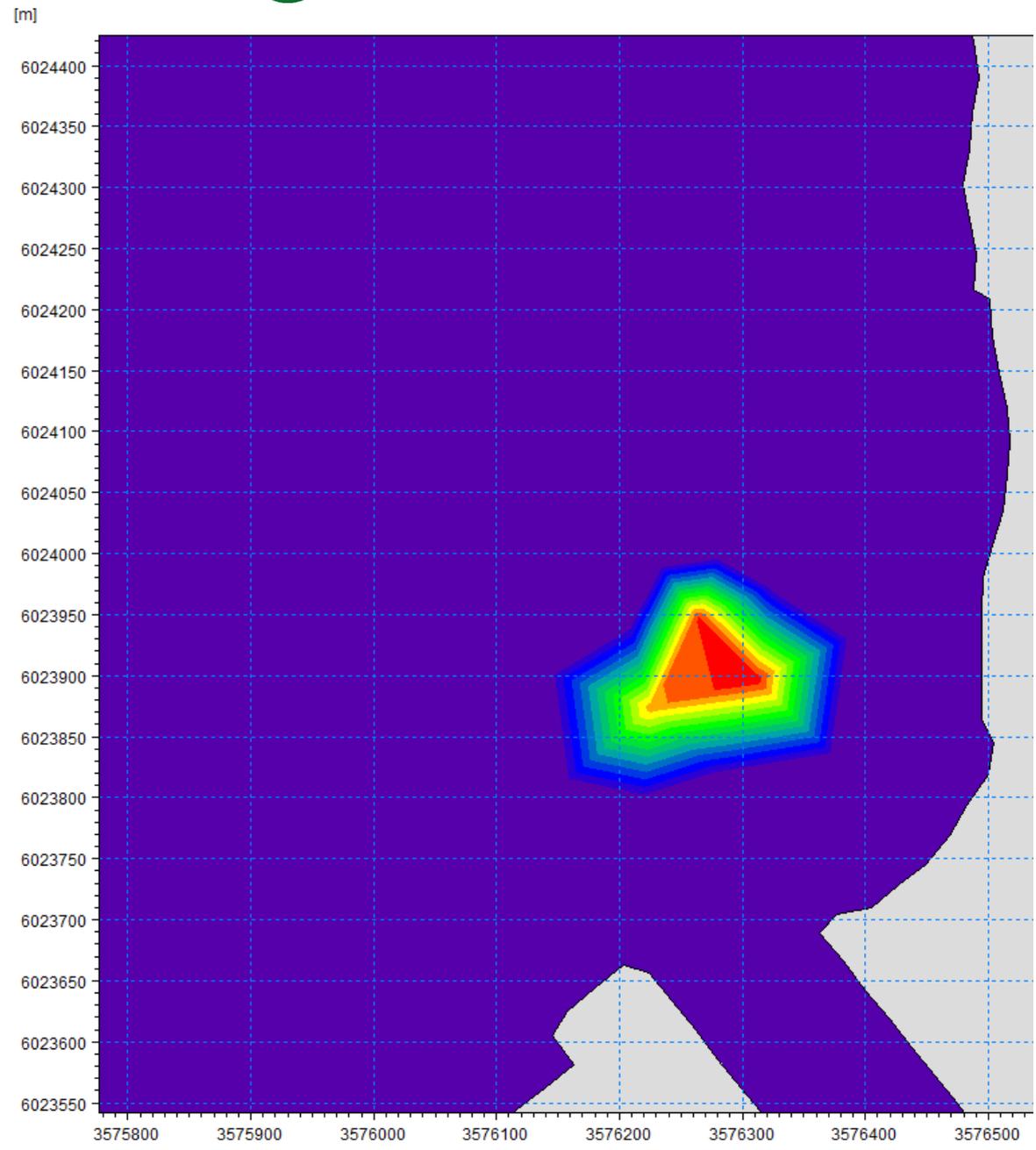
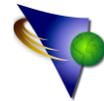
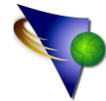


Abbildung 32: Detailansicht über die Verdriftung der Faeces



6.2.3 Advection-Dispersion Modul

Die Verdünnung der gelösten Nährstoffe Stickstoff (0,15g/s) und Phosphor (0,012g/s) erfolgt relativ rasch. Für Stickstoff liegen die Werte in 100m Entfernung unter 0,004mg/l in 150m um 0,003mg/l (Abbildung 33 und 34).

Die Phosphorwerte liegen in 100m Entfernung unter 0,0003mg/l und in 150m unter 0,00025mg/l.

Es entsteht eine nach Norden gerichtete Fahne, da die Strömungsrichtung hier dominant ist.

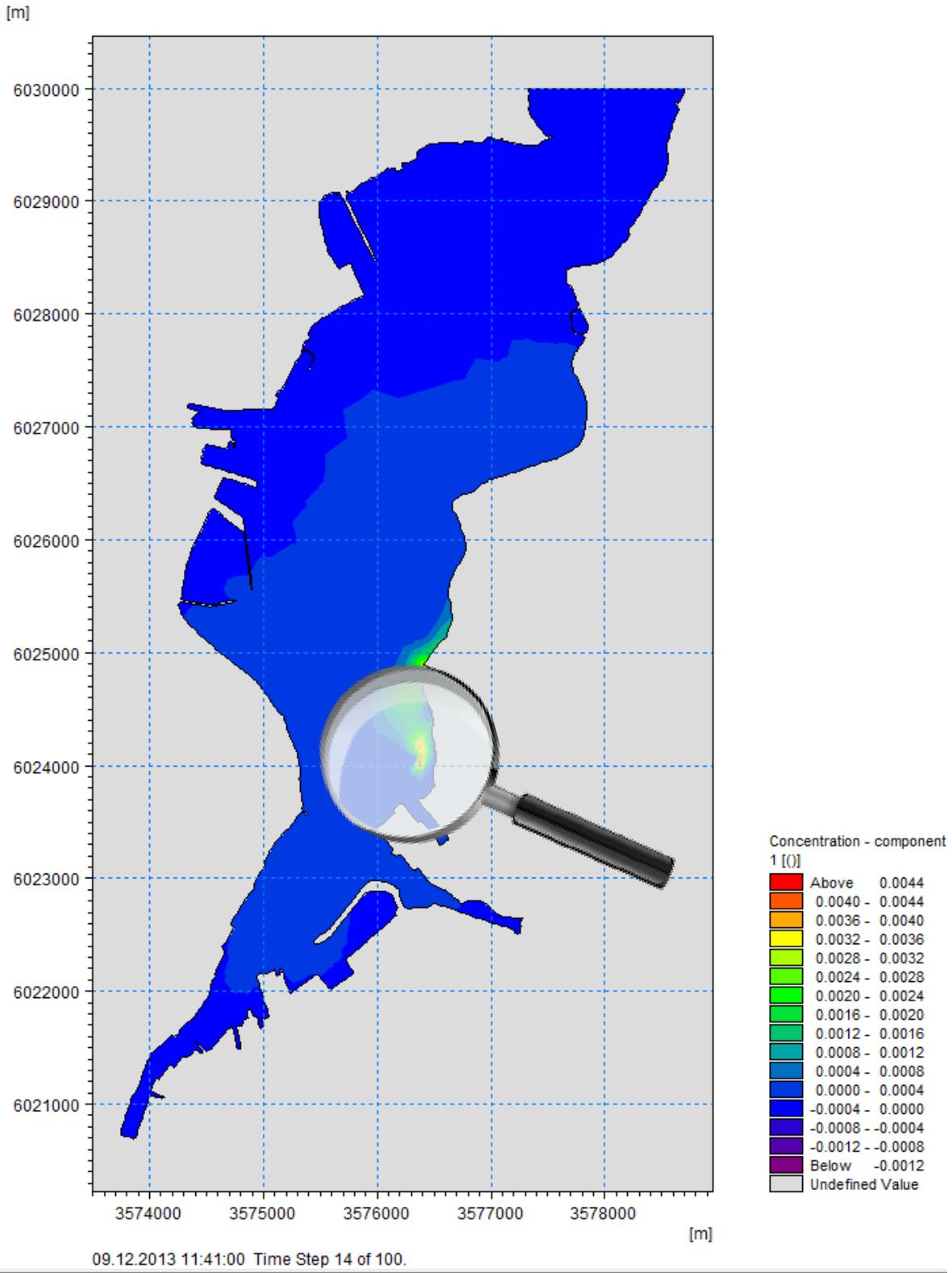
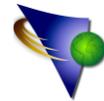


Abbildung 33: Übersicht über die Verdriftung gelöster Nährstoffe, hier Stickstoff

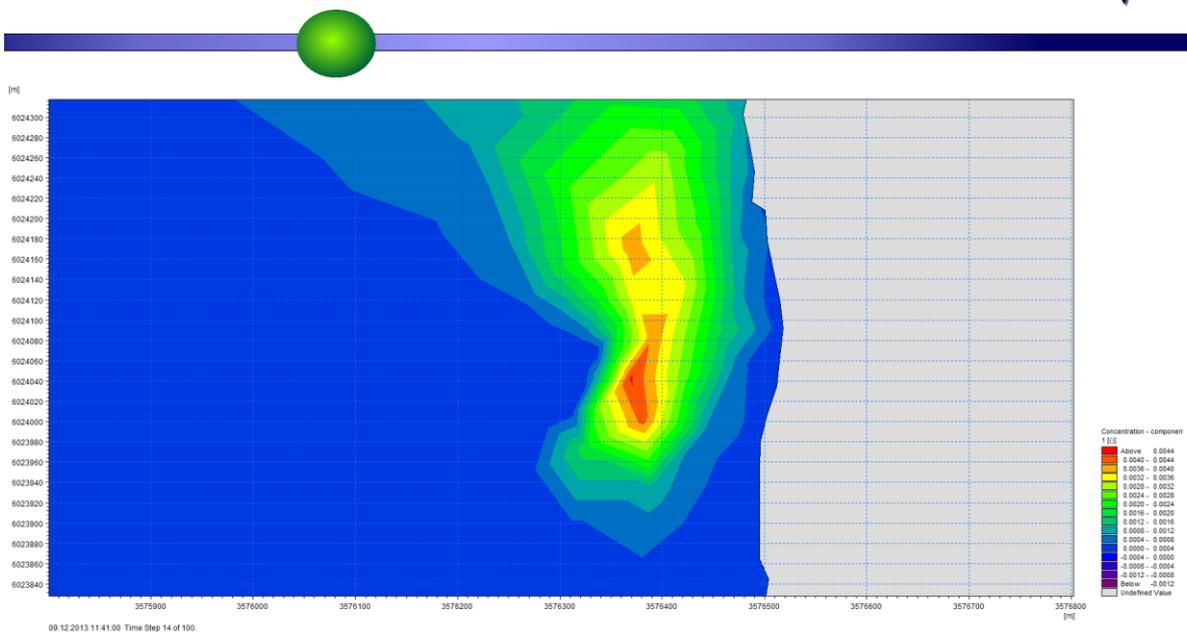
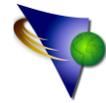
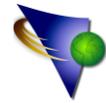


Abbildung 34: Detailansicht über die Verdriftung gelöster Nährstoffe, hier Stickstoff

7 Diskussion

Die offenen Aquaklaturanlagen führen zwangsläufig zu Nährstoffeinträgen ins Seegebiet. Wie die Untersuchungen zeigen, sind diese sehr lokal begrenzt. Dies eröffnet aber auch entsprechende Ausgleichsmaßnahmen zu konzipieren. Die Faeces verdriften aufgrund Sinkgeschwindigkeit und Strömungsgeschwindigkeit kaum. Sie sedimentieren überwiegend direkt unterhalb der Anlage oder in unmittelbarer Umgebung. Abbauprozesse mit möglichen negativen Auswirkungen sind somit sehr lokal begrenzt. Da der Hauptanteil der Faeces direkt unterhalb der Anlage sedimentiert, bietet es sich an, unterhalb der Anlage eine Auffangvorrichtung (Abbildung 35) zu installieren in der der Kot sich sammelt und abgesaugt werden kann. Bei Sauerstoffmangel kann durch die Absaugvorrichtung Luft ins System eingebracht werden. Eine Manipulation des Futters mit Zusatzstoffen, die den Kot aufschwimmen lassen, der dann an der Oberfläche abgesaugt werden kann, scheint nicht zweckführend zu sein, da Wind und Welle an der Oberfläche zu zusätzlicher Verdriftung führen kann bevor der Kot abgesaugt werden kann. Dieser schwimmende Kot kann dann relativ weit verdriftet werden.

Gelöste Nährstoffe können so nicht gebunden und dem System entzogen werden. Algen binden jedoch die gelösten Nährstoffe direkt und Muscheln indirekt über die Aufnahme von Schwebstoffen aus der Wassersäule. Es wäre daher sinnvoll, Algenkulturen möglichst nahe oder direkt innerhalb der Aquakulturfarm aufzubauen. Abbildung 36 zeigt eine Möglichkeit der Anordnung von Algenkulturen. Da die einzelnen Netzgehege zugänglich sein müssen, muss ein Bewirtschaftungskorridor freigehalten werden. Es sollte aber ausreichend sein, wenn jedes Netzgehege nur von einer Seite zugänglich ist. Es



ständen dann für Algenkulturen ca. 84.000m² Fläche innerhalb der gesamten Anlage zur Verfügung. Für die Bindung von Stickstoff nur durch Algen werden 32ha benötigt (s. Kap. 2). 25% können somit in der Aquakultur Farm gebunden und entnommen werden. Es verbleiben ca. 75% (ca. 24.200kg) die die Anlage verlassen und durch Muscheln gebunden werden müssen. Hierfür werden ca. 15ha Muschelkultur benötigt.

Für die Fixierung von Phosphor nur durch Algen werden 14ha benötigt. 43% (1.075kg) verlassen die Aquakultur und müssen durch Muscheln aufgenommen werden. Hierfür werden ca. 15ha Muschelkultur benötigt. Die Ausgleichsfläche hätte somit eine Ausdehnung von 500m x 300m.

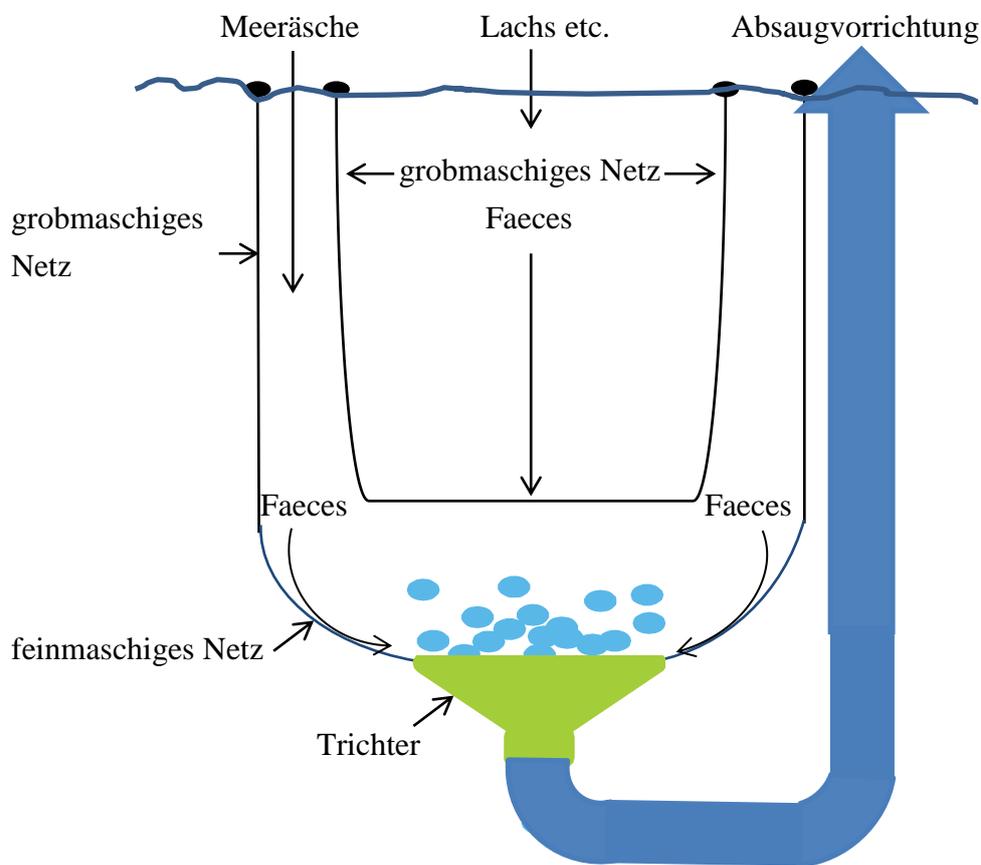


Abbildung 35: Schema einer multitrophen Aquakulturanlage mit Absaugvorrichtung

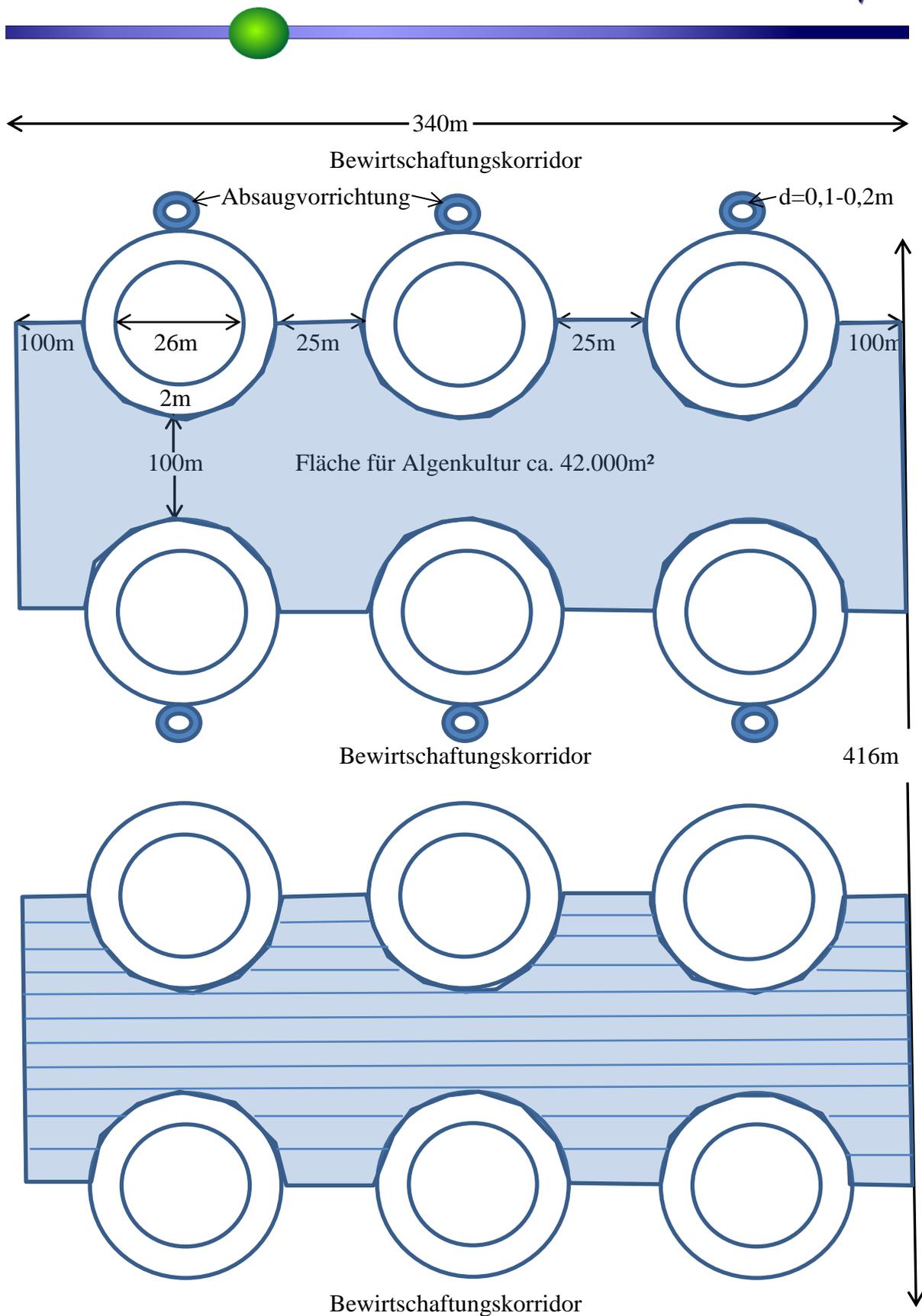
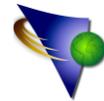
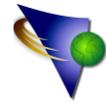


Abbildung 36: Multitrophe Aquakultur mit integrierter Algenangleinenkultur



8 Weiteres Vorgehen

Eine multitrophe Forschungsaquakulturanlage sollte eingerichtet werden, um noch viele offene Fragen klären zu können. Hierzu gehören nicht nur wissenschaftliche Fragestellungen sondern auch das Erproben von Technologien. Es bietet sich ein PPP-Projekt an, da durch die Fischernte sowie die Ernte der Begleitkulturen Erlöse erzielt werden können. Im ersten Schritt sollte eine kleine 600T Anlage mit 6 Netzkäfigen erprobt werden. Mit den Erfahrungen aus dieser Anlage kann eine zweite Einheit gleichen Maßstabs mit optimierter Technologie installiert werden.

Im Folgenden werden einige Forschungsfragen angesprochen:

I. Kompensationszüchtungen zu Nährstoffretention

Es wird vorgeschlagen, zwei natürlich vorkommende Arten zur Nährstoff-Retentionszüchtung zu nutzen. Dies sind Miesmuscheln und Braunalgen. Die Arten lassen sich kommerziell weiter verwerten, so dass sich ein Doppeleffekt durch die Produktion ergibt.

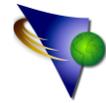
Ia Miesmuschel in Hängekulturen

Hängekulturen (Langleinenkulturen) stellen das Gros der Muschelproduktion in der EU, was auf den großen Anteil der spanischen Produktion innerhalb der EU zurückgeht (ca. 250.000 Tonnen/Jahr von den insgesamt in Europa erzeugten ca. 550.000 Tonnen/Jahr, die fast ausschließlich hängend an Flößen durchgeführt wird). Der höhere Arbeitsaufwand gegenüber Bodenkulturen wird im Falle des menschlichen Konsums durch schnelleres Wachstum und geringeren Sandanteil kompensiert. Miesmuscheln können mit und ohne Larven in Netzstrümpfen kultiviert werden. Hier müssen Aufwand und Ertrag je Hektar ermittelt werden.

Neben gut verfügbaren pflanzlichen Proteinträgern stellen Muscheln eine alternative Proteinquelle tierischer Herkunft dar. Sie zeichnen sich durch eine hohe biologische Wertigkeit sowie einen hohen Anteil an wertvollen, ungesättigten Fettsäuren aus. Diese hochwertigen Fettsäuren können bei Verwendung pflanzlich basierter Futtermittel für die Lipidversorgung der Lachsforelle genutzt werden. Weiterhin können die Muschelschalen als zusätzliche Mineralstoffquelle in alternativen Futtermitteln Verwendung finden. Dieses erscheint insbesondere bei Ostseemuscheln mit geringer Schalendicke denkbar.

Ib Algenfarming

In der Ostsee wird derzeit überwiegend die Braunalge *Saccharina latissima* kultiviert, die gute Erträge erzielt. Zuckertang kommt natürlich im Nordatlantik vor, in der Ostsee etwa



bis Rügen bzw. Bornholm; weiter östlich wird der Salzgehalt zu niedrig. Die Alge gedeiht auf geeigneten Substraten (Seilen, Netzen) in Nord- und Ostsee in Tiefen bis ca. 15 m (abhängig von der Transparenz des Meerwassers). Sie verträgt in der Nordsee Wassertemperaturen bis 21°, in der westlichen Ostsee bis ca. 17°. Zuckertang wird in der Kieler Förde, vor Sylt und in dänischen Gewässern kultiviert, in Frankreich und Norwegen aus Wildbeständen geerntet.

Die Züchtungsverfahren sollten im Bereich des vorgesehenen Produktionsstandorts vergleichend durchgeführt werden. Durch Kontrolle der Erntemenge und durch Analyse der geernteten Organismen werden die aus dem Meer extrahierten Nährstoffe (Stickstoff und Phosphor) ermittelt.

Daraus werden die Flächeneffizienz der Nährstoffretention, sowie nach einer Kosten/Nutzen - Analyse, die wirtschaftlich praktikabelste Methode der Nährstoffretention ermittelt.

Auch einheimische Makroalgen wie der Zuckertang (*Saccharina latissima*) könnten als ergänzende Protein- und Lipidquelle in die Futterformulierung für die Ernährung von Regenbogenforellen eingebracht werden und finden darüber hinaus Absatz in Produkten des Lebensmittelsektors und der Kosmetik.

Gerade bei Verwendung hoher Anteile terrestrischen Pflanzenproteins im Futtermittel ist eine reduzierte Futteraufnahme sowie eine verringerte Verdaulichkeit häufig die Folge, was oftmals Einbußen in der Wachstumsleistung der Fische mit sich bringt. Erste Untersuchungen zum Futteraufnahmeverhalten von Fischen zeigten, dass die Akzeptanz dieser Futtermittel unter Beimischung von Extrakten aus natürlichen Nährorganismen (Muscheln, Algen) als Appetenz-Trigger deutlich zu steigern ist.

II. Die Erkundung der Fischart *Chelon labrosus* (Dicklippige Meeräsche) als umweltvorteilhafter Kandidat für die marine Aquakultur

Alle derzeit kultivierten marinen Fischarten sind Prädatoren, die einen hohen Bedarf an mehrfach ungesättigten Fettsäuren (DHA, EPA) haben und als Top-Prädatoren am Ende der Nahrungskette stehen. Eine Möglichkeit der Nahrungskettenverkürzung kann darin bestehen, anstatt räuberischer Fische in der Aquakultur Vegetarier zu halten, die wiederum die kurze Nahrungskette nutzen. Tatsächlich sind allerdings alle bei uns bisher kultivierten marinen Fischarten Räuber (Steinbutt, Wolfsbarsch, Dorade, Lachs, Regenbogenforelle).

Die Dicklippige Meeräsche, *Chelon labrosus*, ist eine der wenigen, nicht obligatorisch, räuberischen wohlschmeckenden marinen Fischarten. Sie ernähren sich von benthischen Diatomeen, epiphytischen Algen und kleinen Invertebraten. Sie kommt ursprünglich aus der Mittelmeerregion, ist in den vergangenen Jahren in Nord- und Ostsee heimisch geworden. Die Meeräsche hat saftiges Fleisch mit wenigen Gräten und lässt sich



auf vielfältige Weise zubereiten. Sie ist damit ein extrem interessanter Kandidat für eine nachhaltige Fischproduktion, zu deren Kultivierung allerdings noch ganz erhebliche Grundlagenarbeit geleistet werden muss.

Während eine verwandte Art – *Mugil cephalus* – im Mittelmeer bereits vereinzelt schon kultiviert wird (allerdings auf der Basis von wild gefangenen Jungfischen), steht die Kultur von *Chelon labrosus* noch ganz am Anfang. Offene Fragen sind (u.a.):

Ia Die Reproduktion

Khemis et al. (2006) stellen dar, dass die Larvenaufzucht von *Chelon labrosus* unter Kulturbedingungen prinzipiell möglich ist.

Ib Eine geeignete Fütterungsstrategie

Ic Die Futterzusammensetzung

Als herbivore bzw. omnivore Art benötigt *Chelon labrosus* einen höheren Anteil an Algen in der Futtermischung. Hier sind grundlegende Untersuchungen notwendig

Iid Die Kultivierung in Netzgehegen

Es muss erkundet werden, in wieweit sich die Tiere zur Hälterung in Netzgehegen eignen, in welcher Dichte, in welcher Wassertiefe etc. sowie ob sie für multitrophe Anlagen einsetzbar sind.

Iie Die Temperaturempfindlichkeit

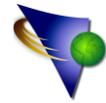
Problematisch könnten ggf. kalte Wintertemperaturen sein. In der Natur zieht sich die Meeräsche bei kälteren Temperaturen in tiefere Wasserschichten zurück; ggf. bieten sich Farmstandorte in der Nähe von Kühlwasserauslässen an.

Besonderes Augenmerk sollte hierbei auf die Nutzung von Futterresten und Forellen-Faeces, sowie auf das Säubern der Netze von Algenbewuchs durch die Meeräschen gelegt werden. Untersuchungen zur Futteraufnahme und -verwertung, Wachstum und Produktqualität bei unterschiedlicher Nahrung (Kot, Futterreste, Algen) sowie toxikologische Studien sind hierzu denkbar.

III. Produktions-Optimierung

IIIa Futter

Nährstoffemissionen in der Netzkäfig-Aquakultur sind im Wesentlichen auf ungenutzte Futterreste sowie auf den anfallenden Fischkot und gelöste Stoffwechselendprodukte zurückzuführen.



Um die Menge nicht genutzter Futterreste weiterhin zu minimieren, sollten unterschiedliche Fütterungsstrategien getestet und ein optimales Fütterungsregime in Bezug auf Futtermenge, Fütterungszeitraum (Dauer, Häufigkeit, Tageszeiten, Entropie? etc.) und Verabreichungsform entwickelt werden.

Weiterhin sollte anhand von Fütterungsexperimenten die Futtermittelzusammensetzung in Bezug auf Verdaulichkeit und Verwertbarkeit des Futters optimiert werden. Durch Erreichen einer optimalen Futteraufnahme und Futtermittelverwertung lässt sich folglich die Nährstoffemission deutlich minimieren.

IIIb Exkrement (Faeces)

Durch eine Optimierung der Futtermittelzusammensetzung sollen Eigenschaften und Konsistenz des Kots beeinflusst werden, um diesen besser mechanisch entfernen oder aber für Detritus-Fresser besser nutzbar machen zu können.

Durch Zusatzstoffe könnte der Kot schwerer werden und nach unten schneller absinken, ohne vorher in Lösung zu gehen und dort abgesaugt werden. Sollte einmal Sauerstoffmangel auftreten, könnte über die Absauganlage Luft von unten in die Gehege eingeblasen werden. Hier gilt es Zusatzstoffe und eine geeignete Absaugtechnologie zu entwickeln, sowie das Netzdesign (Maschenweite, Material etc.) zu optimieren.

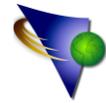
Mittels Beimischung spezieller Zusatzstoffe im Futter könnte der Kot zudem an Festigkeit gewinnen, was die Löslichkeit im Wasser stark reduziert und ihn somit besser mechanisch (z. B. mittels Netztrichter) entfernbar, oder aber länger als potentielle Nahrung für sekundär kultivierte Organismen (Meeräsche, Seeringelwürmer, evtl. heimische Garnelen) verfügbar macht.

Potentielle Futter-Zusatzstoffe (z. B. Kohle) sollten diesbezüglich experimentell in speziellen Futtermittelsversuchen getestet und eine optimierte Futtermittelzusammensetzung formuliert werden. Des Weiteren sollte die Verwertbarkeit des in Bezug auf Festigkeit optimierten Kots durch potentiell geeignete Sekundär-Organismen evaluiert werden.

9 Literatur

AHRENDT, K. (2012) : Machbarkeitsstudie mit Feldforschung zur Lachsforellenzucht in einer multi-trophischen Null-Emissions-Anlage (unveröf.)

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2012) : The state of world fisheries and aqua culture 2012



GREN, I. M.; LINDAHL, O. & M. LINDQUIST (2009) : Values of mussel farming for combating eutrophication: An application to the Baltic Sea, *Ecological Engineering*, 35, 935-945, Elsevier

OLSEN, L. M.; HOLMER, M. & Y. OLSEN (2008) : Perspective of nutrient emission from fish aquaculture in coastal waters – literature review with evaluated state of knowledge, FHF project no. 542014

REID, G. K.; LIUTKUS, M.; ROBINSON, S. M. C.; CHOPIN, T. R.; BLAIR, T.; LANDNER, T.; MULLEN, J. & F. PAGE (2008) : A review of the biophysical properties of salmonid faeces: implications for aquaculture waste dispersal models and integrated multi-trophic aquaculture, *Aquaculture Research*, 1-17, Blackwell

SKJERMO, S.; AASEN, I. M.; ARFF, J.; BROCH, O. J.; CARVAJAL, A.; CHRISTI, H.; FORBORD, S.; OLSEN, Y.; REITAN, K. I.; RUSTAD, T.; SANDQUIST, J.; SOLBAKKEN, R.; STEINHOVDEN, K. B.; WITTEGENS, B.; WOLFF, R. & A. HANDA (2014) : A new Norwegian bioeconomy based on cultivation and processing of seaweeds: Opportunities and R&D needs, SINTEF A25981, Trondheim