

Analyse von Treibseldünen zu Küstenschutzzwecken

Masterarbeit

im Ein-Fach Masterstudiengang

Umweltgeographie und -management

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen-Fakultät

der Christian Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Birger Machnicki

Erstgutachter: Prof. Dr. rer. nat. Horst Sterr

Zweitgutachter: Prof. Dr. rer. nat. Wilfried Hoppe

Kiel, März 2018

Zusammenfassung

Treibsel wird in großen Mengen an den Stränden der deutschen Ostseeküste angespült. Eine effektive Nutzungsmöglichkeit wäre die lokale Verwertung als Unterbau von künstlich angelegten Dünen zum Schutz gegen Hochwassersituationen. Durch die im Treibsel enthaltenen Nährstoffe können Pflanzen schnell die Oberfläche bewachsen und die Düne vor äolischer Erosion bewahren. Diese Arbeit vergleicht vier zeitlich unterschiedlich angelegte Treibseldünen in Schleswig-Holstein und zeigt mithilfe einer Kohlenstoff-Stickstoff-Analyse, dass das biologische Material innerhalb der Düne über einen Zeitraum von zehn bis fünfzehn Jahren aerob vollständig verwittert. Phosphatspuren unterhalb von jüngeren Treibselaufschüttungen weisen auf anschließende Versickerungsprozesse hin. Das Ergebnis einer mikroskopischen Untersuchung von vorgefundenem, zweifarbigem Treibsel lässt darauf schließen, dass das Material zeitlich nicht homogen zersetzt wird.

Abstract

Wreck is washed up in very large quantities on beaches of the German Baltic coast. An effective potential use would be the local application as substructure of artificial raised dunes for protection against flood events. The vegetation of the surface is promoted by the nutrient-rich wreck. Those plants preserve the dune of eolian erosion. This work compares four different aged wreck-based dunes in Schleswig-Holstein, Germany, and exhibits with the aid of a carbon-nitrogen-analysis that the biological material decompose aerobic over a period of ten to fifteen years. Traces of phosphate beneath younger wreck-based dunes points to subsequent percolation processes. The result of a microscopic investigation of encountered two-colored wreck reveals non-homogeneous temporal decomposition.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	.	.	.	.	.	.	1
2.	Untersuchungsgebiete	.	.	.	.	.	.	6
2.1	Weidefeld	.	.	.	.	.	.	6
2.2	Eckernförde	.	.	.	.	.	.	9
2.3	Priwall	.	.	.	.	.	.	10
2.4	Fehmarn	.	.	.	.	.	.	12
2.5	Vergleichsproben	.	.	.	.	.	.	12
3.	Methodik	.	.	.	.	.	.	13
4.	Ergebnisse	.	.	.	.	.	.	17
4.1	Visuelle Erkenntnisse bei Probennahme	.	.	.	.	.	.	17
4.2	Laborergebnisse	.	.	.	.	.	.	19
4.3	Mikroskopieergebnisse	.	.	.	.	.	.	26
5.	Fehleranalyse	.	.	.	.	.	.	28
6.	Diskussion	.	.	.	.	.	.	29
6.1	Nährstoffuntersuchungen	.	.	.	.	.	.	29
6.2	Vegetation und Küstenschutz	.	.	.	.	.	.	34
6.2	Analyse der Mikroskopieergebnisse	.	.	.	.	.	.	36
7.	Fazit und Ausblick	.	.	.	.	.	.	38
8.	Literaturverzeichnis	.	.	.	.	.	.	41

Bild- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Verteilung Windrichtung an Untersuchungsorten (WindFinder.com 2018; Google 2018), eigene Darstellung	5
Abbildung 2: Küstenlinie Weidefelder Strand (AHRENDT 2010, eigene Aufnahme 2017)	8
Abbildung 3: Priwall (eigene Aufnahme 2017)	11
Abbildung 4: Quereinsicht Eckernförder Treibseldüne (eigene Aufnahme 2017)	18
Abbildung 5: Zweifarbiges Treibsel (eigene Aufnahme 2017)	19
Abbildung 6: Fisches <i>Zostera marina</i> (eigene Aufnahme, 2017)	26
Abbildung 7: Epidermis bernsteinfarbenen Treibselns (eigene Aufnahme 2017)	26
Abbildung 8: Struktur auf Epidermis (eigene Aufnahme 2017)	27
Abbildung 9: Nicht zellgebundener Fleck (eigene Aufnahme 2017)	27
Abbildung 10: Schwarzes Treibselstück (eigene Aufnahme 2017)	28
Abbildung 11: Graphische Darstellung Gewichtsverluste nach Muffelprozess (eigene Darstellung)	30
Tabelle 1: Probenübersicht (eigene Darstellung)	14
Tabelle 2: Gewichtsverluste nach Muffelprozess (Teil 1, eigene Darstellung)	21
Tabelle 3: Gewichtsverluste nach Muffelprozess (Teil 2, eigene Darstellung)	22
Tabelle 4: Korngrößenverteilung (eigene Darstellung)	24
Tabelle 5: Ergebnisse C/N-Analyse (eigene Darstellung)	25

1. Einleitung

Das POSIMA-Projekt („Pilotregion Ostseeküste: Initiierung einer Wertschöpfungskette für Treibsel und Seegras als Maßnahme zur Anpassung an den Klimawandel“) wurde etabliert um naturbasierte Klimaanpassung zu fördern und dabei auch den Küstenschutz an Schleswig-Holsteins Ostseeküste zu unterstützen. Der Fokus liegt auf der Verwertung von angeschwemmten Treibsel an den Stränden und der Stärkung der Interaktionen von dabei beteiligten Akteuren.

Unter dem Begriff Treibsel werden zumeist organische Materialien, wie vom Wasser abgerissene Pflanzenteile, manchmal aber auch anthropogen eingetragene Gegenstände, wie Müll oder Wrackteile, zusammengefasst, die im Meer treiben und dann an den Küsten angeschwemmt werden (POSIMA 2017, Nationalpark Wattenmeer 2010). Im Englischen werden mit dem Ausdruck „wrack“ ausschließlich angeschwemmte Meerespflanzen bezeichnet (Merriam-Webster 2017; M. P. Rogers & Associates PL 2016, nach: KIRMAN & KENDRICK 1997). Diese machen nach Aussage von Dipl.-Biologin Nardine Stybel vom EUCC-D an deutschen Küsten rund 95 % des Treibsel aus (SVZ 2016). An der deutschen Ostseeküste ist der Anteil von nicht oder nur langsam biologisch abbaubaren Produkten relativ zur Nordseeküste nochmals geringer (POSIMA 2017). Diese Arbeit wird sich im Folgenden auf die Küstenlinie der Ostsee beziehen und den Begriff Treibsel verwenden, ohne jedoch damit nicht-pflanzliche Bestandteile einzuschließen.

Je nach Standort an der deutschen Ostseeküste besteht das Treibsel hauptsächlich aus Gewöhnlichem Seegras (*Zostera marina*) und teilweise auch aus Zwerg-Seegras (*Zostera noltei*), sowie verschiedenen Braunalgenarten, wie zum Beispiel Blasentang (*Fucus vesiculosus*) oder Sätentang (*Fucus serratus*) (POSIMA 2017, MariLim 2017). Aber auch Rotalgenarten (*Rhodophyceae*) lassen sich auffinden (MariLim 2017, MOSSBAUER et al. 2012), die im Sommer zusammen mit Grünalgen (*Chlorobionta*) an bestimmten Standorten im angespülten Material sogar überwiegen. Im Winter macht *Zostera marina* hingegen an einigen Stellen beinahe 99 % der Biomasse aus (HAMMANN/ ZIMMER 2014).

Die deutsche Ostseeküste hat eine Länge von 724 km (KLIEWE/ SCHWARZER 2002). Etwa 310 km davon sind als Badebereiche ausgeschrieben (MOSSBAUER et al. 2012, nach: LasD S-H, und: LAGuS M-V). Für Touristen ist der Strand eines der Hauptargumente, ihren Urlaub an der deutschen Ostseeküste zu verbringen (MOSSBAUER et al. 2012, nach: KESSLER 2008). Mehr als 33 Millionen Übernachtungen wurden dort beispielsweise im Jahr 2012 gezählt (EUCC-D 2013). Die Tourismusbranche ist somit ein wichtiges wirtschaftliches Standbein für die Region. Viele Strandbesucher erwarten jedoch das Bild eines reinen Sandstrandes und empfinden die Treibselablagerungen an der Wasserkante visuell als störend (SVZ 2016, SHZ 2016, DONGES et al. 2013) und auch als geruchsbelästigend. Reines Seegras ist beim Zersetzungsprozess allerdings geruchsneutral. Wahrgenommen wird immer die Zersetzung von dazwischen liegenden Algen und tierischen Bestandteilen, wie zum Beispiel Muschelresten (POSIMA 2017). Die meisten Strandbetreiber lassen das gesamte angeschwemmte Treibsel deswegen mit großen Maschinen entfernen, die das Material aufsaugen und/ oder den Strand rechen. Der Kreis Eckernförde muss für Abtransport und Kompostierung der jährlich ungefähr 1.300 Tonnen Seegras rund 80.000 € aufwenden (SVZ 2016). Je nach dem, wie viel Material angespült wird, steigen bzw. sinken die aufzuwendenden Kosten. Auch die geographische Lage spielt bei der Akkumulation eine Rolle. So fallen in Travemünde über 150.000 € zwischen Mai und September für die Treibsel-Strandreinigung an. In Binz auf Rügen belaufen sich die Entsorgungskosten pro Saison auf durchschnittlich 50.000€ bis 70.000 €, in Heiligenhafen auf 30.000 € (OZ 2017, KN-Online 2016). Besonders im Spätsommer und Herbst wird viel Treibsel an den Küsten angeschwemmt. Hochgerechnet auf die gesamte deutsche Ostseeküste fallen jährlich etwa 4.900 Tonnen Biotrockenmasse an (MOSSBAUER et al. 2012).

Juristisch gesehen ist an den Strand angespültes Treibsel zunächst nicht entsorgungspflichtig. Wird es dennoch abgetragen, besteht nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz eine Verwertungspflicht, sollte diese technisch, wirtschaftlich und mit Bedacht auf soziale Aspekte möglich sein. Ansonsten ist es als Abfall zu entsorgen. Eine Deponierung ist unzulässig (SVZ 2016, Umweltbundesamt 2016; nach: KrWG 2012). Es gibt jedoch Unterschiede in der weiteren Gesetzgebung der Bundesländer. Im Gegensatz zu Mecklenburg-Vorpommern darf in Schleswig-Holstein der

aus dem Treibsel herausgefilterte Sand beispielsweise wieder an den Stränden ausgebracht werden (EUCC-D 2016).

Aus ökologischer Sicht ist ein Liegenlassen des Treibsel an Ort und Stelle die sinnvollste Lösung. Es ist Habitat für Mikroben, Herbivoren oder Saprobionten, die wiederum eine Nahrungsquelle für Vögel und andere Tiere sind (POSIMA 2017, LEVY et al. 2014, HARRIS/ STRAYER 2011). Einige Lebewesen können sogar nur in älterem, nicht weggeräumten Treibsel gefunden werden (DEIDUN et al. 2009). Treibsel stellt überdies einen natürlichen Schutz gegen äolische Stranderosion dar, indem es durch seine raue Oberfläche als Flugsandfänger fungiert (HOOTON et al. 2016, DUGAN/ HUBBARD 2010) und so zur Entstehung von Strandwällen beiträgt (NORDSTROM et al. 2011, HEMMINGA/ NIEUWENHUIZE 1990). Wird das Treibsel vom Strand entfernt, entfällt nicht nur dieser natürliche Schutz: Der Reinigungsprozess fördert durch das Rechen und das Aufsaugen der Biomasse sogar die Stranderosion, da bis zu 90 % einer Gewichtseinheit abgetragenen Treibsel aus Sand besteht (MOSSBAUER et al. 2012). Auch das Befahren des Strandes mit schweren Maschinen kann dem Küstenökosystem schaden (City of Holdfast Bay 2012).

Die Treibselkomponente Seegrass ist eine wertvolle natürliche Ressource und kann vielseitig eingesetzt werden. Da es sehr resistent gegen Ungeziefer und Schimmel ist und außerdem nur schwer entflammbar, eignet es sich gut als Dämmmaterial und zum Dachdecken (POSIMA 2017, SVZ 2016). Dennoch hat sich ein Vorhaben in Nordwestmecklenburg, Treibsel zu biologischem Dämmstoff und zu Katzenstreu zu verarbeiten, als nicht rentabel genug erwiesen und ist eingestellt worden (SVZ 2016). Weitere mögliche Verwendungszwecke für Treibsel sind unter anderem der Einsatz als Düngemittel in der Landwirtschaft (MICHALAK et al. 2016, ILLERA-VIVES et al. 2016, ILLERA-VIVES et al. 2013, KHAN et al. 2009) oder als Rohstoffbasis für medizinisch-kosmetische Produkte (POSIMA 2017). Es muss jedoch bedacht werden, dass es vor einer Weiterverwertung erst aufwendig von Sand und/ oder anderen Substanzen befreit werden muss. Diese Aufarbeitung ist kostenintensiv und ohne eine konstante Nachfrage kann das Endprodukt nicht gewinnbringend vermarktet werden (OZ 2018). Eine endgültige Lösung für den Verbleib von Treibsel nach einer Strandreinigung ist noch nicht gefunden, da weiterhin eine unzureichende Verwertungsnachfrage besteht (POSIMA 2017).

Genau an dieser Stelle setzt das POSIMA-Projekt an, in dessen Rahmen 2012 in Eckernförde das Pilotprojekt „Treibseldüne“ gestartet worden ist. Am landwärtigen Strandende ist das angeschwemmte Seegras zusammengetragen und mit Sand aufgeschüttet worden. Diese künstliche Düne wurde anschließend zur Befestigung mit Strandroggen (*Leymus arenarius*) und -hafer bepflanzt (SVZ 2016; ZIEGLER, pers. Mitteilung, 2016). Testweise wurden zwei verschiedene Strandhaferarten gepflanzt: Gewöhnlicher Strandhafer (*Ammophila arenaria*) und Baltischer Strandhafer (*X Calammophila baltica*) (ZIEGLER, pers. Mitteilung, 2016).

Der Bau von Treibseldünen kann als eine sogenannte „Win-Win-Situation“ angesehen werden. Zum Einen kann das aus touristischer Sicht unbeliebte Seegras kostengünstig und vor Ort einem Verwendungszweck zugeführt werden. Zum Anderen stellt diese entstehende Küstenschutzmaßnahme eine adäquate Vorkehrung gegen Hochwasser dar; sei es nun durch zukünftige Auswirkungen des Klimawandels auf den Meeresspiegel oder durch bereits gegenwärtig temporär auftretende Sturmfluten.

Sturmfluten in der Ostsee sind im Gegensatz zu den meisten Seegewässern nicht mitunter von Tiden, sondern allein vom Wind abhängig. Da die deutsche Ostseeküste sich in der Westwindzone befindet, weisen die Strände zu einer Vielzahl des Jahres ablandigen Wind auf (siehe Abbildung 1).

Wenn nun an manchen Tagen bei nachlassendem Wind die verdrängten Wassermassen zurückschwingen („Badewanneneffekt“) und zudem lang anhaltender, starker Nordost- bis Ostwind einsetzt und das Wasser in Richtung Kieler, Mecklenburger und Pommerscher Bucht drückt, droht durch diesen Windstau eine Sturmflut (MARKAU 2003, nach: Ausschuss für Küstenschutzwerke 1993). Diese fällt aber bei Weitem nicht so hoch aus wie vergleichbare Ereignisse an der Nordseeküste, wo der Tidenhub einen erheblich größeren Faktor darstellt.

Bisher wurde die oben angesprochene angelegte Düne in Eckernförde keiner weiteren, tieferen Analyse unterzogen. Bis zum Stand dieser Arbeit lagen keine Informationen vor, wie das Innere der Düne sich über die Jahre entwickelt hat. Die allgemeine Annahme, dass sich der Treibselunterbau über die Jahre auf natürliche Art und Weise zersetzt und kompostiert, soll nachgewiesen werden. Hierfür werden außerdem zwei weitere, deutlich

ältere Treibseldünen (Weidefeld bei Kappeln, Priwall bei Travemünde) in die Untersuchung eingebunden, sowie eine zeitlich unbestimmte Treibseldüne auf Fehmarn, um Vergleichswerte zu erhalten. Des weiteren wird überprüft, ob sich die Nährstoffe aus dem Unterbau auch lange Zeit nach der Anlegung noch innerhalb der Düne nachweisen lassen.

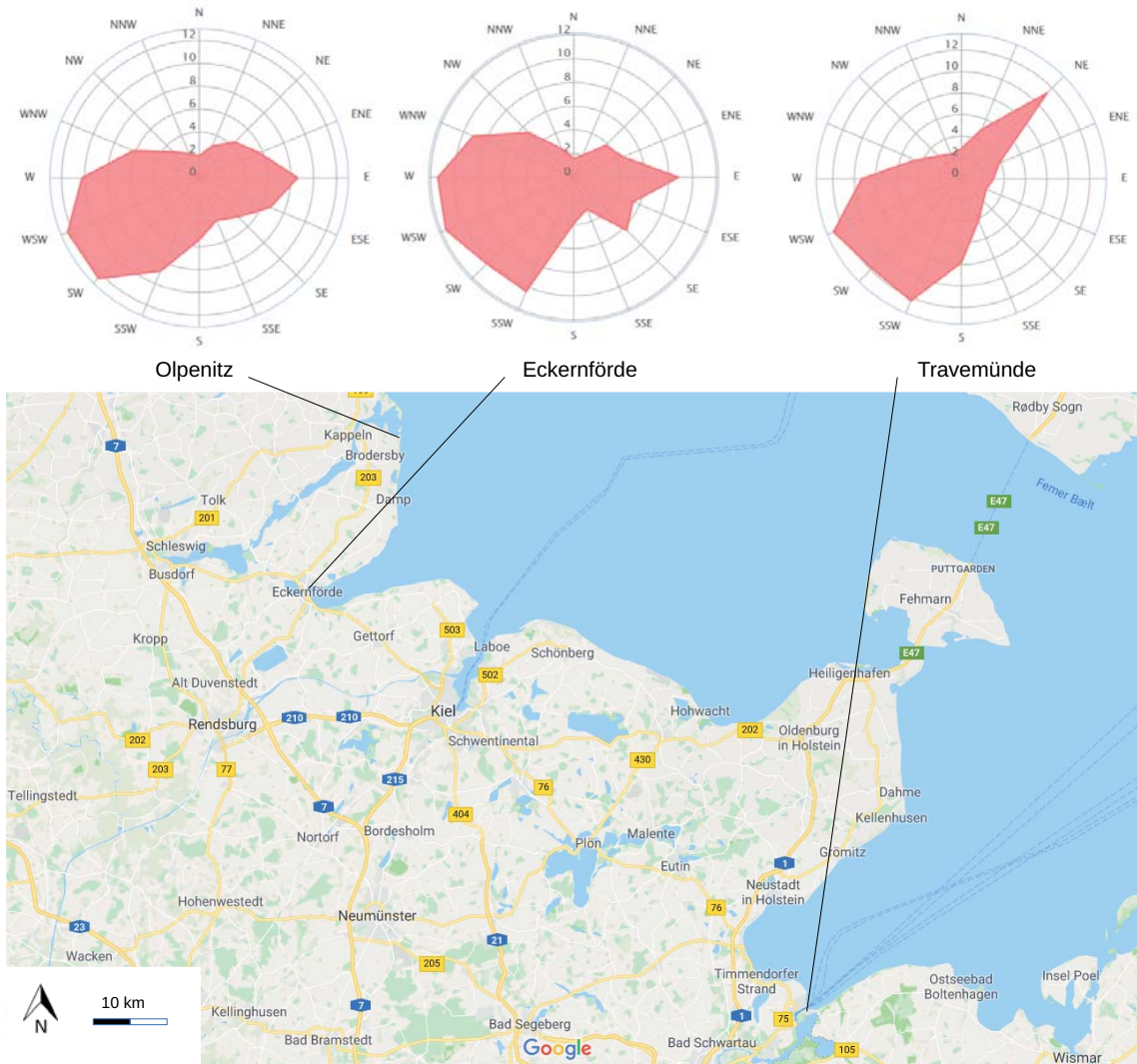


Abbildung 1: Durchschnittliche Windverhältnisse an Windmessstationen nahe den Untersuchungsorten - oben: Verteilung Windrichtung [% / Jahr] (WindFinder.com 2018); unten: Kartenausschnitt Schleswig-Holsteinische Ostseeküste, GeoBasis-DE/BKG 2009 (Google 2018), eigene Darstellung

Im folgenden Kapitel wird zunächst genauer auf die Untersuchungsgebiete in Schleswig-Holstein eingegangen und die Umgebung der Treibseldünen näher beschrieben. Ferner werden Informationen über die Anlegung der Düne am jeweiligen Ort gegeben. Bevor die Ergebnisse der Laboranalysen und auch die Erkenntnisse während der Probenahme dargelegt werden, wird das Vorgehen bei der Feld- und Laborarbeit erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse ausgewertet und erörtert, um am Schluss ein Fazit ziehen zu können und die aufgestellten Thesen entweder zu verifizieren oder zu falsifizieren.

Alle in dieser Arbeit bestimmten Pflanzenarten sind auf folgende Quellen zurückzuführen: AICHELE/ SCHWEGLER (2013), FITTER et al. (2007), JÄGER (2011), ZIEGLER (pers. Mitteilung, 2016 und 2017).

2. Untersuchungsgebiete

2.1 Weidefeld

Das nördlichste der vier Untersuchungsgebiete befindet sich südlich der Schleimündung und östlich der Stadt Kappeln. Landeinwärts, direkt hinter dem Strand, befindet sich ein kleiner Streifen dünengeprägtes Naturschutzgebiet, etwa 80 bis 90 Meter breit. Dieses Areal ist hauptsächlich bewachsen mit Strandgräsern, insbesondere Gewöhnlichem Strandhafer (*Ammophila arenaria*) und Baltischem Strandhafer (*X Calammophila baltica*), sowie vereinzelt Blattmoos- (*Bryophyta*) und Lebermoosflächen (*Marchantiophyta*). Auch Gewöhnlicher Tüpfelfarn (*Polypodium vulgare*) konnte gelegentlich ausgemacht werden.

Seit 1994 ist der Restaurantbesitzer Theodor Kalmar aufgrund seiner Aufgaben und seines Berufes beinahe täglich vor Ort. Er reinigt zudem den Strandbereich für Touristen; angeschwemmte Treibsel werden abgetragen und auf der bestehenden Dünenkette verteilt.

Unmittelbar nördlich des Untersuchungsgebietes liegt der Hafen von Olpenitz, ein ehemaliger Marinestützpunkt. Dieser ist mit einer vertikal zur Küste verlaufenden Mole

vom Untersuchungsgebiet abgetrennt. Hier entsteht derzeit ein Ferienresort mit hunderten Häusern und Wohnungen sowie einem Hotel. Bis vor etwa zehn Jahren befand sich parallel zur Küste eine zweite Steinmole, etwa 100 bis 150 Meter lang, die an die große Hafemole angebaut war. Diese hat den Wellengang und die Strömungsverhältnisse im Untersuchungsgebiet erheblich reduziert. Dies führte neben einer Sedimentakkumulation aber auch dazu, dass speziell in den Sommermonaten, wenn die Windverhältnisse eher gemäßigt sind, das Durchmischungs- und Wasseraustauschpotenzial, sowie der natürliche Abtransport Richtung Meer abnahmen. Damit einhergehend stieg die Nährstoffkonzentration durch Landabfluss und anthropogene Einträge durch Strandbesucher an. Das Resultat waren starke Braunalgenblüten im Sommer (KALMAR, pers. Mitteilung, 2017; AHRENDT 2010).

Während einer Extremblüte im Jahr 2004 wurden die Braunalgen kurzweilig am Strand zum Trocknen ausgelegt, dann zusammengefahren und mit Sand überschüttet bzw. vergraben. Entstanden ist eine künstliche Düne mit Treibselkern, die schnell mit Strandhafer und anderen lokalen Strandvegetationen überwachsen ist (KALMAR, pers. Mitteilung, 2018), darunter auch die neobiotische Kartoffel-Rose (*Rosa rugosa*, auch Apfel-Rose oder Sylter Rose genannt).

Als der vorherige Besitzer der Hafenfläche, die *Port Olpenitz GmbH*, Insolvenz angemeldet hatte und von der Ferienimmobiliengesellschaft *Helma Eigenheim AG* aufgekauft wurde (WeltN24 GmbH 2013), wurde die parallele Mole jedoch entfernt. Die Steine der Mole wurden für die weitere Erschließung des Hafenbereichs verwendet. Durch nun wieder stärkere Vulnerabilität der Küstenlinie gegenüber marinen Wirkungskräften haben transgressive Bewegungen zu Erosionsprozessen geführt (KALMAR, pers. Mitteilung, 2017; vgl. SHZ 2014). Die einst in den Dünenkomplex integrierte Treibseldüne ist zu großen Teilen erodiert (siehe Abbildung 2). Bevor die Steinmole entfernt wurde, war der Strandbereich um bis zu 60 Meter breiter (KALMAR, pers. Mitteilung, 2017; vgl. AHRENDT 2010). Auch eine in der Vergangenheit getätigte, vom Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz (LKN) geforderte Sandaufspülung im Jahr 2015



Abbildung 2: Vergleich der Küstenlinie am Weidefelder Strand 2006 (oben) gegenüber 2017 (unten). Die Transgression ist (trotz der leicht abweichenden Aufnahmewinkel der Fotos) gut zu erkennen. Als Fixpunkte dienen die Steilküste im Hintergrund und das Gebäude (weißer Pfeil). (Foto oben: AHRENDT 2006, unten: eigene Aufnahme 2017)

(KALMAR, pers. Mitteilung, 2018; SHZ 2014) habe als Gegenmaßnahme keinen Einfluss auf die transgressive Bewegung gehabt (KALMAR, pers. Mitteilung, 2017). Die ehemalige Treibselldüne ist mittlerweile nur noch durch einen verstärkten Bewuchs durch *Rosa rugosa* an der landwärtigen Exposition auszumachen.

Der „Fuß“ der Düne, der erosiv bedingt derzeit ungefähr an jener Stelle liegt, an welcher der damalige Dünenkopf war, zeichnet sich durch eine Abbruchkante zum Strandbereich

hin aus. Zwischen diesem Punkt und der heutigen Dünenmitte, wurde im Zuge dieser Arbeit eine Probe genommen (Probenname: *WEI_D*). Die Höhe der Düne liegt zwischen 1,00 m und 1,50 m.

Bei der Anlegung der Treibseldüne wurde außerdem versehentlich eine kleine Menge Treibsel im rückwärtigen Dünenbereich abgelagert. Auch diese Stelle wurde beprobt (*WEI_H*). Der etwa 70 cm hohe Hügel unterscheidet sich heute vom Umland durch ein ungefähr 10 m² großes Biotop von Stranddistelgewächsen (*Eryngium maritimum*). Diese Pflanzen wachsen in einem sehr weiten Umkreis nur auf dieser Fläche, nachdem seit 1986 der Bestand von ca. 700 Pflanzen stark zurückgegangen ist (KALMAR, pers. Mitteilung, 2017 und 2018). Die Art steht auf der Roten Liste der Farn- und Blütenpflanzen Schleswig-Holsteins (LLUR 2006).

2.2 Eckernförde

Eckernförde ist eine kleine Stadt nördlich von Kiel. Der Strandbereich liegt im Osten der Stadt am westlichen Ende der gleichnamigen Bucht und wird weitgehend durch den örtlichen Kurbetrieb gepflegt (Stadt Eckernförde 2017).

Eckernförde betreibt als einziges Untersuchungsgebiet dieser Arbeit die Verwendung von Treibsel zum Dünenbau als Küstenschutzmaßnahme aktiv. Eine Verlängerung der Düne ist für die nahe Zukunft geplant (PACKSCHIES, pers. Mitteilung, 2017). An angeschwemmtem *Zostera marina* wird es der Stadt für dieses Projekt nicht mangeln, da parallel zur Küste ausgedehnte Seegraswiesen wachsen (SHZ 2017, LANU 2008).

Die Treibseldüne ist Teil einer kleinen Dünenkette, die zwischen dem Strand und einer kleinen Promenade liegt. Direkt dahinter stehen die ersten Gebäude der Stadt. Die Dünen sind allerdings nicht höher als einen Meter und stellen visuell den Anstieg zur Promenade dar. Die Treibseldüne lässt sich durch einen deutlich ausgeprägteren Bewuchs klar von den Dünen mit einem reinen Sandkern unterscheiden. Baltischer Strandhafer (*X Calammophila baltica*), Strandroggen (*Leymus arenarius*), Seggen (*Carex*), Quecken (*Elymus*), Kräuter (beispielsweise *Galium aparine*) und andere Gräser füllen die

Dünenoberfläche aus. Die zweite angepflanzte Strandhaferart *Ammophila arenaria* ist inzwischen aber kaum bis gar nicht mehr aufzufinden. Ebenfalls wächst *Rosa rugosa* vor Ort und verdrängt indigene Arten. Dieser Neophyt ist aber bereits vor der Anlegung der Düne in Eckernförde aufgetaucht und ist vorwiegend auf den kleineren Dünen ohne Treibselkern zu finden (ZIEGLER, pers. Mitteilung, 2016).

Auf den Küstenschutz bezogen stellt die Eckernförder Treibselldüne eine wichtige Stütze dar, weil sie unmittelbar zwischen Stadtgrenze und dem im Falle einer Sturmflut überfluteten Strandbereich steht. Das letzte sturmbedingte Hochwasser, welches den Strand erosiv stark beeinträchtigt hat, entstammte dem Tiefdruckgebiet *Daisy* im Januar 2010 (ZIEGLER, pers. Mitteilung, 2017; WeltN24 GmbH 2010). Das nächste vergleichbare Hochwasser fand erst im Januar 2017 statt, verursacht durch das Tiefdruckgebiet *Axel* (WeltN24 GmbH 2017). Die Treibselldüne wurde dabei nicht in Mitleidenschaft gezogen.

Der Strand wurde im Februar desselben Jahres mit etwa 6000 m³ Sand aus Vertiefungsarbeiten eines naheliegenden Jachthafens in der Eckernförder Bucht wieder aufgeschüttet. Der Sand wurde überwiegend für die Verbreiterung des Strandbereichs verwendet. Sowohl die vorgelagerten Seegraswiesen als auch die Treibselldüne waren von der Maßnahme nicht betroffen (PACKSCHIES, pers. Mitteilung, 2017; SHZ 2017).

Insgesamt wurden in Eckernförde drei Proben aus zwei Grabungen entnommen. Aus Grabung 1 wurden aus ungefähr 50 cm Tiefe und aus ungefähr 100 cm Tiefe jeweils eine Probe genommen (*ECK_D1A* bzw. *ECK_D1B*). Aus Grabung 2 wurde als Vergleichswert aus ca. 50 cm Tiefe Material entnommen (*ECK_D2A*).

2.3 Priwall

Priwall ist eine Halbinsel an der Mündung des Flusses Trave nahe Lübeck und unmittelbar anschließend befindet sich die Landesgrenze zu Mecklenburg-Vorpommern. Dies ist folglich das östlichste Untersuchungsgebiet dieser Arbeit. Richtung Wasserkante befindet sich ein 70 bis 90 Meter breiter Sandstrand. Dahinter folgt ein Naturschutzgebiet, ca. 130 bis 150 Meter breit und sowohl mit niederer Strandvegetation, als aber auch mit kleinen



Abbildung 3: Blick über die Dünenreihe auf Priwall. Die Wasserkante ist in Blickrichtung rechts (eigene Aufnahme, 2017)

Gehölzflächen bewachsen. An der landzugewandten Seite des Areals steht vor einer Siedlung eine Dünenkette, ca. 200 bis 230 Meter von der Wasserkante entfernt. Die Dünen sind mit Strandgräsern (*X Calammophila baltica*) überzogen. Auch einige, noch junge Kiefern (*Pinus nigra* oder *Pinus montana*) konnten sich entwickeln (siehe Abbildung 3). Ob diese angepflanzt wurden oder sich natürlich angesiedelt haben, kann nicht nachvollzogen werden. Der Dünenbereich ist zudem mit Laubmoosflächen (*Bryophyta*) bedeckt. Die Dünenkette wurde nach Angaben des Landschaftspflegevereins Dummersdorfer Ufer e.V., des Kurbetriebs Travemünde sowie der Hansestadt Lübeck in den 1960er und 1970er Jahren durch ein Ablagerungsgemisch von Algen, Seegras und Sand angelegt bzw. erhöht. Die

ursprüngliche Dünenlandschaft ist durch den aufkommenden Massentourismus in jener Zeit zurückgegangen. Einzig die Dünenreihe Richtung Landesgrenze ist durch Sandanflug natürlich aufgeweht und erhalten geblieben (BRAUN, pers. Mitteilung 2017). Die etwa zwei bis zweieinhalb Meter hohen untersuchten Dünen stellen somit die älteste mithilfe von Treibsel erstellte Dünenkette dieser Arbeit dar. Die gesammelte Probe vom Kopf der Düne beinhaltet Material von 160 cm bis 260 cm Tiefe (*PRI_D*).

2.4 Fehmarn

Auch auf Fehmarn wurde im Vorhinein dieser Arbeit eine Treibseldüne vermutet. Am Tag der Untersuchung wurde jedoch schnell ersichtlich, dass es sich um keine Düne im eigentlichen Sinn handelte, sondern lediglich um einen aufgeschütteten Hügel aus zusammengefahrenem Treibsel, wenige Meter von der Wasserkante entfernt. Zudem befindet sich der Ort auf einem Privatgrundstück und wurde auf Wunsch der Grundstücksbesitzer hin in dieser Arbeit anonymisiert. Er wird im Folgenden schlicht als „Fehmarn“ bezeichnet.

Es wurden dennoch Proben mit Material von 120 cm bis 180 cm sowie von 180 cm bis 220 cm Tiefe als Vergleichswerte genommen (*FEH_A1A* bzw. *FEH_A1B*), da aber die vorgefundene Aufschüttung des Treibsel wie erwähnt keinem Küstenschutz zweck dienlich ist, wird auf die Exposition nicht weiter eingegangen. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass durch Wind, Niederschlag und Wellen an der Aufschüttung Erosion stattgefunden hat, jedoch weitaus weniger als an der Treibseldüne in Weidefeld.

Als zusätzliche, dritte Probe wurde aus einem zweiten Loch aus 50 cm bis 100 cm Tiefe überwiegend Seegrass-Material entnommen (*FEH_A2*). Geringe Sandbeimengen waren unvermeidbar.

Auf dem Kopf der Aufschüttung befand zudem ein nicht näher bestimmter, bereits wieder abgestorbener Busch von etwa einem Meter Breite und einem halben Meter Höhe, was darauf schließen lässt, dass das Treibsel einige Jahre unberührt gelegen hat.

2.5 Vergleichsproben

Zu allen gesammelten Daten wurden zudem vier weitere Vergleichsproben in die spätere Analyse einbezogen. Sie stammen aus Eckernförde und drei davon stellen Proben mit reinem Sand dar. Diese wurden an drei unterschiedlichen Stellen am südlichen Eckernförder Strand oberflächennah genommen (*ECK_FS1*, *ECK_FS2* und *ECK_FS3*). Aufgrund der Höhe der Orte über NN wird vermutet, dass sie beim letzten Hochwasser

nicht überschwemmt wurden und somit von potenziellen Einflüssen von mariner Fauna befreit sind. Die Intention dieser Probennahme ist der Erhalt von Analysewerten von sandigem, „treibselfreien“ Boden, um ihn mit dem aus den Treibseldünen gezogenen Material vergleichen zu können. Um möglichst wenig fremdes Material oder zu grobe Sandkörner in diesen Proben zu haben, wurde der Sand direkt am Strand gesiebt, so dass die Körner ausschließlich Größen zwischen 0,2 mm und 63 µm aufwiesen.

Die letzte genommene Probe beinhaltete frisch angespülte Treibsel am Eckernförder Strand (*ECK_T*). Dieses Material dient zum Vergleich von „neuen“ mit „alten“ ausgegrabenen Treibselstücken.

Alle für diese Arbeit entnommenen Proben sind nochmals in einer Übersicht aufgelistet (siehe Tabelle 1). Der aufgeführte Referenzpunkt der Feinsand-Vergleichsproben stellt ein Rundpavillon-Gebäude vor Ort dar.

3. Methodik

Die Feinsand-Vergleichsproben sind Ende Mai 2017 genommen worden und das angespülte Treibsel wurde im August aufgegeben. Alle anderen Proben stammen aus den letzten Februarwochen desselben Jahres. Bis zum Start der Laboranalysen Anfang Juni (bzw. Ende August für das frische Treibsel) wurden alle Proben nach Lufttrocknung kühl, trocken und dunkel gelagert. Bei der Probenahme wurde auf eine repräsentative Aufnahme des Materials aus dem entsprechenden Bodenhorizont geachtet.

Alle im Februar gesammelten Proben wurden mithilfe einer Linnemannspitze mit Bohrprofil entnommen. Die Linnemannspitze ließ sich mit zwei weiteren ineinander verschraubbaren Stangen verlängern, sodass die Nut Material in bis zu drei Meter Tiefe aufnehmen konnte. Dieser gesamte Stab wurde zur Entnahme mehrmals in den Boden getrieben und anschließend jeweils vorsichtig herausgeholt. Die Proben *WEI_H* und *FEH_A2* wurden hingegen lediglich aus wenigen Dezimetern Tiefe entnommen. Auch wurde an jeder Entnahmestelle mit einem Spaten ein bis zu etwa 1 m tiefes Loch

ausgehoben, um einen Einblick in das „Innenleben“ der Düne zu erhalten. Die gesammelten Proben wurden in einem Trockenofen bei 35°C luftgetrocknet und dann auf Stickstoff, Kohlenstoff und Phosphat getestet sowie einer Bestimmung des Anteils von organischem Material unterzogen. Alle Werte können im Abschnitt *Ergebnisse* nachgelesen werden.

Tabelle 1: Name der Probe, verwendete Abkürzung und unter Einbezug von GoogleMaps ermittelte Koordinaten [Dezimalgrad] (eigene Darstellung)

	Probenherkunft / Entnahmetiefe	Nennung	Koordinaten (WGS 84)
	Weidefeld Treibseldüne, 120-210cm	WEI_D	54,65714 N 10,03332 E
	Weidefeld Kleiner Hügel, ~40-100cm	WEI_H	54,65504 N 10,03169 E
	Eckernförde Dünenkern 1, ~50cm	ECK_D1A	54,47013 N 9,84025 E
	Eckernförde Dünenkern 1, ~100cm	ECK_D1B	54,47013 N 9,84025 E
	Eckernförde Dünenkern 2, ~50cm	ECK_D2A	54,47002 N 9,84024 E
	Priwall Treibseldüne, 160-260cm	PRI_D	53,95571 N 10,89353 E
	Fehmarn Aufschüttung, 120-180cm	FEH_A1A	
	Fehmarn Aufschüttung, 180-220cm	FEH_A1B	
	Fehmarn Entnahme 2, 50-100cm	FEH_A2	
an Oberfläche entnommen	Eckernförde VglP, 80m nördl. RP	ECK_FS1	54,45036 N 9,85676 E
	Eckernförde VglP, 20m östl. RP	ECK_FS2	54,44984 N 9,85784 E
	Eckernförde VglP, 70m südl. RP	ECK_FS3	54,44931 N 9,85865 E
	Eckernförde VglP frische Treibsel	ECK_T	54,47302 N 9,84159 E

VglP = Vergleichsprobe
RP = Referenzpunkt

Außerdem wurden die Proben vor den nachfolgend beschriebenen Analysen auf ihre Korngrößenverteilung hin untersucht. Dabei wurden Siebe mit Maschenweiten gewählt, die den Sand in die aus der Geologie bekannten Korngrößen unterteilen: 2 mm – 0,63 mm – 0,2 mm – 0,063 mm. Für die Gewichtsmessung hierbei wurde eine Kern 572-35 Präzisionswaage benutzt. Bei den Proben *FEH_A2* und *ECK_T* fand keine Korngrößenverteilungsanalyse statt. *FEH_A2* besaß zu wenig Aussagekraft aufgrund der nur geringen Sandbeimenge. Es wurde nur zwischen > 2 mm und < 2 mm getrennt. Kleineres, am Treibsel anhaftendes Material wurde als marginal angenommen. *ECK_T* wurde nicht gesiebt, da es ausschließlich aus angespültem und eingesammeltem *Zostera marina* bestand. Die Vergleichsproben vom Eckernförder Strand enthielten wie bereits beschrieben keinen Sand > 0,2 mm und < 63 µm.

Die Analyse auf Gesamtkohlenstoff und Gesamtstickstoff (*C_gesamt*, *N_gesamt*; „C/N-Bestimmung“) wurde mittels eines Gaschromatographen durchgeführt. Eingesetzt wurde hierfür der EuroEA 3000 Elemental Analyser von *Eurovector Instruments & Software*. Dieser verbrennt unter Verwendung des Trägergases Helium winzige Probenmengen und ermittelt aus der Temperaturdifferenz mit einem Wärmeleitfähigkeitsdetektor während der Verfeuerung den – in diesem Fall – Gesamtkohlenstoff- und Gesamtstickstoffgehalt. Bei der Befüllung der für die Messung benutzten Zinnkartuschen wurde mit einer Präzisionswaage (*Sartorius M2P*) darauf geachtet, dass die Probenmenge 30 mg nicht überschritten hat. Auf eine Untersuchung repräsentativen Probenmaterials wurde stets geachtet. Muschelschalenreste in der Probenmenge wurden entfernt, da diese den Kohlenstoffwert verfälschen würden.

Aus Proben mit sichtbarem organischen Material wurden jene Substanzen, die größer als 2 mm sind, beim vorangegangenen Sieben separiert. Jeweils bis zu 2,5 g dieser ausgegliederten Proben wurden zwei Minuten lang mit einer Schwingmühle (*Retsch MM 2000*) gemahlen. *ECK_T* wurde nicht aufgeteilt, sondern komplett gemahlen. Das durch das Mahlen entstandene feine Pulver wurde ebenfalls einer C/N-Analyse unterzogen, jedoch mit maximal 5 mg bis 7 mg, da die erwarteten C_{ges} - und N_{ges} -Werte um ein vielfaches höher eingeschätzt wurden.

Für die Phosphatuntersuchung (PO_4) wurde ein kolometrischer Schnelltest der Firma Merck für Süß- und Meerwasser verwendet. Von den Proben wurden 40 g repräsentatives Material (Feuchtgewicht) mit 50 ml destilliertem Wasser vermengt. Davon wiederum wurden 5 ml für den Test verwendet und filtriert. Phosphat-Ionen und Molybdat-Ionen bilden Molybdatophosphorsäure, die zu Phosphormolybdänblau reduziert wird und dann kolometrisch bestimmt werden kann, um die PO_4 -Konzentration zu erhalten. Nach dem Zugeben der Reagenzien wurden die Proben für zwei Minuten in einen Horizontalschüttler (Gerhardt Laboshake) gestellt um eine bestmögliche Durchmischung zu gewähren. Anschließend war eine Unterteilung der Konzentration in acht Farbklassen möglich, wobei folgende Werte die jeweilige Mindestgröße einer Klasse darstellen: 0 – 0,25 – 0,50 – 0,75 – 1,0 – 1,5 – 2,0 – 3,0 mg/l PO_4^{3-} (vgl. Merck 2017). Auch eine Nullprobe wurde zum Testen der Farbskala angewandt. Alle Testergebnisse sind jedoch aufgrund des Abgleichs anhand einer Farbkarte subjektiv zu bewerten.

Mit diesem Schnelltest wurde nicht die Phosphatkonzentration des Sandes oder des organischen Materials selbst bestimmt, sondern vielmehr der Nachweis angestrebt, dass an Probeorten, die visuell kein organisches Material mehr aufwiesen (siehe Abschnitt *Ergebnisse*), jedoch als „Lagerstätte“ von eingesammeltem Treibsel bekannt sind, die verbliebenen Phosphatreste zwischen den einzelnen Sandkörnern aufzufinden. Daher wurde auf eine Phosphatanalyse von Proben, die eindeutig organisches Material und nur wenig Sand enthielten, verzichtet. Dies sind, mit Ausnahme von *FEH_A1B*,¹ jene Proben, die für die C/N-Analyse gesplittet wurden.

Um den Anteil organischer Substanz zu bestimmen, wurde das Prinzip des Muffelns angewandt. In Tiegeln aus glasiertem Porzellan wurden von den Proben zwei Parallelen angefertigt, die ein Feuchtgewicht² von etwa 10 g hatten. Ausnahmen bildeten die Proben *ECK_T* und *FEH_A2*, sowie alle Feinsand-Vergleichsproben aus Eckernförde (*ECK_FS1*, *ECK_FS2*, *ECK_FS3*). Für die Feinsand-Vergleichsproben wurde aufgrund der Erwartung von weniger organischem Inhalt ein Maximum von bis zu 12 g je Tiegel angesetzt. *ECK_T*

1 Diese Probe enthielt etwa zu gleichen Anteilen Sand und organisches Material.

2 Da die Proben weiterhin Feuchtigkeit enthielten (insbesondere innerhalb der organischen Zellen), wird das zuerst ermittelte Gewicht weiterhin als Feuchtgewicht angegeben.

und *FEH_A2* bestanden dagegen hauptsächlich aus *Zostera marina*. Da dieses mehr Platz einnimmt als kleine Sandkörner und ohnehin ein geringeres Gewicht aufweist, ließen sich die Tiegel mit nicht mehr als anderthalb Gramm Probematerial für Eckernförde, sowie fünfeinhalb Gramm für Fehmarn befüllen. Bei letzterem war das Material bereits in kleinere Stücke zerfallen. Auch bei dieser Probenanalyse wurde auf Repräsentativität und Homogenität Rücksicht genommen.

Nun wurden die Tiegel für 24 Stunden in einen Muffelofen (*Heraeus Thermicon P*) gestellt, um bei 105°C alles noch enthaltene Wasser verdampfen zu lassen. Nach einer erneuten Gewichtsmessung (das sogenannte Trockengewicht) wurden die Proben dann nochmal für sechs Stunden bei 500°C erhitzt. Diese Temperatur führt zu einer Veraschung allen organischen Materials. Die Massendifferenz zwischen dem Trockengewicht und dem Glührückstand gibt nun Rückschlüsse auf die ehemals in der Probe enthaltene organische Substanz. Für eine bessere Handhabung beim Wiegen konnten sich die Tiegel nach dem Muffeln in Exsikatoren auf Raumtemperatur abkühlen. Es wurde dabei darauf geachtet, dass die Proben auch beim anschließenden Wiegen keine signifikante Umgebungsfeuchtigkeit aufnehmen konnten. Das Gewicht der Asche des organischen Materials wurde als vernachlässigbar gering angenommen.

Für die mikroskopische Untersuchung einiger Treibselstücke aus Eckernförde wurde ein *Leitz Dialux 20 EB* verwendet. Das Fotoprogramm für die Aufnahme und Bearbeitung heißt *Leica Application Suite (LAS 4.4)*.

4. Ergebnisse

4.1 Visuelle Erkenntnisse bei Probennahme

Es wurden folglich an drei verschiedenen Orten in Schleswig-Holstein Treibseldünen angegraben – vier, wenn die lose Aufschüttung auf Fehmarn hinzugezählt wird.

In Weidefeld war die Treibseldüne zu einem großen Teil bereits erodiert. Dies ermöglichte zwar einen guten Querschnitts-Einblick, doch konnten visuell in keinem Bodenorizont

Überreste von Treibsel ausgemacht werden. Zum gleichen Ergebnis lässt sich bei dem versehentlich abgelagerten Hügel kommen. Einzig der Bewuchs beider Probeorte durch andere Pflanzenarten verglichen zum Umland deutet auf eine (ehemals) andere Bodenzusammensetzung als Sand hin.

Auf Priwall fanden sich im Boden ebenfalls keine Hinweise auf in der Vergangenheit abgelagerte Treibsel, obwohl bis in 2,60 m Tiefe gebohrt wurde. Ab ca. 2 m unter der Oberfläche konnte lediglich eine leichte Grundfeuchtigkeit festgestellt werden.

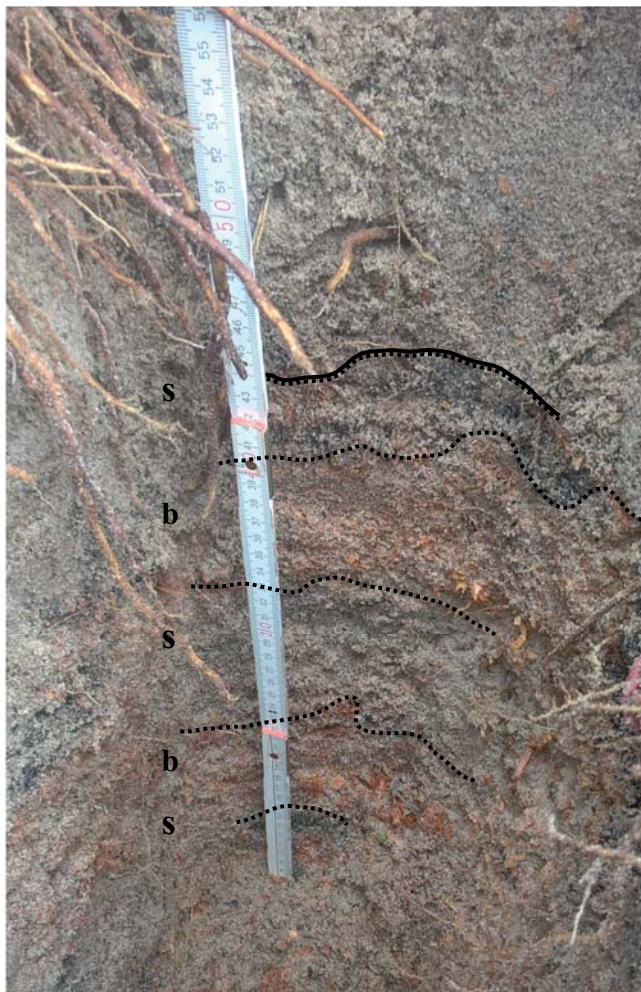


Abbildung 4: Quereinsicht in die oberen 50cm Treibselmaterial in der Eckernförder Treibseldüne (Probeloch 1); s=schwarz, b=bernsteinfarben (eigene Aufnahme, 2017)

Die Treibseldüne in Eckernförde ist die jüngste angelegte Düne dieser Arbeit. Beim Beprobieren konnte schon nach etwa 20 cm unterhalb der Oberfläche eine gewisse Grundfeuchtigkeit festgestellt werden und ab ungefähr 50 cm (bzw. etwa 80 cm bei Probeloch 2) trat gelagertes *Zostera marina* auf. Unerwartet ist das verschiedenfarbige Aussehen des vorgefundenen Materials. Zum Teil schwarz, zum Teil orange bis bernsteinfarben, und durch den aufliegenden Druck teils zu Plättchen gepresst, lagerte es abwechselnd in variierender Horizontbreite von wenigen Zentimetern bis hin zu 60 cm in Probeloch 2 (siehe Abbildungen 4 und 5). Für eine Aufklärung zur Farbgebung wurde

eine mikroskopische Untersuchung an die Laboranalysen angehängt. Ab einer Tiefe von 100 cm bis 140 cm kam wieder Sand zum Vorschein.

Auf der Dünenoberfläche konnte außerdem eine kleine bewachsene Humusschicht von ca. 3 cm ausgemacht werden. Auch wurde die Pflanzenart Kletten-Labkraut (*Galium aparine*) bestimmt. Dieses kann als ein Indikator für Stickstoff im Boden bewertet werden (ZIEGLER, pers. Mitteilung, 2017).



Abbildung 5: Zweifarbiges Treibsel in der Eckernförder Treibseldüne (eigene Aufnahme, 2017)

Die Fehmarn-Proben zeigten keine Auffälligkeiten. Das Treibsel war grundsätzlich schwarz.

Die genommenen Proben wurden wie bereits erwähnt bei der Entnahme optisch auf Treibselreste überprüft. Folgende Proben beinhalten viel organische Substanz: *ECK_D1A*, *ECK_D2A*, *FEH_A1A*, *FEH_A2* und die Treibsel-Probe *ECK_T*. Die Proben *PRI_D*, *WEI_D* und *WEI_H* sowie die Vergleichsproben *ECK_FS1*, *ECK_FS2* und *ECK_FS3* enthielten keine erkennbaren Treibselreste. Der visuelle Anteil an Treibsel von *FEH_A1B* liegt zwischen beiden Gruppen.

4.2 Laborergebnisse

Wie im Abschnitt *Methodik* beschrieben, wurden die mit Material befüllten Porzellantiegel dreimal gewogen: (1) Nach der 35°C-Lufttrocknung (Feuchtgewicht), (2) der 105°C-Trocknung (Trockengewicht) und (3) dem 500°C-Muffelprozess (Glührückstand). Alle Proben, die visuell viel organische Substanz enthielten (siehe oben) haben wie erwartet nach der 24-stündigen Trocknung mehr Gewicht verloren als jene Proben, die

visuell wenig oder kein organisches Material enthielten (siehe Tabellen 2). Alle Proben mit optisch viel organischem Material (> 50 %) haben am meisten Gewicht verloren. Den größten prozentualen Gewichtsverlust weist dabei die Probe *ECK_T* auf, gefolgt von *FEH_A2*. Die Proben, die auf Priwall (*PRI_D*) und in Weidefeld (*WEI_D*, *WEI_H*) entnommen wurden, haben ähnlich an Gewicht verloren wie die Feinsand-Vergleichsproben aus Eckernförde. Wird der Mittelwert der Feinsand-Proben genommen (0,051 g), liegen bis auf *WEI_D* alle Proben sogar darunter. Dies liegt allerdings an einem Messfehler bei der Probe *ECK_FS2*, der im Abschnitt *Fehleranalyse* näher beschrieben wird. Doch auch nach Ausschluss des Fehlers liegen die Werte der Feinsand-Vergleichsproben und der aus Weidefeld und Priwall recht nah beieinander. Zusammenfassend haben also mit Ausnahme von *FEH_A1B* (und der fehlerbehafteten *ECK_FS2*) alle Proben mit optisch wenig organischem Material (Anteil < 50 %) ähnlich an Gewicht nach der Trocknung bei 105°C verloren. Mit Blick auf die Differenz zwischen Feuchtgewicht und Glührückstand ergeben sich ähnliche Verhältnisse wie zwischen Feucht- und Trockengewicht beschrieben (siehe Tabelle 3). Beide Proben, die jeweils unterhalb von sichtbarem organischem Material entnommen wurden (*ECK_D1B*, *FEH_A1B*), haben, verglichen zu den Proben wenige Dezimeter darüber (*ECK_D1A*, *FEH_A1A*), also ebenfalls weniger Gewicht während der Trocknung und dem Muffeln verloren.

Mit Blick auf die Korngrößenverteilungsanalyse weisen alle Proben, die optisch stark mit organischem Material durchsetzt waren, im Bereich Material > 2 mm einen deutlich erhöhten Gewichtsanteil relativ zu den anderen Proben auf (siehe Tabelle 4; die Spalte „Schwund“ wird im Abschnitt *Fehleranalyse* erläutert). Bei allen im Labor gesiebten Proben mit Ausnahme von *ECK_D1A* bestand der Hauptanteil der jeweiligen Probenmasse aus Mittelsand oder ähnlich großen Elementen. Die Probe aus Priwall hat, von den Vergleichsproben abgesehen, mit Abstand den geringsten Grobsand und den höchsten Feinsandanteil. Außerdem besaß sie zusammen mit *ECK_D1B* auffallend wenig Material > 2 mm. Es ist darauf hinzuweisen, dass es sich bei der Korngrößenverteilung um Gewichtsangaben handelt, die nicht mit dem Volumen einer Probe gleichzusetzen sind. *Zostera marina* ist erheblich leichter als die gleiche Menge Sand.

Tabelle 2: Ergebnisse Gewichtsverluste nach dem Trocknen und Veraschen (Teil 1, eigene Darstellung)

Probenherkunft / Entnahmetiefe	Tiegel- Nummer	Tiegelgewicht [g]	Feuchtwegicht [g]	Trockengewicht [g]	Differenz (Feuchtwegicht – Trockengewicht) [g]	Anteil Wasser [%]
Weidefeld Treibseldüne, 120-210cm	1	26,7266	9,7030	9,6949	-0,0081	0,08
	5	25,1905	10,3614	10,3533	-0,0081	0,08
Weidefeld Kleiner Hügel, ~40-100cm	10	22,3692	10,6609	10,6565	-0,0044	0,04
	13	23,6154	11,3198	11,3141	-0,0057	0,05
Eckernförde Dünenkern 1, ~50cm	26	26,8381	10,6560	10,5565	-0,0995	0,93
	32	25,7047	9,6951	9,6014	-0,0937	0,97
Eckernförde Dünenkern 1, ~100cm	44	25,5354	9,6548	9,6494	-0,0054	0,06
	51	25,3372	9,8591	9,8526	-0,0065	0,07
Eckernförde Dünenkern 2, ~50cm	58	26,9416	9,7534	9,6597	-0,0937	0,96
	62	30,2964	10,4026	10,2709	-0,1317	1,27
Priwall Treibseldüne, 160-260cm	63	27,1730	10,7755	10,7710	-0,0045	0,04
	64	30,1597	10,8599	10,8556	-0,0043	0,04
Fehmarn Aufschüttung, 120-180cm	75	29,9401	10,4850	10,4206	-0,0644	0,61
	100	27,6905	10,1133	10,0429	-0,0704	0,70
Fehmarn Aufschüttung, 180-220cm	107	26,5526	10,0247	10,0062	-0,0185	0,18
	116	24,5474	9,5972	9,5770	-0,0202	0,21
Fehmarn Entnahme 2, 50-100cm *	121	28,8758	5,4988	5,3273	-0,1715	3,12
	129	23,9181	5,6570	5,5389	-0,1181	2,09
Eckernförde VglP, 80m nördl. RP	200	27,5878	11,5133	11,5067	-0,0066	0,06
	204	28,2216	10,3816	10,3761	-0,0055	0,05
Eckernförde VglP, 20m östl. RP	208	29,2336	11,8944	11,7723	-0,1221	1,03
	215	28,0807	11,0926	11,0902	-0,0024	0,02
Eckernförde VglP, 70m süd. RP	217	28,3497	10,7826	10,7790	-0,0036	0,03
	232	30,3544	10,9823	10,9787	-0,0036	0,03
Eckernförde VglP frische Treibsel **	35	28,7725	0,9644	0,8339	-0,1305	13,53
	39	25,7060	1,0079	0,9021	-0,1058	10,50
	105	23,0195	1,2531	1,1168	-0,1363	10,88

VglP = Vergleichsprobe

RP = Referenzpunkt

rot hervorgehoben: vermutlicher Anwendungsfehler

*) größtenteils Treibsel; geringeres Probengewicht, etwas sperriger

**) ausschließlich Seegrass; geringes Probengewicht, sperriger

Tabelle 3: Ergebnisse Gewichtsverluste nach dem Trocknen und Veraschen (Teil 2, eigene Darstellung)

Probenherkunft / Entnahmetiefe	Gewicht nach ZOS [g]		Differenz (Trockengewicht - Gewicht nach ZOS) [g]		Anteil organische Substanz [%]		Differenz (Feuchtgewicht - Gewicht nach ZOS) [g]		Anteil Wasser und organische Substanz [%]	
Weidefeld Treibseldüne, 120-210cm	9,6267	-0,0682	0,70	-0,0477	0,48	-0,0763	0,79	-0,0557	0,56	
	10,3262	-0,0271	0,26			-0,0352	0,34			
Weidefeld Kleiner Hügel, ~40-100cm	10,6244	-0,0321	0,30	-0,0308	0,28	-0,0365	0,34	-0,0359	0,33	
	11,2846	-0,0295	0,26			-0,0352	0,31			
Eckernförde Dünenkern 1, ~50cm	10,0665	-0,4900	4,64	-0,4707	4,67	-0,5895	5,53	-0,5673	5,58	
	9,1501	-0,4513	4,70			-0,5450	5,62			
Eckernförde Dünenkern 1, ~100cm	9,6205	-0,0289	0,30	-0,0330	0,34	-0,0343	0,36	-0,0389	0,40	
	9,8156	-0,0370	0,38			-0,0435	0,44			
Eckernförde Dünenkern 2, ~50cm	9,2121	-0,4476	4,63	-0,5157	5,16	-0,5413	5,55	-0,6284	6,21	
	9,6872	-0,5837	5,68			-0,7154	6,88			
Priwall Treibseldüne, 160-260cm	10,7541	-0,0169	0,16	-0,0136	0,13	-0,0214	0,20	-0,0180	0,17	
	10,8454	-0,0102	0,09			-0,0145	0,13			
Fehmarn Aufschüttung, 120-180cm	10,1193	-0,3013	2,89	-0,3285	3,22	-0,3657	3,49	-0,3959	3,85	
	9,6873	-0,3556	3,54			-0,4260	4,21			
Fehmarn Aufschüttung, 180-220cm	9,9062	-0,1000	1,00	-0,0953	0,97	-0,1185	1,18	-0,1146	1,17	
	9,4865	-0,0905	0,94			-0,1107	1,15			
Fehmarn Entnahme 2, 50-100cm*	4,5758	-0,7515	14,11	-0,6411	11,84	-0,9230	16,79	-0,7859	14,13	
	5,0082	-0,5307	9,58			-0,6488	11,47			
Eckernförde VglP, 80m nördl. RP	11,4677	-0,0390	0,34	-0,0385	0,35	-0,0456	0,40	-0,0445	0,41	
	10,3381	-0,0380	0,37			-0,0435	0,42			
Eckernförde VglP, 20m östl. RP	11,7550	-0,0173	0,15	-0,0174	0,15	-0,1394	1,17	-0,0797	0,68	
	11,0726	-0,0176	0,16			-0,0200	0,18			
Eckernförde VglP, 70m südl. RP	10,7544	-0,0246	0,23	-0,0252	0,23	-0,0282	0,26	-0,0288	0,26	
	10,9530	-0,0257	0,23			-0,0293	0,27			
Eckernförde VglP frische Treibsel**	0,2457	-0,5882	70,54	-0,6273	66,68	-0,7187	74,52	-0,7515	70,53	
	0,2617	-0,6404	70,99			-0,7462	74,04			
	0,4634	-0,6534	58,51			-0,7897	63,02			

*) größtenteils Treibsel, geringeres Probengewicht, etwas sperriger

**) ausschließlich Seegrass; geringes Probengewicht, sperriger

VglP = Vergleichsprobe

RP = Referenzpunkt

ZOS = Zerstörung organischer Substanz (Muffeln)

Aus den Ergebnissen der C/N-Analyse ist ersichtlich, dass Proben, die aufgrund des reichhaltigen organischen Materials in > 2 mm und < 2 mm separiert wurden, mehr Gesamtstickstoff und Gesamtkohlenstoff beinhalten als jene Proben, die nicht aufgeteilt wurden (siehe Tabelle 5). Dabei weisen die Fraktionen > 2 mm höhere prozentuale Anteile auf als jene von < 2 mm Durchmesser. Eine Ausnahme stellt *FEH_A1A* dar, bei der sich die Stickstoff-Anteile sich nur geringfügig unterscheiden und in der Messung mit Material > 2 mm sogar weniger Stickstoff nachgewiesen wurde. Die höchsten Stickstoffwerte wurden in *ECK_T* nachgewiesen, gefolgt von *FEH_A2* (> 2 mm) und *ECK_D1A* (> 2 mm). In diesen Proben befand sich ebenfalls am meisten Kohlenstoff, gefolgt von *FEH_A1A* (> 2 mm) und *ECK_D2A* (> 2 mm). Am wenigsten Kohlenstoff wurde in *ECK_D1B* und in *PRI_D* vorgefunden, sogar weniger als in den Feinsand-Vergleichsproben (Mittelwert 0,345 %). Ebenso wie die absoluten Kohlenstoff- und Stickstoff-Werte in den Proben mit Material > 2 mm höher sind als in fragmentierteren Probeninhalten, so ist auch hier der C/N-Quotient größer. Der kleinste Wert wurde für *FEH_A2* (< 2 mm) und der größte für *ECK_D2A* (> 2 mm) ermittelt.

Der Phosphat-Schnelltest hat ergeben, dass *ECK_D1B* und *FEH_A1B* am meisten Phosphat aufweisen (siehe Tabelle 5). Bei *WEI_D* ist der Gehalt am geringsten. Proben mit auffällig viel organischer Substanz (Anteil > 50 %) wurden wie erwähnt nicht getestet. Es fällt auf, dass die Feinsand-Vergleichsproben einen im Schnitt höheren Phosphatgehalt besaßen als jene Proben aus den Treibseldünen am Weidefelder Strand und auf Priwall.

Tabelle 4: Korngrößenverteilung der Proben. Der Schwund ist über die beim Sieben verlorene Masse definiert (eigene Darstellung).

Probenherkunft / Entnahmetiefe	Gesamt- gewicht [g]	Verteilung [g]					< 63 µm	Schwund
		> 2 mm	2 mm – 0,63 mm	0,63 mm – 0,2 mm	0,2 mm – 63 µm			
Weidefeld Treibseldüne, 120-210cm	113,57	11,97	18,76	78,51	3,45	0,47	0,41	0,36%
Weidefeld Kleiner Hügel, ~40-100cm	53,11	7,38	13,09	30,88	1,24	0,22	0,30	0,56%
Eckernförde Dünenkern 1, ~50cm	16,55	10,39	1,01	4,80	0,28	0,01	0,06	0,36%
Eckernförde Dünenkern 1, ~100cm	361,27	1,80	36,50	315,67	6,22	0,08	1,00	0,28%
Eckernförde Dünenkern 2, ~50cm	63,21	24,99	5,76	28,06	3,90	0,01	0,49	0,78%
Priwall Treibseldüne, 160-260cm	228,87	0,40	10,94	190,22	25,76	0,97	0,58	0,25%
Fehmarn Aufschüttung, 120-180cm	128,34	32,73	29,13	62,90	3,30	0,05	0,23	0,18%
Fehmarn Aufschüttung, 180-220cm	128,72	9,92	26,09	86,15	5,70	0,16	0,70	0,54%
Fehmarn Entnahme 2, 50-100cm*	5,96	4,76	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
Eckernförde VglP, 80m nördl. RP	314,07	0,00	0,00	0,00	314,07	0,00	0,00	0,00%
Eckernförde VglP, 20m östl. RP	260,57	0,00	0,00	0,00	260,57	0,00	0,00	0,00%
Eckernförde VglP, 70m südl. RP	358,45	0,00	0,00	0,00	358,45	0,00	0,00	0,00%
Eckernförde VglP finsche Treibsel**	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
Bezeichnung		Kies + gr. org. Material	Grobsand	Mittelsand	Feinsand	Schluff		

 VglP = Vergleichsprobe
 RP = Referenzpunkt

 *) größtenteils Treibsel
 **) ausschließlich Seegras

Tabelle 5: Ergebnisse der C/N-Analyse und des PO₄-Schnelltests. Die verschiedene Deklaration der Sample-Nummern der Proben mit frischem Treibsel sind durch die gegenüber den anderen Proben erst später erfolgte Analyse begründet (eigene Darstellung).

Kohlenstoff-Stickstoff-Analyse (EURO EA Elemental Analyzer)						Phosphat-Schnelltest		
Probenherkunft / Entnahmetiefe	Sample-Nummer	Gewicht [mg]	Stickstoff (N _{ges}) [%]		Kohlenstoff (C _{ges}) [%]		C/N-Verhältnis	Phosphat (PO ₄) [mg/kg]
Weidefeld Treibseldüne, 120-210cm	16	28,879	0		0,766			0 – 0,313
	17	29,600	0	0,000	0,564	0,631		
	18	29,301	0		0,562			
Weidefeld Kleiner Hügel, ~40-100cm	19	28,671	0		0,680			0,313 – 0,625
	20	29,606	0	0,000	0,695	0,695		
	21	28,812	0		0,711			
Eckernförde Dünenkern 1, ~50cm	26	29,361	0,060		0,986			
	27	27,986	0,069	0,067	1,036	1,059	15,723	
	28	28,103	0,073		1,154			
Eckernförde Dünenkern 1, ~50cm > 2mm	45	5,544	0,211		4,219			
	46	5,549	0,114	0,149	4,235	4,302	28,808	
	47	5,286	0,123		4,452			
Eckernförde Dünenkern 1, ~100cm	29	29,475	0		0,052			1,875 – 2,500
	30	27,924	0	0,000	0,107	0,079		
	31	29,667	0		0,079			
Eckernförde Dünenkern 2, ~50cm	32	28,770	0,012		0,516			
	33	28,722	0,016	0,018	0,642	0,598	33,849	
	34	29,243	0,025		0,636			
Eckernförde Dünenkern 2, ~50cm > 2mm	49	5,245	0,082		3,797			
	50	5,208	0,085	0,083	3,766	3,764	45,536	
	51	5,407	0,081		3,730			
Priwall Treibseldüne, 160-260cm	22	29,635	0		0,085			0,313 – 0,625
	23	29,739	0	0,000	0,273	0,155		
	25	28,964	0		0,106			
Fehmar Aufschüttung, 120-180cm	39	29,377	0,135		1,864			
	40	27,468	0,074	0,120	1,062	1,590	13,211	
	41	28,684	0,152		1,843			
Fehmar Aufschüttung, 120-180cm > 2mm	52	5,374	0,119		3,924			
	53	5,468	0,087	0,096	3,851	3,950	41,003	
	54	5,511	0,083		4,075			
Fehmar Aufschüttung, 180-220cm	35	29,300	0,004		0,530			1,875 – 2,500
	37	28,950	0,003	0,002	0,640	0,518		
	38	29,079	0		0,383			
Fehmar Aufschüttung, 180-220cm > 2mm	55	10,335	0,012		1,827			
	56	10,181	0,010	0,012	1,869	1,870		
	57	10,463	0,013		1,914			
Fehmar Entnahme 2, 50-100cm	42	29,219	0,041		0,419			
	43	28,294	0,029	0,037	0,317	0,367	9,919	
	44	28,151	0,041		0,365			
Fehmar Entnahme 2, 50-100cm > 2mm	58	6,315	0,147		5,239			
	59	6,180	0,198	0,253	5,301	5,303	20,962	
	61	6,274	0,414		5,370			
Eckernförde VglP, 80m nördl. RP	6	27,954	0,004		0,433			0,938 – 1,250
	7	29,520	0	0,003	0,455	0,534		
	8	29,650	0,005		0,714			
Eckernförde VglP, 20m östl. RP	9	27,277	0		0,234			0,313 – 0,625
	10	29,237	0	0,000	0,461	0,277		
	11	28,806	0		0,137			
Eckernförde VglP, 70m südl. RP	13	28,488	0		0,276			0,625 – 0,938
	14	29,332	0	0,000	0,183	0,225		
	15	28,894	0		0,215			
Eckernförde VglP frische Treibsel	A	5,128	1,163		32,047			
	B	5,065	1,111	1,135	32,071	32,134	28,304	
	C	5,260	1,132		32,284			

VglP = Vergleichsprobe
RP = Referenzpunkt

4.3 Mikroskopieergebnisse

Aufgrund des Vorfindens von zweifarbigem Treibselresten im Dünenkern von Eckernförde, wurde das Material für eine nähere Untersuchung mit einem Mikroskop optisch untersucht. Die Auswertung kann im Abschnitt *Diskussion* nachgelesen werden.

Abbildung 6 zeigt als Vergleichsbasis einen Querschnitt von „grünem“ *Zostera marina*. Gut erkenntlich sind die Chloroplasten in der äußeren Zellschicht sowie größere Interzellulare am oberen Bildrand. Die Zellwände sind intakt.



Abbildung 6: Frisches *Zostera marina*, Querschnitt (eigene Aufnahme, 2017)

Auf Abbildung 7 ist die Epidermis von bernsteinfarbenen Treibselstücken in Draufsichten zu erkennen. Die Zellwände scheinen weiterhin intakt.

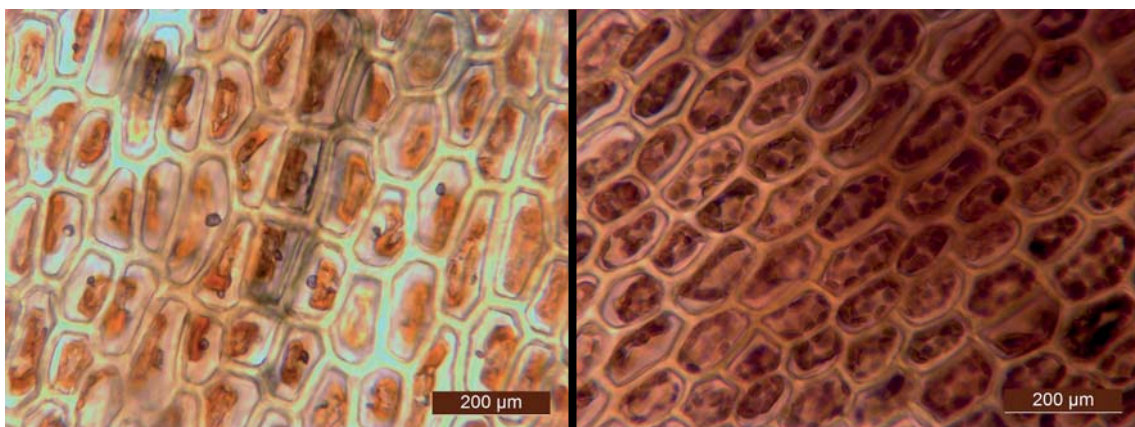


Abbildung 7: Epidermis bernsteinfarbenen Treibselstücker, Flächenschnitt (eigene Aufnahme, 2017)

Die Abbildung 8 ist auf eine bernsteinfarbene formlose Masse fokussiert, die den Zellen aufzuliegen scheint. Dahinterliegende Zellen sind insbesondere in der rechten Aufnahme verglichen zu Abbildung 7 erkennbar leer. Einige Zellwände sehen unbeschädigt aus, andere sind aufgrund der Fokussierung nur verschwommen oder gar nicht differenzierbar.

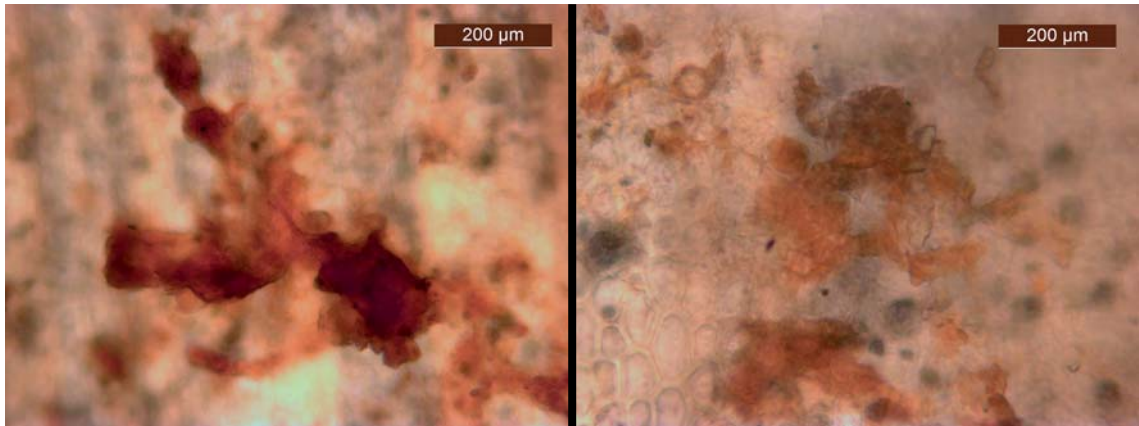


Abbildung 8: Formlose Struktur auf Epidermis, Flächenschnitt (eigene Aufnahme, 2017)

Bild 9 zeigt einen (von mehreren entdeckten) runden und nicht zellgebundenen „Fleck“. Er liegt der Zellschicht entweder unter oder er ist halbtransparent und liegt der Zellschicht auf. Weitere solcher etwa millimetergroßen Flecken sind unregelmäßig und verstreut auf der Treibselprobe aufzufinden (nicht im Bild). Die Wände umliegender Zellen wirken intakt. Die Mehrzahl der Zellen selbst sind allerdings leer.

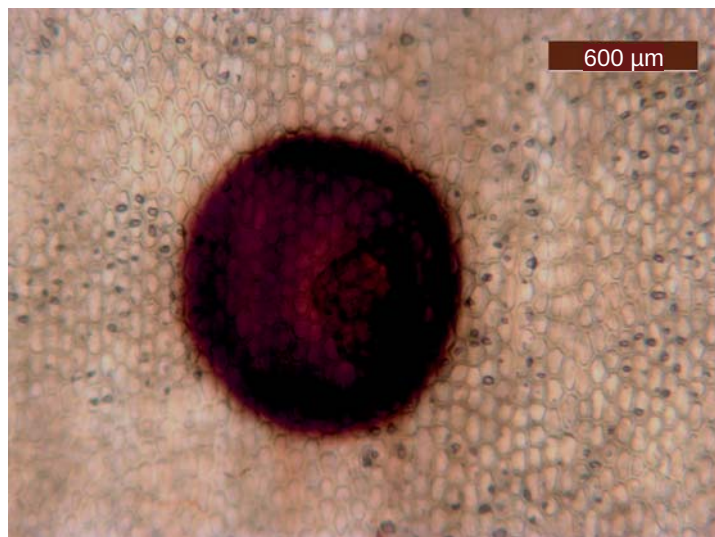


Abbildung 9: Nicht zellgebundener Fleck, exemplarische Abbildung, Flächenschnitt (eigene Aufnahme, 2017)

Bild 10 stellt einen Querschnitt eines schwarzen Treibselstückes dar. Einige Zellwände scheinen intakt, andere weisen Risse auf, wiederum andere sind stark beschädigt und ohne erkennbaren Zellinhalt.

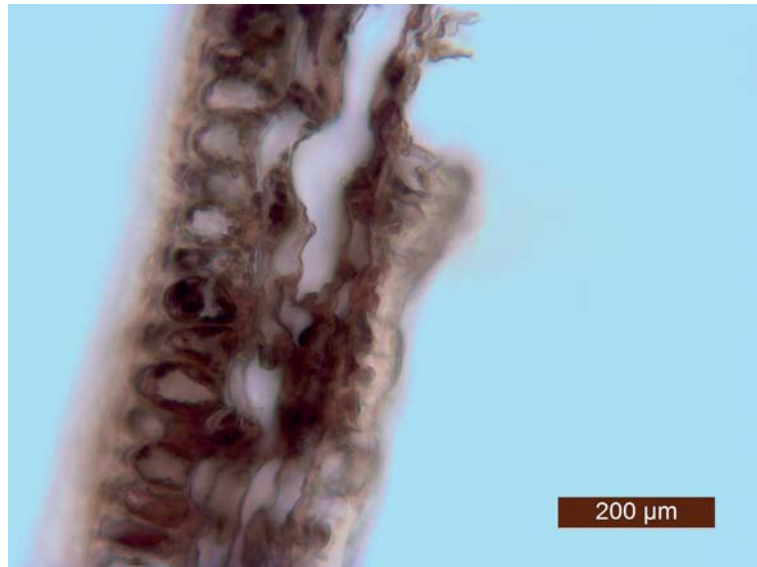


Abbildung 10: Schwarzes Treibselstück, Querschnitt (eigene Aufnahme, 2017)

5. Fehleranalyse

Es ist durchaus möglich, dass bei der Korngrößenverteilungsanalyse beim Sieben einige Sandkörner entweder im Sieb zurückbleiben können oder, insbesondere je feiner die Körner werden, beim Umfüllen in Schalen zum Wiegen verloren gehen. So ist der natürliche Schwund (vgl. Tabelle 4) zu erklären. Dennoch hat der relativ geringe prozentuale Anteil eher wenig Auswirkung auf die Auswertung der Korngrößenverteilung.

Ein weiterer zu nennender Aspekt findet sich in der Gewichtsmessung der Porzellantiegel vor dem Muffelprozess. Die Vergleichsprobe *ECK_FS2* zeigt einen vergleichbar erheblichen Masseverlust nach der 105°C-Trocknung. Proben, die überwiegend organisches Material enthielten, verzeichneten zwar ebenfalls größere Gewichtsverluste, aber diese enthielten nach der Lufttrocknung in den Zellenresten des Treibsel auch bis

zuletzt noch Wasserrückstände. Der Inhalt der Probe *ECK_FS2* hingegen bestand eigentlich nur aus Feinsand. Folglich wurde entweder das Feucht- oder Trockengewicht fehlerbehaftet gewogen oder in der Probe konnte sich etwas Flüssigkeit anlagern. Letzteres wird jedoch mit großer Sicherheit ausgeschlossen. Da allerdings von jeder Probe zwei Parallelen gemacht und insgesamt drei Vergleichsproben genommen wurden, ist der Messfehler für die abschließende Beurteilung ohne größere Bedeutung.

Die festgestellte Bodengrundfeuchtigkeit in der Tiefe an den Untersuchungsstellen stellt in den Gewichtungsvergleichen nach der 105°C-Trocknung keine Ergebnisverzerrung dar, weil der Feuchtigkeitsanteil gegenüber Proben mit organischem Material nicht signifikant war.

Schlussendlich sollte noch darauf hingewiesen werden, dass es sich in dieser Arbeit um eine geographische und keine biologisch-botanische Herangehensweise handelt. Der Schwerpunkt liegt demnach auf der integrativen Erfassung interdisziplinärer Ansätze in einem komplexen Ökosystem.

6. Diskussion

6.1 Nährstoffuntersuchungen

Je größer der Glühverlust beim Muffeln war, desto mehr organische Substanz wurde dabei zerstört. Daraus lässt sich schließen, welche Proben sandhaltiger waren und welche Proben mehr Treibselreste oder anderes organisches Material enthalten haben. Die Werte sind im Abschnitt *Ergebnisse* einsehbar.

Die hohen Gewichtsverluste der Proben *FEH_A2* und *ECK_T* bei den Messungen des Feucht- und des Trockengewichtes sowie des Glührückstandes sind mit dem noch hohen Wassergehalt innerhalb der noch bestehenden Zellstruktur der Treibsel zu erklären. Der Anteil beider Komponenten lag bei etwa 14 % in der Probe aus Fehmarn und bei etwa 70 % bei der aus Eckernförde. Letztere bestand wie beschrieben aus relativ zeitnah zur Analyse erst an den Strand angespültem *Zostera marina*. Das Material der Fehmarn-Probe ist älter. Allerdings bedeutet der noch immer hohe Anteil an Wasser und organischer

Substanz, dass die Zersetzung noch nicht weit fortgeschritten sein konnte. Auch die Dünenproben mit viel sichtbarem organischem Material aus Eckernförde verzeichneten im Vergleich zu den anderen Proben erhöhte Gewichtsverluste, jedoch weniger stark als *FEH_A2* und *ECK_T* (siehe Abbildung 11). Dies könnte an einem größeren Anteil an Sand in den Proben liegen oder aber auch auf eine bereits stärkere Zersetzung hindeuten.

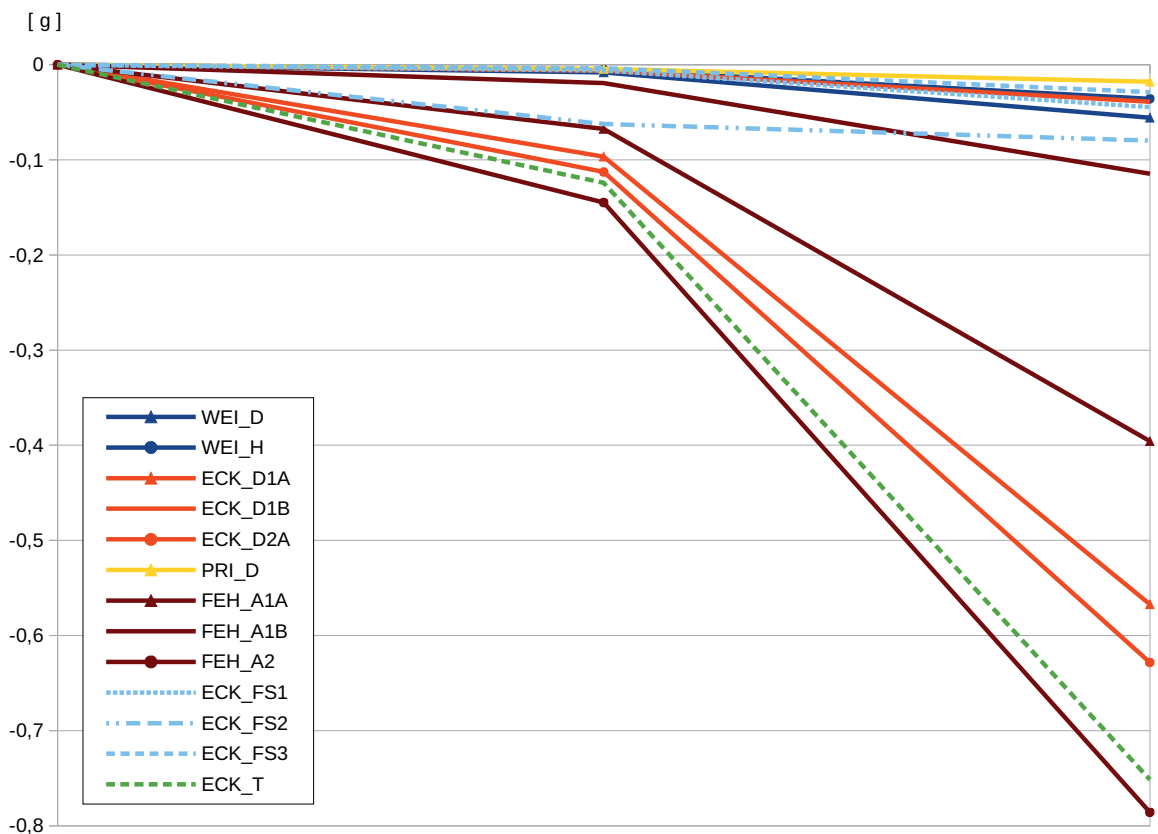


Abbildung 11: Graphische Darstellung der Gewichtsverluste der Proben nach dem Trocknen und Veraschen (eigene Darstellung)

FEH_A1B, also eine Probe, die unterhalb des zusammengeschobenen Treibselhaufens genommen wurde, weist im Vergleich zu ihrem Pendant aus Eckernförde (*ECK_D1B*) einen höheren Glühverlust auf. Es könnte ein Hinweis auf ein stattfindendes Versickern von teilzersetzten Produkten des Treibselhaufens sein. Allerdings befindet sich der Haufen nur wenige Meter von der Wasserkante entfernt, was die Ergebnisse beeinträchtigt haben könnte.

Die Proben aus Weidefeld und Priwall hingegen haben relativ wenig an Gewicht verloren. Die Differenz zwischen Feuchtgewicht und Glührückstand beläuft sich auf weniger als 0,1 g (0,35 %). Dies ist vergleichbar mit den Feinsand-Proben, dessen Anteil an organischem Material und/ oder Wasser bei etwa 0,28 % (ausschließlich des Fehlerwertes) lag. Daraus lässt sich schließen, dass die Zersetzung und Kompostierung in Weidefeld und auf Priwall bereits vollständig abgeschlossen zu sein scheint.

Die Gesamtstickstoff- und Gesamtkohlenstoffwerte in Proben mit Material > 2 mm, und dabei insbesondere in der Probe mit frisch angespültem Treibsel, sind signifikant höher, da diese Elemente noch nicht abgebaut und/ oder ausgewaschen worden sind. Bemerkenswert ist jedoch, dass mithilfe der C/N-Analyse in den Proben aus Weidefeld und Priwall nicht einmal Spuren von Stickstoff nachgewiesen wurden. Gerade an diesen Stellen wurde im Vorhinein dieser Arbeit davon ausgegangen, zumindest auf Restspuren zu stoßen, da dort in der Vergangenheit Treibsel verbaut wurden. Auch die gemessenen Kohlenstoffwerte der Priwall-Probe sind niedrig; sogar niedriger als die Werte der Feinsand-Vergleichsproben aus Eckernförde. Mit Blick auf die hohe Erosionsrate in Weidefeld könnte vermutet werden, dass das Treibsel oder dessen Nährstoffreste vom Meer vollständig weggespült wurden, obwohl selbst dann im Boden des beschriebenen und höher gelegenen Distelbiotops Reste gefunden werden hätten müssen. Auf Priwall befindet sich die Düne jedoch etwa 200 Meter von der Wasserkante entfernt. Da erscheint es unwahrscheinlich, dass selbst unter Annahme von einer unnatürlich erhöhten Sturmflutfrequenz jegliche Spur von Treibsel ausgewaschen wurde. Auch ein versehentliches Beprobieren von Sandkern-Dünen kann ausgeschlossen werden, da sowohl Herr Kalmar für Weidefeld als auch Herr Braun, Vorstandssprecher des zuständigen Landschaftspflegeverein für Priwall, die Grabungen an der korrekten Stelle bestätigt haben (BRAUN, pers. Mitteilung 2017; KALMAR, pers. Mitteilung, 2017).

Der Abbau von Treibsel am Strand findet primär durch Pilze statt, aber auch Mikroarthropoden (wie zum Beispiel Enchyträen) und die Mesofauna (wie Collembolen und Oribatiden) sind beteiligt. Der Abbau von nicht verholzten Pflanzenanteilen erfolgt

besonders schnell. Die sogenannte Lignocellulose wird dagegen wesentlich langsamer abgebaut. Marine Vegetation enthält jedoch wenig bis keine Lignocellulose, was zu einer schnellen Zersetzung des Treibsel führt (GERNANDT 2007, SCHEFFER/ SCHACHTSCHABEL 2002). Der C/N-Quotient dient als Anzeiger für den Zersetzungsgrad von pflanzlichem Material. Ein weites C/N-Verhältnis wird dort vorgefunden, wo frisch abgestorbene Materie liegt. Nimmt die Zersetzung zu, wird das Verhältnis enger (GERNANDT 2007). Je fragmentierter die Pflanzenreste zudem sind, desto höher sind die Abbauraten (SCHEFFER/ SCHACHTSCHABEL 2002). Folglich ist deshalb der festgestellte C/N-Quotient bei Proben mit Treibselstücken < 2 mm auch kleiner ausgefallen (siehe Tabelle 5 im Abschnitt *Ergebnisse*). Ein weiterer Einflussfaktor auf das Ergebnis ist eine größere Beimenge an Sand in den Proben mit Material < 2 mm. Eine Ausnahme stellt Probe *FEH_A1A* dar, bei der beim größeren Material eine leicht kleinere Stickstoffkonzentration gemessen wurde. Dies führte zu einem größeren Quotienten. Ansonsten deuten die Werte der Fehmarn-Proben aufgrund insgesamt kleinerer Quotienten gegenüber der Eckernförder Proben auf weiter fortgeschrittenere Zersetzungs- und Kompostierungsprozesse hin. Daraus resultiert, dass entweder die Treibselaufschüttung länger zurückliegen muss als die Anlegung der Düne in Eckernförde oder dass vergrabenes Treibsel längere Zeit für Zersetzungs- und Kompostierungsprozesse in Anspruch nimmt als freiliegendes Material. Letzterem steht eine Studie von HAMMANN und ZIMMER (2014) entgegen. Sie besagt, dass der Zerfall von Treibsel sogar doppelt so schnell stattfinden soll, wenn diese unter Sand begraben seien als wenn sie an der freien Luft an der Oberfläche lägen (ebd.). Es wäre ebenso möglich, dass die Aufschüttung auf Fehmarn über mehrere Jahre durchgeführt wurde und nicht in einer einmaligen Aktion.

Auffällig an den Eckernförder C/N-Werten ist außerdem, dass die Probe *ECK_D2A* um den Faktor 1,6 (Material > 2 mm) bzw. 2,2 (< 2 mm) im Vergleich zu *ECK_D1A* erhöhte C/N-Quotienten aufweist, obwohl beide aus der gleichen Tiefe stammen. Ob mehr gelöster Stickstoff durch erhöhten Niederschlagseintrag ausgewaschen wurde, kann nicht ermittelt werden. Die Farbgebung des Treibsel (siehe Abbildungen 4 und 5) wies keine Unterschiede auf: An beiden Probeorten wurde sowohl schwarzes als auch bernsteinfarbenes Material gefunden. Auf die Farbherkunft wird im Unterabschnitt *Analyse der Mikroskopieergebnisse* näher eingegangen.

Es kann davon ausgegangen werden, dass kein Zersetzungsprozess stattfindet, wenn kein Stickstoff im Boden nachgewiesen werden konnte (vgl. SCHEFFER/ SCHACHTSCHABEL 2002). Daher wurde in den Ergebnissen bei zu kleinen N-Werten kein Quotient angegeben. Bei allen Proben von optisch treibselfreiem Boden war dies der Fall, mit Ausnahme von *FEH_A1B*. Hier waren wie erwähnt Spuren von Treibsel bei der Probenahme erkennbar. Dennoch konnten nur verschwindend geringe Mengen Stickstoff nachgewiesen werden. Wie verlässlich der Wert hier aufgrund der erwähnten unmittelbaren Nähe zur Ostsee und damit auch zum Grundwasser ist, kann nicht abschließend geklärt werden.

Werden die vorher erläuterten Ergebnisse des Muffeln hinzugezogen, unterstützt es die Erkenntnis, dass der Treibselunterbau der Dünen in Weidefeld und auf Priwall über die Jahre restlos zersetzt und kompostiert wurde. Aufgrund der grobkörnigen Struktureigenschaft des Sandes sind Nährstoffreste dann infolge von Niederschlag versickert. In der im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Korngrößenverteilungsanalyse sind nicht ausreichend Partikel $< 63 \mu\text{m}$ festgestellt worden, die diesen Prozess hätten verlangsamten oder gar unterbinden können.

Die Ergebnisse des Phosphattests stellen ein weiteres Indiz für den Versickerungsprozess dar. Unterhalb der Treibseldüne in Eckernförde und des Treibselhaufens auf Fehmarn wurden relativ zu den Feinsand-Vergleichsproben hohe PO_4 -Werte ausgemacht. Phosphate sind im Gegensatz zu Stickstoff partikelgebunden und schlecht wasserlöslich. Während die Stickstoffverbindungen weiter versickerten, sind einige Phosphatverbindungen im entsprechenden Bodenhorizont zurückgeblieben. In den ehemaligen Treibseldünen in Weidefeld und auf Priwall sind aber auch diese inzwischen nur noch schwach nachweisbar. Dass die Ergebnisse von dort sogar unter denen der Feinsand-Vergleichsproben liegen, wird – auch aufgrund des subjektiv zu bewertenden Phosphat-Tests – keiner größeren Bedeutung zugeführt.

Der Großteil der Nährstoffe ist also während der Verwitterung durch Niederschlag aus der Düne ausgewaschen worden und entweder über den Zwischenabfluss oder über den Grundwasserabfluss zurück ins Meer gelangt. Somit gibt es außer einer kleinen zeitlichen Differenz keinen Unterschied in der Summe der Nährstoffrückflüsse zwischen am Strand

lieengelassenem und in einer Düne verarbeitetem Material. Das Argument, dass das angeschwemmte Treibsel allein deswegen abtransportiert werden müsse, damit die beinhalteten Stoffe nicht zur Eutrophierung der Ostsee beitragen, ist trotzdem nur bedingt haltbar. Die Verwitterung ist ein natürlicher Prozess und neben den erwähnten Biotopen, die bei der Trocknung am Strand entstehen, ist auch der Rückfluss Teil des natürlichen Nährstoffkreislaufes. Zudem stellt der Zerfall von Treibsel einen natürlichen Nährstoff-Input in die eher nährstoffarmen Strandökosysteme dar (LEVY et al. 2014, DUGAN et al. 2011). Das Problem der Eutrophierung der Meere muss an anderen Stellen angegangen werden.

6.2 Vegetation und Küstenschutz

Da das Treibsel langfristig vollständig zersetzt wird, ist davon auszugehen, dass die Höhe der Dünen zudem mit der Zeit abnimmt. Natürliche Kompaktion ist ein weiterer Faktor, der diesen Prozess unterstützt, aber dies geschieht auch bei anderen aufgeschütteten Wallanlagen. Als Unterbau eignet sich dabei *Zostera* besser als *Fucus*. Der Wassergehalt von *Fucus* ist gegenüber dem von *Zostera* erheblich höher. Daher ist der Masse- und Größenverlust der Algen während der Trocknung und/ oder Zersetzung ausgeprägter (ZIEGLER, pers. Mitteilung, 2016) und die zu erwartende Kompaktion wäre stärker. Es müsste letztendlich also mehr Material für dieselbe Höhe aufgewendet werden. Darüber hinaus werden bei der Kompostierung von Seegrass an sich keine geruchlich wahrnehmbaren Schwefelwasserstoffverbindungen freigesetzt (POSIMA 2018; ZIEGLER, pers. Mitteilung, 2016). Ein genereller Ausschluss von *Fucus* stellt diese Empfehlung jedoch keineswegs dar.

Ein dem Höhenverlust der Düne gegensteuernder Prozess ist die Sandakkumulation an der Düne in windberuhigten und bewachsenen Bereichen. Strandhafer eignet sich hervorragend zum Bepflanzen von Dünen. Es ist ohnehin eine Pionierpflanze auf offenem, locker bewegtem Sand und ist zudem unempfindlich gegenüber Trockenheit und Sandüberschüttung. Letzteres ist eine ideale Eigenschaft, um auf der Luvseite als Dünenbefestigung zu fungieren. Strandroggen eignet sich eher für die Leeseite der Dünen.

Verwitternde Vegetationsreste beider Gräserarten bilden wiederum für andere Pflanzen eine Ansiedlungsgrundlage (AICHELE/ SCHWEGLER 2013). Die erfolgreiche Anwendung zeigt sich in Eckernförde durch den im Gegensatz zu den danebenliegenden Sandkern-Dünen ausgeprägteren Bewuchs der angelegten Treibseldüne. Das Anwachsen der Dünenlandschaft in Weidefeld ist ebenso ein Indiz für die Eignung von Strandhafer als „Sandfänger“. Lediglich aufgrund der aus touristischen Gründen durchgeführten Pflege und Bewirtschaftung des Strandbereichs – und natürlich der Nutzung von Touristen –, ist das Wachstum zur Wasserkante hin gehemmt. Das vor Ort angespülte Treibsel wird jedoch regelmäßig auf der vom Wasser aus betrachtet vordersten Dünenreihe verteilt. Dies trägt so zu einer sukzessiven Erhöhung bei, was in Zeiten eines prognostizierten Meeresspiegelanstiegs eine adaptive Strategie darstellt. Außerdem scheint das Ausstreuen des Treibselns zwischen den nitrophilen Strandhaferpflanzen eine hervorragende Düngemethode zu sein (KALMAR, pers. Mitteilung, 2017).

Ein weiterer Vorteil ist die Auswirkung auf den Neophyt *Rosa rugosa*. Dieses Rosengewächs ist als Befestigungspflanze auf Dünen ungeeignet und daher unerwünscht, da das Wurzelsystem von *Rosa rugosa* deutlich weniger ausgeprägt ist als das von *X Calammophila baltica*, dessen Wurzeln tiefer in den Untergrund eindringen. Hinzu kommt, dass *Rosa rugosa* das heimische *X Calammophila baltica* verdrängt (KALMAR, pers. Mitteilung, 2017; ZIEGLER, pers. Mitteilung, 2016). Die Verteilung von Treibsel auf Dünen hingegen sorgt für einen Rückgang von *Rosa rugosa* und fördert die Vitalität von *X Calammophila baltica* (KALMAR, pers. Mitteilung, 2017). Dies wäre aus botanischer und biologischer Sicht interessant und eine akurate wissenschaftliche Untersuchung wert.

In Eckernförde wiederum kann das Verstreuen nur bedingt durchgeführt werden. Die angelegte Treibseldüne ist zu schmal für die Gesamtmenge an angespülter Biomasse, da sie zwischen Promenade und touristisch ausgelegtem Strandbereich räumlich eingengt ist. Eine Verbreiterung ist aus stadtplanerischer Sicht somit ausgeschlossen. Ein weiterer zu beachtender Faktor ist die subjektive Wahrnehmung der Touristen und Einwohner von Treibsel. Es müsste sicherlich Überzeugungs- und Aufklärungsarbeit geleistet werden, um die Menschen für diese (bisher) „unkonventionelle“ Idee zu gewinnen. Es bietet sich jedoch das Potenzial an, die Treibseldüne zu erweitern und über die gesamte Länge der Strand-Stadt-Schnittstelle zu ziehen. Wird das Treibsel mit Sand beschichtet und die Düne

bepflanzt, werden sich weder Touristen noch Einwohner über ästhetische oder möglicherweise geruchsbelästigende Aspekte des verarbeiteten Treibselns beschweren können.

Im Hinblick auf den Klimawandel und die exponierte Lage der Stadt Eckernförde direkt am Meer, ist, obwohl ein Meeresspiegelanstieg verbunden mit Sturmfluten bei weitem nicht die Ausmaße wie dieselbe Kombination an der deutschen Nordseeküste haben wird, eine Verstärkung der Küstenschutzmaßnahmen eine sinnvolle Investition in die Zukunft. Nach Aussage des Klima- und Küstenforschers Dr. Hans-Jörg Markau sei der Hochwasserschutz der Stadt ohnehin ausbaufähig (SHZ 2017).

Durch eine zunehmende Anzahl an Stürmen und extremen Wetterlagen wird die Menge an angeschwemmten Treibseln in Zukunft vermutlich steigen (SHZ 2016, LLUR 2014). Langfristig jedoch könnten der Klimawandel und anthropogene Einflüsse wahrscheinlich zu einer Abnahme der Seegraswiesen in der Ostsee führen. Höhere Wassertemperaturen, insbesondere aber verstärkte Nährstoff- und Sedimentfrachten, welche die Lichtverfügbarkeit im Wasser reduzieren und das Wachstum von wiederum schattenwerfenden Mikroalgen fördern, sowie eine geringere Sauerstoffkonzentration im Wasser schaden den Seegraswiesen (BOBSIEN 2014, LLUR 2014, MOSSBAUER et al. 2012, FOURQUREAN et al. 1997). *Zostera marina* ist an eher niedrigere Nährstoffkonzentrationen angepasst (LANU 2008).

6.3 Analyse der Mikroskopieergebnisse

Die Intention der mikroskopischen Untersuchung des Materials aus dem Düneninneren in Eckernförde war es, Rückschlüsse auf die unterschiedliche Farbgebung des Treibselns zu erlangen. Erste Überlegungen noch am Ausgrabungsort kamen zu der Auffassung, dass ein Pilz die bernsteinfarbene Materialfarbe verursacht haben könnte. Abbildung 9 (siehe Abschnitt *Ergebnisse*) gibt tatsächlich Hinweise auf einen Pilzbefall. Der exemplarisch abgebildete, runde und nicht zellgebundene, und daher der Zellschicht auf- oder unterliegende Fleck, könnte eine Pilzkolonie darstellen. Hyphen oder gar Myzelien konnten, trotz Verdachtsfällen bei einer vorangegangenen, nicht fotodokumentierten

Mikroskopie-Analyse, nicht ausgemacht werden. Die vorgefundenen Flecken waren darüber hinaus auch nur sporadisch vorhanden und schienen keinen Einfluss auf die flächendeckende Farbgebung zu haben. Daher kann die Vermutung einer pilzverursachten Verfärbung nicht erhärtet werden. Es könnte sich folglich auch um etwas anderes handeln, beispielsweise um Mikroalgen (vgl. KREMER 2002). Daher wird vermutet, dass die Verfärbung des organischen Materials in Eckernförde eher einen bakteriellen als einen pilzlichen Hintergrund hat.

Unter Einbezug der Draufsichten der Abbildung 7 und im Vergleich zu Bild 10, welches eine Aufnahme eines schwarzgefärbten Treibselstückes darstellt und auf dem der Zellinhalt keine bernsteinähnliche Farben aufweist, ist erkennbar, dass die Verfärbung aus dem Zellinneren stammt. Der Zellinhalt (Zellplasma) stellt sich in einer kristallinen Form dar und ist deutlich bernsteinfarben. Dieses scheint folgend auszutreten, denn die beschriebene formlose Masse war erst dann auffindbar, wenn die umliegenden Zellen inhaltsleer sind (siehe Abbildung 8). Wenngleich viele Zellwände intakt aussehen, müssen sie doch an einigen Stellen aufgebrochen sein. Eine Beschädigung beim Präparieren der Probe, was eben zu jenem sichtbaren Ergebnis führen könnte, kann nicht ausgeschlossen werden, wird aber aufgrund der Analogie weiterer Beobachtungen an anderen Probestücken nicht als maßgeblich in Betracht gezogen.

Die unterschiedliche Farbgebung könnte ihren Ursprung von aeroben und anaeroben Organismen haben. Je nach dem, ob bei der Zersetzung Sauerstoff vorhanden ist oder nicht, sind unterschiedliche Bakterienarten beteiligt. Allerdings wurde kein Schwefelwasserstoffgeruch wahrgenommen, was ein Argument gegen anaerobe Verhältnisse darstellt (vgl. SCHEFFER/ SCHACHTSCHABEL 2002). Ebenfalls gegen diese Theorie spricht das Auffinden der sich unmittelbar abwechselnden Farbhorizonte. Wahrscheinlicher könnten hingegen ganz schlicht verschiedene Zersetzungsstadien sein. Für eine definitive Antwort auf diese Fragestellung sind weitere Tests vonnöten.

7. Fazit

Seegras ist ein natürlicher und kostengünstiger Rohstoff. Zusammen mit Makroalgen wird es regelmäßig an den Stränden der Ostsee angeschwemmt und bietet Habitate für verschiedene Lebensformen. Aus ästhetischer Sichtweise ist es für den in dieser Region wirtschaftlich elementaren Tourismussektor jedoch eher ein Ärgernis. Das Treibsel wird daher in den meisten Fällen entsorgt. Das Räumen ist jedoch kostenintensiv und eine Deponierung des Materials nicht zulässig. Eine thermische Verwertung durch Verbrennung stellt keine sinnvolle Lösung dar, weil Treibsel nur über einen sehr geringen Energiegehalt verfügt (vgl. MLUR 2011).

Ein Kompromiss zwischen ökologischer und ökonomischer Sichtweise scheint angebracht zu sein. Im Winter könnten Akkumulationen von Treibsel am Strand liegengelassen werden, um der Stranderosion gerade in diesen eher stürmisch geprägten Monaten entgegen zu wirken (vgl. DEIDUN et al. 2009). Im Sommer wird diese Handhabung aufgrund touristischer Aspekte jedoch kaum haltbar sein. MOSSBAUER et al. (2012) schlagen unter anderem eine Wechselfolge von gereinigten und natürlich belassenen Stränden vor. Da allerdings die verschiedenen Küstengemeinden an der Ostsee im Tourismussektor teils gegeneinander konkurrieren, werden von dieser Idee vermutlich nur wenige Personen überzeugt werden können.

Eine andere Studie hingegen hat festgestellt, dass sich die Menge an angespültem Treibsel nur bis zu einem bestimmten Wert akkumuliert und die Masse danach konstant bleibt. Dieser Wert ist je nach Korngröße des Stranduntergrundes und der Windexponierung variabel. Zusätzlich angeschwemmtes Material würde zurück ins Meer gespült werden (HAMMANN/ ZIMMER 2014). Allerdings bezieht sich die Studie nur auf einen einzigen Untersuchungsort an der Ostsee und kann daher nicht für die gesamte Küstenlinie abstrahiert werden.

Somit wird zumindest in der Sommersaison ein Entsorgen von angeschwemmten Treibsel weiter praktiziert werden. Die Schaffung einer Koordinationsstelle für die gesamte Ostseeküste würde dabei jeder Gemeinde bei der Aufgabe helfen, das Material einem Verwendungszweck zuzuführen. Zudem würde Informationsvermittlung über die

vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten von Seegras die Nachfrage fördern. Dafür müssen kommunal übergreifend Interaktionen und Kooperationen unterschiedlicher Akteure gestärkt werden. Am Beispiel des in dieser Arbeit aufgesuchten Beprobungsort auf Fehmarn zeigt sich exemplarisch, dass bezüglich einer Treibselverwertung noch Nachholbedarf besteht. Zentrale Sammelstellen, eine angepasste (und einheitliche) Gesetzgebung sowie ergänzende Verwertungs-Pilotprojekte sind weitere Ansatzpunkte, um eine gewisse Nachfragegrundlage und eine Rohstoffversorgungssicherheit zu initiieren. All dies sind Ziele, denen sich das POSIMA-Projekt verschrieben hat (POSIMA 2017). Die Anlegung von Treibseldünen ist eines dieser Pilotprojekte.

Vergleicht man die Nährstoffergebnisse und die zeitliche Genese der Treibseldünen, bestätigt es die Annahme, dass innerhalb der Düne eine vollständige Zersetzung und Kompostierung der Biomasse über die Jahre stattgefunden hat bzw. stattfindet. In Dünen, die erst vor wenigen Jahren angelegt wurden, sind die Kohlenstoff- und Stickstoffkonzentration verglichen zu anderen Strandabschnitten deutlich erhöht. In Dünen, die älter als ein Jahrzehnt sind, konnten kaum bis keine Nährstoffreste ausfindig gemacht werden. Auf Versickerungs- und Auswaschungsprozesse konnte anhand von unterhalb von jüngerer Düne festgestellten Phosphatkonzentrationen geschlossen werden. Der Verwitterungsprozess findet bzw. fand an den Untersuchungsstellen unter aeroben Bedingungen statt.

Einen besseren Schutz gegen Hochwasser stellen die Treibseldünen gegenüber reinen Sanddünen jedoch nur dann dar, wenn die überziehende Vegetation dicht ist und die Sandschichten mit tiefreichenden Wurzelsystemen durchzogen sind. Es gelten also ähnliche Bedingungen bezüglich des Erosionspotenzials wie bei „natürlichen“ Sanddünen. Aufgrund des nährstoffhaltigen Kerns von Treibseldünen kann die Oberfläche aber relativ schnell von Strandvegetation bewachsen werden. Ein Verteilen von Treibsel zwischen den Pflanzen eignet sich zudem als Düngemethode. Gegen extreme, langanhaltende Abrasionsraten hält aber auch dies nicht vor, wie sich am Beispiel Weidefeld gut erkennen lässt. Gegen temporäre Sturmfluten stellen sie hingegen bei guter Instandhaltung ein probates Schutzmittel dar.

Würde das an den Strand angeschwemmte Material getrocknet und dann zum Dünenbau oder der Dünenpflege verwendet werden, würde ein Großteil der Kosten eines Abtransportes entfallen. Zudem würden die örtlichen Gemeinden nachhaltigen und ökologischen Küstenschutz betreiben. Wie viel kostengünstiger der Bau einer Treibseldüne gegenüber eines Abtransportes des Materials ist, kann und muss jedoch im Einzelfall geprüft werden. Menge und Art des Treibsel spielen hierbei eine große Rolle. Es kann also keine gesamtküstenumspannende Empfehlung ausgesprochen werden, sondern es gilt regional zu überprüfen, in welcher Form und in welchem Umfang das angespülte Treibsel verwertet werden kann. Es gibt viele weitere Ansatzmöglichkeiten, die in Zukunft eruiert und umgesetzt werden könnten. Eine strandnahe Weiterverwendung oder eine kostengünstige und geschlossene Produktionskette würden jedoch finanzielle Entlastungen für die Ostseegemeinden bedeuten und ökologische Nachhaltigkeit fördern.

Daher ist es erforderlich das Projekt „Treibseldüne“ weiter voranzutreiben. Weitere Studien bezüglich der farblichen Treibsel-Bodenhorizonte in Eckernförde oder der Auswirkung von Treibsel als Dünger auf die Beziehung *Rosa rugosa* – *X Calammophila baltica*, aber auch individuelle Langzeitstudien zur Untersuchung der Sandakkumulation durch Dünenbewuchs gegenüber dem natürlichen Erosionspotenzial der Treibseldünen im Vergleich zu Sandkern-Dünen sind anzuregen. Für eine effektive küstenweite Verwendung von Treibsel gilt es ebenfalls die Gesamtmenge und insbesondere auch die Teilmengen der Treibselkomponenten, die an den Stränden angespült werden, zu eruieren.

8. Literaturverzeichnis

AHRENDT, K. (2010): Ad hoc Bewertung der Auswirkungen der Entfernung des Wellenbrechers an der Südmole von Port Olpenitz auf die Strandstabilität. Büro für Umwelt und Küste, Kiel.

AICHELE, D. und H. W. SCHWEGLER (2013): Unsere Gräser. Kosmos-Naturführer. Süßgräser, Sauergräser und Binsen. 13. Auflage, Franckh-Kosmos Verlags-GmbH, Stuttgart.

BRAUN, M.; Vorstandssprecher Landschaftspflegeverein Dummersdorfer Ufer. Kontakt: LPV Dummersdorfer Ufer, Resebergweg 11, 23569 Lübeck.

BOBSIEN, I. (2014): Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Blasentang (*Fucus vesiculosus*) und das gewöhnliche Seegras (*Zostera marina*) in der Ostsee. Report. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR), RAdOst-Berichtreihe (24), Flintbek.

City of Holdfast Bay (2012): Beach Wrack (Seagrass) Removal Policy. URL: [https://www.holdfast.sa.gov.au/contentFile.aspx?filename=Beach%20Wrack%20\(Seagrass\)%20Removal%20Policy.pdf](https://www.holdfast.sa.gov.au/contentFile.aspx?filename=Beach%20Wrack%20(Seagrass)%20Removal%20Policy.pdf) (Stand: 27.10.2017).

DEIDUN, A., SALIBA, S. und P. J. SCHEMBRI (2009): Considerations on the Ecological Role of Wrack Accumulations on Sandy Beaches in the Maltese Islands and Recommendations for Their Conservation Management. In: C. P. DA SILVA (Hrsg.): Journal of Coastal Research, Special Issue 56, S. 410-414.

DONGES, L., HALLER, I. und G. SCHERNEWSKI (2013): Tourists' Perception of Coastal Changes – A Contribution to the Assessment of Regional Adaptation Strategies? In: SCHMIDT-THOMÉ, P. und J. KLEIN (Hrsg.): Climate Change Adaptation in Practice: From Strategy Development to Implementation. EA, S. 239-252.

DUGAN, J. E. und D. M. HUBBARD (2010): Loss of Coastal Strand Habitat in Southern California: The Role of Beach Grooming. In: BOWEN, T. (Hrsg.): Estuaries and Coasts, (33), S. 67-77.

DUGAN, J. E., HUBBARD, D. M., PAGE, H. M. und J. P. SCHIMMEL (2011): Marine Macrophyte Wrack Inputs and Dissolved Nutrients in Beach Sands. In: BOWEN, T. (Hrsg.): Estuaries and Coasts (34), S. 839-850.

EUCC-D (2013): Factsheet: Risiko und Potential - Küstentourismus an der Ostsee zwischen Klimawandel, Wachstum und Nachhaltigkeit. Die Küsten Union Deutschland e.V., Rostock-Warnemünde. URL: http://www.klimzug-radost.de/sites/default/files/Factsheet_Klimafolgen-Tourismus.pdf (Stand: 04.11.2017).

EUCC-D (2016): Protokoll: Austauschveranstaltung zwischen den Projekten *KliWaKom* und *Klimabündnis Kieler Bucht*. URL: <http://www.eucc-d.de/veranstaltungen-und-wettbewerbe/articles/austauschveranstaltung-kliwakom-und-kbkb.html> (Stand: 16.11.2017).

FITTER, R., FITTER, A. und M. BLAMEY (2007): Pareys Blumenbuch: Über 2500 Arten in 3200 Farbzeichnungen. Kosmos-Naturführer. 4. Auflage, Franckh-Kosmos Verlags-GmbH, Stuttgart.

FOURQUREAN, J. W., MOORE, T. O., FRY, B. und J. T. HOLLIBAUGH (1997): Spatial and temporal variation in C:N:P ratios, $\delta^{15}\text{N}$, and $\delta^{13}\text{C}$ of eelgrass *Zostera marina* as indicators of ecosystem processes, Tomales Bay, California, USA. In: PECK, M. A., PETERSON, C. H., RICHARDSON, K. und R. P. WILSON (1997): Marine Ecology Progress Series, Vol. 157, S. 147-157.

GERNANDT, P. (2007): Bodenkunde in der Geographie. Diercke Spezial. Westermann Verlag, Braunschweig.

HAMMANN, S. und M. ZIMMER (2014): Wind-Driven Dynamics of Beach-Cast Wrack in a Tide-Free System. In: D. A. SALAS-DE-LEÓN (Hrsg.): Open Journal of Marine Science (4), S. 68-79.

HARRIS, C. und D. STRAYER (2011): The Ecology of Wrack: Decomposition and Use By Invertebrates On Natural and Engineered Shorelines of the Hudson River. In: D. J. YOZZO, S. H. FERNALD und H. ANDREYKO (Hrsg.): Final Reports of the Tibor T. Polgar Fellowship Program, 2009, Hudson River Foundation, Sektion 4, S. 1-29.

HEMMINGA, M. A. und J. NIEUWENHUIZE (1990): Seagrass Wrack-induced Dune Formation on a Tropical Coast (Banc d'Arguin, Mauritania). In: BAIRD, D., BURDIGE, D. J., ELLIOTT, M., JENNERJAHN, T. und S. MITCHELL (Hrsg.): Estuarine, Coastal and Shelf Science (31), S. 499-502.

HOOTON, N., MILLER, D., THETFORD, M. und S. CLAYPOOL (2016): Building Coastal Dunes with Sea Oats and Surrogate Wrack. University of Florida. IFAS Extension. URL: <https://edis.ifas.ufl.edu/uw409> (Stand: 23.02.2018).

ILLERA-VIVES, M., SEOANE LABANDEIRA, S. und M. E. LÓPEZ-MOSQUERA (2013): Production of compost from marine waste: Evaluation of the product for use in ecological agriculture. URL: <https://www.researchgate.net/publication/236021871> (Stand: 07.12.2017).

ILLERA-VIVES, M., SEOANE LABANDEIRA, S., BRITO, L. M., LÓPEZ-FABAL, A. und M. E. LÓPEZ-MOSQUERA (2015): Evaluation of compost from seaweed and fish waste as a fertilizer for horticultural use. In: BOWER, J. P., COLLA, G., GUO, W. W., KONDO, S., MARTINEZ GÓMEZ, P., PENNISI, B. und D. SCHWARZ (Hrsg.): Scientia Horticulturae, Vol. 186, S.101-107.

JÄGER, E. J. (2011): Rothmaler – Exkursionsflora von Deutschland. Gefäßpflanzen: Grundband. 20. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Berlin.

KALMAR, T. J. J.; Strandbetreiber und Restaurantbesitzer. Kontakt: Strandrestaurant *Lobster*, Strandstraße 1, 24376 Kappeln.

KLIEWE, H. und K. SCHWARZER (2002): Die deutsche Ostseeküste. In: LIEDTKE, H. und J. MARCINEK (Hrsg.): Physische Geographie Deutschlands. 3. Auflage, Klett-Perthes, Gotha/ Stuttgart.

KN-Online (2016): Badeorte in SH: Dauerkampf gegen Strand-Müll. URL: <http://www.kn-online.de/News/Aktuelle-Nachrichten-Schleswig-Holstein/Nachrichten-Schleswig-Holstein/Schleswig-Holsteins-Badeorte-im-Dauerkampf-gegen-Strand-Muell> (Stand: 17.10.2017).

KREMER, B. J. (2002): Das große Kosmos-Buch der Mikroskopie. Franckh-Kosmos Verlags-GmbH, Stuttgart.

KrWG (2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das durch Artikel 2 Absatz 9 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist. URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/krwg/KrWG.pdf> (Stand: 06.12.2017).

LANU (2008): Kartierung mariner Pflanzenbestände im Flachwasser der Ostseeküste – Schwerpunkt *Fucus* und *Zostera*. Außenküste der schleswig-holsteinischen Ostsee und Schlei. Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein (inzwischen: Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR)), Flintbek.

LEVY, J., DETHIER, M. und A. LOWE (2014): Invertebrate Abundance and Rate of Decomposition in Beach Wrack of *Zostera marina* and *Fucus distichus*. In: Friday Harbor Laboratories Student Research Papers, University of Washington. URL: <http://hdl.handle.net/1773/27252> (Stand: 01.11.2017).

LLUR (2006): Die Farn- und Blütenpflanzen Schleswig-Holsteins. Rote Liste. Band 1. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Flintbek. URL: https://www.umweltdaten.landsh.de/nuis/upool/gesamt/pflanzen/rl_pflanzen1.pdf (Stand: 16.11.2017).

LLUR (2014): Factsheet: Das Große Seegras – *Zostera marina*. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Flintbek. URL: http://www.klimzug-radost.de/sites/default/files/flyer_seegras.pdf (Stand: 04.11.2017).

M. P. Rogers & Associates PL (2016): Ocean Reef Marina Beach Wrack Management. City of Joondalup. K1126, Report R455 Rev 3.

MariLim (2017): Gesellschaft zur Gewässeruntersuchung mbH. Wasserrahmenrichtlinie. BALCOSIS. URL: <http://www.marilim.de/de/informationen/wasserrahmenrichtlinie/balcosis.html> (Stand: 23.10.2017).

MARKAU, H.-J. (2003): Risikobetrachtung von Naturgefahren. Analyse, Bewertung, und Management des Risikos von Naturgefahren am Beispiel der sturmflutgefährdeten Küstenniederungen Schleswig-Holsteins. Dissertation. CAU Kiel. URL: <http://www.sterr.geographie.uni-kiel.de/mare/Diss-gesamt-H.-J.Markau.pdf> (Stand: 23.11.2017).

Merck (2017): 111151 - MColorTest Kompaktlabor für Wasseruntersuchungen. URL: http://www.merckmillipore.com/DE/de/product/Phosphate-Test-in-freshwater-and-seawater,MDA_CHEM-114661#documentation (Stand: 21.12.2017).

Merriam-Webster (2017): Dictionary by Merriam-Webster. URL: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/wrack> (Stand: 23.10.2017).

MICHALAK, I., WILK, R. und K. CHOJNACKA (2016): Bioconversion of Baltic Seaweeds into Organic Compost. In: NZIHOU, A. (Hrsg., 2017): Waste and Biomass Valorization, Vol. 8 (6), S. 1885-1895.

MLUR (2011): Energiepotenzial aus Biomasse und Versorgungsbeitrag für das Jahr 2020. Studie des Ministeriums für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (heute: Ministeriums für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (MELUR)), Kiel. URL: http://www.schleswig-holstein.de/DE/Schwerpunkte/Energiewende/Daten/pdf/Biomassepotenzialstudie.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (Stand: 01.02.2018).

MOSSBAUER, M., HALLER, I., DAHLKE, S. und G. SCHERNEWSKI (2012): Management of stranded eelgrass and macroalgae along the German Baltic coastline. In: DE JONGE, V. N. (Hrsg.): Ocean & Coastal Management (57), S. 1-9.

Nationalpark Wattenmeer (2012): Treibsel-Reduzierung. URL: <http://www.nationalpark-wattenmeer.de/nieders%C3%A4chsisches-wattenmeer/natur-wissen/forschung/treibselreduzierung> (Stand: 28.10.2017).

NORDSTROM, K. F., JACKSON, N. L. und K. H. KOROTKY (2011): Aeolian Sediment Transport Across Beach Wrack. In: ROBERTS, T. M., ROSATI, J. D. and P. WANG (Hrsg.): Journal of Coastal Research, Special Issue 59, S. 211-217.

OZ (2017): Binz überlässt Seetang meist der Natur URL: <http://www.ostsee-zeitung.de/Vorpommern/Ruegen/Binz-ueberlaesst-Seetang-meist-der-Natur> (Stand: 29.01.2018).

OZ (2018): Seegras-Anlage zur Saison fertig. URL: <http://www.ostsee-zeitung.de/Mecklenburg/Grevesmuehlen/Die-Loesung-fuer-das-Seegras-Problem> (Stand: 13.03.2018).

PACKSCHIES, M; Abteilungsleiter Naturschutz und Landschaftsplanung Eckernförde. Kontakt: Bauamt Eckernförde, Rathausmarkt 4-6, 24340 Eckernförde.

POSIMA (2017): Pilotregion Ostseeküste Schleswig-Holstein: Initiierung einer Wertschöpfungskette Treibsel als Maßnahme zur Anpassung an den Klimawandel. Das Treibsel. URL: <https://posima.de/das-treibsel.html> (Stand: 01.03.2018).

SCHEFFER, F. und P. SCHACHTSCHABEL (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg/ Berlin.

SHZ (2014): Sandaufspülung. Weidefelder Strand wächst wieder. URL: <https://www.shz.de/8434231> (Stand: 27.10.2017).

SHZ (2016): Seegras-Plage. Lösungen gesucht: Ungeliebtes Strandgut kommt Küstenorten teuer zu stehen. URL: <https://www.shz.de/15112381> (Stand: 27.10.2017).

SHZ (2017): Küstenschutz mit hohem Freizeitwert. URL: <https://www.shz.de/15754581> (Stand: 30.01.2018).

Stadt Eckernförde (2017): Bevölkerung. Bevölkerung am 31.12. des Jahres. URL: http://www.eckernfoerde.de/?object=tx_2460_3882_1 (Stand: 07.11.2017).

SVZ (2016): Ungeliebtes Strandgut in MV: Wohin mit dem ganzen Seegras? URL: <https://www.svz.de/15114511> (Stand: 17.11.2017).

Umweltbundesamt (2016): Abfallrecht. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/abfallrecht> (Stand: 06.12.2017).

KHAN, W., RAYIRATH, U. P., SUBRAMANIAN, S., JITHESH, M. N., RAYORATH, P. HODGES, D. M., CRITCHLEY, A. T., CRAIGIE, J. S., NORRIE, J. und B. PRITHIVIRAJ (2009): Seaweed Extracts as Biostimulants of Plant Growth and Development. In: LUDWIG-MÜLLER, J. (Hrsg.): Journal of Plant Growth Regulation, Vol. 28 (4), S. 386-399.

WeltN24 GmbH (2010): Tief „Daisy“ nahm Norddeutschland im Sturm. URL: <https://www.welt.de/article5798750> (Stand: 05.01.2018).

WeltN24 GmbH (2013): Neustart für Projekt Port Olpenitz? URL: <https://www.welt.de/article121036478> (Stand: 05.01.2018).

WeltN24 GmbH (2017): So extrem wütete die Sturmflut an der Ostsee. URL: <https://www.welt.de/vermishtes/article160889342> (Stand: 23.02.2018).

ZIEGLER, RÜDIGER; Landschaftsarchitekt. Kontakt: Ostsee Info-Center, Jungfernstieg 110, 24340 Eckernförde.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Weiterhin versichere ich, dass diese Arbeit noch nicht als Abschlussarbeit an anderer Stelle vorgelegen hat.

Die eingereichte schriftliche Fassung der Arbeit entspricht der auf dem elektronischen Speichermedium (*1952-Machnicki.pdf*).

Ich stimme zu, dass meine Abschlussarbeit durch das Geographische Institut der CAU digital gespeichert und auf Plagiate überprüft wird und dass ein gedrucktes Exemplar in der Bibliothek des Geographischen Instituts öffentlich zugänglich wird. Meine Urheberrechte als Autor bleiben von dieser Einwilligung unberührt. Einen Sperrvermerk kann ich jederzeit beim Prüfungsausschuss beantragen.

Datum

Unterschrift