

## **Endbericht**

### **Treibsel an den niedersächsischen Küsten**

# **-Aufkommen, Zusammensetzung und Möglichkeiten zur nachhaltigen klimaneutralen Verwertung**

erstellt durch das

### **Fachgebiet Nachhaltige Energie- und Umwelttechnik (NEUTec)**

Rudolf-Diesel-Straße 12, 37075 Göttingen - Germany

Telefon: +49/ 551/ 30 73 8-0, Fax: +49/ 551/ 30 73 8-21

Email: [neutec@hawk-hhg.de](mailto:neutec@hawk-hhg.de), Homepage: [www.hawk-hhg.de/neutec](http://www.hawk-hhg.de/neutec)

Bearbeiter: Ahrens, F.; Wallmann, R.; Loewe, K.

Auftraggeber:

### **Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz und Landschaftsentwicklung**

Calenberger Straße 2, 30168 Hannover – Germany

Dezember 2011

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis .....	XIII
1 Einleitung .....	1
1.1 Hintergrund .....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
2 Vorstellung der geleisteten Arbeiten.....	3
2.1 Arbeitspaket I: Ermittlung des Ist-Zustandes .....	3
2.2 Arbeitspaket II: Probenahme und Charakterisierung .....	3
2.3 Arbeitspaket III: Versuche zur Aufbereitung des Treibseles .....	4
2.4 Arbeitspaket IV: Auswertung und Konzeptentwicklung .....	5
3 Grundlagen .....	6
3.1 Klassifizierungen von Treibgut .....	6
3.2 Organisation des Küstenschutzes in Niedersachsen.....	7
3.2.1 Deichverbände .....	7
3.2.2 Staatlicher Küstenschutz.....	8
3.2.3 Rechtliche Grundlagen zu Verwertung und Entsorgung von Treibsel ..	9
3.2.4 Spannungsfeld Deichvorland: Naturschutz und landwirtl. Flächennutzung.....	10
3.3 Grundlagen und Verfahren der Biogasgewinnung .....	12
3.4 Grundlagen thermische Verwertung .....	18
3.4.1 Verbrennung .....	18
3.4.2 Hydrothermale Carbonisierung.....	19
3.4.3 Pyrolyse .....	20
3.5 Grundlagen Biostabilität .....	20
4 Material und Methoden.....	25
4.1 Literaturrecherche .....	25
4.2 Umfrage – allgemeines Vorgehen .....	25
4.3 Potentialabschätzung/Zwischenbericht .....	26

4.4	Probenahme .....	27
4.4.1	Standortwahl und Organisation .....	27
4.4.2	Treibselprobenahme an der niedersächsischen Küste .....	27
4.5	Methoden zur Charakterisierung des Treibsel .....	30
4.5.1	Bestimmung der Schüttraumdichte.....	30
4.5.2	Trockensubstanz.....	31
4.5.3	Organische Trockensubstanz.....	31
4.5.4	Brenn- und Heizwert.....	32
4.5.5	Ascheschmelzverhalten .....	33
4.5.6	Kohlenstoff-, Wasserstoff- Stickstoff- und Sauerstoffgehalt .....	33
4.5.7	Schwefelgehalt.....	34
4.5.8	Chloridgehalt.....	35
4.5.9	Schwermetallgehalt.....	35
4.5.10	Biostabilität.....	36
4.5.10.1	Atmungsaktivität mit der AT <sub>4</sub> -Aufstockungsmethode .....	37
4.5.10.2	Bestimmung der Humifizierungsart .....	39
4.5.10.3	DOC und TOC .....	39
4.5.10.4	Infrarotspektroskopische Untersuchungen .....	40
4.5.10.5	REM-Aufnahmen und Energiedispersive Röntgenanalyse (EDX)....	41
4.6	Untersuchungen zur energetischen Verwertung.....	41
4.6.1	GRW-Biogasertragstest .....	42
4.6.2	Festbett-Feststoffvergärung .....	43
4.6.3	Zweistufige Vergärungsanlage .....	45
4.6.4	Verbrennung .....	47
4.7	Methoden zur Aufbereitung des Treibsel .....	47
4.7.1	Trocknen .....	47
4.7.2	Silierung .....	48
4.7.3	Häckseln .....	48
4.7.4	Waschversuch.....	48
4.7.5	Hydrothermale Carbonisierung.....	49
4.7.6	Pyrolyse .....	49
4.8	Arbeitsgruppe Treibsel .....	49
4.9	Logistikkonzept .....	50

5	Ergebnisse .....	51
5.1	Literaturrecherche .....	51
5.1.1	Zusammensetzung des Treibseis .....	51
5.1.2	Aufkommen .....	58
5.1.3	Bergung .....	62
5.1.4	Entsorgung und Verwertung .....	62
5.1.4.1	Kompostierung .....	63
5.1.4.2	Humifizierung .....	64
5.1.4.3	Vergraben/Verkuhlen .....	65
5.1.4.4	Häckseln und Verblasen .....	65
5.1.4.5	Verbrennung .....	66
5.1.4.6	Vergärung von Treibsel .....	73
5.1.4.6	Werkstoffliche Verwertung von Treibsel .....	76
5.2	Umgang mit Treibsel in anderen Regionen bzw. Ländern .....	77
5.2.1	Forschung und Praxis zu Ostseetreibsel .....	77
5.2.2	Nordamerika .....	82
5.2.3	Südamerika .....	83
5.2.4	Frankreich .....	84
5.2.5	Niederlande .....	85
5.2.6	Dänemark .....	85
5.3	Ergebnisse der Umfrage von 2009 .....	85
5.3.1	Aufkommen und Zusammensetzung .....	85
5.3.2	Erfassung des Treibselaufkommens 2009 bis 2011 .....	89
5.3.3	Jahreszeitliche Verteilung des Treibselaufkommens .....	90
5.3.4	Schüttraumdichte .....	91
5.3.5	Bergung und Transport .....	92
5.3.6	Verwertung .....	93
5.4	Charakterisierung des Treibseis .....	96
5.4.1	Bestimmung der Schüttraumdichte .....	102
5.4.2	Trockensubstanz .....	102
5.4.3	Organische Trockensubstanz .....	104
5.4.4	Brenn- und Heizwert .....	106
5.4.5	Ascheschmelzverhalten .....	107

5.4.6	Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Stickstoffgehalt .....	107
5.4.7	Schwefelgehalt.....	109
5.4.8	Chloridgehalt.....	110
5.4.9	Schwermetallgehalt.....	111
5.4.10	Biostabilität.....	112
5.4.10.1	Trockensubstanz und organische Trockensubstanz.....	112
5.4.10.2	Atmungsaktivität mit der AT <sub>4</sub> -Aufstockungsmethode .....	114
5.4.10.3	Bestimmung der Humifizierungsart .....	118
5.4.10.4	DOC und TOC .....	119
5.4.10.5	Infrarotspektroskopische Untersuchungen .....	120
5.4.10.6	REM-Aufnahmen und Energiedispersive Röntgenanalyse .....	121
5.4.10.7	Ergebnisse der Elementaranalyse.....	123
5.5	Untersuchungen zur energetischen Verwertung.....	126
5.5.1	GRW-Biogasertragstest .....	126
5.5.2	Festbett-Feststoffvergärung .....	129
5.5.3	Zweistufige Vergärungsanlage .....	130
5.6	Aufbereitung des Treibsel.....	133
5.6.1	Trocknen .....	133
5.6.2	Silierung .....	133
5.6.3	Waschversuch.....	133
5.6.4	Hydrothermale Carbonisierung.....	134
5.6.5	Pyrolyse .....	134
5.7	Arbeitsgruppe Treibsel .....	135
5.8	Logistikkonzept .....	136
6	Diskussion.....	143
6.1	Diskussion und Bewertung allgemeiner Parameter von Treibsel .....	143
6.2	Diskussion und Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich einer thermischen Verwertung von Treibsel .....	148
6.3	Biostabilität.....	159
6.3.1	Trockensubstanz und organische Trockensubstanz .....	160
6.3.2	Atmungsaktivität.....	161
6.3.3	Bestimmung der Humifizierungsart.....	162
6.3.4	TOC und DOC.....	162

6.3.5	Infrarotspektroskopische Untersuchung .....	164
6.3.6	Analytik mittels REM und EDX .....	164
6.3.7	CHN-Analyse .....	164
6.4	Diskussion der Ergebnisse zur biochemischen Konversion von Treibsel. ....	167
6.4.1	GRW-Biogasertragstests.....	168
6.4.2	Gaserträge der aufbereiteten Treibselproben.....	171
6.4.3	Gaserträge aus der Festbett-Feststoffvergärung.....	173
6.4.4	Gaserträge aus der zweistufigen Versuchsanlage.....	174
6.5	Treibsel als Brennstoff.....	175
6.6	Aufbereitung des Treibsel.....	176
6.6.1	Trocknen .....	176
6.6.2	Silieren .....	176
6.6.3	Waschversuch.....	176
6.6.4	Hydrothermale Carbonisierung.....	176
6.6.5	Pyrolyse .....	176
6.7	Logistikkonzept .....	177
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	178
8	Literaturverzeichnis .....	180
9	Anhang .....	185

## Tabellenverzeichnis

TABELLE 1:	ZUSÄTZLICHE ANSCHAFFUNGEN IM ARBEITSPAKET II .....	4
TABELLE 2:	VERGABE VON UNTERAUFTRÄGEN AN EXTERNE EINRICHTUNGEN IM RAHMEN DER STABILITÄTSUNTERSUCHUNGEN.....	5
TABELLE 3:	ZUSÄTZLICHE ANSCHAFFUNGEN IM ARBEITSPAKET III .....	5
TABELLE 4:	ZUORDNUNG DER DEICHVERBÄNDE ZU DEN NUMMERN IN DEN FOLGENDEN ABBILDUNGEN .....	8
TABELLE 5:	LAGERUNGSFORMEN DES TREIBSELS ZU DEN ZEITPUNKTEN DER PROBENAHMEN .....	29
TABELLE 6:	VERSUCHSANSÄTZE ZUR BESTIMMUNG DER ATMUNGSAKTIVITÄT NACH 4 TAGEN .....	38
TABELLE 7:	KENNDATEN UND PARAMETER DES VERSUCHSAUFBAUS .....	44
TABELLE 8:	KENNDATEN DES METHANBEHÄLTERS.....	47
TABELLE 9:	KENNDATEN DER EINGESETZTEN FÜLLKÖRPER DER FA. RATZ.....	47
TABELLE 10:	ÜBERSICHT DER EXPERIMENTELLEN TREIBSELSILIERVERFAHREN .....	48
TABELLE 11:	VERGLEICH VON TREIBSELPROBEN MIT ANDERER, AUSGEWÄHLTER BIOMASSE.....	55
TABELLE 12:	ERGEBNISSE DER TREIBSELANALYSE NACH BfN .....	57
TABELLE 13:	FEUERUNGSTECHNISCHE DATEN UND ABGASZUSAMMENSETZUNG DER VERBRENNUNGSVERSUCHE VON TREIBSEL NACH STRECKER .....	69
TABELLE 14:	AUSZUG AUS DEN EMISSIONSMESSUNGEN NACH SÜßMANN.....	71
TABELLE 15:	ANALYSEERGEBNISSE VON SCHWIMMHOLZ AUS DER OSTSEE .....	73
TABELLE 16:	VERGLEICH DER METHANAUSBEUTEN NACH MEISGEIER .....	75
TABELLE 17:	REGISTRIERTE TREIBSELMENGEN AUF RÜGEN .....	77
TABELLE 18:	SPEZIFISCHE METHANERTRÄGE UNTERSCHIEDLICHER ALGEN-GATTUNGEN .....	83
TABELLE 19:	UMFRAGEERGEBNISSE ZU AUFKOMMEN UND ZUSAMMENSETZUNG VON TREIBSEL .....	86
TABELLE 20:	DEICHVERBÄNDE MIT WEITERHIN BESTEHENDEN DATENLÜCKEN .....	86
TABELLE 21:	TREIBSELAUFKOMMEN 2007 UND 2008 INKLUSIVE DER GESCHÄTZTEN TREIBSELMENGEN .....	89
TABELLE 22:	TREIBSELAUFKOMMEN DER EINZELNEN DEICHVERBÄNDE IN 2010 UND 2011 .....	89
TABELLE 23:	KOSTEN DER ENTSORGUNG DES TREIBSEL FÜR DEN ZEITRAUM 2004 BIS 2008.....	95
TABELLE 24:	ERMITTELTE SCHÜTTTRAUMDICHTEN VON TREIBSEL AUS DEN JAHREN 2010 UND 2011 .....	102
TABELLE 25:	TROCKENSUBSTANZ- UND WASSERGEHALTE DER TREIBSELPROBEN.....	103
TABELLE 26:	ERGEBNISSE DER BESTIMMUNG VON ORGANISCHER TROCKENSUBSTANZ UND ASCHEGEHALT.....	104
TABELLE 27:	BRENN- UND HEIZWERTE DER TREIBSELPROBEN .....	106
TABELLE 28:	KOHLENSTOFF-, WASSERSTOFF- UND STICKSTOFFGEHALTE UND -VERHÄLTNISSE.....	108
TABELLE 29:	SCHWEFELGEHALTE DER TREIBSELPROBEN DER JAHR 2010 UND 2011 .....	109
TABELLE 30:	CHLORIDKONZENTRATIONEN.....	110
TABELLE 31:	GEHALTE AN SCHWERMETALLEN/SPURENELEMENTEN .....	111
TABELLE 32:	TROCKENSUBSTANZ- UND WASSERGEHALTE DER PROBEN FÜR STABILITÄTSUNTERSUCHUNGEN.....	112
TABELLE 33:	PROZENTUALE ANTEILE ORGANISCHE TROCKENSUBSTANZ UND ASCHEGEHALTE .....	113
TABELLE 34:	AT4-WERTE DER VERSCHIEDENEN SUBSTRATE IM VERGLEICH .....	116

TABELLE 35:	ERGEBNISSE DER PHOTOMETRISCHEN MESSUNG.....	118
TABELLE 36:	GESAMTER ORGANISCHER UND ANORGANISCHER KOHLENSTOFFGEHALT IN %.....	119
TABELLE 37:	ERGEBNISSE DER CHN-ANALYSE .....	123
TABELLE 38:	BERECHNETE SAUERSTOFFGEHALTE DER PROBEN .....	125
TABELLE 39:	O/C UND H/C VERHÄLTNISSE.....	126
TABELLE 40:	ERGEBNISSE DES GRW-BIOGASERTRAGSTESTS DER TREIBSELPROBEN VON 2010 .....	127
TABELLE 41:	ERGEBNISSE DES GRW-BIOGASERTRAGSTESTS DER TREIBSELPROBEN VON 2011 .....	128
TABELLE 42:	ERGEBNISSE GRW-GASERTRAGSTEST, SILIERTEN TREIBSELPROBEN (MITTELWERTE 3-FACH) .....	133
TABELLE 43:	ERGEBNISSE WASCHVERSUCH .....	134
TABELLE 44:	INFORMATIONEN ZUR ARBEITSGRUPPE TREIBSEL.....	135
TABELLE 45:	VERFAHRENSTECHNISCHE INFORMATIONEN ÜBER BIOGASANLAGEN AN DER NDS. NORDSEEKÜSTE .....	137
TABELLE 46:	TREIBSELANFALL IN DEN DEICHVERBANDBEREICHEN I-VII IN GEGENÜBERSTELLUNG MIT FREIEN KAPAZITÄTEN ÖRTLICHER BIOGASANLAGEN .....	141
TABELLE 47:	KOHLENSTOFFGEHALT PRO KG SUBSTRAT UND PRO KG FRISCHMASSE .....	160
TABELLE 48:	C, H, N, AN- UND ABREICHERUNGEN IN DEN EINZELNEN SUBSTRATEN.....	165
TABELLE 49:	ZUSAMMENFASSENDE DARSTELLUNG DER ANALYSEERGEBNISSE.....	167
TABELLE 50:	ERGEBNISSE DES KONTINUIERLICHEN VERSUCHES IN DER 2-STUFIGEN VERSUCHSANLAGE .....	174
TABELLE 51:	UMFRAGEERGEBNIS: AUFKOMMEN UND ZUSAMMENSETZUNG VON TREIBSEL 2004, 2005 .....	196
TABELLE 52:	UMFRAGEERGEBNIS: AUFKOMMEN UND ZUSAMMENSETZUNG VON TREIBSEL 2006, 2007, 2008 .....	197
TABELLE 53:	TREIBSELAUFKOMMEN PRO DEICHKILOMETER FÜR 2004 BIS 2008 .....	198
TABELLE 54:	UMFRAGEERGEBNIS: BERGUNG DES TREIBSELS .....	199
TABELLE 55:	UMFRAGEERGEBNIS: TRANSPORT DES TREIBSELS .....	200
TABELLE 56:	UMFRAGEERGEBNIS: VERTEILUNG DER TREIBSELMENGEN AUF DIE IN 2008 ANGEWENDETE ENTSORGUNGSMETHODE .....	201
TABELLE 57:	ÜBERSICHT DER TEILNEHMENDEN DEICHVERBÄNDE MIT DEN INFORMATIONEN ÜBER DAS DATUM DER ZU- UND RÜCKSENDUNG DES FRAGEBOGENS .....	202

## Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1:	BEISPIELE FÜR ZUSAMMENSETZUNG UND AUFKOMMEN VON TREIBGUT.....	6
ABBILDUNG 2:	DIE HAUPTDEICHVERBÄNDE AN DEN NIEDERSÄCHSISCHEN KÜSTEN .....	8
ABBILDUNG 3:	PROZESSSTUFEN DES ANAEROBEN ABBAUS .....	13
ABBILDUNG 4:	KORRELATION VON CSB UND OTS.....	15
ABBILDUNG 5:	BEZIEHUNG ZWISCHEN RAUMBELASTUNG, VERWEILZEIT UND SUBSTRATKONZENTRATION .....	17
ABBILDUNG 6:	STRUKTUR DER CELLULOSE.....	22
ABBILDUNG 7:	HAUPTBESTANDTEILE DER HEMIZELLULOSE .....	23
ABBILDUNG 8:	TEILSTRUKTUR EINES LIGNINMOLEKÜLS .....	23
ABBILDUNG 9:	STRUKTURMODELL EINER BODENHUMINSÄURE .....	24
ABBILDUNG 10:	KARTE DER NIEDERSÄCHSISCHEN NORDSEEKÜSTE MIT PROBEHAHMESTELLEN UND INVOLVIERTEN DEICHVERBÄNDE .....	28
ABBILDUNG 11:	GLIEDERUNG DER HUMINSTOFFE .....	39
ABBILDUNG 12:	FESTBETT-FESTSTOFF-FERMENTER .....	44
ABBILDUNG 13:	DURCHSCHNITTLICHES TREIBSELAUFKOMMEN DER JAHRE 1980 BIS 1989 IM VERGLEICH ZU DENEN DER JAHRE 1990 BIS 1995.....	58
ABBILDUNG 14:	DURCHSCHNITTLICHE TREIBSELMENGEN IM VERHÄLTNIS ZUR ANZAHL DER STURMTIDEN AM PEGEL NORDERNEY ZWISCHEN 1980 UND 1995 .....	61
ABBILDUNG 15:	DURCHSCHNITTLICHE TREIBSELMENGEN IM VERHÄLTNIS ZUR ANZAHL DER STURMTIDEN AM PEGEL NORDERNEY ZWISCHEN 1995 UND 2008.....	61
ABBILDUNG 16:	VERTEILUNG DER TREIBSELMENGEN AUF DIE ANGEWENDETE ENTSORGUNGSMETHODE FÜR 1995 ...	63
ABBILDUNG 17:	BEACH-CLEANER DER FIRMA KÄSSBOHRER; SEA-CLEANER ALGENSAUGER DER FIRMA LAND & BAU KOMMUNALGERÄTE .....	78
ABBILDUNG 18:	SCHEMA EINES TANGDEICHES IM QUERSCHNITT (TVÆRSNIT) .....	80
ABBILDUNG 19:	„AQUAMARINE AQUATIC HARVESTER“ IN DEN USA .....	82
ABBILDUNG 20:	TREIBGUTBERGUNG MIT SPEZIALBOOT IN BALTIMORE .....	83
ABBILDUNG 21:	PROZENTUALE VERTEILUNG DES TREIBSELAUFKOMMENS IM JAHRESVERLAUF.....	90
ABBILDUNG 22:	SCHLEPPER MIT SPEZIALANBAU BEI DER TREIBSELBERGUNG .....	93
ABBILDUNG 23:	METHODEN ZUR TREIBSELENTSORGUNG 2008 (%) .....	94
ABBILDUNG 24:	METHODEN DER TREIBSELENTSORGUNG 2008 (M <sup>3</sup> ) .....	94
ABBILDUNG 25:	TREIBSEL DES DVB OSTERSTADER MARSCH AUS .....	96
ABBILDUNG 26:	TREIBSELFRISCHMASSE DER GESONDERTEN PROBEHAHME VOM 16.02.2011.....	97
ABBILDUNG 27:	KOMPOSTIERTES TREIBSELMATERIAL .....	98
ABBILDUNG 28:	TREIBSEL DES DEICHVERBANDES LAND WURSTEN.....	98
ABBILDUNG 29:	TREIBSEL DES DEICHVERBANDES KEHDINGEN OSTE .....	<b>FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.</b>
ABBILDUNG 30:	TREIBSEL DES DEICHVERBANDES HEEDE-ASCHENDORF-PAPENBURG .....	99
ABBILDUNG 31:	TREIBSEL DER MOORMERLÄNDER DEICHACHT .....	99
ABBILDUNG 32:	TREIBSEL DES II. OLDENBURGISCHEN DEICHBANDES.....	100

ABBILDUNG 33:	TREIBSEL DER DEICHACHT KRUMMHÖRN .....	101
ABBILDUNG 34:	TS UND OTS FÜR TREIBSELPROBEN AUS DEN JAHREN 2010 UND 2011 .....	105
ABBILDUNG 35:	C/N-VERHÄLTNIS FÜR TREIBSELPROBEN AUS DEN JAHREN 2010 UND 2011 .....	108
ABBILDUNG 36:	SCHWEFELANTEIL (TS-BEZUG) FÜR TREIBSELPROBEN AUS DEN JAHREN 2010 UND 2011 .....	110
ABBILDUNG 37:	TROCKENSUBSTANZ UND WASSERGEHALTE .....	113
ABBILDUNG 38:	DARSTELLUNG DER OTS UND ASCHEGEHALTE DER PROBEN .....	114
ABBILDUNG 39:	ZEITLICHER VERLAUF DER ATMUNGSAKTIVITÄT BEI 25 % PROBENZUGABE.....	115
ABBILDUNG 40:	ZEITLICHER VERLAUF DER ATMUNGSAKTIVITÄT BEI 50 % PROBENZUGABE.....	115
ABBILDUNG 41:	DARSTELLUNG DER AT4-WERTE DER VERSCHIEDENEN SUBSTRATE .....	116
ABBILDUNG 42:	HEMMUNG DER ATMUNGSAKTIVITÄT DURCH PYROLYSEKOHLE BEI 25 % PROBENANTEIL .....	117
ABBILDUNG 43:	HEMMUNG DER ATMUNGSAKTIVITÄT DURCH DIE PYROLYSEKOHLE BEI 50 % PROBENANTEIL .....	118
ABBILDUNG 44:	DARSTELLUNG DER ÜBERWIEGEND ENTHALTENEN HUMINSTOFFE .....	119
ABBILDUNG 45:	GELÖSTER ORGANISCHER KOHLENSTOFF DOC .....	120
ABBILDUNG 46:	ORGANISCHER KOHLENSTOFFGEHALT (TOC).....	120
ABBILDUNG 47:	ABSORPTIONSSPEKTREN DER INFRAROTSPEKTROSKOPISCHEN UNTERSUCHUNG.....	121
ABBILDUNG 48:	TREIBSEL FRISCHMASSE ;, KOMPOSTIERTES TREIBSEL.....	122
ABBILDUNG 49:	TREIBSEL-GÄRREST; HTC-KOHLE AUS TREIBSEL .....	122
ABBILDUNG 50:	PYROLYSEKOHLE AUS TREIBSEL; STEINKOHLE .....	122
ABBILDUNG 51:	DARSTELLUNG DES KOHLENSTOFFGEHALTES DER VERSCHIEDENEN PROBEN.....	123
ABBILDUNG 52:	DARSTELLUNG DES WASSERSTOFFGEHALTES DER VERSCHIEDENEN PROBEN .....	124
ABBILDUNG 53:	DARSTELLUNG DES STICKSTOFFGEHALTES DER VERSCHIEDENEN PROBEN .....	124
ABBILDUNG 54:	DARSTELLUNG DES C/N-VERHÄLTNISSES DER VERSCHIEDENEN PROBEN.....	125
ABBILDUNG 55:	INKOHLUNGSDIAGRAMM .....	126
ABBILDUNG 56:	GASERTRAGSKUVE FESTBETT-FESTSTOFFVERGÄRUNG.....	129
ABBILDUNG 57:	BIOGASPRODUKTIVITÄT IN DEN VERSUCHSPHASEN (2-STUFIGE VERGÄRUNGSANLAGE).....	131
ABBILDUNG 58:	GASZUSAMMENSETZUNG IN DEN VERSUCHSPHASEN (2-STUFIGE VERGÄRUNGSANLAGE).....	131
ABBILDUNG 59:	GEBILDETE METHANMENGEN IN DER HYDROLYSESTUFE (2-STUFIGE VERGÄRUNGSANLAGE) .....	132
ABBILDUNG 60:	H <sub>2</sub> S-, H <sub>2</sub> - UND METHAN-GEHALTE IM HYDROLYSE GAS (2-STUFIGE VERGÄRUNGSANLAGE) .....	132
ABBILDUNG 61:	HTC-KOHLE AUS TREIBSEL.....	134
ABBILDUNG 62:	PYROLYSEKOHLE AUS TREIBSEL .....	135
ABBILDUNG 63:	TREIBSELAUFKOMMEN UND FREIE KAPAZITÄTEN NAHEGELEGENER BIOGASANLAGEN .....	139
ABBILDUNG 64:	ÜBERSICHTSKARTE ZUM LOGISTIKKONZEPT.....	140
ABBILDUNG 65:	ERMITTELTE SCHÜTTTRAUMDICHTEN DER FRISCHMASSE VON TREIBSEL .....	144
ABBILDUNG 66:	SCHÜTTTRAUMDICHTEN DER TROCKENMASSE VON TREIBSEL AUS DEN JAHREN 2010 UND 2011 ....	144
ABBILDUNG 67:	VERGLEICH DER TROCKENSUBSTANZGEHALTE VON TREIBSEL MIT ANDERER BIOMASSE .....	146
ABBILDUNG 68:	VERGLEICH DER ORG. TROCKENSUBSTANZGEHALTE VON TREIBSEL MIT ANDERER BIOMASSE.....	147
ABBILDUNG 69:	HEIZWERTE DER TREIBSELPROBEN IM FRISCHEN ZUSTAND GEGENÜBER DEN HEIZWERTEN VON FRISCHEM LAUB- UND NADELHOLZ MIT EINEM WASSERGEHALT VON 50 % .....	148

ABBILDUNG 70:	HEIZWERTE DER TREIBSELPROBEN GEGENÜBER DEN HEIZWERTEN ANDERER BIOMASSEN BEZOGEN AUF DIE TROCKENSUBSTANZ.....	149
ABBILDUNG 71:	HEIZWERTE DER TREIBSELPROBEN VON 2011 GEGENÜBER LITERATURANGABEN.....	150
ABBILDUNG 72:	CHLORIDKONZENTRATIONEN DER TREIBSELPROBEN VON 2010 UND 2011 IM VERGLEICH MIT LITERATURANGABEN NACH STRECKER .....	151
ABBILDUNG 73:	SCHWEFELGEHALTE IN DEN TREIBSELPROBEN VON 2010 UND 2011 IM VERGLEICH MIT LITERATURANGABEN.....	152
ABBILDUNG 74:	VERGLEICH DER ASCHERWEICHUNGSTEMPERATUREN DES TREIBSELS VOM DVB LAND WURSTEN MIT ANDEREN BIOGENEN BRENNSTOFFEN SOWIE STEIN- UND BRAUNKOHLE .....	153
ABBILDUNG 75:	CADMIUMKONZENTRATIONEN IM TREIBSEL UND GRENZWERTE NACH DIN 51731 .....	155
ABBILDUNG 76:	CHROMKONZENTRATIONEN IM TREIBSEL UND GRENZWERTE NACH DIN 51731.....	156
ABBILDUNG 77:	BLEIKONZENTRATIONEN IM TREIBSEL UND GRENZWERTE NACH DIN 51731 .....	156
ABBILDUNG 78:	KUPFERKONZENTRATIONEN IM TREIBSEL UND GRENZWERTE NACH DIN 51731 .....	157
ABBILDUNG 79:	SCHWEFELGEHALTE IM TREIBSEL UND GRENZWERTE NACH DIN 51731 .....	157
ABBILDUNG 80:	CHLORGEHALTE IM TREIBSEL UND GRENZWERTE NACH DIN 51731 .....	158
ABBILDUNG 81:	STICKSTOFFGEHALTE IM TREIBSEL UND GRENZWERTE NACH DIN 51731 .....	158
ABBILDUNG 82:	PROZENTUALE VERÄNDERUNG DER ATMUNGSAKTIVITÄT BEI PROBENVERDOPPLUNG.....	161
ABBILDUNG 83:	ANTEIL DES GELÖSTEN ORGANISCHEN KOHLENSTOFFS AM GESAMTEN ORGANISCHEN KOHLENSTOFF.....	163
ABBILDUNG 84:	NATÜRLICHES INKOHLUNGSDIAGRAMM ERGÄNZT .....	166
ABBILDUNG 85:	SPEZIFISCHE METHANERTRÄGE EINZELNER STANDORTE DER JAHREN 2010 UND 2011 .....	168
ABBILDUNG 86:	ZUSAMMENHANG ZWISCHEN CHLORGEHALT UND METHANERTRAG .....	169
ABBILDUNG 87:	ZUSAMMENHANG ZWISCHEN SCHWEFELGEHALT, C/N-VERHÄLTNIS UND METHANERTRAG .....	169
ABBILDUNG 88:	METHANERTRÄGE VON TREIBSEL GEGENÜBER DEN METHANERTRÄGEN ANDERER BIOGASSUBSTRATE .....	171
ABBILDUNG 89:	BIOGAS- UND METHANERTRÄGE DER AUFBEREITETEN TREIBSELPROBE DER DEICHACHT KRUMMHÖRN .....	172
ABBILDUNG 90:	GASERTRAGSVERGLEICHE UNTERSCHIEDLICHER TESTSYSTEME MIT MAISSILAGEREFERENZPROBE.....	175
ABBILDUNG 91:	SEITE 1 DES FRAGEBOGENS DER UMFRAGE .....	185
ABBILDUNG 92:	SEITE 2 DES FRAGEBOGENS DER UMFRAGE .....	186
ABBILDUNG 93:	SEITE 3 DES FRAGEBOGENS DER UMFRAGE .....	187
ABBILDUNG 94:	TREIBSELAUFKOMMEN DES JAHRES 2004 .....	188
ABBILDUNG 95:	TREIBSELAUFKOMMEN DES JAHRES 2005 .....	189
ABBILDUNG 96:	TREIBSELAUFKOMMEN DES JAHRES 2006 .....	190
ABBILDUNG 97:	TREIBSELAUFKOMMEN DES JAHRES 2007 .....	191
ABBILDUNG 98:	TREIBSELAUFKOMMEN DES JAHRES 2008 .....	192
ABBILDUNG 99:	TREIBSELAUFKOMMEN DES JAHRES 2009 .....	193
ABBILDUNG 100:	TREIBSELAUFKOMMEN DES JAHRES 2010 .....	194
ABBILDUNG 101:	TREIBSELAUFKOMMEN DES JAHRES 2011 .....	195



**Abkürzungsverzeichnis**

%	Prozent
§	Paragraph
°C	Grad Celsius
μ	Mikro
Abs.	Absatz
ALR	Amt für ländliche Räume
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BImSchG	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge, Bundes – Immissionsschutzgesetz
CH <sub>4</sub>	Methan
cm <sup>2</sup>	Quadratcentimeter
d. h.	das heißt
d.	der, des
DüMV	Düngemittelverordnung
DüngG	Düngemittelgesetz
e. V.	eingetragener Verein
ebd.	ebenda
EU	Europäische Union
f	folgende
ff	fortfolgende
ggf.	gegebenenfalls
GJ	Gigajoule
GWh	Gigawattstunden
HAWK	Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst
k. A.	keine Angabe, keine Angaben
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
km	Kilometer
kWh	Kilowattstunden
LKW	Lastkraftwagen
l <sub>N</sub>	Normliter
m	Meter
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
mg	Milligramm

---

MJ	Megajoule
ML	Niedersächsisches Ministerium für ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
MW	Megawatt
Nds.	Niedersachsen, Niedersächsische, Niedersächsisches
NEUTec	Nachhaltige Energie- und Umwelttechnik
Nm <sup>3</sup>	Normkubikmeter
NO <sub>x</sub>	Stickoxid
Nr.	Nummer
o. ä.	oder ähnliches
oTS	organische Trockensubstanz
pers.	persönliche
s. o.	siehe oben
S.	Seite
t	Tonne
TS	Trockensubstanz
u. a.	unter anderem
VR	Versuchsreihe, Versuchsreihen
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil

## 1 Einleitung

### 1.1 Hintergrund

In Deutschland basiert die heutige Energieerzeugung überwiegend auf importierten Energieträgern, die größtenteils fossiler Herkunft sind. Die Nutzung fossiler Rohstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas geht mit der Freisetzung klimaschädlicher Treibhausgase, allen voran Kohlendioxid, einher, deren Emissionen entsprechende Folgeschäden nach sich ziehen. Zudem führt eine Primärenergieversorgung auf Basis fossiler Rohstoffe, die zum Teil aus politisch instabilen Regionen bezogen werden, zu einer zunehmenden Abhängigkeit von Importen. Vor diesem Hintergrund gewinnt die Energieerzeugung durch den Einsatz nachwachsender Rohstoffe zunehmend an Bedeutung. Um der Forderung einer Reduktion von klimaschädlichen Treibhausgasen nachzukommen, werden vermehrt Agrarrohstoffe zur Energieerzeugung angebaut und eingesetzt. Die gezielte Produktion dieser Biomasse findet größtenteils auf landwirtschaftlichen Flächen statt und bietet den Landwirten eine zusätzliche Einkommensquelle. Die Zunahme der Nutzung von Ackerflächen als Produktionsstätte pflanzlicher Rohstoffe zur energetischen Nutzung wurde in letzter Zeit verstärkt als Ursache für steigende Preise im Lebensmittelbereich diskutiert, z. B. für Getreide und Ölsaaten. Diese Preissteigerungen für Lebensmittel sind teilweise auf die gestiegene Nachfrage nach biogenen Energieträgern pflanzlichen Ursprungs zurückzuführen, besonders durch die weltweite und steigende Förderung der Biokraftstoffproduktion (ZEDDIES, 2008, S. 13). Die Erzeugung pflanzlicher Rohstoffe ist aufgrund der Preissteigerungen in die öffentliche Kritik geraten, wodurch die Diskussion „Teller statt Tank?“ in der Öffentlichkeit auftrat (WELLING, 2008, S. 1).

Durch diese Diskussion ist der Einsatz biogener Rest- und Abfallstoffe zur Bioenergieerzeugung von zunehmendem Interesse, da hier keine Flächenkonkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung besteht. Die Energieerzeugung durch den Einsatz biogener Reststoffe trägt dazu bei, die Ressourcen zu schonen und die Treibhausgasemissionen zu minimieren, um den anthropogen verursachten Klimawandel einzudämmen.

An den Deichen der niedersächsischen Nordseeküste sowie der Ems, Weser, Elbe und weiteren Flüssen landen jährlich große Mengen Treibgut mit hohen pflanzlichen Anteilen an. Dieses Material muss aus Gründen des Küstenschutzes entfernt werden, da durch die Ablagerung des Treibguts auf den Deichen die darunterliegende Grasnarbe zu ersticken droht. Der Erhalt der Grasnarbe des Deiches ist eine Voraussetzung für die Gewährleistung des Hochwasserschutzes durch den Deich. Die für die Bergung und Entsorgung des Treibguts verantwortlichen Instanzen des Küstenschutzes sind gesetzlich zur Entfernung und Entsorgung des Treibguts verpflichtet und zahlen jährlich hohe Entsorgungskosten.

Im Sinne der Biomasseverordnung gelten auch die pflanzlichen Bestandteile von Treibgut aus der Gewässerpflege, Uferpflege und Uferreinhaltung als Biomasse. Demnach besteht die Möglichkeit, dass die aus Treibgut erzeugte Energie gemäß dem Gesetz zum Vorrang der erneuerbaren Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG) vergütet wird. Diese Biomasse wird bisher jedoch nahezu ausschließlich unter Entsorgungsaspekten betrachtet und aufwendig und kostenintensiv beseitigt.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel des Forschungsvorhabens der HAWK ist es, zunächst eine belastbare Datengrundlage zum Aufkommen, zur Zusammensetzung und zu den wesentlichen charakteristischen Eigenschaften von Treibsel an der niedersächsischen Küste zu erarbeiten. Auf dieser Basis ist dann die Erstellung eines Konzeptes zur nachhaltigen Verwertung des Treibselns vorgesehen. Das Projekt ist in folgende 4 Arbeitspakete gegliedert:

- Ermittlung des Ist-Zustandes
- Probenahme und Charakterisierung
- Versuche zur Aufbereitung des Treibselns
- Auswertung und Konzeptentwicklung

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitspakete detailliert erläutert. Änderungen im Vergleich zum Antrag, die sich im Verlauf des Projektes ergeben haben, werden dabei erläutert.

## **2 Vorstellung der geleisteten Arbeiten**

In den folgenden Unterkapiteln werden die geleisteten Arbeiten in zusammengefasster Form dargestellt.

### **2.1 Arbeitspaket I: Ermittlung des Ist-Zustandes**

Zu Beginn des Projektes wird eine umfassende nationale und internationale Literaturstudie durchgeführt. Ziel der Studie ist die Ermittlung eines Überblicks über den Stand der wissenschaftlichen Untersuchungen zum Aufkommen und zur Verwertung von Treibsel. Dabei werden Ansätze und/oder Lösungen zur energetischen Nutzung von Treibsel im nationalen sowie internationalen Kontext recherchiert.

Parallel zu der Literaturstudie wird eine Umfrage bei den beteiligten Akteuren durchgeführt, wodurch gleichzeitig der der Erstkontakt hergestellt wird. Die Umfrage liefert zudem Erkenntnisse zur derzeitigen Praxis im Umgang mit Treibsel seitens der Beteiligten, insbesondere zu bestehenden Ansätzen und Erfahrungen der Verwertung und zur Akzeptanz einer möglichen energetischen Nutzung des Treibsel. Desweiteren wurden durch die Umfrage die vorliegenden Daten zur Qualität und Quantität erfasst und systematisch ausgewertet.

Aus den Erkenntnissen der beiden beschriebenen Schwerpunkte wird anschließend eine erste Potenzialabschätzung vorgenommen.

Die Ergebnisse des Arbeitspakets I werden in einem Zwischenbericht dargestellt und dem Fördergeber vorgelegt. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse des Arbeitspakets I in diesem Abschlussbericht lediglich als Zusammenfassung dargestellt.

### **2.2 Arbeitspaket II: Probenahme und Charakterisierung**

Auf der Basis der aus dem Arbeitspaket I resultierenden Grundlagen wird in Arbeitspaket II in Abstimmung mit den Deichverbänden das Gesamtaufkommen von Treibsel an den niedersächsischen Küsten ermittelt. Hierauf basierend werden zwei Probenahmekampagnen durchgeführt und Treibselproben von unterschiedlichen Entnahmestellen entlang der niedersächsischen Küste zwecks umfassender Analysen zur HAWK genommen. Die erste Kampagne erfolgte in KW 16 im Jahr 2010 und die zweite Kampagne erfolgt in der KW 21 im Jahr 2011. Die folgenden Parameter wurden bestimmt, um das Material zu charakterisieren.

- Schüttdichte
- Enthaltene Stofffraktionen
- Trockensubstanz
- Organische Trockensubstanz
- Heiz- und Brennwert
- Gehalt an bestimmten, verwertungsrelevanten Schwermetallen
- Schwefelgehalt
- Chloridgehalt
- Ascheschmelzpunkt

Im Anschluss an diese Analysen werden Biogasertragstests nach DIN 4630 durchgeführt, um Aussagen über weitere Möglichkeiten der energetischen Verwertung des Treibsel zu abzuleiten. Abweichend vom Antrag werden die Untersuchungen zur Vergärbarkeit des Treibsel erweitert. Zusätzlich zur Vergärung in den Batchfermentern des GRW-Gasertrags werden kontinuierliche Versuche zur Vergärung von Treibsel durchgeführt. Diese werden zum Teil zusätzlich durch ein innovatives Verfahren ergänzt, bei dem die Flüssigfraktion zusätzlich über ein Festbett geleitet wird. Für diese Untersuchungen wird zum Teil auf Anlagen aus dem Technikum zurückgegriffen, zum Teil müssen aber auch Anschaffungen getätigt werden, die an anderer Stelle eingespart werden.

Die in Tabelle 1 aufgelisteten Aggregate (Investitionen) werden zur Durchführung der zusätzlichen Versuche angeschafft.

**Tabelle 1: Zusätzliche Anschaffungen im Arbeitspaket II**

Position	Beschreibung	Kosten brutto [€]
<b>Nr.103742 VWR Membran-Pumpe</b>	Die Pumpe wurde für Perkolationsversuche mit Treibsel eingesetzt.	674,73
<b>Nr.104084 Kobold Durchflussarmatur pH-Messung:</b>	Verbrauchsmaterial für die kontinuierlichen Versuche zur Perkoation von Treibsel	447,95
<b>Nr.104069 temperierbarer Behälter</b>	Behälter für die kontinuierlichen Versuche zur Perkolation von Treibsel	714,-
<b>Nr.104069 Nachtigall,VA-Blechring</b>	Zubehör für den Behälter für die kontinuierlichen Versuche zur Perkolation von Treibsel	258,13

### 2.3 Arbeitspaket III: Versuche zur Aufbereitung des Treibsel

Im Rahmen des Arbeitspakets III werden unterschiedliche Methoden zur Konservierung und Aufbereitung für die anschließende Nutzung von Treibsel untersucht. Es wird geprüft, ob die Haltbarkeit von Treibsel durch Trocknen und/oder Silieren erhöht werden kann. Ein Teil der Treibselproben werden gehäckselt, um herauszufinden, ob durch den mechanischen Aufschluss eine bessere Vergärbarkeit zu erzielen ist. In Waschversuchen soll herausgefunden werden, ob und in welchem Maße eine Salzentfrachtung des Treibsel möglich ist und wie sich diese auf den Heiz- und Brennwert, die Vergärbarkeit, den Schwefel- und Chloridgehalt auswirken.

Zusätzlich zu den geplanten Versuchen werden Untersuchungen zur Berteilung der Biostabilität von Treibsel in unterschiedlichen Aufbereitungszuständen durchgeführt. Dies dient der Beurteilung, ob und in welcher Form aufbereitetes Treibsel als Bodenverbesser eingesetzt werden kann. Für diese Untersuchungen wird neben der Treibsel-Frischmasse, humifiziertes bzw. kompostiertes, hydrothermal-carbonisiertes und pyrolysiertes Treibsel eingesetzt. Im Rahmen dieser Untersuchungen werden einige Aufbereitungsschritte sowie die Analyse unterschiedlicher Parameter an externe Einrichtungen vergeben.

**Tabelle 2: Vergabe von Unteraufträgen an externe Einrichtungen im Rahmen der Stabilitätsuntersuchungen**

Position	Beschreibung	Kosten brutto [€]
<b>HTC-Kohle</b>	Artec, Herstellung von HTC-Kohle	2.856,-
<b>DOC-Analysen</b>	Universität BS, Analyse des gelösten organischen Kohlenstoffs.	155,94
<b>Pyrolyse Kohle</b>	Universität Edinburgh, Herstellung von Pyrolyse-Kohle	702,43

Zur Durchführung eigener Untersuchungen im Bereich der Biostabilität wird das Oxitop Messsystem erweitert. Dafür wird Zubehör gemäß Tabelle 3 beschafft.

**Tabelle 3: Zusätzliche Anschaffungen im Arbeitspaket III**

Position	Beschreibung	Kosten brutto [€]
<b>Nr.104067 VWR Messsystem</b>	Bei diesem Posten handelt es sich um Zubehör zum Oxitop System, das der Messung der Sauerstoffzehrung dient und im Bereich der Stabilitätsuntersuchungen eingesetzt wird	1.000,-

## 2.4 Arbeitspaket IV: Auswertung und Konzeptentwicklung

Parallel zu den Untersuchungen der Arbeitspakete II und III werden bereits abgeschlossene Projekte und weitere Informationen ausgewertet und bewertet. Die eigenen Ergebnisse werden schriftlich ausgearbeitet und in den Kontext mit anderen Ergebnissen des Forschungsprojektes gesetzt. Weiterhin wird anhand der Ergebnisse ein Logistikkonzept erstellt. Hierdurch wird die vorhandene potentielle Infrastruktur zur nachhaltigen klimaneutralen Verwertung des Treibsel aufzeigt. Dabei wird auf Gesichtspunkte der mechanischen bzw. energetischen Verwertung und die mögliche Verwertung der Reststoffe eingegangen. Zusätzlich erfolgt eine Einschätzung zur Klimarelevanz und Wirtschaftlichkeit der Treibselverwertung.

Zusätzlich zu dem am Ende des Projektes geplanten Workshop zur Vorstellung der Ergebnisse wird im Verlauf des Projektes „Treibsel an den Niedersächsischen Küsten – Aufkommen, Zusammensetzung und Möglichkeiten zur nachhaltigen klimaneutralen Verwertung“ eine Arbeitsgruppe „Treibsel“ initiiert. Die Beteiligten der Gruppe sind zum Zeitpunkt der Gruppenbildung ihrerseits in Forschungsprojekten zur Verwertung bzw. Vermeidung von Treibsel tätig. Die Arbeitsgruppe dient dem Austausch und der Diskussion von Erkenntnissen zu den Themen Treibselverwertung und Treibselvermeidung. Zwischen Herbst 2009 und Sommer 2010 haben drei Treffen im Abstand von ca. drei Monaten stattgefunden.

Der abschließende Workshop für die beteiligten Personen und Institutionen ist geplant. Zur genaueren Abstimmung des Termins stehen Hochschule und Ministerium im Kontakt.

### 3 Grundlagen

#### 3.1 Klassifizierungen von Treibgut

Die Bezeichnung Treibgut steht für Materialien verschiedenster Art und Herkunft. Diese Materialien werden auf bestimmte Weise von strömungsbehafteten Gewässern mitgeführt und an die Insel- und Festlandküsten getrieben. Dort wird es vereinzelt und je nach meteorologischen sowie hydrologischen Gegebenheiten in relativ großen Massen meist breittförmig oder in Form von Wulsten an Deichen und Dünen oder auf den Deichvorländern abgesetzt (LÜDERS & LUCK, 1976, S. 215).

In küstennahen Regionen gibt es diverse Bezeichnungen für Treibgut, wie z. B. Treibsel, Treibzeug, Teek, Getreibsel oder Driffels (ebd., S. 215). In dem vorliegenden Bericht werden die Begriffe Treibsel und Teek verwendet, da diese geläufige Bezeichnungen für Treibgut an den niedersächsischen Küsten darstellen (WIEGMANN, 2009, pers. Mitteilung). Ein weiterer Grund für die Verwendung der Begriffe Teek und Treibsel in diesem Bericht ist die Differenzierung von anderem Treibgut, wie zum Beispiel verlorene Schiffsfrachten oder ähnliches. In Abbildung 1 werden Beispiele für unterschiedliche Zusammensetzungen und unterschiedlich großes Aufkommen von Treibgut bzw. Treibsel gezeigt. Die Bilder wurden im Zuständigkeitsbereich des II. Oldenburgischen Deichbandes aufgenommen.



**Abbildung 1: Beispiele für Zusammensetzung und Aufkommen von Treibgut (CORNELIUS & WILKEN, 2009, pers. Mitteilung)**

Hauptsächlich besteht Treibsel aus Teilen von Bäumen und Büschen sowie aus Gras, Schilf, Tang und Stroh (LÜDERS & LUCK, 1976, S. 215). Andere Quellen beschreiben die Zusammensetzung von Treibgut genauer und nennen zusätzlich schwimmfähigen Zivilisationsmüll wie Plastik, Glasflaschen und Styropor (GERLACH ET. AL, 1999, S. 16f). Weitere Bestandteile

sind tierischer Herkunft, wie beispielsweise Kadaver, Federn oder Muscheln (ebd., S. 16 f). Eine genauere Beschreibung der Zusammensetzung von Treibsel erfolgt in Kapitel 5.3.1. Das Treibsel, das an den Deichen der Nordseeküste sowie den Deichen der von der Tide beeinflussten Flüsse anlandet, stellt eine Gefährdung der Deichsicherheit dar (GERLACH ET. AL, 1999, S. 1). Die nachteilige Wirkung des Treibsel besteht darin, dass die unterhalb des Spülsaums liegende Grasnarbe aufgrund von Lichtmangel in relativ kurzer Zeit abstirbt. Dieser Effekt kann bei größeren Treibselmengen durch einsetzende Rotteprozesse und hiermit verbundenen Temperaturerhöhungen noch verstärkt werden (ebd., S. 1). Zudem kann das angelandete Treibsel einen optimalen Lebensraum für Kleintiere, z. B. Wühlmäuse, darstellen, deren Lebensweise zur Zerstörung der Grasnarbe beiträgt (ebd., S. 1). Dies hat zur Folge, dass die anlandenden Treibselmengen möglichst unverzüglich entfernt werden müssen, um den Küstenschutz aufrechterhalten zu können (ebd., S. 1; CORNELIUS & WILKEN, 2009, pers. Mitteilung). Diese Aufgabe haben die Träger des Küstenschutzes, überwiegend die Deichverbände, zu bewältigen (NIEDERSÄCHSISCHE STAATSKANZLEI, 2004, § 7).

### **3.2 Organisation des Küstenschutzes in Niedersachsen**

In den folgenden Kapiteln werden die Strukturen des niedersächsischen Küstenschutzes beschrieben. Hier wird zwischen Deichverbänden und staatlichem Küstenschutz differenziert. Weiter werden die gesetzlichen Grundlagen für die Organisation des Küstenschutzes dargestellt.

#### **3.2.1 Deichverbände**

In Niedersachsen übernehmen 22 Hauptdeichverbände, auch Deichverbände, Deichachten oder Deichbände genannt, die Unterhaltung, Instandsetzung und Wiederherstellung der Hauptdeiche, Schutzdeiche, des Deichvorlandes samt seiner Deichsicherungs- und Schutzwerke sowie ggf. der zweiten Deichlinie (NLWKN, 2007, S. 31; NIEDERSÄCHSISCHE STAATSKANZLEI, 2004). Die rechtliche Grundlage dafür bildet das Niedersächsische Deichgesetz (NDG).

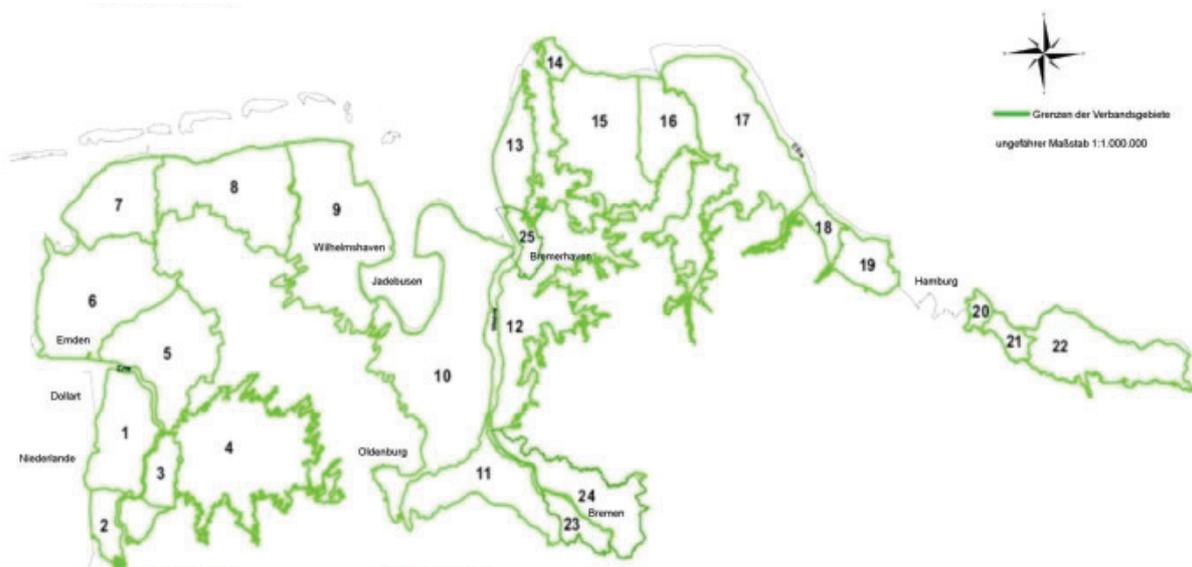
Als Wasser- und Bodenverbände gelten alle niedersächsischen Deichverbände laut Wasserverbandsgesetz als Körperschaften öffentlichen Rechts (NIEDERSÄCHSISCHE STAATSKANZLEI, 2004, § 9, Abs. 2). Mitglieder der Deichverbände sind alle Grundstückseigentümer in sperrwerks- und deichgeschützten Gebieten. Sie sind nach § 6, Abs. 1 NDG zur gemeinschaftlichen Deicherhaltung verpflichtet, somit beitragspflichtig und gelten als Zwangsmitglieder (NIEDERSÄCHSISCHE STAATSKANZLEI, 2004, § 6). Dies ist nach § 6 Abs. 4 NDG für die Ostfriesischen Inseln auszuschließen. Die Grenzen der sperrwerks- und deichgeschützten Gebiete auf dem niedersächsischen Festland, folglich die Grenzen der Verbandsgebiete, werden durch Geländehöhen festgelegt, die den maßgebenden Sturmflut- bzw. Hochwasserständen gleichkommen (NLWKN, 2007, S. 31, NIEDERSÄCHSISCHE STAATSKANZLEI, 2004).

Eine Übersicht über die Gebiete der einzelnen Hauptdeichverbände in Niedersachsen ist in Abbildung 2 in Verbindung mit Tabelle 4 wiedergegeben. Dort werden, der Vollständigkeit

halber, zusätzlich die Deichverbände des Bundeslandes Bremen aufgeführt, auf die im Rahmen dieses Projektes jedoch nicht eingegangen wird.

**Tabelle 4: Zuordnung der Deichverbände zu den Nummern in den folgenden Abbildungen**

Nr.	Deichverband	Nr.	Deichverband
1	Rheider Deichacht	14	Cuxhavener Deichverband
2	Deichverband Heede-Aschendorf-Papenburg	15	Hadelner Deich- und Uferbauverband
3	Overledinger Deichacht	16	Ostedeichverband
4	Leda-Jümme-Verband	17	Deichverband Kehdingen Oste
5	Moormerländer Deichacht	18	Deichverband I. Meile des Alten Landes
6	Deichacht Krummhörn	19	Deichverband II. Meile des Alten Landes
7	Deichacht Norden	20	Harburger Deichverband
8	Deichacht Esens-Harlingerland	21	Deich- und Wasserverband Vogtei Neuland
9	III. Oldenburgischer Deichband	22	Artlenburger Deichverband
10	II. Oldenburgischer Deichband		
11	I. Oldenburgischer Deichband	23	Bremischer Deichverband links der Weser
12	Deichverband Osterstader Marsch	24	Bremischer Deichverband rechts der Weser
13	Deichverband Land Wursten	25	bremenports GmbH & Co. KG



**Abbildung 2: Die Hauptdeichverbände an den niedersächsischen Küsten (verändert nach NLWKN, 2007, S. 53)**

Die niedersächsischen Deichverbände sind u. a. im Wasserverbandstag Bremen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt e. V., im Folgenden als Wasserverbandstag bezeichnet, zusammengeschlossen.

### 3.2.2 Staatlicher Küstenschutz

Der Küstenschutz in Niedersachsen obliegt teilweise auch der Bundesrepublik Deutschland und dem Bundesland Niedersachsen. Sie sind unterhaltungspflichtig für einzelne Sommer-

deichstrecken und vor allem für Sperrwerke (NLWKN, 2007, S. 31; NIEDERSÄCHSISCHE STAATSKANZLEI, 2004, § 7a).

Für den Küstenschutz auf den Ostfriesischen Inseln ist das Bundesland Niedersachsen zuständig. Die landeseigenen Deiche, auf den Inseln zusätzlich die Schutzdünen, werden vom Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) erhalten (NLWKN, 2007, S. 19). Die Zuständigkeit des Schutzes vor Sturmfluten wird in Häfen auf den Hafenbetreiber übertragen (ebd., S. 19).

Für den Betrieb und die Unterhaltung der Sperrwerke ist wiederum das Land Niedersachsen verantwortlich. Auch hierfür ist der NLWKN zuständig. Einzelne Sperrwerke, die nicht ausschließlich auf dem Gebiet Niedersachsens liegen, werden ggf. von anderen Bundesländern unterhalten und betrieben (NLWKN, 2007, S. 20 f).

### **3.2.3 Rechtliche Grundlagen zu Verwertung und Entsorgung von Treibsel**

Die Aufnahme, der Transport sowie die Entsorgung von Treibsel unterliegen dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG). Mit der Bergung des Treibsel von den Deichen stellt dieses Abfall dar. Im KrW-/AbfG, § 2, Abs. 1, wird der Geltungsbereich des Gesetzes beschrieben. Die Vermeidung und die Verwertung von Abfall sind nach § 4 Abs. 1 KrW-/AbfG einer Entsorgung oder Beseitigung vorzuziehen. Da das Anlanden von Treibsel nicht vermieden, höchstens eingeschränkt werden kann (CORNELIUS & WILKEN, 2009, pers. Mitteilung), greift hier § 3, Abs. 7 KrW-/AbfG. Somit ist Treibsel zu entsorgen, was die Verwertung und/oder die Beseitigung bedeutet.

Die Verwertung von Treibsel wird in der Bioabfallverordnung (BioAbfV) geregelt. Nach § 2, Nr. 1 BioAbfV in Zusammenhang mit Anhang 1, Nr.1 BioAbfV gilt Treibsel als pflanzlicher Abfall. Wenn Untersuchungen der pflanzlichen Bestandteile des Treibsel die Schwermetallgrenzen, die in der Bioabfallverordnung angegeben sind, nicht überschreiten, dürfen diese einer Verwertung zugeführt werden. Hierfür sind unabhängige Untersuchungen in zugelassenen und anerkannten Labors durchzuführen (MEISGEIER, 2008, S. 43).

Eine Möglichkeit der Beseitigung von Treibsel außerhalb von Abfallbeseitigungsanlagen wird in der Verordnung über die Beseitigung von pflanzlichen Abfällen durch Verbrennen außerhalb von Abfallbeseitigungsanlagen (BrennVO) geregelt. Demnach ist es möglich, in Einzelfällen einen Antrag zur Verbrennung von Treibsel zu stellen. Die zuständige Abfallbehörde kann das Verbrennen von Treibsel außerhalb von Abfallbeseitigungsanlagen im Einzelfall auf Antrag zulassen, wenn das Wohl der Allgemeinheit und die Nachbarschaft nicht unzumutbar beeinträchtigt werden (§ 3, Abs. 3, BrennVO).

Im Falle der Verwendung von Treibsel als Dünger, als Mittel zur Bodenverbesserung oder als Substrat für den Wurzelraum von Pflanzen unterliegt Treibsel ferner dem Düngegesetz (DüngG) vom 9. Januar 2009. Dieses Gesetz greift ebenfalls bei kostenloser Weitergabe des Treibsel an Landwirte oder Gärtner. Somit ist die Einhaltung des Düngegesetzes sowohl für denjenigen, der Treibsel als Dünger in Verkehr bringt als auch für den Anwender, vorgeschrieben.

Die Düngemittelverordnung (DüMV, § 3, in Verbindung mit Anlage 2, Tabelle 7 – Hauptbestandteile für Düngemittel, Bodenhilfsstoffe, Kultursubstrate oder Pflanzenhilfsmittel, 7.1.6 Pflanzliches Abfisch- und Rechengut) schreibt vor, dass Treibsel nur als Pflanzendünger, Mittel zur Bodenverbesserung oder als Substrat für den Wurzelraum von Pflanzen verwendet werden kann, wenn der Nutzung eine aerobe oder anaerobe Behandlung in einer entsprechenden Behandlungsanlage vorausgegangen ist. Zudem müssen im Anschluss an die Behandlung des Treibselns Mindestgehalte der Nährstoffe Stickstoff, Phosphor oder Kalium erreicht werden (MEISGEIER, 2008, S. 43).

Laut Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse (Biomasseverordnung, BiomasseVO) ist Treibsel gemäß § 2, Abs. 3, Nr. 4 BiomasseVO als Biomasse zur energetischen Verwertung im Sinne dieser Verordnung anerkannt. Somit ist die Vergütung der erzeugten Energie aus Treibsel gemäß dem Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG) möglich.

Der § 4 BiomasseVO schreibt vor, welche technischen Verfahren Anwendung finden dürfen, um Energie aus Treibsel zu gewinnen. Die energetische Verwertung ist unter Berücksichtigung von § 5, Abs. 1 BiomasseVO durchzuführen. Somit sind bei der Verwertung zur Energieerzeugung die Vorschriften des öffentlichen Rechts hinsichtlich der Vermeidung und Verminderung von Umweltverschmutzungen, dem Schutz und der Vorsorge vor schädlichen Umwelteinwirkungen und zur Gefahrenabwehr sowie der Ressourcenschonung und der Sicherung des umweltverträglichen Umgangs mit Abfällen einzuhalten.

### **3.2.4 Spannungsfeld Deichvorland: Naturschutz und landwirtsch. Flächennutzung**

Die Deichvorländer Niedersachsens sind Marschböden, überwiegend Salzmarschen, alluvialer Herkunft. Die Vorländer in den Gebieten der Tideflüsse bilden sogenannte Brackmarschen (LÜDERS & LUCK, 1976, S. 116).

Diese Salzmarschen sind zugleich geprägt von der natürlichen Dynamik der Nordsee und den landwirtschaftlichen Aktivitäten der Küstenbewohner über einen relativ langen Zeitraum. Dahingegen sind die Salzmarschen des Festlandes nahezu vollständig durch systematische Landgewinnungsmaßnahmen entstanden. Diese fruchtbaren Gebiete wurden seit dem Beginn ihrer Besiedlung durch den Menschen als Weiden und Wiesen genutzt (LEINER & MENKE, 1998, S. 1).

Neben ihrer Bedeutung im Küstenschutzsystem sind Deichvorländer aus vegetationskundlicher und faunistischer Sicht von besonderer Bedeutung. Sie sind an der Nordseeküste infolgedessen mehrheitlich Bestandteile des Nationalparks Niedersächsisches Wattenmeer (WITTIG ET AL., 2007, S. 44). Der Nationalpark besteht seit 1986.

Seit der Gründung des Nationalparks Niedersächsisches Wattenmeer ist die landwirtschaftliche Nutzung der Salzmarschen auf großen Flächen fast vollständig untersagt oder naturverträglich extensiviert worden. Lediglich die Nutzung von kleineren Flächen in Privat-, aber auch in Landesbesitz, ist teilweise gestattet. Damit verfolgt die Nationalparkverwaltung das Ziel, natürliche Prozesse und die Entwicklung von natürlichen Zuständen in den Salzmar-

schen zu schützen (LEINER & MENKE, 1998, S. 2). Um dieses Ziel zu erreichen, setzt die Nationalparkverwaltung *Niedersächsisches Wattenmeer* die Aufgabe von landwirtschaftlichen Aktivitäten sowie Flächenentwässerung im Deichvorland voraus.

Das hydrologisch durch Gezeiten geprägte, vom Menschen durch verschiedenste Nutzungen beeinflusste System aus Land und Meer dient zahlreichen Arten der Flora und Fauna als Lebensraum (ML, 2005, S. 50). „Das Wattenmeer stellt eine der letzten großräumigen Naturlandschaften Deutschlands dar und hat durch seine Funktion als temporärer Lebensraum für Zugvögel [...] internationale Bedeutung“ (ebd., S. 50). Das Deichvorland, das dem Nationalpark *Niedersächsisches Wattenmeer* zuzuordnen ist, ist nahezu gleichsam Biosphärenreservat, RAMSAR-Feuchtgebiet, EU-Vogelschutzgebiet und vorgeschlagenes Fauna-Flora-Habitat (ebd., S. 50). Vor allem ist das gesamte Wattenmeer mit den angrenzenden Naturschutzflächen vor dem Deich seit 2009 als UNESCO-Weltnaturerbe ausgezeichnet und dadurch von herausragender Bedeutung (FARKE, 2009, S. 1).

In einzelnen Fällen werden im Deichvorland spezielle, kostenintensive Pflegemaßnahmen für den Artenschutz und zur Begrenzung enormer Vorlanderosionen durchgeführt (LEINER & MENKE, 1998, S. 2). Die zur Nutzung freigegebenen Flächen in Landesbesitz werden unter strengen Auflagen jeweils für den Zeitraum eines Jahres an landwirtschaftliche Betriebe verpachtet. Dem Pächter ist es verboten, Dünge- oder Pflanzenschutzmittel auf den Flächen auszubringen, das Bodenrelief zu verändern und Entwässerungsmaßnahmen zu ergreifen. Weiterhin ist eine vorgegebene Nutzungsart, Mahd oder Beweidung, einzuhalten. Je nach Nutzungsart werden bestimmte Vorgaben festgelegt. So ist die Mahd vor dem 1. Juli jeden Jahres untersagt und darf nur einmal im Jahr durchgeführt werden (einschürige Mahd). Bei der Beweidung ist eine Beweidungsdichte von nur einem Jungrind pro Hektar zulässig (LEINER & MENKE, 1998, S. 3). An dem mittelfristigen Ziel der generellen Nutzungsaufgabe auf Vordeichflächen hält die Nationalparkverwaltung *Niedersächsisches Wattenmeer* nach LEINER & MENKE (1998, S. 3) fest. Das Ziel konnte jedoch bislang nicht erreicht werden. Dies ist nach LEINER & MENKE (1998, S. 3) auf die einflussreichen Institutionen des Küstenschutzes, allen voran die Deichverbände, zurückzuführen, die sich für die Beibehaltung der landwirtschaftlichen Nutzung der Vordeichflächen einsetzen (CORNELIUS & WILKEN, 2009, pers. Mitteilung). Seitens der Deichverbände wird angenommen, dass eine intensivere landwirtschaftliche Nutzung, als die bisher zugelassene, das Deichvorland widerstandsfähiger gegen Erosion machen würde (ebd.). Zusätzlich würde durch die Nutzung der Flächen vor dem Deich das Pflanzenmaterial minimiert. Dies hätte zur Folge, dass weniger Treibsel bei Sturmfluten o. ä. an den Deich gespült würde, wodurch der jeweils zuständige Deichverband geringere Beseitigungskosten aufzuwenden hätte (ebd.). Seitens der Landwirte besteht ein weiteres Interesse der Nutzung des Deichvorlands, da sie aus dem Aufwuchs Futter gewinnen können, welches angeblich eine besondere gesundheitsfördernde Qualität aufweist (LEINER & MENKE, 1998, S. 3).

Weitere Agitatoren in der Diskussion über die landwirtschaftliche Nutzung des Deichvorlandes, auch außerhalb des Nationalparks *Niedersächsisches Wattenmeer*, gegenüber der Ver-

folgung naturschützender Ziele auf diesen Flächen sind politische Organisationen, die in bestimmtem Maße die Meinung der Bürger vertreten. SANDER (2008, S. 1) führt das Problem eines verstärkten Treibselanfalls in Bereichen einzelner Deichverbände auf die erfolgten ökologischen Kompensationsmaßnahmen zurück. Zur Lösung dieses Problems schlägt SANDER (2008, S. 1) in Bezug auf einzelne Pflanzenarten vor, das Deichvorland nach Möglichkeit naturverträglich zu beernten.

Diesem Vorschlag ging eine Diskussion der Bevölkerung in Loxstedt voraus. Dort stellte die Entsorgung von Treibsel ein Problem dar. Durch die Verbrennung von Treibsel trat eine starke Geruchsbelästigung auf, so dass Lösungen zum Problem des Treibselaufkommens erörtert wurden (CDU-LOXSTEDT, 2008, S. 1). Auch hier wird die untersagte Bewirtschaftung des Deichvorlandes als Ursache für das vermehrte Aufkommen von Treibsel genannt (ebd., S. 1). Als Lösungsansatz ist nach CDU-LOXSTEDT (2008, S. 1) die Beweidung und die Mahd im Deichvorland zu verfolgen und der rechtliche Rahmen dafür wiederherzustellen. Die Wiederbewirtschaftung des Deichvorlandes machten politische Parteien auch zum Wahlkampfthema der niedersächsischen Landtagswahl 2008 (FDP, 2008, S. 45).

### **3.3 Grundlagen und Verfahren der Biogasgewinnung**

Eine Biogasanlage ist eine räumliche, organisatorische und wirtschaftliche Einheit, zur Erzeugung von Biogas aus organischen Eingangsmaterialien durch anoxische Vergärung unter Ausnutzung natürlicher Vergärungsprozesse. Dieses wird i.d.R. energetisch genutzt.

Bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen kommen in erster Linie Nassvergärungsverfahren, die entweder ein- oder zweistufig ausgeführt werden zur Anwendung (SCHULZ, 2006). Bei den einstufigen Verfahren laufen die mikrobiellen Abbauvorgänge der Fermentation, Hydrolyse und Methanogenese in einem Reaktor ab. Daneben kommen aber auch zweistufige Anlagen zum Einsatz, bei denen Hydrolyse und Methanogenese in zwei getrennten Reaktoren ablaufen. Substrate für die Biogasanlagen sind vielfältig und bestehen u. a. aus komplexen organischen Verbindungen wie Kohlenhydrate, Fette und Eiweiße. Der Abbau eines komplexen organischen Stoffes zu Biogas bzw. Methan ist abhängig von der Substratbereitstellung für die methanogenen Bakterien, welche mehrere vorangehende Prozessschritte erfordert (BISCHOFBERGER ET AL., 2005). Der Entstehungsprozess des Biogases läuft in vier Phasen ab, in denen verschiedene Bakteriengruppen in Symbiose einzelne Teilschritte des Prozesses nacheinander realisieren (KALTSCHMITT, 2001). Die Zusammensetzung der Bakterienkultur in einer Biogasanlage ergibt sich aus den spezifischen Prozessbedingungen. Die vier Phasen der Biogasbildung können wiederum zu zwei Abschnitten oder Stufen zusammengefasst werden, da die einzelnen zusammengefassten Phasen sehr ähnliche Anforderungen an die Milieubedingungen aufweisen. Die erste Stufe beinhaltet die Hydrolyse und Versäuerung, wobei die Substrate für die methanogenen Mikroorganismen entstehen. Im Zuge ihres Verbrauchs wird in der zweiten Stufe, der acetogenen und methanogenen Stufe, Methan gebildet (PÄTZ, 2005). Abbildung 3 zeigt eine Zusammenfassung der einzelnen Prozessstufen.

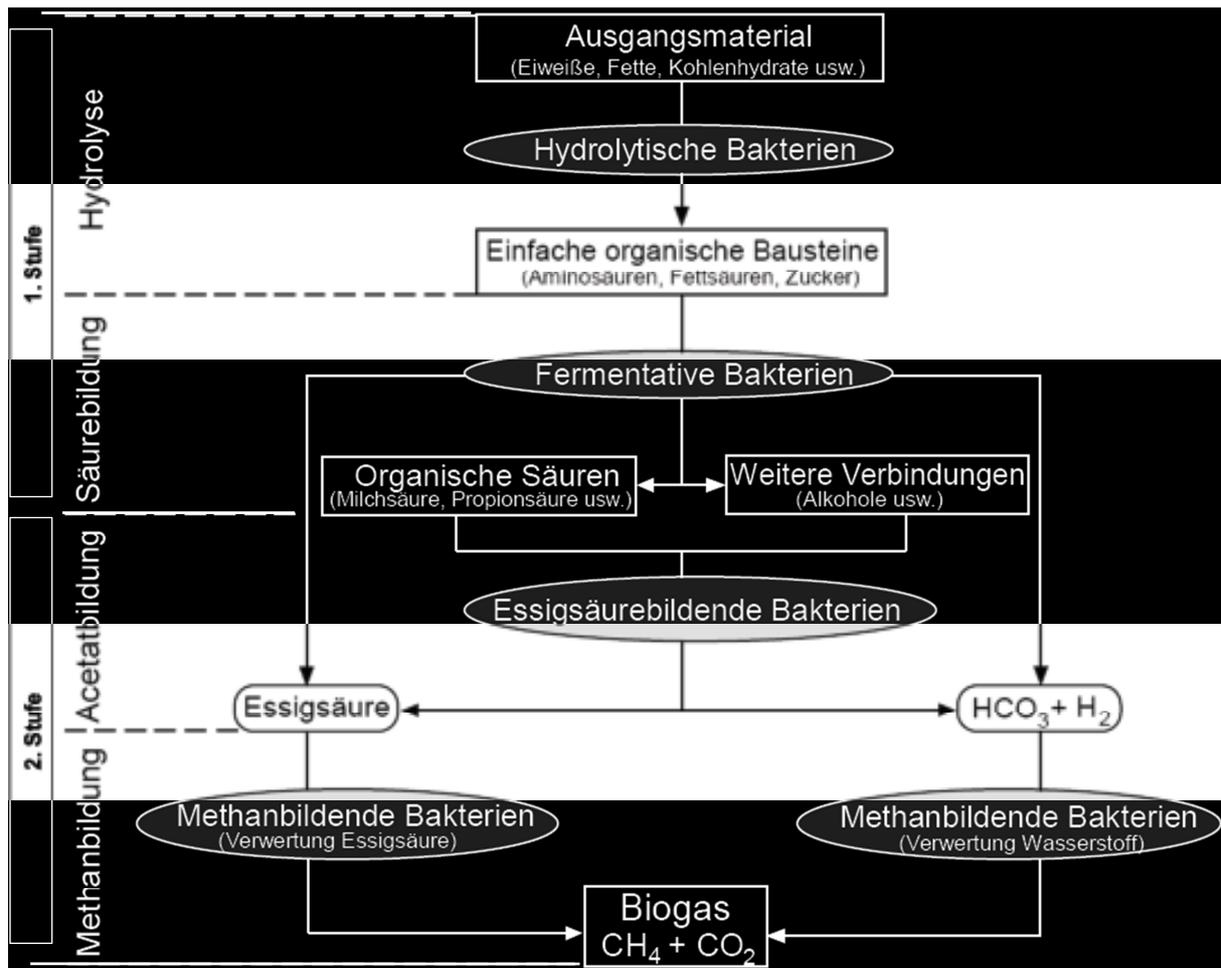


Abbildung 3: Prozessstufen des anaeroben Abbaus (SCHOLWIN ET AL., 2009)

### Hydrolyse/Acidogenese

Im Bereich der Biogasbildung wird die Spaltung von polymeren Substraten in Bruchstücke als Hydrolyse bezeichnet. Zweck der Hydrolyse ist es, höhermolekulare Substanzen in niedermolekulare Substanzen zu spalten, die von den Mikroorganismen in den nachfolgenden Stufen der Biogasbildung aufgenommen und weiter abgebaut werden können. Zucker und Hemizellulose sind sehr gut aufzuschließen, während die Hydrolyse von Zellulose, Stärke oder Pektin deutlich langsamer verläuft. Bei Lignin ist ein Aufschluss durch hydrolysierende Bakterien nur sehr langsam bis gar nicht möglich (BISCHOFBERGER ET AL., 2005).

Die Zwischenprodukte der Hydrolyse werden während der Acidogenese durch Versäuerungsbakterien weiter zu niederen Carbonsäuren (Essig-, Propion- und Buttersäure), geringen Mengen Milchsäure und Alkoholen, sowie Kohlendioxid und Wasserstoff abgebaut (FNR, 2010). Versäuerungsbakterien sind schnell wachsende Bakterien mit den kürzesten Generationszeiten aller an der Biogasbildung beteiligten Bakterien (GERBER, 2009).

Ein Kennzeichen der Versäuerung ist die Abnahme des Energiegehalts des Substratgemischs, um circa 10%. Die Energie wird dem Substrat in Form von gasförmigem Wasserstoff entzogen. Die Zusammensetzung der Endprodukte der Acidogenese hängt von der Zusam-

mensetzung des Substrats, von den Prozessbedingungen im Reaktor, von der Substratbelastung und dem  $H_2$ -Partialdruck ab.

### **Acetogenese/Methanogenese**

Die in der Hydrolyse und Acidogenese entstandenen Produkte werden nun in der Acetogenese (Essigsäurebildung) durch Bakterien zu Vorläufersubstanzen des Biogases umgesetzt (Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid) (FNR, 2010). In der sich an die Acetogenese anschließenden Methanogenese wird aus den Produkten der Acetogenese Methan gebildet (BISCHOFBERGER ET AL., 2005). Die Methanbildung kann aus Wasserstoff, Kohlenstoffdioxid, Ameisensäure, Essigsäure, Methanol, Methylen und weiteren Spaltprodukten erfolgen (SCHERER, 2008; BISCHOFBERGER ET AL., 2005). Ist die Methanbildung gestört, kommt es zur Anreicherung von längeren Karbonsäuren, wie zum Beispiel Buttersäure, was gleichzeitig auf eine Störung der Acetogenese hinweist (BISCHOFBERGER ET AL., 2005).

### **Eintrag von Hemm- und Störstoffen**

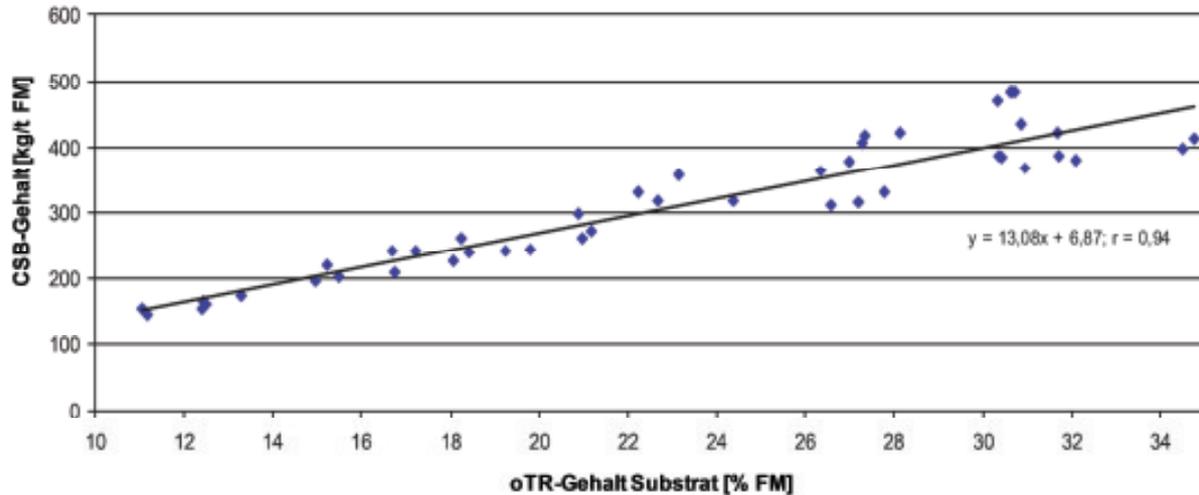
Der Prozessablauf kann aus unterschiedlichen Gründen gestört werden. Die Störung kann sowohl durch betriebstechnische Änderungen als auch von Hemmstoffen, die den Prozessfortschritt verzögern und die Bakterien hemmen verursacht werden (FNR, 2010). Eine Hemmung ist eine reversible Veränderung der kinetischen Parameter der beteiligten Bakterien. Dagegen kann bei einer toxischen Wirkung eine irreversible Abtötung von aktiven Bakterien eintreten (BISCHOFBERGER ET AL., 2005). Die Hemmung ist abhängig von der Konzentration der Hemmstoffe, der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials und der Anpassung der Bakterien an den Hemmstoff (KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001).

Hemmstoffe können durch die Substratzugabe in den Fermenter gelangen. Da sich grundsätzlich jeder Inhaltsstoff eines Substrats in zu hoher Konzentration schädlich auf die Bakterien auswirken kann, ist eine Hemmung bei übermäßigen Substratzugaben nicht auszuschließen (FNR, 2010). Außerdem können unterschiedliche Hemmwirkungen durch verschiedene Stoffe hervorgehoben werden, die teilweise aus dem eigenen Stoffwechsel der Biozönose stammen. Substanzen wie Schwefelwasserstoff, Nitrat- bzw. Ammoniumstickstoff und flüchtige organische Säuren, die als Stoffwechselprodukte aus dem anaeroben Prozess hervorgehen, wirken ausschließlich in undissoziierter Form hemmend auf den Abbauprozess. Somit ist die hemmende Wirkung dieser Stoffe stark abhängig von dem pH-Wert des Fermenterinhalt (FRITZ, 2006). Hemmwirkungen verschiedener Stoffe hängen also von mehreren Faktoren ab, was eine Festlegung auf feste Grenzwerte erschwert (FNR, 2010).

### **Belastungsparameter**

Einer der wichtigsten Grundparameter im Biogasprozess stellt die täglich eingebrachte Substratmenge  $Q_0$  in  $[m^3/d]$  mit der Konzentration  $c_0$  in  $[kg\ oTS/m^3]$  dar. Für die Bestimmung der Konzentrationen der eingebrachten Frischmasse wird in der Regel organische Trockensubstanz (oTS) oder Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) angewandt. Der CSB-Gehalt kann

analog zum oTS-Gehalt für die Bestimmung des abbaubaren Anteils eingesetzt werden. Beide Parameter sind gegeneinander austauschbar (FNR, 2010), wobei der CSB-Gehalt für flüssige Substrate besser geeignet ist. Abbildung 4 zeigt den Zusammenhang zwischen CSB- und oTS-Gehalten.



**Abbildung 4: Korrelation von CSB und oTS [FNR, 2009]**

Aus dem Zusammenhang ergibt sich eine lineare Funktion, die die Umrechnung der beiden Parameter in einander ermöglicht. Daraus lässt sich ein Umrechnungsfaktor von 1,33 für die Umrechnung der oTS-Gehalte in CSB herleiten.

**Formel 1: Umrechnung der oTS-Gehalte in CSB-Gehalt**

$$c_0(CSB) = c_0(oTS) \cdot 1,33$$

Der abbaubare Anteil des Substrates wird in dem Fermenter mit dem Gärvolumen  $V_R$  in  $[m^3]$  in Biogas und Bakterienbiomasse mit der Ablaufmenge  $Q_A$  in  $[m^3/d]$  mit einer Ablaufkonzentration  $c_A$  in  $[kg\ oTS/m^3]$  umgesetzt, wobei  $Q_A$  auch nicht abgebaute Substratreste enthält. In einem idealen Rührreaktor ohne Volumenänderung des Gärsubstrates sind Zulaufrate ( $Q_0 \cdot c_0$ ) und Ablaufrate ( $Q_A \cdot c_A$ ) gleich, also  $Q_0 = Q_A = Q$  (WEILAND, 2001; LINKE, 2006).

Mit diesen Größen lassen sich einige Betriebsparameter zur Beschreibung der Belastungssituation in einer Biogasanlage definieren. In erster Linie handelt es sich um folgende Belastungsparameter:

- Raumbelastung
- Schlammbelastung und
- mittlere hydraulische Verweilzeit

**Raumbelastung**

Ein wichtiger Belastungsparameter im Betrieb einer Biogasanlage ist die Raumbelastung ( $B_R$ ). Die Raumbelastung gibt an, wieviel organische Substanz (oTS oder CSB) dem Fermenter je  $m^3$  Arbeitsvolumen pro Tag  $[d]$  zugeführt wird (FNR, 2010). Die Raumbelastung wird in  $kg\ oTS/(m^3 \cdot d)$  bzw.  $kg\ CSB/(m^3 \cdot d)$  angegeben.

**Formel 2: Raumbelastung**

$$B_R = (Q_0 \cdot c_0) / V_R$$

**Schlammbelastung**

Wird zur Berechnung die Ablaufkonzentration  $c_A$  einbezogen, steht ein noch genauerer Bemessungsparameter, die Schlammbelastung  $B_{oTS}$ , zur Verfügung. Die oTS-Last des zugeführten Substrats ( $Q_0 \cdot c_0$ ) wird dabei nicht nur auf das Volumen des Fermenters ( $V_R$ ), sondern auch auf die Konzentration ( $c_A$ ) der im Reaktor vorhandenen und am Biogasprozess beteiligten Biomasse (Mischung aus Frischsubstrat, Restsubstrat und Bakterienbiomasse) bezogen (KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001). Dabei handelt es sich um das Verhältnis von zugeführter Substratmenge bezogen auf die im Reaktor verfügbare Biomasse und damit Bakterienzahl. Mit dem Parameter lässt sich eine mögliche Substrathemmung feststellen. Die Schlammbelastung wird in kg oTS/(kg oTS·d) bzw. kg CSB/(kg CSB·d) angegeben.

**Formel 3: Schlammbelastung**

$$B_{oTS} = (Q_0 \cdot c_0) / (V_R \cdot c_A)$$

**Verweilzeit**

Um einen bestimmten Abbaugrad des zugeführten Substrats zu erreichen und die notwendige Mindestzeit für das Bakterienwachstum zu ermöglichen, ist eine Mindestverweilzeit des Substrats im System einzuhalten (FNR, 2010). Ein Parameter dafür ist die mittlere hydraulische Verweilzeit (HRT), die einen direkten Einfluss auf die Dimensionierung der Behältergröße ( $V_R$ ) hat. Die Verweilzeit wird in der Regel in Tagen [d] angegeben.

**Formel 4: Mittlere hydraulische Verweilzeit**

$$HRT = V_R / Q_0$$

In einem volldurchmischten System kann die tatsächliche Verweilzeit von der mittleren berechneten abweichen, da je nach Durchmischung des Fermenters Kurzschlussströmungen entstehen können. Wird dem Fermenter mehr Substrat mit gleichbleibender Konzentration zugeführt, wird die Raumbelastung steigen und die Verweilzeit sich somit verkürzen, wodurch ein enger Zusammenhang zwischen den beiden Größen entsteht (vgl. Abbildung 5).

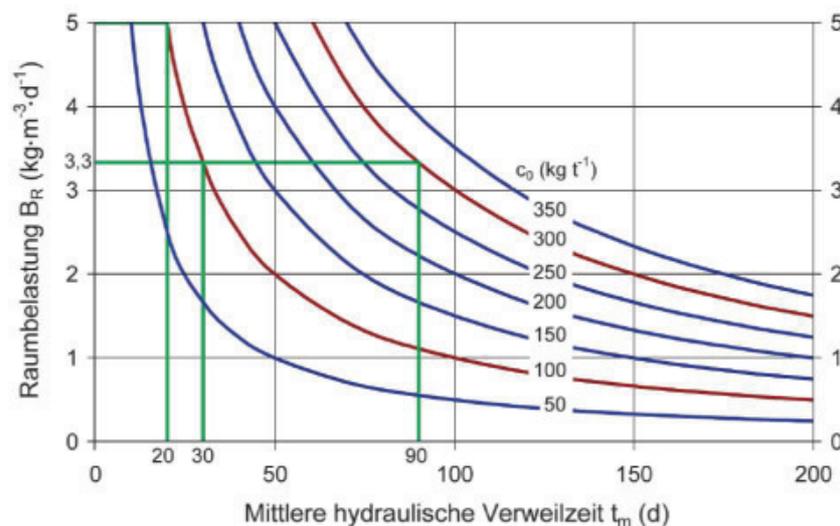


Abbildung 5: Beziehung zwischen Raumbelastung, Verweilzeit und Substratkonzentration (LINKE, 2006)

### Leistungsparameter

Zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit einer Biogasanlage wird das entstehende Biogas herangezogen. Als Bezugsgröße dient dabei entweder die Biogasmenge oder die Methanmenge. Die täglich gebildete Biogasmenge wird als  $Q_B$  bzw.  $Q_{CH_4}$  für Methanmenge in  $[Nm^3/d]$  angegeben. Um die Gastemperatur- und Luftdruckschwankungen auszugleichen, werden die Biogasmengen auf die Normbedingungen umgerechnet ( $0\text{ °C}$  bzw.  $273,15\text{ K}$  und  $1013\text{ hPa}$ ) (FNR, 2009).

#### Formel 5: Normvolumen

$$V_N = V \cdot p \frac{p_N T_N}{p_N T}$$

#### Formel 6: Tägliches Biogas-Normvolumen

$$Q_B = V \cdot \frac{p \cdot T_N}{p_N \cdot T} \cdot \frac{1}{t}$$

(mit  $t = 1\text{ d}$ )

### Biogas-/Methanproduktivität

Werden die täglich produzierten Gasmengen ( $Q_B$ ) auf das Reaktorvolumen ( $V_R$ ) bezogen, so ergibt sich eine Größe für Effektivität eines Fermentervolumens (FNR, 2010). Die Biogasproduktivität ( $P_{Biogas}$ ) wird dabei in  $[Nm^3/(m^3 \cdot d)]$  angegeben.

#### Formel 7: Biogasproduktivität

$$P_{Biogas} = Q_B / V_R$$

### **Biogasausbeute**

Soll die Effizienz der Gasproduktion bezogen auf die Inputstoffe bestimmt werden, wird der Quotient aus der produzierten Biogasmenge ( $Q_B$ ) und der täglich eingebrachten organischen Substanz ( $Q_O \cdot c_O$ ) errechnet (FNR, 2010). Die so ermittelte Biogasausbeute ( $A_{\text{Biogas}}$ ) des Substrats wird in [ $\text{Nm}^3/\text{kg oTS}$ ] angegeben.

#### **Formel 8: Biogasausbeute**

$$A_{\text{Biogas}} = Q_B / (Q_O \cdot c_O)$$

### **Abbaugrad**

Die Effizienz der Ausnutzung der eingesetzten Biomasse lässt sich über den Leistungsparameter Abbaugrad ( $\eta_{\text{oTS}}$ ) errechnen. Dabei wird die Differenz zwischen der zugeführten organischen Substanz ( $Q_O \cdot c_O$ ) und der restlichen Organik im Ablauf ( $Q_A \cdot c_A$ ), was der in Biogas umgesetzten organischen Substanz entspricht, ins Verhältnis zu der eingebrachten organischen Substanz ( $Q_O \cdot c_O$ ) gesetzt (FNR, 2010).

#### **Formel 9: Abbaugrad**

$$\eta_{\text{oTS}} = ((Q_O \cdot c_O) - (Q_A \cdot c_A)) / (Q_O \cdot c_O)$$

## **3.4 Grundlagen thermische Verwertung**

### **3.4.1 Verbrennung**

Verbrennung beschreibt den Prozess vollständiger Oxidation kohlenstoffhaltiger Materialien. Der Prozess ist exotherm. Es entstehen Kohlendioxid und Wasser in veränderlichen Anteilen, zudem fallen je nach Ausgangssubstrat, Aschen und Schlacken verschiedener chemischer Zusammensetzung an.

Das Treibsel der niedersächsischen Nordseeküste und der Ästuarien wurde in der Vergangenheit bereits mehrfach hinsichtlich seiner Eignung als Einsatzstoff zur Energieerzeugung betrachtet und analysiert. Überwiegend wurde hier die Energieerzeugung durch die Verbrennung von Treibsel untersucht. Dieser Ansatz stellte sich in der Literatur als relativ problematisch dar (SÜßMANN, 1997; STRECKER, 1995). Die Problematik besteht vor allem in der Zusammensetzung des Treibsel (z. B. Chlorkonzentrationen im Material) und der entstehenden Rauchgasemissionen, die bei der alleinigen Verbrennung von Treibsel relative hohe toxische Bestandteile, wie bspw. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe oder polychlorierte Dibenzop-Dioxine und -Furane, aufweisen. Um diesen Effekten entgegenzuwirken, wären beim Einsatz des Treibsel als Brennstoff umfangreiche und aufwändige Maßnahmen zur Rauchgasreinigung nötig (STRECKER, 1995, S. 37).

Eine Alternative zum alleinigen Einsatz von Treibsel zur Energieerzeugung durch Verbrennung stellt ggf. die Nutzung des Materials als Co-Brennstoff dar (SÜßMANN, 1997, S. 22). Allerdings wird auch hier mit einer relativ aufwendigen Rauchgasreinigung als limitierender Faktor einer ökologisch sinnvollen Verbrennung des Treibsel argumentiert (ebd., S. 22).

Zudem muss bei der Co-Verbrennung von Treibsel in bestehenden Anlagen mit einem erhöhten Wartungsaufwand und steigenden Betriebskosten gerechnet werden (ebd., S. 22).

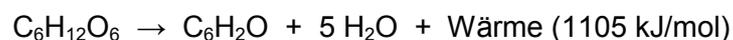
### 3.4.2 Hydrothermale Carbonisierung

Bei der hydrothermalen Carbonisierung (HTC) wird Biomasse in überhitztem Wasser und unter erhöhtem Druck mittels eines thermochemischen Umwandlungsprozesses zu Biokohle formiert. Dieser Prozess ist vergleichbar mit dem natürlichen Ablauf der Inkohlung von Biomasse, der sich in vielen Millionen Jahren unter hohem Druck vollzogen hat und u. a. zur Entstehung von Braun- und Steinkohle führte.

Zur Herstellung der HTC-Kohle wird Biomasse verschiedenster Art (Laub, Bioabfall, Stroh) in einem geschlossenen Druckgefäß mit Wasser versetzt. Zur Inangsetzung der Reaktion muss Aktivierungsenergie in Form von Wärme zugeführt werden. Der Prozess läuft bei Temperaturen von 180-220 °C und Drücken zwischen 15 und 35 bar ab. In 4 – 16 Stunden entsteht eine wässrige schwarze Suspension mit feinen kolloidförmigen Kohlepartikeln. Nach Abfiltern des Wassers verbleibt eine Torf oder Braunkohle ähnliche Substanz (RAMKE, 2001, S. 1). Damit unterscheidet sich dieses Verfahren von anderen thermochemischen Verfahren, bei denen flüssige oder gasförmige Produkte erzeugt werden. Bei der hydrothermalen Carbonisierung steht die Erzeugung des Feststoffes, der Kohle im Vordergrund. In der Kohle finden sich bis zu 70 - 85 % des eingesetzten Kohlenstoffs wieder. Aus welchen Molekülen sich die Festphase zusammensetzt ist noch nicht vollständig untersucht. Die Gasphase, die 5 - 9 % des Kohlenstoffs enthält, besteht zum größten Teil aus CO<sub>2</sub>, mit einem geringen CO - Anteil. In der Flüssigphase, die sich u.a. aus organischen Säuren, Zucker, Huminstoffen und Phenolen zusammensetzt, finden sich 10 - 25 % des Kohlenstoffs wieder (KIESELER, 2010; VORLOP ET AL., 2009, S. 66).

Die chemische Reaktion beinhaltet eine Dehydratisierung und eine Decarboxylierung und kann mit folgender Summenformel vereinfacht dargestellt werden:

**Formel 10: Chemische Reaktion der hydrothermalen Carbonisierung**



Der Kohlenstoff des Zuckers, hier als Edukt verwendet, wird zu 100 % umgesetzt und findet sich in den oben genannten Phasen in unterschiedlichen Verbindungen wieder. Weiterhin entstehen Wasser und Abwärme.

Die Menge des in der Festphase verbleibenden Kohlenstoffs (Kohlenstoffeffizienz) ist abhängig vom eingesetzten Substrat, den Verfahrensbedingungen sowie dem Entwässerungsverfahren für den Feststoff. Der entstandene Kohlenstoff besitzt noch 2/3 seines Brennwertes. Der Rest geht während des Prozesses als Abwärme verloren, wenn sie nicht genutzt wird (ANTONIETTI, 2006, S. 25).

### 3.4.3 Pyrolyse

Bei der Pyrolyse handelt es sich um einen thermochemischen Umwandlungsprozess, der ohne Sauerstoff, lediglich unter Einwirkung von Wärme stattfindet (KALTSCHMITT ET AL., 2009, S. 378). Die Pyrolyse lässt sich in vier Phasen einteilen:

- Bis 220 °C findet eine Aufheizung und Trocknung des Materials statt.
- Bei 280 °C beginnt der endotherme Teil der pyrolytischen Zersetzung. Hierbei entstehen CO<sub>2</sub>, Essig- und Ameisensäure.
- Bis 500 °C vollzieht sich eine heftige exotherme Reaktion, bei der brennbare Gase entstehen (Kohlenmonoxid, Methan u. a.). Diese werden so schnell aus der Feststoffmatrix getrieben, dass kondensierbare organische Verbindungen mitgerissen werden und als Rauch in Erscheinung treten. Bis ca. 300 °C bleibt die ursprüngliche Struktur der Biomasse erhalten. Ab ca. 400 °C bildet sich eine kristalline Struktur aus.
- Ab 500 °C beginnt wieder eine endotherme Reaktion. Austretende Gase werden beim Durchgang durch die bereits verkohlten Schichten aufgespalten. Dabei entstehen brennbare Gase.

Es werden zwei Pyrolysetechnologien unterschieden; die langsame Pyrolyse und die Flashpyrolyse. Bei der Flashpyrolyse, die mit hohen Temperaturen (> 800 °C) und schnellen Aufheizraten arbeitet, überwiegen die gasförmigen Anteile der Pyrolyseprodukte.

Die Herstellung von Holz- oder Pflanzenkohle erfolgt mittels langsamer Pyrolyse. Niedrige Temperaturen (450 °C bis 600 °C), geringe Aufheizraten und relativ lange Verweilzeiten bestimmen den Prozessablauf und gleichzeitig die Anteile der Pyrolyseprodukte. Bei der Pyrolyse entstehen wie bei der Hydrothermalen Carbonisierung feste, flüssige und gasförmige Produkte. Der Anteil der Feststoffe bei der Herstellung von Biokohle beträgt jedoch nur 20 – 25 %. Flüssige Pyrolyseprodukte haben einen Anteil von etwa 60 %. Sie bestehen hauptsächlich aus Pyrolyseölen und Teeren. Der gasförmige Anteil beträgt etwa 20 % und besteht hauptsächlich aus CO<sub>2</sub>, CO und CH<sub>4</sub>. Je höher die Prozesstemperatur, umso mehr verschiebt sich der Anteil flüssiger Produkte hin zum gasförmigen Produktanteil. Bei einer Temperatur von 1600 °C sind nur noch 20 % des Produkts flüssig. Der Feststoffanteil bleibt ab einer Temperatur von 800 °C nahezu konstant (KALTSCHMITT ET AL., 2009, S. 388).

Ein Teil, der durch den Prozess freigesetzten Wärmeenergie, muss wieder in den Prozess eingebracht werden, da der Prozess endotherm verläuft. Für die Pyrolyse werden möglichst trockene Ausgangsstoffe verwendet, da ein hoher Wassergehalt nur zu einem erhöhten Heizbedarf führt und somit die Energiebilanz verschlechtert. Es existieren zahlreiche Einsatzmöglichkeiten für Holz- und Pflanzenkohle u. a. als Brennmaterial oder als Bodenverbesserer.

### 3.5 Grundlagen Biostabilität

Allgemein betrachtet stellt die Biostabilität von Biomasse die Widerstandsfähigkeit einer Substanz gegenüber biotischen und abiotischen Umweltfaktoren dar. Zu den biotischen Umweltfaktoren zählen u. a. Mikroorganismen, die durch ihre Stoffwechselfähigkeit Mole-

külgrößen organischer und anorganischer Substrate verringern. Dies erfolgt unter guten Bedingungen für die Mikroorganismen bis zur Mineralisierung der Substrate. Abiotische Umweltfaktoren, wie z. B. Temperatur und Druck bestimmen biochemische, chemische und physikalische Ab- oder Umbauprozesse, die ebenfalls die Stabilität beeinflussen.

Detaillierter betrachtet, wird die Biostabilität durch Rekalzitranz, intermolekularer Reaktionsabläufe sowie durch die lokale Verfügbarkeit der Biomasse für die Mikroorganismen bestimmt (SOLLINS ET AL., 1996, S. 69).

Die Rekalzitranz gibt an, wie stabil organische Verbindungen gegenüber dem mikrobiellen Abbau aufgrund ihrer chemischen Struktur und des molekularen Aufbaus sind. Ein stabiler molekularer Aufbau ist gekennzeichnet durch das Vorhandensein vieler aromatischer Verbindungen, mit einer möglichst geringen Zahl funktioneller Gruppen, die zu komplexen Molekülstrukturen verknüpft werden. Organische Verbindungen, die ohne die Mitwirkung von Enzymen aufgebaut werden, wie z. B. Lignin, besitzen eine höhere Rekalzitranz als organische Verbindungen bei deren Aufbau Enzyme mitwirken (STADTMÜLLER, 2004, S. 258). Eine hohe Rekalzitranz hat zur Folge, dass den Mikroorganismen der enzymatische Abbau aufgrund der chemischen Struktur des Substrates erschwert ist. Demzufolge reichern sich rekalzitranzte Verbindungen gegenüber leicht abbaubaren Verbindungen an (SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL, 2010, S. 59).

Molekulare Interaktionen, die die Biostabilität beeinflussen, sind Reaktionen der funktionellen Gruppen organischer Substanzen mit Mineraloberflächenstrukturen. Dies führt dazu, dass die funktionellen Gruppen nicht mehr für den enzymatischen Abbau zugänglich sind. Weiterhin können hierbei kleinere Moleküle der organischen Substanz in Porenräumen gebunden werden, in die die Enzyme nicht mehr vordringen können und somit ein weiterer Abbau nicht möglich ist (KÖGEL-KNABNER, 2008, S. 22).

Die lokale Verfügbarkeit von organischen Substanzen für die Mikroorganismen wird charakterisiert durch die räumliche Nähe der Mikroorganismen zum Substrat. Hier kann die Tiefe der Bodenschichten entscheidend sein, in die eine Biomasse eingebracht wird. Die Anzahl der Bodenorganismen nimmt mit der Tiefe signifikant ab. 80 % der mikrobiellen Biomasse bis zu einer Tiefe von 1 m befindet sich in den oberen 25 cm (JOHANNES & OTTOW, 2011, S. 22). Diese, die Biostabilität der Biomasse bestimmenden Faktoren, werden von einer Vielzahl von direkten Einflüssen auf die Biomasse und das Substratgefüge, in das sie eingebracht wird, bestimmt. In erster Linie sind hier die Temperatur, der Wassergehalt, die Kationenaustauschkapazität, der pH-Wert, der Nährstoffgehalt und das elektrische Potential bestimmend. Jeder dieser Faktoren kann sich positiv wie auch negativ auswirken. Das Gesamtgefüge der Faktoren, bestehend aus biologischen, chemischen und physikalischen Größen führt somit zu einem komplexen Gefüge, das letztendlich die Stabilität der Substrate bestimmt (SOLLINS ET AL., 1996, S. 69). Die Komplexität dieser Wechselwirkungen erschwert das Ableiten allgemeingültiger Aussagen über die Biostabilität von Biomasse.

Analog zur Einteilung der Abbaubarkeit organischer Substanz in Böden, kann auch die Biostabilität von Biomasse in verschiedene Pools eingeteilt werden (SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL, 2010). Es wird zwischen aktiver, intermediärer und passiver Biomasse unter-

schieden. Zur Charakterisierung dieser Pools erfolgt hier eine Darstellung der submikrobiellen Strukturen für verschiedene Substratzustände.

### Aufbau und Struktur frischer Biomasse (aktive Biomasse)

Die Submikrostruktur der Zellwände pflanzlicher Biomasse wird wesentlich durch Cellulose, Hemicellulose und Lignin bestimmt. Je nach Art der Biomasse sind die Zellwände zu 35 - 40 % aus Cellulose, 20 - 25 % aus Hemicellulose und zu 15 - 25 % aus Lignin aufgebaut. Sie enthalten zusätzliche Verbindungen, wie Proteine, Pektine, Kohlenhydrate (Hexosen und Pentosen), Fette, Wachse und niedermolekulare organische Säuren (RADEMACHER, 2010). Einige dieser Verbindungen werden von den Mikroorganismen, aufgrund ihrer geringen Größe und des einfachen Aufbaus, schnell zersetzt. Fette oder Wachse hingegen sind relativ resistent gegen den Abbau und dienen im späteren Umbau der Biomassestruktur der Schaffung stabiler Verbindungen (GEODATAZONE, 2010).

**Cellulose** als Kernsubstanz der Biomasse ist aus D-Glucose Molekülen zusammengesetzt. Diese sind als heterozyklische Verbindungen aufgebaut, die ein Sauerstoffatom als Heteroatom in der cyclischen Verbindung enthalten. Vier OH-Gruppen, sowie eine Hydroxymethylgruppe ( $\text{CH}_2\text{OH}$ ) sind als funktionelle Gruppen in einem Molekül gebunden.

Cellulose ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_5$ ) besteht zu 44 % aus Kohlenstoff, 6 % aus Wasserstoff und 50 % aus Sauerstoff (Massenprozente). Ist das Glucosemolekül erst einmal abgespalten, wird es von den Mikroorganismen vollständig umgesetzt. Durch  $\beta$  1,4-Bindungen sind die Moleküle kovalent zu Polysacchariden miteinander verknüpft und bilden die in Abbildung 6 erkennbaren langen, unverzweigten Ketten.

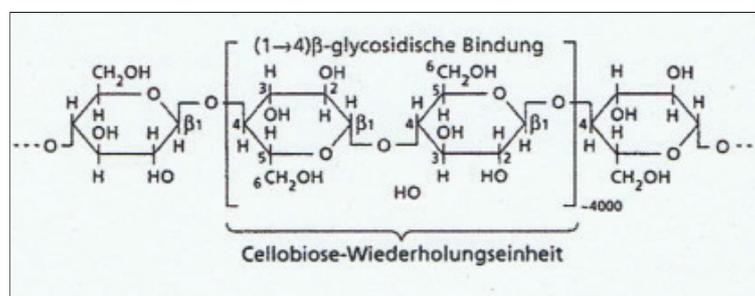
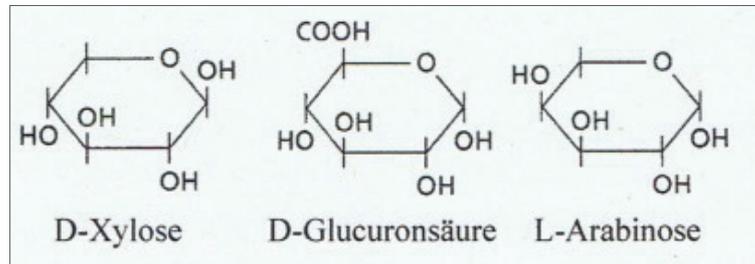


Abbildung 6: Struktur der Cellulose (VON PUTTKAMER, 2005)

Der mikrobielle Abbau der Cellulosestränge erfolgt nur durch das Zusammenspiel verschiedener Enzyme, die jeweils an verschiedenen Stellen des Polymers angreifen (KALTSCHMITT ET AL., 2009, S. 783). Die pyrolytische Zersetzung der Cellulose erfolgt zunächst durch eine wärmeinduzierte Spaltung der glycosidischen Bindung. Im weiteren Verlauf kommt es zu der Transglycosylierung, die Teer und Kohlebildung zur Folge hat und der Cyclo- und Aldol-Reversion, bei der die niedermolekularen Verbindungen wie z. B. Acetaldehyd oder Furfural erzeugt werden. Diese Reaktionen laufen parallel ab (KALTSCHMITT ET AL., 2009, S. 783).

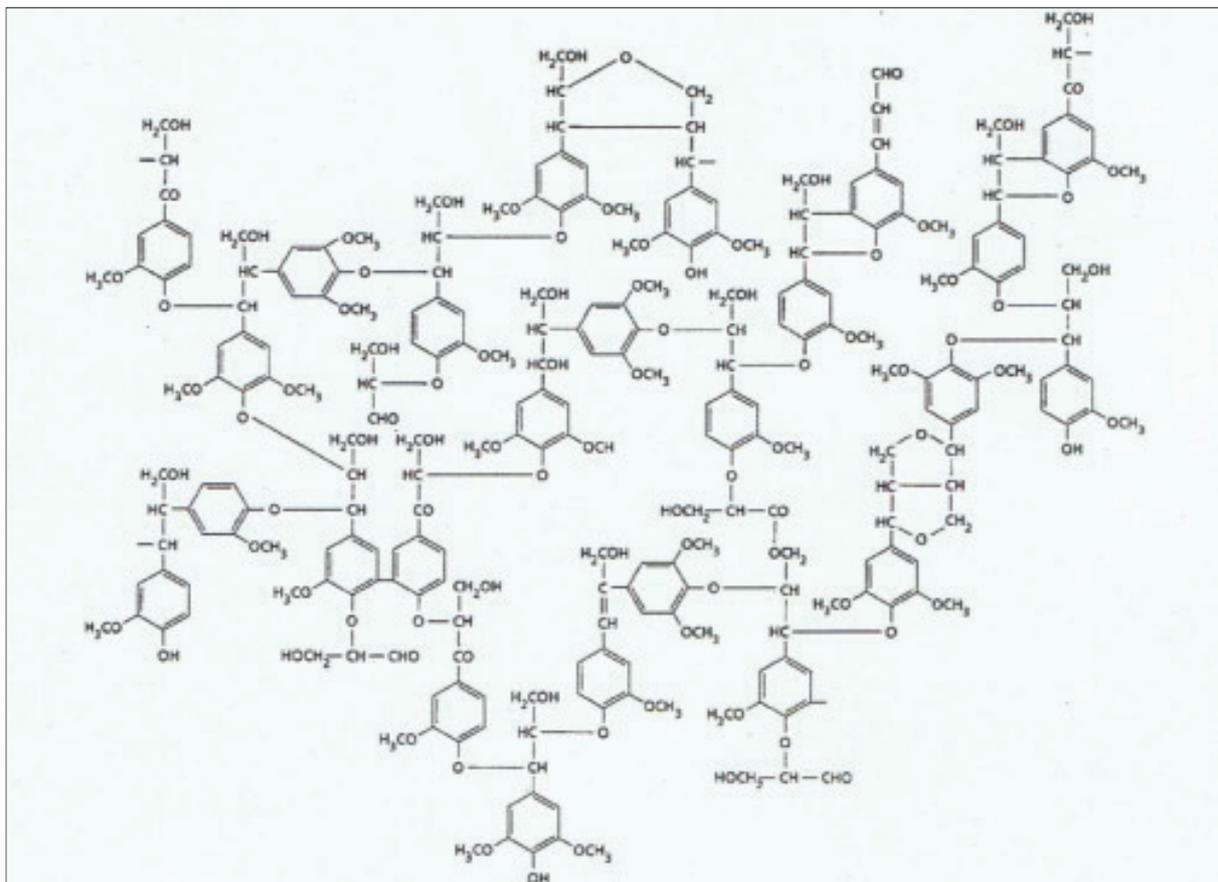
**Hemizellulosen** sind flexible Polysaccharide, die sich an der Celluloseoberfläche anlagern und somit zur Stabilisierung der Zellstruktur beitragen. Sie enthalten als Hauptbestandteile die Folgenden skizzierten Hexosen D-Xylose, D-Glucuronsäure sowie die L-Arabinose

(Abbildung 7). Die Ketten der Hemicellulose sind wesentlich kürzer als die der Cellulose, dafür aber stärker verzweigt. Hemicellulosen bestehen zu 45 % aus Kohlenstoff, 6 % aus Wasserstoff und zu 49 - 50 % aus Sauerstoff (Massenprozent).



**Abbildung 7: Hauptbestandteile der Hemizellulose**

**Lignin** besteht aus amorphen, polymeren Phenylpropanoiden, deren Phenylring mit Hydroxylgruppen (-OH), Methoxygruppen (-OCH<sub>3</sub>) oder Aroxygruppen (-O-R) substituiert ist.



**Abbildung 8: Teilstruktur eines Ligninmoleküls (VON PUTTKAMER, 2005)**

Lignin ist ein stark verzweigtes Polymer, das durch seine kovalenten Bindungen mit Cellulose und anderen Polysacchariden der Zellwand ein strukturbildendes Verbindungselement darstellt. Lignin besteht zu 60-63 % aus Kohlenstoff, zu 6 % aus Wasserstoff und 31 – 34 % aus Sauerstoff (Massenprozent).

Dieser vielfältige Strukturaufbau führt zu einer Vielzahl von Molekülbindungsmöglichkeiten bei einem mikrobiellen, sowie auch thermochemischen Ab- bzw. Umbau der Biomasse.

### Intermediäre Biomasse

Beim aeroben wie auch beim anaeroben Abbau findet eine teilweise Mineralisierung der Substrate statt. Bei der Kompostierung kommt es durch enzymatischen Abbau der Cellulose zur Bildung von Glukose, die während der Glykolyse zu Pyruvat umgebaut wird. Dies wird bei aerobem Abbau im Citratzyklus zu  $\text{CO}_2$  und Reduktionsäquivalenten metabolisiert. Im Vergärungsprozess wird das Pyruvat unter anaeroben Bedingungen abgebaut und zu  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$  umgesetzt. Nichtabbaubare Stoffe, überwiegend ligninartige Substanzen und Reste organischer Säuren, bleiben als Gärrest übrig. Durch verschiedene, letztlich noch nicht vollständig aufgeklärte Ab- und Umbauprozesse, an denen das Lignin einen hohen Anteil hat, entstehen beim aeroben Abbau Huminstoffe. Die Humifizierung ist ein biochemischer Prozess, bei dem Spalt- und Zwischenprodukte, die aus dem Zellverband freigesetzten organischen Stoffe, durch die unterschiedlichsten Reaktionen miteinander reagiert und hochmolekulare stabile Huminstoffe bilden. Diese werden nach ihrer Löslichkeit in Fulvosäuren, Huminsäuren und Humine unterteilt. Fulvosäuren besitzen viele Carbonylgruppen ( $\text{C}=\text{O}$ ), wohingegen die Huminsäuren einen höheren Anteil aromatischer Verbindungen enthalten. Durch eine Anreicherung des Kohlenstoffs in den verschiedenen Umbauprozessen kommt es zu einem kompakteren Aufbau der Huminstoffe, der ihnen eine hohe Stabilität verschafft (GEISLER, 1998). In Abbildung 9 ist die Strukturformel einer Huminsäure dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass diese im Gegensatz zum Lignin mehrkernige aromatische Verbindungen enthält. Das führt zu einer Anreicherung von Kohlenstoff in der Verbindung.

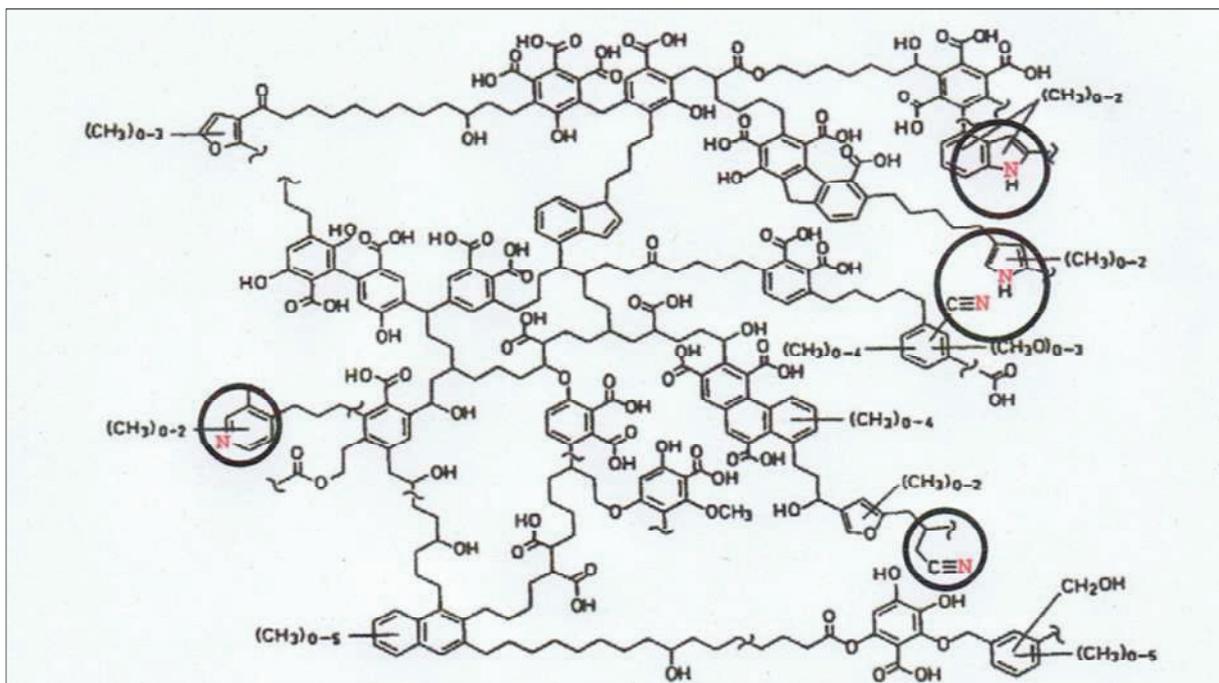


Abbildung 9: Strukturmodell einer Bodenhuminsäure (KÖRNER, 2008)

## 4 Material und Methoden

In den folgenden Unterkapiteln werden die Materialien und Methoden beschrieben, die zum Lösen der Fragestellung verwendet bzw. angewendet wurden.

### 4.1 Literaturrecherche

Ziel der Literaturrecherche ist es, einen Überblick über den Stand der wissenschaftlichen Untersuchungen zum Aufkommen und zur Verwertung von Treibsel zu erhalten. Zusätzlich sollen bestehende Ansätze oder Lösungen zur energetischen Verwertung von Treibsel in der Praxis aufgezeigt werden. Im Rahmen dieser Literaturrecherche werden zunächst die Kataloge der Göttinger Bibliotheken nach themenbezogener Literatur durchsucht, vor allem der Katalog der Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen. Neben der Suche nach themenverwandten Büchern wird zusätzlich der Fachzeitschriftenbestand nach Artikeln bezüglich Treibsel untersucht. Die Suche nach Fachliteratur wird durch Abfrage des Gemeinsamen Verbundkatalogs des Bibliotheksverbundes ausgeweitet. Parallel zu der Suche in Bibliotheken nach Literatur wird eine ausgiebige Internetrecherche durchgeführt. Um Informationen über die energetische Verwertung von Treibgut in anderen Ländern zu erhalten, wird ebenfalls eine ausgiebige Internetrecherche durchgeführt. Vereinzelt werden auch Instanzen des Küstenschutzes telefonisch kontaktiert.

### 4.2 Umfrage – allgemeines Vorgehen

Im Jahr 2009 wurde eine schriftliche Umfrage bei den Deichverbänden durchgeführt, um weitere detaillierte Angaben zum Treibsel und dessen Behandlung in den verschiedenen Deichverbänden zu erhalten. Der dafür entwickelte Fragebogen ist im Anhang enthalten und in die folgenden Bereiche gegliedert:

- Teil A: Allgemeine Angaben zum Deichverband und Angaben zu Treibsel
- Teil B: Bergung und Transport von Treibsel
- Teil C: Behandlung des Treibsel

Durch Telefonate mit der Geschäftsführung des WASSERVERBANDSTAGS (2009, pers. Mitteilung), dem Oberverband der Deichverbände, im Juli und August 2009 wurde bekannt, dass bereits Daten in Bezug auf Treibselmengen, Entsorgungskosten und Arten der Treibselentsorgung der einzelnen Deichverbände Niedersachsens existieren. Diese wurden 2008 im Rahmen eines Forschungsprojektes zur Treibselreduzierung im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) abgefragt und zur Verwendung in diesem Projekt Anfang August 2009 an die HAWK Göttingen weitergegeben. Die Daten des Wasserverbandstags (2009, pers. Mitteilung) werden im Anhang in den Tabellen aufgeführt. Die für die einzelnen Deichverbände vorliegenden Informationen des WASSERVERBANDSTAGS (2009, pers. Mitteilung) wurden in die Fragebögen vor der Verschickung eingetragen, um den Deichverbänden die Arbeit zu erleichtern.

Vor der Versendung der Fragebögen an die niedersächsischen Deichverbände wurde telefonisch Kontakt aufgenommen, um potenzielle Teilnehmer auf die Umfrage vorzubereiten. So

konnten im Vorfeld mögliche Bedenken seitens der Deichverbände diskutiert und ggf. entkräftet werden. Zudem war es wichtig, einen ersten Kontakt zu den Verantwortlichen bei den Deichverbänden durch ein Gespräch herzustellen. In diesem Zusammenhang wurden mit einzelnen Deichverbänden auch persönliche Gespräche vor Ort geführt und die Daten in Form eines Interviews erhoben.

Die Umfrage zum Treibselaufkommen wurde weitergeführt, um einen möglichst vollständigen Datensatz des Treibselaufkommens zu erhalten. Ferner diente diese erneute Umfrage der Findung geeigneter Beprobungsstellen für die Probenahmen in den Jahren 2010 und 2011. Die Umfrage im Jahr 2010 wurde telefonisch durchgeführt. Im Jahr 2011 wurden die Deichverbände telefonisch, sowie per E-Mail zum Treibselaufkommen befragt.

Bei den Umfragen wurden alle 22 Hauptdeichverbände in Niedersachsen berücksichtigt.

### **4.3 Potentialabschätzung/Zwischenbericht**

Auf der Basis der gesammelten Daten wurde abgeschätzt mit welchen Treibselmengen und welcher Art Treibsel in der Zukunft gerechnet werden kann, um bisherige Nutzungs- bzw. Entsorgungspfade zu evaluieren und neue Wege in der Treibselbehandlung zu (un-)ter)suchen. Die Methodik und die Ergebnisse sind in dem im April 2010 erscheinenden Zwischenbericht dargelegt.

## 4.4 Probenahme

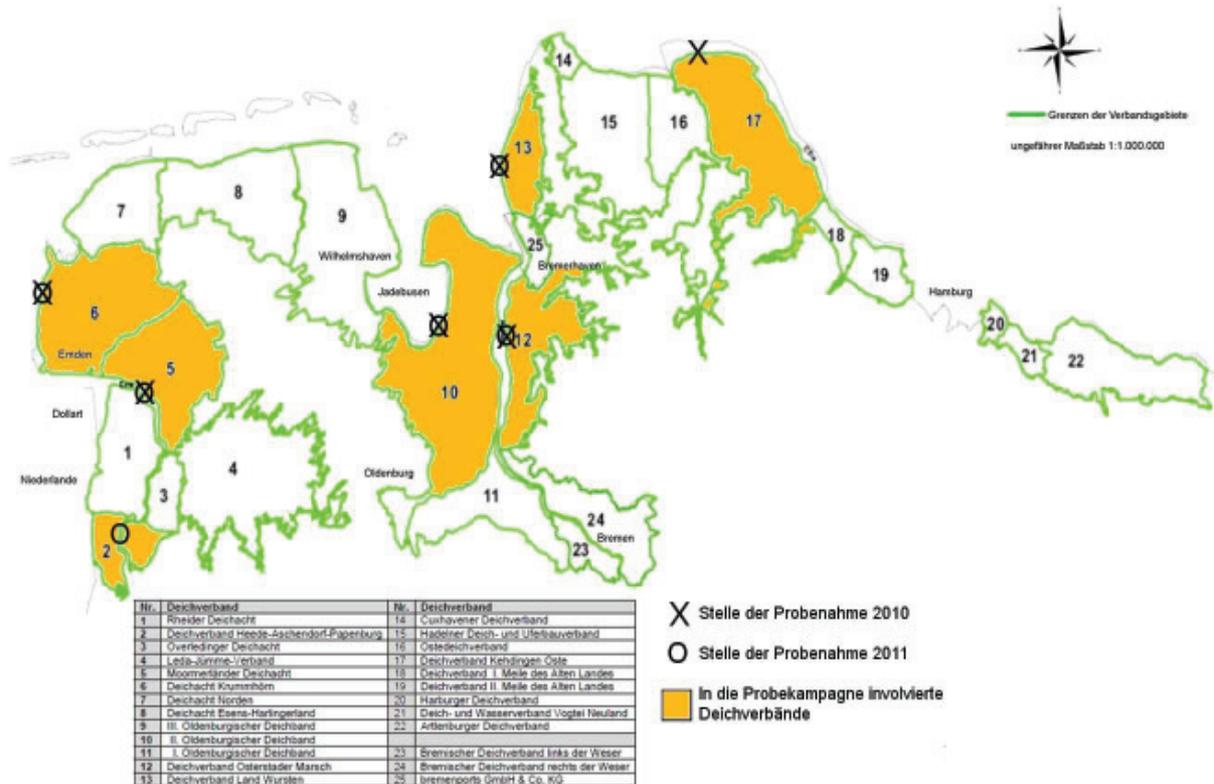
### 4.4.1 Standortwahl und Organisation

Im Vorfeld der Probenahmen wurden in Kooperation mit den zuständigen Deichverbänden geeignete Probenahmestellen ermittelt. Für diese Stellen sollten verschiedene Voraussetzungen gegeben sein. Im Bezug auf die Wahl des Probenahmeortes war die größte Herausforderung, dass es sich um eine für den Verwaltungsbereich des Deichverbandes repräsentative Treibselzusammensetzung handeln sollte. Wenn dies erfüllt war, sollte es sich um ein Küstensegment mit einem mittleren bis hohen Treibselanfall handeln. Dabei wurde sich aber auch nach den Aussagen der Deichverbände gerichtet. Wenn zum Beispiel ein Verband nur sehr wenig Treibselanfall zu verzeichnen hatte, musste darauf geachtet werden, dass die Grundmenge groß genug war, um eine Probe zu erstellen, die auch charakteristisch für Jahre mit höherem Gesamtanfall war. In einem solchen Fall würde ein Abschnitt mit relativ viel Treibsel gewählt werden. Zusätzlich wurde geklärt, ob in der Nähe des Beprobungsortes ein Stromanschluss sowie eine Ballenpresse und ein Folienwickler verfügbar sein würden. Darüber hinaus war der Einsatz eines Häckslers zu klären, um die Silierfähigkeit nach vorausgeschaltetem Aufschluss testen, sowie eine Kombination zwischen Häcksler, Presse und Folienwickler verwirklichen zu können. Die Stelle oder der Deichabschnitt sollte darüber hinaus möglichst gut mit dem PKW erreichbar sein. Die Anfahrtswege wurden mit den Vertretern der Deichverbände abgesprochen und, soweit es erforderlich war, mündliche Zufahrtsgenehmigungen eingeholt. Zudem sollte die Probenahme „ab Deich“ und möglichst zeitgleich mit der Bergung durch die zuständigen Deichverbände erfolgen, um der Praxis im Umgang mit Treibsel gerecht zu werden. Es erfolgte demnach eine Terminabsprache mit den jeweiligen Vertretern der Deichverbände, die die oben genannten Kriterien erfüllten.

Da im Rahmen dieses Projektes möglichst replizierbare Ergebnisse erzielt werden sollten, wurde im Vorfeld der Probenahme 2011 geplant, die Beprobung an den Entnahmestellen des Vorjahres durchzuführen. Die Absprache mit den beteiligten Deichverbänden bezüglich Ort und Zeitpunkt erfolgte telefonisch.

### 4.4.2 Treibselprobenahme an der niedersächsischen Küste

Die im Rahmen der Probenahme im Jahr 2010 ausgewählten Probenahmestandorte sind in Abbildung 10 mit einem ‚X‘ gekennzeichnet. Die Probenahmestellen der Kampagne 2011 sind in derselben Abbildung mit einem ‚O‘ markiert. Die kooperierenden Deichverbände sind farblich unterlegt. Eine Liste zu den Bezifferungen befindet sich in Tabelle 4. Vor Ort wurde dann für dieses Segment der Niedersächsischen Nordseeküste eine repräsentative Sammelprobe erstellt werden. Dabei wurden die Richtlinien der durch die LAGA PN98 gegeben Vorlagen eingehalten. Es mussten jedoch einige substratspezifische Abwandlungen getroffen werden, um die Vorgehensweise dem Projekt besser anzupassen.



**Abbildung 10: Karte der Niedersächsischen Nordseeküste mit Probenahmestellen und involvierten Deichverbänden**

Während der Probenahme 2010 wurde das Treibsel auf dem Deich in verschiedenen Lagerungsformen vorgefunden. In der Moormerländer DA lag das Treibsel noch so am Deich, wie es die Flut dort angeschwemmt hatte. In dem DVB Kehdingen Oste lag das Material noch im Schwad, wurde jedoch schon einmal bewegt. Im II. Oldenburgischen Deichband sowie in den Deichverbänden Land Wursten und Osterstader Marsch wurde das Treibsel schon zu Haufenwerken zusammengetragen und die Deichverbände hatten die Abfuhr zur Entsorgung bereits begonnen. In der Deichacht Krummhörn war das Treibsel des kompletten Abschnittes schon auf einem Verkuhlungsplatz zusammengetragen worden.

Im Jahr 2011 wurde das Treibsel im Zuständigkeitsbereich der Moormerländer DA in der gleichen Lagerungsform wie 2010 vorgefunden. Im Bereich des II. Oldenburgischen DB und des DVB Land Wursten lag das Treibsel noch in dem Zustand am Deich, wie es von der Flut herangetragen wurde. Bei der DA Krummhörn wurde das Treibsel z. T. schon zu einem sog. Verkuhlungsplatz wie im Jahr 2010 verbracht, ein anderer Teil wurde vor dem Deich in einen Schwad gelegt. Das Treibsel im Bereich des DVB Osterstader Marsch wurde zum Zeitpunkt der Probenahme 2011 bereits zu einem Humifizierungsplatz transportiert. Da im Zuständigkeitsbereich des DVB Kehdingen-Oste zwischen Herbst 2010 und Frühjahr 2011 nur sehr geringe bis keine Treibselmengen angeschwemmt wurden (FRERICHS, 2011, pers. Mitt.), konnte hier keine erneute Beprobung durchgeführt werden. Stattdessen wurden Proben im Bereich des DVB Heede-Aschendorf-Papenburg genommen (siehe Abbildung 10).

Die Lagerungsformen des Treibsel bei den kooperierenden Deichverbänden zu den Zeitpunkten der Probenahmen sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

**Tabelle 5: Lagerungsformen des Treibsel zu den Zeitpunkten der Probenahmen**

Deichverband	Lagerungsform	
	2010	2011
<b>Moormerländer DA</b>	Spülsaum am Deichfuß	Spülsaum am Deichfuß
<b>II. Oldenburgischer DB</b>	Haufwerke auf dem Deich, Ablagerungen in Gräben vor dem Deich	Spülsaum am Deichfuß
<b>DVB Land Wursten</b>	Haufwerke am Deichfuß	Spülsaum am Deichfuß
<b>DVB Osterstader Marsch</b>	Haufwerke am Deichfuß	Haufwerk auf Humifizierungsplatz
<b>DA Krummhörn</b>	Haufwerk auf Verkuhlungsplatz	Haufwerk auf Verkuhlungsplatz, Schwad am Deichfuß
<b>DVB Kehdingen-Oste</b>	Spülsaum am Deichfuß	-
<b>DVB Heede-Aschendorf-Papenburg</b>	-	Schwad am Deichfuß

Aus der Vielfalt der Lagerungsformen wird deutlich, dass verschiedene Vorgehensweisen entwickelt werden mussten, um vergleichbare Proben zu generieren. Während aller Probenahmen wurde höchste Priorität auf die Repräsentativität der einzelnen Proben der jeweiligen Küstenabschnitte gelegt. Der Ablauf der Probenahmen und die Bestimmung der Probenmengen wurden in Anlehnung an die von der Ländergemeinschaft Abfall (LAGA) festgelegte LAGA PN 98 durchgeführt. Hierdurch wurde sichergestellt, dass die Probenahmen an allen Standorten nach gleichen Vorgaben erfolgten.

Sofern das Treibsel noch im Schwad am Deich lag, wurde in bestimmten Intervallen (etwa alle 10-15 m) ein mindestens spatenbreiter Querschnitt für die Sammelprobe entnommen, das heißt, dass sich je nach Länge der Komponenten der Querschnitt verändern konnte. Durch diese Varianz wurde erreicht, dass sich die Grundmenge der Sammelprobe bei größerem Material mit der gleichen Querschnittszahl vergrößern ließ, wie es die PN 98 vorsieht. Sind vor der Probenahme schon Haufen aus dem Treibsel aufgeschoben worden, wurde je ein radiales Stück pro Haufen entnommen und in die Sammelprobe mit eingebracht.

Ist das gesamte Treibsel des Abschnittes schon im Vorfeld zu einem kompletten Haufen zusammengetragen worden, wurden ringsherum radiale Stücke entnommen. Dabei wurde darauf geachtet, dass auch vermeintliche Minderheiten mit in die Sammelprobe eingemischt wurden, falls unterschiedliche Komponenten vorhanden waren.

Zudem wurden über den Beprobungshorizont hinweg an jedem Standort organoleptische Untersuchungen des Treibsel vorgenommen. Dies sollte sicherstellen, dass keine gravierenden Änderungen des Materials die Repräsentanz der genommenen Proben in Frage stellen könnten.

Für die Untersuchungen der Biostabilität wurde im Februar 2011 frisches Treibsel aus dem Zuständigkeitsbereich des DVB Land Wursten entnommen. Das am Deich und Deichfuß angespülte Material wurde in zwölf Proben in Abständen von 100 m entnommen. Diese zwölf

Proben wurden vermengt, so dass sich eine Mischprobe aus den zwölf Probenahmestellen ergab. Aus dieser Mischprobe wurden fünf mal 60 Liter Material, stark verdichtet in Fässern, als Probe für die Untersuchungen abgefüllt. Ein geringer Anteil Abfall, in Form von Plastik, wurde bei Probenahme am Deich und vor der Aufbereitung des Materials aussortiert. Zum selben Zeitpunkt wurde eine Probe kompostierten Treibsels genommen. Dieses lagerte 2 Jahre lang in einer Haufenmiete, die weder umgesetzt noch aktiv belüftet wurde (MÖHLMANN, pers. Mitt., 2011). Die Haufenmiete wurde an acht Stellen in einer Tiefe von jeweils einem Meter beprobt. Diese acht Proben wurden vermischt. Aus der Mischprobe wurden vier mal 60 Liter, stark verdichtet in Fässern, als Probe für die Untersuchungen entnommen.

Diese Protokolle wurden in Anlehnung an die VDI 4630 (S. 42 ff) und der CEN/TS 14780 angefertigt. Jedoch wurden einzelne, substratspezifische Abwandlungen vorgenommen, um die Protokolle der Beprobung anzupassen. Die Protokolle waren in die folgenden Abschnitte gegliedert:

- Angaben zum Probenehmer und Zeitraum der Probenahme, sowie die Bezeichnung der Probe
- Bezeichnung und Lage der Probenahmestelle (Deichverband, Gemeinde, Landkreis)
- Informationen über das Auftreten der letzten Sturmflut (Datum, Höhe des Wasserstands) sowie vorherrschendes Wetter zum Zeitpunkt der Probenahme und Dokumentation des Zeitpunkts des letzten Niederschlags
- Dokumentation von Gewicht, Volumen und Schüttdichte der Probe
- Beschreibung des verwendeten Probenbehälters.

#### **4.5 Methoden zur Charakterisierung des Treibsels**

##### **4.5.1 Bestimmung der Schüttraumdichte**

Ein wichtiger Parameter im Rahmen der Untersuchung ist die Schüttdichte des Treibsels. Dieser Parameter wurde in der Vergangenheit von den Verantwortlichen der Deichverbände lediglich abgeschätzt.

Zur Bestimmung der Schüttdichte wird ein Verfahren angewendet, welches sich an die Vorgaben zur Schüttdichtebestimmung nach LAGA PN 98 und die CEN/TS 15013 anlehnt. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wird im Vorfeld der Probenahme 2010 ein Behälter (eine Holzkiste) mit einem Fassungsvermögen von 0,5 m<sup>3</sup> hergestellt. Für die Probenahme 2011 wird das Behältervolumen aus arbeitsergonomischen Gründen auf 0,25 m<sup>3</sup> verringert. Vor der Bestimmung der Schüttdichte einer Treibselprobe wird eine sogenannte Sammelprobe des Treibsels erstellt. Das heißt, dass an verschiedenen Stellen des am Deich liegenden Treibsels relativ kleine Mengen zusammengetragen und vermischt werden. Darauf folgend wird das Leergewicht des Behälters notiert. Erst dann wird der Behälter mit dem Material aus der Sammelprobe befüllt, so dass ein Kegel auf dem Behälter entsteht. Der gefüllte Behälter wird anschließend angehoben und aus einer Höhe von ca. 30 cm auf einen befestigten Untergrund fallengelassen. Die durch den freien Fall entstehende Schwerelosigkeit wird durch das Aufschlagen auf den Untergrund abrupt beendet. Dies verursacht die Einwir-

kung eines Vielfachen der Erdanziehungskraft auf die Treibselprobe. Der hierdurch entstehende Druck hat zur Folge, dass das Material in sich zusammensackt und das Volumen des Materials verringert wird. Das frei gewordene Volumen in dem Behälter wird in gleicher Weise wie zu Beginn befüllt und der Behälter erneut auf den Boden aufgeschlagen. Hiernach wird das Material, das über den Rand des Behälters ragt, abgestrichen und der volle Behälter gewogen. Das ermittelte Gewicht, abzüglich des Leergewichts der Kiste, ist die Schüttdichte von  $0,5 \text{ m}^3$  bzw.  $0,25 \text{ m}^3$  des untersuchten Materials. Um mögliche Messfehler zu kompensieren, wird die Schüttdichtebestimmung für die Treibselproben eines jeden beprobten Deichverbandes dreimal durchgeführt. Die Schüttraumdichte wird üblicherweise in  $\text{t/m}^3$  angegeben.

#### 4.5.2 Trockensubstanz

Die Bestimmung der Trockensubstanz (TS) wird an der HAWK gemäß der CEN/TS 14774-1 & 3 vorbereitet und durchgeführt. Hierzu werden die Taragewichte der verwendeten Bleche und die Einwaage des Treibselnotiert. Für die TS-Bestimmung wird kein bestimmtes Gewicht als Einwaage angestrebt, sondern eine gleichmäßige und repräsentative Probe der jeweiligen Küstenabschnitte verwendet. Im Durchschnitt werden je Blech 322 g Treibsel eingewogen. Um mögliche Abweichungen erkennen und ausgleichen zu können, werden alle TS-Bestimmungen doppelt durchgeführt.

Nach CEN/TS 14774-1 & 3 ist eine Probe, deren TS-Gehalt bestimmt werden soll, 24 h oder bis zur Gewichtskonstanz bei einer Temperatur von  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  [ $378,15 \text{ K}$ ] in einem Trockenschrank zu trocknen. Diese Methode wird zur Bestimmung der TS-Gehalte der Treibselproben abgewandelt. Die Verweildauer der Proben im Trockenschrank wird auf 48 h verdoppelt. Darüber hinaus erfolgt 1 h nach der Entnahme aus dem Trockenschrank eine erneute Verwiegung, um die Gewichtskonstanz des getrockneten Materials zu bestimmen. Im Anschluss an die TS-Bestimmung wird das getrocknete und relativ gut abgekühlte Material verpackt und luftdicht verschlossen, um eine Wiederbefeuchtung durch die Luftfeuchtigkeit zu vermeiden.

#### 4.5.3 Organische Trockensubstanz

Der TS-Bestimmung folgt die Bestimmung der organischen Trockensubstanz (oTS). Diese erfolgt an der HAWK gemäß den Vorgaben der CEN/TS 14775. Hierzu muss die getrocknete Probe zuerst auf eine Korngröße von  $< 5 \text{ mm}$  zerkleinert werden, um das Material in einer Mühle auf eine Korngröße  $< 2 \text{ mm}$  zermahlen zu können. Anschließend wird das gemahlene Material durchmischt und in Portionen zu 2 g in die Glühverlusttiegel eingewogen. Um auch bei der Bestimmung dieses Parameters das mögliche Auftreten von analyseverfahrensbedingten Schwankungen zu kompensieren, wird die oTS-Bestimmung jeder Probe als Dreifachbestimmung durchgeführt. Hierzu werden die einzelnen Proben für jeweils 10 h in einen sog. Muffelofen verbracht. Dieser Ofen benötigt in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur rund 4 h, um die in der CEN/TS 14775 (2003, S. 3) geforderte Temperatur von  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  [ $823,15 \text{ K}$ ] zu erreichen. Wenn die geforderte Temperatur erreicht ist, verbleibt das Material für 6 h bei  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  [ $823,15 \text{ K}$ ] im Ofen. Hierin verglühen die organischen Bestandteile der

Probe. Im Anschluss an diesen Vorgang wird das Gewicht der einzelnen Proben bestimmt. Das Gewicht, abzüglich des Gewichts der verwendeten Tiegel, ist der anorganische Ascherückstand bzw. der Glührückstand. Die Gewichtsdiﬀerenz zwischen dem Probengewicht vor und nach der Verweilzeit im Muffelofen ist der sog. Glühverlust bzw. die organische Trockensubstanz (oTS). Die Berechnung der organischen Trockensubstanz erfolgt nach der folgenden Formel 11.

**Formel 12: Berechnung der organischen Trockensubstanz (nach CEN/TS 14775, 2009, S. 6)**

$$A_{db} = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} * 100$$

$$oTS = 100 - A_{db}$$

$m_1$	Masse des leeren Tiegels in Gramm
$m_2$	Masse des mit der getrockneten Probe gefüllten Tiegels
$m_3$	Masse des Tiegels und der verglühten Probe
$A_{db}$	Aschegehalt in %, bezogen auf die Trockenmasse
oTS	organische Trockensubstanz, bezogen auf die Gesamt-Trockensubstanz

#### 4.5.4 Brenn- und Heizwert

Die Bestimmungen des Heiz- ( $H_u$ ) und des Brennwertes ( $H_o$ ) erfolgen an der HAWK in Anlehnung an die CEN/TS 14918. Zur Bestimmung des Heiz- und des Brennwertes, auch unterer Heizwert ( $H_u$ ) und oberer Heizwert ( $H_o$ ) genannt, wird ein sog. Bombenkalorimeter eingesetzt. Hierbei handelt es sich um ein regelmäßig kalibriertes Analysegerät. In diesem Instrument wird eine definierte Menge an Biomasse, welche zuvor zu einem Brikett gepresst werden muss, verbrannt. Vor diesem Vorgang muss der Trockensubstanzgehalt des untersuchten Materials bekannt sein. Die eingesetzten Proben müssen für diese Analyse einen TS-Gehalt von 100 % aufweisen und die Korngröße des Materials darf vor der Pelletierung nicht größer als 1 mm sein. Weitere Anforderungen an das Pellet sind:

- Ein Gewicht von 2 g mit einer Genauigkeit von 0,00001 g,
- eine ausreichende Festigkeit,
- kein Aufweisen von Rissen,
- möglichst wenig staubige Anteile (Explosionsgefahr).

Sind diese Anforderungen erfüllt, wird die Probe in den Verbrennungstiegel aus Quarz eingefüllt. Zur Zündung des Verbrennungsvorgangs dient ein Baumwolldocht (50 J), der an den Zünddraht angebracht wird. Zur Vermeidung einer Verpuffung und zur besseren Zündung des Materials wird zudem eine genormte Menge von 400 µl Paraffin ( $\Sigma$  46.076 J/g) auf die Materialprobe geträufelt. Zusätzlich werden 5 ml destilliertes Wasser in die Bombe gefüllt und das Probengestell fest in das Kalorimeter eingesetzt. Anschließend wird die Bombe handfest verschlossen und 30 bar Sauerstoffdruck (dies entspricht rund 6 L  $O_2$ ) auf die Bombe gegeben, um eine vollständige Verbrennung der Materialprobe zu gewährleisten.

Die Verbrennung der Materialprobe und die zugehörige Messung erfolgen automatisch nach dem Startbefehl in der Analysesoftware. Die Temperaturerhöhung des Kalorimetergefäßes wird registriert. Aus dem Temperaturanstieg, der Wärmekapazität des Kalorimetergefäßes, der Einwaage der Probe, der Wärmemenge von Zündmittel (Docht) und Paraffin wird der Brennwert ( $H_o$ ) des untersuchten Treibstoffs berechnet.

Unter Berücksichtigung des Wasserstoff-, Stickstoff-, Sauerstoff- und Schwefelgehaltes werden aus dem Brennwert die Heizwerte bei konstantem Volumen bzw. konstantem Druck berechnet. Bezieht man zusätzlich den Wassergehalt der Probe im Anlieferungszustand ein, kann der Heizwert ( $H_u$ ) der Probe in vorliegendem Zustand berechnet werden.

#### 4.5.5 Ascheschmelzverhalten

Das Ascheschmelzverhalten wird von der Eurofins Environment AB, Lidköping, Schweden, gemäß CEN/TS 15370-1 (Vornorm) bestimmt. Dazu werden die Proben gemäß DIN EN 14775 bei 550 °C verascht. Aus der Asche wird bei einem festgelegten Druck ein Würfel mit einer Kantenlänge von 3 mm hergestellt, der in einem Röhrenofen langsam bis mindestens 1400 °C erhitzt wird. Der Aufheizprozess wird von einer Kamera aufgenommen und anhand der damit dokumentierten Veränderungen des Probekörpers werden die charakteristischen Temperaturen des Ascheerweichungsprozesses ermittelt. Die Temperatur am Beginn der Schrumpfung (SST) ist erreicht, sobald sich die Fläche des Probekörpers um 5 % verkleinert hat. Die Erweichungstemperatur (DT) ist erreicht, sobald die Ecken des Probekörpers beginnen sich abzurunden. Die Halbkugeltemperatur gibt die Temperatur an, bei der der Probekörper die Form einer Halbkugel (HT) bildet, d. h. die Höhe des Probekörpers dem halben Durchmesser entspricht. Die Fließtemperatur (FT) ist erreicht, sobald der Probekörper nur noch die Hälfte der Höhe der Halbkugel aufweist.

#### 4.5.6 Kohlenstoff-, Wasserstoff- Stickstoff- und Sauerstoffgehalt

Die Bestimmung der Elemente Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Stickstoff (N) findet als katalytische Rohrverbrennung unter Sauerstoffzufuhr und hohen Temperaturen gemäß CEN/TS 15104:2005 statt. Es wird der Elementaranalysator Vario EL der Firma Elementar der HAWK verwendet. Nach der Verbrennung der Probe und selektiver Anreicherung der einzelnen Verbrennungsprodukte mittels Wärmeleitfähigkeitsdetektion werden die Elemente C, H und N quantitativ bestimmt. Hierfür werden die Verbrennungsgase ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ ,  $O_3$ ) von Halogenen gereinigt, mit Hilfe spezifischer Adsorptionssäulen getrennt und nacheinander im Wärmeleitfähigkeitsdetektor bestimmt. Die Bestimmung der Elemente erfolgt in der Reihenfolge N, C, H.

Der Substanzaufschluss durch explosionsartige Verbrennung im reinen Sauerstoffstrom bei Temperaturen zwischen 950 °C und 1050 °C findet im Verbrennungsteil statt.

Dazu wird die zu untersuchende Substanz in kleine Zinnschiffchen eingewogen, verschlossen und durch das Probengebersystem in das Verbrennungsrohr (Oxidationsrohr) geworfen. Durch Verbrennung des Zinns entstehen kurzfristig Temperaturen von bis zu 1800 °C, wodurch auch schwer verbrennbare Substanzen aufgeschlossen werden. Durch den Oxida-

tionskatalysator Kupferoxid wird eine quantitative Verbrennung der Probe erreicht. Das Spül- und Trägergas ist Helium. Bei der Verbrennung entstehen folgende Oxidationsprodukte:

- molekularer Stickstoff (N<sub>2</sub>)
- Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)
- Wasser (H<sub>2</sub>O)
- verschiedene Stickoxide (NO<sub>x</sub>)

Im nachgeschalteten Reduktionsrohr werden die Stickoxide bei 500 °C quantitativ zu Stickstoff reduziert. Überschüssiger Sauerstoff wird am Kupfer gebunden. Den Nachweis störende Substanzen (Halogene, Schwefelverbindungen) werden mit Hilfe von Silberwolle aus dem Gasgemisch entfernt. Das erzeugte Gasgemisch wird anschließend dem Trenn- und Messsystem zugeführt. Zuerst wird der Stickstoff mit dem Trägergas in die Wärmeleitfähigkeitsmesszelle (Detektor) transportiert und gemessen, wobei zuvor das Kohlenstoffdioxid an einer mit Silicagel gefüllten Kupferrohrspirale und das Wasser an einer Silberrohrspirale quantitativ gebunden (absorbiert) wird. Nach Beendigung der Stickstoffmessung wird die Kupfersäule auf 100 °C aufgeheizt. Kohlendioxid wird desorbiert und mit dem Trägergas zur Wärmeleitfähigkeitsmesszelle transportiert und gemessen. Danach wird die Silberspirale auf 180 °C erhitzt und das Wasser wird in den Detektor transportiert. Die Software berechnet die Elementgehalte für C, H, N in Prozent und außerdem das C/N-Verhältnis.

Der Sauerstoffgehalt wird nach DIN 15296 (EN15296:2011(D)) mit der folgenden Formel berechnet.

**Formel 13: Berechnung des Sauerstoffgehaltes nach DIN 15296 (EN15296:2011(D))**

$$O = 100 - C[\%] - H[\%] - N[\%] - S[\%] - Cl[\%] - A[\%]$$

C - Kohlenstoffanteil [%]

H - Wasserstoffanteil [%]

N – Stickstoffanteil [%]

S – Schwefelanteil [%]

C – Chloranteil [%]

A – Ascheanteil [%]

Der Schwefel und Chlorgehalt sind für diesen Teil der Analysen unbedeutend und werden nicht berücksichtigt.

#### 4.5.7 Schwefelgehalt

An der HAWK wird zur Bestimmung des Schwefelgehaltes in den jeweiligen repräsentativen Treibselproben das Verfahren der Infrarotabsorptionsspektroskopie angewendet. Das zu untersuchende Material muss hierzu in trockenem Zustand vorliegen. Das Messverfahren beruht auf dem Prinzip der Probenverbrennung und der Analyse der Verbrennungsgase mittels Infrarotabsorptionsspektroskopie. Als Grundlage dieser Analyse dient die DIN EN 13137 (2001), in welcher das Vorgehen zur Charakterisierung von Abfall – Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (total organic carbon, TOC) in Abfall, Schlämmen und Sedi-

menten – reglementiert ist. Eine weitere Grundlage bildet die CEN/TS 15289, in der die Bestimmung von Schwefel und Chlor in festen Biobrennstoffen reglementiert wird.

Bei der Verbrennung werden die in der Probe vorliegenden Schwefel- und Kohlenstoffanteile zu  $\text{SO}_2$  und  $\text{CO}_2$  oxidiert. Die übliche Verbrennungstemperatur liegt bei  $1350\text{ }^\circ\text{C}$ .

Die Verbrennung von 200 mg genau eingewogener Probe erfolgt in einem Sauerstoffstrom von 180 L/h. Der Sauerstoff dient gleichzeitig als Trägergas. Staubfallen und Feuchtigkeitsabsorber sorgen dafür, dass das Gasgemisch staubfrei und trocken in den Infrarotanalysator gelangt. Dort werden die Signale für  $\text{SO}_2$  bzw.  $\text{CO}_2$  selektiv erfasst. Zur Berechnung des Elementgehaltes in der Probe wird das Signal integriert, der Wert mit den Daten der Kalibration mit einer Referenzsubstanz korreliert und durch die Einwaage dividiert. Angegeben wird der Elementgehalt in % C bzw. % S.

#### 4.5.8 Chloridgehalt

Die Bestimmung des Chloridgehaltes im Treibsel erfolgt an der HAWK in Anlehnung an die DIN EN ISO 7292-2 (DPD). Bei diesem Verfahren handelt es sich um einen sog. Küvetten-Schnelltest, der üblicherweise im Bereich der Abwasseranalytik Anwendung findet. Um dieses Verfahren auf die Chloridbestimmung an Feststoffen zu übertragen, werden die Verbrennungsrückstände des zu untersuchenden Materials in Suspension gebracht.

Der Chloridgehalt einer Materialprobe wird anhand einer chemischen Reaktion von freiem und gebundenem Chlorid mit Diethyl-1.4-phenylendiamin (DPD) bestimmt. Das DPD fungiert als Oxidationsmittel. In Anwesenheit von DPD oxidiert freies sowie gebundenes Chlorid unter Bildung einer roten Färbung. Die Stärke der Färbung wird anschließend visuell oder photometrisch bestimmt, wovon die Chloridkonzentration abgeleitet wird.

#### 4.5.9 Schwermetallgehalt

Zur Charakterisierung des Treibsel werden an der HAWK die Gehalte von Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Kupfer und Zink im Treibsel bestimmt. Grundlage dieser Analyse sind die in der Bioabfallverordnung aufgeführten Grenzwerte für Bioabfälle zur Feldausbringung (§ 4 Bioabfallverordnung). Bis auf Zink werden die genannten Elemente mittels Graphitrohr-Atomabsorptionsspektrometrie bestimmt. Der Nachweis von Zink erfolgt mittels Flammen-Atomabsorptionsspektrometrie. Beide Analysen werden in Anlehnung an die CEN/TS 15297:2006 durchgeführt.

Bei dem Verfahren der **Graphitrohr-Atomabsorptionsspektrometrie** (Graphitrohr-AAS) werden die genannten Elemente, nachdem sie mittels Elution oder Aufschluss in Lösung gebracht wurden, quantitativ bestimmt. Das Messprinzip ist die Absorption der elementspezifischen Primärstrahlung einer Hohlkathoden-Lampe durch Atome im Grundzustand. Die Intensität des Absorptionssignales ist ein Maß für die Konzentration des zu bestimmenden Elements in der analytischen Probe. Bei der Graphitrohrtechnik erfolgt die Atomisierung in einem elektrisch beheizten und von Inertgas durchströmten Graphitrohr. Gelöste Proben werden in das noch kalte Rohr dosiert, durch stufenweises Aufheizen vom Lösungsmittel und anderen Begleitsubstanzen befreit, und schließlich atomisiert. Bei dem verwendeten Verfah-

ren wird zur Kompensation optischer Störungen die Zeeman-Untergrundkorrektur eingesetzt. Die Graphitrohr-AAS liefert ein Messsignal, dessen Fläche proportional zu der Masse des zu bestimmenden Elements ist. Die Messbereiche der verschiedenen zu untersuchenden Metalle liegen bei einem Dosiervolumen von 20 µL im Konzentrationsbereich von µg/L bis ng/L. Gegenüber der Flammen-AAS zeigt das Graphitrohr-AAS etwa eine um Faktor  $10^3$  höhere Empfindlichkeit. In der Steuer- und Auswertungssoftware des angewendeten Graphitrohrspektrometers sind diverse Programme gespeichert, mit denen ein oder mehrere Elemente nacheinander automatisiert bestimmt werden können. Die Programme enthalten alle Daten, die für die Analyse erforderlich sind, d. h. die Spektrometer-, Atomisator-, Kalibrier-, Proben-, Probengeber- und QC-Einstellungen.

Mit dem Verfahren der **Flammen-Atomabsorptionsspektrometrie** (Flammen-AAS) wird der Zinkgehalt in den Treibselproben quantitativ bestimmt, nachdem diese mittels Elution oder Aufschluss in Lösung gebracht wurden. Bei der Bestimmung wird die zu untersuchende Lösung angesaugt, zerstäubt, in eine Acetylen-Luft- bzw. Distickstoffmonoxid (Lachgas)-Luft-Flamme gebracht und dort erhitzt. Die hierbei entstehenden Metallatome werden von einem durch die Flamme gerichteten monochromatischen Lichtstrahl einer Hohlkathodenlampe auf der Resonanzwellenlänge des gleichen Elements vom Grundzustand in den angeregten Zustand überführt. Bei dieser Anregung wird ein Teil des eingestrahnten Lichts absorbiert, welcher der Analytkonzentration proportional ist. Die bei der Flammen-AAS auftretende Untergrundstrahlung durch Verdampfung, Streuung und Dissoziation wird durch eine Deuterium-Untergrund Kompensation ausgeglichen.

#### 4.5.10 Biostabilität

Für die Untersuchungen zur Biostabilität wird Treibsel in den folgenden Formen verwendet:

- Treibsel-Frischmasse (DVB Land Wursten, 2011),
- Kompost aus Treibsel (Haufenmiete, 2011),
- Treibselgärrest (vgl. Kapitel 4.6.2),
- HTC-Kohle aus Treibsel (vgl. Kapitel 4.7.5)
- Pyrolysekohle aus Treibsel (vgl. Kapitel 4.7.6)
- Steinkohle als Referenzwert für eine seit Millionen Jahren stabile Biomasse aus dem Bergwerk West in Kamp-Lintfort in Nordrhein-Westfalen. Die Kohle ist unbehandelt und wurde direkt aus dem Stollen entnommen.

Zunächst wird die Humifizierungsart der jeweiligen Proben bestimmt. Weiterhin wird die Biostabilität der Proben mittels der  $AT_4$ -Aufstockungsmethode untersucht und eine DOC/TOC-Analyse durchgeführt. Ergänzt werden diese Untersuchungen durch Infrarotspektroskopie, REM und EDX-Analysen.

#### 4.5.10.1 Atmungsaktivität mit der AT<sub>4</sub>-Aufstockungsmethode

Seinen Ursprung hat der AT<sub>4</sub> in der Abfallwirtschaft, wo er als Zuordnungskriterium für die Deponierung von Abfällen dient. Bei einem Wert kleiner als 5 mgO<sub>2</sub>/g TS darf der Abfall aus mechanisch-biologischen Vorbehandlungsanlagen (unter Einhaltung weiterer Parameter) auf Deponien verbracht werden (ABFABLV, 2001).

Der AT<sub>4</sub>-Wert gibt an, wieviel Sauerstoff beim Abbau organischer Substanz innerhalb von 4 Tagen verbraucht wird. Gemessen wird dabei eine Druckdifferenz. Beim mikrobiellen aeroben Abbau organischer Substanz wird Sauerstoff verbraucht, jedoch entsteht gleichzeitig in äquimolaren Mengen Kohlendioxid. Das entstehende Kohlendioxid wird in dem gasdichten Reaktionsgefäß an ein Gemisch aus Natriumhydroxid (NaOH) und Calciumhydroxid (Ca(OH)<sub>2</sub>), auch Natronkalk genannt gebunden und damit aus dem Gasraum über der Probe entfernt. Natronkalk liegt in granulierter Form vor und hat dementsprechend eine große Oberfläche. Natronkalk beeinflusst den Wassergehalt der Probe nur in zu vernachlässigendem Ausmaß und zeigt über eine Verfärbung eines Indikators das Ende der Adsorberkapazität an (WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE-WERKSTÄTTEN, 2004, S. 10). Pro Messung und Reaktionsgefäß werden 4 g Absorptionsmittel verwendet. Das Kohlendioxid erscheint damit nicht als freies Gas, womit die entstehende Druckdifferenz auf den Sauerstoffverbrauch zurückzuführen ist. Die Druckdifferenz wird mit dem OxiTop<sup>®</sup>- C Messkopf mittels Digitalmanometer gemessen. Das Messintervall beträgt 20 min. Die für einige Substanzen erwartete niedrige Atmungsaktivität führte zu dem Entschluss, bei der AT<sub>4</sub>-Ermittlung die Aufstockungsmethode anzuwenden. Hierbei wird zu jeder Probe die gleiche Menge reifen Komposts aus der Bioabfallkompostierungsanlage in Göttingen als Grundmatrix verwendet. Um zu ermitteln, welchen Einfluss der Wassergehalt des Kompostes hat, wird Kompost mit seinem ursprünglichen Wassergehalt und Kompost mit nach Abfallablagereverordnung (ABFABLV, 2001) eingestelltem Wassergehalt betrachtet. Da die Ergebnisse reproduzierbar sein sollen, wird gleichzeitig ein zuvor eingefrorener Kompost analysiert, da ein eingefrorener Kompost seine Zusammensetzung über die Zeit beibehält und nach schonendem Auftauen wieder im ursprünglichen Zustand zur Verfügung steht.

Der verwendete Kompost hat einen TS-Gehalt von 60,46 % und einen Wassergehalt von 39,64 %. Zu 20 g Kompost werden jeweils 8 g Wasser zugegeben, um einen Wassergehalt von 60 % einzustellen. Die Aufstockung bewirkt, dass eine gewisse Menge Mikroorganismen für einen aeroben Abbau zur Verfügung steht und eventuell nur geringe Mengen verbrauchter Sauerstoff rechnerisch besser erfasst werden können (RAMKE, 2006, S. 8). Um für jeden Versuch gleiche Bedingungen bezüglich der Kompostzusammensetzung zu schaffen, wird der Kompost eingefroren und zum Versuch schonend aufgetaut. Die Proben werden in einem Trockenschrank jeweils 5 Tage bei 20 °C inkubiert, um nach Ablauf der Lagphase noch Messergebnisse für eine 4-Tage-Messung zu erhalten.

Für die AT<sub>4</sub>-Bestimmung ist zunächst ein definiertes Reaktionsvolumen nötig. Als Reaktionsgefäße werden Weck Einmachgläser mit ca. 2,5 L Inhalt verwendet. Das exakte Reaktionsvolumen dieser Gefäße wird durch Auslitern bestimmt. Dazu wird das gespülte und getrocknete Reaktionsgefäß mit Oxitop Messkopf und Gefäß für den Adsorber, sowie den Klammern

zur Befestigung des Messkopfes zunächst leer gewogen, anschließend wird das Reaktionsgefäß mit demineralisiertem Wasser gefüllt und wieder mit dem Oxitop-Messkopf, dem Behälter für den Absorber und den Verschlussklemmen bestückt und gewogen. Zuletzt wird die Temperatur des demineralisierten Wassers zur Ermittlung der Dichte des Wassers gemessen und das Volumen des Gefäßes nach folgender Formel berechnet:

**Formel 14: Formel zur Bestimmung der Gefäßvolumina**

$$V = \frac{M_{\text{voll}}[\text{g}] - M_{\text{leer}}[\text{g}]}{\rho T}$$

- V Volumen des Reaktionsgefäß'  
 $M_{\text{leer}}$  Masse der Messutensilien und des leeren Reaktionsgefäß  
 $M_{\text{voll}}$  Masse der Messutensilien und des wassergefüllten Reaktionsgefäß  
 $T_{\text{Wasser}}$  Temperatur des demineralisierten Wassers  
 $\rho T$  Dichte des demineralisierten Wassers bei  $T_{\text{Wasser}}$

Die Proben werden, bezogen auf den Trockensubstanzgehalt der Kompostmatrix, in einer Menge von 25 % und 50 % zugegeben. Der Ansatz für die Bestimmung der Atmungsaktivität erfolgte für jede Probenmenge 3-fach. Die Versuchsansätze sind in folgender Tabelle aufgelistet.

**Tabelle 6: Versuchsansätze zur Bestimmung der Atmungsaktivität nach 4 Tagen**

Probenart	Zugesetzte Probenmengen	
	<b>Kompost + Treibsel Frischmasse</b>	25 % TS
<b>Kompost + Treibsel Kompost</b>	25 % TS	50 % TS
<b>Kompost + Treibsel Gärrest</b>	25 % TS	50 % TS
<b>Kompost + Treibsel HTC-Kohle</b>	25 % TS	50 % TS
<b>Kompost + Treibsel Pyrolysekohle</b>	25 % TS	50 % TS
<b>Kompost + Steinkohle</b>	25 % TS	50 % TS

Die Kompostmasse wird in das Reaktionsgefäß gegeben und mit der entsprechenden Wassermenge versetzt. Anschließend wird die entsprechende Probemenge zugegeben. Die Proben werden mit ihrem ursprünglichen Wassergehalt zugegeben. Die Frischmasse, das kompostierte Treibsel sowie der Treibsel-Gärrest werden auf weniger als 5 mm zerkleinert zugegeben. Die kohleartigen Proben werden so zerrieben oder zerkleinert, dass in dem Kompost eine homogene Verteilung entstehen kann. Die Komponenten des Ansatzes werden mit einem Spatel sehr gut durchmischt. Abschließend wird das Reaktionsgefäß gasdicht verschlossen und die Messung gestartet.

Gemessen wird, wie oben beschrieben, eine Druckdifferenz. Um die Atmungsaktivität zu bestimmen, wird die Druckdifferenz mit der folgenden Formel umgerechnet.

**Formel 15: Berechnung der Druckdifferenz**

$$AT4 = \frac{M_{O_2}}{R \cdot T} * \frac{V}{m} * |\Delta P| \quad [\text{mg } O_2/\text{g TS}]$$

- $M_{O_2}$  Molekulargewicht  $O_2$  [31999 mg/mol]  
V freies Gasvolumen des Reaktionsgefäßes [L]

R	Allgemeine Gaskonstante [83,14 LhPa/(k mol)]
T	Messtemperatur in Kelvin
m	Masse der Bodentrockensubstanz [kg]
\Delta P	Betrag der Druckänderung [hPa]

#### 4.5.10.2 Bestimmung der Humifizierungsart

Huminstoffe werden in Fulvosäuren, Huminsäuren und Humine unterschieden. Die Huminsäuren werden noch einmal in Braun- und Grauhuminsäuren unterteilt (vgl. Abbildung 11). Die Komplexität der Moleküle und die damit verbundene Stabilität im Boden nehmen von den Fulvosäuren über die Huminsäuren zu den Huminen hin zu (GEISLER, 1998, S. 32). Anhand der Bestimmung der Art der Huminstoffe kann hierdurch eine Aussage über die Stabilität der Biomassen getroffen werden.

Zunächst wird die getrocknete und gemahlene Probe, die 0,1 g organische Substanz enthalten, mit 50 ml 0,5 % -NaOH-Na-Oxalat in einem 100 ml Erlenmeyerkolben vermischt. Das Gemenge wird für eine Stunde im Wasserbad unter aufgesetztem Trichter erhitzt. Nach dem Abkühlen werden 10 ml des Extraktes 5 min bei 3000 U/min zentrifugiert. Das Zentrifugat wird jeweils bei 472 nm und 664 nm photometrisch bestimmt. Aus dem Quotienten der gemessenen Extinktionen wird die Art der überwiegend enthaltenen Huminstoffe bestimmt. Ist der Quotient größer als 5, so handelt es sich zum größten Teil um Fulvosäuren. Liegt der Quotient zwischen 4 und 5, so liegen überwiegend Braunhuminsäuren vor. Bei einem Quotienten von weniger als 3 überwiegen die Grauhuminsäuren (SCHLICHTING et al., 1995, S. 167 ff).

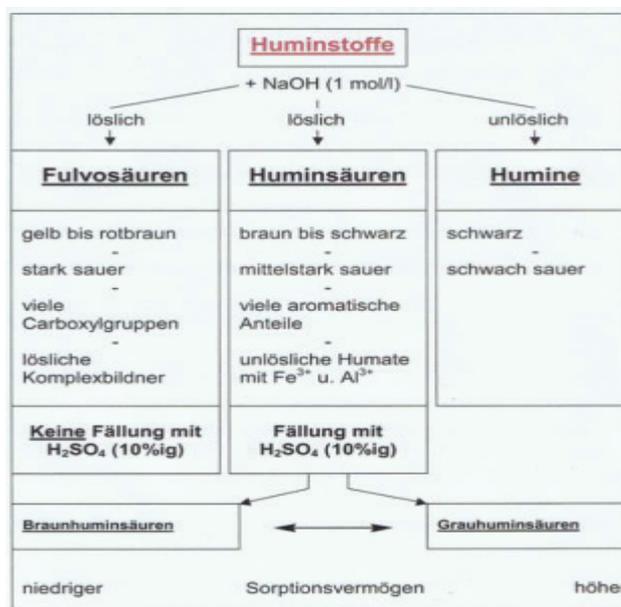


Abbildung 11: Gliederung der Huminstoffe

#### 4.5.10.3 DOC und TOC

Zur Bestimmung des gelösten organischen Kohlenstoffs (*dissolved organic carbon; DOC*) wird zunächst ein Eluat nach EN 12457 hergestellt. Dazu wird von jeder Probe eine Proben-

menge mit 50 g Trockensubstanz-Gehalt in eine 1.000 ml PE-Flasche eingewogen und mit 500 ml destilliertem Wasser vermengt.

Bei hohen erwarteten Werten und einer damit einhergehenden Gasentwicklung werden die Proben mit leicht geöffnetem Deckel für 24 h auf einem Schütteltisch geschüttelt. Nach der Schüttelphase erfolgt eine Absetzphase von 15 Minuten, in der sich ein Teil der suspendierten Feststoffe absetzt. In der Suspension verbliebene Feststoffe werden mit einem Faltenfilter abgetrennt. Das Filtrat aus dem Faltenfilter wird für 3 Min. bei 5000 U/Min. zentrifugiert und anschließend durch einen 0,45 µm – Membranfilter gegeben.

Die Bestimmung des DOC wird im Labor des Leichtweiss–Institutes Abteilung Abfallwirtschaft in Braunschweig durchgeführt. Die Untersuchung der Eluate erfolgt nach DIN EN 1484, wobei die Analyse des CO<sub>2</sub> mit dem Küvettentest von Hach-Lange (Austreibmethode) durchgeführt wird (MÜNNICH, 2011).

Zur Ermittlung des gesamten organischen Kohlenstoffgehaltes (*total organic carbon; TOC*) einer Probe wird der gesamte Kohlenstoffgehalt (TC) und der anorganische Kohlenstoffgehalt (TIC) einer Substanz bestimmt. Aus der Differenz dieser Werte ergibt sich der TOC.

**Formel 16: Ermittlung des TOC**

$$\text{TOC} = \text{TC} - \text{TIC}$$

Zur Bestimmung des TC und des TIC werden bei 105 °C getrocknete und mit der Kugelmühle zermahlene Proben verwendet. Für die Analyse des TC werden Probenmengen zwischen 60 und 70 mg, auf 0,1 mg genau, in Keramikscheffchen eingewogen und bei 1.350 °C im Sauerstoffstrom verbrannt. Der enthaltene Kohlenstoff wird zu CO<sub>2</sub> oxidiert und mittels Sauerstoff als Trägergas in den Infrarotanalysator geleitet, wo er quantitativ bestimmt wird. Der Kohlenstoffgehalt wird in % der Einwaage angegeben. Die Messung des TC erfolgt in Doppelbestimmung.

Zur Messung des TIC werden jeweils 500 mg der Proben in einen Erlenmeyerkolben eingewogen und mit einem Rührfisch versehen. Der Erlenmeyerkolben wird in die TIC-Messapparatur eingebracht. Unter Rühren wird Phosphorsäure zugegeben, die das CO<sub>2</sub> aus den anorganischen Carbonaten verdrängt. Das entweichende CO<sub>2</sub> wird im Infrarotanalysator quantitativ erfasst. Das Ergebnis wird in % der Einwaage angegeben (Massenprozent).

Die Durchführung des Verfahrens erfolgt an der HAWK mit dem Analysator CS 500 der Firma Eltra entsprechend der DIN EN 13137.

#### **4.5.10.4 Infrarotspektroskopische Untersuchungen**

Grundlage der Infrarotspektroskopie ist die Wechselwirkung der Materie mit Infrarotstrahlung im Bereich von 2,5 - 25 µm. Infrarot–Spektren werden in Abhängigkeit von der Wellenzahl aufgezeichnet. Die Wellenlänge von 2,5-25 µm entspricht einer Wellenzahl von 4000 - 400 cm<sup>-1</sup>. Durch die IR-Strahlung werden funktionelle Gruppen von Molekülen zu Schwingungen angeregt. Die dabei aufgenommene Energie wird als Absorptionsbande im Spektrum dargestellt. Verschiedene Absorptionsbanden sind charakteristisch für verschiedene Molekülstrukturen. Die benötigte Energie zur Anregung einer Schwingung ist umso höher, je grö-

ßer die Bindungsstärke zwischen den schwingenden Atomen und je kleiner die Masse der beteiligten Atome ist. Eine hohe Wellenzahl bedeutet hohen Energieaufwand für eine Schwingungsanregung. Stabilere Verbindungen sind dementsprechend im Bereich höherer Wellenzahlen zu finden. Da jedoch das Wasserstoffatom eine geringe Masse besitzt, sind auch OH, NH und CH-Gruppen in diesem Bereich zu finden. Bei komplexen Gemischen, wie Kompost oder Gärresten, ergeben sich häufig breite überlappende Banden, so dass die funktionellen Gruppen nicht im Einzelnen zugeordnet werden können. Jedoch ergeben sich auch hier Indikatorbanden, die auf das Vorhandensein verschiedener funktioneller Gruppen hinweisen. Die infrarotspektroskopischen Untersuchungen werden an der Universität für Bodenkultur in Wien, am Institut für Abfallwirtschaft durchgeführt. Das Institut verfügt über eine große Datenbank zur Auswertung verschiedener Substrate, die als Referenzwerte herangezogen werden. Die Proben werden getrocknet, mit der Kugelmühle gemahlen und verschickt. Gemessen wurde mit einem Gerät der Firma Bruker (Alpha; integrierte Software OPUS) (SMIDT & SCHWANNINGER, 2005, S. 253).

#### **4.5.10.5 REM-Aufnahmen und Energiedispersive Röntgenanalyse (EDX)**

Mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) werden Oberflächen von Stoffen mit einem fein gebündelten Elektronenstrahl abgetastet. Hierdurch werden auf der Probenoberfläche sogenannte Sekundärelektronen herausgelöst und von einem Sekundärelektronendetektor registriert. Dieses Signal wird durch einen Signalverstärker verstärkt und an den Elektronenstrahl des Monitors weitergegeben. Je mehr Sekundärelektronen von der Probenoberfläche gelöst werden, umso heller erscheint der entsprechende Punkt am Monitor. Durch die Rasterbewegung des primären Elektronenstrahls entsteht so ein Abbild der Oberfläche der Probe (ULM, 2001). Um zu verhindern, dass sich das Material durch den Elektronenstrahl auflädt, werden die Oberflächen der zu betrachtenden Materialien normalerweise mit einem Metallfilm bedampft und somit auch leitend gemacht. Auf diesen aufwändigen Vorbereitungsschritt wird bei der Erstellung der Aufnahmen verzichtet. Daher kommt es gelegentlich zu kleinen hellen Bereichen im Bild, die aufgrund hoher Reflektion durch Aufladungen (Artefakte) entstehen. Um Reaktionen von Atomen und Molekülen mit der Luft zu vermeiden, wird die Probe im Hochvakuum von dem Elektronenstrahl abgetastet. Hierzu muss die Probe absolut wasserfrei sein (FERNER, 2001). Mit dem REM kann eine bis zu 100.000-fache Vergrößerung erzeugt werden (1 µm). Der limitierende Faktor für die Vergrößerung ist der Durchmesser des Elektronenstrahls. Die im Rahmen dieses Projektes erstellten Aufnahmen sind im Bereich von 50 bis 100 µm aufgelöst. Die Aufnahmen werden mit einem REM der Firma ASPEX (ASPEX PSEM Express), welches ein integriertes EDX-Spektrometer besitzt, an der HAWK, Fakultät Naturwissenschaften der HAWK Göttingen erstellt.

#### **4.6 Untersuchungen zur energetischen Verwertung**

Im Rahmen der Untersuchungen zur energetischen Nutzung von Treibsel wurden im Technikum der HAWK, Fachgebiet NEUTec, neben den Gasertragstests in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4630 zwei weitere Verfahren zur Gewinnung von Biogas aus Treibsel erprobt. Die

im Rahmen dieses Projektes untersuchten Verfahrensvariationen zur Vergärung von Treibselbiomasse werden in den folgenden Unterkapiteln näher beschrieben.

#### 4.6.1 GRW-Biogasertragstest

Die Gasertragstests, die an der HAWK im Fachgebiet NEUTec durchgeführt werden, erfolgen in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4630. Die Bezeichnung GWR-Biogasertragstest steht für eine in Kooperation der HAWK Göttingen, der Universität Rostock und der ISF Forschungsgesellschaft GmbH in Wahlstedt entwickelte Methode zur praxisnahen Bestimmung von Biogaserträgen gemäß der VDI-Richtlinie 4630. Die Abweichungen gegenüber der VDI-Richtlinie werden im Folgenden kurz beschrieben.

Laut VDI-Richtlinie 4630 sind gasdichte Fermenter mit einem Volumen zwischen 0,5 l und 2 l für Gasertragstests von relativ homogenen Substraten zu verwenden. Bei der Vergärung von relativ inhomogenen Materialien (bspw. Bioabfall) sei der Einsatz von gasdichten Behältern mit größeren Volumina (10 l bis 20 l) zu präferieren (VDI 4630, 2004, S. 24). Die Begründung hierfür ist, dass bei größeren Gärbehältern das Erstellen repräsentativer Proben erleichtert werde (ebd.).

Die Behälter, die im Fachgebiet NEUTec für die Biogasertragstests verwendet werden, haben ein Volumen von 60 l. Hiervon werden 2/3 als Nutzvolumen verwendet. Das Kopfvolumen der Behälter wird, nach der Befüllung mit Substrat, mit Stickstoff gespült, um eine eventuelle Hemmung des Gärprozesses durch Sauerstoff aus der Umgebungsluft möglichst auszuschließen zu können.

Eine Fermentergröße der Dimension von 60 l erlaubt den Einsatz von Probenmengen zwischen 500 g und 2.000 g. Die Probenmenge wird in Abhängigkeit der Trockensubstanz, der organischen Trockensubstanz und der Abbaubarkeit des eingesetzten Substrats bestimmt. Entsprechend der VDI 4630 liegt der Berechnung des Verhältnisses von Substrat zu Impfschlamm die Formel 17 zugrunde. Dieses Verhältnis ist einzuhalten, um eine Hemmung im Gäransatz möglichst auszuschließen (VDI 4630, 2004, S. 28).

**Formel 17: Berechnung des Verhältnisses von Substrat zu Impfschlamm (VDI 4630, 2004, S. 28)**

$$\frac{oTS_{\text{Substrat}}}{oTS_{\text{Impfschlamm}}} \leq 0,5$$

Weiterhin ist zu beachten, dass die Gaserträge des untersuchten Substrates mehr als 80 % der Gesamtgasmengen ausmachen, wobei der TS-Gehalt im Ansatz maximal 10 % betragen sollte, damit ein ausreichender Stoffübergang stattfinden kann (VDI 4630, 2004, S. 28).

Zur Inkubation des eingesetzten Substrates wird beim GWR-Biogasertragstest ausgefaulter Klärschlamm aus der städtischen Kläranlage verwendet. Der Prozess der Inkubation findet, wie der gesamte GRW-Biogasertragstest, unter mesophilen Bedingungen bei 37 °C (±2 °C) in einer Klimakammer statt. Neben der versuchsmäßigen Vergärung bestimmter Substrate wird eine Referenzprobe gemäß VDI 4630 angesetzt. Hierbei wird die biologische Aktivität des eingesetzten Impfschlammes sichergestellt. Als Referenzsubstrat dient mikrokristalline

Cellulose, da das Biogaspotenzial hiervon bekannt ist. Um jedoch einen Rückschluss auf die tatsächlich entstandenen Biogasvolumina der eingesetzten Substrate ziehen zu können, wird parallel zur Substratuntersuchung und Referenzprobe eine Nullprobe des eingesetzten Inokulums angesetzt. Die Ansätze der zu untersuchenden Substrate sowie der Referenzansatz und die Nullprobe finden, gemäß VDI 4630, jeweils als Dreifachbestimmung statt.

Entsprechend der VDI-Richtlinie 4630 werden die Behälter im befüllten Zustand arbeitstäglich mittels eines Rührgeräts durchmischt. Für diese Aufgabe kommt ein Magnetrührer zum Einsatz. Das gebildete Biogas wird je Fermenter in einem ausreichend dimensionierten Folienbeutel aufgefangen, welcher arbeitstäglich zur Bestimmung des Gasvolumens über einen Trommelgaszähler entleert wird. Die Verwendung von Folienbeuteln als Hilfsmittel zur Bestimmung des entstandenen Gasvolumens hat gegenüber anderen Messsystemen den Vorteil, dass mit relativ niedrigen Drücken gearbeitet wird. Das entstandene Gasvolumen jedes Fermenters wird auf Normbedingungen (273,14 K, 1.013,25 hPa) umgerechnet und schriftlich sowie elektronisch festgehalten. Zur substratspezifischen Auswertung der Gasertrags-tests wird der Bezug zwischen Gasertrag und Frischmasse sowie organischer Trockensubstanz hergestellt. Hiernach erfolgt eine Darstellung über die Kinetik der Gasbildung eines jeden Versuchsfermenters.

Zusätzlich zur Bestimmung des Gasvolumens erfolgt die arbeitstägliche Bestimmung der Gaszusammensetzung. Hier werden die Anteile an Methan ( $\text{CH}_4$ ), Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) in Volumenprozent bestimmt. Optional kann eine Bestimmung von Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) und Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) erfolgen.

#### **4.6.2 Festbett-Feststoffvergärung**

Zur Bestimmung des Gasertrags von Treibselmaterial wird ein modifizierter Gasertragstest eingesetzt. Bei dem Verfahren handelt es sich um eine Kombination des Garagenverfahrens der Fa. Bekon und des Anstau-Boxenverfahrens der Fa. INES. Das geschichtete Material befindet sich in einem temperierten Reaktor mit 100 L Gesamtvolumen und einer Kreislauf-führung der in einem Festbett vergorenen Flüssigkeit.

Die eingebrachte Treibselbiomasse wird unter Luftabschluss vergoren. Das strukturreiche Gärsubstrat wird von oben berieselt, dabei erfolgt keine weitere Durchmischung und es wird kein zusätzliches Substrat zugeführt. Das aus der Biomasse sickende Perkolat wird im unteren Behälterbereich über eine Festbettschüttung, die durch ein Gitternetz von der Treibselbiomasse getrennt ist, angestaut. Die Flüssigphase wird unterhalb des Festbetts abgesogen, durch einen Sandfang geleitet und innerhalb des Behälters durch vier Nebeldüsen (Fa. Gardena, Typ Micro-Drip-System Nebeldüsen) auf das Treibsel gesprüht (Abbildung 12). Die Flüssigfraktion mit der gelösten Organik (Perkolat) gelangt in das Festbett, wo ein großer Teil der Organik Mikroorganismen zu Methan metabolisiert wird.



**Abbildung 12: Links oben: Verfahrensfliessbild Festbett-Feststoff-Fermenter. Links unten: Festbett. Rechts: 100-L-Festbett-Feststoff-Fermenter an der HAWK Göttingen**

Der Gärprozess findet im mesophilen Temperaturbereich bei ca. 39 °C statt, die Temperierung erfolgt mittels eines Wassermantels im Boden- und Wandbereich.

Für diesen Versuch werden 2 kg Treibselfrischmasse aus dem Verbandsgebiet der Moor-merländer Deichacht eingewogen.

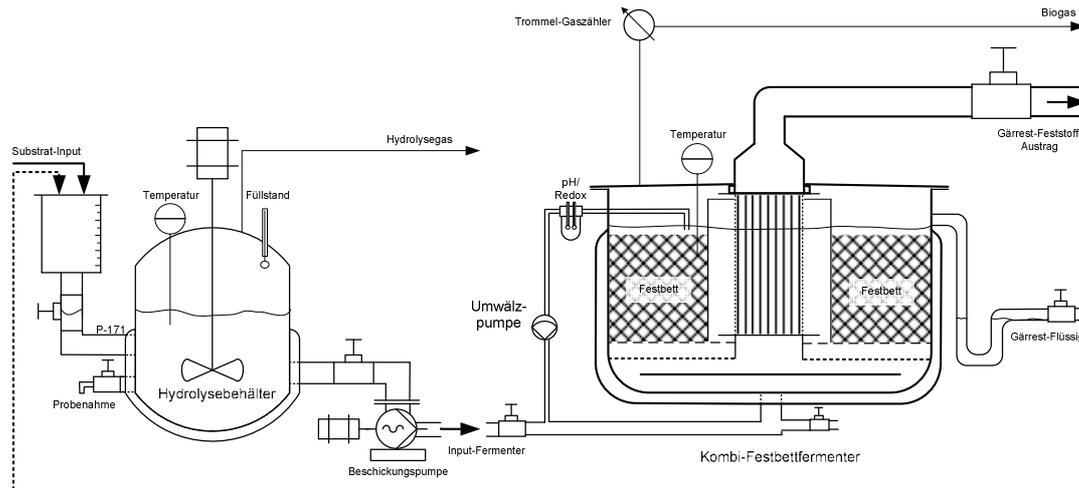
In nachfolgender Tabelle sind die wichtigsten Parameter des Versuchs aufgelistet.

**Tabelle 7: Kenndaten und Parameter des Versuchsaufbaus**

<b>Festbett/Füllkörper</b>	15,9 kg Füllkörper (Keramik), 38 L Füllkörpervolumen, 5,32 m <sup>2</sup> Ansiedlungsfläche (bei 140 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
<b>Flüssigphase</b>	24 L Gärrest <sub>flüssig</sub> zum Animpfen 6 L Wasser
<b>Substrat</b>	2 kg Treibselfrischmasse, mit 33,02 % TS, 79,39 % oTS
<b>Kreislaufführung</b>	Membranpumpe (Umwälzleistung: 144 L/d)
<b>Behältervolumen</b>	100 L
<b>Temperatur im Behälter</b>	39 °C

### 4.6.3 Zweistufige Vergärungsanlage

Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen wird ein Biogasverfahren entwickelt, das die Vergärung flüssiger und feststoffhaltiger Biomasse in einem kombinierten Festbettreaktor ermöglicht. Neuartig ist dabei, dass die eingesetzte feststoffhaltige Biomasse im Nebenstrom vergoren wird. Dabei wird die gelöste Biomasse ausgewaschen und in den durch ein Sieb getrennten Festbett-Gärraum geführt. Das Verfahren soll eine hocheffiziente Ausnutzung der strukturreichen Treibselbiomasse erlauben. Das Verfahrensfliessbild und die Technikumsversuchsanlage sind in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt.



**Abbildung 12: Verfahrensfliessbild der zweistufigen Biogasanlage**

Die Inbetriebnahme der Versuchsanlage erfolgt mit Maissilage. Im weiteren Versuchsverlauf wird das Treibsel als Co-Substrat im kontinuierlichen Vergärungsversuch untersucht. Das Verhältnis der eingesetzten organischen Trockenmasse aus Maissilage und Treibsel beträgt 1:1. Die Versuchsphase, in der Maissilage als Monosubstrat vergoren wird, gilt als Referenz zur Berechnung der Biogaserträge aus Treibselbiomasse. Während der gesamten Versuchsdauer werden Grundparameter ermittelt, die die ersten Aussagen über das Vergärungsverhalten der Treibselbiomasse im kontinuierlichen Versuchsaufbau erlauben.

Als Kombi-Fermenter wird ein Edelstahlbehälter mit einem Nutzvolumen von 300 L eingesetzt. Der Behälter ist mit einem Heizwasser-gespeisten Heizmantel ausgestattet, über den eine Temperierung der Behälter in einem Temperaturbereich von 20 bis mind. 70°C realisiert werden kann.



**Abbildung 13: Zweistufige Biogasanlage mit kombiniertem Festbettreaktor im Technikum der HAWK (FG NEUTec)**

Die Umwälzung bzw. Kreislaufführung erfolgt mittels einer Membranpumpe, die über einen einstellbaren Leistungsbereich verfügt. Die Umwälzpumpe wird so eingestellt, dass eine etwa 3 bis 4-fache Umwälzung pro Tag stattfindet. Die Einstellung entspricht einem Fördervolumen von ca. 30 L/h.

Die Beschickung des Fermenters erfolgt automatisch mittels einer Exzentrerschneckenpumpe aus dem Hydrolysebehälter. Das zudosierte Volumen wird gleichzeitig mittels eines Überlaufs entnommen, der mit einem Siphon ausgestattet ist, so dass der Gärrest ablaufen kann, aber keine Umgebungsluft in den Fermenter eindringt. Um ein Austragen von nicht abgebautem Substrat in einem Kurzschlussstrom zu vermeiden, erfolgt die Fütterung des Fermenters am Boden, während sich der Überlauf an der Oberkante des Flüssigkeitsstandes befindet. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass das Substrat das von Bakterien besiedelte Festbett durchströmen muss, bevor es aus dem Behälter ausgetragen wird. Dieses Prinzip wird ebenfalls durch die Umwälzung/Kreislaufführung des Fermenterinhalt verstärkt. Hierbei wird die Flüssigkeit ca. 5 cm unterhalb der Füllstandsgrenze über einen weiteren Anschluss abgesaugt und am Boden des Reaktors wieder zugeführt. In folgender Tabelle sind die Kenndaten des Methanreaktors aufgeführt.

**Tabelle 8: Kenndaten des Methanbehälters**

<b>Brutto-Volumen</b>	300 Liter
<b>Netto-Volumen</b>	250 Liter
<b>Volumen Feststoffvergärung</b>	80 Liter
<b>Volumen Festbett</b>	170 Liter
<b>Hydraulisches Gesamtvolumen</b>	220 Liter
<b>spez. Oberfläche des Festbetts</b>	55,5 m <sup>2</sup>
<b>Beschickung</b>	quasi-kontinuierlich
<b>Entnahme</b>	Überlauf
<b>Durchmischung</b>	Umwälzung mittels Pumpe
<b>Temperaturbereich</b>	mesophil

Der Methanbehälter ist mit einem Festbett aus Kunststoff-Füllkörpern gefüllt. Die Kenndaten der eingesetzten Festbett-Füllkörper sind in Tabelle 9 dargestellt. Die Füllkörper dienen den Mikroorganismen als Besiedlungsfläche, so dass diese immobilisiert und nicht mit dem Substrat ausgetragen werden. 150 Liter des Fermentervolumens sind mit Füllkörpern gefüllt, dies entspricht einer Oberfläche des Festbetts von 55,5 m<sup>2</sup>.

**Tabelle 9: Kenndaten der eingesetzten Füllkörper der Fa. Ratz**

<b>Typ</b>	<b>Abmessung [mm]</b>	<b>Oberfläche [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>]</b>	<b>geschützte Oberfläche [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Schüttdichte ca. [Stk./m<sup>3</sup>]</b>
<b>BT30</b>	30 x 25	370	280	50.000

Die eingesetzte Treibselbiomasse stammt aus der Mischprobe der im Jahr 2011 beprobten Standorte (vgl. Kapitel 4.4). Die Mischprobe wird vor dem Versuchsbeginn zerkleinert, homogenisiert und in kleineren Einheiten eingefroren, um auszuschließen, dass die zeitliche Veränderung des Substrats die Ergebnisse der Untersuchungen beeinflusst.

#### 4.6.4 Verbrennung

Es werden keine Verbrennungsversuche durchgeführt, sondern lediglich auf recherchierte Literaturdaten und Erfahrungswerte zurückgegriffen.

### 4.7 Methoden zur Aufbereitung des Treibsel

#### 4.7.1 Trocknen

Um Rückstellproben für eventuelle zusätzliche Untersuchungen lagern zu können, werden je Probe ein Materialvolumen von 60 Litern luftgetrocknet. Dafür werden die Proben in einem Gewächshaus der HAWK ausgebreitet und je nach Witterung mehrmals gewendet. Nach organoleptischer Einschätzung eines lagerfähigen Zustands wird das getrocknete Treibsel in geeignete Behälter gefüllt und eingelagert.

### 4.7.2 Silierung

Da das Treibsel nicht ganzjährig verfügbar ist (vgl. Kapitel 5.3.3), wird im Rahmen des Projektes die Möglichkeit der Lagerung durch Silierung untersucht. Hierzu werden Treibselproben aus dem Zuständigkeitsbereich der Deichacht Krummhörn zur ISF Schaumann Forschung GmbH verbracht. Dort wird mit dem Treibsel als Substrat eine Silierversuchsreihe durchgeführt. Die Silierversuchsreihe wird in drei Einzeluntersuchungen in Dreifachbestimmung gegliedert. Hierfür wird das angelieferte Material in drei gleiche Mengen geteilt. An jeder Einzelmengung wird ein anderes Silierverfahren getestet. Tabelle 10 enthält eine Übersicht über die Gestaltung der experimentellen Silierverfahren.

**Tabelle 10: Übersicht der experimentellen Treibsel-silierungsverfahren**

Teilmengen-/ Probenbe- zeichnung	Versuchsaufbau	verwendetes Si- lierhilfsmittel	Dosierung des Silier- hilfsmittels	Dauer d. Si- lierversuchs
<b>Treibsel 0</b>	3 mal 3 kg Treibsel	-	-	91 Tage
<b>Treibsel 1</b>	3 mal 3 kg Treibsel plus Silierhilfsmittel	silasil Energy®	0,006 g silasil Energy® (Anwendungsverhältnis 2 g/t)	
<b>Treibsel 2</b>	3 mal 3 kg Treibsel plus Silierhilfsmittel	Experimentelles Silierhilfsmittel <sup>1</sup>	0,006 g Silierhilfsmittel (Anwendungsverhältnis 2 g/t)	

Nach Beendigung der Silierversuche wird das silierte Treibsel dem Gasertragstest nach VDI-Richtlinie 4630 unterzogen. Hierbei soll festgestellt werden, welche Auswirkungen die unterschiedlichen Silierungsmethoden auf den Gasertrag des Treibsel haben.

### 4.7.3 Häckseln

Wegen zu erwartender Materialschäden am Häcksler kann das Häckseln nicht am Ort der Probenahme durchgeführt werden. Es werden jedoch Häckselproben nach der Trockensubstanzbestimmung erstellt, um zusätzlich zu den Versuchen zu der Silierung eine Aussage darüber treffen zu können, ob das Häckseln einen besseren Siliervorgang ermöglicht. Die Zerkleinerung des Materials wird zunächst mit einer herkömmlichen Schere vorgenommen. Daran anschließend wird das vorzerkleinerte Material in einer Schneidmühle auf etwa 1 mm gebracht und danach mit einer Ultrazentrifugalmühle (UZM) auf eine Korngröße von kleiner 0,2 mm gemahlen. Diese Häckselprobe wird im Anschluss in die GRW-Biogasertragstestreihe gegeben, um herauszufinden, welcher Gasertrag bei größtmöglichem Aufschluss erzielbar ist.

### 4.7.4 Waschversuch

Im Zuge der Untersuchungen zur Aufbereitung des Treibsel wird an der HAWK eine nicht standardisierte Methode zur Treibselwäsche angewendet. Dafür wird Frischmasse aus dem

<sup>1</sup> Mischung aus silasil Energy® und einer Mischung versch. Enzyme

Zuständigkeitsbereich der Deichacht Krummhörn, von welcher zunächst der TS- und der oTS-Gehalt bestimmt werden, verwendet. Die Durchführung des Waschversuches erfolgt als Dreifachbestimmung. Bei jedem einzelnen Waschvorgang werden 2 kg Treibselfrischmasse in eine Gitterbox mit einem Lochdurchmesser von 1 cm eingewogen. Die Gitterbox wird anschließend so in einer PE-Wanne befestigt, dass das Waschwasser, das aus dem Material austritt, aufgefangen wird. Außerdem wird die Gitterbox so in der PE-Wanne befestigt, dass ein Eintauchen des Materials in das abgelaufene Waschwasser ausgeschlossen ist. Für die Wäsche werden je Treibselinwaage zwei mal 5 L Wasser verwendet. Zwischen den beiden Waschvorgängen wird eine Pause von 5 min eingelegt. Hierdurch soll ein ausreichendes Abtropfen des Wassers aus dem Material gegeben sein. Von dem Waschwasser wird vor der Durchführung des Versuchs eine Nullprobe genommen. Nach dem ersten Waschvorgang wird eine Probe des perkolierten Wassers aus der PE-Box entnommen. Ebenso wird nach dem zweiten Waschvorgang verfahren.

Das aus dem Treibsel ausgeflossene Waschwasser wird nach der Versuchsdurchführung auf seinen Chloridgehalt untersucht. Anhand dieser Analyse soll beurteilt werden, ob eine Chloridreduktion des Treibsel mit einem relativ einfachen durchzuführenden Waschvorgang reduziert werden kann. Im Anschluss an diese Versuchsdurchführung wird das gewaschene Treibsel, mit einem Tag Verzögerung als Substrat in die Gasertragstestreihe eingebracht.

#### **4.7.5 Hydrothermale Carbonisierung**

Treibsel-Frischmasse wird mit einem Cutter (Schneidzerkleinerer) auf kleiner 0,5 mm zerkleinert und in zwölf Chargen von der Firma Artec Biotechnologie GmbH in Bad Königshofen hydrothermal karbonisiert. Die durchschnittlichen Prozessparameter betragen 218 °C, 27,3 bar und 8,8 h. Der zur Herstellung der HTC-Kohle verwendete Laborautoklave b.coal 2.0 hat ein Fassungsvermögen von 1,8 Litern. Die durchschnittlich aufgebrauchte Heizleistung zur Carbonisierung einer Charge beträgt 4,7 kWh. Im 10 s Takt erfolgt die Protokollierung der Prozessparameter für jede einzelne Charge, die grafisch aufgezeichnet wird.

#### **4.7.6 Pyrolyse**

Treibsel-Frischmasse wird mit einem Cutter (Schneidzerkleinerer) auf kleiner 0,5 mm zerkleinert und dann 24 h bei 105 °C getrocknet. Die Pyrolyse des Materials erfolgt an der Universität Edinburgh im *UK Biochar Research Centre*. Das Produkt dieses Aufbereitungsversuchs wird als Pyrolysekohle bezeichnet. Bei der Anlage handelt es sich um eine kontinuierliche Anlage, die mit einer Beschickungsmenge von bis zu 5 kg/h und Verweilzeiten des Materials im Hochtemperaturbereich zwischen 10 und 60 Minuten arbeitet. Es werden 15 bis 25 g Treibselmaterial pro Minute zugeführt und bei einer Verweilzeit von 16 Minuten bei 650 °C pyrolysiert. Der Prozess läuft unter Sauerstoffausschluss im Stickstoffstrom ab.

### **4.8 Arbeitsgruppe Treibsel**

Im Rahmen der Rechercharbeiten wurden bereits zu Beginn des Forschungsprojektes verschiedene Kontakte zu anderen Wissenschaftlern bzw. Wissenschaftlergruppen aufgebaut, die ebenfalls im Bereich „Treibsel“ beschäftigt waren. Aus den ersten Gesprächen heraus

ergaben sich zahlreiche gemeinsame Interessen, wodurch eine gemeinsame „Arbeitsgruppe Treibsel“ gegründet wurde. Ziel der AG war, die verschiedenen Informationen und Sichtweisen zum Themenbereich Treibsel zusammen zu führen und zu diskutieren. In diesem Zusammenhang fanden insgesamt im Projektzeitraum 3 Treffen der AG statt.

#### **4.9 Logistikkonzept**

Für das Forschungsprojekt „Treibsel an den Niedersächsischen Küsten“ wird ein theoretisches Logistikkonzept für den Transport des Treibsel präsentiert. Der Gedanke dabei ist, freie Kapazitäten örtlicher Biogasanlagen mit angelieferten Treibsel von der niedersächsischen Nordseeküste aufzufüllen und auf diese Weise energetisch zu verwerten. Für eine praktische Umsetzung von Treibseltransporten dient dieses Konzept nicht. Dafür sind detailliertere Einzelverhandlungen z. B. zwischen Biogasanlagenbetreibern, Transporteuren und Deichverbänden durchzuführen. Im Mittelpunkt des Konzeptes stehen Informationen über verfahrenstechnische Informationen einzelner Biogasanlagen, Transportentfernungen zwischen den Geschäftsstellen der Deichverbände und den betrachteten Biogasanlagen, Transportkosten, sowie Informationen über massenmäßige Treibselanfänge und freie Kapazitäten von Biogasanlagen, die mit Treibsel rein theoretisch aufgefüllt werden könnten. Bevor die Ergebnisse präsentiert werden, wird die methodische Vorgehensweise zur Erstellung des Logistikkonzeptes beschrieben:

Zunächst ist eine Recherche zur Ermittlung und Lokalisierung von Biogasanlagen erforderlich. Als Informationsquelle dient der Internetauftritt des „Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt und Klimaschutz“ sowie der Internetsuchdienst „google-maps“. Das Kriterium zur Auswahl der potenziell belieferbaren Anlagen ist die Entfernung der Verwertungsanlage zur nächstgelegenen Geschäftsstelle eines der 21 in Frage kommenden Deichverbände. Die Entfernungen zwischen den Biogasanlagen und den Geschäftsstellen soll dabei nicht mehr als 60 km betragen. Auf diesem Wege wurden insgesamt 80 potenzielle Biogasanlagen auffindig gemacht.

Anschließend werden Informationen über 28 dieser 80 Biogasanlagen durch den telefonischen Kontakt zu den Anlagenbetreibern gesammelt. Zu erwähnen ist hierbei, dass sich in dem betrachteten Gebiet deutlich mehr Biogasanlagen befinden, zu dessen Betreiber bis zum jetzigen Zeitpunkt noch kein Kontakt aufgenommen werden konnte.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Literaturrecherche

#### 5.1.1 Zusammensetzung des Treibsel

Die Zusammensetzung von Treibsel haben GERLACH ET AL. (1999) ausführlich erforscht. Der Bericht „Untersuchung zur Zusammensetzung und Herkunft von Getreibsel („Teek“) an der niedersächsischen Nordseeküste“ gibt einen ausführlichen Überblick zur floristischen Zusammensetzung von Treibsel und wird an dieser Stelle als Hauptquelle verwendet. Weitere Angaben zur Zusammensetzung von Treibsel stammen von der AZT (1996). Ergebnisse einer Analyse der elementaren Zusammensetzung zweier Treibselproben von unterschiedlichen Standorten liefert STRECKER (1996).

Die Auswahl der Standorte für die zweite Probenahme erfolgte unter Berücksichtigung der Kriterien:

- Lage (Bucht, offene Festlandküste, Ästuarbereich)
- Exposition (geographische Ausrichtung)
- Nutzung des Deichvorlandes (z.B. brachliegend, beweidet mit Schafen oder Rindern, einschürig gemäht)
- Existenz eines Sommerdeiches.

Es wurden zwölf Deichabschnitte zur Probenahme am Festland ausgewählt, die sich zwischen der holländischen Grenze und Cuxhaven verteilten. Zusätzlich wurden Proben auf den Inseln Mellum und Spiekeroog genommen (ebd., S. 2 & 21 f). Hierdurch sollte ein Vergleich zwischen der Treibselzusammensetzung am Festland und auf den Inseln ermöglicht werden.

Um die Herkunft der pflanzlichen Bestandteile des Treibsel nachweisen zu können, haben GERLACH ET AL. (1999, S. 30 ff) die Zusammensetzung und die Flächenanteile der Vorlandvegetation der Deiche bestimmt.

Die Probenentnahmen erfolgten nach GERLACH ET AL. (1999, S. 26 f) für beide Versuchsreihen gleichermaßen. Ein Stechrahmen mit einer Größe von 1.000 cm<sup>2</sup> wurde an den jeweiligen Untersuchungsstandorten mittig auf den augenscheinlich als homogen beurteilten Spülsaum gelegt. Entlang des Stechrahmens wurde der Spülsaum bis zum Untergrund mit einem Spaten durchstoßen. Das Material innerhalb des Stechrahmens stellte eine Probe dar. Diese wurde eingesammelt und in einem Labor analysiert. Um das Volumen der entnommenen Proben zu bestimmen, wurde an jeder Probenahmestelle die Höhe des Spülsaums gemessen. Die Proben hatten somit ortsspezifische Volumina, die sich aus Fläche des Stechrahmens (1.000 cm<sup>2</sup>) multipliziert mit der ortsspezifischen Spülsaumhöhe ergaben (GERLACH ET AL., 1999, S. 27). Um einheitliche Probengrößen zu erhalten, wurden die Proben nach Bestimmung ihres Frischgewichtes in Einzelproben von 1, 2 und 4 Litern portioniert. Erst danach wurden die Proben auf ihre Zusammensetzung hin untersucht (GERLACH ET AL., 1999, S. 28 f). Bei den Untersuchungen der Treibselproben hinsichtlich ihrer qualitativen Zusammensetzung konnten 48 unterschiedliche Pflanzenarten bzw. -gattungen identifiziert werden

(GERLACH ET AL., 1999, S. 38). GERLACH ET AL., (1999, S. 56) stellen in ihrem Bericht auch fest, dass sich die Hauptmenge des Treibsels in allen Proben aus nur sehr wenigen Pflanzenarten zusammensetzt. So „variiert die Gesamtanzahl der Arten je Probe [...] zwischen 9 und 28“ (GERLACH ET AL., 1999, S. 56).

Der Anteil pflanzlichen Materials an der Trockensubstanz der Proben betrug bei nahezu allen Proben 75 bis 95 Gew.-%. Die Proben von Deichabschnitten an der Weser bestanden sogar zu mehr als 99 Gew.-% aus Pflanzenmaterial. Proben des Teekmaterials von Spiekeroog wiesen deutlich geringere Anteile an Pflanzenmaterial auf. „Diese waren stark mit Sand durchmischt, so dass hier auch die Fraktion `Sediment` 28 bis 35 Gew.-% des Teekmaterials bestimmt“ (ebd., S. 56). Einen sehr geringen Anteil nahmen Algen ein. Diese fielen überwiegend mit Anteilen von unter 1 bis 4,5 Gew.-% in den Proben an. Nur die Proben von Spiekeroog bestanden zu 6 Gew.-% aus Algen (ebd., S. 56).

Als Gesamtergebnis ihrer Arbeit halten GERLACH ET AL. (1999, S. 16 f) fest, dass drei Pflanzenarten die Deichvorlandvegetation dominieren. Dies sind einerseits Quecken-Arten (*Elymus spec.*) und verschiedene Melden-Arten (*Atriplex spec.*) in den Vorländern der Deiche an der Nordseeküste und andererseits Schilf-Arten (*Phragmites spec.*) vor den Deichen an der Weser. Alle insgesamt identifizierten Pflanzenarten teilen GERLACH ET AL. (1999, S. 16 f) in die folgenden Kategorien ein, um Aussagen über die Herkunft der pflanzlichen Treibselbestandteile treffen zu können:

- Halophyten (auf Salzböden, Watten oder im Salzwasser gedeihende Pflanzen mit verschiedenen Anpassungsmechanismen an hohen Salzgehalt)
- Psammophyten (auf sandigen Böden gedeihende Pflanzen)
- Brackwasserarten (an Standorte mit Brackwasservorkommen angepasste Pflanzen)
- Glykophyten (Pflanzen, die keine salzhaltigen Böden tolerieren)

Da sich die Untersuchung des Treibsels von GERLACH ET AL. (1999) nicht auf die gesamte niedersächsische Küste bezieht, die Elbe zählte nicht zum Untersuchungsgebiet, wird die Zusammensetzung des Treibsels an dieser Stelle durch Umfrageergebnisse der AZT (1996) ergänzt. Die Angaben zur Zusammensetzung des Treibsels nach der AZT (1996) sind Ergebnisse einer Umfrage bei den niedersächsischen Deichverbänden. Darin werden die prozentualen Anteile von Holz, Kunststoff, Salzwiesenvegetation und sonstigen Pflanzen im Treibsel für 1994/1995 wiedergegeben. Die zu diesem Zeitpunkt bestehenden 28 Deichverbände in Niedersachsen sind heute in 22 Deichverbänden organisiert. Im Anhang werden die Ergebnisse der Umfrage von der AZT (1996, S. 31) tabellarisch dargestellt.

Die Zusammensetzung des Treibsels ist nach AZT (1996, S. 31) in vier Hauptkategorien aufgeteilt. Diese sind Holz, Kunststoff, Salzwiesenvegetation und sonstige Pflanzen. Die Bestandteile Holz und Kunststoff werden vor einer Entsorgung des Treibsels manuell von Angestellten der Deichverbände aussortiert und entsorgt (AZT, 1996, S. 75).

Für die Hauptkategorien Salzwiese und sonstige Pflanzen hat STRECKER (1995, S. 24) Materialanalysen an Verbrennungsrückständen von Treibsel durchgeführt. Die Ergebnisse werden in

Tabelle 11 wiedergegeben. Hier steht die Probe Sandstedt stellvertretend für Treibselmaterial aus Brackwasserstandorten. Diese Probe stammt aus dem Deichvorland an der Weser in der Nähe von Sandstedt und ist der Kategorie sonstige Pflanzen zuzuordnen, da sie nach STRECKER (1995, S. 36) hauptsächlich aus Schilf (*Phragmites australis*) bestand. Die Probe Leybucht repräsentiert Treibsel aus der Salzwiesenvegetation und stammt aus dem Deichvorland an der Leybucht an der Nordsee (STRECKER, 1995, S. 15). Die Materialien dieser Probe waren überwiegend verholzte Anteile der Strandaster (*Aster tripolium*) (ebd., S. 36). Die verhältnismäßig niedrigen Feuchtwerte beider Proben führt STRECKER (1995, S. 24) auf die relativ lange Lagerungsdauer an der Anlandungsstelle (Probe Sandstedt) bzw. auf einem Kompostplatz (Probe Leybucht) zurück.

Die Ascheanteile der Trockensubstanz von 15,1 und 18,6 Gew.-% der Proben Leybucht und Sandstedt liegen nach STRECKER (1995, S. 24) deutlich höher als die bekannten Werte anderer halmgutartiger Biomasse, beispielsweise von Weizen-, Roggen- oder Gerstenstroh. Der Ascheanteil liegt hier nach CEN/TS 14961 (2004, S. 31) bei 5 Gew.-% TS (STRECKER, 1995, S. 24). Einen ähnlichen Ascheanteil weist erntefrisches Rohrglanzgras (Erntezeitraum: März bis Mai) mit 5,6 Gew.-% auf (CEN/TS, 2004, S. 33). Die Werte der genannten Ascheanteile beziehen sich jeweils auf wasserfreies Material. Die Abweichung dieser Werte begründet STRECKER (1995, S. 24) mit der Anhaftung von Schlick.

Die Werte der elementaren Zusammensetzung bezüglich Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff des aschefreien Materials werden in beiden Proben in gleichen Größenordnungen nachgewiesen. Diese Werte entsprechen weitgehend denen anderer einjähriger Biomassen (STRECKER, 1995, S. 24). Demgegenüber stehen die Messwerte der Stickstoff- und Schwefelgehalte. Diese erreichen in der Probe aus der Leybucht Werte, die deutlich höher liegen als in der Probe aus Sandstedt. Im Vergleich mit anderer einjähriger Biomasse sind in der Probe aus Sandstedt Schwefelgehalte nachweisbar, die etwa das Dreifache der Schwefelgehalte von Weizen-, Roggen- und Gerstenstroh erreichen (siehe

Tabelle 11).

Hinsichtlich des Fluorgehalts der untersuchten Treibselproben bezeichnet STRECKER (1995, S. 25) die Analyseergebnisse von 22 mg/kg TS (Sandstedt) und 21 mg/kg TS (Leybucht) als typische Werte für Biomasse. Die CEN/TS 14961 (2004, S. 28) weist Werte in dieser Höhe nur für erntefrisches Rindenmaterial von Nadelholz auf.

**Tabelle 11: Vergleich von Treibselproben mit anderer, ausgewählter Biomasse (STRECKER, 1995, S. 25; CEN/TS, 2004, S. 27 ff, MUHMANN, 2006, S. 47)**

	Einheit	Treibsel Sandstedt	Treibsel Leybucht	Weizen-, Roggen- und Gerstenstroh	Rohrglanzgras (Ernte März bis Mai)
<b>Asche</b>	Gew.-%	18,60	15,10	2,00 bis 10,00	2,00 bis 9,50
<b>Kohlenstoff</b>		40,60	41,46	46,00 bis 51,00	49,00
<b>Wasserstoff</b>		4,64	5,14	6,00 bis 6,60	5,80
<b>Stickstoff</b>		1,20	1,80	0,2 bis 1,6	0,90
<b>Sauerstoff</b>		34,47	32,69	40 bis 46	44,00
<b>Fluor</b>	Gew.-%	0,0022	0,0021	0,0005	k. A.
<b>Chlor</b>	mg/kg TS	820,00	9.270,00	2.503,00	k. A.
<b>Schwefel</b>		2.600,00	7.900,00	737,00	k. A.
<b>Blei</b>		4,00	4,00	0,1 bis 3,00	<0,50 bis 5,00
<b>Cadmium</b>		< 0,30	< 0,30	<0,05 bis 0,30	<0,04 bis 0,20
<b>Chrom</b>		1,00	< 1,00	1 bis 60,00	k. A.
<b>Kupfer</b>		6,00	9,00	1 bis 10,00	k. A.
<b>Zink</b>		64,00	54,00	3 bis 60,00	k. A.
<b>Brennwert</b>		MJ/kg TS	16,394	16,686	18,500 bis 20,500
<b>Heizwert</b>	15,382		15,563	17,500 bis 19,500	18,600

Aufgrund der pflanzlichen Anteile im Treibsel in Verbindung mit deren Aufwuchsorten und dem Kontakt mit salzhaltigem Wasser beim Verdriften an die Deiche ist davon auszugehen, dass Treibsel vergleichsweise hohe spezifische Salzgehalte, und somit Chlorgehalte, aufweist (MEISGEIER, 2008, S. 38). Der spezifische Salzgehalt des Treibsel hängt, neben den oben genannten Faktoren auch entscheidend davon ab, ob und über welchen Zeitraum das Treibsel am Ort seiner Anlandung Regenwetterereignissen ausgesetzt ist, denn durch das Regenwasser wird der Salzgehalt des Treibsel durch Auswaschen reduziert (MEISGEIER, 2008, S. 38). Die Chlorgehalte beider Treibselproben sind mit 820 mg/kg TS und 9.270 mg/kg TS bzw. 8,2 ppm und 92,7 ppm (bezogen auf TS) unterschiedlich hoch. Der Chlorgehalt des Treibsel der Leybucht übertrifft den Chlorgehalt des Treibsel aus Sandstedt um 8.450 mg/kg TS. Dieser deutliche Unterschied ist mit dem Salzgehalt des Wassers der Nordsee und der damit verbundenen relativ hohen Salinität des Standortes Leybucht zu begründen. Im Vergleich mit Getreidestroh ist der Chlorgehalt des Treibsel aus Sandstedt an der Unterweser geringer. Die Differenz beträgt 1.683 mg/kg TS. Das Treibsel der Leybucht enthält mehr Chlor als Getreidestroh. Die Differenz beträgt hier 6.767 mg/kg TS.

Die Analyseergebnisse nach STRECKER (1995, S. 25) weisen für beide Proben gleich große Werte hinsichtlich der Schwermetallkonzentration (Blei 4 mg/kg TS, Cadmium < 0,3 mg/kg TS und Chrom  $\leq$  1 mg/kg TS) in der absoluten Trockenmasse auf. Im Vergleich mit den Schwermetallkonzentrationen in der absoluten Trockenmasse von Weizen-, Roggen- und Gerstenstroh nach CEN/TS 14961 (2004, S. 31) sind die Werte nach STRECKER (1995, S. 25) für die Bleikonzentration in den Treibselproben relativ hoch. Die Bleikonzentrationen im Treibsel kommen den in der oberen Hälfte anzusiedelnden Werten von Rohrglanzgras

gleich (CEN/TS, 2004, S. 33). Die Werte der Cadmium- und Chromkonzentration des Treibseils nach STRECKER (1995, S. 25) entsprechen den Werten vergleichbarer Trockenmassen (CEN/TS, 2004, S. 31). Eine übersichtliche Gegenüberstellung dieser Werte ist

Tabelle 11 zu entnehmen. Die Werte der Kupfer- (Sandstedt: 6 mg/kg TS; Leybucht: 9 mg/kg TS) und Zinkkonzentrationen (Sandstedt: 64 mg/kg TS; Leybucht: 54 mg/kg TS) sind in beiden Treibselproben unterschiedlich hoch (STRECKER, 1995, S. 25). Werte in diesem Bereich sind nach CEN/TS 14961 (2004, S. 31) auch in Weizen-, Roggen-, und Gerstenstroh zu erwarten.

Die Heiz- und Brennwerte von Treibsel liegen in beiden Proben relativ nah beieinander.

Diese Werte liegen jedoch unterhalb der Angaben von CEN/TS 14961 (2004, S. 27 ff) zu Heiz- und Brennwerten von Halmgütern wie Weizen-, Gersten-, Roggenstroh, Miscanthus, Rohrgranzgras sowie erntefrischem Laub- und Nadelholz.

Im Projekt *Treibsel zu Biogas* (BFN, 2009) haben sich die Bearbeiter, das Biosphärenreservat Niedersächsisches Wattenmeer und die bepeg – bio-e-power-engineer-group, mit dem Thema Treibsel als Substrat zur Biogasproduktion auseinandergesetzt. In diesem Projekt wurde angenommen, dass Treibsel zu mehr als 90 % der Trockensubstanz aus pflanzlichem Material besteht. Der Rest setze sich aus Holz, Kunststoff, tierischem Material wie Muscheln, Federn oder Kadavern zusammen (ebd., S. 1). Für die Zusammensetzung des pflanzlichen Anteils im Treibsel seien die örtlichen Verhältnisse bzw. die Herkunft des Treibsel ausschlaggebend. So könne im Treibsel der Flüsse und Flussmündungen bis zu 80 % des pflanzlichen Anteils aus Röhricht stammen. Im Treibsel der Nordseeküste könne die Hauptmasse aus Strandastern und Quecken bestehen. Aus diesen Angaben kommen die Autoren zu dem Schluss, dass ca. 80 % des Treibsel an den niedersächsischen Küsten nicht aus den Salzwiesen des Nationalparks Niedersächsisches Wattenmeer stammen, sondern ihren Ursprung in den Röhrichtbeständen der Ästuarien haben (ebd., S. 1). In BFN (2009, S. 4) werden Analyseergebnisse vom Treibsel zweier Standorte, der Nordseeküste und der Weser, aufgeführt. Diese Daten sind Tabelle 12 zu entnehmen.

**Tabelle 12: Ergebnisse der Treibselanalyse nach BFN (2009, S. 4)**

Parameter	Salzwiese (Hilgenriedersiel)	Weser (Brake)
Trockensubstanz (Masse-% der FM)	14,5	89,9
Organische Trockensubstanz/ Glühverlust (Masse-% der TS)	67,6	76,2
Salzgehalt (g/l FM)	3,66	0,35
pH	7,2	7,3
Cellulose (g/kg TS)	122	401
Lignin (g/kg TS)	199	186
Theoretischer Biogasertrag (l <sub>N</sub> /kg oTS)	548	610
Theoretischer Methanertrag (l <sub>N</sub> /kg oTS)	50	50
Gesamtstickstoff (Masse-% der TS)	2,48	1,08
Phosphor als P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (Masse-% TS)	0,81	0,21
Schwefel (mg/kg TS)	7.200	1.500

### 5.1.2 Aufkommen

Die in BFN (2009, S. 1) getätigten Abschätzungen der Treibselmengen und damit verbundenen Beseitigungskosten basieren überwiegend auf Datengrundlagen der 1990er Jahre. Die Autoren nehmen an, dass an der niedersächsischen Festlandküste im Jahresdurchschnitt Treibselmengen zwischen 50.000 m<sup>3</sup> und 100.000 m<sup>3</sup> beseitigt werden müssen. Weiterhin werden in BFN (2009, S. 1) das Treibselaufkommen an der niedersächsischen Küste der Sturmflut von 2006 (rund 150.000 m<sup>3</sup>) in Verbindung mit entstandenen Entsorgungskosten von 1,4 Mio. € genannt. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass die Kosten der Treibselentsorgung entsprechend dem Treibselaufkommen von Jahr zu Jahr schwanken. Als gängige Entsorgungsmethode für Treibsel nennen die Autoren Häckseln und Verblasen, Kompostieren sowie das Verkuhlen (BFN, 2009, S. 2). Weitere Informationen hierzu sind in dem Zwischenbericht zu diesem Projekt (2010) aufgeführt.

Die ARBEITSGRUPPE ZUM TREIBSELPROBLEM (AZT 1996) hat mit dem „Bericht zur Treibselproblematik an den Hauptdeichen der niedersächsischen Nordseeküste und der von der Tide beeinflussten Flussläufe“ eine fundierte Arbeit zum Aufkommen, der Zusammensetzung und der Verwertung von Treibsel in Niedersachsen erstellt. Dieser Bericht wird in vielen Veröffentlichungen zum Thema Treibsel, so auch in diesem Bericht, als Arbeitsgrundlage herangezogen.

Die Datenbasis der AzT beruht auf Befragungen der Deichverbände zwischen 1970 und 1995. Unter anderem ergab diese Umfrage, dass „...die Anlandung des Treibfels nicht für jeden Deichverband ein Problem bedeutet“ (AZT, 1996, S. 35). In dem Bericht wird hervorgehoben, dass die mittleren Mengen angelandeten Teeks der 1980er Jahre im Vergleich zu den Mengen der Jahre 1993 bis 1995 geringer sind (ebd., S. 35). Partiiell liegen die jährlichen Mengen von 1993 bis 1995 „...weit über dem Durchschnitt für den gesamten Erhebungszeitraum“ (ebd., S. 35) und sind teilweise „sogar doppelt so hoch“ (ebd., S. 35).

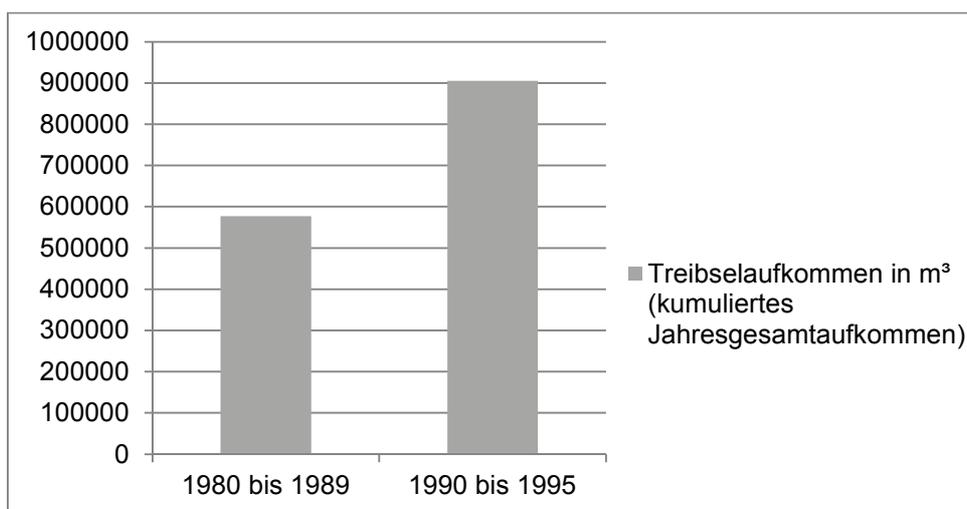


Abbildung 13: Durchschnittliches Treibselaufkommen der Jahre 1980 bis 1989 im Vergleich zu denen der Jahre 1990 bis 1995 nach AzT(1996)

Das Treibselaufkommen steht in direktem Zusammenhang mit folgenden Punkten:

- Sturmfluten
- Mengen an organischem Material im Deichvorland
- Extensivierter Nutzung des Deichvorlandes
- Geographische Lage des Deiches
- Windrichtung
- Witterung
- Vorhandensein eines Sommerdeichs
- Strömungsverhältnis des Gewässers

Einen Haupteinfluss auf die anfallenden Treibselmengen haben Sturmflutereignisse (AZT, 1996, S. 59). Stärkere Sturmfluten sind allgemein in den Wintermonaten von Oktober bis März/April zu verzeichnen (LÜDERS & LUCK, 1976, S. 206). In diesem Zeitraum ist nach GERLACH ET AL. (1999, S. 86) das Treibselaufkommen am größten. Die Menge des Treibsel ist abhängig von mehreren Faktoren, wie der „Stärke und Dauer der Sturmflut (Kettensturmzeiten), der Häufigkeit des Auftretens von Sturmfluten sowie nicht zuletzt der vorherrschenden Windrichtung“ (GERLACH ET AL., 1999, S. 86).

Die Anzahl von Sturmfluten ist in den letzten Jahrzehnten deutlich gestiegen, zusätzlich haben diese Ereignisse in ihrer Intensität zugenommen (AZT, 1996, S. 59). Der AZT (1996, S. 59) zufolge hat die Anzahl der Sturmfluten der Jahre 1974 bis 1993 gegenüber den 1950er bis 1960er Jahre um 60 % zugenommen. Dieses wird von den Autoren auf eine Häufung von Sturm- und Orkantiefs über dem Nordatlantik und der Nordsee zurückgeführt (AZT, 1996, S. 59). Die Beziehung zwischen den Sturmfluten und der durchschnittlichen Treibselmenge, angegeben durch die Deichverbände, lässt sich anhand eines Vergleichs beider Größen aufzeigen. Hierzu werden die durchschnittlichen, von den Deichverbänden angegebenen Treibselmengen in Relation zur Anzahl der verzeichneten Sturmzeiten am Pegel Norderney nach AZT (1996, S. 66) für den Zeitraum von 1980 bis 1995 dargestellt, siehe Abbildung 14. Die gleichen Größen werden, in anderen Relationen, in Abbildung 15 für den Zeitraum von 1996 bis 2008 gegenübergestellt.

Neben dem Zusammenhang zwischen Treibselaufkommen und Anzahl der Sturmzeiten stellt die AZT (1996, S. 62) fest, dass an der Nordseeküste und auf den Inseln weniger Treibsel anfällt, als an den Ufern der tidebeeinflussten Ästuarien. Dies wird auf die brackigen Bereiche im Deichvorland der Ästuarien zurückgeführt, auf denen ein vermehrtes Aufwachsen von Reet zu verzeichnen ist (AZT, 1996, S. 62). An der Nordseeküste landen Pflanzenreste der Salzwiesenvegetation als Treibsel an (BRÖCKER, 1999, S. 7). Begründet wird dies mit der unterschiedlichen Salinität und dem ungleichen Nährstoffgehalt der Standorte Küste und Ästuar (AZT, 1996, S. 70). Diese Faktoren bestimmen die vorherrschende Vegetation am jeweiligen Standort. Hinzu kommt der standortbezogene Unterschied hinsichtlich der Nährstoffversorgung über Luft und Wasser. Je nach Güte der Nährstoffversorgung wird die Wüchsigkeit der standortspezifischen Vegetation bestimmt und somit auch das Potenzial des möglichen Treibselaufkommens (AZT, 1996, S. 70; GERLACH ET AL., 1999, S. 23).

An Deichen mit einem Vorland ist zudem allgemein ein höheres Aufkommen von Teek festzustellen, als an scharliegenden Deichen<sup>2</sup> (AZT, 1996, S. 64). An Deichen mit einem Vorland nimmt außerdem die Nutzung des Vorlandes Einfluss auf die Treibselmengen (GERLACH ET AL., 1999, S. 88). So kann dem Deichvorland durch eine landwirtschaftliche Nutzung, etwa durch Beweidung oder Mahd, anteilig Biomasse entzogen werden. Seit 1986 verfolgt die Nationalparkverwaltung *Niedersächsisches Wattenmeer* eine Extensivierung der Nutzung von Salzwiesen (LEINER & MENKE, 1998, S. 2). Das bedeutet, dass die meisten Deichvorlandflächen an der Nordseeküste überhaupt nicht oder nur unter strengen Auflagen bewirtschaftet werden dürfen (ebd., S. 2).

An den Ästuarien herrschen ähnliche Auflagen, sofern hier Deichvorländer vorhanden sind. Überwiegend werden auch hier viele Deichvorländer als Naturschutzgebiete ausgewiesen, oder die Bewirtschaftung in Form von Reetmahd, wird von potenziellen Interessenten als nicht wirtschaftlich eingestuft (CORNELIUS & WILKEN, 2009, pers. Mitteilung). Diese Problematik wird in 3.2.4 beschrieben.

Das Deichvorland hat für den Küstenschutz eine große Bedeutung. Es trägt zur Deichsicherheit bei. Auflaufende Wellen werden gebrochen, sobald sie Landberührung bekommen (AZT, 1996, S. 69). Dadurch verlieren die Wellen einen Teil ihrer Energie wodurch transportiertes Treibsel im optimalen Fall nicht bis an den Deich gelangt. Hierdurch würde die schädigende Wirkung des Treibsel auf die Grasnarbe des Deiches ausbleiben, womit die Deichsicherheit gewahrt wäre (AZT, 1996, S. 69). Ist einem Hauptdeich ein Sommerdeich vorgelagert, mindert dieser die Anlandung von Treibsel am Hauptdeich (AZT, 1996, S. 64).

Das Aufkommen von Treibsel hängt in den Ästuarien zusätzlich von der Tideströmung ab. Die AZT (1996, S. 64) beschreibt diesen Einfluss auf die Teekanlandung am Beispiel der Weser. So „...kann Treibsel während einer Tide bei ablaufendem Wasser 15 km stromab, bei der nächsten Flut wieder 12 km stromauf treiben“ (ebd., S. 64). Zusätzlich kann bereits angeschwemmtes Treibsel bei anschließenden erhöhten Wasserniveaus vom Ort der Anlandung aufgeschwemmt, weiter transportiert und an anderer Stelle wieder abgelagert werden (ebd., S. 64).

Außer den hier genannten Faktoren, die zum Anfall von Treibsel führen, ist ein besonderer Faktor zu nennen, der die Treibselmenge direkt beeinflussen kann. So ist es möglich, dass bei tiefen Temperaturen über einen relativ langen Zeitraum ganze Vegetationsflächen vereisen. Diese können bei erhöhten Wasserständen aufgeschwemmt werden. In der Folge werden die Pflanzen aus dem Boden gerissen und gelangen mit der nächsten Flut als Treibsel an Land (AZT, 1996, S. 73). Weiter besteht die Möglichkeit, dass bei relativ langen Frostperioden Eisschollen entstehen. Diese können bei Flut über das Deichvorland geschoben werden, wo sie die Vegetation abtrennen. Die abgetrennten Pflanzen werden vom Wasser ab-

---

<sup>2</sup> Als scharliegende Deiche werden Deiche ohne Vorland bezeichnet.

transportiert und nach der Frostperiode im Deichvorland oder am Deich angeschwemmt (ebd., S. 73).

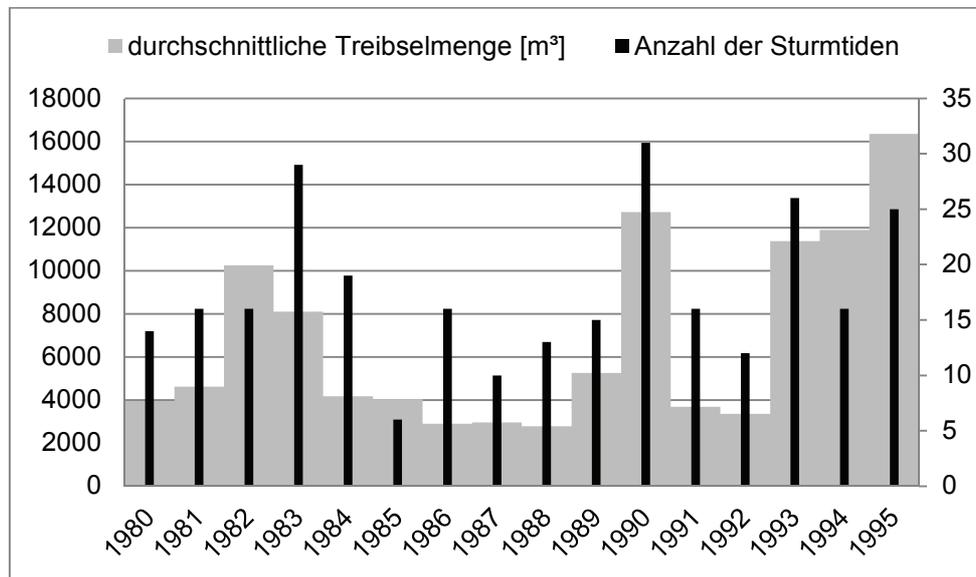


Abbildung 14: Durchschnittliche Treibselmengen im Verhältnis zur Anzahl der Sturmtiden am Pegel Norderney zwischen 1980 und 1995 (AzT, 1996, S. 66)

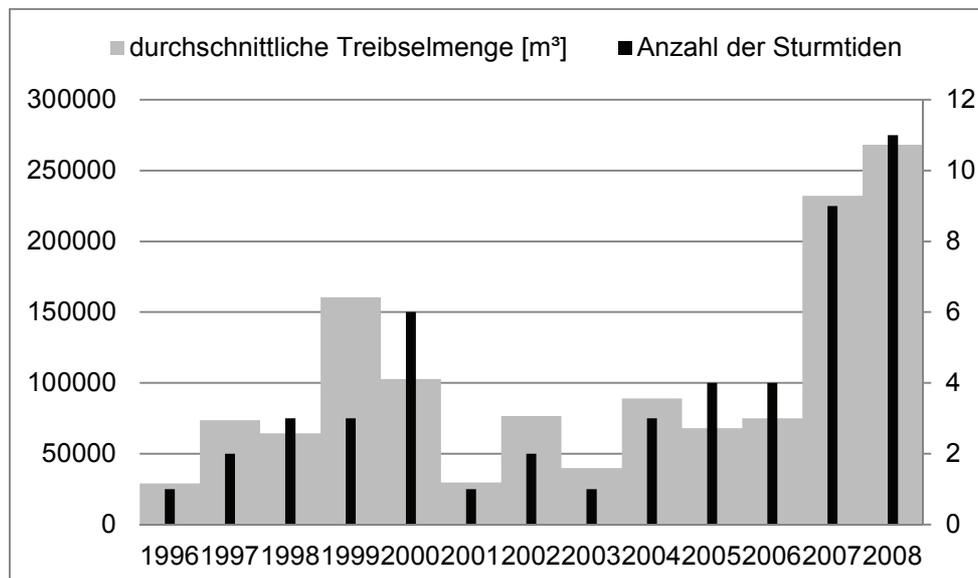


Abbildung 15: Durchschnittliche Treibselmengen im Verhältnis zur Anzahl der Sturmtiden am Pegel Norderney zwischen 1995 und 2008 nach WASSERVERBANDSTAG (2009) und WASSER- UND SCHIFFFAHRTSDIREKTION NORDWEST (2009)

### 5.1.3 Bergung

Die Organisation der Treibselbergung geschieht durch die Deichverbände. Die Durchführung der Bergung erfolgt teilweise durch die Deichverbände selbst und teilweise durch beauftragte Lohnunternehmen. In Einzelfällen übernehmen auch vertraglich verpflichtete Landwirte diese Aufgabe (AZT, 1996, S. 75). Beim Deichverband der I. Meile des Alten Landes übernimmt die Freiwillige Feuerwehr Twielenfleth die Bergung des Treibsels zum Zeitpunkt der Befragung (ebd., S. 77).

Das Bergen von Treibsel ist bei relativ starkem Aufkommen zeitnah nach der jeweiligen Sturmflut durchzuführen (AZT, 1996, S. 74). Die sofortige Treibselbergung ist nicht an jedem Hauptdeich möglich, da die Grasnarbe nach Sturmfluten aufgeweicht und deshalb nicht befahrbar ist (ebd., S. 74; CORNELIUS & WILKEN, 2009, pers. Mitteilung), ohne diese zu beschädigen. Das Teek kann nur dort direkt nach Sturmflutereignissen geborgen werden, wo entweder ein Treibselräumweg am Deich besteht, oder der Boden gefroren ist (AZT, 1996, S. 74). Eine Verletzung der Grasnarbe hätte zur Folge, dass der Deich an dieser Stelle beim nächsten Sturmflutereignis nur bedingt den Küstenschutz gewähren könnte. In der Regel erfolgt die Bergung des Treibsels nach der Abtrocknung der Deiche im April oder Mai (ebd., S. 74).

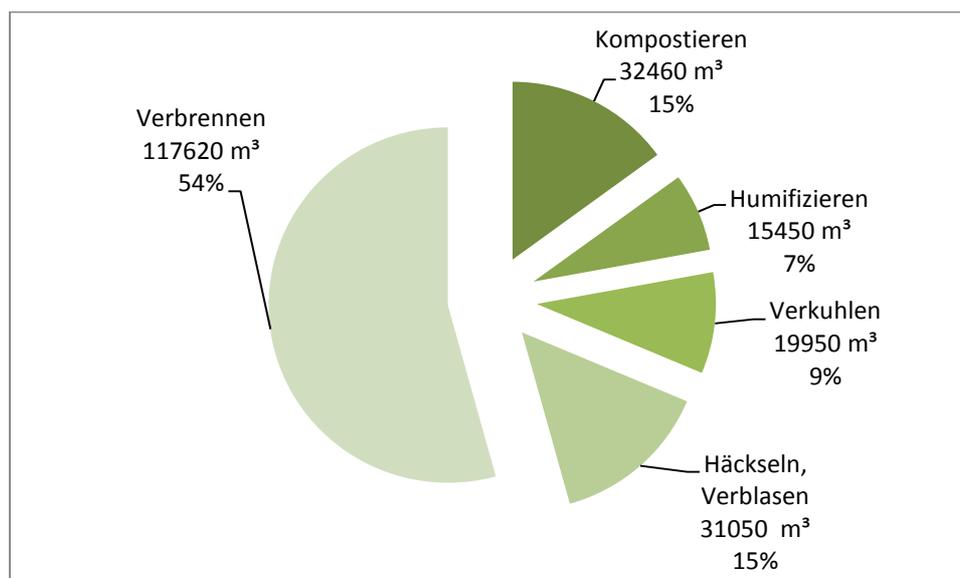
Die AZT (1996) hat die Deichverbände zur Art und Weise der Treibselbergung befragt. Die Ergebnisse zeigen, dass im Zuständigkeitsbereich eines jeden Deichverbandes zuerst diejenigen Bestandteile per Hand entfernt werden müssen, die keiner Verwertung zugeführt werden können. Dies sind die Glas-, Kunststoff- und Holzfraktionen. Die Handsortierung erfolgt an der Stelle, an der das Teek angelandet ist und muss bei größeren Teekmengen ggf. mehrmals durchgeführt werden. Die aussortierten Fraktionen werden nach AZT (1996, S. 75) anschließend auf den Mülldeponien der Landkreise entsorgt. Seit Juni 2005 sind diese Abfallstoffe gemäß AbfallabIV thermischen oder mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen zuzuführen. Das Einsammeln der organischen Bestandteile des Treibsels erfolgt in jedem Deichverband und den örtlichen Bedingungen entsprechend, z. B. des Vorhandensein von Treibselräumwegen, mit unterschiedlichen Techniken und Geräten.

### 5.1.4 Entsorgung und Verwertung

Die unterschiedlichen Arten der Treibselentsorgung beschreibt die AZT (1996) ausführlich. Diese Ausführungen werden in diesem Kapitel teilweise wiedergegeben und durch Informationen aus der Fachliteratur sowie Angaben nach BRÖCKER (1999), MEISGEIER (2008) WASSERVERBANDSTAG (2009), STRECKER (1995), SÜßMANN (1997) Itzehoer Schrott und Recycling GmbH (ISR 2001) und anderen ergänzt. Zur energetischen Verwertung von Treibsel werden in diesem Kapitel u. a. Informationen von STRECKER (1995), SÜßMANN (1997), BRÖCKER (1999), ISR (2001) und MEISGEIER (2008) zusammengefasst.

Für die Treibselentsorgung wenden die Deichverbände unterschiedliche Methoden an. Das gesamte im Jahr 1995 angefallene Treibsel von 216.530 m<sup>3</sup> wurde nach AzT (1996, S. 77 ff) mit folgenden Methoden entsorgt:

- Kompostieren
- Humifizieren
- Verkuhlen (Vergraben)
- Häckseln / Verblasen
- Verbrennen



**Abbildung 16: Verteilung der Treibselmengen auf die angewendete Entsorgungsmethode für 1995 nach AzT (1996, S. 79)**

Die Verteilung der gesamten Treibselmenge auf die angewendeten Entsorgungsmethoden im Jahr 1995 ist in Abbildung 16 veranschaulicht. Nach WASSERVERBANDSTAG (2009, pers. Mitteilung) kamen im Jahr 2008 dieselben Entsorgungsmethoden, jedoch in anderer Mengenverteilung zum Einsatz.

In den folgenden Kapiteln werden die verschiedenen Möglichkeiten der Treibselentsorgung bzw. –verwertung weitergehend erläutert.

#### 5.1.4.1 Kompostierung

Die Kompostierung von Treibsel unterliegt der Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Flächen (Bioabfallverordnung – BioAbfV). Eine Kompostierung des Treibselns ist möglich, wenn die in § 4 genannten Anforderungen hinsichtlich der Schadstoffe und weiterer Parameter eingehalten werden (§ 4 BioAbfV). Die Kompostierung erfolgte sowohl in der Vergangenheit (AzT, 1996, S. 95 ff) als auch heute (WASSERVERBANDSTAG, 2009, pers. Mitteilung; CORNELIUS & WILKEN, 2009, pers. Mitteilung) überwiegend als offene Mietenkompostierung. Hierbei wird das Treibsel, nachdem die Störstoffe bereits am Deich per Hand aussortiert wurden, zu einem relativ

gut durchmischten Haufwerk im Deichhinterland aufgeschüttet. Dieses Haufwerk wird nach Möglichkeit in einem regelmäßigen Turnus umgeschichtet (CORNELIUS & WILKEN, 2009, pers. Mitteilung). Eine Umschichtung während des Rotteprozesses ist notwendig, um Sauerstoff in das Material einzutragen, wovon die Aktivität der Mikroorganismen abhängt (KERN, 1999, S. 302 ff). Die Aktivität der aeroben Mikroorganismen bestimmt den Grad der mikrobiologischen Zersetzung des Materials (HUPE ET AL., 2009). Diese Mikroorganismen sind hauptsächlich aerobe und fakultativ anaerobe Bakterien sowie Schimmel- und andere Pilze (ebd., S. 3). Weiter ist der Abbau der organischen Substanz durch die Temperatur, die Feuchte, den Sauerstoffgehalt und den pH-Wert bestimmt (ebd., S. 3). „Grundsätzlich wird beim aeroben Abbau organische Substanz (Kohlenwasserstoffe) durch die mikrobielle Aktivität mit Hilfe von Sauerstoff zu Kohlendioxid, Wasser und Biomasse umgesetzt“ (ebd., S. 3). Die Freisetzung von Wärmeenergie und der Aufbau von Humusstoffen ist die Folge. „Bei Wassergehalten von 75 bis 85 % kommt der Rotteprozess ohne Zugabe von Zuschlagsstoffen und ohne vorheriges Shreddern des Materials in Gang“ (AZT, 1996, S. 99). Nach etwa sechs bis sieben Monaten ist nach einer erneuten Umsetzung der Mieten keine Temperaturerhöhung im kompostierten Treibsel zu verzeichnen. Dies ist nach AZT (1996, S. 100) das Zeichen für eine abgeschlossene Kompostierung. Der fertige Kompost sollte nach AZT (1996, S. 100) einen Störstoffanteil von weniger als 1 % enthalten. Untersuchungen des Kompostes aus Treibsel haben ergeben, dass dieser einen relativ hohen Stickstoffgehalt, vergleichbar mit dem von Stallmist, aufweist. Der Nährstoffgehalt ist relativ gering, die Schwermetallgehalte lagen unter den zum Zeitpunkt der Untersuchung (1995) geltenden Grenzwerten. Unter diesen Umständen kann der Treibselkompost auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht werden. Der beim Institut für Mikrobiologie und Landeskultur gemessene Salzgehalt des Kompostes wird nach AZT (1996, S. 100) als nicht problematisch bewertet, da dieser bei einer Ausbringung auf landwirtschaftlichen Flächen vom Regen ausgewaschen würde. In Folge einer solchen Feldausbringung wurde jedoch, in mindestens einem Fall, ein Rückgang des Ernteertrags beobachtet, der auf eine Versauerung des Bodens durch den Restsalzgehalt im Treibselkompost zurückführbar wäre (CORNELIUS & WILKEN, 2009, pers. Mitteilung).

#### 5.1.4.2 Humifizierung

Als Humifizierung wird eine Entsorgungsmethode bezeichnet, bei der das Treibsel zu einem großen Haufwerk aufgefahren und verdichtet wird. Störstoffe werden vor dem Anhäufen des Treibsel bereits am Deich per Hand aussortiert. Im Gegensatz zur oben beschriebenen Kompostierung werden die pflanzlichen Bestandteile des Treibsel anaerob umgesetzt. Das Haufwerk wird demnach nicht umgeschichtet, da ein Sauerstoffeintrag nicht erwünscht ist. Nach einer Dauer von zwei bis drei Jahren gilt die Humifizierung des Treibsel als abgeschlossen und das Material kann nach AZT (1996, S. 110) auf geeigneten Flächen oder auf dem Deichvorland ausgebracht werden.

Für die Einrichtung von Humifizierungsplätzen bedarf es ebenso einer gesetzlichen Genehmigung wie für Kompostierungsplätze. Da das Verfahren ähnlich dem der Kompostierung ist, müssen auch bei der Humifizierung Vorkehrungen bezüglich der Vermeidung von Sickerwassereinträgen in das Grundwasser getroffen werden (ebd., S. 110). Aufgrund der erheb-

lich höheren Dauer des Zersetzungsprozesses müsste ein Humifizierungsplatz im Vergleich zu einem Kompostplatz zwei- bis dreimal so groß sein, um das Treibsel durch die Humifizierung zu behandeln (ebd., S. 110).

#### **5.1.4.3 Vergraben/Verkuhlen**

Das Vergraben des Treibsel, regional als Verkuhlen bezeichnet, stellt eine weitere Art der Treibselentsorgung dar. Die AZT (1996, S. 111) bezeichnet diese Entsorgungsmethode auch als Vertorfung.

Das Verkuhlen des Treibsel kann nur stattfinden, wenn die zuständige Behörde eine Genehmigung nach § 27 Abs. 2 Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) zur Behandlung von Abfällen außerhalb von Abfallbehandlungsanlagen erteilt. Eine Verkuhlung ist nur hinter dem Deich, außerhalb der zur Deichverteidigung freizuhaltenden 50 m-Zone zulässig. Vor dem Deich ist bei einer Verkuhlung damit zu rechnen, dass das Deichvorland an Stabilität verliert, womit die Deichsicherheit eingeschränkt wäre (ebd., S. 111).

Nach dem Aussortieren der Anteile an Zivilisationsmüll und Holz aus dem am Deich liegenden Treibsel wird es zu Mieten angehäuft. Hierfür beschreibt die AZT (1996, S. 111) zwei Ausführungen. Entweder wird das Treibsel in eine Grube eingebracht, oder es wird zu ebener Erde verteilt. Da in beiden Fällen eine möglichst starke Verdichtung des Materials notwendig ist, sollte es vorher geshreddert oder zu Ballen gepresst werden (AZT, 1996, S. 111). Eine Abdeckung mit wasserundurchlässigem Bodensubstrat soll ein Einsickern von Niederschlägen möglichst ausschließen. Der anaerobe Abbauprozess läuft relativ langsam ab, sodass eine Vertorfung mehrere Jahrzehnte dauert (ebd., S. 111).

#### **5.1.4.4 Häckseln und Verblasen**

Die Treibselentsorgung durch das Häckseln und Verblasen stellt eine Eigenverwertung dar. Die Eigenverwertung von Biomasse ist u. a. das Ausbringen auf betriebseigenen Flächen bzw. das Ausbringen auf den Flächen, auf denen der Bioabfall angefallen ist. Hierzu muss der Zivilisationsmüll vor der Entsorgung aus dem Treibsel aussortiert werden. Die gesetzliche Grundlage dieser Entsorgungsmethode bilden § 1 Abs. 3 Nr. 2 und § 2 Nr. 6 BioAbfV.

Diese Entsorgungsmethode eignet sich nur, wenn das Treibsel in geringen Mengen anfällt. Als Maximalwert gibt die AZT (1996, S. 105) 0,5 m<sup>3</sup> pro laufendem Deichmeter an. Bei Mengen über diesem Wert entsteht eine zu dicke Schicht des gehäckselten Teeks auf dem Deichvorland, die ggf. eine problematische Vernässung des Deichfußes verursachen kann (ebd., S. 105). Bei einem Treibselaufkommen von weniger als 0,2 m<sup>3</sup> pro laufendem Deichmeter kann das Material nach dem Häckseln auf dem Deich verteilt werden (ebd., S. 105).

Zunächst werden Zivilisationsmüll und Holz aus dem angelandeten Teek aussortiert und einer fachgerechten Entsorgung zugeführt. Anschließend wird das Treibsel mit speziellen landwirtschaftlichen Maschinen in haufenförmige Bahnen, auch als Schwade bezeichnet, gelegt, ehe das Material mit einem Erntehäcksler aus der Landwirtschaft zerkleinert und ins Deichvorland verblasen wird (AZT, 1996, S. 105). Beim Verblasen sollte die herrschende Windrichtung beachtet werden. Bei optimalem Wind kann das gehäckselte Teek bis zu 20 m

in das Deichvorland verblasen werden (ebd., S. 105). Seit 1999 sind landwirtschaftliche selbstfahrende Großhäcksler mit speziell entwickelten Aufnahmevorrichtungen zum Häckseln und Verblasen von Teek im Einsatz. Diese Geräte wurden an der Fachhochschule Emden entwickelt (WÄCHTER, 2000, S. 1 f; WITTRÖCK, 2009, pers. Mitteilung).

#### 5.1.4.5 Verbrennung

Nach AZT (1996, S. 113) war das Verbrennen des Treibselns am Ort der Anlandung bis zum 15. Mai 1992 eine gängige Entsorgungspraxis. Es wurden nach dem Abtrocknen des Deiches überdurchschnittlich große Mengen mit überwiegend groben, leicht entflammbaren Anteilen entzündet, die vorher von Zivilisationsmüll befreit wurden. Diese Entsorgungsmethode fand ebenfalls dort Anwendung wo die Außenböschung des Deiches nicht oder nur eingeschränkt, unabhängig von der Treibselmenge, erreichbar war.

Seit dem oben genannten Datum wurde das Verbrennen von Treibsel durch Inkrafttreten der Kompostverordnung<sup>3</sup> (KompostVO), gemäß § 3 Abs. 1 KompostVO, grundsätzlich verboten. Als Begründungen für das Verbot der Treibselverbrennung werden „die Entlastung der Umwelt und der Bevölkerung von vermeidbaren Emissionen und die Rückführung von Nährstoffen in den natürlichen Stoffkreislauf“ (AZT, 1996, S. 113) aufgeführt.

Bis Ende Mai 1998 galt allerdings eine Übergangsfrist, in welcher das Verbrennen von Treibsel auf Antrag gestattet wurde, wenn angelegte Treibselkompostierungsplätze noch nicht betriebsbereit waren. Zusätzlich war von den Antragstellern schriftlich zu begründen, weshalb andere Entsorgungsmethoden nicht tragbar waren (AZT, 1996, S. 113). Nach Ablauf der Übergangsfrist blieb die Verbrennung von Treibsel gänzlich verboten. Nach AZT (1996, S. 113) wurden, während der Übergangsfrist, weitere Ausnahmen zur Treibselverbrennung erteilt, wenn Treibsel in übermäßigen Mengen anfiel. Begründet wurde dies damit, dass die Kompostplätze für Treibsel nur für normale, durchschnittliche Treibselmengen ausgelegt waren. „Die Kapazität der Treibselkompostplätze kann nicht auf übermäßigen Anfall ausgelegt werden, da die Kosten für so große Anlagen unverhältnismäßig hoch wären“ (ebd., S. 113).

Die Emissionen der Treibselverbrennung werden in STRECKER (1995) beschrieben und im Folgenden auch in Verbindung mit anderen Erkenntnissen zur thermischen Verwertung von Treibsel wiedergegeben.

Der Salz- bzw. Chlorgehalt von Treibsel spielt eine große Rolle hinsichtlich der energetischen Verwertungsmöglichkeiten. So ist zu vermuten, dass eine hohe Chlorkonzentration bzw. ein hoher Chlorgehalt im Substrat Treibsel, ähnlich wie bei Halmgut, bei der thermischen Verwertung durch Verbrennen zu einer Erhöhung der Konzentration und somit bei-

---

<sup>3</sup> Niedersächsische Landesverordnung; aufgehoben am 14.01.2004 durch § 7 Abs. 2 Verordnung über die Beseitigung von pflanzlichen Abfällen durch Verbrennen außerhalb von Abfallbeseitigungsanlagen (AbfallbeseitigungsVO)

spielsweise zur verstärkten Bildung von Salzsäure führt. Hiermit wären Beschädigungen durch Korrosion an Anlagenteilen aus Stahl, wie etwa einem Heizkessel oder anderen metallischen Anlagenelementen, verbunden (MUHMANN, 2006, S. 47; BECHER & KALTSCHMIDT, 1997, S. 35).

### **Thermische Treibselbehandlung in bestehenden Biomassekraftwerken**

Laut GABRIEL & JAHN (2008, S. 31 ff) bestehen in Emden, Papenburg und Hamburg Biomasseheizkraftwerke, die für die Mitverbrennung von Treibsel konzipiert wurden. Der Einsatz des Treibsel als Brennstoff findet derzeit in diesen Kraftwerken nicht statt, da die potenziellen Treibselieferanten nicht bereit sind, die mit der Verbrennung verbundenen hohen Entsorgungskosten zu zahlen (GABRIEL & JAHN, 2008, S. 36).

### **Verbrennungsversuche von STRECKER (1995)**

In Die Versuchsreihen 1 und 2 wurden in einer Feststofffeuerungsanlage durchgeführt und unterschieden sich in der Art der Feuerungsführung und damit in der Güte des Ausbrands.

Der Versuch 1 wurde mit einem Vorofen vor der eigentlichen Feststofffeuerungsanlage durchgeführt.

Bei Versuch 2 wurde der Vorofen umgangen und das zu verbrennende Treibsel im Gewichtsverhältnis 1:2 mit Nadelholzhackschnitzeln vermischt. Diese Maßnahme war notwendig, um ein Ersticken der Glut durch entstehende Asche zu verhindern.

Die Versuchsreihe 3 wurde als Haufenverbrennung im Freiland durchgeführt und kam somit der Entsorgung von Treibsel durch Verbrennung am Deich nahe.

Tabelle 13 sind die Daten der Abgaszusammensetzung aller von Strecker (1995, S. 46) durchgeführten Verbrennungsversuche dargestellt.

Die Versuchsreihen 1 und 2 wurden in einer Feststofffeuerungsanlage durchgeführt und unterschieden sich in der Art der Feuerungsführung und damit in der Güte des Ausbrands.

Der Versuch 1 wurde mit einem Vorofen vor der eigentlichen Feststofffeuerungsanlage durchgeführt.

Bei Versuch 2 wurde der Vorofen umgangen und das zu verbrennende Treibsel im Gewichtsverhältnis 1:2 mit Nadelholzhackschnitzeln vermischt. Diese Maßnahme war notwendig, um ein Ersticken der Glut durch entstehende Asche zu verhindern.

Die Versuchsreihe 3 wurde als Haufenverbrennung im Freiland durchgeführt und kam somit der Entsorgung von Treibsel durch Verbrennung am Deich nahe.

**Tabelle 13: Feuerungstechnische Daten und Abgaszusammensetzung der Verbrennungsversuche von Treibsel nach STRECKER (1995, S. 46)**

	Einheit	Probe Sandstedt			Probe Leybucht			
		VR 1	VR 2	VR 3	VR 1	VR 2	VR 3	
<b>Feuerungstechnische Daten</b>								
Vorofentemperatur	°C	831	-	-	813	-	-	
Feuerraumtemperatur		310	266	-	298	271	-	
Abgastemperatur		150	136	123	154	129	67	
Kesseltemperatur		94	86	-	91	89	-	
Leistung	kW	6,6	7,4	-	9,5	6,6	-	
Brennmaterial	kg/h	6,0	6,2	9,0	6,9	5,9	6,5	
Brennmaterial atro		5,6	5,6	8,5	6,5	5,4	6,1	
<b>Abgaszusammensetzung</b>								
Probenahmezeit	min	80	90	98	95	90	108	
Probenvolumen <sup>1)</sup>	m <sup>3</sup>	94,6	91,0	84,8	84,7	100,0	95,6	
Sauerstoffgehalt	Vol.-%	16,0	17,9	20,4	15,2	18,0	20,7	
Kohlendioxidgehalt	mg/m <sup>3</sup>	4,5	2,8	0,4	5,2	2,9	0,3	
Kohlenmonoxidgehalt		324,0	8.194,0	4,8	1.229,0	8.217,0	12.233,0	
Stickoxidgehalt		460,0	281,0	383,0	411,0	312,0	383,0	
Gesamtkohlenwasserstoffgehalt		< 3,0	1.749,0	2.069,0	16,0	1.750,0	8.486,0	
Gesamtkohlenstoffgehalt		< 3,0	1.431,0	1.693,0	13,0	1.431,0	6.943,0	
Schwefeldioxidgehalt		541,0	8,0	71,0	654,0	4,0	171,0	
Chloridgehalt		84,0	16,0	< 3,0	425,0	56,0	12,0	
Fluoridgehalt		1,0	1,0	< 1,0	2,0	< 1,0	< 1,0	
Bleidgehalt		mg/m <sup>3</sup>	0,64	< 0,02	k. A.	0,82	< 0,02	k. A.
Cadmiumgehalt			0,02	< 0,02		0,03	< 0,02	
Chromgehalt			0,02	< 0,02		0,01	< 0,02	
Kupfergehalt			0,15	< 0,02		0,88	< 0,02	
Zinkgehalt	4,20		0,03	3,36		< 0,02		
Toxizitätsäquivalente nach NATO/CCMS (1988) in Bezug auf Brennstoffmasse von 40 kg (atro)	ng/m <sup>3</sup>	0,13	0,36	0,02	5,04	0,85	0,01	
Summe der Konzentrationen polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe ( $\Sigma$ PAH)	$\mu$ g/m <sup>3</sup>	3,22	270,04	1,47	39,14	284,16	3,81	

<sup>1)</sup> unter Normbedingungen

STRECKER (1995, S. 24 ff) weist in den Abgasen dieser Versuchsverbrennungen auffällig hohe Kohlenmonoxid-, Stickoxid-, Schwefeldioxid- und Chloridanteile nach und wertet diese als Indizien für relativ unvollständige Verbrennungsvorgänge und hohe Umweltbelastungen. Ein spezifischer Chlorgehalt im Brennstoff Treibsel verursacht bei einer Verbrennung laut STRECKER (1995, S. 24 ff) und SÜßMANN (1997, S. 11 f) umweltbelastende und z. T. human-karzinogene Emissionen. So weist STRECKER (1995, S. 9) darauf hin, dass bei Verbrennungsvorgängen, bei denen „unvollständig oxidiertes Kohlenstoff und chlorhaltige Verbindungen im Rauchgas vorhanden sind“, eine Bildung polychlorierter Dibenzo-p-Dioxine (PCDDs) und -Furane (PCDFs) grundsätzlich möglich ist.

Die Werte der ermittelten PCDD- und PCDF-Verbindungen werden in Tabelle 13 als Toxizitätsäquivalente (TE) wiedergegeben. Die Toxizitätsäquivalente geben an, welcher Menge 2,3,7,8-tetrachloriertem Dibenzo-p-Dioxin (2,3,7,8-TCDD) das nachgewiesene PCDD/PCDF-

Gemisch entspricht. Der Toxizitätsäquivalenzfaktor (TEF) ist für 2,3,7,8-TCDD mit 1 festgelegt. Durch die Berechnung der einzelnen, nachgewiesenen PCDD- und PCDF-Konzentrationen mit den spezifischen TEF und anschließender Addition ergibt sich die in Tabelle 13 angegebene Konzentration. Die Werte geben diejenige Konzentration an, die der gleichen toxischen Wirkung des hochgiftigen 2,3,7,8-TCDDs entspräche (UBA, 2009, S. 1).

Für die Erstellung des TEF wird davon ausgegangen, dass die einzelnen Dioxine und Furane unterschiedliche Wirkungsstärken bei gleichem Wirkungsprinzip aufweisen (ebd., S. 1).

Anhand der Ergebnisse dieser Verbrennungsversuche beurteilt STRECKER (1995, S. 36 f) die Praxistauglichkeit der Treibselverbrennung. STRECKER (1995, S. 37) beschreibt es als nicht sinnvoll, Treibsel als Brennstoff in geschlossenen Feuerungssystemen einzusetzen. Begründet wird dies mit den hohen Kohlenmonoxid-, Gesamtkohlenstoff- und Dioxinmissionen, die in den Versuchsreihen 1 und 2 nachgewiesen wurden (STRECKER, 1995, S. 37). Eine offene Treibselverbrennung wird ebenfalls als bedenklich beurteilt. Hierfür werden ebenfalls die z. T. höheren Kohlenmonoxid- und Gesamtkohlenstoffemissionen angeführt, „so dass auch hier nach dem heutigen Umweltschutzverständnis die Verbrennung nicht mehr vorbehaltlos zu vertreten ist, zumal mit den sehr hohen Konzentrationen [...] im Rauchgas auch eine deutliche Emission von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen einher geht“ (STRECKER, 1995, S. 37). Einige der polyzyklischen chlorierten Kohlenwasserstoffe sind nach STRECKER (1995, S. 37) in Bezug auf ihre Toxizität als ebenso problematisch einzuordnen wie bestimmte Dioxine und Furane.

#### **Verbrennungsversuche von SÜßMANN (1997)**

Weiterführende Untersuchungen zur thermischen Verwertung von Treibsel stammen von SÜßMANN (1997). Hier wurde die Eignung von Treibsel als Co-Brennstoff zur Wärmeerzeugung für die Stadtwerke Norden untersucht. Auch hier wurden die Emissionen der Verbrennung untersucht.

Als Hauptbrennstoff wurden Waldhackschnitzel eingesetzt. Das Mischverhältnis betrug 4:1 für eine Verbrennung in einer Vorschubrostfeuerungsanlage mit 450 kW Leistung. Die Feuerungsanlage war mit einer sogenannten Low-NO<sub>x</sub>-Technik ausgestattet, bei der über eine gesteuerte Stufung der Verbrennungsluft der NO<sub>x</sub>-Gehalt gesenkt werden konnte, indem die im Brennstoff enthaltenen natürlichen Reduktionsstoffe genutzt wurden (SÜßMANN, 1997, S. 13). Durch diese Technik sollte der Einsatz zusätzlicher Reduktionsmittel vermieden werden. Die Herkunft des verwendeten Treibsel geht aus den Angaben von SÜßMANN (1997, S. 14) nicht eindeutig hervor. Es wird nur erwähnt, dass das im Versuch verwendete Treibsel dem für den Einsatz in Norden vorgesehenen Material in Zusammensetzung und Herkunft entspricht. Das Treibsel wies vor der Verbrennung Feuchtegehalte bis etwa 50 % auf und musste, bevor es der Verbrennung zugeführt wurde, gehäckselt werden, um eine relativ gute Durchmischung von Hackschnitzeln und Treibsel zu erreichen (SÜßMANN, 1997, S. 15).

Die untersuchten Messgrößen werden zusammen mit exemplarischen Ergebniswerten zweier Versuche vom 2. Juni 1997 in Tabelle 14 als Absolutwerte dargestellt. In den Untersu-

chungsergebnissen von SÜßMANN (1997, S. 16 f) werden allerdings keine Volumenströme der Verbrennungsgase aufgeführt.

**Tabelle 14: Auszug aus den Emissionsmessungen nach SÜßMANN (1997, S. 16 ff)**

	Versuch Nr. 2	Versuch Nr. 5
Sauerstoff [Vol.-%]	10,40	11,70
Kohlendioxid [Vol.-%]	10,10	8,90
Staub [mg/Nm <sup>3</sup> ]	245,00	262,00
Kohlenmonoxid [mg/Nm <sup>3</sup> ]	5,00	0,00
Stickoxid [mg/Nm <sup>3</sup> ]	258,00	275,00
Luftüberschuss $\lambda$	1,98	2,26
Abgastemperatur [°C]	216,60	195,70

Die relativ geringen Kohlenmonoxidwerte lassen auf einen relativ guten Ausbrand schließen. Es wird von SÜßMANN (1997, S. 16) explizit erwähnt, dass diese Werte nicht auf Messfehler zurückzuführen sind. Die Emissionen werden als beherrschbar eingestuft und hängen vom Grad der Durchmischung und der Zerkleinerung der eingesetzten Brennstoffe ab.

Die gegenüber der Verbrennung von Holz erhöhten NO<sub>x</sub>-Emissionen lassen sich nach SÜßMANN (1997, S. 16) durch Einsatz der oben beschriebenen Low-NO<sub>x</sub>-Technik minimieren. Zur weiteren NO<sub>x</sub>-Reduzierung wird die Zugabe von Harnstoff als Reduktionsmittel empfohlen (SÜßMANN, 1997, S. 16).

Als problematisch werden die höheren Anteile an Salz und Mineralien im Treibsel im Vergleich zu denen im Holz bewertet. „Insbesondere durch die mineralischen Bestandteile wird der Schmelzpunkt des Brenngutes herabgesetzt, wodurch es zu Schlackebildung in der Asche kommen kann“ (ebd., S. 16). Die Salze bilden nach dem Ausbrand des Brenngutes relativ feine Staubpartikel. Diese können bei der Abgasreinigung von einem Multizyklon nicht abgeschieden werden. Infolgedessen besteht ein höherer Wartungsbedarf des Rauchgasreinigungssystems, da sich die Staubpartikel in diesem System ablegen (ebd., S. 16).

Zudem wurden im Rahmen der Untersuchungen von SÜßMANN (1997, S. 16) Proben vom Kondensat der Rauchgase analysiert. Das Kondensat wies einen pH-Wert von 1 auf. Im Vergleich mit dem Rauchgaskondensat von Waldhackschnitzeln (pH 5) ist das Rauchgas der Treibselverbrennung sehr sauer (ebd., S. 16). Diesen Fakt wertet SÜßMANN (1997, S. 16) als Hinweis auf eine erhöhte Salzsäurekonzentration in diesem Rauchgas und führt diesen Wert auf das im Brennstoff Treibsel enthaltene Chlor zurück.

### **Emissionsminderungsmaßnahmen bei der Verbrennung von Treibsel**

SÜßMANN (1997, S. 17) beschreibt, auch im Hinblick auf die Erkenntnisse von STRECKER (1995, S. 36 f), Möglichkeiten der Emissionsminderung bei der thermischen Verwertung von Treibsel. Demnach lassen sich Kohlenmonoxid- und Stickoxidemissionen durch eine Optimierung der Verbrennungsbedingungen reduzieren. Nach SÜßMANN (1997, S. 17) lassen sich bei Verbrennungstemperaturen oberhalb 800 °C eingetragene Dioxine fast vollständig

zerstören. Gleichzeitig mindern diese Bedingungen die Anteile an Kohlenstoff im Rauchgas, die zur Bildung von Dioxinen führen könnten (SÜßMANN, 1997, S. 17).

Durch eine optimale Ausführung der Brennraumgeometrie, der Rauchgasführung und der Luftzufuhr lassen sich nach SÜßMANN (1997, S. 17) folgende Ziele einer Optimierung der Verbrennungsbedingungen als Primärmaßnahme der Emissionsminderung erreichen:

- Reduzierung des Luftüberschusses  $\lambda$  ( $\lambda \leq 1,5$ )
- bestmögliche Durchmischung von Heißgas und Sekundärluft
- Erhöhung der Verweilzeiten des Gases bei hohen Temperaturen
- keine oder möglichst geringe Staubablagerungen im Brennraum

Zur Reduzierung von Dioxinen im Rauchgas, wie sie bei STRECKER (1995, S. 36 f) festgestellt wurden, empfiehlt SÜßMANN (1997, S. 18) weitere Maßnahmen zur Rauchgasreinigung. Für diese sekundäre Rauchgasreinigung stehen z. B. Adsorptionsfilter mit Kalk-Kohle-Additiven oder Aktivkohle als Sorptionsmittel zur Verfügung. Durch diese können Dioxin-emissionen um etwa 60 % verringert werden (ebd., S. 18). Eine zusätzliche Reinigung der Rauchgase von Stickoxid und Dioxin ist durch Oxidationskatalysatoren erreichbar (ebd., S. 19).

Als ein relativ wartungsarmes und kostengünstiges Verfahren zur Entstaubung des Rauchgases und Neutralisierung saurer Rauchgaskondensate nennt SÜßMANN (1997, S. 19) den Einsatz eines Nassverfahrens mit Aerosolfilter. Damit werden saure Inhaltsstoffe des Rauchgases an das Neutralisationsmittel Natronlauge gebunden. Zusätzlich werden die Staubpartikel vom Aerosolfilter aus dem Rauchgas gefiltert, wodurch „sehr niedrige Reststaubgehalte erreicht werden“ (SÜßMANN, 1997, S. 19).

### **Schadstoffentfernung vor der Verbrennung**

Anders als in STRECKER (1995) und SÜßMANN (1997) wird in ISR (2001) die Schadstoffminimierung des Treibsel vor der thermischen Verwertung beschrieben. Diese Untersuchung bezieht sich auf Treibsel aus Schleswig-Holstein. Jedoch liegt der Untersuchungsraum an der Unterelbe und der nördlich zur Elbmündung angrenzenden Nordseeküste. Folglich ist davon auszugehen, dass sich das von ISR (2001) untersuchte Treibsel des Elbufers in Schleswig-Holstein dem Treibsel des Elbufers auf niedersächsischem Gebiet hinsichtlich der enthaltenen Pflanzenbestandteile ähnelt.

In ISR (2001, S. 1) wird festgestellt, dass sich das Treibsel der Unterelbe von dem der Nordseeküste vor allem im Chlorgehalt unterscheidet. Folgende Chlorgehalte wurden in Stichproben nachgewiesen:

- <1.000 mg Chlor/kg TS im Treibsel der Unterelbe
- 20.000 bis 30.000 mg Chlor/kg TS im Nordseetreibsel

Die Chlor-Werte des Treibsel der Unterelbe werden in ISR (2001, S. 1) als unkritisch beurteilt. Die Chlor-Werte des Nordseetreibsel werden als zu hoch beschrieben, wenn dieses Treibsel einer Verbrennung zugeführt werden soll. Deshalb untersuchte ISR (2001, S. 1 ff) die Wirkung einer Wäsche auf den Chlor-Gehalt im Nordseetreibsel. Zudem soll der in Vor-

versuchen ermittelte und als gering bewertete Heizwert durch eine Trocknung erhöht werden. Das Verfahren zur Wäsche wird in ISR (2001) ausführlich beschrieben. Durch die Wäsche kann der Chlorgehalt von Nordseetreibsel (20.000 mg Chlor/kg TS) auf etwa 2.000 bis 3.000 mg Chlor/kg TS verringert werden. Durch eine anschließende Trocknung soll der Heizwert des Ausgangsmaterials von 2.200 bis 3.500 kJ/kg auf etwa 8.000 bis 10.000 kJ/kg erhöht werden können (ISR, 2001, S. 7).

### **Analysen von Ostsee-Schwimmholz nach DBFZ**

Das Deutsche BiomasseForschungsZentrum (DBFZ) hat im Jahr 2010 eine umfangreiche Analyse von Schwimmholz aus der Ostsee vorgenommen. Untersucht wurden hauptsächlich brennstoffspezifische Parameter. Um Gehalte an Chlor-, Schwefel und anderer Hauptelemente als Vergleichswerte heranziehen zu können, werden die Analyseergebnisse des DBFZ (2010, pers. Mitt.) in der folgenden Tabelle aufgeführt.

**Tabelle 15: Analyseergebnisse von Schwimmholz aus der Ostsee (DBFZ, 2010, pers. Mitt.)**

Parameter	Einheit	Ergebnis	
Wassergehalt	Masse-% FM	14,60	
Aschegehalt (550 °C)	Masse-% TS	2,01	
Flüchtige Bestandteile		78,10	
Kohlenstoff		45,53	
Wasserstoff		6,39	
Sauerstoff		46,12	
Stickstoff		0,36	
Schwefel gesamt		0,05	
Phosphor		0,01	
Chlor gesamt		mg/kg TS	0,23
Brennwert		kJ/kg	19.138
Heizwert	19.113		
Cadmium	mg/kg TS	0,292	
Chrom		1,51	
Kupfer		3,73	
Blei		0,935	
Nickel		1,76	

#### **5.1.4.6 Vergärung von Treibsel**

Eine weitere Möglichkeit der energetischen Verwertung von Treibsel hat MEISGEIER (2008) experimentell analysiert. Darin wird die anaerobe Umsetzung von Treibsel zu Methan (CH<sub>4</sub>) und Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) erprobt und beschrieben. Das Versuchsziel bestand darin, einen positiven Ansatz zur Trockenvergärung von Treibsel zu erhalten.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden Trockenvergärungsversuche im „halblabortechnischen Maßstab“ durchgeführt (MEISGEIER, 2008, S. 46). Die Vergärungsversuche fanden unter mesophilen Bedingungen in einer einstufigen Trockenvergärung im Batch-Betrieb mit Perkolati-

on statt (ebd., S. 66). Hierzu wurde Perkolat aus einer großtechnischen Anlage verwendet, aus der auch das Animpfmaterial stammte. Bei den Vergärungsversuchen nach Meisgeier (2008, S. 46) handelt es sich um ein diskontinuierlich betriebenes Perkulationsverfahren, bei dem die anaerobe Phase durch Berieselung mit Perkolat eingeleitet wird. Eine wichtige Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit eines solchen Perkulationsverfahrens ist, dass das zu vergärende Substrat (-gemisch) eine relativ grobe Feststoffstruktur mit ausreichendem Porenvolumen aufweist. Diese Struktur sollte auch im Zuge des anaeroben Abbaus nicht zusammenbrechen, um die Perkolation aufrecht erhalten zu können (SCHATTAUER & WEILAND, 2006, S. 26 ff).

Das als Substrat eingesetzte Treibsel stammte aus der gleichen Region wie das von ISR (2001) verwendete. Zusätzlich wurde dem Treibsel anteilig Gärrest zweier Biogasanlagen, in denen Bioabfälle bzw. Küchen- und Gartenabfälle vergoren wurden, als Animpfmaterial beigemischt (MEISGEIER, 2008, S. 44). Ein praktikables Mischungsverhältnis der organischen Trockensubstanz (oTS) aus den beiden Substraten wurde in Vorversuchen in kleinerem Maßstab bestimmt. Für die Hauptversuche wurde ein Verhältnis von 60 % der oTS aus Treibsel und 40 % der oTS aus Gärrest gewählt (ebd., S. 60).

Zusätzlich wurden Untersuchungen zur Verwendbarkeit des Gärrests der Treibselvergärung hinsichtlich seines Salzgehaltes durchgeführt (ebd., S. 46). Hierfür wurden die Gehalte an Magnesium, Natrium, Chlorid, Kalzium und Sulfat in der organischen Trockensubstanz (oTS) des Treibsel vor der Versuchsdurchführung bestimmt. Der Hauptversuch war in zwei Versuchsreihen gegliedert. Jede Versuchsreihe bestand aus drei Versuchsreaktoren mit jeweils 160 L Fassungsvermögen. Während der Versuchsphase wurden täglich der pH-Wert und die Temperatur in den Reaktoren, sowie der Gasertrag und die Zusammensetzung des Gases bestimmt (ebd., S. 57).

In der ersten Hauptversuchsreihe beinhalteten zwei der drei Reaktoren das oben angegebene Gemisch aus Treibsel und Gärrest. Der dritte Reaktor dieser Versuchsreihe war ausschließlich mit einer entsprechenden Menge des Animpfmaterials aus der großtechnischen Anlage gefüllt, um Referenzwerte zu erhalten (ebd., S. 66). Die Dauer der ersten Versuchsreihe betrug 28 Tage. Während dieser Zeit wurde das eingesetzte Perkolat im Kreis geführt. Die Perkolation fand einmal am Tag zwei Minuten lang statt.

Die Versuchsreaktoren der zweiten Versuchsreihe waren mit Treibsel und dem Gärrest der ersten Versuchsreihe gefüllt. Gleichzeitig wurde das Perkolat verwendet, das bei der ersten Versuchsreihe entstanden ist. Hierdurch sollte eine eventuelle Aufkonzentration des Salzgehalts nachgewiesen werden können. Der dritte Versuchsreaktor war wie in Versuchsreihe eins nur mit Gärrest der großtechnischen Anlage befüllt worden (ebd., S. 60). Die Dauer dieser Versuchsreihe betrug ebenfalls 28 Tage, jedoch fand die Perkolation hier alle sechs Stunden, mittels Zeitschaltuhr gesteuert, statt (ebd., S. 59 f).

Als Ergebnis der ersten Versuchsreihe gibt MEISGEIER (2008, S. 67) an, dass bei der Vergärung von Treibsel und Gärrest, innerhalb von 28 Tagen eine spezifische kumulierte Methan- ausbeute von ca. 127 bzw. 131 l<sub>N</sub> CH<sub>4</sub>/kg oTS erreicht wurde (ebd., S. 70). Hierbei handelt

es sich um die Methanausbeute des Substratgemisches, also der Methanausbeute aus 60 % oTS Treibsel, 40 % oTS und bereits vergorenem Animpfmaterial.

In der zweiten Versuchsreihe konnte beobachtet werden, dass die Mikroorganismen eine Adaptionszeit von zwei bis drei Tagen benötigten, bevor der Abbauprozess einsetzte (ebd., S. 82). Die spezifische kumulierte Methanausbeute des Substratgemisches der zweiten Hauptversuchsreihe betrug etwa 48 l<sub>N</sub> bzw. 47 l<sub>N</sub> CH<sub>4</sub>/kg oTS (ebd., S. 84).

In Tabelle 16 werden die Methanausbeuten der Hauptversuchsreihen 1 und 2 gegenübergestellt. Den festgestellten Unterschied der Methanausbeuten begründet MEISGEIER (2008, S. 83) mit der Theorie, dass eine Hemmung der Aktivität der Methanbakterien in den Reaktoren der Hauptversuchsreihe 2 durch Ammoniak stattgefunden hat.

**Tabelle 16: Vergleich der Methanausbeuten nach MEISGEIER (2008, S. 84)**

Hauptversuchsreihe	Reaktor	Substrat	Methanertrag in l <sub>N</sub> CH <sub>4</sub> /kg oTS
1	1	60 % oTS Treibsel 40 % oTS Animpfmaterial	127,9
	2	60 % oTS Treibsel 40 % oTS Animpfmaterial	131,4
2	1	60 % oTS Treibsel 40 % oTS Gärrest aus Hauptversuchsreihe 1	48,0
	2	60 % oTS Treibsel 40 % oTS Gärrest aus Hauptversuchsreihe 1	47,2

Die Untersuchungen der organischen Trockensubstanz des Gärrests beider Hauptversuchsreihen auf ihre Salzgehalte ergaben, dass der Salzgehalt beider Hauptversuchsreihen nach Abschluss der Versuche abgenommen hatte (ebd., S. 88). Dies führt MEISGEIER (2008, S. 88) auf die Perkolation zurück, wodurch die im Substratgemisch enthaltenen Salze ausgewaschen wurden. Da der Salzgehalt im Gärrest der Hauptversuchsreihe 2 zudem geringer war als im Gärrest der Hauptversuchsreihe 1, geht MEISGEIER (2008, S. 88) davon aus, dass dies mit dem erhöhten Perkulationsrhythmus zu begründen ist. Zudem ergab eine Analyse der organischen Trockensubstanz des Perkolats der Hauptversuchsreihe 2, dass hierin bedeutend höhere Salzkonzentrationen als in den Gärresten beider Hauptversuchsreihen festgestellt werden konnten (ebd., S. 88). Auch diesen Umstand führt MEISGEIER (2008, S. 88) als mögliche Ursache einer Hemmung der Aktivität der Methanbakterien und der damit verbundenen Reduzierung der Gasproduktion im Verlauf der Hauptversuchsreihe 2 auf.

Ein weiteres Projekt zur energetischen Nutzung von Treibsel erarbeitet die *Hanseatische Umwelt CAM GmbH* in Projektgemeinschaft mit *AAP Projektmanagement Erneuerbare Energien*. Diese Projektgemeinschaft strebt die Realisierung eines Bioenergiewerkes zur Methanisierung von jährlich ca. 20.000 t Treibsel an. Hierfür wurden nach Aussage der Projektgemeinschaft bereits langfristige Lieferverträge (max. 25 Jahre) für Treibsel mit dem Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig Holstein geschlossen (HANSEATISCHE UMWELT, 2010, S. 1). Bei dem voraussichtlich eingesetzten Material soll es sich um Treibsel aus den Bereichen von Elbe, Weser und der Nordsee handeln

(HANSEATISCHE UMWELT, 2009, S. 2). Die Hanseatische Umwelt (2009, S. 2) charakterisiert das Treibsel folgendermaßen:

- Das Treibsel der Nordseeküste soll 40 % des eingesetzten Materials ausmachen und setzt sich zusammen aus:
  - Gras, krautige Pflanzenteile
  - Typische Salzwiesenpflanzen, Queller, Schilf
  - Zweige, holzige Bestandteile, Faschinenmaterial
  - Restbestandteile ca. 2 % (werden vor Verwertung entsorgt)
- Das Treibsel der Ästuarien soll 60 % des eingesetzten Materials betragen und besteht überwiegend aus strohartigem Material (Reet, Schilf)

Weiter beschreibt die HANSEATISCHE UMWELT (2009, S. 4) das Treibsel hinsichtlich einiger energetischer Parameter. So wird der Heizwert des Treibsel mit 17,0 MJ/kg TS angegeben und wird von den Autoren in den Heizwertbereich von Holz eingestuft. Die durchschnittliche Gasausbeute des Materials betrug nach Vergärungsversuchen etwa 300 m<sup>3</sup>/t oTS bei einem durchschnittlichen Methanertrag von rund 163 m<sup>3</sup>/t oTS. Diese Werte wurden in Laborversuchen ermittelt (HANSEATISCHE UMWELT, 2009, S. 4). Um die Gasausbeute des Treibsel für den Einsatz in einer großtechnischen Anlage zu steigern, sieht die Hanseatische Umwelt (S. 4 f, 2009) den Einsatz einer Prallmühle und einer Hydrolysestufe vor. Hierdurch versprechen sich die Autoren den Gasertrag um ca. 20-30 % zu steigern. Das Treibsel soll in den Fermentern einer Biogasanlage (Nassfermentation) methanisiert werden.

Neben der Vergärung des Treibsel nennt die HANSEATISCHE UMWELT (2009, S. 5) ferner die Planung von Anlagen zur Verbrennung des Treibsel mittels zirkulierendem Wirbelschichtverfahren, evtl. auch die Vergasung/Pyrolyse des Materials.

Nach BÖTTIGER (2010, S. 19) prüft die *Hanseatische Umwelt GmbH CAM* die Realisierung einer Pilotanlage zur Treibselvergärung im Landkreis Dithmarschen (Schleswig-Holstein).

#### **5.1.4.6 Werkstoffliche Verwertung von Treibsel**

Neben den oben genannten Entsorgungs- und Verwertungsmöglichkeiten ist laut BRÖCKER (1999, S. 62) die Verwendung von Treibsel als Werkstoff zu betrachten.

Nach BRÖCKER (1999, S. 62 f) bestehen vor allem für Schilfmaterial Möglichkeiten des Einsatzes in folgenden Einsatzfeldern und Verwertungstrecken:

- in der Bauindustrie als Dachdeckwerk, Schallschutzmaterial, Dämmstoff, Isolier- und Filtermaterial sowie als Teil von Verbundwerkstoffen
- in der Zellstoff- und Spanplattenherstellung
- in der Verpackungsindustrie als Isolier- oder Polstermaterial
- im Garten- und Landschaftsbau als Material für Pflanzkörbe, Steckunterlage, etc. und
- als Rohstoff in der Chemieindustrie.

## 5.2 Umgang mit Treibsel in anderen Regionen bzw. Ländern

In den folgenden Kapiteln wird über Erfahrungen und Erkenntnisse zum Treibsel der Ostseeküste und aus ausgewählten Staaten berichtet, soweit Daten verfügbar sind.

### 5.2.1 Forschung und Praxis zu Ostseetreibsel

An der Ostseeküste von Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Dänemark kommt es unter verschiedenen Bedingungen ebenfalls zur Anlandung von Treibsel. In diesem Kapitel wird beschrieben, welche Ursachen das dortige Aufkommen von Treibsel hat, welche Probleme hiermit verbunden sind, wie sich das Treibsel zusammensetzt und wie der Treibselproblematik begegnet wird.

#### Aufkommen

Nach ECKSTÄDT (2009, S. 8) ist die Ostsee überdüngt. Diese tendenziell zunehmende Eutrophierung hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Vor allem die zunehmende, anthropoge Einleitung von Phosphor und Stickstoff in die Ostsee hat eine erhöhte Algenblüte im Frühjahr und Sommer zur Folge (JANAS, 2004, S. 6 ff). Bei Ostwindlagen landen die Algen als Treibsel an den Ostseestränden (ECKSTÄDT, 2009, S. 8). Der an den Stränden einsetzende biologische Abbau des Algenmaterials führt zu Geruchsbelästigungen, welche eine Einschränkung der touristischen Nutzung betroffener Strände nach sich ziehen, was regional eine Minderung des Wirtschaftswertes einzelner Küstenabschnitte bedeutet (ECKSTÄDT, 2009, S. 8; JANAS, 2004, S. 6). An den Ostseeküsten Schleswig-Holsteins, Mecklenburg-Vorpommerns und Dänemarks bestehen ebenfalls Küstenschutzeinrichtungen, wie Landesschutz- und Seedeiche, jedoch erfolgt die Treibselräumung am Strand überwiegend aus ästhetischen und damit verbundenen ökonomischen Gründen (ECKSTÄDT, 2009, S. 12). Am Beispiel Rügen sind die Treibselmengen für den Zeitraum von 2006 bis 2008 in Tabelle 17 dargestellt.

**Tabelle 17: Registrierte Treibselmengen auf Rügen (ECKSTÄDT, 2009, S.15)**

Gemeinde	2006 [t/Jahr]	2007 [t/Jahr]	2008 [t/Jahr]	Mittelwert [t/Jahr]
Breege/Juliusruh	1.750	1.750	1.750	1.750
Binz	1.150	1.100	1.200	1.150
Thiessow	-	-	495	495
Sellin	600	450	300	450
Göhren	144	227	205	192
Baabe	35	25	25	28
<b>Summe</b>	<b>3.679</b>	<b>3.552</b>	<b>3.975</b>	<b>4.065</b>

#### Zusammensetzung

Das Ostseetreibsel besteht überwiegend aus diversen Algenarten und Cyanobakterien (ECKSTÄDT, 2009, S. 12; SCHNEIDER, 2008, S. 11 ff). Andere Materialien, wie z. B. Zivilisationsmüll und tierische Überreste sind anteilig im Ostseetreibsel enthalten (SCHNEIDER, 2009, S. 17).

Nach SCHNEIDER (2008, S. 18) enthält das Treibsel der Ostseeküste Schleswig-Holsteins 30 bis 70 % Trockensubstanz und 12 bis 33 % organische Trockensubstanz bezogen auf die Frischmasse. Die Anteile an organischer Trockensubstanz im Treibsel der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns werden von ECKSTÄDT (2009, S. 16) mit rund 14 bis 24 % angegeben.

Die Untersuchungen einiger Proben des Ostseetreibsels von Rügen haben ergeben, dass z. T. erhöhte Schwermetallkonzentrationen im Treibsel nachweisbar sind (ECKSTÄDT, 2009, S. 16). Dies betrifft vor allem den Cadmium-Gehalt (Cd-Gehalt) mit Werten zwischen etwa 2 bis 2,3 mg/kg TS. Diese Werte übersteigen die in § 4 Abs. 3 BioAbfV angegebenen Werte von 1 bzw. 1,5 mg Cd/kg TS für Bioabfall um 50 bzw. 65 %.

### Bergung

Die Bergung des Ostseetreibsels erfolgt, anders als die Bergung des Nordseetreibsels, mehrheitlich mit Spezialgeräten. Unabhängig von den Treibselmengen werden an den Stränden und in Flachwasserbereichen der Ostsee speziell entwickelte Bergegeräte eingesetzt, wie z. B. der sog. *Beach-Cleaner* oder *Sea-Cleaner Algensauger* siehe Abbildung 17).



**Abbildung 17: links: Beach-Cleaner der Firma Kässbohrer; rechts: Sea-Cleaner Algensauger der Firma Land & Bau Kommunalgeräte (ECKSTÄDT, 2009, S. 18)**

Algen werden oft noch bevor sie an den Strand gelangen, per Boot mit Auffangrechen oder –netzen eingesammelt. Das gesammelte Material wird am Strand aufgehäuft und zwischengelagert, bevor es der Entsorgung oder Verwertung zugeführt wird (ECKSTÄDT, 2009, S. 20). Diese Art der Zwischenlagerung wird als unbefriedigend beurteilt, da es auch hier durch fortschreitende Rotteprozesse zu Geruchsbelästigungen der Strandbesucher kommt (ebd., S. 21). Zudem wird die Zwischenlagerung des Ostseetreibsels am Strand vereinzelt nur bis September von den zuständigen Behörden genehmigt und die Suche nach geeigneten Lagerflächen wird regional durch eingeschränktes Entgegenkommen der Gemeinden erschwert (ebd., S. 21).

In Schleswig-Holstein ist das Amt für ländliche Räume (ALR) für die Bergung und Entsorgung des Treibsels verantwortlich, während diese Aufgabe in Mecklenburg-Vorpommern von den Staatlichen Ämtern für Umwelt und Natur (StÄUN) sowie von Wasser- und Bodenverbänden erledigt wird (MEISGEIER, 2008, S. 35; LU, 2009, S. 75). In Dänemark sind die Gemeinden für die Treibselbergung verantwortlich und schreiben diese Tätigkeiten öffentlich aus (PROJEKT SAND, 2008f).

## Entsorgung und Verwertung

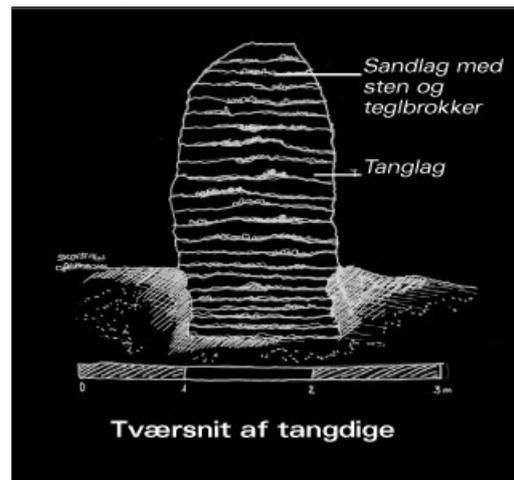
Im Rahmen des Interreg III A-Programms, einem Programm zur Förderung der Zusammenarbeit zwischen Regionen der Europäischen Union, wurde in der Fehmarn-Belt Region (Storstrøm [DK], Ost Holstein und Lübeck) das *Projekt Sand* ins Leben gerufen. In diesem Forschungsvorhaben wurde die umweltfreundliche und technische Aufnahme sowie die Möglichkeit einer Weiterverarbeitung von Tang und Algen im Hinblick auf den nachhaltigen Tourismus untersucht. Hierbei stand die Beseitigung des Pflanzenmaterials vom Strand im Vordergrund (PROJEKT SAND, 2008a).

In einzelnen Küstenabschnitten Dänemarks wird das Treibsel wie oben beschrieben eingesammelt und nach einer analytischen Bestimmung der Gehalte an Schadstoffen auf landwirtschaftliche Flächen in der näheren Umgebung ausgebracht. Die Flächenausbringung findet im Frühjahr und Herbst statt. In der übrigen Zeit wird das Treibsel in der Nähe des Strandes zwischengelagert (PROJEKT SAND, 2008e).

Um die Möglichkeiten der Treibselentsorgung zu untersuchen, wurde Ostseetreibsel ausgewählter Standorte in Dänemark, die möglichst repräsentativ für die gesamte Ostseeküste waren, im dänischen Kompostwerk FASAN in Næstved kompostiert. Hierfür wurden drei Ladungen Ostseetreibsel zu je 16 t Frischmasse mit jeweils etwa 44 t Siebresten aus der Grünabfallkompostierung vermischt. Die Kompostierung des Algen-Grünabfall-Gemisches dauerte ein Jahr, in dessen Verlauf der Zersetzungsprozess beobachtet wurde. Nach Abschluss des Versuchs wurde festgestellt, dass die Kompostierung des Ostseetreibsels bei geringem Arbeitsaufwand durchführbar ist. Die aufgehäuften Mengen mussten lediglich gewendet werden. Weitere Maßnahmen waren nicht erforderlich (PROJEKT SAND, 2008b).

Neben der Kompostierung wurden weitere Verwertungsansätze verfolgt. Beispielsweise wurde eine freigespülte Abfallgrube an der Küste des Boddens von Stege (Dänemark) mit Seetang und Steinen abgedeckt, was sich als geeignete Methode zur Befestigung des Küstenstreifens herausstellte (PROJEKT SAND, 2008c).

Ein ähnlicher Ansatz wurde mit der Verwendung des Ostseetreibsels als Baumaterial für die Restauration und den Neubau von so genannten Tangdeichen verfolgt. Solche Küstenschutzbauwerke sind an vielen Abschnitten der Ostseeküste Dänemarks zu finden und wurden im 18. Jhd. errichtet. Auf der dänischen Insel Møn werden nach diesem historischen Vorbild Tangdeiche erbaut oder wiederhergestellt (PROJEKT SAND, 2008d). Den schematischen Aufbau eines solchen Tangdeiches zeigt Abbildung 18.



**Abbildung 18: Schema eines Tangeiches im Querschnitt (Tværnsnit); unterteilt in Sandlage mit Steinen und Ziegelfragmenten sowie Tanglage (PROJEKT SAND, 2008d)**

Weitere experimentelle Verwendungen für das Ostseetreibsel sind:

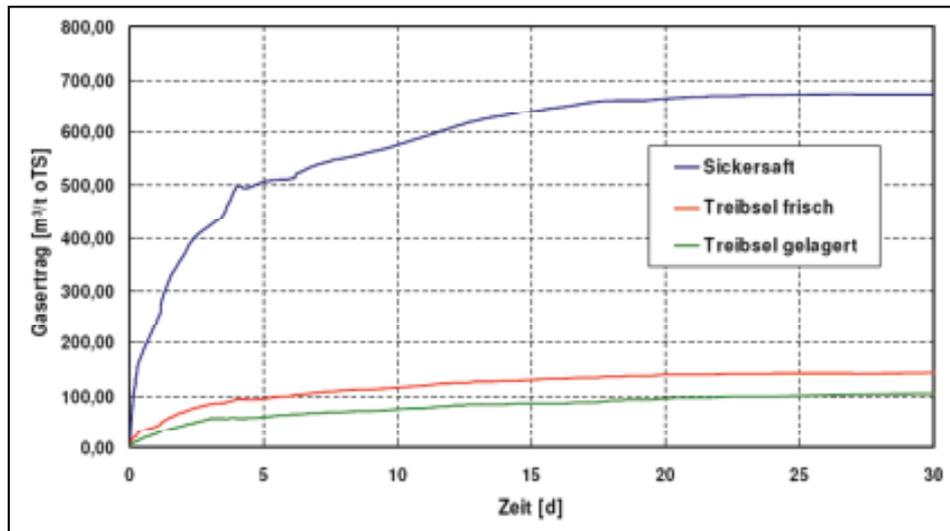
- Seegras als Filtermaterial zur Abwasserfiltration
- Treibselkompost als Substrat für diverse Pflanzen (z. B. Kürbis, Kartoffel, Hagebutte)
- Seegras als natürliches Dämmmaterial im Hausbau
- Seegras als Material zur Produktion von Geotextilien

Andere Verwertungsmöglichkeiten des Ostseetreibsel werden von ECKSTÄDT (2009) und von SCHNEIDER (2008) beschrieben. Hier steht die energetische Verwertung des Pflanzenmaterials im Vordergrund. So beschreibt ECKSTÄDT (2009, S. 26), dass Vergärungsversuche des Ostseetreibsel im Labormaßstab einen Methanertrag von 116 l<sub>N</sub>/kg oTS Treibsel ergaben. Weiter wird erwähnt, dass der Vergärungsprozess des Ostseetreibsel durch Salz- und Sedimentgehalte, die im Treibsel enthalten sein können, gehemmt werden kann (ECKSTÄDT, 2009, S. 27). Zusätzlich ist eine mögliche Schadstoffbelastung des Ostseetreibsel als problematisch anzusehen, da hierdurch eine Verwertung der Biomasse in Biogasanlagen nicht zulässig wäre (ebd., 2009, S. 27).

SCHNEIDER (2008, S. 18 ff) sagt aus, dass an der Küste Schleswig-Holsteins anlandendes Treibsel einen maximalen oTS-Gehalt von 10 % der Frischmasse aufweist. Durch die Vergärung dieses Materials ließen sich SCHNEIDER (2008, S. 19) zufolge 80 bis 200 l<sub>N</sub>/kg oTS mit einem Methangehalt von rund 50 % erzeugen. Bei einem Energiegehalt von 5 kWh/m<sup>3</sup> Biogas und der Verstromung in einem Blockheizkraftwerk mit einem Wirkungsgrad von  $\eta=33\%$  ergibt sich ein Energieertrag von 1,65 kWh/m<sup>3</sup> Biogas (ebd., S. 19). SCHNEIDER (2008, S. 19) rechnet mit einem Energieertrag von 13 bis 33 kWh/t Ostseetreibsel. Hieraus ergibt sich eine theoretische Grundvergütung des erzeugten Stroms nach dem Gesetz zum Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG), inkl. Technologie- und Kraft-Wärme-Kopplungsbonus, von 2 bis 5 €/t Ostseetreibsel (ebd., S. 19).

SCHNEIDER (2008, S. 22) erachtet eine ausschließliche energetische Nutzung des Ostseetreibsel aufgrund des geringen spezifischen Energieertrags als „wenig sinnvoll“. Sinnvoller erscheint die Erarbeitung eines Entsorgungskonzeptes, in dem die anaerobe Vergärung „als

Prozess zur Verminderung der biologischen Fracht des Treibsel und zur Verringerung der Entsorgungskosten betrachtet werden sollte“ (SCHNEIDER, 2008, S. 22). Ein solches Konzept kann die Lagerung des Treibsel in Tunneln zur Vermeidung von Auswaschungen durch Regenwasser und die Sammlung des Sickersaftes umfassen (ebd., S. 22). Das Treibsel und der Sickersaft können in einer Biogas-Kleinanlage vergoren werden (ebd., S. 22). Die Biogaserträge durch eine anaerobe Vergärung des Ostseetreibsel vor und nach der Lagerung in Tunneln sowie des Sickersaftes werden in Abbildung 20 dargestellt.



**Abbildung 20 : Gaserträge der anaeroben Vergärung von Ostseetreibsel vor und nach der Lagerung sowie der Vergärung der Sickersäfte (SCHNEIDER, 2008, S. 21)**

Nach ECKSTÄDT (2009, S. 28 ff) sollten auch andere energetische Verwertungsmöglichkeiten untersucht werden, wie z. B. die **Umsetzung des Materials zu Pyrolyseöl** durch die thermische Aufspaltung im Wirbelschichtverfahren unter Sauerstoffausschluss. Hierbei wird das Produkt Pyrolyseöl erzeugt, welches mit einem Heizwert von 15 bis 30 MJ/kg etwa die Hälfte des Heizwertes von konventionellem Heizöl erreicht (ebd., S. 28). Um aus dem Ostseetreibsel Pyrolyseöl gewinnen zu können, bedarf es der Entfernung der in der Biomasse enthaltenen Chloride sowie einer Trocknung des Materials (ebd., S. 28).

Eine weitere Möglichkeit, einen Brennstoff aus dem Ostseetreibsel zu gewinnen, stellt die **Vergasung der Biomasse im Gegenstrom-, Gleichstrom- oder Wirbelschichtvergaser** mit Luft, Sauerstoff oder Dampf dar. Die Technologie hierfür befindet sich jedoch noch in der Demonstrations- bzw. Markteintrittsphase (ebd., S. 29). Es ist bekannt, dass mit diesem Verfahren höhere Wirkungsgrade als bei der direkten Verbrennung vergleichbarer Biomasse erzielt werden können. Das zentrale Problem dieser Verfahren ist, dass es während der Pyrolyse zur Bildung von Teeren kommt, was eine Verunreinigung des Gases zur Folge hat. Um diesen Vorgang zu minimieren, ist vor der Vergasung eine umfangreiche Aufbereitung des eingesetzten Substrats notwendig (ebd., S. 29).

Als Alternativen zur Vergasung des Ostseetreibsel beschreibt ECKSTÄDT (2009, S. 31 ff) die Umsetzung der Biomasse zu einem flüssigen und einem festen Brennstoff durch zwei unterschiedliche Verfahren. Einerseits lässt sich Biomasse durch das **Hydrothermal Upgrading Verfahren** (HTU) verflüssigen. Hierbei wird aus der Biomasse unter einem Druck von 120

bis 180 bar und einer Temperatur von 120 bis 180 °C sogenanntes Biocrude, eine schwere organische Flüssigkeit, erzeugt (ebd., S. 31).

Andererseits kann aus der Biomasse durch **Hydrothermale Carbonisierung** (HTC) ein relativ fester Biobrennstoff hergestellt werden (ebd., S. 32). Neben der Verwendung als Energieträger besteht nach SCHLITT ET AL. (2009, S. 192) die Option die Pflanzenkohle zur Bodenverbesserung einzusetzen.

Eine weitere Möglichkeit der Energieerzeugung aus dem Ostseetreibsel stellt die **Verbrennung im Wirbelschichtverfahren** dar (ECKSTÄDT, 2009, S. 33). Hierbei wird der Brennstoff einem speziellen Feuerungskessel zugeführt, in dem das Ostseetreibsel bei Temperaturen zwischen 850 und 880 °C verbrannt wird. Eine solche Verwertung ist nur dann möglich, wenn die Schadstoffgrenzwerte des Abgases die Vorgaben der Verordnung über die Verbrennung von Abfällen (17. BImSchV) nicht überschreiten (ebd., S. 33; vgl. Kapitel 5.1.4.5).

### 5.2.2 Nordamerika

Aus den USA ist keine energetische Verwendung von Treibsel bekannt. In manchen Küstengebieten wird die Vegetation an den Ufern von Gewässern, seien es Seen oder das Meer, regelmäßig zurückgeschnitten. Mit Wasserpflanzen wird ebenso verfahren (AQUAMARINE, 2009, S. 3). Beides geschieht mit Spezialbooten, wie beispielsweise dem in Abbildung 19 dargestellten *Aquamarine Aquatic Harvester*.



**Abbildung 19: Rückschnitt des Uferbewuchses mit Spezialboot „Aquamarine Aquatic Harvester“ in den USA (AQUAMARINE, 2009, S. 3)**

In Baltimore, Maryland, an der Ostküste der USA, wird das Treibgut (englisch drift, debris) beispielsweise vom Debris Removal Team nach Sturmfluten beseitigt. Dieses Team ist dem U.S. Army Corps of Engineers unterstellt und sammelt das angelandete Treibsel im Hafen von Baltimore und Washington D.C. sowie an den Ufern der Flüsse Potomac River und Anacostia River ein. Das Treibgut besteht hier überwiegend aus Bauholz von der Hafempier und von Stürmen entwurzeltten Bäumen. Dieses Material sammelt das Debris Removal Team mit Spezialbooten ein (siehe Abbildung 20) und verlädt es in schwimmende Abfallcontainer, sog. Schuten. Das geborgene Treibgut wird anschließend auf Mülldeponien in der Region entsorgt (USACE, 2009, ohne Seitenangabe).



**Abbildung 20: Treibgutbergung mit Spezialboot in Baltimore, Maryland, USA (UMI, 2009)**

Im Gegensatz zur energetischen Verwertung von Treibgut begannen die U.S. Navy, die American Gas Association, das Gas Research Institute und das U.S. Department of Energy bereits 1968 zu erforschen, wie es technisch und wirtschaftlich möglich ist, synthetisches Erdgas (substitute natural gas) aus gezüchteter mariner Biomasse zu produzieren. Hierfür wurden verschiedene Braunalgen-Gattungen (*Laminaria*, *Macrocystis* und *Sargassum*) sowie Rotalgen (*Gracillaria*) in Kultur herangezogen und nach der Ernte anaerob zu Biogas vergoren (CHYNOWETH, 2002, S. 14). Die ermittelten spezifischen Methanerträge der einzelnen Algengattungen sind in Tabelle 18 dargestellt.

**Tabelle 18: Spezifische Methanerträge unterschiedlicher Algen-Gattungen (CHYNOWETH, 2002, S. 104)**

Algen-Gattung	Spezifischer Methanertrag in l <sub>N</sub> CH <sub>4</sub> /kg oTS	
	Minimum	Maximum
Laminaria	230	300
Macrocystis	140	400
Sargassum	60	190
Gracillaria	280	400

### 5.2.3 Südamerika

Für die Verwertung von Treibgut oder Treibsel in Südamerika werden an dieser Stelle die Erkenntnisse von EYRAS ET AL. (1998) als Grundlage herangezogen. In diesem Forschungsprojekt wurde untersucht, ob sich angespülte Reste verschiedener Rot-, Grün- und Braun-Algengattungen (u. a. *Ulva sp.*, *Codium spp.*, *Dictyota sp.*) von den Küsten Argentiniens stofflich verwerten lassen. Im Fokus der Untersuchung stand die Kompostierung des angespülten Algenmaterials, welches bis zum Beginn des Projekts lediglich im küstennahen Umland ohne weitere Behandlung deponiert wurde (EYRAS ET AL., 1998, S. 1). Zusätzlich wurde die Verwendung des Kompostes zur Bodenverbesserung, speziell hinsichtlich der Wasserspeicherkapazität, untersucht.

Für die Kompostierung wurde das gesammelte Algenmaterial mit Sägespänen aus Pappel (*Populus sp.*), Weide (*Salix sp.*) und Kiefer (*Pinus radiata*) in einem Verhältnis von 80 % TS

Algen zu 20 % TS Sägespänen vermischt. Die prozentuale Zusammensetzung der Sägespäne ist unbekannt. Die Kompostierung des Substratgemisches dauerte 10 Monate. Anschließend wurden Anbauversuche mit Tomatenpflanzen (*Lycopersicon esculentum var. platense*) in Substraten, bestehend aus gewaschenem Sand und Kompost bzw. lokalen Bodensubstraten unterschiedlicher Mischungsverhältnisse, durchgeführt.

Die Untersuchungen von EYRAS ET AL. (1998, S. 3 ff) ergaben, dass die Kompostierung des angespülten Algenmaterials technologisch problemlos durchführbar ist. Zudem eignet sich der Kompost zur Bodenverbesserung. Letzteres bezeichnen EYRAS ET AL. (1998, S. 8 f) als sehr wertvoll für Regionen mit nährstoffarmen Böden, da durch die Verwendung des Algenkomposts Nährstoffe eingetragen und die Wasserspeicherkapazität erhöht werden (ebd., S. 8 f).

#### 5.2.4 Frankreich

In Saint-Michel-en-Greve an der Côte d'Armor in der Bretagne (Frankreich) landen jährlich große Mengen Grünalgen an. An der gesamten Küstenlinie der Region Côte d'Armor landen vor allem im Sommer größere Mengen Algen (Meeressalat, *Ulva lactuca*) an. Die Algenbildung wird wesentlich durch das Ausbringen von Schweinegülle auf küstennahe Landwirtschaftsflächen beeinflusst. Hierdurch gelangen relativ große Nährstoffmengen, u. a. Phosphor und Stickstoff, über angrenzende Flüsse oder das Grundwasser in die betroffenen Meeresbuchten. Die relativ warmen Lufttemperaturen und die Sonneneinstrahlung im Sommer haben Einfluss auf die Algenbildung (RÉPUBLIQUE FRANÇAISE, 2010, S. 2). Im relativ flachen küstennahen Wasser entwickeln sich die Pflanzen und sterben dort ab. Die Faulgase der absterbenden Pflanzen (Schwefelwasserstoff, Methan und Kohlendioxid) stellen eine Gefahr für Strandbesucher dar. Einige Tiere sind aufgrund der austretenden Faulgase am Strand verendet. Eine praktikable Lösung für das Algenproblem wurde bisher nicht gefunden. Im Jahr 2009 wurden die Reste der Algen vom Strand und aus dem flachen Wasser gesammelt und deponiert, z. T. aber auch als Dünger auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht (NIKOLEI, 2009, ohne Seitenangabe).

Mit dem „Plan zur Bekämpfung der Grünalgen“ (Plan de lutte contre les algues vertes) hat die französische Regierung eine Grundlage zum Vorgehen gegen das als Plage bezeichnete Aufwachsen der Grünalgen an den betroffenen Küstenregionen Frankreichs erarbeitet. Der Plan soll versuchsweise in den Kommunen Saint Michel en Grève und d'Hillion umgesetzt werden und verfolgt die nachstehenden Ziele:

- Zeitraum 2010 bis 2011
  - Bergung und Entsorgung der Grünalgen
  - Optimierung der Sammeltechnik und der Kompostierung
  - Bau neuer Kompostplätze
  - Erhöhung der Arbeitssicherheit bei der Sammlung der Grünalgen
  - Maßnahmen zur Kontrolle und Verringerung des Stickstoffeintrags ins Grundwasser
  - Prüfung der ordnungsgemäßen Abwasserentsorgung von industriellen und landwirtschaftlichen Betrieben sowie von Privathaushalten

- Regelmäßige Kontrolle des Stickstoffgehaltes im Abwasser
- Gesetzliche Beschränkung der Feldausbringung von Schweinegülle
- Verbesserung der Abwasseraufbereitung
- Zeitraum bis 2015
  - Reduktion des Stickstoffeintrags in alle Gewässer um 30 bis 40 % im Untersuchungsgebiet (Saint Michel en Grève und d'Hillion) durch eine Kombination aus rechtlicher Kontrolle, Weiterentwicklung bzw. Installation von Biogasanlagen zur Produktion von Wirtschaftsdüngern mit verringertem Stickstoffgehalt

Die Umsetzung dieses Plans wird wissenschaftlich begleitet, um eine mögliche Übertragung der genannten Maßnahmen auf andere Regionen zu erarbeiten (RÉPUBLIQUE FRANÇAISE, 2010, S. 2 ff).

### 5.2.5 Niederlande

In den Niederlanden fallen im Jahresverlauf so geringe Mengen an Treibsel an, dass die Beseitigung von den Behörden nicht als bedeutungsvolles Problem eingestuft wird. Die entstandenen Mengen können ohne großen Aufwand von privaten Betrieben entsorgt werden, wodurch bisher keine Aktivitäten bzgl. einer alternativen Nutzung erfolgt sind. Die niederländischen Naturschutzverbände stehen der extensiven Nutzung des unter Naturschutz stehenden Vorlandes positiv gegenüber. Die Kosten für die allgemeine Deichunterhaltung werden in den Niederlanden von verschiedenen Institutionen getragen (AzT, 1996, S. 135).

### 5.2.6 Dänemark

An der dänischen Nordseeküste gibt es kein Treibselproblem. Der Anfall im Wattenmeerbereich ist so gering, dass es entweder im freien Land verrottet oder auf Kleindeponien kompostiert wird. Deichschutz hat landwärts der Deiche grundsätzlich Vorrang vor Naturschutz. Umgekehrt kann es bei Salzwiesen oder im Deichvorland sein. Kompostplätze wie in Deutschland sind nicht vorhanden (AzT, 1996, S. 142). Vergleiche hierzu auch Kapitel 5.2.1.

## 5.3 Ergebnisse der Umfrage von 2009

An der Umfrage haben nicht alle Deichverbände teilgenommen. In Tabelle 57 werden alle Deichverbände mit dem jeweiligen Datum der Zusendung des Fragebogens und dem jeweiligen Datum des Eingangs der Antwort aufgelistet.

Einzelne potenzielle Teilnehmer lehnten ein Mitwirken an der Umfrage bereits während der Telefonate ab. Die Vertreter von zwei Deichverbänden willigten telefonisch einer Teilnahme ein. Diesen wurde ein Fragebogen zugesendet, jedoch wurde dieser auch nach mehrmaliger telefonischer Erinnerung nicht zurückgeschickt. Die Anzahl der teilnehmenden Deichverbände verringerte sich daher von 22 potenziellen auf 15 tatsächliche Teilnehmer.

### 5.3.1 Aufkommen und Zusammensetzung

Das Treibselaufkommen wurde in den Zuständigkeitsbereichen der einzelnen Deichverbände bereits vom WASSERVERBANDSTAG (2009, pers. Mitteilung) ermittelt. Bestehende Lücken in diesen Daten sollten durch die Umfrage geschlossen werden. Dieses Ziel wurde teilweise

erreicht. Aus den Ergebnissen der Umfrage, in Verbindung mit den erhobenen Daten vom WASSERVERBANDSTAG (2009, pers. Mitteilung), resultieren die in der Tabelle 19 dargestellten Angaben zum Treibselaufkommen und der prozentualen Zusammensetzung der abgefragten Kategorien.

Zu den in der Tabelle 19 dargestellten Ergebnissen ist anzumerken, dass auch durch die im Rahmen des ersten Arbeitspakets dieses Forschungsprojekts durchgeführte Umfrage nicht alle Treibselmengen des Zeitraums 2004 bis 2008 ermittelt werden konnten. Diese Datenlücken sind auf nicht verwertbares bzw. nicht vorhandenes Datenmaterial seitens der Deichverbände zurückzuführen. Die weiterhin bestehenden Datenlücken zeigt Tabelle 20 auf.

**Tabelle 19: Umfrageergebnisse zu Aufkommen und Zusammensetzung von Treibsel**

Jahr	Aufkommen [m <sup>3</sup> ]	Zusammensetzung [%]			
		Holzige Bestandteile	Sonstige pflanzliche Bestandteile	Abfallstoffe/ Müll	Sonstiges
2004	88.030	4,34	88,78	6,80	0,08
2005	68.024	3,83	90,71	4,92	0,54
2006	75.048	4,51	91,44	3,97	0,08
2007	260.523	3,98	85,99	9,64	0,40
2008	290.029	3,44	86,25	9,91	0,40

**Tabelle 20: Deichverbände mit weiterhin bestehenden Datenlücken (verändert nach WASSERVERBANDSTAG 2009, pers. Mitteilung)**

Nr.	Deichverband	Treibselaufkommen [m <sup>3</sup> ] der Jahre				
		2004	2005	2006	2007	2008
3	Overledinger DA	k. A.	k. A.	k. A.	700	900
10	II. Oldenburgischer DB	k. A.	k. A.	k. A.	73.000	80.000
11	I. Oldenburgischer DB	k. A.	k. A.	k. A.	142	78
13	DVB Land Wursten	7.200	k. A.	k. A.	11.255	21.739
14	Cuxhavener DVB	k. A.	k. A.	k. A.	100	150
17	DVB Kehdingen Oste	k. A.	k. A.	k. A.	25.000	25.000
18	DVB d. I. Meile d. Alten Landes	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
19	DVB d. II. Meile d. Alten Landes	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
20	Harburger DVB	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
21	DWVB Vogtei Neuland	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.

Das Treibselaufkommen für den Zeitraum 2004 bis 2008 jedes einzelnen Deichverbandes wird in den Tabellen im Anhang dargestellt. Dort wird ebenfalls die prozentuale Zusammensetzung des Treibselns für jeden Deichverband aufgeführt, der an der Umfrage teilgenommen hat.

Um die Datenlücken des Treibselaufkommens für 2007 und 2008 zu schließen, werden im Folgenden theoretische Treibselvolumina für die nachstehenden Deichverbände errechnet:

- Deichverband der I. Meile des Alten Landes
- Deichverband der II. Meile des Alten Landes
- Harburger Deichverband
- Deich- und Wasserverband Vogtei Neuland

Für diese Berechnung werden die spezifischen Treibselentsorgungskosten des Artlenburger Deichverbandes aus dem Jahr 2008 berücksichtigt. Im Jahr 2008 fielen im Verbandsgebiet des Artlenburger Deichverbandes 600 m<sup>3</sup> Treibsel an, für deren Entsorgung 5.000 € bezahlt wurden. Daraus folgt, dass die Entsorgung eines Kubikmeters Treibsel 8,33 € kostete. Anhand der vom Wasserverbandstag. (2009, pers. Mitteilung) angegebenen Treibselentsorgungskosten des Deichverbands der II. Meile des Alten Landes für 2007 und 2008 wird auf die Treibselmenge zurückgerechnet. Im Jahr 2007 zahlte der Deichverband der II. Meile des Alten Landes 14.700 € für die Treibselentsorgung, im Jahr 2008 waren es 17.200 €. Hieraus lässt sich das Treibselaufkommen für den Deichverband der II. Meile des Alten Landes für das Jahr 2007 folgendermaßen errechnen:

**Formel 18: Berechnung des Treibselaufkommens 2007 im DVB d. II. Meile d. Alten Landes**

$$\frac{\text{Treibselentsorgungskosten DVB II. Meile d. Alten Landes 2007 in €}}{\text{Entsorgungskosten des Artlenburger DVB 2008 in €/m}^3} = \frac{17.200 \text{ €}}{8,33 \text{ €/m}^3} \approx 2.065 \text{ m}^3$$

Für 2008 ergibt sich folgende Treibselmenge für den Deichverband der II. Meile des Alten Landes:

**Formel 19: Berechnung des Treibselaufkommens 2008 im DVB d. II. Meile d. Alten Landes**

$$\frac{\text{Treibselentsorgungskosten DVB II. Meile d. Alten Landes 2008 in €}}{\text{Entsorgungskosten des Artlenburger DVB 2008 in €/m}^3} = \frac{14.700 \text{ €}}{8,33 \frac{\text{€}}{\text{m}^3}} \approx 1.765 \text{ m}^3$$

Da für die Deichverbände DVB der I. Meile der Alten Landes, Harburger DVB und DWVB Vogtei Neuland weder Daten zum Treibselaufkommen noch zur Treibselentsorgung vorhan-

den sind, werden für diese Deichverbände theoretische Werte zum Treibselaufkommen in den Jahren 2007 und 2008 generiert. Dies erfolgt anhand des errechneten Treibselaufkommens vom Deichverband der II. Meile des Alten Landes und der jeweiligen Deichstrecken (Haupt- und Schutzdeiche, siehe Tabellen im Anhang) der anderen, oben genannten, Deichverbände. Diese Berechnung gestaltet sich folgendermaßen:

Die Strecke der Haupt- und Schutzdeiche des Deichverbandes der II. Meile des Alten Landes beträgt 10,8 km. Aus dem Verhältnis der Deichstrecken der anderen, oben genannten Deichverbände ergeben sich die im Folgenden angegebenen Berechnungsfaktoren:

**Formel 20: Berechnung DVB d. I. Meile d. Alten Landes**

- Deichstrecke: 11,2 km
- Berechnungsfaktor:  $\frac{11,2 \text{ km}}{10,8 \text{ km}} = 1,037$
- Treibselaufkommen 2007:  $2.065 \text{ m}^3 * 1,037 = 2.141,405 \text{ m}^3 \cong 2.140 \text{ m}^3$
- Treibselaufkommen 2008:  $1.765 \text{ m}^3 * 1,037 = 1.830,305 \text{ m}^3 \cong 1.830 \text{ m}^3$

**Formel 21: Berechnung Harburger DVB**

- Deichstrecke: 6,2 km
- Berechnungsfaktor:  $\frac{6,2 \text{ km}}{10,8 \text{ km}} = 0,574$
- Treibselaufkommen 2007:  $2.065 \text{ m}^3 * 0,574 = 1.185,31 \text{ m}^3 \cong 1.185 \text{ m}^3$
- Treibselaufkommen 2008:  $1.765 \text{ m}^3 * 0,574 = 1.013,11 \text{ m}^3 \cong 1.010 \text{ m}^3$

**Formel 22: Berechnung DWVB Vogtei Neuland**

- Deichstrecke: 7 km
- Berechnungsfaktor:  $\frac{7 \text{ km}}{10,8 \text{ km}} = 0,625$
- Treibselaufkommen 2007:  $2.065 \text{ m}^3 * 0,625 = 1.290,625 \text{ m}^3 \cong 1.290 \text{ m}^3$
- Treibselaufkommen 2008:  $1.765 \text{ m}^3 * 0,625 = 1.103,125 \text{ m}^3 \cong 1.100 \text{ m}^3$

Der Artlenburger Deichverband wird hier für die Berechnung der Treibselmengen herangezogen, da dieser Deichverband, wie die oben aufgeführten Verbände, an der Elbe liegt. Eine Berechnung der Treibselmengen durch die Angaben anderer Deichverbände, z. B. anhand der Entsorgungskosten des Deichverbandes Kehdingen-Oste, wird hier nicht durchgeführt, da dessen Verbandsgebiet teilweise in nördlicher Ausrichtung an die Elbmündung angrenzt und ein unbekannter Anteil des angefallenen Treibsel durch Verbrennung entsorgt wird (Wasserverbandstag, 2009, pers. Mitteilung).

Einen Unsicherheitsfaktor bei der vorgenommenen Abschätzung stellt die nicht bekannte Entsorgungsmethode des Treibsel bei den oben aufgeführten Deichverbänden dar. Aufgrund der gänzlich fehlenden Daten der Entsorgungskosten und des Aufkommens von Treibsel aller an der Elbe gelegenen Deichverbände bis zum Jahr 2007, ist eine ähnliche Interpolation für den Zeitraum 2004 bis 2006 nicht möglich.

Verwertbare Daten zum Treibselaufkommen in Niedersachsen sind folglich nur für die Jahre 2007 und 2008 vorhanden. Die durch die Umfrage ermittelten, sowie die abgeschätzten

Treibselmengen der Jahre 2007 und 2008 sind in Tabelle 21 dargestellt. Alle erfassten und berechneten Daten der einzelnen Deichverbände zum Aufkommen von Treibsel und dessen Zusammensetzung enthalten die Tabellen im Anhang.

**Tabelle 21: Treibselaufkommen 2007 und 2008 inklusive der geschätzten Treibselmengen**

Jahr	Treibselaufkommen [m <sup>3</sup> ]
2007	260.523
2008	290.029

Einen Überblick des Treibselaufkommens der einzelnen Deichverbände in den Jahren 2004 bis 2011 geben Karten der Abbildung 93 bis Abbildung 100: **Treibselaufkommen** des Jahres 2011 im Anhang. In diesen Karten ist das Fehlen belastbarer Daten zum Treibselaufkommen bis einschließlich 2006 deutlich erkennbar.

### 5.3.2 Erfassung des Treibselaufkommens 2009 bis 2011

Die Erfassung des Treibselaufkommens der Jahre 2009, 2010 und 2011 erfolgte per Telefon und E-Mail. Die Befragten gaben die Daten zum angelandeten Treibsel, wie schon in der Umfrage des ersten Arbeitspakets dieses Forschungsprojektes, in Volumen an. Die angegebene Einheit ist m<sup>3</sup>. Die Ergebnisse ebenfalls sind in den Karten (Abbildung 93 bis Abbildung 100 im Anhang) aufgeführt.

**Tabelle 22: Treibselaufkommen der einzelnen Deichverbände in 2010 und 2011**

Nr.	Deichverband	Treibselaufkommen in [m <sup>3</sup> /a]		
		Jahr 2009	Jahr 2010	Jahr 2011
1	Rheider DA	k. A.	k. A.	k. A.
2	DVB Heede-Aschendorf-Papenburg	0	1.400	375
3	Overledinger DA	k. A.	k. A.	k. A.
4	Leda-Jümme-Verband	345	200	200
5	Moormerländer DA	2.500	4.500	k. A.
6	DA Krummhörn	k. A.	k. A.	k. A.
7	DA Norden	500	500	k. A.
8	DA Esens-Harlingerland	104	75	100
9	III. Oldenburgischer DB	0	0	0
10	II. Oldenburgischer DB	9.000	7.500	k. A.
11	I. Oldenburgischer DB	k. A.	k. A.	k. A.
12	DVB Osterstader Marsch	0	3.523	6.000
13	DVB Land Wursten	8.755	2.085	2.810
14	Cuxhavener DVB	k. A.	k. A.	k. A.
15	Hadelner DUVB	300	400	k. A.
16	Ostedeichverband	k. A.	k. A.	k. A.
17	DVB Kehdingen Oste	8.000	2.000	0
18	DVB I. Meile d. Alten Landes	k. A.	k. A.	k. A.
19	DVB I. Meile d. Alten Landes	k. A.	k. A.	k. A.
20	Harburger DVB	k. A.	k. A.	k. A.
21	DWVB Vogtei Neuland	k. A.	k. A.	k. A.
22	Artlenburger DVB	k. A.	k. A.	k. A.
<b>Summe</b>		<b>29.504</b>	<b>22.183</b>	<b>9.485</b>

k. A.: keine Angabe

Aus der Tabelle 22 wird ersichtlich, dass rund die Hälfte der niedersächsischen Deichverbände keine Angaben zum Treibselaufkommen für den Zeitraum von 2009 bis 2011 gemacht haben bzw. machen konnten.

Das ermittelte Treibselaufkommen in den Zuständigkeitsbereichen der niedersächsischen Deichverbände belief sich im Jahr 2009 auf 29.504 m<sup>3</sup>. Bei der Rheider DA, dem II. Oldenburgischen DB und dem DVB Osterstader Marsch wurde kein Treibselaufkommen festgestellt. Der DVB Heede-Aschendorf-Papenburg, die DA Norden, DA Esens-Harlingerland und der Hadelner DUVB verzeichneten ein Treibselaufkommen unterhalb von 500 m<sup>3</sup>. An den Deichen der Moormerländer DA wurden im Jahr 2009 insgesamt 2.500 m<sup>3</sup> Treibsel angespült. Mit 8.000 m<sup>3</sup> beim DVB Kehdingen Oste, 8.755 m<sup>3</sup> beim DVB Land Wursten und 9.000 m<sup>3</sup> II. Oldenburgischer DB wurden die größten Treibselmengen im Jahr 2009 verzeichnet.

Die Angaben zum Treibselaufkommen im Jahr 2010 liegen zwischen 75 m<sup>3</sup> im Zuständigkeitsbereich der DA Esens-Harlingerland und 7.500 m<sup>3</sup> beim II. Oldenburgischen DB. Insgesamt konnte für das Jahr 2010 ein Treibselaufkommen von 22.183 m<sup>3</sup> an der niedersächsischen Nordseeküste und den Ästuarien ermittelt werden.

Im Jahr 2011 lag die Gesamtmenge des im Untersuchungsgebiet angelandeten Treibsel bei 9.485 m<sup>3</sup>. In jenem Zeitraum wurde für den Zuständigkeitsbereich des DVB Osterstader Marsch mit 6.000 m<sup>3</sup> die größte Menge angelandeten Treibsel angegeben. Für das Verbandsgebiet der DA Esens-Harlingerland wurde mit 100 m<sup>3</sup> der geringste Wert für angelandetes Treibsel übermittelt. Demgegenüber steht das Ausbleiben von Treibsel beim DVB Kehdingen Oste und dem III. Oldenburgischen DB.

### 5.3.3 Jahreszeitliche Verteilung des Treibselaufkommens

Die Verteilung des Treibselaufkommens gestaltet sich im Untersuchungsgebiet sehr unterschiedlich. Durch das Umfrageergebnis bezüglich der jahreszeitlichen Verteilung des Treibselaufkommens wird ersichtlich, dass das größte Aufkommen von Treibsel im Winter zu verzeichnen ist. Im Sommer wird kein Treibselaufkommen von den Befragten angegeben. Die prozentuale Verteilung des Aufkommens im Jahresverlauf, errechnet aus den Angaben der Befragten, ist der Abbildung 21 zu entnehmen.

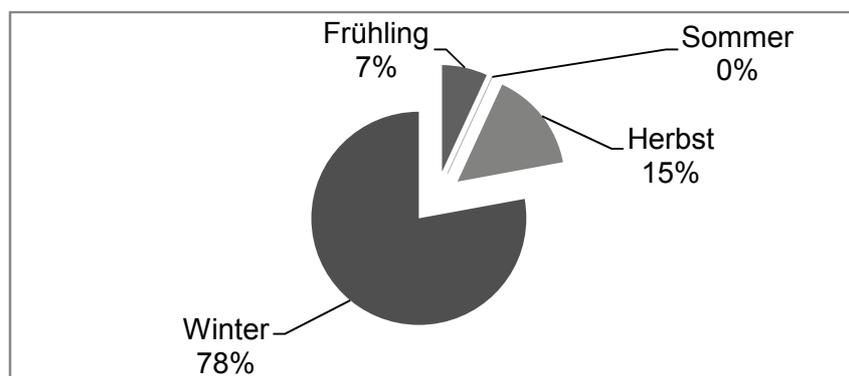


Abbildung 21: Prozentuale Verteilung des Treibselaufkommens im Jahresverlauf

Zusätzlich zur prozentualen Verteilung des Treibselaufkommens im Jahresverlauf konnten die Befragten hierzu Bemerkungen auf dem Fragebogen notieren. Von den 15 Umfrageteilnehmern fügten acht Teilnehmer Bemerkungen an.

Aus diesen Bemerkungen geht hervor, dass das Treibselaufkommen

- vorwiegend aufgrund von Sturmfluten verzeichnet wird und
- die Sturmfluten meistens zwischen November und April auftreten.

Aus diesen Aussagen ist zu folgern, dass das Aufkommen von Treibsel diskontinuierlich stattfindet. Um dieses Material für eine energetische Verwertung ganzjährig nutzen zu können, ist folglich eine Lagerung nötig.

Die Ermittlung der angelandeten Treibselmengen geschieht bei allen Deichverbänden, die an der Umfrage teilgenommen haben, gleichermaßen. Alle Teilnehmer gaben für ihren Deichverband an, dass ausschließlich das Volumen des Treibsel ermittelt wird. Hierfür nennen die Teilnehmer der Umfrage folgende Methoden:

- Die Treibselmengen werden bei der Abfuhr durch das Zählen der beladenen LKW ermittelt. Das Ladevolumen der LKW ist bekannt.
- Die am Deich liegenden Treibselmengen werden vermessen (Höhe, Breite, Länge), woraus das Volumen des angelandeten Treibsel errechnet wird.
- Die nach der Bergung entstandenen Treibselhaufwerke werden vermessen (Höhe, Breite, Länge), woraus ebenfalls das Volumen bestimmt wird.

#### 5.3.4 Schüttraumdichte

Um genauere Angaben zum Treibselaufkommen zu erfahren und die Treibselmassen in Tonnen angeben zu können, wurden die Teilnehmer der Umfrage um die Angabe der mittleren Schüttraumdichte gebeten. Sofern bei den Deichverbänden keine derartigen Messwerte vorlagen, sollten diese Werte geschätzt werden.

Die angegebenen Schüttraumdichten der einzelnen Verbände weichen deutlich voneinander ab. Die niedrigste mittlere Schüttraumdichte wurde von der Deichacht Krummhörn mit 0,02 bis 0,05 t/m<sup>3</sup> angegeben. Den höchsten Wert gibt der Artlenburger Deichverband mit durchschnittlich 1,6 t/m<sup>3</sup> an. Angegebene Werte der mittleren Schüttraumdichte über 1 t/m<sup>3</sup> werden als unrealistisch angesehen, da ein solch hoher Wert über der Dichte von Wasser liegt. Einige Teilnehmer der Umfrage konnten keine mittlere Schüttraumdichte angeben. Ein einheitlicher Wert konnte nicht festgestellt werden. Der Mittelwert aller angegebenen und realistischen Schüttraumdichten liegt bei rund 0,5 t/m<sup>3</sup>.

Die ermittelten Angaben zu mittleren Schüttraumdichten, Aufkommen und Zusammensetzung des Treibsel aller Deichverbände, die an der Umfrage teilgenommen haben, sind den Tabellen 51 und 52 im Anhang zu entnehmen. Zusätzlich ist eine Tabelle 53 im Anhang hinterlegt, in welcher ein durchschnittliches Treibselaufkommen pro Deichkilometer für jeden Deichverband im Zeitraum 2004 bis 2008 angegeben ist, sofern die dazu benötigten Daten vorlagen oder herausgefunden werden konnten. Die Werte des Treibselaufkommens pro

Deichkilometer im Jahr 2008 liegen zwischen 2.469 m<sup>3</sup>/km (Deichverband Osterstader Marsch) und 1 m<sup>3</sup>/km (I. Oldenburgischer Deichband). Das durchschnittliche Treibselauflommen pro Deichkilometer Niedersächsische Nordseeküste lag im Jahr 2008 bei ca. 360 m<sup>3</sup>/km.

### 5.3.5 Bergung und Transport

Bei den folgenden Deichverbänden werden die Bergung und die Abfuhr des Treibsel von Unternehmen oder von anderen Vertragspartnern ausgeführt:

- Rheider Deichacht
- Moormerländer Deichacht
- Deichacht Krummhörn
- Deichacht Norden
- III. Oldenburgischer Deichband
- Deichverband Osterstader Marsch
- Ostedeichverband

Die Aufträge zur Treibselbergung und -abfuhr werden öffentlich ausgeschrieben, bevor sie an Firmen vergeben werden. Die Beauftragung von externen Unternehmen zur Bergung und zur Abfuhr des Treibsel erfolgt bei fast allen befragten Deichverbänden, die diese Aufgaben nicht selbstständig ausführen, kurzfristig nachdem festgestellt wurde, dass die Deiche ausreichend getrocknet und somit befahrbar sind.

Zur Bergung des Treibsel werden bei allen Deichverbänden, die an der Umfrage teilgenommen haben, ausschließlich konventionelle Geräte aus der Landwirtschaft oder dem Baugewerbe eingesetzt. Teilweise wurden die eingesetzten Geräte mit speziellen Anbauten zur Bergung von Treibsel modifiziert. Ein Beispiel für ein modifiziertes Bergegerät ist in Abbildung 22 dargestellt. Die eingesetzten Bergegeräte sind:

- Schlepper mit Frontlader oder speziellem Heckanbau
- Bagger
- Radlader
- Feldhäcksler mit speziellem Aufnahmegerät

Bei allen befragten Deichverbänden werden, vor der maschinellen Bergung des Treibsel, möglichst alle Störstoffanteile, per Hand aussortiert. Eine Bergung, die ausschließlich per Hand durchgeführt wird, wurde von keinem Teilnehmer der Umfrage angegeben. Die Abfuhr des Treibsel erfolgt bei allen, an der Umfrage beteiligten Deichverbänden, mit LKW und/oder mit Traktoren und Anhängern. Mit diesen Transportgeräten wird das Treibsel auf Strecken von mindestens 100 m (Deichacht Esens – Harlingerland) bis maximal 30 km (Deichacht Norden und I. Oldenburgischer Deichband) zum Entsorgungs- bzw. Verwertungsort transportiert. Detaillierte Informationen über die Praxis zur Bergung und zur Abfuhr des Treibsel der einzelnen Deichverbände sind den Tabellen 54 bis 56 im Anhang zu entnehmen.



**Abbildung 22: Schlepper mit Spezialanbau bei der Treibselbergung  
(CORNELIUS & WILKEN, 2009, pers. Mitteilung)**

### 5.3.6 Verwertung

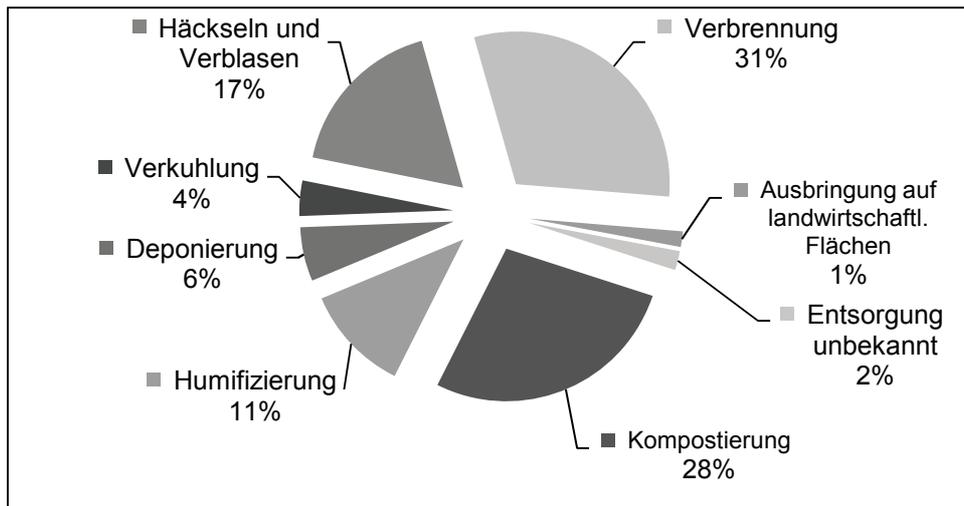
Um die derzeit angewendeten Methoden der Verwertung bzw. der Entsorgung von Treibsel beim jeweiligen Deichverband in Erfahrung zu bringen, war von den Vertretern der Deichverbände im Fragebogen anzugeben, in welchen prozentualen Anteilen das Treibsel den jeweiligen Entsorgungsmethoden nach WASSERVERBANDSTAG (2009, pers. Mitteilung) zugeführt wird. Die vom WASSERVERBANDSTAG (2009, pers. Mitteilung) angegebenen Entsorgungsmethoden sind die Folgenden:

- Kompostierung
- Humifizierung
- Deponierung
- Verkuhlung (Vergraben)
- Häckseln und Verblasen
- Verbrennung

Um Veränderungen bei den Deichverbänden bezüglich der Treibselentsorgung feststellen zu können, war es den Bearbeitern der Fragebögen möglich, neben der Angabe der prozentualen Verteilung des Treibsel auf die angegebenen Entsorgungsmethoden, eine weitere Entsorgungsmethode zu nennen. Zusätzlich war hierfür ebenfalls der prozentuale Anteil der Treibselmenge, der auf diese Methode entfiel anzugeben.

Die Ergebnisse der Umfrage sind, ergänzt durch die Angaben des WASSERVERBANDSTAGS E. V. (2009, pers. Mitteilung), in Abbildung 23 dargestellt.

Aus Abbildung 23 wird ersichtlich, dass eine weitere Entsorgungsmethode für das Treibsel ermittelt und somit eine Datenlücke geschlossen werden konnte. Demnach wird 1 % des gesamten Treibselaufkommens zur Entsorgung auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht, wo es - wie bei einer offenen Kompostierung - von aeroben Mikroorganismen zersetzt wird.



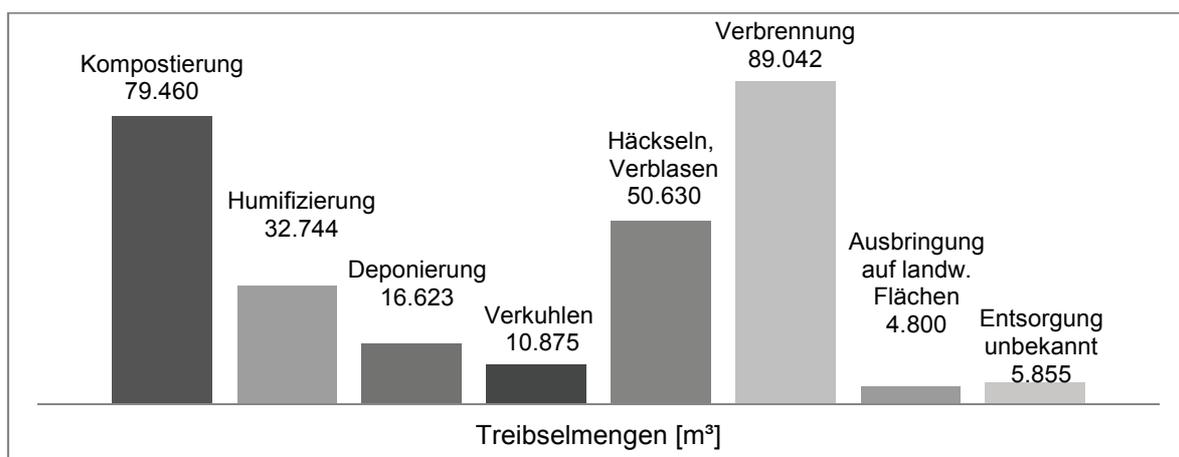
**Abbildung 23: Methoden zur Treibselentsorgung 2008 (%)**

Für die nachstehenden Deichverbände lagen keine Informationen zur angewendeten Entsorgungsmethode vor:

- Cuxhavener Deichverband
- Harburger Deichverband
- Deich- und Wasserverband Vogtei Neuland
- Deichverband der I. Meile des Alten Landes
- Deichverband der II. Meile des Alten Landes

Das Treibselaufkommen dieser Deichverbände (ca. 2 % der gesamten Treibselmenge Niedersachsens 2008) wird hinsichtlich der Entsorgungsmethode in Abbildung 23 und Abbildung 24 unter „Entsorgung unbekannt“ zusammengefasst.

Auf Grundlage der Umfrage ist in Abbildung 24 die Verteilung der Treibselmengen auf die angewendete Entsorgungsmethode für das Jahr 2008 dargestellt.



**Abbildung 24: Methoden der Treibselentsorgung 2008 (m³)**

Die Entsorgungskosten des Treibselns konnten nur bedingt in Erfahrung gebracht werden. Diese Daten wurden vom WASSERVERBANDSTAG (2009, pers. Mitteilung) erhoben. Den Daten

ist zu entnehmen, welche Kosten bei den einzelnen Deichverbänden für die Entsorgung in den einzelnen Jahren angefallen sind. Die Entsorgungskosten der folgenden Deichverbände konnten nur teilweise oder gar nicht hergeleitet werden:

- Overledinger Deichacht
- II. Oldenburgischer Deichband
- Deichverband Cuxhaven
- Ostedeichverband
- Harburger Deichverband
- Deich- und Wasserverband Vogtei Neuland
- Deichverband der I. Meile des Alten Landes
- Deichverband der II. Meile des Alten Landes
- Deichverband Kehdingen – Oste

Anhand der bestehenden und errechneten Kostenstellen der einzelnen Deichverbände erfolgt die Auflistung der Entsorgungskosten für das Treibsel in Tabelle 23. Da, wie oben angegeben, nicht für alle Deichverbände die angefallenen Entsorgungskosten erhoben oder errechnet werden konnten, handelt es sich bei den aufgelisteten Kosten um Mindestangaben. Die Angabe der Entsorgungskosten des III. Oldenburgischen Deichbandes wurde von 1.150.000 € im Jahr 2008 (WASSERVERBANDSTAG, 2009, pers. Mitteilung) auf 150.000 € korrigiert (BARTELS, 2009, pers. Mitteilung).

**Tabelle 23: Kosten der Entsorgung des Treibsel für den Zeitraum 2004 bis 2008 (verändert nach WASSERVERBANDSTAG, 2009, pers. Mitteilung)**

Jahr	Treibselaufkommen [m <sup>3</sup> ]	Entsorgungskosten [€]
2004	88.930	376.112,74
2005	68.024	338.623,33
2006	75.048	358.761,73
2007	260.523	982.747,64
2008	290.029	1.292.202,71

#### Energetische Verwertung

Die folgenden Deichverbände gaben an, dass das Treibsel aus ihrem Verbandsgebiet in der Gegenwart oder Zukunft einer energetischen Verwertung zugeführt wird:

- Deichverband Heede – Aschendorf – Papenburg
- II. Oldenburgischer Deichband
- Deichverband Osterstader Marsch
- Artlenburger Deichverband

Das beim Deichverband Heede – Aschendorf – Papenburg aus dem Treibsel aussortierte Holz wird dem Biomasseheizkraftwerk Papenburg als Brennstoff zugeführt (NIEHAUS, 2009, pers. Mitteilung). Dies waren im Jahr 2008 18 m<sup>3</sup> (ebd., pers. Mitteilung).

Das Treibsel des II. Oldenburgischen Deichbandes und des Deichverbandes Osterstader Marsch kam für die Versorgung des Gewerbegebiets Luneplate (Bremerhaven) als Co-Brennstoff einer Altholzverwertung in einem Biomasseheizkraftwerk in Betracht. Aus wirtschaftlichen Gründen wurde jedoch vom Treibsel als Brennstoff in diesem Biomasseheizkraftwerk Abstand genommen (GABRIEL & JAHN, 2008, S. 36 f; CORNELIUS & WILKEN, 2009, pers. Mitteilung). Beim Deichverband Osterstader Marsch wurde die Treibselverwertung zur Energieerzeugung Anfang dieses Jahres ausgeschrieben. Der Zuschlag wird vermutlich in Kürze dem Unternehmen Hanseatische Umwelt GmbH erteilt (STRÖER, 2009, pers. Mitteilung).

Für den Artlenburger Deichverband wurde im beantworteten Fragebogen angegeben, dass das Treibsel als Brennstoff zur Strom- und Wärmezeugung eingesetzt wurde bzw. wird. Genauere Informationen hierzu konnten nicht in Erfahrung gebracht werden.

#### 5.4 Charakterisierung des Treibsel

Im Folgenden wird das Treibsel als Material beschrieben und grundlegend charakterisiert. Dies erfolgt als Situationsbeschreibung zum jeweiligen Zeitpunkt der Probenahme. Zunächst werden die Standorte herangezogen, die sich an den Flussmündungen befinden, und daraufhin jene, die am offenen Meer liegen. Abbildungen des Treibsel der jeweils beschriebenen Standorte folgen der Beschreibung des Materials.

Im **Deichverband Osterstader Marsch** kann augenscheinlich von einem hohen Reetanteil ausgegangen werden. Der Aufwuchs steht während beider Probenahmekampagnen teilweise noch im Deichvorland. Darüber hinaus kam die Tide in diesem Deichabschnitt in den letzten beiden Jahren nicht so hoch, dass sich Material auf dem Deich oder dem Deichfuß findet. Folglich ist der Treibselanfall in den Jahren 2010 und 2011 relativ gering. Im Jahr 2010 wird ein relativ großer Teil des Treibsel aus dem Graben vor dem Deich geborgen und auf der Berme abgelegt. Z. T. liegt das Treibsel auf der befestigten Betonstraße, dem Treibselräumweg, vor dem Deich.



**Abbildung 25: Treibsel des DVB Osterstader Marsch aus 2010 (links); Treibsel des DVB Osterstader Marsch 2011 (rechts)**

Im Jahr 2011 ist das Treibselaufkommen mengenmäßig etwa halb so hoch wie im Vorjahr (SCHÜBEL, 2011, pers. Mitt.). Zum Zeitpunkt der Probenahme ist das Material bereits zum verbandseigenen Humifizierungsplatz transportiert worden. Hier wird die Probe genommen.

Im **Deichverband Land Wursten** ist das Treibsel zum Zeitpunkt der ersten Probenahmekampagne (2010) bereits zu Haufen zusammen geschoben. Die Sturmfluten der vorausgegangenen Saison haben das Treibsel nicht bis auf den Deichfuß transportiert. Das Material hat einen gemischten Charakter. Es besteht zu einem großen Teil aus reet- und schilfartigen Pflanzenteilen. Ein nicht unerheblicher Anteil war jedoch auch krautiger und grasartiger Herkunft. Die Störstoffe werden hier nicht isoliert. Die Holzfraktion ist hier augenscheinlich die größere Fraktion der Störstoffe, es finden sich z. T. meterlange Holzplanken in den Akkumulationen sowie auch zwischen den Haufen.

Im Vorfeld der zweiten Probenahmekampagne des Jahres 2011 wird für die Untersuchung der Biostabilität (4.5.10) eine weitere Treibselprobe im Zuständigkeitsbereich des DVB Land Wursten genommen. Das Material unterscheidet sich nur unwesentlich von dem Treibsel, das im Zuge der Probenahmekampagne 2011 im Zuständigkeitsbereich des DVB Land Wursten eingesammelt wird.



**Abbildung 26: Treibselfrischmasse der gesonderten Probenahme vom 16.02.2011**

Als zusätzliche Probe für die Untersuchung der Biostabilität wird sog. humifiziertes Treibsel aus dem Zuständigkeitsbereich des DVB Land Wursten genommen. An der HAWK Göttingen wird diese Probe zur weitergehenden Lagerung in einen Komposter gegeben. Da im Laufe der weiteren Kompostierung keine Temperaturerhöhung mehr zu verzeichnen ist, wird davon ausgegangen, dass es sich hierbei um Fertigkompost handelt. Das kompostierte Treibsel unterscheidet sich von der Frischmasse durch eine dunklere Braunfärbung. Die Struktur ist im Wesentlichen die gleiche wie bei der Frischmasse. Die Abbildung 27 zeigt das kompostierte Treibsel in der Haufenmiete (Abbildung 27, links) und eine Nahaufnahme der Materialstruktur (Abbildung 27, rechts).

Zum Zeitpunkt der zweiten Probenahmekampagne (2011) liegt das angelandete Treibsel noch so vor dem Deich, wie von den Sturmfluten angeschwemmt. Die Proben werden direkt aus dem Spülsaum entnommen. Im Gegensatz zur Situation im Jahr 2010 sind Störstoffe überwiegend in Form von Zivilisationsmüll im Treibsel feststellbar. Ansonsten ist die Zusammensetzung der vom Vorjahr sehr ähnlich.

Das Treibsel des **Deichverbandes Kehdingen Oste** ist von ähnlichem Charakter, wie es in der Osterstader Marsch zu finden ist. Der Reetanteil ist am höchsten. Es finden sich jedoch auch krautartige Bestandteile im Substrat. Auch in diesem DVB kam das Wasser zwischen

Herbst 2009 und Frühjahr 2010 nicht sehr hoch. Das Treibsel landete jedoch höher an, als sich die im Deich befestigte Fläche erstreckt. Das Treibsel konnte aber ohne Schwierigkeiten und die Grasnarbe zu beschädigen mit einem Bagger auf den befestigten Deichfuß gezogen werden, wo es in einem Schwad gelegt wurde. Der Zivilisationsmüll wurde in diesem Deichabschnitt nicht abgesammelt. Nach Einschätzung des DVB-Vorstehers wurde zwar viel Material vom Wind über den Deich geblasen, trotzdem befinden sich Störstoffe zwischen den Treibselmengen. Diese setzen sich aus Holz und Zivilisationsmüll, wie bspw. Kunststoffen, zusammen.



**Abbildung 27: kompostiertes Treibselmaterial in einer Haufenmiete (links), kompostiertes Treibsel (rechts)**



**Abbildung 28: Treibsel des Deichverbandes Land Wursten von 2010 (links); Treibsel aus 2011 (rechts)**

Da im Zuständigkeitsbereich des Deichverbandes Kehdingen Oste zwischen Herbst 2010 und Frühjahr 2011 nur sehr wenig bis gar kein Treibsel an die Deiche geschwemmt wird (FRERICHS, 2011, pers. Mitt.), findet hier im Jahr 2011 keine Probenahme statt. In diesem Fall wird ein anderer Probenahmestandort ausgewählt. Allerdings kann keine Beprobung an der Elbmündung stattfinden. Somit wird der Deichverband Heede-Aschendorf-Papenburg an der Ems in die Untersuchungen integriert.

Im Zuständigkeitsbereich des **Deichverbandes Heede-Aschendorf-Papenburg** werden im Zeitraum zwischen Herbst 2010 und Frühjahr 2011 rund 1.400 m<sup>3</sup> Treibsel angeschwemmt.

Auch in dieser Treibselprobe besteht der überwiegende Anteil aus Reet und krautigen Pflanzen.



**Abbildung 29: Treibsel des Deichverbandes Heede-Aschendorf-Papenburg von 2011**

An diesem Standort werden vor der Probenahme Störstoffe wie größere Holzteile und Zivilisationsabfälle händisch aus dem Material aussortiert (DARON, 2011, pers. Mitt.). Das Material wird vor der Probenahme bereits in einen Schwad gelegt, damit es zur Entsorgung mit einem umgerüsteten Feldhäcksler gehäckselt und in das Deichvorland verblasen werden kann.

Die **Moormerländer Deichacht** wird im Zeitraum der Untersuchungen (Herbst 2009 bis Frühjahr 2011) ebenso wie die bisher beschriebenen Teile der Küste, abgesehen von erhöhten Wasserständen, von Sturmfluten verschont. In diesem Zeitraum werden ebenfalls nur verhältnismäßig geringe Treibselmengen angespült (WILKEN, 2011, pers. Mitt.). Das angelandete Treibsel liegt zu beiden Zeitpunkten der Probenahmen noch unberührt vor dem Deich an der Berme eines Grabens, der das Deichvorland vom Deich samt vorgelagertem Treibselräumweg räumlich trennt. Vom Charakter des Materials her, verhält es sich wie in den übrigen Gebieten, die nahe den Flussmündungen liegen. Die Fraktion schilfartiger Biomasse überwiegt. Es findet sich jedoch ein nicht unerheblicher Anteil an feinerer Substanz im Teek. Bis zum Zeitpunkt beider Probenahmen sind keine Störstoffe ausgelesen worden.



**Abbildung 30: Treibsel der Moormerländer Deichacht 2010 (links); aus 2011 (rechts)**

Das Treibsel aus dem östlichen Jadebusen im Bereich des **II. Oldenburgischen Deichbandes** unterscheidet sich von seiner Struktur und Herkunft von den bisher betrachteten erheblich. Es besteht überwiegend aus krautigen, grasähnlichen Materialien.

Im Jahr 2010 lagert es in Haufwerken auf der Seeseite des Deiches. Der Müll- sowie der Holzanteil der Störstoffe sind größtenteils bereits aussortiert. Es finden sich lediglich einige kleine (meist <3 cm) Kunststoffpartikel in den Mieten. Zudem befindet sich auffällig viel Schlick und Erde im Treibsel. Ein Großteil davon scheint bei den Kehrarbeiten zusammen mit der Grasnarbe des Deiches in die Haufen gezogen worden zu sein. Das Treibsel im Ja-debusen ist feuchter als die bisher genommenen Treibselproben. Der hohe Wassergehalt des Substrats und die Tatsache, dass es schon einige Tage im Haufen gelagert wurde, führt im Innern der Mieten zum anaeroben Rotteprozess. Dies ist zu erkennen, als die Haufwerke mit einem Bagger auf die Anhänger zur Treibselabfuhr verfrachtet werden, da hierbei Dampf aus den Haufen austritt. Folglich besteht ein Unterschied zwischen dem Material in der Mitte des Haufens und dem Treibsel an der Oberfläche. Es ist demnach ein Aufschluss in der Haufenmitte zu erkennen, durch den eine Homogenisierung des Materials verzeichnet wird.

Neben den Proben des Treibsel auf dem Deich werden zusätzlich Treibselproben aus einem Graben, der sich vor dem Deich befindet, genommen. Hierbei handelt es sich um das gleiche Material, wie auf dem Deich. Allerdings lag das Material bereits längere Zeit im Wasser, so dass vermutet wird, dass bereits eine verstärkte anaerobe Zersetzung erfolgt ist. Das Treibsel im Graben, im Folgenden als Treibsel-Baggerschlamm bezeichnet, befindet sich zum Zeitpunkt der Probenahme 2010 unter der Wasseroberfläche und wird mit einem Bagger geborgen.

Im Jahr 2011 wird deutlich weniger Treibsel auf dem Deich im selben Untersuchungsteilgebiet vorgefunden als im Jahr 2010. Da das Treibselaufkommen seitens des verantwortlichen Deichbandes als so gering eingestuft wird, ist die Bergung nicht notwendig (GRIMM, 2011, pers. Mitt.). Die Mengen reichen jedoch aus, um auch hier eine erneute Probenahme durchzuführen. Die Proben werden jedoch, anders als im Vorjahr, aus dem Spülsaum vor dem Deichfuß entnommen. Das entnommene Material entspricht in seiner Zusammensetzung überwiegend den Proben aus dem Vorjahr. Lediglich die Zersetzung, die im Vorjahr durch die Lagerung in Haufen auf dem Deich bedingt war, ist nicht festzustellen. Somit werden Proben genommen, die größtenteils aus krautigen Pflanzenresten bestehen.



**Abbildung 31: Treibsel des II. Oldenburgischen Deichbandes 2010 (links) und 2011 (rechts)**

Das Treibsel der **Deichacht Krummhörn** ist zum Zeitpunkt der Probenahme 2010 bereits vom Deich geräumt und auf einen Verkuhlungsplatz transportiert. Hier liegt es zum Zeitpunkt

der Probenahme in einem relativ großen Haufen und soll zur Entsorgung verkuhlt, sprich vergraben, werden. Entsprechend der Lagerungsform werden hier die Proben genommen.

Im Jahr 2011 werden ähnliche Bedingungen zur Beprobung vorgefunden. Jedoch ist zum Zeitpunkt der Probenahme das angelandete Treibsel noch nicht vollständig auf dem Verkuhlungsplatz aufgehäuft. Ein relativ geringer Anteil am Gesamtaufkommen liegt noch vor dem Deich seeseitig vom vorgelagerten Treibselräumweg. Dieses Material liegt dort zur Vorbereitung des Abtransports in einem Schwad. Auch hier werden Proben genommen und in die Mischprobe eingebracht.

Das Treibsel aus dem Zuständigkeitsbereich der Deichacht Krummhörn enthält schilfartige und krautige Pflanzenreste zu ungefähr gleichen Teilen. Zusätzlich sind in diesen Proben während beider Probenahmekampagnen Wasserpflanzen, wie etwa Blasentang, enthalten. Weiterhin enthalten die Proben Muscheln und Sand in marginalen Anteilen. In den Haufen, in denen das Treibsel zu den Zeitpunkten der jeweiligen Probenahmen vorgefunden wird, haben augenscheinlich schon Rotteprozesse stattgefunden.



**Abbildung 32: Treibsel der Deichacht Krummhörn 2010 (links) und 2011 (rechts)**

Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen dem Treibsel in den Flussmündungen und dem Treibsel welches an der Nordseeküste direkt anfällt erkennbar. Das Nordseetreibsel ist überwiegend krautig und erinnert von der Beschaffenheit optisch an Heu bzw. getrockneten Grasschnitt. Wohingegen das Treibsel aus den Flussmündungen einen höheren Reetanteil besitzt und von der Struktur her eher Stroh ähnelt.

### **Probleme und Änderungen des Arbeitsplans**

Im III. Oldenburgischen DB ist in der Saison 2010/2011 kein Treibsel angefallen, so dass dieser Deichband nicht zur Probenahme geeignet ist.

Die Schüttdichtenbestimmung im II. Oldenburgischen DB stellt sich als schwierig heraus, da das Material eine sehr hohe Dichte aufweist. Aus physischen Gründen ist es nicht möglich, eine dreifache Wiederholung der Wägung durchzuführen.

Laut Arbeitspaketen ist es geplant, im II. Oldenburgischen Deichband zusätzlich zu den Standardproben Material nach ersten Aufbereitungsversuchen, wie Häckseln und Silieren, in Form von gewickelten Ballen nach Göttingen zu transportieren. Diese Planung erweist sich jedoch vor Ort als nicht durchführbar, da die Ballenpressen vor Ort nicht für diese Untersuchungen zur Verfügung stand. Dies ist u. a. damit begründet, dass das Material nicht zu hundert

Prozent frei von Störstoffen, wie Müll, Glas, Sand oder Holz ist, was den Pressen schaden könnte. Darüber hinaus liegt das gesamte Treibsel im II. Oldenburgischen Deichband bereits in Haufen und hat aufgrund geringer vorheriger Niederschläge nicht den, für die Probenentnahme notwendigen, Trockensubstanzgehalt.

#### 5.4.1 Bestimmung der Schüttraumdichte

In Tabelle 24 werden die erfassten Schüttraumdichten des Treibsel der genannten Probenahmestellen aufgelistet und gegenüber gestellt.

An den Werten ist zu erkennen, dass die Schüttraumdichten der einzelnen Standorte innerhalb eines Jahres deutlichen Schwankungen unterliegen. Dies ist vor allem auf die zum Zeitpunkt der Probenahmen vorherrschenden Witterungen zurückzuführen. Im Zeitraum vor und während der Probenahme 2010 war das Wetter regnerisch. Im Jahr darauf war es ca. zwei Wochen lang vor sowie während der Probenahme relativ sonnig, bei Temperaturen von über 20 °C.

**Tabelle 24: Ermittelte Schüttraumdichten von Treibsel aus den Jahren 2010 und 2011**

Deichverband	2010		2011	
	Mg FM/m <sup>3</sup>	Mg TM/m <sup>3</sup>	Mg FM/m <sup>3</sup>	Mg TM/m <sup>3</sup>
DVB Heede-Aschendorf-Papenburg	-	-	0,06	0,04
Moormerländer DA	0,14	0,05	0,08	0,03
DA Krummhörn	0,17	0,08	0,13	0,03
II. Oldeburgischer DB	0,38	0,10	0,03	0,02
DVB Osterstader Marsch	0,07	0,04	0,09	0,07
DVB Land Wursten	0,05	0,04	0,05	0,04
DVB Kehdingen Oste	0,10	0,04	-	-
Mittelwert	0,15	0,06	0,07	0,04
Standardabweichung	0,12	0,03	0,04	0,02
Median	0,12	0,05	0,07	0,04

#### 5.4.2 Trockensubstanz

Die Trockensubstanz (TS) und der dazugehörige Wassergehalt (WG) der Treibselanalyse sind in Tabelle 25 angegeben. Es handelt sich dabei um die Mittelwerte der Ergebnisse aus den jeweiligen Dreifachbestimmungen der einzelnen Proben. TS und WG ergeben summiert 100 %, wobei auch hier die ermittelten Ergebnisse stark schwanken. So hat das Treibsel aus dem DVB Land Wursten die mit Abstand höchsten TS-Werte der Treibselproben im Jahr 2010, der Treibsel-Baggerschlamm hingegen den höchsten Wassergehalt. Die übrigen Werte der verschiedenen Standorte bewegen sich zwischen prozentualen Trockensubstanzgehalten von 33 % - 52 %.

Im Jahr 2011 wurden TS-Gehalte zwischen rund 24 % und etwa 77 % der FM festgestellt. Die geringsten TS-Gehalte wiesen das Treibsel der Deichacht Krummhörn (rund 24 %) und jenes der Moormerländer Deichacht (rund 39 %) auf. Die nächsthöheren Werte lagen bei

rund 62 % (DVB Heede-Aschendorf-Papenburg) und rund 73 % (DVB Osterstader Marsch). Die TS-Gehalte des Treibselns vom DVB Land Wursten mit rund 75 % und des II. Oldenburgischen DB mit rund 77 % erreichten die höchsten Werte, die in der TS-Analyse der Proben von 2011 festgestellt werden konnten.

**Tabelle 25: Trockensubstanz- und Wassergehalte der Treibselproben**

Bezeichnung	2010		2011	
	TS [% der FM]	WG [% der FM]	TS [% der FM]	WG [% der FM]
DVB Heede-Aschendorf-Papenburg	-	-	62,3	37,8
Moormerländer DA	33,0	67,0	44,4	55,6
DA Krummhörn	46,8	53,2	29,2	70,8
II. Oldenburgischer DB	25,3	74,8	76,6	23,4
DVB Osterstader Marsch	52,2	47,8	72,7	27,3
DVB Land Wursten	70,1	29,9	64,1	35,9
DVB Kehdingen- Oste	39,6	60,4	-	-
Treibsel-Baggerschlamm	12,2	87,8	-	-
Mittelwerte <sup>4</sup>	44,5	55,5	58,2	41,8

---

<sup>4</sup> Ohne Treibsel-Baggerschlamm

### 5.4.3 Organische Trockensubstanz

Die organische Trockensubstanz bezieht sich auf die Trockensubstanz (TS) der Probe und gibt prozentual den Wert des organischen Anteils der Probe (% der Trockensubstanz) an. Dieser liegt bei den Proben der vorliegenden Studie zwischen 64 % der TS und 90 % der TS. Auffällige Unregelmäßigkeiten sind nicht zu beobachten. Tendenziell weisen die Proben der Standorte mit größeren Schilf- und Reetanteilen höhere oTS-Werte auf. Die Treibselzusammensetzungen des II. Oldenburgischen DB und der DA Krummhörn hingegen kennzeichnen sich durch starke Gewichtung krautiger Biomasse aus und besitzen demnach weniger Glühverlust (vgl. Tabelle 26).

**Tabelle 26: Ergebnisse der Bestimmung von organischer Trockensubstanz und Aschegehalt**

Deichverband	2010		2011	
	oTS [% der TS]	Aschegehalt [% der TS]	oTS [% der TS]	Aschegehalt [% der TS]
DVB Heede-Aschendorf-Papenburg	-	-	83,2	16,9
Moormerländer DA	79,4	20,6	82,7	17,3
DA Krummhörn	76,0	24,1	83,6	16,4
II. Oldenburgische DB	73,1	26,9	80,1	19,9
DVB Osterstader Marsch	90,3	9,7	89,2	10,8
DVB Land Wursten	88,3	11,7	64,1	35,9
DVB Kehdingen- Oste	86,0	14,0	-	-
Treibsel-Baggerschlamm	-	-	-	-
Mittelwerte	82,2	17,8	80,5	19,5

Die Ergebnisse hinsichtlich der Charakterisierung von Trockensubstanzgehalt und organischer Trockensubstanz ist in folgender Abbildung grafisch dargestellt.

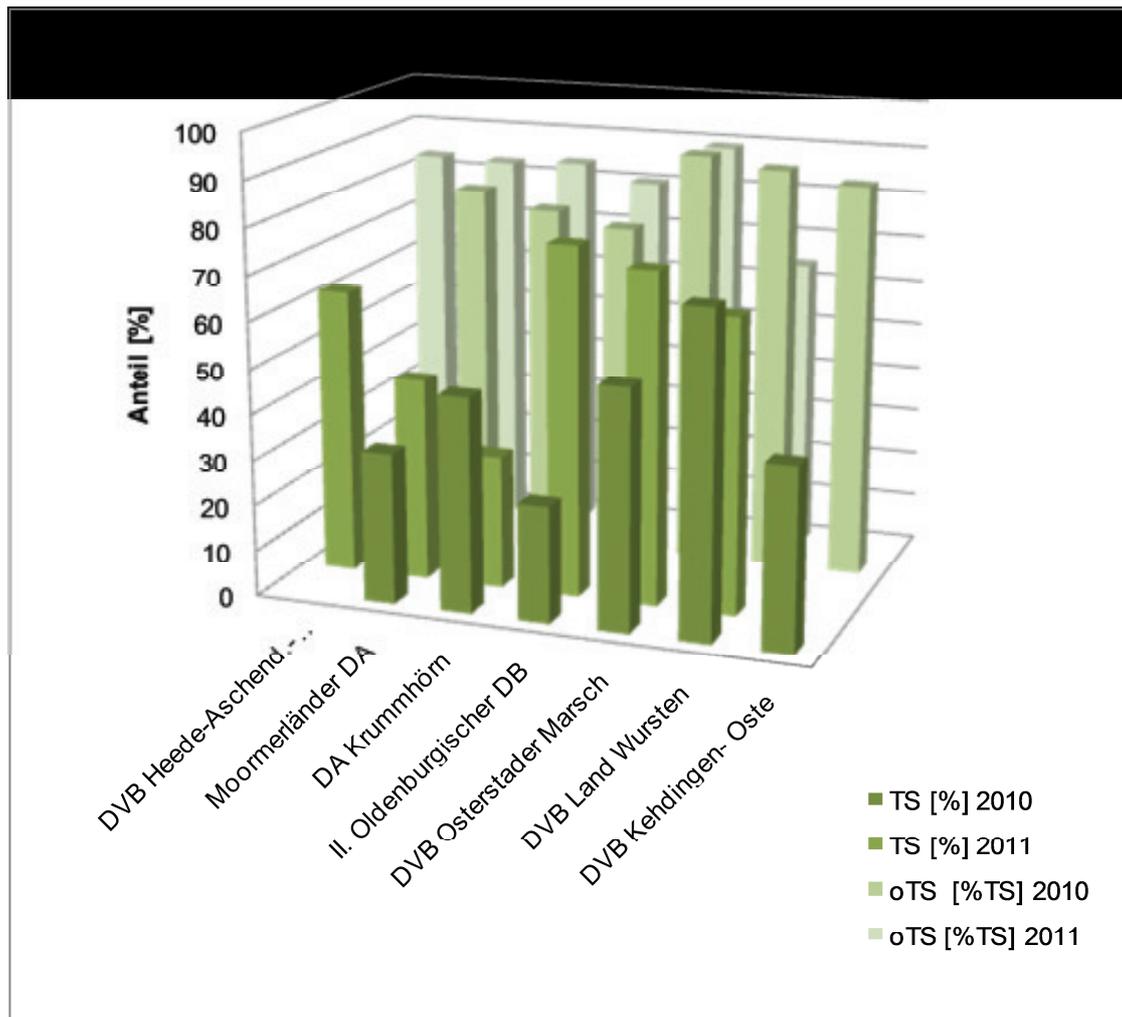


Abbildung 33: TS und oTS für Treibselproben aus den Jahren 2010 und 2011

#### 5.4.4 Brenn- und Heizwert

Die ermittelten Brenn- und Heizwerte aller Proben sind in Tabelle 27 dargestellt. Das Mittel der Heizwerte für die Proben aus 2010 liegen bei 6 MJ/kg FM bzw. 15 MJ/kg TS. Die Proben des Folgejahres liegen mit einem Heizwert von rund 8,5 MJ/kg FM über und mit einem Heizwert von rund 14 MJ/kg TS unter denen des Vorjahres. Im Jahr 2010 sind die Heizwerte des Treibselns aus dem DVB Land Wursten mit rund 11 MJ/kg FM und rund 17 MJ/kg TS im Vergleich der Werte aller anderen Proben relativ hoch. Die niedrigsten, auf die Frischmasse bezogenen Heizwerte wurden in den Treibselproben des II. Oldenburgischen DB (2 MJ/kg FM) und denen der Moormerländer DA (4 MJ/kg FM) festgestellt. Die Probe des Treibsel-Baggerschlamm erreichte, aufgrund des hohen Wassergehaltes (vgl. Tabelle 25), einen Heizwert von 0,0 MJ/kg FM. D. h., dass die im Baggerschlamm enthaltene Energie nicht ausreichend war, um das enthaltene Wasser zu verdampfen.

**Tabelle 27: Brenn- und Heizwerte der Treibselproben**

Deichverband	2010			2011		
	Brennwert [MJ/kg <sub>trocken</sub> ]	Heizwert [MJ/kg <sub>trocken</sub> ]	Heizwert [MJ/kg <sub>frisch</sub> ]	Brennwert [MJ/kg <sub>trocken</sub> ]	Heizwert [MJ/kg <sub>trocken</sub> ]	Heizwert [MJ/kg <sub>frisch</sub> ]
DVB Heede-Aschendorf-Papenburg	-	-	-	16,72	15,35	8,62
Moormerländer DA	16,09	14,72	3,95	15,59	14,22	4,01
DA Krummhörn	15,82	14,45	5,95	16,47	15,10	1,70
II. Oldenburgischer DB	14,89	13,52	2,08	15,76	14,39	10,45
DVB Osterstader Marsch	18,11	16,74	8,22	17,13	15,76	10,79
DVB Land Wursten	18,22	16,84	11,48	12,76	11,39	10,74
DVB Kehdingen Oste	17,38	16,01	5,36	-	-	-
Treibsel-Baggerschlamm	15,09	13,71	0,00	-	-	-
Mittelwerte <sup>5</sup>	16,75	15,38	6,17	15,74	14,37	8,62

Im Jahr 2011 wiesen die Proben des II. Oldenburgischen DB, des DVB Land Wursten und des DVB Osterstader Marsch Heizwerte oberhalb von 10 MJ/kg FM auf. Demgegenüber waren die 2011 festgestellten Heizwerte der Proben vom Treibsel der Moormerländer DA (4 MJ/kg FM) und der DA Krummhörn (1,7 MJ/kg FM) relativ gering. Die Treibselproben von 2011 erreichten im Trockenzustand überwiegend Heizwerte zwischen 15,5 MJ/kg TS und

<sup>5</sup> Ohne Treibsel-Baggerschlamm

17 MJ/kg TS. Lediglich der Heizwert des getrockneten Materials vom DVB Land Wursten lag mit rund 13 MJ/kg TS unter dem Niveau der Heizwerte aller anderen Proben im Trockenzustand.

Generell ist feststellbar, dass die Treibselfrischmasse von Standorten an Ästuarien höhere Heizwerte erreichen als diejenige von Standorten an der Nordsee.

#### 5.4.5 Ascheschmelzverhalten

Für die Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens wird exemplarisch eine Treibselprobe aus dem Zuständigkeitsbereich des DVB Land Wursten verwendet.

Da es sich bei der Probe um eher schilfartiges Material handelt und sich die verschiedenen Treibselproben in ihrer Zusammensetzung deutlich unterscheiden, lassen sich die Ergebnisse nicht unmittelbar auf andere Proben übertragen.

Außerdem hat die Probenahme bei der Bewertung der Ergebnisse einen großen Einfluss. Je nachdem, wie groß der Anteil anorganischer Verschmutzung ist, der bei der Probenahme erfasst wird, ändert sich sowohl der Aschegehalt, als auch durch die veränderte Zusammensetzung der Asche dessen Schmelzverhalten.

#### Ergebnisse zur Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens von Treibsel

Die Analyse wird im Auftrag der HAWK von Eurofins Environment AB, Lidköping, Schweden, gemäß CEN/TS 15370-1 durchgeführt.

Der gemäß DIN EN 14961-1 zur Charakterisierung von Brennstoffen anzugebende Wert ist die Erweichungstemperatur (DT-Wert).

Die Ergebnisse der Analyse lauten wie folgt:

- |  |          |
|--|----------|
| • Temperatur am Beginn der Schrumpfung (SST) | 963 °C   |
| • Erweichungstemperatur (DT)                 | 1.192 °C |
| • Halbkugeltemperatur (HAT)                  | 1.320 °C |
| • Fließtemperatur (FT)                       | 1.438 °C |

#### 5.4.6 Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Stickstoffgehalt

Die mittels CHN Analyse ermittelten Ergebnisse für die Proben aus den beiden Probenahmeaktionen sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Das berechnete C/N-Verhältnis für die Proben wird in Abbildung 34 dargestellt. Während sich die meisten Proben mit C/N-Verhältnissen zwischen knapp 20 und 30 bewegen, liegen die Ergebnisse für den DVB Osterstader Marsch mit 58,9 und 49,2 deutlich darüber, während die Ergebnisse für den II. Oldenburgischen DB mit 16,7 bzw. 20,5 vergleichsweise niedrig liegen.

Tabelle 28: Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Stickstoffgehalte und -Verhältnisse

Deichverband	2010				2011			
	C [%]	H [%]	N [%]	C/N-Verhältnis	C [%]	H [%]	N [%]	C/N-Verhältnis
DVB Heede-Aschendorf-Papenburg	-	-	-	-	41,68	5,61	1,92	21,70
Moormerländer DA	38,95	5,44	1,92	20,44	39,85	5,36	1,14	34,94
DA Krummhörn	41,38	5,72	1,93	21,44	41,66	5,34	1,39	30,10
II. Oldenburgischer DB	39,13	5,49	2,34	16,73	39,64	5,50	1,93	20,50
DVB Osterstader Marsch	44,08	6,01	0,75	58,93	45,42	5,75	0,92	49,21
DVB Land Wursten	43,89	6,10	1,58	27,79	35,05	4,29	1,88	18,69
DVB Kehdingen Oste	43,96	5,96	1,61	27,25	-	-	-	-
Mittelwerte <sup>6</sup>	41,90	5,79	1,69	28,76	40,55	5,31	1,53	29,19
Standardabweichung	2,43	0,28	0,54	15,37	3,40	0,52	0,44	11,63

Die unterschiedlichen C/N Verhältnisse sind vor allem auf starke Schwankungen des Stickstoffanteils der Proben zurückzuführen.

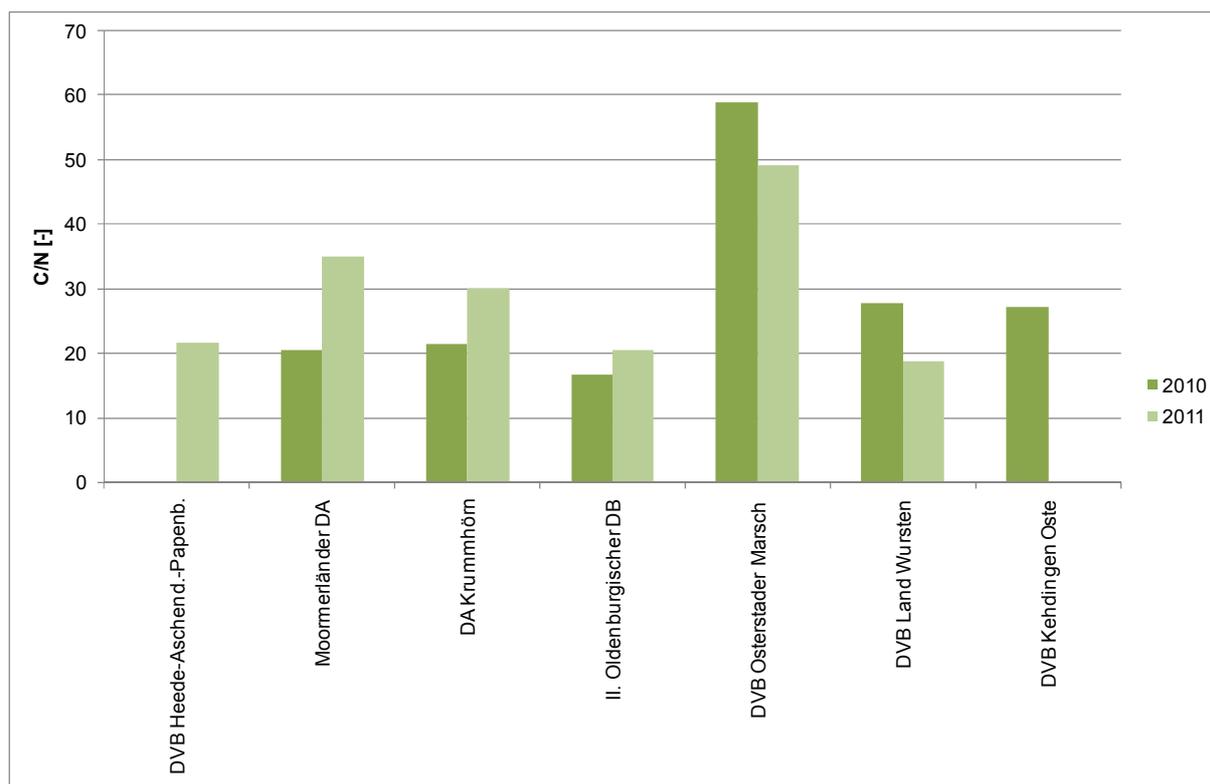


Abbildung 34: C/N-Verhältnis für Treibselproben aus den Jahren 2010 und 2011

<sup>6</sup> Ohne Treibsel-Baggerschlamm

### 5.4.7 Schwefelgehalt

In Tabelle 29 ist werden die Schwefelanteile für die einzelnen Treibselproben dargestellt. Die prozentualen Werte beziehen sich auf die Trockensubstanz der jeweiligen Originalprobe.

In den Proben aus dem Jahr 2010 werden die höchsten Schwefelgehalte im Treibsel des Zuständigkeitsbereiches der DA Krummhörn (0,72 % der TS) sowie im Treibsel-Baggerschlamm aus dem Bereich des II. Oldenburgischen DB (0,73 % der TS) festgestellt. Das Treibsel vom Deich des II. Oldenburgischen DB hingegen hat einen etwa halb so hohen Schwefelgehalt (0,34 % der TS) wie das aus dem Graben vor dem Deich am selben Probenahmestandort. Der geringste Schwefelgehalt wird für die Treibselprobe des DVB Osterstader Marsch mit 0,10 % der TS ermittelt.

Die Schwefelgehalte der Proben aus dem Jahr 2011 weichen zum Teil erheblich von denen der Proben aus dem Jahr 2010 ab. Sie liegen zwischen 0,48 % der TS (DVB Land Wursten) und 0,13 % der TS. Im Vergleich zum Vorjahr wird im Treibsel des DVB Land Wursten nahezu eine Verdopplung des Schwefelgehaltes gemessen. Im Treibsel der Moormerländer DA liegt der Schwefelgehalt um ca. 50 % unter dem des Jahres 2010. In der Probe von 2011 der DA Krummhörn beträgt der Schwefelgehalt weniger als 1/3 des Wertes von 2010 (vgl. Tabelle 29: Schwefelgehalte Abbildung 35).

**Tabelle 29: Schwefelgehalte der Treibselproben der Jahr 2010 und 2011**

Deichverband	2010	2011
	Schwefel [% der TS]	
DVB Heede-Aschendorf-Papenburg	-	0,18
Moormerländer DA	0,28	0,15
DA Krummhörn	0,72	0,20
II. Oldenburgischer DB	0,34	0,29
DVB Osterstader Marsch	0,10	0,13
DVB Land Wursten	0,22	0,48
DVB Kehdingen Oste	0,22	-
Treibsel-Baggerschlamm	0,73	-
Mittelwerte <sup>7</sup>	0,31	0,24
Standardabweichung <sup>8</sup>	0,21	0,13

<sup>7</sup> Ohne Treibsel-Baggerschlamm

<sup>8</sup> Ohne Treibsel-Baggerschlamm

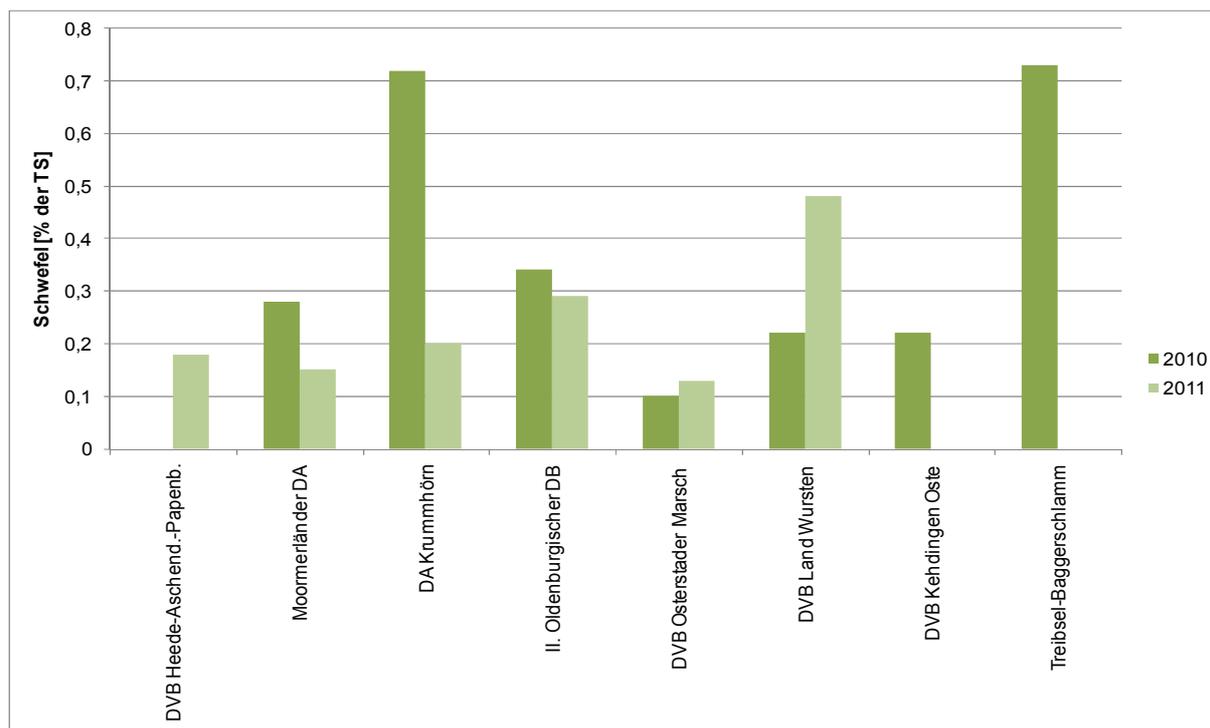


Abbildung 35: Schwefelanteil (TS-Bezug) für Treibselproben aus den Jahren 2010 und 2011

#### 5.4.8 Chloridgehalt

Die Chloridkonzentrationen der Treibselproben aus den Jahren 2010 und 2011 sind in Tabelle 30 dargestellt.

Tabelle 30: Chloridkonzentrationen

Deichverband	2010	2011
	Chloridkonzentration [mg/kg TS]	
DVB Heede-Aschendorf-Papenburg	-	6.487
Moormerländer DA	188	708
DA Krummhörn	5.166	3.298
II. Oldenburgischer DB	809	567
DVB Osterstader Marsch	336	541
DVB Land Wursten	964	925
DVB Kehdingen Oste	343	-
Treibsel-Baggerschlamm	14.462	-
Mittelwerte <sup>9</sup>	1.301	2.088

Die mit Abstand höchste Chloridkonzentration weist die Probe des Treibsel-Baggerschlammes aus dem Jahr 2010 mit 14.462 mg/kg TS auf. Bis auf die Chloridkonzent-

<sup>9</sup> Ohne Treibsel-Baggerschlamm

ration der Probe der DA Krummhörn (5.166 mg/kg TS) liegen alle anderen Werte deutlich darunter. So wurde im Treibsel aus dem Zuständigkeitsbereich der Moormerländer DA bspw. eine Chloridkonzentration von 188 mg/kg TS festgestellt.

Im Jahr 2011 konnte aufgrund von zu geringem Treibselanfall im Zuständigkeitsbereich des II. Oldenburgischen DB keine erneute Probe vom Treibsel-Baggerschlamm genommen werden. Ebenso verhielt es sich mit der Beprobung beim DVB Kehdingen Oste. Die höchste Chloridkonzentration wird im Treibsel aus dem Bereich des DVB Heede- Aschendorf-Papenburg mit 3.298 mg/kg TS nachgewiesen.

#### 5.4.9 Schwermetallgehalt

Die Tabelle 31 sind die Schwermetallgehalte der Elemente Cadmium, Chrom, Blei, Nickel und Kupfer in den Treibselproben der Jahre 2010 und 2011 dargestellt. Die Einheit der Konzentrationen ist mg/kg Trockensubstanz. Maximale Konzentrationen in der jeweiligen Spurenelementkategorie sind fett und kursiv gedruckt.

**Tabelle 31: Gehalte an Schwermetallen/Spurenelementen**

Deichverband	Cadmium		Chrom		Blei		Nickel		Kupfer	
	[mg/kg TS]									
	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011
DVB Heede-Asch.-Papenb.	-	0,33	-	10,04	-	6,60	-	6,20	-	9,90
Moormerländer DA	0,12	0,23	14,65	19,90	3,54	8,22	2,96	<b>8,52</b>	8,24	6,87
DA Krummhörn	0,23	0,31	11,33	17,44	9,07	8,94	6,80	7,88	10,17	7,38
II. Oldenburgischer DB	0,20	<b>0,48</b>	13,85	<b>19,47</b>	7,96	11,11	5,11	8,39	11,4	12,97
DVB Osterstader Marsch	0,17	0,35	8,24	12,09	7,32	7,48	4,48	5,77	<b>25,15</b>	9,62
DVB Land Wursten	0,13	0,46	6,81	14,62	4,67	10,10	2,62	7,29	8,79	14,36
DVB Kehdingen Oste	0,13	-	4,96	-	11,03	-	6,74	-	6,65	-
Waschprobe DA Krummhörn	0,20	-	8,98	-	6,10	-	4,52	-	10,28	-
Treibsel-Baggerschlamm	0,21	-	17,47	-	<b>11,50</b>	-	7,84	-	10,87	-
Mittelwerte <sup>10</sup>	0,16	0,36	9,97	15,59	8,01	8,74	4,79	7,34	11,73	10,18

In den Treibselproben des Jahres 2010 lagen die Cadmium-Konzentrationen zwischen 0,12 bis 0,23 mg/kg TS. Die Chrom-Gehalte deckten einen Bereich zwischen rund 5 mg/kg TS (DVB Kehdingen Oste) bis rund 18 mg/kg TS (Treibsel-Baggerschlamm) ab. Die Werte der Blei-Konzentrationen lagen zwischen ca. 3,5 mg/kg TS (Moormerländer DA) und 11,5 mg/kg TS (Treibsel-Baggerschlamm). Die Nickel-Konzentrationen erreichten Werte zwischen rund 3 mg/kg TS (Moormerländer DA) und rund 8 mg/kg TS (Treibsel-Baggerschlamm). Die Konzentrationswerte von Kupfer im Treibsel wurden mit minimal rund 7 mg/kg TS (DVB Kehdingen Oste) und maximal rund 25 mg/kg TS bestimmt.

<sup>10</sup> Ohne Waschprobe DA Krummhörn und Treibsel-Baggerschlamm

Die Gehalte an Cadmium in den Treibselproben aus dem Jahr 2011 liegen im Bereich zwischen 0,23 mg/kg TS (Moormerländer DA) bis 0,48 mg/kg TS (II. Oldenburgischer DB). Die Chrom-Konzentrationen liegen zwischen rund 10 mg/kg TS (DVB Heede-Aschendorf-Papenburg) und rund 20 mg/kg TS (Moormerländer DA). Die Blei-Gehalte im Treibsel wurden mit Werten zwischen rund 7 mg/kg TS (DVB Heede-Aschendorf-Papenburg) und rund 11 mg/kg TS (II. Oldenburgischer DB) festgestellt. Nickel wurde in Konzentrationen zwischen minimal rund 6 mg/kg TS (DVB Heede-Aschendorf-Papenburg) und maximal rund 9 mg/kg TS (Moormerländer DA) nachgewiesen. Die Kupfer-Konzentrationen lagen bei rund 7 mg/kg TS (Moormerländer DA) und rund 14 mg/kg TS (DVB Land Wursten).

#### 5.4.10 Biostabilität

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Ergebnisse aller durchgeführten Analysen zur Bestimmung der Biostabilität von:

- Treibsel-Frischmasse (DVB Land Wursten, 2011),
- Kompost aus Treibsel (Haufenmiete, 2011),
- Treibselgärrest (vgl. Kapitel 4.6.2),
- HTC-Kohle aus Treibsel (vgl. Kapitel 4.7.5)
- Pyrolysekohle aus Treibsel (vgl. Kapitel 4.7.6)
- Steinkohle

dargestellt.

##### 5.4.10.1 Trockensubstanz und organische Trockensubstanz

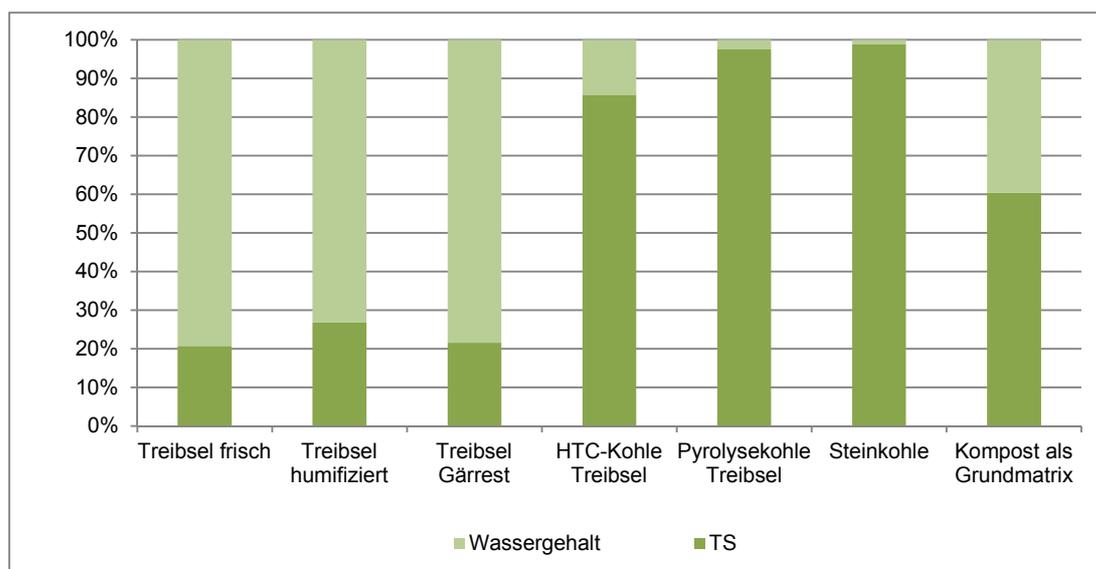
Folgende Trockensubstanz- und Wassergehalte wurden ermittelt:

**Tabelle 32: Trockensubstanz- und Wassergehalte der Proben für Stabilitätsuntersuchungen**

Probe	TS [%]	Wassergehalt [%]
Treibsel Frischmasse	20,7	79,3
Treibsel Kompost	26,7	73,3
Treibsel Gärrest	21,6	78,4
HTC-Kohle-Treibsel	85,8	14,2
Pyrolysekohle-Treibsel	97,5	2,5
Steinkohle	99,0	1,0
Kompost als Grundmatrix	60,5	39,5

Die Originalsubstanz und die in den biologischen Verfahren behandelten Substanzen zeigen ähnliche Trockensubstanzgehalte. Sie liegen im Bereich von 21 % bis 27 %. Die thermochemisch behandelten Substrate und die Steinkohle lassen sich ebenfalls zusammen betrachten. Hier liegen die Werte im Bereich von 86 % bis 98 %.

Zusätzlich wird hier der Kompost aus der Bioabfall Kompostierungsanlage in Göttingen aufgeführt. Dieser wurde bei den Messungen zur Atmungsaktivität als Grundmatrix verwendet (Abbildung 36).



**Abbildung 36: Trockensubstanz und Wassergehalte**

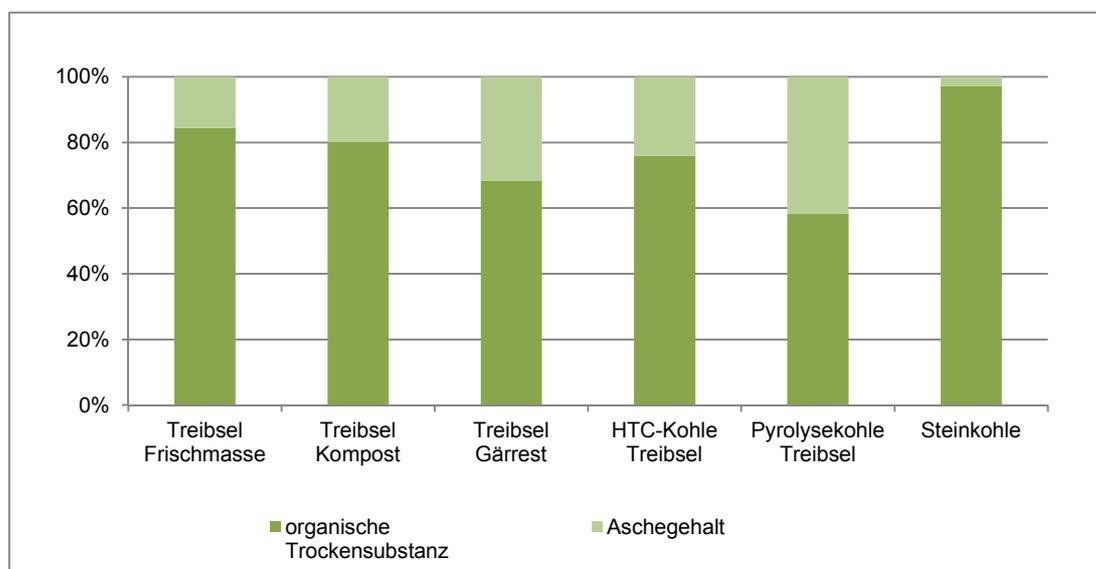
Der Gehalt an organischer Trockensubstanz als Teil der gesamten Trockensubstanz liegt bei den untersuchten Substraten zwischen 58,33 % in der Pyrolysekohle und 97,13 % in der Steinkohle. Bezogen auf die Treibsel-Frischmasse hat sich der Anteil der organischen Trockensubstanz im Treibsel-Kompost um 6,15 %, im Treibsel Gärrest um 19,06 %, in der HTC-Kohle aus Treibsel um 10,18 % und in der Pyrolysekohle um 30,93 % reduziert.

**Tabelle 33: Prozentuale Anteile organische Trockensubstanz und Aschegehalte**

Probenart	organische Trockensubstanz [%]	Aschegehalt [%]
Treibsel-Frischmasse	84,45	15,55
Treibsel-Kompost	80,19	19,81
Treibsel-Gärrest	68,35	31,65
HTC-Kohle-Treibsel	75,85	24,15
Pyrolysekohle-Treibsel	58,33	41,67
Steinkohle	97,13	2,87

In Abbildung 37 sind die Proben in ihrer Zusammensetzung aus organischem und anorganischem Anteil dargestellt.

Die Pyrolysekohle besitzt mit 41,67 % den höchsten anorganischen Anteil, gefolgt vom Treibsel-Gärrest mit 31,65 %. Die HTC-Kohle aus Treibsel enthält noch 24,15 % und das kompostierte Treibsel 19,81 % Anorganik. Der anorganische Anteil in der Trockensubstanz der Treibsel-Frischmasse beträgt 15,55 % (Tabelle 33).



**Abbildung 37: Darstellung der oTS und Aschegehalte der Proben**

#### 5.4.10.2 Atmungsaktivität mit der AT<sub>4</sub>-Aufstockungsmethode

In Vorversuchen mit Kompost zeigt sich, dass der von ursprünglich 39 % auf 56 % erhöhte Wassergehalt zu einer deutlichen Steigerung der Atmungsaktivität führt. Der AT<sub>4</sub>-Wert steigt durch die Wasserzugabe von 1,57 auf 2,79 mg O<sub>2</sub> / g TS um 77 %. Gleichzeitig war kein Unterschied in der Verwendung von frischem oder eingefrorenem Kompost zu erkennen. Der biologische Abbau im zeitlichen Verlauf und das Ergebnis für den Sauerstoffverbrauch nach 4 Tagen sind nahezu identisch (2,79 und 2,80 mg O<sub>2</sub> / g TS). Dies führte zu der Entscheidung, eingefrorenen Kompost zu verwenden, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen.

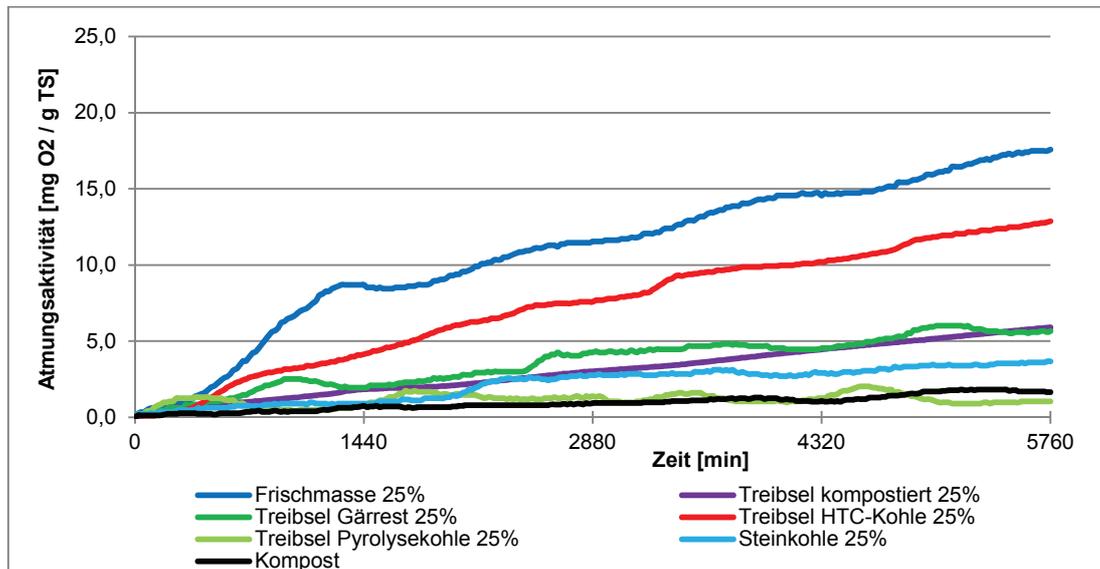
In Abbildung 38 sind die Mittelwerte der Dreifachbestimmungen für die einzelnen Substrate bei 25 % Probenzugabe dargestellt. Die größte Atmungsaktivität zeigte die Treibsel Frischmasse, die über den gesamten zeitlichen Verlauf die höchste biologische Aktivität aufwies.

Mit einigem Abstand folgt dann die Atmungsaktivität der HTC-Kohle aus Treibsel, die wie die der Treibsel-Frischmasse kontinuierlich ansteigt. Unterhalb der Aktivität der HTC-Kohle befinden sich dann der Sauerstoffverbrauch beim Abbau von Treibsel-Gärrest, Treibsel-Kompost, Steinkohle und Pyrolysekohle aus Treibsel. Die unterste Linie (schwarz) stellt die Atmungsaktivität der Grundmatrix, dem Kompost, dar. Betrachtet man diese als Nulllinie, lässt sich erkennen, dass diese durch die Atmungsaktivität der Pyrolysekohle an einigen Stellen unterschritten wird. Die Atmungsaktivität der Pyrolysekohle im Kompost ist hier geringer als die des Kompostes allein.

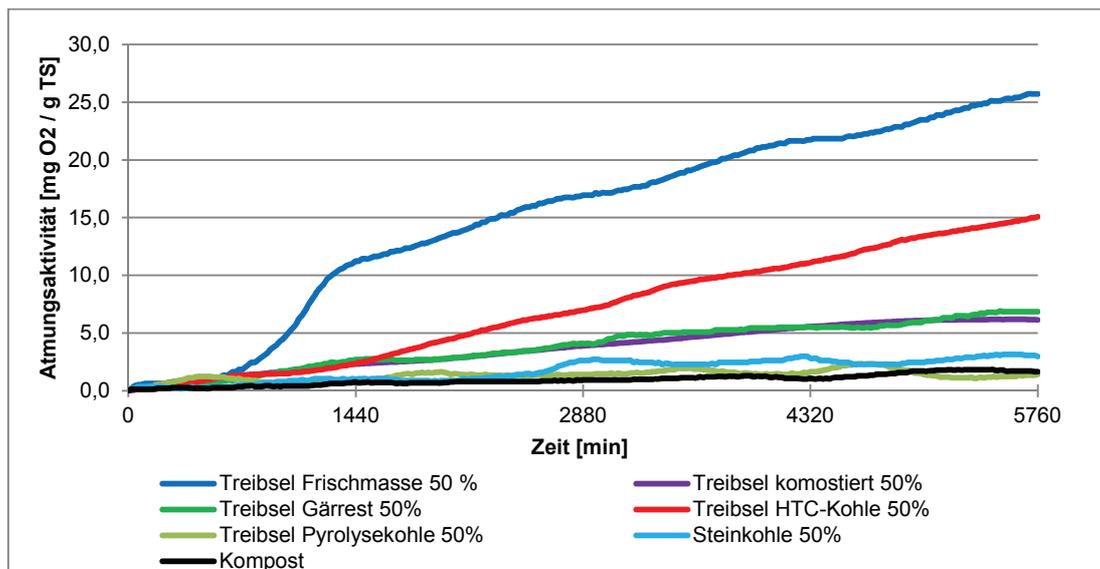
Die Verläufe der Atmungsaktivitäten bei 50 % Zugabe der Proben, die in Abbildung 39 dargestellt sind, zeigen die gleiche Abfolge der Substrate wie bei 25 % Zugabe.

Bei der Treibsel Frischmasse kam es jedoch zu einem stark erhöhten Sauerstoffverbrauch, was sich in einer größeren Steigung des Verlaufs erkennen lässt. Auffällig ist der exponentielle Anstieg der Atmungsaktivität der Treibsel-Frischmasse innerhalb der ersten 24 Stunden bei 25 % wie auch 50 % Probenzugabe.

Bei der Messung der Atmungsaktivität unter Zugabe von HTC-Kohle war eine Schimmelbildung zu erkennen.



**Abbildung 38: Zeitlicher Verlauf der Atmungsaktivität bei 25 % Probenzugabe**



**Abbildung 39: Zeitlicher Verlauf der Atmungsaktivität bei 50 % Probenzugabe**

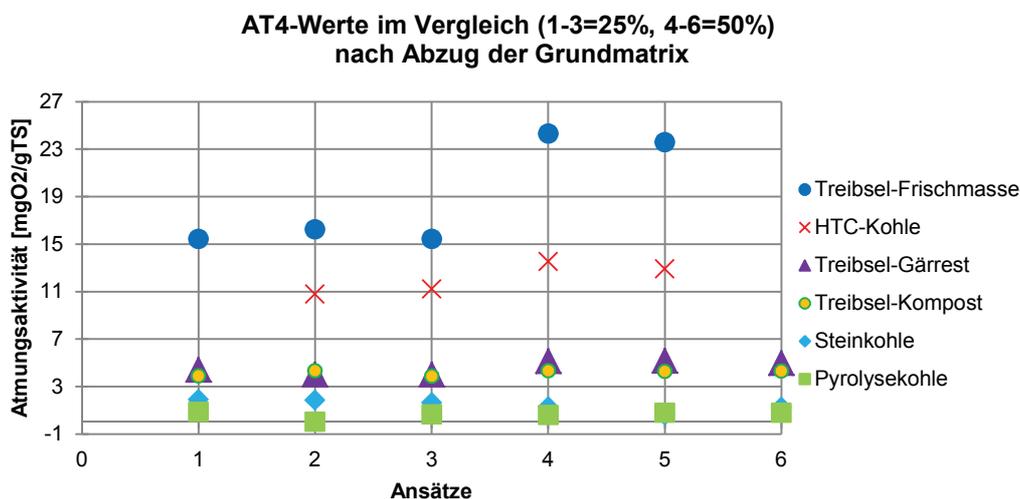
In Tabelle 34 werden die, über die Versuchsdauer von 4 Tagen aufsummierten, Sauerstoffverbräuche ( $AT_4$ -Werte) der unterschiedlichen Substrate in Abhängigkeit der zugegebenen Probenmengen verglichen. Die Werte stellen Mittelwerte der Dreifachbestimmungen dar. Der  $AT_4$ -Wert des Kompostes, der als Grundmatrix für alle Proben verwendet wird, beträgt  $1,91 \text{ mg O}_2 / \text{g TS}$ . Dieser wird für die Betrachtung der Messwerte von diesen abgezogen. Die Treibsel Frischmasse erzielt mit  $15,67 \text{ mg O}_2 / \text{g TS}$  die höchste Atmungsaktivität. Bei Verdopplung der Probenmenge erhöht sich die Sauerstoffzehrung um 52 % auf  $23,92 \text{ mg O}_2 / \text{g TS}$ . Die HTC-Kohle aus Treibsel verbraucht  $10,96 \text{ mg O}_2 / \text{g TS}$  bei 25 % Probenzugabe und  $13,17 \text{ mg O}_2 / \text{g TS}$  bei 50 % Probenanteil. Damit steigt der Sauerstoffverbrauch um 20 %. Das kompostierte Treibsel und der Gärrest aus Treibsel erzielen annä-

hernd die gleichen Werte. Sie liegen bei rund 4 mg O<sub>2</sub> / g TS. Beim Treibsel Gärrest erfolgt bei Verdopplung der Probenmenge eine Steigerung um 23 %, wohingegen die Atmungsaktivität beim kompostierten Treibsel nur um 6,8 % zunimmt. Die Pyrolysekohle erwirkt mit 0,71 mg O<sub>2</sub> / g TS den geringsten AT<sub>4</sub>-Wert und bei Erhöhung der Menge der Pyrolysekohle im Reaktionsgefäß vermindert sich die Atmungsaktivität um 5,6 %. Steinkohle zeigt etwas mehr als die doppelte Atmungsaktivität als die Pyrolysekohle, die jedoch bei Verdopplung der Kohlemenge um 29,5 % zurückgeht.

**Tabelle 34: AT<sub>4</sub>-Werte der verschiedenen Substrate im Vergleich**

Probe	AT <sub>4</sub> -Werte [mg O <sub>2</sub> / g TS] (nach Abzug der Werte für die Grundmatrix)		
	25 % Probe	50 % Probe	Prozentuale Veränderung
Probenart/Probenanteil [% TS / TS Kompost]			
Treibsel Frischmasse	15,67	23,92	+ 52 %
Treibsel Kompost	3,99	4,26	+ 6,8 %
Treibsel Gärrest	4,10	5,05	+ 23 %
HTC-Kohle aus Treibsel	10,96	13,17	+ 20 %
Pyrolysekohle aus Treibsel	0,71	0,67	-5,6 %
Steinkohle	1,76	1,24	- 29,5 %

Zum Vergleich der verschiedenen Ansätze bei der Dreifachbestimmung der Proben sind in Abbildung 40 die Ansätze eins bis sechs der unterschiedlichen Substrate aufgezeigt. Die Ansätze eins bis drei beinhalten jeweils die Proben mit einem Proben-TS-Anteil von 25 % und die Proben vier bis sechs die Proben mit einem Proben-TS-Anteil von 50 % von der Kompost Trockenmasse.



**Abbildung 40: Darstellung der AT<sub>4</sub>-Werte der verschiedenen Substrate -nach Abzug der Grundmatrix-**

Die Proben der einzelnen Reihen stimmen gut überein. Die maximale absolute Abweichung vom Mittelwert betrug 0,36 mg O<sub>2</sub> / g TS.

Im Laufe der Versuche sind aus ungeklärter Ursache einige Reaktionsgefäße gesprungen und waren somit für den Versuch nicht mehr nutzbar. Dementsprechend sind in Abbildung 40 für die HTC-Kohle nur 4 Ansätze und für die Treibsel Frischmasse und die Steinkohle nur fünf ausgewertete Ansätze dargestellt.

### Untersuchung der Hemmung der Atmungsaktivität durch die Pyrolysekohle

In Abbildung 38 und Abbildung 39 ist unter anderem dargestellt, dass die Atmungsaktivität der Pyrolysekohle zeitweise unter der Atmungsaktivität des Kompostes liegt. Dies deutet darauf hin, dass durch die Zugabe von Pyrolysekohle die Atmungsaktivität des Kompostes in der Anfangsphase gehemmt wird. Um festzustellen, ob es sich hierbei um eine echte Hemmung oder nur um eine kurzzeitige Unterschreitung der Atmungsaktivität des Kompostes handelt, wurde für die Mittelwerte der Dreifachbestimmung zu jedem Zeitpunkt die jeweilige Standardabweichung berechnet. Der Mittelwert dieser Standardabweichungen wurde dann als Fehlerindikator verwendet. Der Mittelwert für die Standardabweichung für die Atmungsaktivität der Pyrolysekohle beträgt bei 25 % Probe 0,29 und bei 50 % Probe 0,15. Der Mittelwert für die Standardabweichung der Grundmatrix Kompost beträgt 0,045. Aus den entsprechenden Darstellungen in Abbildung 40, Abbildung 41 und Abbildung 42 lässt sich erkennen, dass es in den ersten drei Tagen zu keiner Hemmung kommt; am 4. Tag die  $AT_4$ -Werte der Pyrolysekohle, die des Kompostes tatsächlich unterschreiten. Dies trifft für die 25 %ige Probenzugabe wie auch für die 50 %ige Probenzugabe zu. Der Verlauf der Trendlinien bestätigt dies, da nach 2,7 Tagen die Trendlinie für die Pyrolysekohle 25 % die Trendlinie für den Kompoststandard schneidet. Die Steigung der Trendlinie für den Verlauf der Atmungsaktivität der Pyrolysekohlen liegt jeweils unter der des Kompostes. Dies spricht für eine längerfristige Hemmung der Atmungsaktivität durch die Pyrolysekohle.

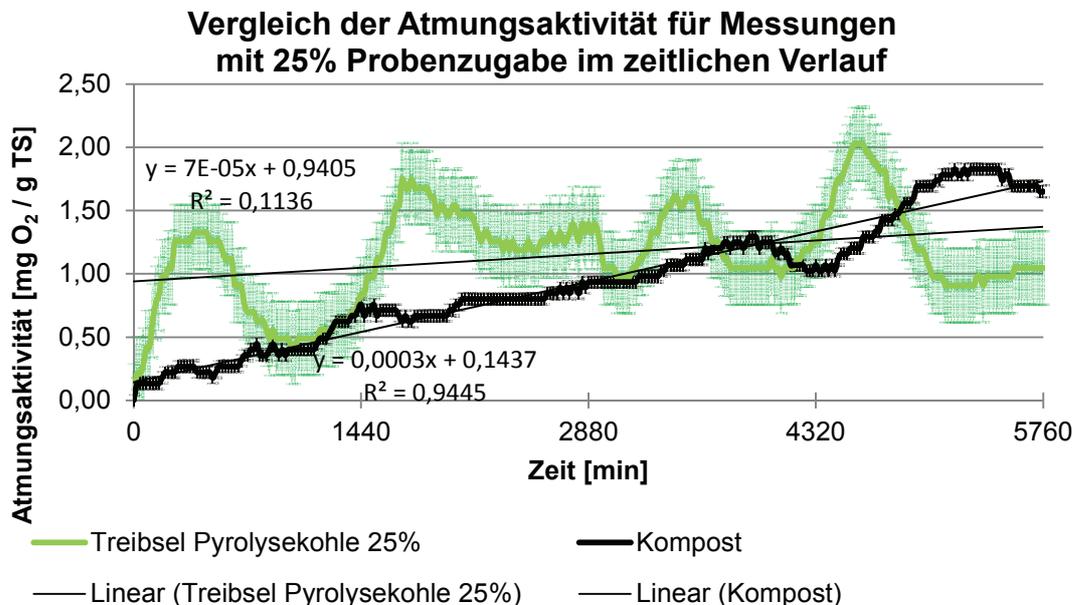
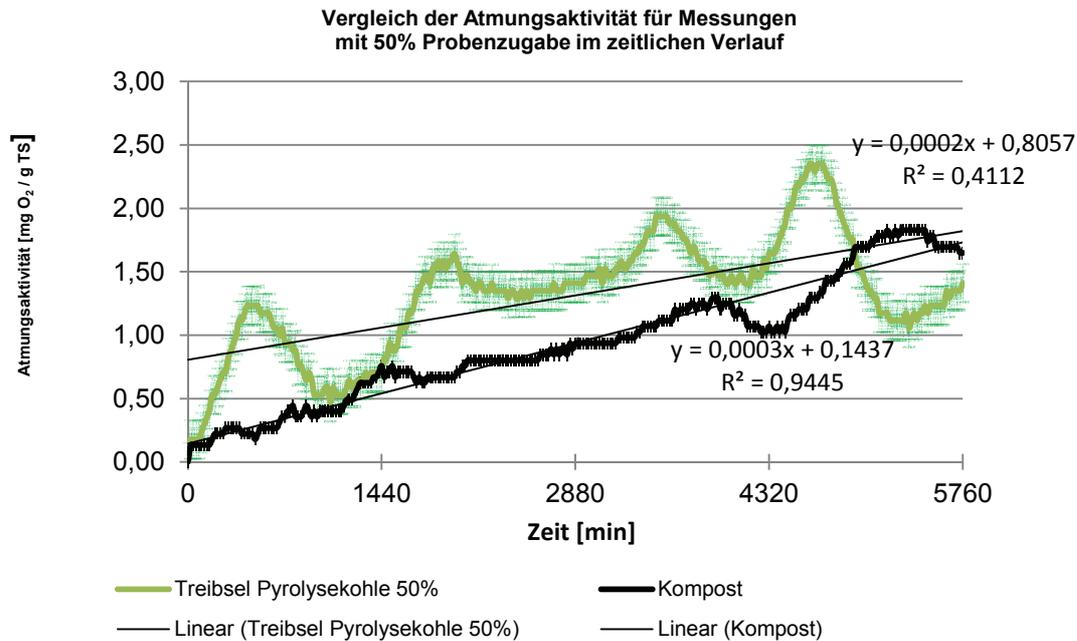


Abbildung 41: Hemmung der Atmungsaktivität durch Pyrolysekohle bei 25 % Probenanteil



**Abbildung 42: Hemmung der Atmungsaktivität durch die Pyrolysekohle bei 50 % Probenanteil**

#### 5.4.10.3 Bestimmung der Humifizierungsart

Die Bestimmung, der in den Proben enthaltenen Huminstoffenarten, wird mittels zweier Extinktionsmessungen und dem daraus gebildetem Quotienten vorgenommen.

In Tabelle 35 sind die Werte für die Extinktionen bei 472 nm und 664 nm aufgeführt. Die sich daraus ergebenden Quotienten sind in Abbildung 43 grafisch dargestellt.

Bis zu einem Extinktionsquotienten von drei handelt es sich, bei den in den Proben überwiegend vorhandenen Huminstoffen, um Grauhuminsäuren. Ist der Quotient größer als drei, so dominieren die Braunhuminsäuren. Fulvosäuren stellen die Mehrheit der enthaltenen Huminstoffe, wenn sich ein Quotient größer als fünf ergibt.

**Tabelle 35: Ergebnisse der photometrischen Messung**

Probenart	Einwaage	Extinktion bei 472 nm	Extinktion bei 664 nm	Quotient (4/6)
Treibsel Frischmasse	0,1189	0,540	0,100	5,40
Treibsel Kompost	0,1249	1,068	0,208	5,13
Treibsel Gärrest	0,1460	1,048	0,202	5,19
Treibsel HTC-Kohle	0,1323	1,700	0,445	3,82
Treibsel Pyrolysekohle	0,1727	0,051	0,045	1,13
Steinkohle	0,1029	0,007	0,006	1,17

Bei der Treibsel-Frischmasse, dem Treibsel-Kompost und dem Treibsel Gärrest liegt der Quotient über 5. In diesen Substraten überwiegen demzufolge die Fulvosäuren. Die HTC-Kohle erzielte einen Quotienten von 3,82 und enthält damit einen hohen Anteil an Braunhuminsäuren. Die Extinktionsquotienten der Pyrolysekohle und der Steinkohle liegen mit 1,13 und 1,17 sehr niedrig. Sie enthalten überwiegend Grauhuminsäuren.

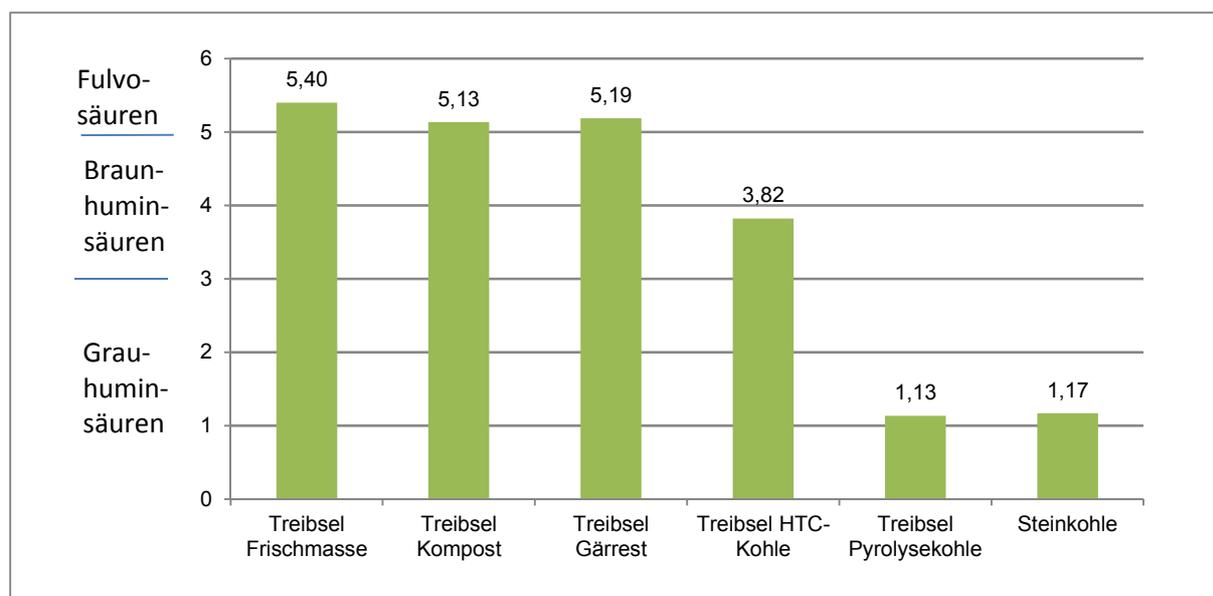


Abbildung 43: Darstellung der überwiegend enthaltenen Huminstoffe

#### 5.4.10.4 DOC und TOC

Die höchsten Mengen organischen Kohlenstoffs lösen sich aus der HTC-Kohle aus Treibsel. Hier finden sich 2.337 mg/l im Eluat. Aus 100 g TS werden dementsprechend 2,337 g als gelöster organischer Kohlenstoff in das Eluat ausgewaschen. Aus der Treibsel-Frischmasse wurden noch 1.540 mg/l, aus dem Treibsel-Gärrest 889 mg/l und dem kompostierten Treibsel 534 mg/l organische Verbindungen ausgewaschen. Die Eluate der Pyrolysekohle und der Steinkohle enthielten mit 61 mg/l und 12 mg/l die geringsten Mengen organischer Verbindungen.

Die Messungen erfolgten in Einfachbestimmung. Lediglich für die HTC-Kohle wurde aufgrund des hohen Wertes ein zweites Eluat erstellt und eine weitere Messung durchgeführt. Der hier angegebene Wert ist der Mittelwert aus diesen zwei Messungen.

Die Gehalte an organischem Kohlenstoff nehmen von der Treibsel-Frischmasse über den kompostierten Treibsel bis zum Gärrest leicht ab. In der HTC-Kohle und der Pyrolysekohle finden sich, im Vergleich zur Treibsel-Frischmasse, höhere organische Kohlenstoffgehalte. Die Steinkohle besteht zu 89,46 % aus organischem Kohlenstoff.

Tabelle 36: Gesamter organischer und anorganischer Kohlenstoffgehalt in %

Probenart	TOC	TIC
Treibsel frisch	36,93	0,026
Treibsel kompostiert	36,86	0,064
Treibsel Gärrest	32,22	0,167
HTC-Kohle Treibsel	46,43	0,011
Pyrolysekohle Treibsel	54,84	0,087
Steinkohle	89,46	0,017

Für die Bestimmung des organischen Kohlenstoffgehaltes (TOC) wird der anorganische Kohlenstoff (TIC) gemessen. In Tabelle 36 sind die Ergebnisse beider Messungen aufgeführt. Der Anteil des anorganischen Kohlenstoffes ist sehr gering und beträgt maximal 0,17 %.

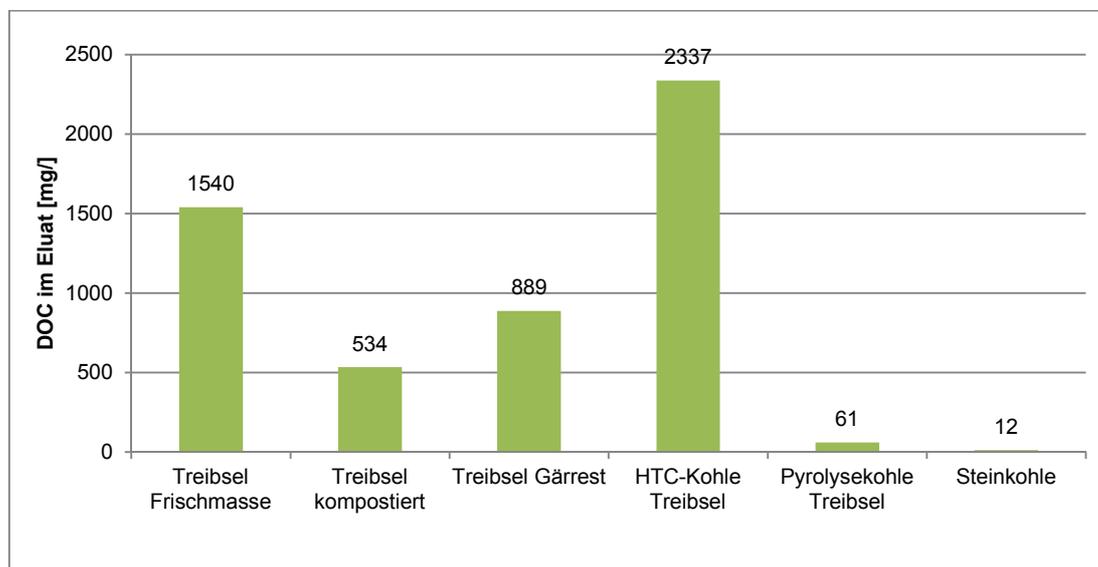


Abbildung 44: Gelöster organischer Kohlenstoff DOC

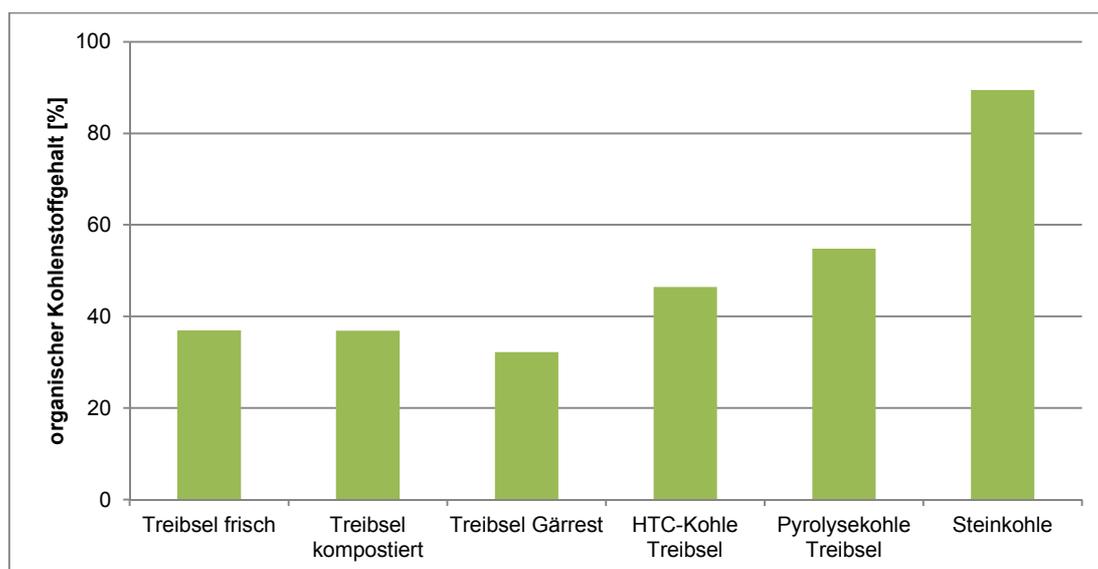
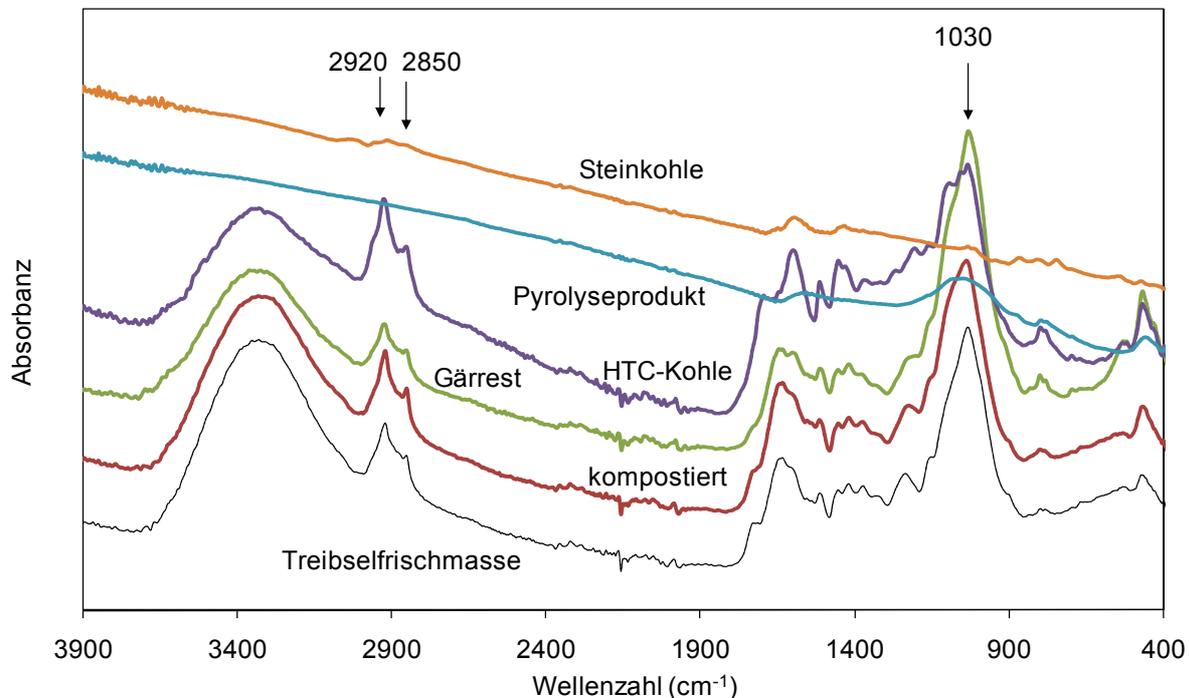


Abbildung 45: Organischer Kohlenstoffgehalt (TOC)

#### 5.4.10.5 Infrarotspektroskopische Untersuchungen

Die infrarotspektroskopische Untersuchung der Proben ergibt folgende Absorptionsspektren: Im Absorptionsspektrum (Abbildung 46) ist zu erkennen, dass die Treibsel Frischmasse, der Treibsel Kompost und der Treibsel Gärrest sehr ähnliche Strukturen aufweisen. Auch die HTC-Kohle weicht nur wenig von diesen Strukturen ab. Das Absorptionsspektrum der Pyrolysekohle lässt die thermo-chemische Behandlung deutlich erkennen. Die Absorptionsbanden weisen nur geringe Schwingungen auf. Das Spektrum der Pyrolysekohle ähnelt dem der Steinkohle.

Auffällig sind bei der Treibsel Frischmasse, dem Kompost, dem Gärrest und der HTC-Kohle die ausgeprägten Methylenbanden ( $\text{CH}_2$ ). Diese sind beim Kompost ausgeprägter als bei der Frischmasse, nehmen beim Gärrest wieder ab, steigen bei der HTC-Kohle jedoch wieder stark an. Im Absorptionsspektrum der Pyrolysekohle ist keine Methylenbande mehr zu erkennen.



**Abbildung 46: Absorptionsspektren der infrarotspektroskopischen Untersuchung**

Der sogenannte Fingerprintbereich zwischen 1600 und 1000  $\text{cm}^{-1}$  ist charakteristisch für das Gesamtmolekül, da es auf Gerüstschwingungen zurückzuführen ist. In diesem Bereich sind sich die Frischmasse, der Kompost, der Gärrest und die HTC-Kohle sehr ähnlich. Eine hohe Absorption tritt bei der Frischmasse, dem Kompost, dem Gärrest und der HTC-Kohle ebenfalls bei einer Wellenzahl von 1030  $\text{cm}^{-1}$  auf, welche charakteristisch für die enthaltenen Silikate ist. Die Pyrolysekohle weist in diesem Bereich nur noch eine geringe Absorption auf (SMIDT & TINTNER, 2011).

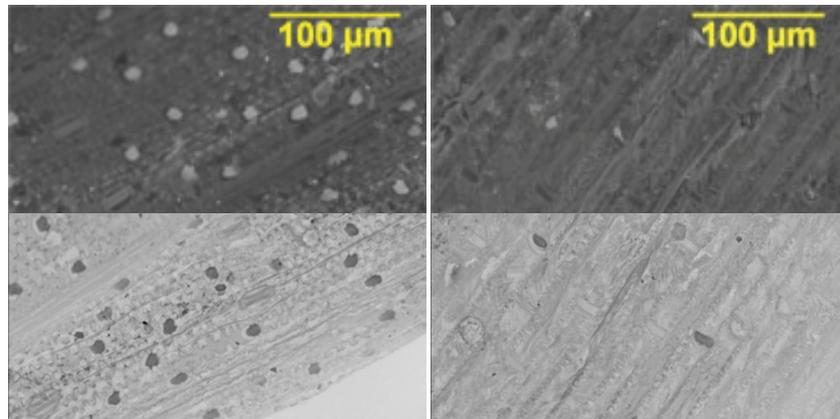
#### 5.4.10.6 REM-Aufnahmen und Energiedispersive Röntgenanalyse

Anhand der Rasterelektronenmikroskopaufnahmen lassen sich die Strukturen der einzelnen Proben vergleichen.

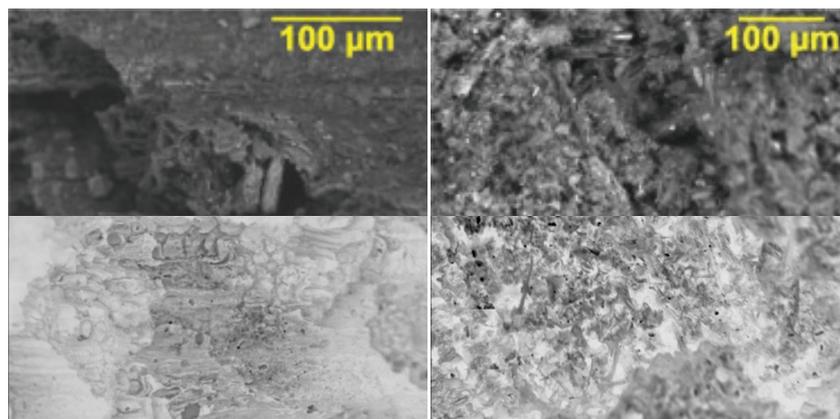
In Abbildung 47 links ist die Oberfläche eines Partikels aus der Treibsel Frischmasse und rechts ist die Oberfläche des kompostierten Treibsel dargestellt. Bei der Frischmasse ist ein klarer struktureller Aufbau des Substrates zu erkennen, während bei dem kompostierten Treibsel ist eine beginnende Auflösung dieser Strukturen zu erkennen ist. Das gleiche gilt für den Gärrest aus Treibsel, der in Abbildung 48 (links) dargestellt ist.

Die HTC-Kohle aus Treibsel, die in Abbildung 48 (rechts) dargestellt wird, besitzt eine strukturlose Oberfläche.

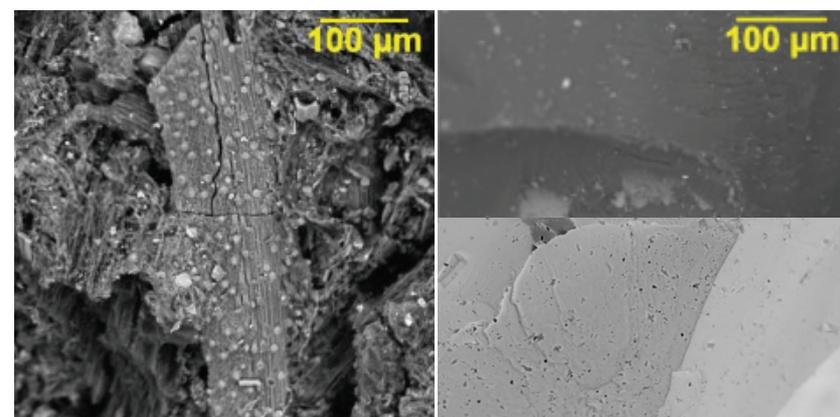
Bei der Pyrolysekohle aus Treibsel (Abbildung 49, links) sind strukturierte und unstrukturierte Bereiche zu erkennen. Die strukturierten Bereiche zeigen geringe Porosität, wohingegen die unstrukturierten eine große Oberfläche und große innere Porenwandoberflächen erkennen lassen. Abbildung 49 (rechts) zeigt die glatte Oberfläche der Steinkohle, an der schollenartige Abbrüche zu erkennen sind.



**Abbildung 47: Treibsel Frischmasse (links), kompostiertes Treibsel (rechts)**



**Abbildung 48: Treibsel-Gärrest (links), HTC-Kohle aus Treibsel (rechts)**



**Abbildung 49: Pyrolysekohle aus Treibsel (links), Steinkohle (rechts)**

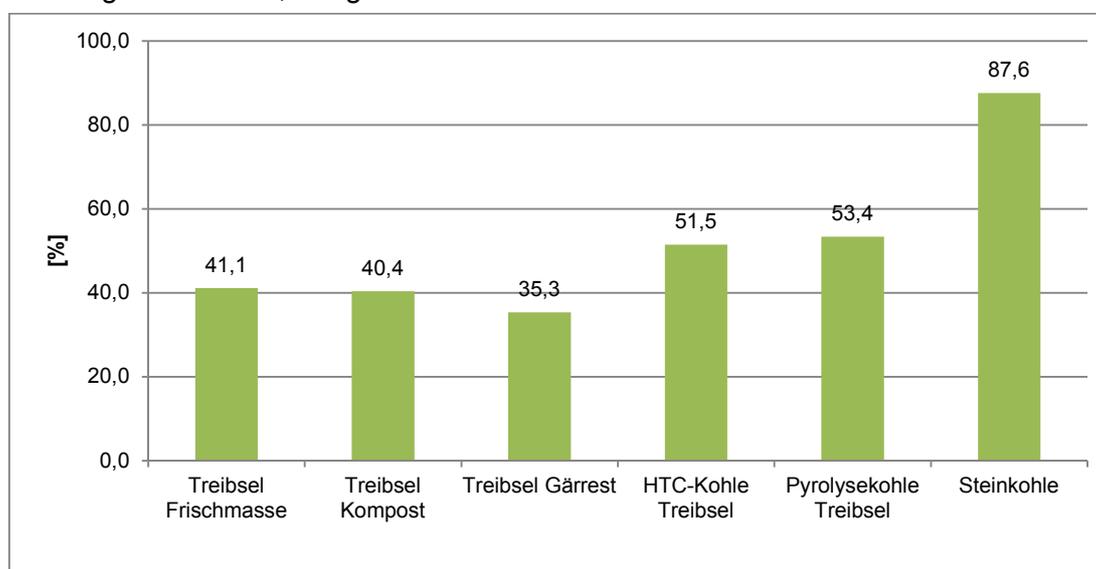
### 5.4.10.7 Ergebnisse der Elementaranalyse

Die Bestimmung der Gehalte an Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Stickstoff (N) liefern folgendes Ergebnis:

**Tabelle 37: Ergebnisse der CHN-Analyse**

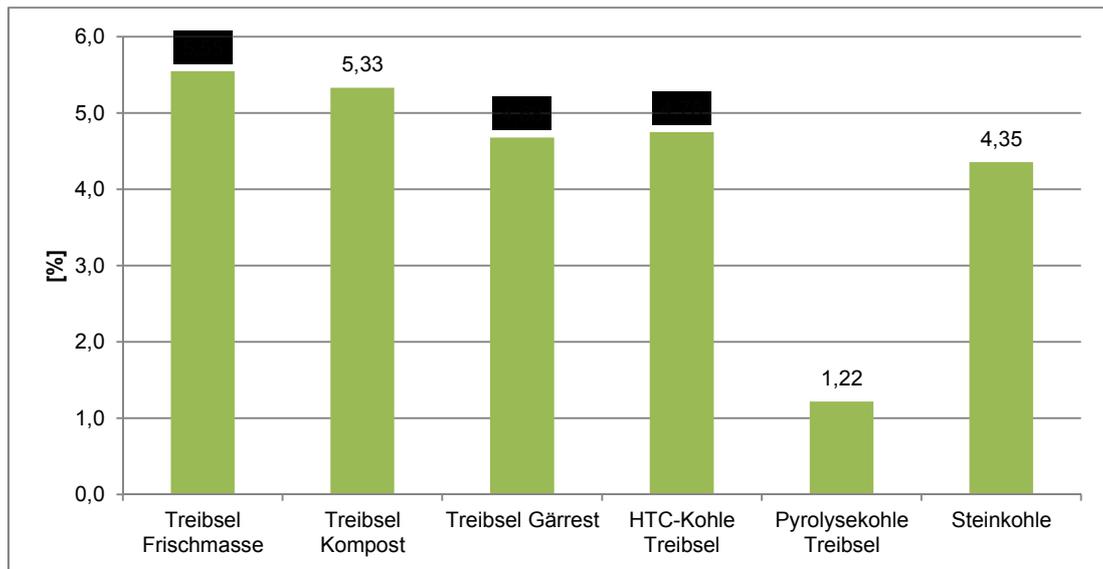
Probe	C-Gehalt [%]	H-Gehalt [%]	N-Gehalt [%]
Treibsel-Frischmasse	41,13	5,55	1,58
Treibsel-Kompost	40,37	5,33	2,32
Treibsel-Gärrest	35,31	4,68	2,00
HTC-Kohle Treibsel	51,49	4,75	2,35
Pyrolysekohle Treibsel	53,38	1,22	1,53
Steinkohle	87,64	4,35	1,38

Wie aus Tabelle 37 und Abbildung 50 zu erkennen ist, nimmt der Kohlenstoffgehalt von der Frischmasse zum Treibsel-Kompost bis zum Treibsel-Gärrest leicht ab. Der Kohlenstoffgehalt der Treibsel-Frischmasse und dem Treibsel-Kompost ist jedoch nahezu identisch. Bei den aus thermischen und chemischen Prozessen entstandenen Kohlen, ist eine deutliche Anreicherung des Kohlenstoffs zu erkennen. Bei der HTC-Kohle erfolgte durch den Carbonisierungsprozess eine Erhöhung des Kohlenstoffgehaltes von 41,13 % auf 51,49 %, . Das stellt eine Anreicherung um 25 % dar. Bei der Pyrolysekohle erhöht sich der Kohlenstoffgehalt durch den Pyrolyseprozess von 41,1 % auf 53,4 %. Hier fand eine Anreicherung des Kohlenstoffs um 30 % statt. In der Steinkohle, die durch natürliche Prozesse entstand, wurde ein Kohlenstoffgehalt von 87,6 % gemessen.



**Abbildung 50: Darstellung des Kohlenstoffgehaltes der verschiedenen Proben**

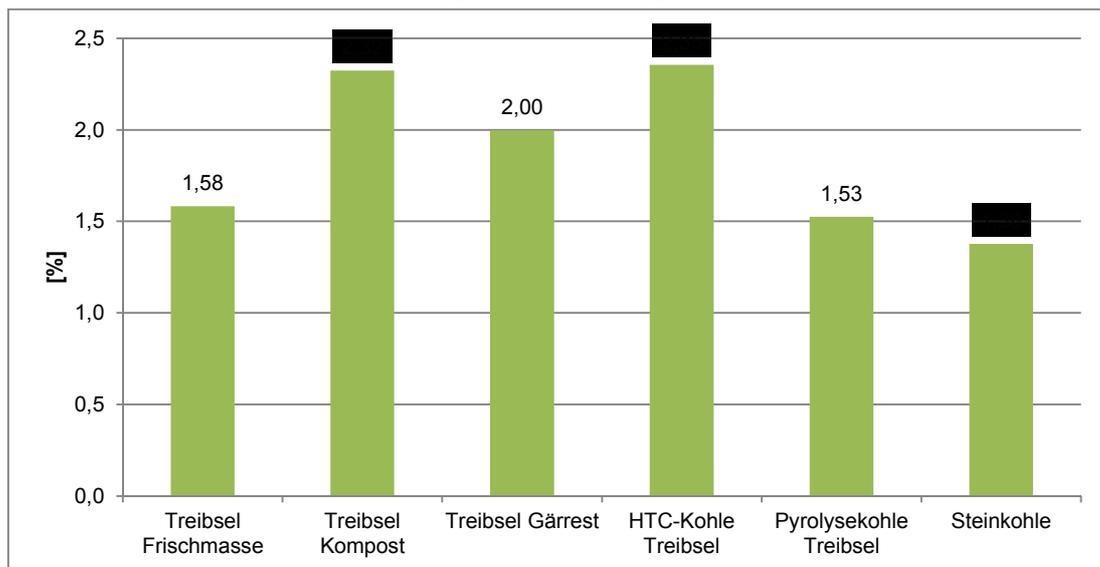
Der Wasserstoffgehalt hat sich, bezogen auf die Frischmasse, in allen anderen Substanzen reduziert (Abbildung 51).



**Abbildung 51: Darstellung des Wasserstoffgehaltes der verschiedenen Proben**

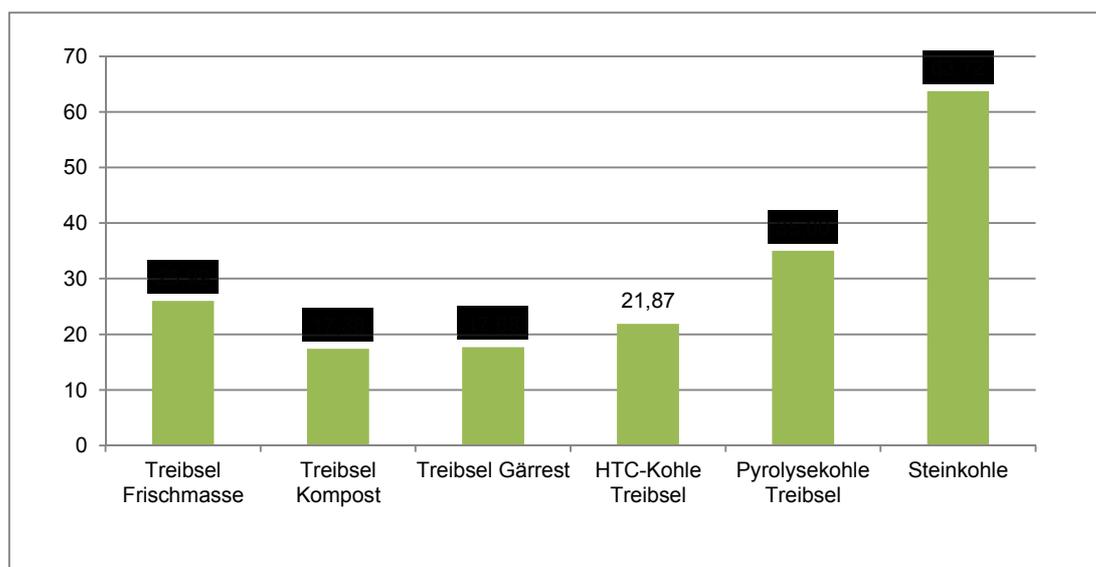
Durch den biologischen Prozess der Kompostierung verringerte sich der Wasserstoffgehalt von 5,55 % auf 5,33 %. Die Abreicherung ist gering und beträgt ca. 4,0 %. Durch den Prozess der Vergärung reduzierte sich der Wasserstoffgehalt um 15,7 %. Er nahm von 5,55 % auf 4,68 % ab. Bei der HTC-Kohle fand eine Abreicherung um 14,4 % und bei der Pyrolysekohle um 78,0 % statt. Die HTC-Kohle enthält noch 4,75 % Wasserstoff und die Pyrolysekohle besteht noch zu 1,22 % aus Wasserstoff.

Der Stickstoffgehalt liegt bei den einzelnen Substraten zwischen 1,38 % und 2,35 % (Abbildung 52). Beim Kompost, dem Gärrest und der HTC-Kohle fand eine Anreicherung statt, wohingegen sich der Stickstoffgehalt bei der Pyrolysekohle geringfügig reduzierte. Die Steinkohle weist mit 1,38 % den niedrigsten Stickstoffgehalt auf.



**Abbildung 52: Darstellung des Stickstoffgehaltes der verschiedenen Proben**

Ein wichtiger Parameter für den Ablauf mikrobiologischer Prozesse ist das Verhältnis aus Kohlenstoff und Stickstoff.



**Abbildung 53: Darstellung des C/N-Verhältnisses der verschiedenen Proben**

Ausgehend von der Treibsel Frischmasse, die ein C/N-Verhältnis von 25,99 aufweist, verringern sich die Werte für den Treibsel Kompost, den Treibsel Gärrest und der HTC-Kohle aus Treibsel. Die Pyrolysekohle aus Treibsel hat mit einem C/N-Verhältnis von 35 einen höheren Wert als die Treibsel-Frischmasse. Die stabile Steinkohle weist mit 63,72 das höchste C/N-Verhältnis auf.

Mit den erhaltenen Daten aus der CHN-Analyse und weiteren Berechnungen lässt sich ein Inkohlungsdiagramm erstellen. Dieses Diagramm bildet das Verhältnis von Wasserstoff zu Kohlenstoff über dem Verhältnis von Sauerstoff zu Kohlenstoff ab. Folgende Sauerstoffgehalte wurden berechnet.

**Tabelle 38: Berechnete Sauerstoffgehalte der Proben**

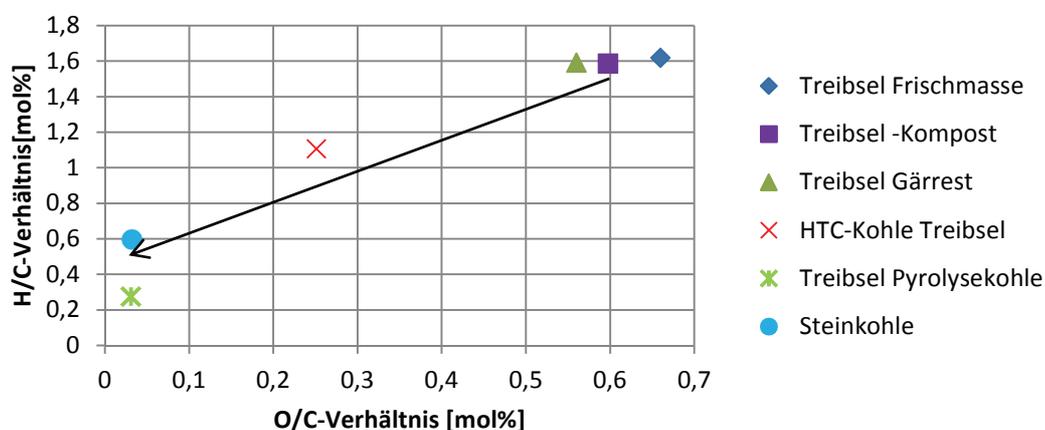
Probe	Sauerstoffgehalt [%]
Treibsel-Frischmasse	36,19
Treibsel-Kompost	32,17
Treibsel-Gärrest	26,37
HTC-Kohle Treibsel	17,26
Pyrolysekohle Treibsel	2,21
Steinkohle	3,76

Für die Erstellung des Inkohlungsdiagramms werden daraus folgende molare H/C und O/C-Werte berechnet und in Abbildung 54 dargestellt: Die zunehmende Stabilität durch die veränderte Zusammensetzung der Substrate ist im Inkohlungsdiagramm (Abbildung 54), durch einen Pfeil dargestellt. Die Treibsel Frischmasse, der Treibsel Kompost und der Treibsel Gärrest liegen dicht beieinander im rechten oberen Bereich des Inkohlungsdiagramms. Die HTC Kohle liegt an dem Weg des Pfeiles, der die zunehmende Stabilität für natürliche Verbindungen anzeigt, auf 2/3 der Strecke.

Die Pyrolysekohle liegt unterhalb der Steinkohle, die sich am unteren Ende des Pfeiles befindet. Durch den niedrigen Wasserstoffgehalt in der Pyrolysekohle ist das H/C-Verhältnis sehr klein. Das O/C-Verhältnis entspricht dem der Steinkohle.

**Tabelle 39: O/C und H/C Verhältnisse**

Probe	O/C	HC
Treibsel-Frischmasse	0,65989119	1,61805511
Treibsel-Kompost	0,59768076	1,58457473
Treibsel-Gärrest	0,56020923	1,59006798
HTC-Kohle Treibsel	0,25144155	1,10638353
Pyrolysekohle Treibsel	0,03107925	0,27390245
Steinkohle	0,03220613	0,59620015



**Abbildung 54: Inkohlungsdiagramm**

## 5.5 Untersuchungen zur energetischen Verwertung

Versuche zur energetischen Verwertung von Treibsel werden schwerpunktmäßig im Bereich der Vergärung durchgeführt. Neben Batchversuchen zur Gasertragsbestimmung werden zwei eigens entwickelte Verfahren untersucht. Dies sind die Festbett-Feststoffvergärung und die Vergärung in einer zweistufigen Vergärungsanlage, die im Gegensatz zur Festbett-Feststoffvergärung kontinuierlich betrieben wird, aber ebenso mit einem Festbett arbeitet.

### 5.5.1 GRW-Biogasertragstest

In diesem Kapitel erfolgt die Darstellung der Ergebnisse der GRW-Biogasertragstests der Treibselproben aus den Jahren 2010 und 2011. Die Darstellung erfolgt in tabellarischer Darstellung der kumulierten Biogasmengen und zeigt diese in Normlitern bezogen auf ein Kilogramm der organischen Trockensubstanz [ $l_N/kg$  oTS] der eingesetzten Probe. Ebenfalls werden die erzielten Methanerträge in  $l_N/kg$  oTS aufgelistet. Die dargestellten Ergebnisse bilden jeweils den Mittelwert der Dreifachbestimmung einer Einzelprobe ab, daher werden zusätzlich die Standardabweichungen der Biogas- und Methanmenge aufgeführt. Weiterhin wird in

den Tabellen auch der gemittelte Methangehalt des entstandenen Biogases in Prozent aufgeführt. Die Tabelle 40 zeigt die Ergebnisse des GRW-Biogasertragstests der Treibselproben aus dem Jahr 2010. In Tabelle 41 werden die Ergebnisse der Treibselproben aus dem Jahr 2011 aufgelistet.

**Tabelle 40: Ergebnisse des GRW-Biogasertragstests der Treibselproben von 2010**

Deichverband	TS	oTS	kum. Biogasmenge	kum. Methanmenge	kum. Biogasmenge	kum. Methanmenge	Methangehalt Ø
	[%]	[%TS]	[l <sub>N</sub> /kg oTS]		[l <sub>N</sub> /kg FM]		[%]
Moormerländer DA	33,0	79,4	247,8	137,7	64,9	36,1	55,7
DA Krummhörn	46,8	76	219,6	123,9	78,1	44,0	56,3
II. Oldenburgischer DB	25,3	73,1	203,6	125,6	37,6	23,2	61,3
DVB Osterstader Marsch	52,2	90,3	197,2	107,3	93,1	50,6	54,3
DVB Land Wursten	70,1	88,3	222,9	117,8	137,9	72,9	52,7
DVB Kehdingen-Oste	39,6	86,0	232,6	126,4	79,2	43,0	54,3
Mittelwerte	44,5	82,2	220,6	123,1	81,8	45,0	55,8

Die Vergärungsversuche der Treibselproben werden über den Zeitraum von 80 Tagen unter konstanten Temperaturbedingungen im Batchfermenter vergoren. Normalerweise beträgt der Zeitraum für einen GRW-Biogasertragstest beträgt bis zu 60 Tage.

Aus dem Treibsel der Moormerländer DA sind durchschnittlich rund 248 l<sub>N</sub>/kg oTS bei einem durchschnittlichen Methangehalt von 56 % entstanden. Dies entspricht ca. 138 l<sub>N</sub>/kg oTS Methan. Auf Frischmasse bezogen, erzielte das Treibsel der Moormerländer DA 64,9 l<sub>N</sub>/kg FM Biogas bzw. 36,1 l<sub>N</sub>/kg FM Methan.

Die Vergärung des Treibsel der DA Krummhörn ergibt im Mittel eine kumulierte Biogasmenge von rund 220 l<sub>N</sub>/kg oTS bei einem durchschnittlichen Methangehalt von etwa 56 %. Bezogen auf die Frischmasse wird in dem Versuch eine kumulierte Biogasmenge von 124 l<sub>N</sub>/kg FM erzielt. Der Mittelwert der kumulierten Methanmengen beläuft sich auf etwa 124 l<sub>N</sub>/kg oTS bzw. auf 44 l<sub>N</sub>/kg FM.

Bei der Vergärung des Treibsel aus dem Zuständigkeitsbereich des II. Oldenburgischen DB beträgt die gemittelte, kumulierte Biogasmenge etwa 204 l<sub>N</sub>/kg oTS und 65 l<sub>N</sub>/kg FM bei einem durchschnittlichen Methangehalt von 61 %. Im Mittel werden rund 126 l<sub>N</sub>/kg oTS bzw. 23 l<sub>N</sub>/kg FM Methan durch die Vergärung erzielt.

Die Treibselprobe des DVB Osterstader Marsch ergibt im Vergärungsversuch rund 197 l<sub>N</sub>/kg oTS und 93 l<sub>N</sub>/kg FM. Der mittlere Methangehalt beträgt rund 54 %, sodass der Mittelwert der kumulierten Methanmenge bei rund 107 l<sub>N</sub>/kg oTS bzw. 51 l<sub>N</sub>/kg FM liegt.

Der Mittelwert der kumulierten Biogasmenge von Treibsel des DVB Land Wursten liegt bei etwa 223 l<sub>N</sub>/kg oTS und 138 l<sub>N</sub>/kg FM bei einem mittleren Methangehalt von rund 53 %. Der Mittelwert der kumulierten Methanmenge beträgt ca. 118 l<sub>N</sub>/kg oTS und rund 73 l<sub>N</sub>/kg FM.

Aus dem Treibsel des DVB Kehdingen Oste wird eine kumulierte Biogasmenge von rund 233 l<sub>N</sub>/kg oTS bzw. 79 l<sub>N</sub>/kg FM mit einem durchschnittlichen Methangehalt von 54 % erzielt. Der Mittelwert der kumulierten Methangehalte liegt bei rund 126 l<sub>N</sub>/kg oTS bzw. 43 l<sub>N</sub>/kg FM.

Der Mittelwert aller untersuchten Proben beträgt für die kumulierte Biogasmenge rund 221 l<sub>N</sub>/kg oTS. Bezogen auf die Frischmasse lag der Mittelwert für die kumulierte Biogasmenge bei etwa 82 l<sub>N</sub>/kg FM. der Mittelwert des Methangehaltes liegt bei rund 56 %. Die durchschnittliche kumulierte Methanmenge beträgt rund 123 l<sub>N</sub>/kg oTS bzw. 45 l<sub>N</sub>/kg FM.

**Tabelle 41: Ergebnisse des GRW-Biogasertragstests der Treibselproben von 2011**

Deichverband	TS	oTS	kum. Biogasmenge	kum. Methanmenge	kum. Biogasmenge	kum. Methanmenge	Methangehalt Ø
	[%]	[%TS]	[l <sub>N</sub> /kg oTS]		[l <sub>N</sub> /kg FM]		[%]
DVB Heede-ASD-Pb.	62,3	83,2	89,7	52,1	46,4	26,9	58,0
Moormerländer DA	44,4	82,7	146,5	81,8	53,8	30,1	55,5
DA Krummhörn	29,2	83,6	189,8	114,6	46,3	28,0	60,7
II. Oldenburgischer DB	76,6	80,1	130,9	72,1	80,4	44,3	55,3
DVB Osterstader Marsch	72,7	89,2	95,4	53,4	61,8	34,6	56,7
DVB Land Wursten	68,8	64,1	229,7	123,1	101,3	54,3	53,3
VB Land Wursten hum.	26,7	80,2	169,6	86,3	36,4	18,5	50,7
Mittelwerte	54,4	80,4	150,2	83,3	60,9	33,8	55,7

Auch für diese Proben wird der Zeitraum der Untersuchung von 60 Tagen auf 80 Tage erweitert, um vergleichbare Untersuchungsbedingungen wie bei den Biogasertragstests im Vorjahr zu realisieren.

Aus der Treibselprobe des DVB Heede-Aschendorf-Papenburg wird eine kumulierte Biogasmenge von 90 l<sub>N</sub>/kg oTS bzw. 46 l<sub>N</sub>/kg FM erzeugt. Bei einem durchschnittlichen Methangehalt von 58 % ergeben sich hieraus kumulierte Methanmengen von 52 l<sub>N</sub>/kg oTS bzw. 27 l<sub>N</sub>/kg FM.

Die Treibselprobe der Moormerländer DA ergibt eine kumulierte Biogasmenge von 147 l<sub>N</sub>/kg oTS bzw. 54 l<sub>N</sub>/kg FM. Die kumulierten Methanmengen liegen bei rund 82 l<sub>N</sub>/kg oTS und 30 l<sub>N</sub>/kg FM. Der Methangehalt beträgt folglich ungefähr 55 %.

Das Ergebnis des Vergärungsversuchs des Treibsel aus dem Zuständigkeitsbereich der DA Krummhörn liegt für die kumulierte Biogasmenge bei rund 190 l<sub>N</sub>/kg oTS bzw. 46 l<sub>N</sub>/kg FM. Der Methangehalt im Biogas liegt bei etwa 61 %. Somit wurden kumulierte Methanerträge von ca. 115 l<sub>N</sub>/kg oTS und 28 l<sub>N</sub>/kg FM erzielt.

Die Treibselbiomasse aus dem Zuständigkeitsbereich des II. Oldenburgischen DB ergibt im Vergärungsversuch kumulierte Biogaserträge von rund 131 l<sub>N</sub>/kg oTS und 80 l<sub>N</sub>/kg FM. Der Methangehalt liegt im Durchschnitt bei ca. 55 %. Die kumulierten Methanerträge liegen bei etwa 72 l<sub>N</sub>/kg oTS und 44 l<sub>N</sub>/kg FM.

Die kumulierten Biogasmengen aus der Vergärung des Treibsel vom DVB Osterstader Marsch liegen bei etwa 95 l<sub>N</sub>/kg oTS und 62 l<sub>N</sub>/kg FM. Bei einem durchschnittlichen Methan-

gehalt von rund 57 % wird ein kumulierter Methanertrag von ca. 53 l<sub>N</sub>/kg oTS bzw. 35 l<sub>N</sub>/kg FM festgestellt.

Aus dem Deichverband Land Wursten werden zwei unterschiedliche Treibselproben vergoren. Bei der einen handelt es sich um eine Treibselprobe, die im Rahmen der Probenahme-kampagne 2011 direkt vom Deichfuß geborgen wird. Bei der anderen Probe handelte es sich um Treibsel, das bereits längere Zeit auf einem Haufen zur Entsorgung humifiziert wurde.

Aus der Probe vom Deichfuß wird eine kumulierte Biogasmenge von rund 229 l<sub>N</sub>/kg oTS bzw. 101 l<sub>N</sub>/kg FM ermittelt. Der Methangehalt liegt im Durchschnitt bei rund 53 %. Der kumulierte Methanertrag liegt bei 123 l<sub>N</sub>/kg oTS und 54 l<sub>N</sub>/kg FM.

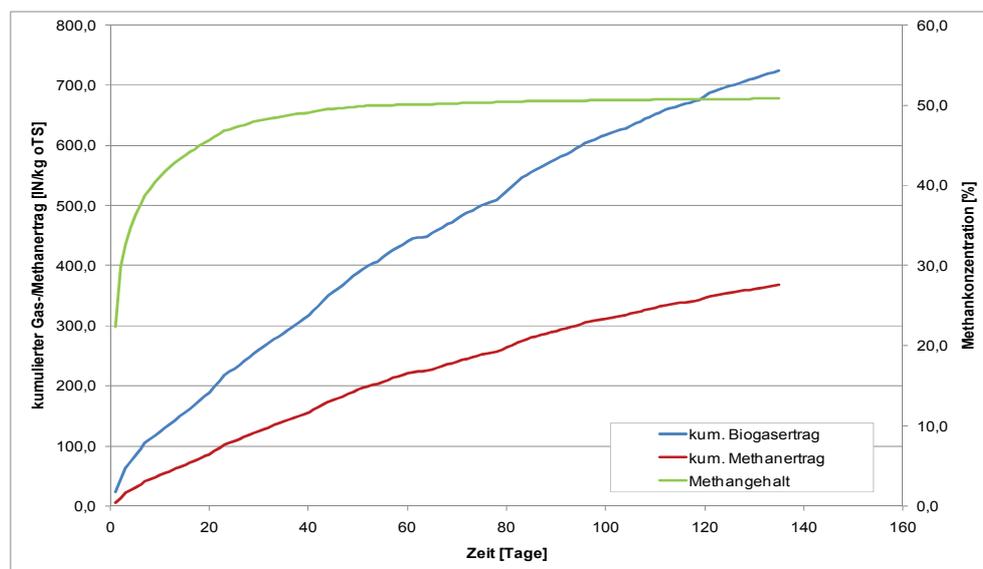
Aus dem humifizierten Treibsel wird eine kumulierte Biogasmenge von rund 169 l<sub>N</sub>/kg oTS bzw. 36 l<sub>N</sub>/kg FM gebildet. Bei einem durchschnittlichen Methangehalt von etwa 51 % entstand eine Methanmenge von 82 l<sub>N</sub>/kg oTS bzw. 18,5 l<sub>N</sub>/kg FM.

Für alle Treibselproben, außer der Probe des humifizierten Treibsel des DVB Land Wursten, wird ein Mittelwert der kumulierten Biogasmenge von rund 143 l<sub>N</sub>/kg oTS und 64 l<sub>N</sub>/kg FM errechnet. Der errechnete Mittelwert der durchschnittlichen Methangehalte dieser Proben liegt bei ca. 57 %. Der Mittelwert der kumulierten Methangehalte liegt bei etwa 81 l<sub>N</sub>/kg oTS und rund 36 l<sub>N</sub>/kg FM.

### 5.5.2 Festbett-Feststoffvergärung

Die eingesetzte Treibselprobe weist zu Beginn der Versuche einen TS-Gehalt von 33,0 % und einen oTS-Gehalt von 79,4 % auf.

Im Vergleich zum GRW Biogasertragstest wird der Versuch deutlich länger betrieben. Der Versuch wird erst nach 135 Tagen beendet. Der Verlauf der Biogasertragskurve, der Methankurve und des Methangehalts des Versuchs sind in der folgenden Abbildung dargestellt.



**Abbildung 55: Gasertragskurve Festbett-Feststoffvergärung**

Der Biogas- bzw. Methanertrag nach Beendigung des Versuchs liegt bei 724 l<sub>N</sub>/kg oTS bzw. 358,6 l<sub>N</sub>/kg oTS. Die Methankonzentration im Biogas steigt während der Anfahrphase steil an und stagniert nach ca. 40 Tagen bei ca. 50 %.

### 5.5.3 Zweistufige Vergärungsanlage

In der zweistufigen Vergärungsanlage (vgl. Kapitel 4.6.3) werden zwei Versuchsvarianten durchgeführt. Zunächst wird diese für die Dauer von ca. 40 Tagen mit Mais beschickt. Anschließend werden die Untersuchungsergebnisse des kontinuierlichen Vergärungsversuches für die Treibselbiomasse im Rahmen der zweiten Versuchsreihe während einer Dauer von 38 Tagen ermittelt.

Bei der Vergärung von Mais liegt die Biogasproduktivität bei durchschnittlich  $48 \text{ L}_N/(\text{m}^3 \text{ h})$ . Bei einer Methankonzentration von 63 % errechnet sich eine Methanproduktivität von  $30 \text{ L}_N/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ . Aus dieser stündlichen Biogasproduktion ergibt sich bei einer Raumbelastung von  $1,7 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \text{ d})$  eine Biogas- bzw. Methanausbeute von  $678 \text{ L}_N/\text{kg oTS}$  bzw. von  $426 \text{ L}_N/\text{kg oTS}$ .

Im weiteren Versuchsverlauf wird die Fütterung mit der Maissilage in gleicher Menge fortgesetzt. Zusätzlich wird die Versuchsanlage mit Treibsel als Co-Substrat im gleichen oTS-Massenverhältnis wie die Maissilage beschickt, so dass eine Raumbelastung von  $3,4 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \text{ d})$  realisiert wird. Bei dem Treibsel handelt es sich um eine Mischprobe aller 6 Standorte aus dem Jahr 2011. Die ermittelte Biogasproduktivität in dieser Versuchsphase beträgt  $65 \text{ L}_N/(\text{m}^3 \text{ h})$ , bei einem Methangehalt um 60 % ca.  $38 \text{ L}_N/(\text{m}^3 \text{ h})$  Methan. Bezogen auf die gesamte Raumbelastung aus Maissilage (50 %) und Treibselbiomasse (50 %) von  $3,4 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \text{ d})$  wird eine Methanausbeute von  $273 \text{ L}_N/\text{kg oTS}$  erzielt. Daraus ergibt sich eine Differenz der ermittelten Methanproduktion aus der ersten und der zweiten Versuchsphase von  $8 \text{ L}_N/(\text{m}^3 \text{ h})$ . Es wird davon ausgegangen, dass die Differenz der Methanbildung aus Treibselbiomasse entspricht. Folglich lässt sich eine Methanausbeute aus der eingebrachten Treibselbiomasse von  $113 \text{ L}_N/\text{kg oTS}$  ermitteln.

Die Biogas- bzw. Methanausbeute aus der Treibselmischprobe wird nach Durchlauf einer Verweilzeit von 13 Tagen nach Fütterungsbeginn bestimmt. Die Bewertungszeiträume sind in Abbildung 56 dargestellt.

Neben den Hauptkomponenten des Biogases werden auch Schwefelwasserstoff und Wasserstoff erfasst. Die Ergebnisse sind in Abbildung 57 dargestellt. Der  $\text{H}_2\text{S}$ -Gehalt liegt anfänglich bei über 120 ppm, im Versuchsverlauf sinkt dieser Wert auf unter 40 ppm. Konzentrationen von  $\text{H}_2$  werden im Bereich zwischen 20 und 80 ppm ermittelt.

Der spezifische Methanverlust in der Hydrolysestufe beträgt in der ersten Versuchsphase beim Einsatz von Maissilage etwa  $7 \text{ L}_N/\text{kg oTS}$ . Während der zusätzlichen Fütterung mit Treibsel sind die Hydrolysegasmengen etwa gleich geblieben, wobei die Methangehalte von etwa 6 % teilweise auf über 10 % angestiegen. So liegen die Methanverluste während der Fütterung mit Maissilage und der Treibselbiomasse als Co-Substrat bei ca.  $6,5 \text{ L}_N/\text{kg oTS}$ .

In Abbildung 58 ist die täglich gebildete Methanmenge in der Hydrolysestufe dargestellt.

Während der Fütterung mit Maissilage und Treibselbiomasse sind die Schwefelwasserstoff- und Wasserstoffkonzentrationen deutlich zurückgegangen.

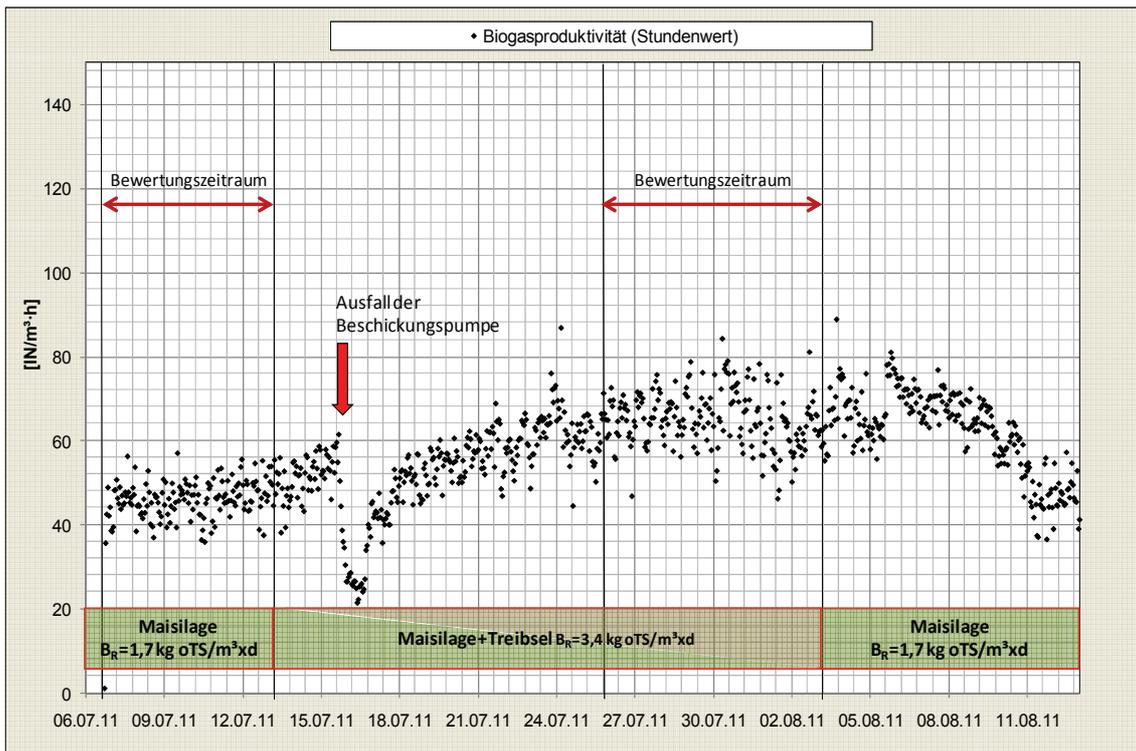


Abbildung 56: Biogasproduktivität in den Versuchsphasen (2-stufige Vergärungsanlage)

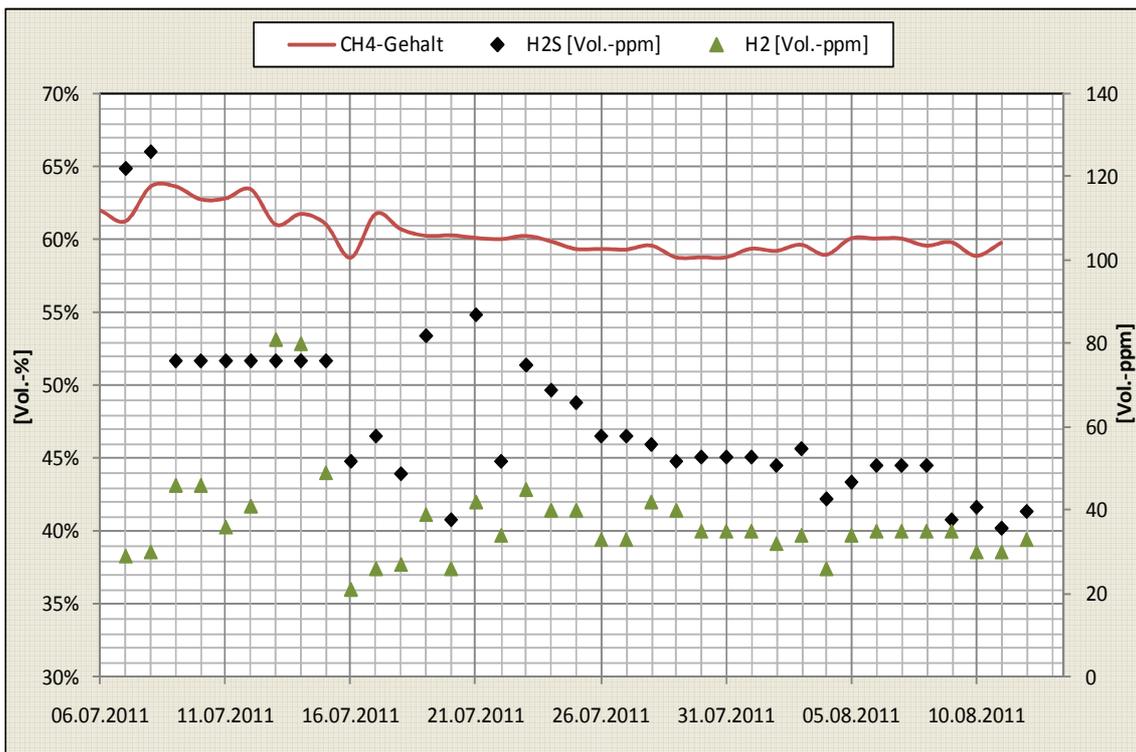


Abbildung 57: Gaszusammensetzung in den Versuchsphasen (2-stufige Vergärungsanlage)

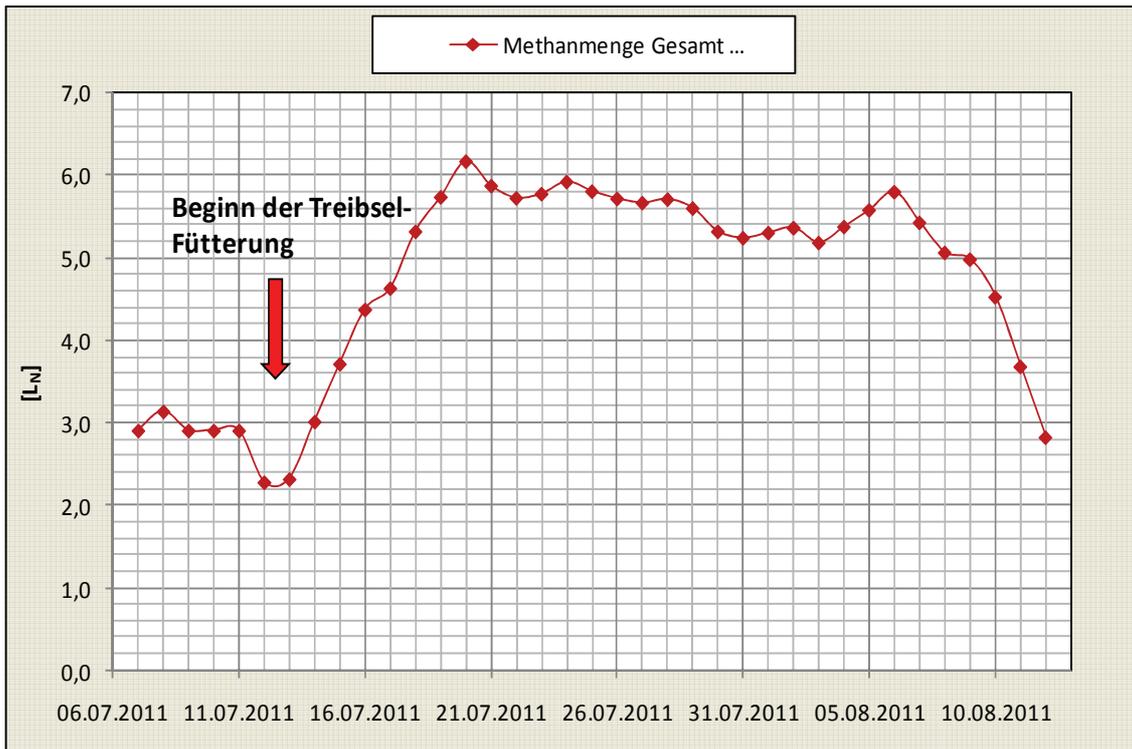


Abbildung 58: gebildete Methanmengen in der Hydrolysestufe (2-stufige Vergärungsanlage)

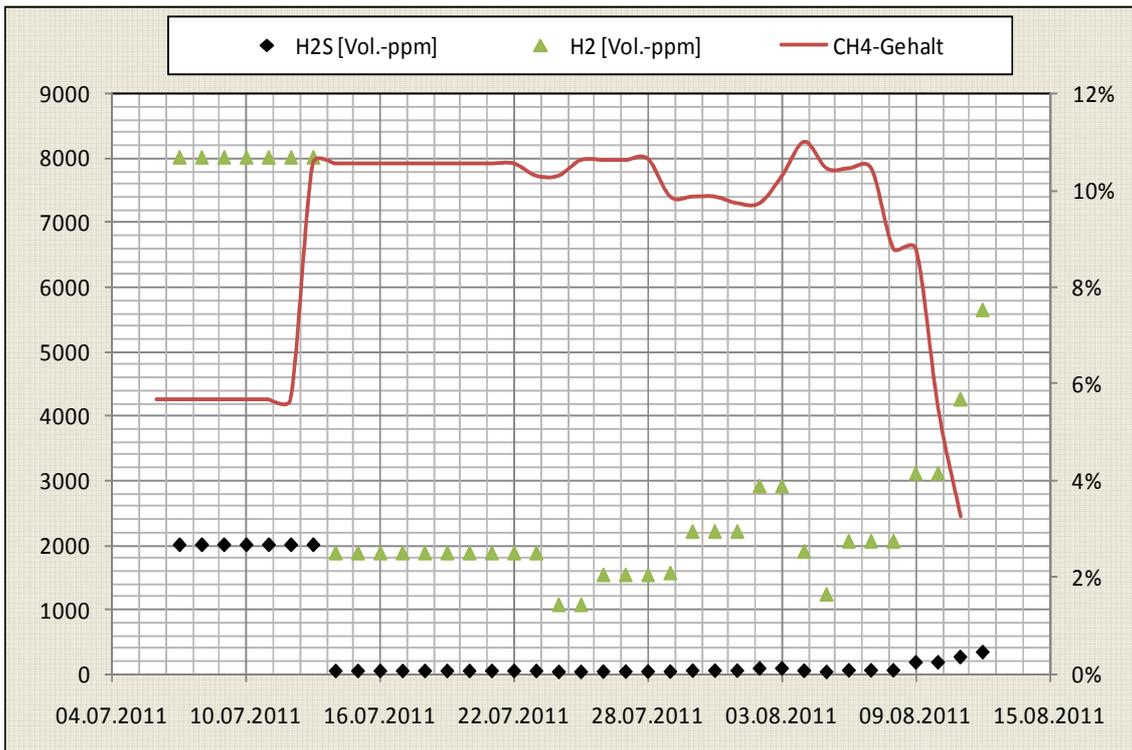


Abbildung 59: H<sub>2</sub>S-, H<sub>2</sub>- und Methan-Gehalte im Hydrolysegas (2-stufige Vergärungsanlage)

Die ermittelten H<sub>2</sub>S- bzw. H<sub>2</sub>-Konzentrationen in der ersten Versuchsphase überschritten den Messbereich des Gasanalysators von 2.000 bzw. 8.000 ppm Vol. deutlich. In der Abbildung 59 ist der Verlauf der H<sub>2</sub>S- und H<sub>2</sub>-Konzentrationen während der gesamten Versuchsphase dargestellt.

## 5.6 Aufbereitung des Treibsel

### 5.6.1 Trocknen

Die Trocknung in dem Gewächshaus der Forstwirtschaftlichen Fakultät ist positiv verlaufen. Zu beobachten war dabei, dass das Treibsel des II. Oldenburgischen Deichverbandes wesentlich länger brauchte einen stabilen Wassergehalt zu erreichen, als das Treibsel der übrigen Deichverbände. Vor allem das Treibsel des Deichverbandes Land Wursten hatte diesen stabilen Bereich sehr schnell erreicht.

### 5.6.2 Silierung

Der Silierungsversuch wird bei der ISF Schaumann Forschung GmbH in Wahlstedt durchgeführt. Hier werden drei Versuchsansätze gewählt (vgl Kapitel 4.7.2).

Trotz einer hohen Qualität und einem sehr hohen Grad an Erfahrung bei der Versuchsdurchführung dieser Versuche, sind sämtliche Proben nach Beendigung des 91-tägigen Versuchs verschimmelt.

Trotzdem wurde das silierte Material in einen weiteren GRW-Biogasertragstest integriert. Hier sollte festgestellt werden, ob auch das verschimmelte Treibsel vergoren werden kann und wie sich die Silierung auf den Gasertrag auswirkt. Die festgestellten Parameter der Untersuchung des Biogasertrags sind in Tabelle 42 dargestellt.

**Tabelle 42: Ergebnisse GRW-Gasertragstest, silierten Treibselproben (Mittelwerte 3-fach)**

Probenbezeichnung	TS	oTS	kumulierte Biogasmenge	kumulierte Metahnmenge	kumulierte Biogasmenge	kumulierte Metahnmenge	Methan-gehalt Ø
	[%]	[% TS]	[l <sub>N</sub> /kg oTS]		[l <sub>N</sub> /kg FM]		
Treibsel Krummhörn 2010, siliert 0	46,3	71,2	173,8	119,1	57,2	39,2	68,4
Treibsel Krummhörn 2010, siliert 1	41,2	74,4	185,7	120,5	56,9	36,9	64,8
Treibsel Krummhörn 2010, siliert 2	38,3	72,2	150,5	88,9	41,6	24,6	55,3

### 5.6.3 Waschversuch

Bei den Waschversuchen wurde Treibsel von der Deichacht Krummhörn aus dem Jahr 2010 eingesetzt. Es sollte untersucht werden, inwieweit eine Entfrachtung des Treibsel von anhaftendem Natriumchlorid durch Waschen erreicht werden kann.

Die Probe enthält vor dem Waschversuch 5.188 mg Chlor je kg TS. Die eingesetzte Waschwassermenge liegt je Versuchsdurchgang bei 5 Liter. Die Ergebnisse der Waschversuche sind in Tabelle 43 dargestellt.

Durch den Waschversuch konnten 59 % des im Treibsel enthaltenen Chlorids in das Waschwasser überführt werden und damit eine entsprechende Entfrachtung des Treibsel erreicht werden.

Tabelle 43: Ergebnisse Waschversuch

Probe	TS Treibsel	oTS Treibsel	Waschwasser- menge	Treibsel- Frischmasse	Cl-Konz. im Waschwasser	Cl-Masse im Waschwasser
	[%]	[% TS]	[l]	[kg]	[mg/l]	[mg]
V1, 1	47,7	79,4	5	2	615	3.075
V1, 2	47,7	79,4	5	2	551	2.755

#### 5.6.4 Hydrothermale Carbonisierung

In den zur hydrothermalen Carbonisierung verwendeten Autoklaven werden pro Charge durchschnittlich 914 g Treibsel-Frischmasse mit einem Trockensubstanz-Gehalt von 21 % und 537 g Wasser zur Carbonisierung gegeben.

Insgesamt werden 10.973 g Treibsel-Frischmasse, die 2.304 g Trockenmasse enthalten, mit 6.446 g Wasser carbonisiert.

Als Produkte der hydrothermalen Carbonisierung entstehen 6.180 g filtrierte Kohle und 7.586 g filtrierte Lösung. Die filtrierte Kohle hat einen durchschnittlichen Trockensubstanzgehalt von 29,0 %. Dementsprechend werden 1.789 g HTC-Kohle-TS hergestellt. 77 % der Trockenmasse der Treibsel-Frischmasse finden sich nach der Carbonisierung in der Trockenmasse der HTC-Kohle wieder. Die hergestellte HTC-Kohle hat eine braune Farbe und ist porös. Sie lässt sich leicht zwischen den Fingern zerreiben und hat einen torfähnlichen Geruch. Die ursprüngliche Struktur der Biomasse ist nicht mehr zu erkennen (Abbildung 60). Die Kohle wurde nach der Filtration auf einen Trockensubstanzgehalt von 85 % getrocknet.



Abbildung 60: HTC-Kohle aus Treibsel

#### 5.6.5 Pyrolyse

Die Pyrolyse des Treibsel erfolgt an der Universität Edinburgh im *UK Biochar Research Centre*. Die Masse von 5.697 g Treibsel-TS ergab nach der Pyrolyse 2.259 g Pyrolysekohle. Somit beträgt die Wiederfindungsrate für die Trockensubstanz 39,7 %.

Die Pyrolysekohle riecht nach Kohle. Die ursprüngliche Struktur des Materials ist noch zu erkennen (Abbildung 61).



Abbildung 61: Pyrolysekohle aus Treibsel

## 5.7 Arbeitsgruppe Treibsel

Die an der AG Treibsel teilnehmenden Personen bzw. Institutionen sowie deren Treibsel-Forschungsprojekte sind in Tabelle 44 aufgeführt.

Tabelle 44: Informationen zur Arbeitsgruppe Treibsel

Institution/ Unternehmen	Standort	Teilnehmer/-in	Beteiligung am Forschungsprojekt
<b>HAWK</b>	<b>Göttingen</b>	Prof. Dr. R. Wallmann M.Sc. Finn Ahrens	Treibsel an den Nieder- sächsischen Küsten (Vorhaben des ML Nds.)
<b>3N</b>	Werlte	R. Martens	
<b>Biosphere AG</b>	Wilhelmshaven	Dr. M. Michaelsen	
<b>FH Flensburg</b>	Flensburg	Dr.-Ing. H. Schneider	Interreg III A, Projekt Sand
<b>LUFA Nord West</b>	Oldenburg	Dr. M. Bischoff	Interreg IV b, enercoast
<b>Nationalpark Nds. Wattenmeer</b>	Wilhelmshaven	K. Wonnenberger	Forschungsvorhaben „Treibselreduzierung“
<b>Planungsgruppe grün</b>	Ovelgönne- Fri- schenmoor	M. Sprötge, A. Bremermann	Forschungsvorhaben „Treibselreduzierung“

Die Treffen der Arbeitsgruppe fanden an den folgenden Orten und Terminen statt:

- Wilhelmshaven, 14.10.2009
- Göttingen, 04.03.2010
- Ovelgönne, 10.06.2010

Während der Treffen berichteten die Teilnehmer von ihren jeweiligen Projekten. Es wurden Erfahrungen, Ergebnisse und aufgetretene Probleme ausgetauscht und diskutiert. Auf dieser Basis wurde u. a. auch versucht, ein gemeinsames Treibsel-Folgeprojekt zu entwickeln. Dies ist bisher leider nicht gelungen, da die Förderaussichten nach Einschätzung der Beteiligten nicht ausreichend sind.

## 5.8 Logistikkonzept

In der folgenden Tabelle 45 sind Informationen über 28 Biogasanlagen aufgelistet.

- Betreiber der Biogasanlage
- Grau hinterlegt: Anlagenbetreiber zeigt hohes Interesse an dem Forschungsprojekt
- Standort der Biogasanlage (nur PLZ und Ortsname)
- Durchsatzleistung der Biogasanlage in  $\text{Mg}_{\text{Biomass}}/\text{a}$
- Verfahrensführung der Biogasanlage
- Anlagenleistung ( $\text{kW}_{\text{elektrisch}}$  und  $\text{kW}_{\text{thermisch}}$ )
- Entfernung zum nächsten Deichverband in km

An dieser Stelle ist anzumerken, dass bei der Erstellung des Konzeptes davon ausgegangen wird, dass die Adresse der Geschäftsstelle der jeweiligen Deichverbände auch als Transportstartpunkt der Treibsel angenommen wird. Dies wird nicht in jedem Fall mit der Realität übereinstimmen, sodass in einigen Fällen von Abweichungen zu den in der Tabelle 45 angegebenen Entfernungen auszugehen ist.

Sollten weitere Informationen über die hier aufgelisteten Anlagen benötigt werden, so kann über das NEUTec Kontakt zu den Anlagenbetreibern aufgenommen werden.

### Erläuterungen zum Logistikkonzept

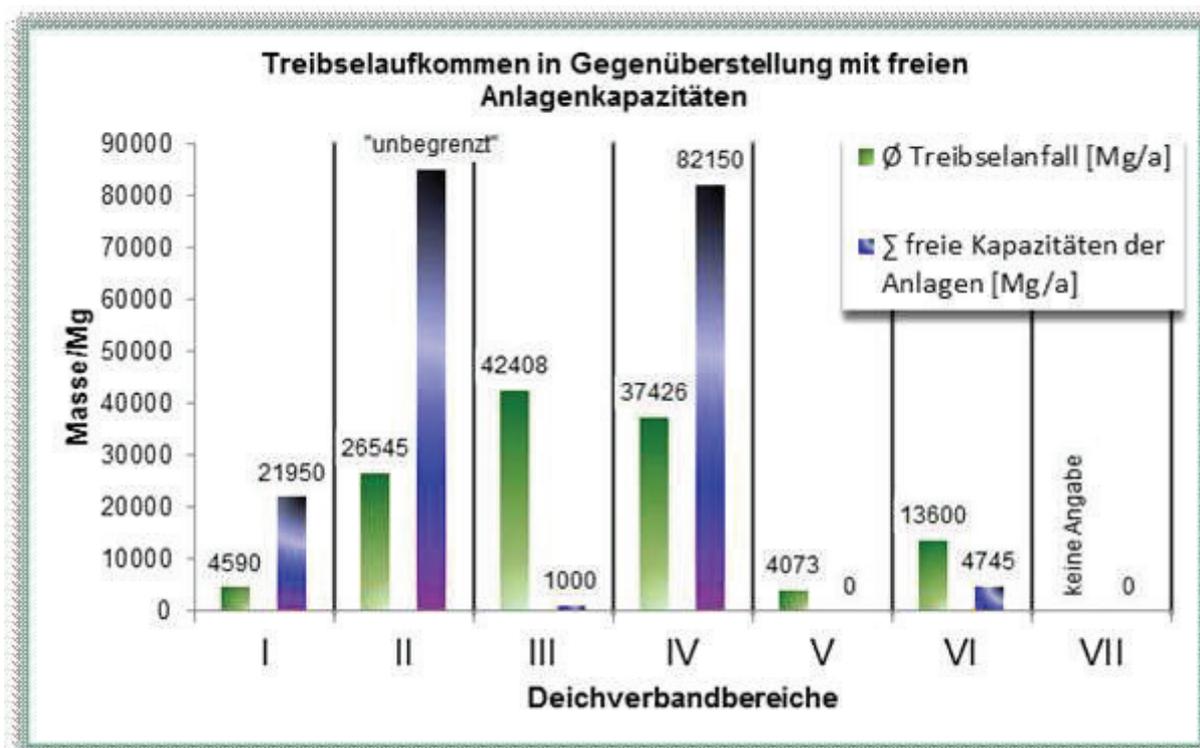
In der Übersichtskarte zum Logistikkonzept (Abbildung 63) und in der Tabelle 46 sind die wesentlichen Inhalte des Logistikkonzeptes enthalten. Die Übersichtskarte veranschaulicht die Standorte der Biogasanlagen (blau markiert) und der Geschäftsstellen der Deichverbände (rot markiert) und sie gibt Auskunft über die Transportkosten einzelner Strecken (blaue Verbindungslinien).

Desweiteren ist die Karte in 7 Deichverbandbereiche eingeteilt (I-VII), um kleinere und sinnvolle Transportbereiche zusammenzufassen. Diese Deichverband- bzw. Transportbereiche sind in der Tabelle 46 nochmals mit weitergehenden Informationen zusammengefasst. Der Vorteil dieser Zusammenfassung ist, dass schnell ersichtlich ist, wie viel anfallende Treibselmasse in den einzelnen Bereichen auf wie viel freie Anlagenkapazitäten treffen. Der Grundgedanke dabei ist, dass freie Anlagekapazitäten mit Treibsel aufgefüllt werden, um eine energetische Verwertung dessen zu ermöglichen. In Abbildung 62 ist diese Korrelation grafisch dargestellt.

**Tabelle 45: Verfahrenstechnische Informationen über Biogasanlagen an der nds. Nordseeküste**

Nr.	Betreiber und Standort der Biogasanlage	Durchsatzleistung [Mg <sub>Biomasse</sub> /a]	Verfahrens-führung	Anlagenleistung	Entfernung [km] zum nächsten Deichverband
B1	Biogas Niemand GmbH & Co. KG 26487 Blomberg	Mais: 8.760 Gülle: 4.015	kontinuierliches Nassverfahren, mesophil	500 kW el. 500 kW th.	10
B2	Biogasanlage Wittmund/EWE Biogas GmbH und Co. KG 26409 Wittmund	Abfälle: 45.000 Gülle: 100.000	quasikontinuierliches Batchverfahren	2 500 kW el. 2.400 kW th.	10
B3	Egon Janssen Westerhausen 9 26388 Wilhelms- haven	Gras, Mist und Gülle: 15.000	kontinuierliches Nassverfahren mesophil	560 kW el. 600 kW th.	10
B4	Biogasanlage Up- schört GmbH & Co. KG 26446 Friedeburg	Gras, Mist und Gülle: 22.000	kontinuierliches Nassverfahren mesophil	1.250 kW el. 1.250 kW th.	15
B5	Biogasanlage Heede/ Bioenergie Blodkamp GmbH & Co. KG 26892 Heede	Mais, Gras, Mist, Gülle: 5.480	kontinuierliches Nassverfahren mesophil	270 kW el. 300 kW th.	5
B6	Biogasanlage Sur- wold/EWE Biogas GmbH & Co.KG 26903 Surwold	Abfall: 10.000 Gülle: 31.000	keine Angabe möglich	950 kW el. 1 307 kW th.	15
B7	Biogasanlage Kruse Verwaltungs GmbH 26169 Friesoythe	Mais, Mist, Gras und Gülle: 4.000	kontinuierliches Nassverfahren mesophil	190 kW el. 210 kW th.	35
B8	Biogas Freke GbR / Thomas Freke 26219 Bösel	15.330	kontinuierliches Nassverfahren mesophil	500 kW el. 500 kW th.	40
B9	Gehlenberger Bio- energie GmbH & Co. KG 26169 Friesoythe	73.000	kontinuierliches Nassverfahren mesophil	1 600 kW el. 2 000 kW th.	30
B10	SK Biogas Produkti- onsgesellschaft mbH & CO. KG 26901 Lorup	Mais, Mist und Gülle: 12.000	kontinuierliches Nassverfahren mesophil	500 kW el. 600 kW th.	30
B11	Texas Bioenergie/ Bernhard Aumann 49661 Cloppenburg	Mais: 5.600 Gülle: 2.800	quasikontinuierliches Nassverfahren mesophil	500 kW el. 600 kW th.	50
B12/B13	Jürgen Bahlmann 49661 Cloppenburg	65.850	kontinuierliches Nassverfahren mesophil	2 900 kW el. 2 900 kW th.	55
B14	Lübbers Biogas GbR 49699 Lindern	Mais Mist und Gülle: 7.000	kontinuierliches Nassverfahren mesophil	500 kW el. 600 kW th	45

Nr.	Betreiber und Standort der Biogasanlage	Durchsatzleistung [Mg <sub>Biomasse</sub> /a]	Verfahrens-führung	Anlagenleistung	Entfernung [km] zum nächsten Deichverband
B15	Gebrüder Thyen GbR 49699 Lindern	Speisereste, Fett und Stärke: 16.000	kontinuierliches Nassverfahren mesophil	500 kW el. 500 kW th.	45
B16	Clemens Scherbring, Ahausen 49632 Essen	23.375	kontinuierliche Nass- und Trockenfütterung mesophil	1100 kW el. 1500 kW th	55
B17	Fehrmann Biogasanlage GmbH & Co. KG 49716 Meppen	Mais: 3.450 Gülle: 2.350	kontinuierliches Nassverfahren mesophil	250 kW el. 170 kW th.	50
B18	Gödde Biogasanlage GmbH & Co. KG 49744 Geeste	Mais: 9.000 Sonstige TS: 30.000-33.000 Gülle: 4.000	kontinuierliches Nassverfahren mesophil	500 kW el. 550 kW th.	55
B19	Biogas Backenhus/Heinz Backenhus 26197 Großkneten	Gülle: 4.500 Mais: 3.500 Gras: 1.000	kontinuierliches Nassverfahren	500 kW el. 600 kW th.	45
B20	Maik Plate 27793 Wildeshausen	Gülle, Flotate, Getreide, Kartoffeln: 18.250	kontinuierliches Nassverfahren mesophil	2.500 kW el. 2.500 kW th.	55
B21	Gerold Stuhr Biogas 27801 Dötlingen	Flotatschlamm, Speisereste, Gülle: 18.250	kontinuierliches Nassverfahren mesophil	625 kW el. 680 kW th	35
B22	Bio Tec /Jörg Deharde 26936 Stadland	feste, flüssige und pastöse Abfälle: 10.000	kontinuierliches Nassverfahren mesophil	500 kW el. 600 kW th	10
B23	Biogas Dorum GmbH & Co. KG 27632 Dorum	Mais: 4.500 Gülle:3.000	kontinuierliches Nassverfahren mesophi.	265 kW el 195 kW th.	20
B24	Rotenburger Rohstoff und Energie GmbH & Co. KG 27404 Rhadereistedt	Fettabscheider, Speisereste, Zöllvernichtungen: 40.150	Einstufiges Nassverfahren mesophil	1.420 kW el. 1.700 kW th.	25
B25	Benas Biogasanlage GmbH 27412 Vorwerk	175.000 (verteilt auf zwei Anlagen)	quasikontinuierliches Nassverfahren mesophil	6 MW el.	35
B26	Müller Biogas GmbH & Co. KG 27624 Lintig	Gülle: 6.570 Mais und Mist: 5.500	kontinuierliches Nassverfahren mesophil	400 kW el.	25
B27	Bio-Gas Hammah GmbH & Co. KG 21714 Hammah	Mais: 10.950 Gülle: 36.500	kontinuierliches Nassverfahren mesophil	900 kW el.	10
B28	Energiepark Trelder Berg GmbH 21244 Buchholz	Mais: 85 000	quasikontinuierliche Trockenfermentation mesophil	4.800 kW el. 4.800 kW th.	20



**Abbildung 62: Treibselaufkommen und freie Kapazitäten nahegelegener Biogasanlagen**

In den Deichverbänden I, II und IV reicht der durchschnittliche jährliche Treibselanfall nicht aus, um die freien Kapazitäten der umliegenden Biogasanlagen auszufüllen.

In den Bereichen III, V und VI verhält es sich umgekehrt: Die freien Kapazitäten der umliegenden Biogasanlagen genügen nicht, um die gesamten Treibselmassen zu verwerten. Insbesondere in den Bereiche III und IV sind diesbezüglich gravierende Unterschiede zwischen Treibselanfall und freien Kapazitäten zu erkennen.

Für den Bereich VII existieren weder Angaben über den Treibselanfall noch über freie Anlagenkapazitäten, die mit Treibsel aufgefüllt werden könnten.

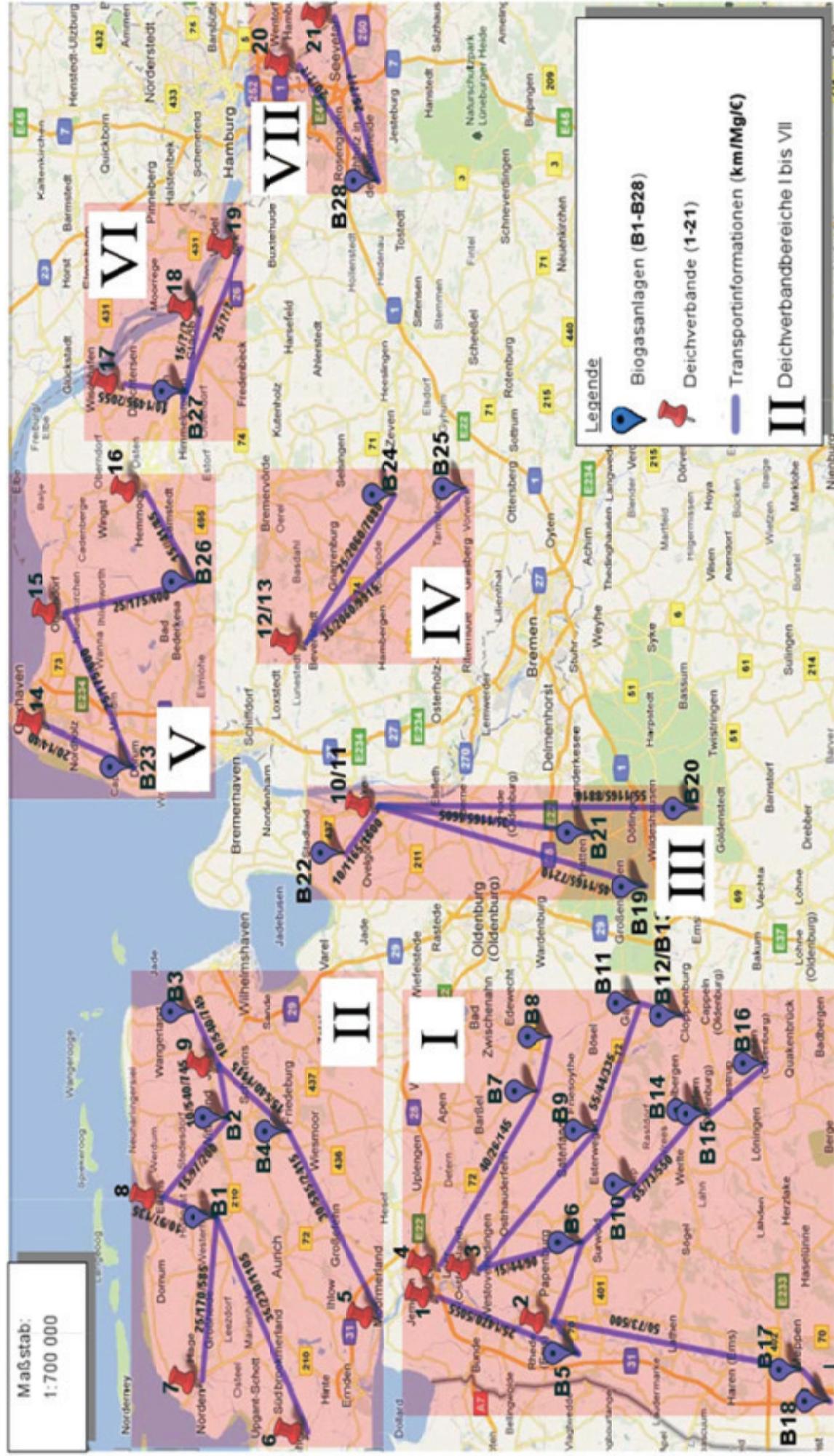


Abbildung 63: Übersichts-karte zum Logistik-konzept

Tabelle 46: Treibselanfall in den Deichverbandsbereichen I-VII in Gegenüberstellung mit freien Kapazitäten örtlicher Biogasanlagen

Deichverbandsbereich	Deichverbände (Nr. 1-21 auf der Karte)	Ø Treibselanfall [Mg/a] (1995-2011)	Biogasanlagen in dem Bereich (Nr. B <sub>1</sub> -B <sub>28</sub> auf der Karte)	Σ freie Kapazitäten der Anlagen [Mg <sub>Biomasse</sub> /a]
I	Rheider Deichacht (1)	4.590	B <sub>6</sub> bis B <sub>18</sub>	21.950
	Deichverband Heede-Aschendorf-Papenburg (2)			
	Overledinger Deichacht (3)			
	Leda-Jümme Verband (4)			
II	Moorerländer Deichacht (5)	26.545	B <sub>1</sub> bis B <sub>4</sub>	Zitat: „Unbegrenzt“ (Betreiber der Anlage B <sub>4</sub> ist zu einem umfangreichen Ausbau bereit)
	Deichacht Krummhörn (6)			
	Deichacht Norden (7)			
	Deichacht Esens-Harlingerland (8)			
III	III. Oldenburgischer Deichband (9)	42.408	B <sub>19</sub> bis B <sub>22</sub>	1.000
	II. Oldenburgischer Deichband (10)			
	I. Oldenburgischer Deichband (11)			
IV	Deichverband Osterstader Marsch (12)	37.426	B <sub>24</sub> und B <sub>25</sub>	82.150
	Deichverband Land Wursten (13)			
V	Cuxhavener Deichverband (14)	4.073	B <sub>23</sub> und B <sub>26</sub>	0
	Hadelner Deich- und Uferbauverband (15)			
	Ostedeichverband (16)			
VI	Deichverband Kehdingen Oste (17)	13.600	B <sub>27</sub>	4.745
	Deichverband I. Meile des Alten Landes (18)			
	Deichverband II. Meile des Alten Landes (19)			
VII	Harburger Deichverband (20)	k.A.	B <sub>28</sub>	0
	Deich- und Wasserverband Vogtei Neuland (21)			

### Transportkosten

Die Kosten für den Transport der Treibsel belaufen sich auf durchschnittlich **0,14 €/tkm** (tkm=Tonnenkilometer). Dieser Transportpreis beruht ausschließlich auf Erfahrungswerten und Abschätzungen einiger Biogasanlagenbetreiber, die Ihre bisherigen Transportkosten für ihre Biomasse als Vergleichswert heranzogen. Auskunft über den Transportpreis konnten die Betreiber der Anlagen B<sub>1</sub>, B<sub>9</sub>, B<sub>12/13</sub>, B<sub>14</sub>, B<sub>16</sub>, B<sub>18</sub>, B<sub>21</sub>, B<sub>23</sub> geben. Deren Einzelwerte lagen dicht beieinander, sodass vor diesem Hintergrund ein Mittelwert gebildet wurde.

Da es bisher keinerlei praktische Erfahrungen im Bereich des Treibseltransportes gibt, ist dieser Wert lediglich als Richtwert zu betrachten. Beispielsweise konnte bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht berücksichtigt werden, wie sich z. B. eine steigende Transportentfernung auf den Preis/tkm auswirkt. Vermutlich würde unter diesen Voraussetzungen der Preis auf Grund des Fixkostendegressionseffektes sinken.

Mit Hilfe des ermittelten Transportpreises lassen sich die Transportkosten der Treibsel für einzelne Strecken zwischen den Geschäftsstellen der Deichverbände und den einzelnen Biogasanlagen rechnerisch abschätzen. Hierbei werden jeweils die jährlich anfallenden Treibselmassen in Mg mit den Entfernungen zu den nächstgelegenen Biogasanlagen multipliziert. Das Ergebnis sind die Transportkosten in €. Auf der Übersichtskarte zum Logistikkonzept sind diese Berechnungen für jede Strecke einzeln durchgeführt worden, sodass ein Überblick über die Kosten gegeben werden kann. Wie in der Legende der Übersichtskarte zum Logistikkonzept zu lesen, ist die Transportinformation in folgender Reihenfolge angegeben: Kilometer/Megagramm/Euro (**km/Mg/€**); die Werte sind direkt in der Übersichtskarte an den blauen Transportstrecken beigefügt.

Unter der Annahme, dass mehrere Biogasanlagen von nur einem Deichverband beliefert werden, wird in diesem Konzept angenommen, dass dabei jede einzelne Biogasanlage mit der kompletten Treibselmenge beliefert wird. Damit soll die Übersichtlichkeit gewahrt werden, aber es ist darauf zu achten, dass die Transportmassen in solchen Fällen nicht nochmal einzeln aufsummiert werden.

## 6 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse, die im Rahmen dieses Forschungsprojektes erzielt wurden, bewertet und diskutiert. Zuerst werden allgemeine Parameter von Treibsel, wie bspw. das Aufkommen oder die Schüttraumdichte, beurteilt, bevor eine Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich einer möglichen thermischen Verwertung von Treibsel erfolgt. Im Anschluss daran werden die Möglichkeiten der biochemischen Verwertung von Treibsel anhand der erzielten Ergebnisse diskutiert und bewertet. Anschließend erfolgt die Diskussion der Ergebnisse zur Biostabilität von Treibsel in unterschiedlich aufbereiteten Zuständen.

Auf Basis der zusammengetragenen und neugewonnenen Erkenntnisse werden, im Rahmen des erstellten Logistikkonzepts, Handlungsempfehlungen gegeben.

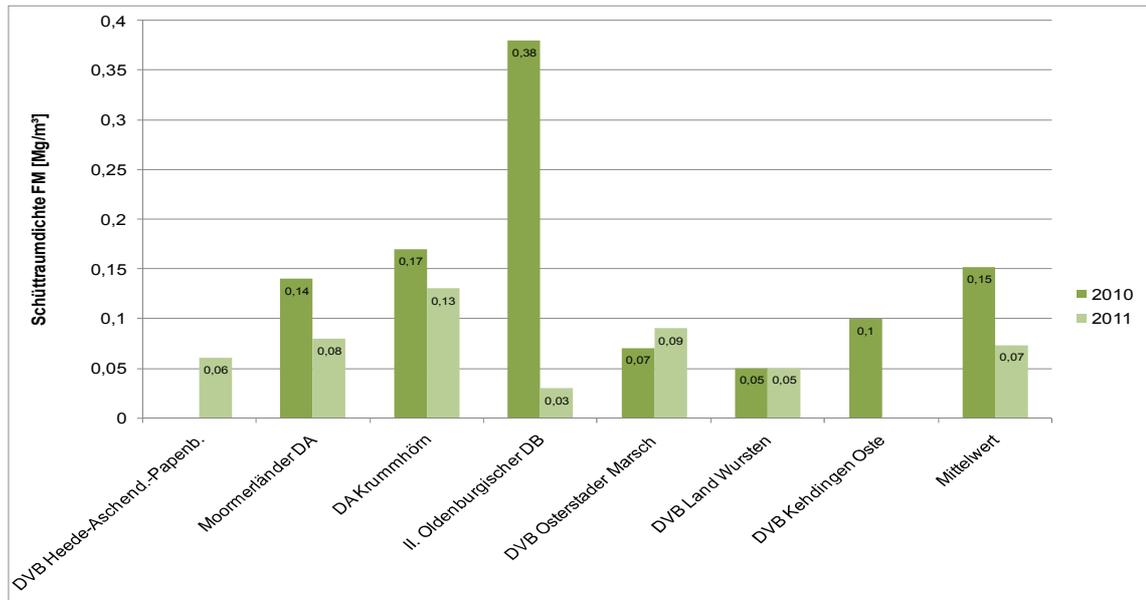
### 6.1 Diskussion und Bewertung allgemeiner Parameter von Treibsel

Die Daten zum **Treibselaufkommen** an den niedersächsischen Küsten sind für den Zeitraum von 2004 bis einschließlich 2008 relativ gut erfasst. Bestehende Datenlücken aus den Jahren 2007 und 2008 konnten nur durch eine Berechnung geschlossen werden. Hierdurch entstand ein theoretischer Wert des Treibselaufkommens dieser beiden Jahre. Für den darauffolgenden Betrachtungszeitraum konnte eine solche Berechnung nicht durchgeführt werden, da nur elf der 22 niedersächsischen Hauptdeichverbände Angaben zum Treibselaufkommen zwischen 2009 und 2011 gemacht haben und nur vier Deichverbände gaben die entstandenen Entsorgungskosten an. Bei den Deichverbänden werden die Treibselmengen erst nach der Entsorgung oder der Bergung vom Deich erfasst. So dass vielen Deichverbänden zum Zeitpunkt der letzten Umfrage noch keine Daten des Treibselaufkommens für 2011 vorlagen. Somit war die Datengrundlage für die Berechnung eines theoretischen Treibselaufkommens, wie für das Jahr 2008 geschehen, zu gering.

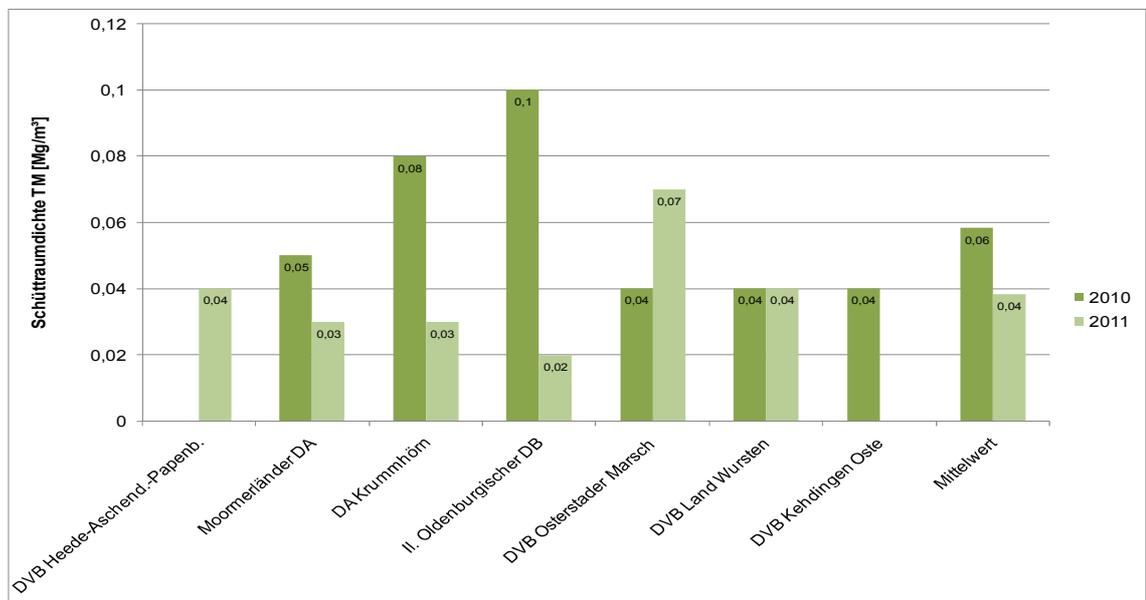
Eine Berechnung der Treibselmengen gestaltet sich nicht nur aufgrund der geringen Datenlage relativ schwierig. Zusätzlich sollten hier die festgestellten Schüttraumdichten beachtet werden, da eine Entsorgung, und damit z. T. die resultierenden Daten für eine Statistik, beim Leda-Jümme-Verband und I. Oldenburgischer DB nach Masse und bei allen anderen Deichverbänden nach Volumen abgerechnet wird. Die Schüttraumdichten unterscheiden sich nicht nur zwischen den einzelnen Standorten, an denen die Treibselproben genommen wurden, sondern auch zeitlich. So wurden innerhalb eines Jahres teilweise relativ große Unterschiede der Schüttraumdichte des Treibsel an einem Standort festgestellt. Dieser Aspekt spricht zudem für eine Erfassung der Treibselvolumina in den Statistiken zum Treibselaufkommen. Für eine Erfassung der Treibselmassen müssten die Schüttraumdichten der einzelnen Standorte alljährlich bestimmt werden. Hiermit ist allerdings, nach Rücksprache mit einigen Vertretern einzelner Deichverbände (CORNELIUS & WILKEN, 2009, pers. Mitt.; WILKEN, 2011, pers. Mitt.), nicht zu rechnen.

Neben den genannten Aspekten zur Schwierigkeit, das gesamte Treibselaufkommen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens zu erfassen, gilt es zu beachten, dass für Treibsel kein Abfallschlüssel beim Landesbetrieb für Statistik und Kommunikation Niedersachsen vorhanden ist. Dieser Stoffstrom wird somit nicht gesondert erfasst (BEHRE, 2011, pers. Mitt.).

In Abbildung 64 werden die **Schüttraumdichten** des Treibsel der untersuchten Standorte einander gegenübergestellt.



**Abbildung 64: Ermittelte Schüttraumdichten der Frischmasse von Treibsel aus den Jahren 2010 und 2011**



**Abbildung 65: Schüttraumdichten der Trockenmasse von Treibsel aus den Jahren 2010 und 2011**

Die Werte geben die Schüttraumdichten der Treibselfrischmasse wieder. An den dargestellten Werten wird deutlich, welche extremen Unterschiede innerhalb eines Zeitraumes von einem Jahr bestehen können. Hier ist vor allem auf die Schüttraumdichten

der Treibselfrischmasse des II. Oldenburgischen DB hinzuweisen. Die Schüttraumdichte des 2011 untersuchten Materials beträgt nur rund 1/10 des Wertes aus dem Jahr 2010. Die Begründung hierfür ist, dass im Jahr 2010 relativ große Mengen Treibsel an die Deiche des II. Oldenburgischen DB angeschwemmt wurden. Zum Zeitpunkt der Probenahme war das Treibsel bereits zur Bergung vorbereitet worden. Hierfür wurde der Spülsaum zu kleineren Haufwerken zusammengekehrt. Bei dem Vorgang des Zusammenkehrens wurde auch die sich unter dem Treibsel befindende, z. T. zerstörte Grasnarbe abgetragen und dem aufgehäuften Treibsel beigemischt. Hierdurch sind relativ große Sedimentanteile in das Treibsel transportiert worden. Dies wird zusätzlich durch die in Abbildung 65 dargestellten Schüttraumdichten der Trockenmasse bestätigt, auch wenn die Schüttraumdichte der Trockenmasse aus dem Jahr 2011 nur noch 1/5 derer von 2010 beträgt. Im Jahr 2011 waren die Treibselmengen im Bereich des II. Oldenburgischen DB relativ gering, so dass seitens des Deichverbandes keine Treibselbergung und –Entsorgung veranlasst werden musste. Das Treibsel lag in relativ dünnen Schichten vor und z. T. auf dem Deich, wo es bei der vorherrschenden trockenen und warmen Witterung trocknete.

Ein weiterer Grund für die hohe Schüttraumdichte des Treibsel des II. Oldenburgischen DB im Jahr 2010 war, dass die Haufwerke aus dem zusammengekehrten Treibsel schon längere Zeit auf dem Deich lagen. In diesem Zeitraum herrschte regnerisches Wetter. Das Regenwasser sammelte sich in den Haufwerken und erhöhte somit die Masse des Materials je Volumeneinheit.

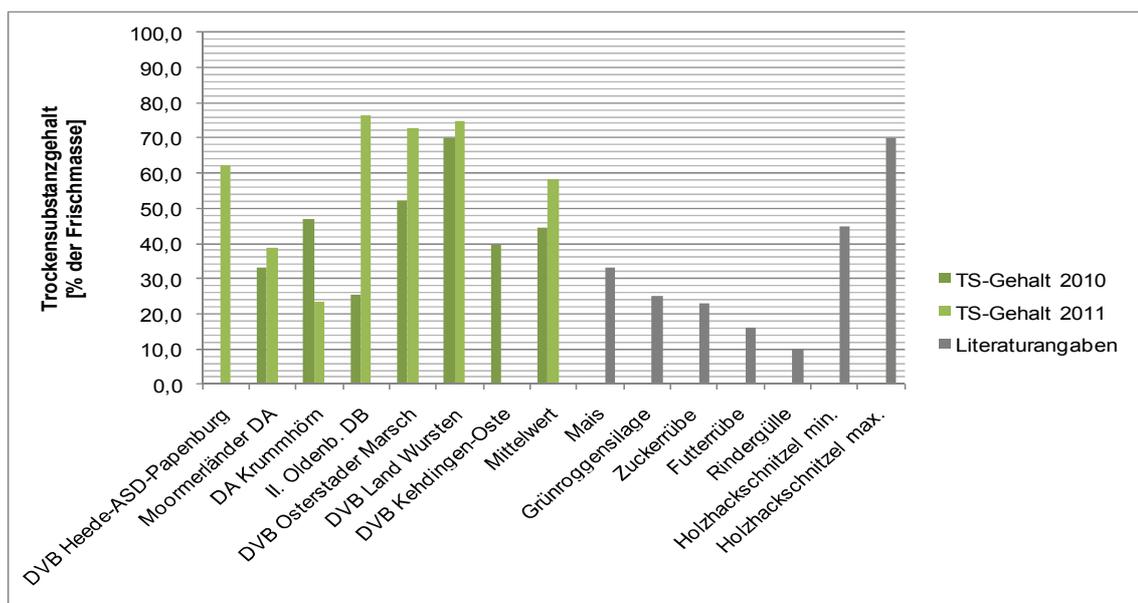
Im Gegensatz zu den Schüttraumdichten des Treibsel vom II. Oldenburgischen DB sind die Schüttraumdichten des Treibsel aus dem Zuständigkeitsbereich des DVB Land Wursten im frischen wie auch trockenen Zustand im Zeitraum eines Jahres relativ konstant (vgl. Abbildung 64 und Abbildung 65).

Die Schüttraumdichte des Treibsel aus dem Bereich vom DVB Osterstader Marsch ist im Vergleich zum Wert des Jahres 2010 in 2011 als einzige leicht gestiegen. Dieser Unterschied ist darin begründet, dass das Treibsel während der Bestimmung der Schüttraumdichte im Jahr 2010 in einer relativ dünnen Schicht am Graben und z. T. auf dem Treibselräumweg vor dem Deich lag und einem relativ starken Wind ausgesetzt war. Dies hat möglicherweise eine Reduzierung des Wassergehaltes im Treibsel bewirkt. Im Jahr 2011 wurde die Treibselprobe im DVB Osterstader Marsch aus einem Haufwerk auf dem Humifizierungsplatz des Deichverbandes entnommen. Trotz relativ trockenen Wetters im Vorfeld der Probenahme ist davon auszugehen, dass das Treibsel im Haufwerk feuchter war, als jenes, das im Vorjahr beprobt wurde.

Ein Zusammenhang zwischen der Schüttraumdichte und der Lagerungsform des Treibsel zum Zeitpunkt der Probenahme ist nicht für alle beprobten Standorte erkennbar. Als ausschlaggebender Faktor, für die Veränderung der Schüttraumdichte am selben Probenahmestandort innerhalb eines Jahres, ist vor allem die vorherrschende Witterung zum Zeitpunkt der Bestimmung der Schüttraumdichten des Treibsel anzusehen, da Wetterereignisse wie Sonnenschein, Wind und Regen den Wassergehalt bzw. den Trockensubstanzgehalt des untersuchten Materials beeinflussen.

Die Differenzen zwischen den Schüttraumdichten der unterschiedlichen Standorte sind mit der ebenso unterschiedlichen Zusammensetzung des Treibselns entlang der niedersächsischen Nordseeküste und Ästuarien zu begründen. So hat ein bestimmtes Volumen einer Treibselprobe der Ästuarien, die hauptsächlich aus schilfartigen Pflanzen besteht, eine geringere Dichte als eine Treibselprobe der Nordseeküste, die sich aus grasähnlichen Pflanzen, Wasserpflanzen wie Blasentang und geringen Anteilen an Sand und Muscheln zusammensetzt.

Die **Trockensubstanzgehalte** der Treibselproben von 2010 liegen, mit Ausnahme des Treibselns vom Deichverband Land Wursten (70 % der FM), im Bereich von 25 % d. FM bis 52 % d. FM. Vergleichbare Ergebnisse sind z. B. bei Silagen zu finden. Ein Wassergehalt in dieser Größenordnung ist für anaerobe Bedingungen günstig. Wirtschaftlich gesehen, verringert sich die Transportwürdigkeit eines Substrates mit steigendem Wassergehalt. Ein entsprechend hoher Trockensubstanzgehalt kann demnach eine entscheidende Rolle spielen, sollte die Verwertungsanlagendichte an der Küste niedrig sein.



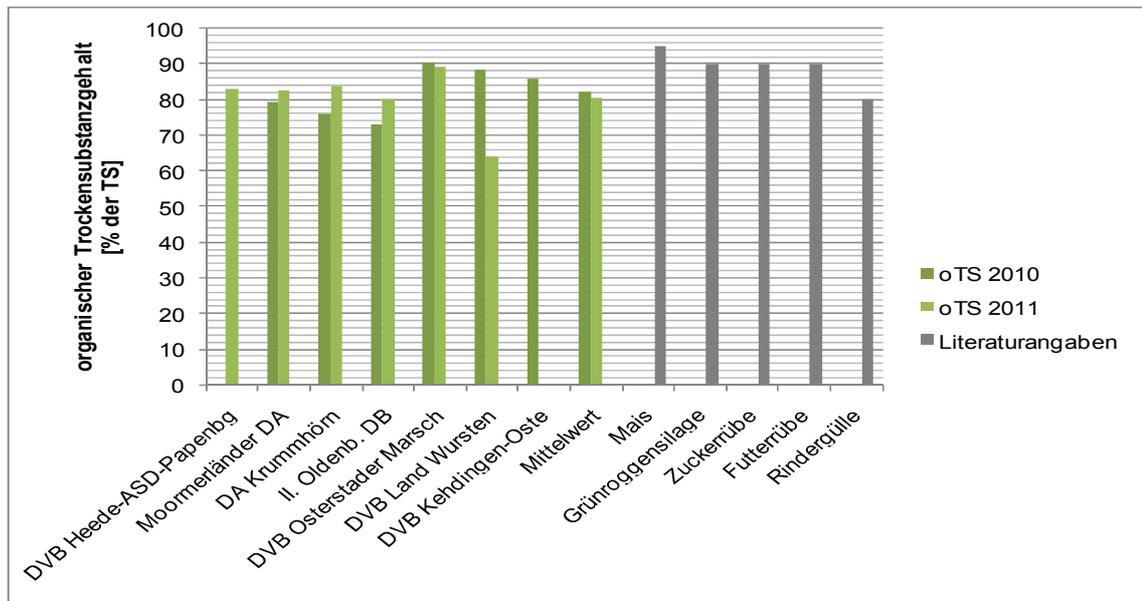
**Abbildung 66: Vergleich der Trockensubstanzgehalte von Treibsel mit anderer Biomasse (nach FNR, 2010, S. 85; KTBL, 2006 S. 367)**

Die Trockensubstanzgehalte der Treibselproben aus dem Jahr 2011 liegen überwiegend zwischen 62 % d. FM und 77 % d. FM. Lediglich das Treibsel der DA Krummhörn (24 % d. FM) und der Moormerländer DA (39 % d. FM) liegen deutlich unterhalb der anderen festgestellten Werte. Material mit hohen Trockensubstanzgehalten könnte eher für eine thermische Verwertung geeignet sein, da hier durch den geringeren Wassergehalt ein höherer Heizwert der Frischmasse erreicht wird.

In der Abbildung 66 werden die festgestellten Trockensubstanzgehalte des untersuchten Treibselns, getrennt nach Standort und Probenahmezeitpunkt, mit Literaturangaben zu Trockensubstanzgehalten anderer Biomasse gegenübergestellt.

Die Trockensubstanzgehalte des Treibseis von 2010 liegen zwischen den Werten von Grünroggensilage und Holzhackschnitzeln. Die Trockensubstanzgehalte des Treibseis von 2011 sind in den gleichen Bereichen einzuordnen.

Die Bestimmung der **organischen Trockensubstanz** des Treibseis ergibt für die Proben von 2010 Werte zwischen rund 73 % der TS und 90 % der TS. Die Werte der Proben von 2011 liegen zwischen 64 % der TS und 89 % der TS. Die Abbildung 67 zeigt die Ergebnisse der Bestimmung der organischen Trockensubstanzgehalte aller Treibselproben von 2010 und 2011 sowie deren Mittelwerte. Zusätzlich wird in Abbildung 67 ein Vergleich mit anderer Biomasse grafisch dargestellt. In der Abbildung 67 wird ersichtlich, dass die Mittelwerte der organischen Trockensubstanzgehalte der untersuchten Treibselproben nur knapp über den Literaturangaben zum organischen Trockensubstanzgehalt von Rindergülle liegen. Der Anteil an organischer Trockensubstanz einiger Proben (DVB Land Wursten 2010, DVB Osterstader Marsch 2010 & 2011) liegt in der Größenordnung von Literaturwerten für Grünroggensilage, sowie Zucker- und Futterrüben.

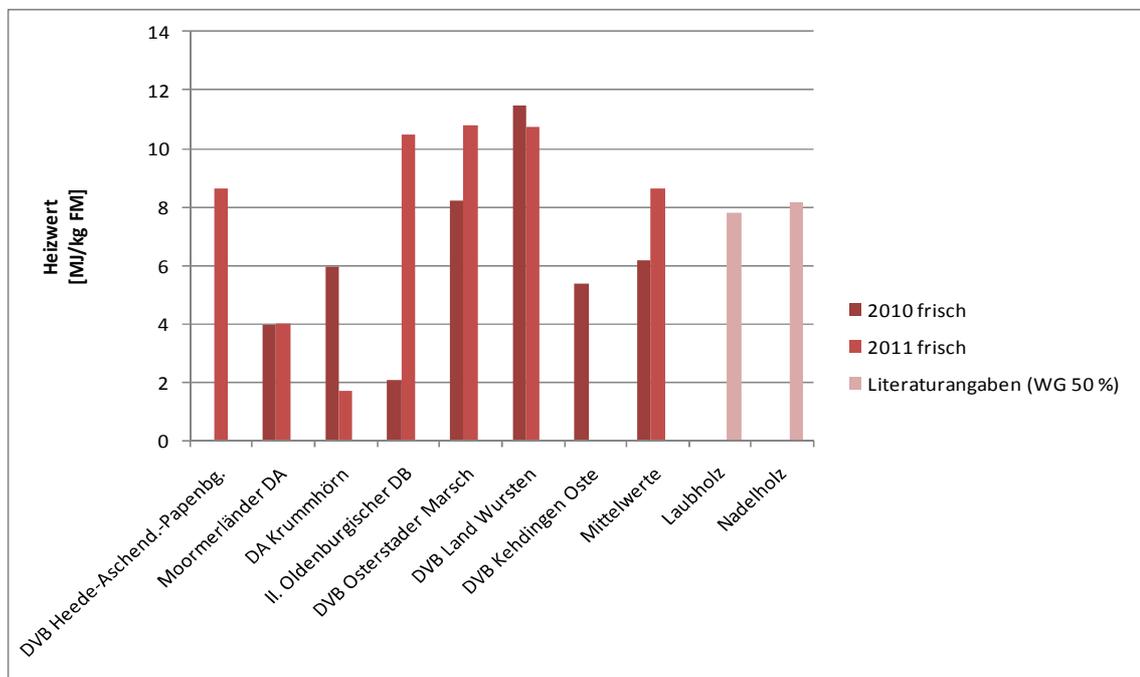


**Abbildung 67: Vergleich der organischen Trockensubstanzgehalte von Treibsel mit anderer Biomasse (nach FNR, 2010, S. 85)**

Die im Jahr 2011 höheren TS-Gehalte im Vergleich zum Jahr 2010 lassen sich analog zur Schüttraumdichte mit zum Zeitpunkt der Probenahme vorherrschenden Witterung erklären. Warmes sonniges Wetter bewirkt die Trocknung des Materials und somit die Erhöhung der TS-Gehalte. Die oTS-Gehalte unterliegen natürlichen Schwankungen, die vermutlich zu einem großen Teil durch die unterschiedliche Ablagerung von Sedimenten hervorgerufen wird, die sowohl standortabhängig als auch saisonal unterschiedlich sein kann. Schwankungen des oTS-Gehaltes aufgrund unterschiedlicher pflanzlicher Zusammensetzung der Proben können aus den Ergebnissen nicht abgeleitet werden.

## 6.2 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich einer thermischen Verwertung von Treibsel

Die Ergebnisse der Brennwertwertbestimmungen liegen bei den Treibselproben aus dem Jahr 2010 zwischen rund 15 MJ/kg TS und 18 MJ/kg TS. Für das Treibsel aus dem Jahr 2011 wurden Brennwerte rund 13 MJ/kg TS und 17 MJ/kg TS bestimmt. Aus diesen Werten werden die **Heizwerte** bezogen auf die Treibselfrischmasse errechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen liegen zwischen 4 MJ/kg FM und 11,5 MJ/kg FM im Jahr 2010 und rund 2 MJ/kg FM bis 11 MJ/kg FM im Jahr 2011. Zusätzlich werden die Heizwerte bezogen auf die Trockenmasse aus den Brennwerten berechnet. Diese betragen beim Treibsel aus dem Jahr 2010 zwischen 13,5 MJ/kg TS und 16 MJ/kg TS und beim Treibsel aus dem Jahr 2011 11 MJ/kg TS bis 16 MJ/kg TS. Die Heizwerte des Treibsel im feuchten (Abbildung 68) und im trockenen Zustand (Abbildung 69) werden den Heizwerten anderer Biomassen, die in der Praxis thermisch verwertet werden, gegenübergestellt.

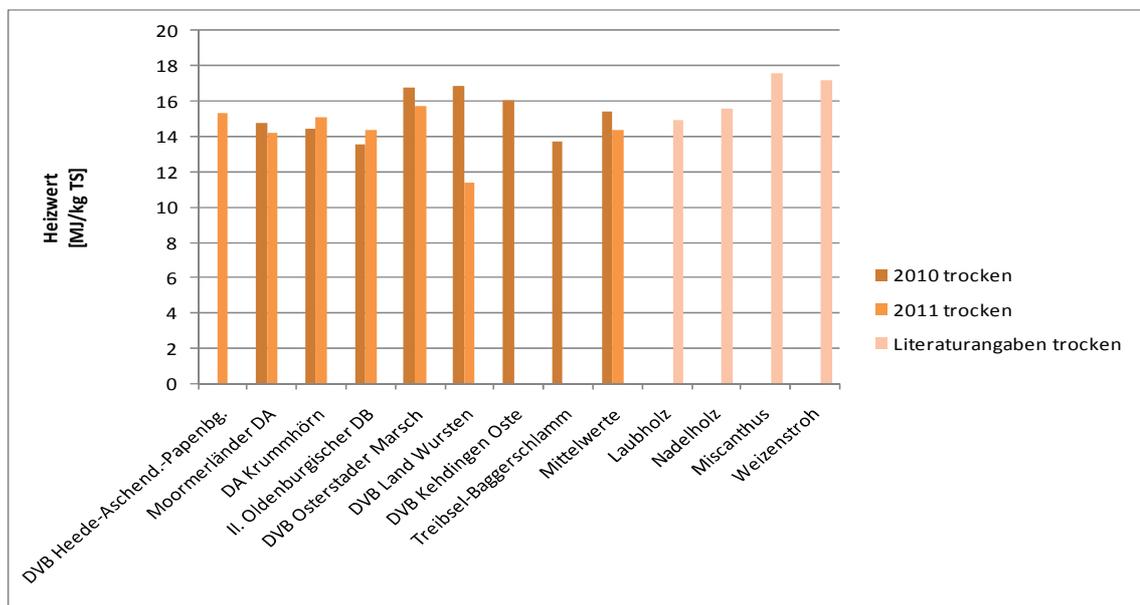


**Abbildung 68: Heizwerte der Treibselproben im frischen Zustand gegenüber den Heizwerten von frischem Laub- und Nadelholz mit einem Wassergehalt von 50 % (LWF, 2003, S. 1)**

Aus Abbildung 68 geht hervor, dass die Heizwerte von lediglich zwei Treibselproben aus 2010 (DVB Osterstader Marsch, DVB Land Wursten) die Heizwerte von Holz mit einem Wassergehalt von 50 % erreichen bzw. übersteigen. Die restlichen Proben liegen mit rund 2 MJ/kg FM bis 6 MJ/kg FM unterhalb der angegebenen Heizwerte der Vergleichswerte. Die Heizwerte des frischen bzw. feuchten Treibsel aus dem Jahr 2011 liegen, mit Ausnahme zweier Treibselproben (Moormerländer DA, DA Krummhörn), oberhalb der Werte von feuchtem Laub- und Nadelholz. Allein an den Mittelwerten der Heizwerte des frischen Treibsel ist zu erkennen, dass die Heizwerte des frischen Treibsel aus dem Jahr 2011 höher sind als die des Treibsel aus dem Jahr

2010. Die festgestellten Unterschiede zwischen den, auf das frische Treibsel bezogenen Heizwerten, sind mit den unterschiedlichen Trockensubstanzgehalten des Treibsel zum jeweiligen Zeitpunkt der Probenahmen zu begründen. Hierauf nimmt, wie beschrieben, die vorherrschende Witterung zum Zeitpunkt der Probenahme direkten Einfluss.

Die in Abbildung 69 dargestellten Mittelwerte der Heizwerte des trockenen Treibsel beider Probenahmekampagnen liegen im Bereich der Heizwerte anderer, trockener Biomassen, die in der Praxis thermisch verwertet werden. Bei Betrachtung der Einzelwerte fällt lediglich der Heizwert des trockenen Treibsel vom DVB Land Wursten von 2011 auf. Dieser liegt mit rund 11 MJ/kg TS als einziger auf einem niedrigeren Niveau. Dieses niedrigere Niveau korreliert mit einem erheblich geringeren oTS-Gehalt (vgl. Abbildung 67).



**Abbildung 69: Heizwerte der Treibselproben gegenüber den Heizwerten anderer Biomassen bezogen auf die Trockensubstanz (KTBL, 2006, S. 360; LWF, 2003, S. 1; FNR, 2007, S. 86)**

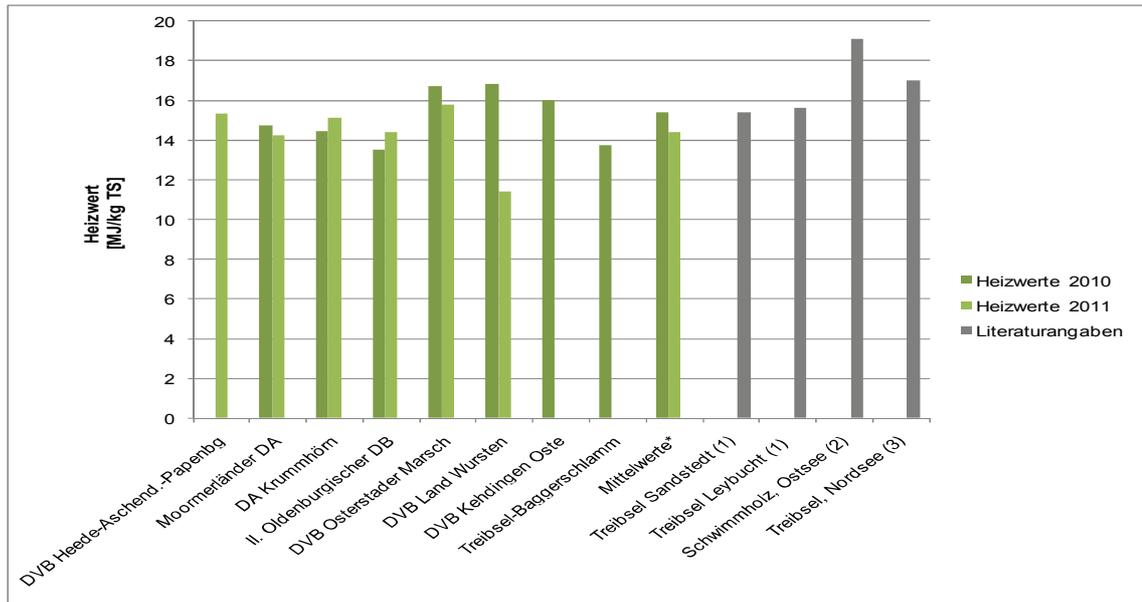
Der Einsatz von Treibsel als Brennstoff wurde, wie in Kapitel 5.1.4.5 beschrieben, bereits mehrfach untersucht. Bei diesen Untersuchungen wurden brennstoffspezifische Parameter, wie die Brenn- und Heizwerte, von relativ wenigen Standorten betrachtet.

Im Rahmen dieses Projektes werden diese Parameter von sechs bzw. sieben Standorten analysiert.

Eine Gegenüberstellung der Heizwerte von Treibsel, die im Rahmen dieses Projektes ermittelt wurden, mit Heizwerten für Treibsel aus der Literatur erfolgt in Abbildung 70.

Die Mittelwerte der Heizwerte aller Treibselproben, die im Rahmen dieses Projektes in den beiden Jahren 2010 und 2011 festgestellt werden, entsprechen den Angaben von STRECKER (1995, S. 25) für Treibsel aus Sandstedt an der Unterweser und der Leybucht an der Nordsee. Das Schwimmholz der Ostsee liegt nach DBFZ (2010) mit rund 19 MJ/kg TS deutlich über den Mittelwerten der untersuchten Treibselproben von 2010

und 2011. Das Treibsel der Nordsee nach HANSEATISCHE UMWELT (2009, S. 4) liegt mit 17 MJ/kg TS ebenfalls, wenn auch geringfügig, über den dargestellten Mittelwerten.



**Abbildung 70: Heizwerte der Treibselproben von 2011 gegenüber Literaturangaben (mit \*: Mittelwerte ohne Treibsel-Baggerschlamm; 1: STRECKER, 1995; 2: DBFZ, 2010; 3: HANSEATISCHE UMWELT, 2009)**

Um die Heizwerte des Treibsel für eine thermische Verwertung auf das dargestellte Niveau zu bringen, ist eine Trocknung des Treibsel erforderlich. Die Möglichkeiten, größere Treibselmengen zu trocknen, sollten untersucht werden, wenn eine Verbrennung des Treibsel geplant ist.

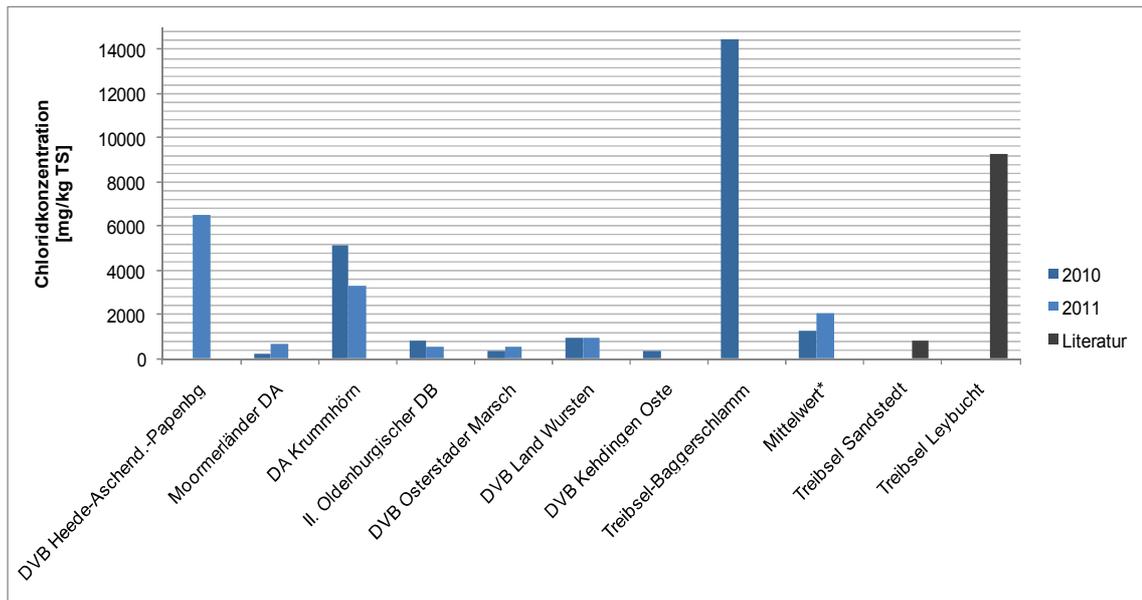
Die thermische Verwertung von Treibsel wird nicht nur von STRECKER (1995) und SÜßMANN (1997) (vgl. Kap. 5.1.4.5) kritisch betrachtet. Auch die Betreiber von Biomasseheizkraftwerken, die zumindest für eine Co-Verbrennung von Treibsel ausgelegt sein sollen, stehen einer Verbrennung dieses Materials kritisch oder ablehnend gegenüber (PROKON NORD, 2011, pers. Mitt.). Seitens der Anlagenbetreiber sind es weniger die möglichen toxischen Rauchgasbestandteile, die bei der Treibselverfeuerung entstehen, sondern die im Treibsel enthaltenen Chlorkonzentrationen, weswegen sie Treibsel als Brennmaterial ablehnen bzw. nicht einsetzen. Chlor kann in Anlagenteilen eine Hochtemperaturkorrosion hervorrufen. Zudem ist die thermische Nutzung bisher aufgrund wirtschaftlicher Aspekte gescheitert.

Die **Chloridkonzentrationen** der in den Jahren 2010 und 2011 untersuchten Proben ist in Abbildung 71 dargestellt. Sie werden den Chlorgehalten für Treibsel nach STRECKER (1995, S. 25) gegenübergestellt.

Die Chloridkonzentration im Treibsel-Baggerschlamm liegt auffallend hoch. Der Wert erreicht rund 15.500 mg/kg TS. Das Treibsel dieser Probe aus dem Zuständigkeitsbereich des II. Oldenburgischen DB wurde aus einem Graben vor dem Deich genommen. Es ist zu vermuten, dass diese hohe Chloridkonzentration dadurch entstanden ist, dass sich im Wasser des Grabens ein hoher Salzwateranteil befand. Vom Trockensubstanzgehalt dieser Probe (vgl. 5.4.2) wird abgeleitet, dass ein relativ hoher Wasser-

gehalt im genommenen Probenmaterial enthalten war. Dieses enthaltene Wasser, vermutlich hauptsächlich Salzwasser, hat das Ergebnis der Bestimmung des Chloridgehaltes beeinflusst.

Die nächsthöhere Chloridkonzentration wird in der Treibselprobe vom DVB Heede-Aschendorf-Papenburg nachgewiesen und liegt bei ca. 6.000 mg/kg TS. Dieser Wert übersteigt auch die Werte der Treibselproben von Standorten, bei denen ein größerer Einfluss des Salzwassers der Nordsee (DA Krummhörn, DVB Land Wursten) erwartet wird. Die Gründe für die relativ hohen Chloridkonzentrationen im Treibsel vom DVB Heede-Aschendorf-Papenburg sollten genauer untersucht werden.



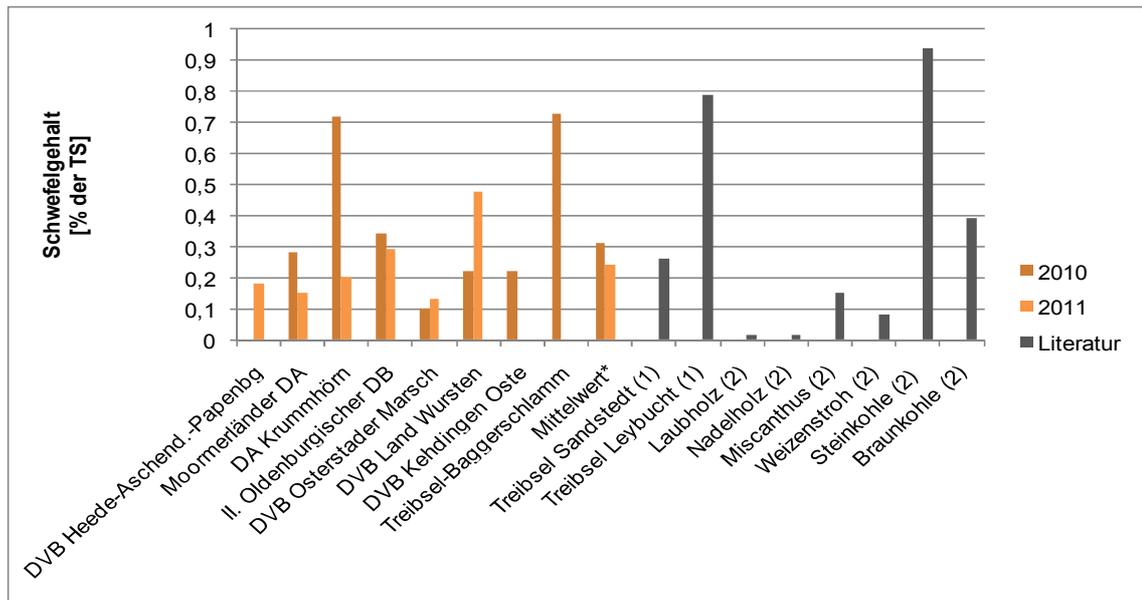
**Abbildung 71: Chloridkonzentrationen der Treibselproben von 2010 und 2011 im Vergleich mit Literaturangaben nach STRECKER (1995, S. 25); (\*: Mittelwerte ohne Treibsel-Baggerschlamm)**

Die Vermutung, dass das Salzwasser der Nordsee einen Einfluss auf die Chloridkonzentrationen im Treibsel hat, wird durch die Konzentration in den Proben der DA Krummhörn bestätigt. In der Probe aus dem Jahr 2010 wird eine Chloridkonzentration von rund 5.000 mg/kg TS nachgewiesen, in der Probe aus dem Jahr 2011 bei rund 3.000 mg/kg TS. Diese Werte liegen jedoch unterhalb der Angaben nach STRECKER (1995, S. 25) für die Treibselprobe Leybucht (7.900 mg/kg TS). Die Deiche der Leybucht sind dem Verbandsgebiet der DA Krummhörn zuzuordnen. Somit werden im Rahmen dieser Untersuchung die relativ hohen Werte der Probe Leybucht nach STRECKER (1995, S. 25) nicht bestätigt. Es ist allerdings anzumerken, dass es sich bei den Proben nach STRECKER (1995) wie auch im Rahmen dieses Projektes um Momentaufnahmen der Chloridkonzentrationen handelt. Mit Schwankungen der Chloridkonzentrationen ist z.B. aufgrund von witterungsbedingten Schwankungen, etwa durch Auswaschungen des Chlorids aus dem Treibsel am Deich durch Regen, zu rechnen.

Die Chloridgehalte der anderen Treibselproben ähneln dem Wert, den STRECKER (1995, S. 25) für die Treibselprobe Sandstedt (Unterweser) mit 820 mg/kg TS angibt. Die im Rahmen dieses Projektes ermittelten Chloridwerte der meisten Proben liegen

bei unter 1.000 mg/kg TS. Eine Ausnahme bilden die im Rahmen dieses Projektes untersuchten Proben vom DVB Land Wursten. Die Konzentrationen lagen im Jahr 2010 bei rund 960 mg/kg TS und im Jahr 2011 bei rund 920 mg/kg TS. Diese Werte liegen geringfügig über den Vergleichswert nach STRECKER (1995, S. 25).

In der folgenden Abbildung 72 sind die **Schwefelgehalte**, der Treibselproben von 2010 und 2011 graphisch dargestellt. Auch in dieser Abbildung werden die Analyseergebnisse nach STRECKER (1995, S. 25) zum Vergleich herangezogen. Zusätzlich werden die Analysenergebnisse des Treibsel mit den Schwefelgehalten anderer Biomassen sowie Stein- und Braunkohle nach FNR (2007, S. 56) gegenübergestellt.



**Abbildung 72: Schwefelgehalte in den Treibselproben von 2010 und 2011 im Vergleich mit Literaturangaben (mit : Mittelwerte ohne Treibsel-Baggerschlamm; 1: STRECKER, 1995, S. 25; 2: FNR, 2007, S. 56)**

Die Mittelwerte der Schwefelgehalte in den Treibselproben lagen 2010 bei rund 0,3 % der TS und 2011 bei rund 0,25 % der TS. Diese Ergebnisse entsprechen den Schwefelgehalten der Treibselprobe Sandstedt nach STRECKER (1995, S. 25), die einen Schwefelgehalt von ebenfalls rund 0,25 % der TS aufwies. Bei Betrachtung der einzelnen Ergebnisse der Schwefelanalysen im Rahmen dieses Projektes liegen die Schwefelgehalte von drei Proben relativ deutlich über den Mittelwerten. Hierbei handelt es sich um das Treibsel der DA Krummhörn aus dem Jahr 2010 mit einem Schwefelgehalt von rund 0,7 % der TS. Weiter betrifft dies das Treibsel vom DVB Land Wursten aus 2011 mit rund 0,5 % der TS sowie den Treibsel-Baggerschlamm von 2010 mit ungefähr 0,7 % der TS. Diese drei Werte liegen in dem Bereich, den STRECKER (1995, S. 25) für die Treibselprobe Leybucht aufführt.

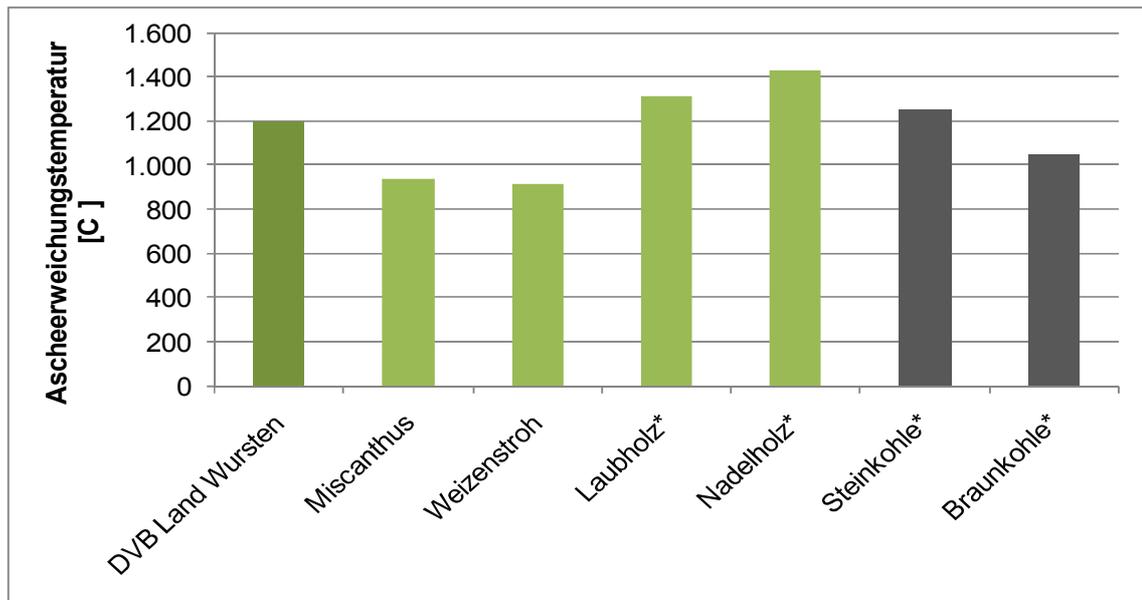
Die Einzelwerte der anderen Treibselproben wiesen einen Schwefelgehalt von maximal 0,3 % der TS auf und entsprechen damit in etwa den von STRECKER (1995, S. 25) angegebenen Schwefelgehalten der Probe Sandstedt.

Auffällig ist, dass die Treibselproben, die im Rahmen dieses Projektes analysiert wurden, teilweise Schwefelgehalte aufweisen, die deutlich über denen anderer Biomassen,

wie Miscanthus (ca. 0,15 % der TS) oder Weizenstroh (ca. 0,1 % der TS), liegen. Die Mittelwerte der Schwefelgehalte der Probenahmekampagnen 2010 und 2011, die im Rahmen dieses Projektes analysiert wurden, liegen vielmehr im Bereich von Braunkohle (rund 0,4 % der TS) als in den Bereichen anderer Biomassen wie Weizenstroh oder Miscanthus, bei denen eher eine Ähnlichkeit zum Treibsel zu vermuten wäre.

Vom Schwefelgehalt eines Brennstoffes werden die bei der Verbrennung entstehenden Schwefeldioxidemissionen ( $\text{SO}_2$ -Emissionen) bestimmt.  $\text{SO}_2$  trägt in beträchtlichem Umfang zur Luftverschmutzung bei. In Verbindung mit (Luft-)Sauerstoff entsteht aus dem  $\text{SO}_2$  Schwefeltrioxid. In Verbindung mit Wasser entsteht aus dem Schwefeltrioxid wiederum Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) und daraus saurer Regen. Um dies zu vermeiden, ist bei der thermischen Verwertung stark schwefelhaltiger Brennstoffe eine aufwändige Rauchgasreinigung von Nöten.

Auch bezüglich der **Ascheerweichungstemperatur** von Treibsel bestehen Unterschiede im Vergleich zu anderen Biomassen (vgl. Abbildung 73).



**Abbildung 73: Vergleich der Ascheerweichungstemperaturen des Treibsel vom DVB Land Wursten mit anderen biogenen Brennstoffen sowie Stein- und Braunkohle (\*: FNR, 2007, S. 59)**

Der Wert für die Erweichungstemperatur (1.192 °C) der untersuchten Treibselprobe liegt im Vergleich zu anderen Halmgütern relativ hoch, wie in Vergleichsuntersuchungen festgestellt werden konnte. Für Miscanthus lag der Wert bei 937 °C, für Weizenstroh bei 912 °C. In Bezug auf das Ascheerweichungsverhalten erfüllt Treibsel damit fast die Anforderung, die nach EN plus für Holzpellets der höchsten Qualität (A1) gelten ( $DT > 1.200$  °C). In Abbildung 73 wird die ermittelte Ascheerweichungstemperatur des Treibsel vom DVB Land Wursten den Ascheerweichungstemperaturen von Miscanthus, Weizenstroh, Laub- und Nadelholz sowie Stein- und Braunkohle gegenübergestellt. Mit rund 1.300 °C und etwa 1.400 °C liegen die Ascheerweichungstemperaturen von Laub- bzw. Nadelholz nach FNR (2007, S. 59) rund 100 °C bzw. 200 °C über

der Temperatur des untersuchten Treibselns. Die Untersuchung ergab, dass die Ascheerweichungstemperatur des Treibselns vom DVB Land Wursten in etwa auf dem Niveau von Braunkohle (rund 1.200 °C) liegt. Steinkohle liegt um 200 °C unter diesen Werten.

Die Ergebnisse der Untersuchungen Anteile von **Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff** zeigen, dass Treibsel hauptsächlich Kohlenstoffverbindungen aufweist. Die Kohlenstoffgehalte der jeweiligen Trockensubstanzen liegen im Bereich zwischen 39 % der TS und 44 % der TS (2010) bzw. 35 % der TS und 45 % der TS (2011).

Die bei der Verbrennung freigesetzte Energie wird hauptsächlich durch die Oxidation des Kohlenstoffs bestimmt. Im Vergleich der Kohlenstoffgehalte in der Trockensubstanz des untersuchten Materials mit anderen biogenen Brennstoffen ist das untersuchte Treibsel im unteren Bereich von Halmgütern wie Roggenstroh mit rund 47 % der TS, Weizenstroh mit rund 46 % der TS und Landschaftspflegeheu mit rund 45 % der TS einzuordnen. Laub- und Nadelholz enthalten rund 48 % bis 50 % der TS Kohlenstoff. Der Kohlenstoffgehalt dieser biogenen Brennstoffe wird von fossilen Brennstoffen, wie Stein- und Braunkohle noch übertroffen. Steinkohle rund 73 % der TS, Braunkohle rund 66 % der TS Kohlenstoff.

Neben dem Kohlenstoff hat der im Brennstoff enthaltene Wasserstoff bei der Oxidation Einfluss auf den Heizwert und somit auf die erzeugbaren Energiemengen. Die Wasserstoffgehalte der Treibselproben von 2010 liegen zwischen 5,4 % der TS und 6,1 % der TS. In 2011 lagen diese Werte zwischen 4,3 % der TS und 5,8 % der TS. Auch dieser Bereich ist nach FNR (2007, S. 56) bei biogenen Festbrennstoffen, insbesondere bei Halmgütern, wiederzufinden. So enthalten Roggenstroh 6 % der TS, Weizenstroh 5,8 % der TS und Landschaftspflegeheu 6,1 % der TS Wasserstoff.

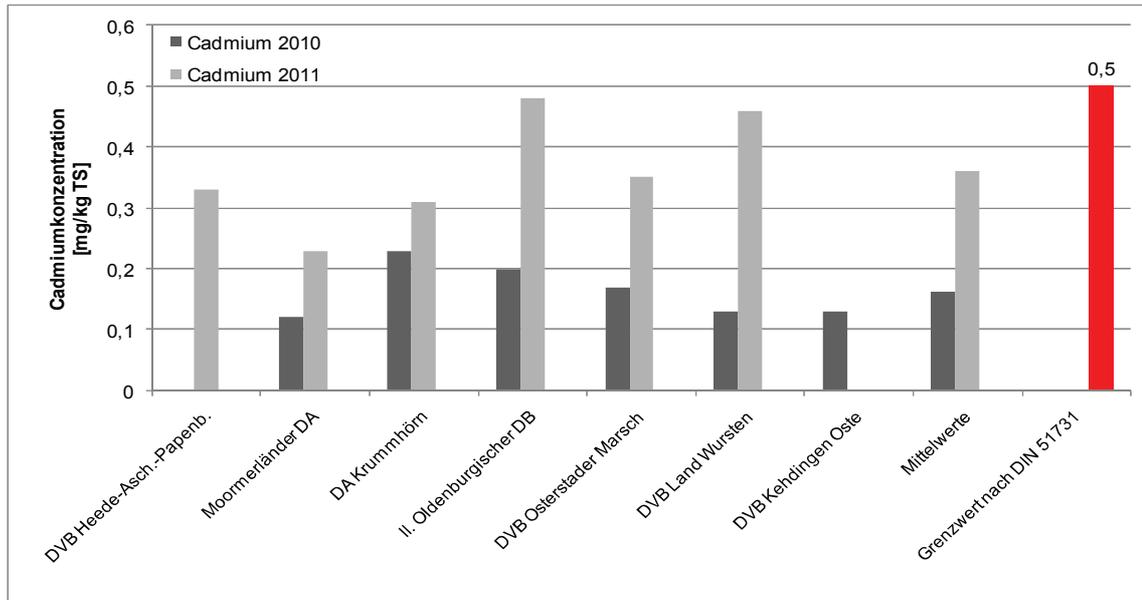
Gemessen an diesen Kriterien, wäre das Treibsel der untersuchten Standorte, das im Rahmen dieses Projektes analysiert wurde, für eine thermische Verwertung, analog zur Verwertung von Halmgütern, geeignet. Werden jedoch die Gehalte an emissionsrelevanten Elementen, wie bspw. Stickstoff und Schwefel, betrachtet, fällt diese Beurteilung anders aus. Der im Brennstoff enthaltenen Stickstoff wirkt sich nach FNR (2007, S. 57) direkt auf die Bildung von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) aus, da dieses Element fast vollständig in die Gasphase übergeht.

Die untersuchten Proben von 2010 weisen Stickstoffgehalte zwischen 0,75 und 2,3 % der TS auf. Im Vergleich hierzu enthalten die thermisch verwertbaren Halmgüter Roggenstroh (0,55 % der TS) und Weizenstroh (0,48 % der TS) geringere Stickstoffgehalte. Das Landschaftspflegeheu ist mit einem Stickstoffgehalt von 1,14 % der TS im mittleren Bereich der untersuchten Treibselproben einzuordnen. Laub- und Nadelholz enthalten mit 0,4 % der TS bzw. 0,13 % der TS weniger Stickstoff als Halmgüter oder Treibsel.

Hinsichtlich der **Schwermetall-** bzw. **Spurenelementgehalte** im untersuchten Treibsel wird an dieser Stelle ein Vergleich mit den Grenzwerten für Holzbriketts und –pellets nach DIN 51731 aufgeführt. Die folgenden Abbildungen zeigen den Vergleich zwischen

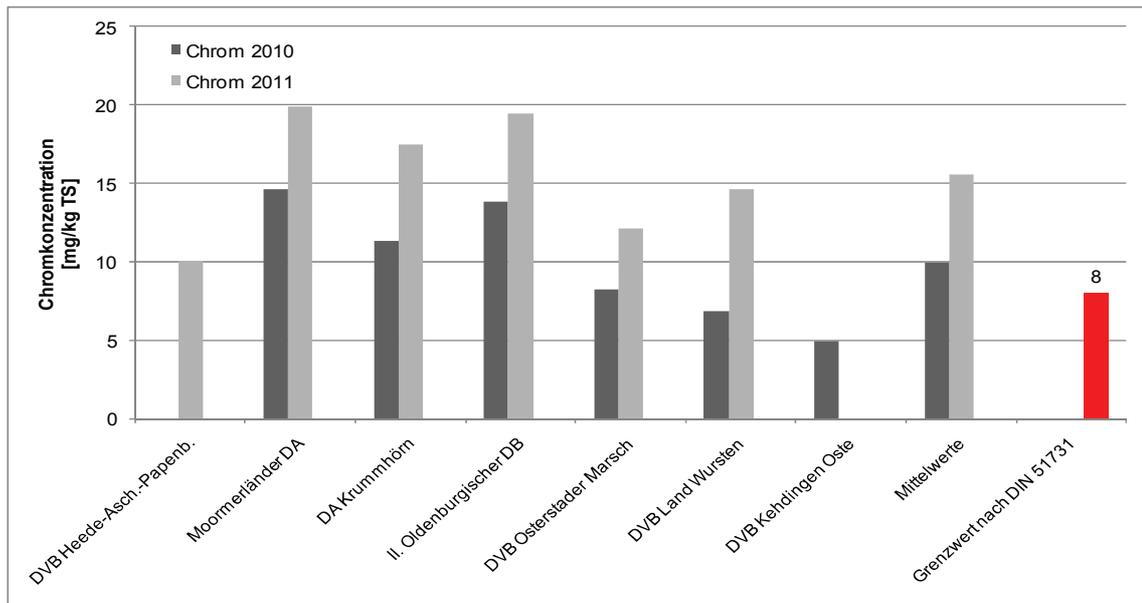
gemessenen Elementkonzentrationen und –gehalten der Elemente Cadmium, Chrom, Blei und Kupfer im Treibsel und den Grenzwerten nach DIN 51731. In dieser Norm werden auch die Grenzwerte für die Elemente Schwefel, Chlor und Stickstoff festgelegt, die hier ebenfalls zum Vergleich herangezogen werden.

Zwar wird der Grenzwert für die nach DIN 51731 erlaubte Cadmiumkonzentration nicht überschritten, aber im Jahr 2011 erreichten die Treibselproben vom II. Oldenburgischen DB und dem DVB Land Wursten Cadmiumkonzentrationen, die nur unwesentlich unterhalb des Grenzwertes liegen.



**Abbildung 74: Cadmiumkonzentrationen im Treibsel und Grenzwerte nach DIN 51731**

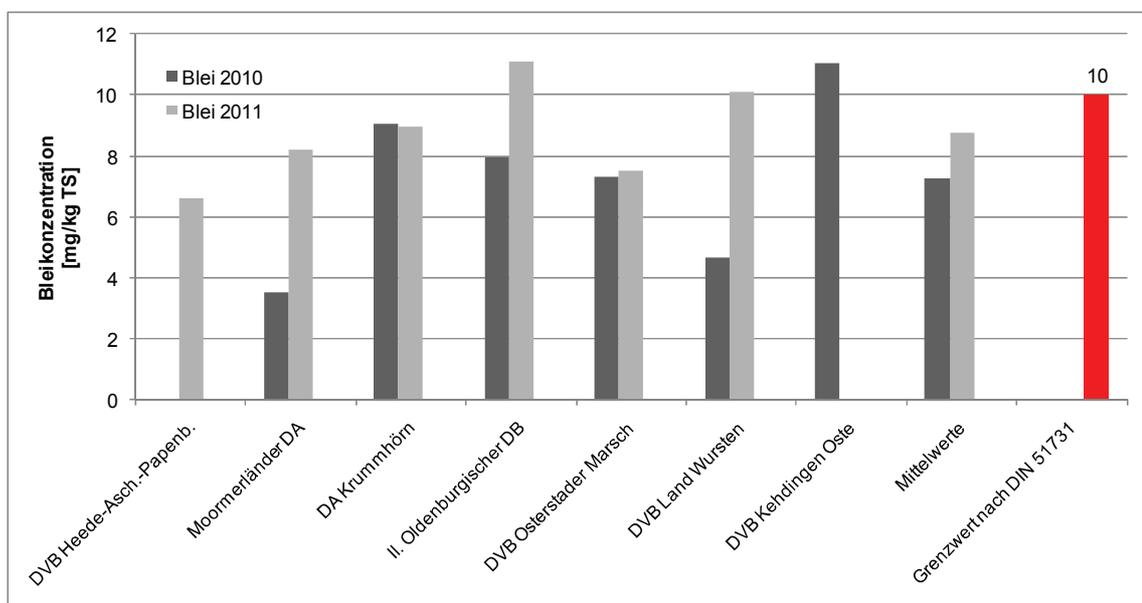
Die Grenzwerte der zulässigen Chromkonzentration nach DIN 51731 werden, wie in Abbildung 75 ersichtlich, nur in den Treibselproben des Jahres 2010 vom DVB Kehdingen Oste, DVB Land Wursten und DVB Osterstader Marsch eingehalten. In allen anderen Treibselproben werden die genannten Grenzwerte überschritten. Auffällig ist hier die Schwankung der Chromkonzentrationen innerhalb des Betrachtungszeitraumes von einem Jahr.



**Abbildung 75: Chromkonzentrationen im Treibsel und Grenzwerte nach DIN 51731**

Hinsichtlich der Bleikonzentration im Treibsel sind drei Treibselproben zu nennen, bei denen der Grenzwert nach DIN 51731 nicht eingehalten wird (vgl.

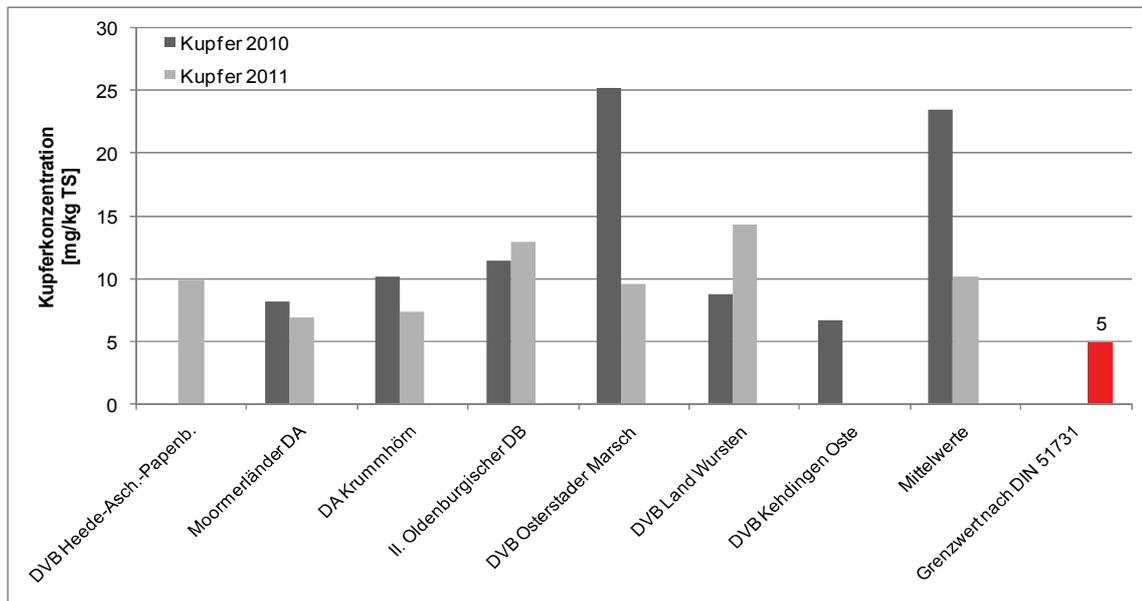
Abbildung 76). Dies sind die Proben des DVB Kehdingen Oste im Jahr 2010 sowie die Proben vom II. Oldenburgischen DB und vom DVB Land Wursten im Jahr 2011. Bei den letztgenannten Deichverbänden schwanken die Bleikonzentrationen im Treibsel innerhalb eines Jahres deutlich. So wird im Treibsel vom DVB Land Wursten eine Verdoppelung der Bleikonzentration in der untersuchten Treibselbiomasse gemessen.



**Abbildung 76: Bleikonzentrationen im Treibsel und Grenzwerte nach DIN 51731**

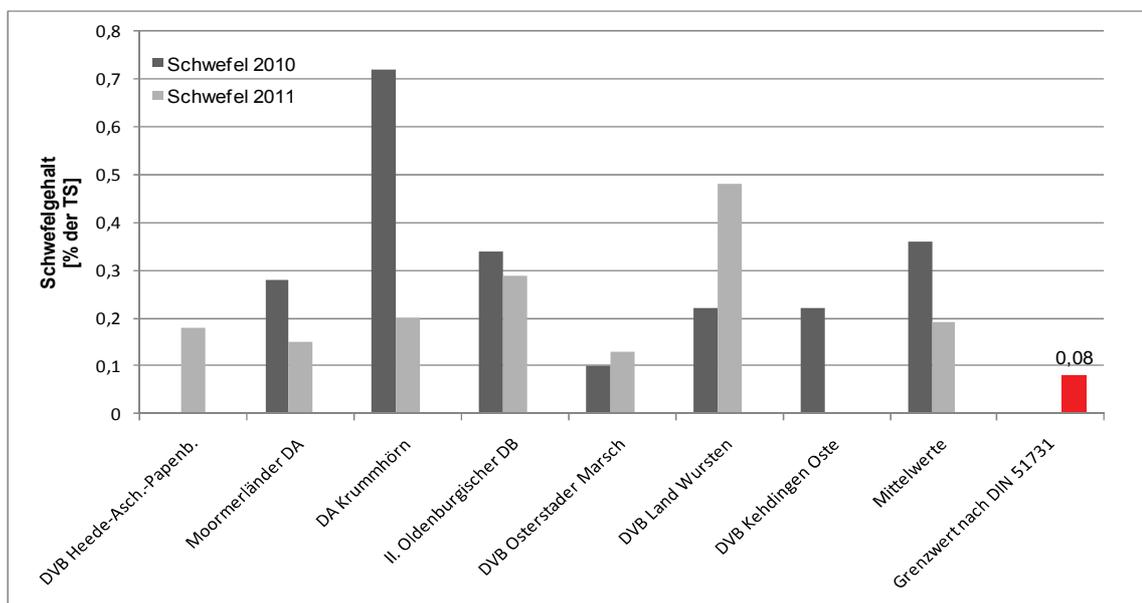
Nach DIN 51731 liegt der Grenzwert der Kupferkonzentration bei 5 mg/kg TS. Aus Abbildung 77 wird deutlich, dass dieser Grenzwert in keiner Treibselprobe eingehalten wird. Die nachgewiesenen Kupferkonzentrationen liegen im Mittel zwischen rund

10 mg/kg TS (2010) und 24 mg/kg TS (2011). Hiermit werden die Anforderungen an einen Brennstoff nach DIN 51731 nicht erfüllt.



**Abbildung 77: Kupferkonzentrationen im Treibsel und Grenzwerte nach DIN 51731**

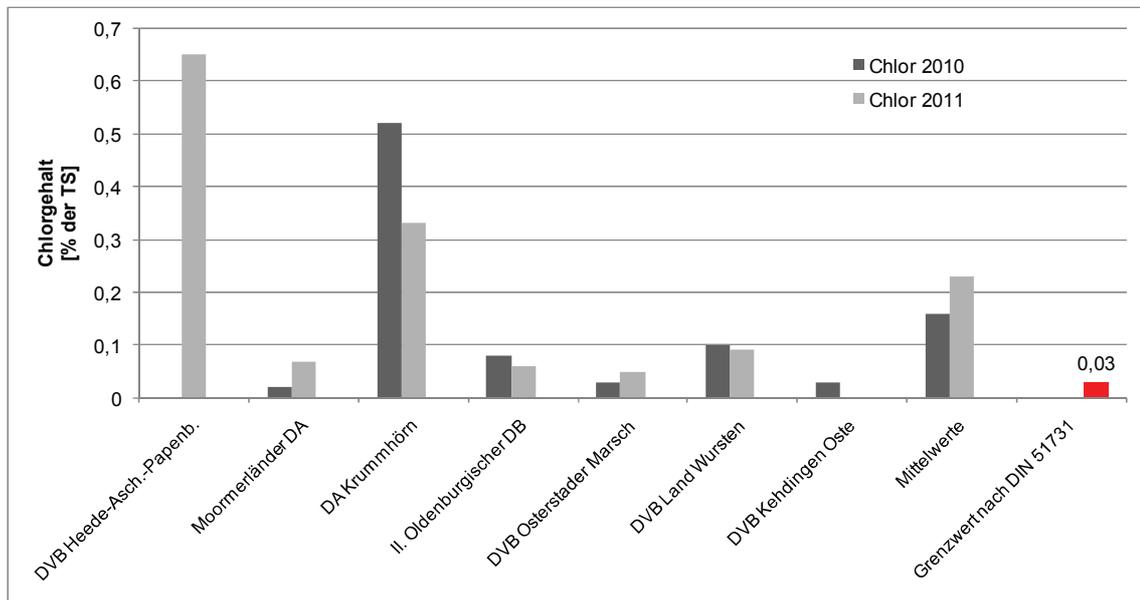
Die Ansprüche an einen Brennstoff hinsichtlich seines Schwefelgehaltes werden ebenfalls in der DIN 51731 vorgegeben.



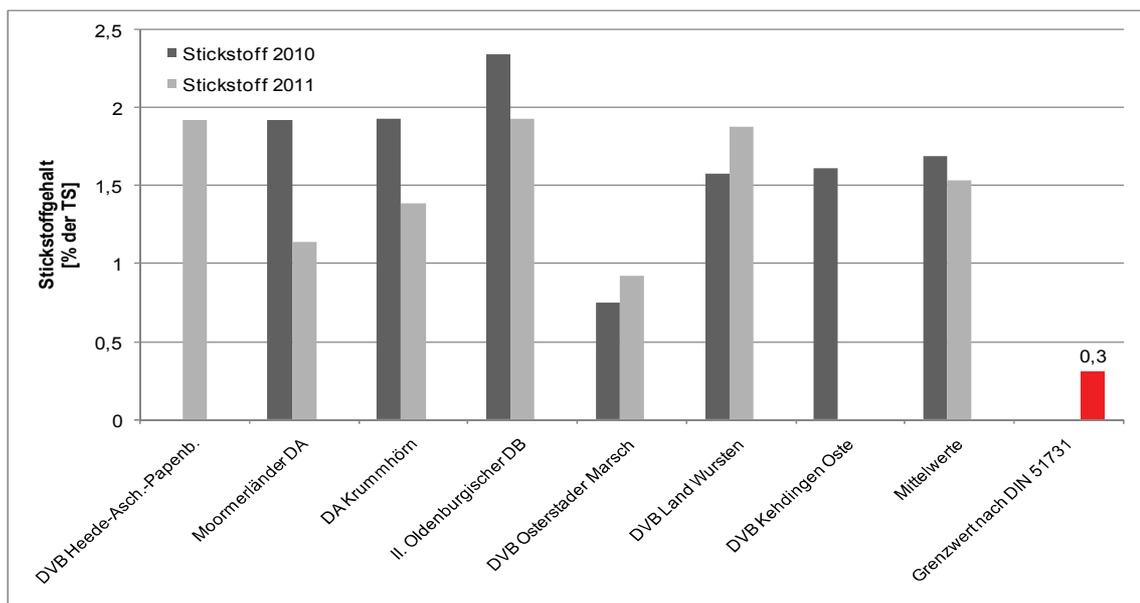
**Abbildung 78: Schwefelgehalte im Treibsel und Grenzwerte nach DIN 51731**

So darf in einem der DIN 51731 entsprechenden Brennstoff der Schwefelgehalt den Wert von 0,08 % der TS nicht überschreiten. Die Treibselproben, die während des Betrachtungszeitraumes untersucht wurden, überschreiten diesen Grenzwert. Auch dieser Fakt verdeutlicht, dass Treibsel nur bedingt für eine thermische Verwertung geeignet ist.

Die DIN 52731 gibt den Grenzwert für Chlor mit 0,03 % der TS an. In Abbildung 79 wird dieser Grenzwert den ermittelten Chlorgehalten im untersuchten Treibsel gegenüber gestellt.



**Abbildung 79: Chlorgehalte im Treibsel und Grenzwerte nach DIN 51731**



**Abbildung 80: Stickstoffgehalte im Treibsel und Grenzwerte nach DIN 51731**

Bis auf drei Proben aus dem Jahr 2010 (Moormerländer DA, DVB Osterstader Marsch und DVB Kehdingen Oste) wird auch der Grenzwert für Chlor z. T. deutlich (bspw. DVB Heede-Aschendorf-Papenburg in 2011) überschritten. Waschversuche am Beispiel der Probe aus dem Jahr 2010 der Deichacht Krummhörn, verdeutlichen, dass die Reduktion des Chlorgehalts nur schrittweise unter Einsatz großer Mengen an Frischwasser zu realisieren ist. Wiederholte Waschvorgänge mit möglichst effektiver mechanischer Trocknung wären notwendig. Nach erster Einschätzung ist dieses Verfahren nicht wirtschaftlich zu realisieren.

Der nach DIN 51731 vorgegebene Grenzwert des Stickstoffgehaltes beträgt 0,3 % der TS. Aus Abbildung 80 wird ersichtlich, dass dieses Kriterium von keiner Treibselprobe, die im Rahmen dieses Forschungsprojektes untersucht worden ist, eingehalten wird. Nach DIN 51731 wäre Treibsel nicht als potentieller Brennstoff geeignet.

### 6.3 Biostabilität

Die Analyseergebnisse aller durchgeführten Verfahren zur Bestimmung der Biostabilität (Tabelle 49) führten bei der Treibsel Frischmasse, der Treibsel Pyrolysekohle und bei der Steinkohle zu einem eindeutigen Ergebnis bezüglich ihrer Stabilität.

Die Treibsel Frischmasse als Ausgangsmaterial weist die geringste Stabilität auf. Dies konnte durch alle Verfahren bestätigt werden. Die Pyrolysekohle hingegen hat durch die Pyrolyse einen sehr stabilen Zustand erreicht. Dies belegten alle durchgeführten Analysemethoden. Der Steinkohle wurde anhand der Analysen ihre Stabilität bestätigt.

Für den Treibsel Kompost und den Treibsel Gärrest ergaben sich Widersprüche bei der Betrachtung der Ergebnisse der Atmungsaktivität und der infrarotspektroskopischen Untersuchung. Insbesondere für den Treibsel Kompost, aber auch für den Treibsel Gärrest konnte eine relativ geringe Atmungsaktivität in Form des  $AT_4$  nachgewiesen werden. Wohingegen das Spektrum der infrarotspektroskopischen Untersuchung Substrate erkennen lässt, die im Verhältnis zum Ausgangssubstrat kaum eine Änderung der Zusammensetzung der Molekülstrukturen aufweisen. Dementsprechend wäre für diese Substrate eine hohe Atmungsaktivität zu erwarten gewesen. Für die geringe gemessene Atmungsaktivität spricht jedoch auch das Ergebnis des C/N-Verhältnisses, welches auf einen bereits vollzogenen mikrobiellen Abbau des Substrates hindeutet.

Um diese gegensätzlichen Ergebnisse aufzuklären, sollten weitere strukturaufklärende Methoden angewandt werden, um die Zusammensetzung der Verbindungen darzustellen. Zusätzlich sollte die Messung der Atmungsaktivität über einen längeren Zeitraum erfolgen.

Die unterschiedlichen Analysen der HTC-Kohle ergaben keine einheitliche Aussage über deren Grad der Biostabilität. Der relativ hohe Wert der Atmungsaktivität, die hohen Mengen an gelöstem organischen Kohlenstoff, sowie das Spektrum aus der infrarotspektroskopischen Messung sprechen eher für eine Substanz mit einem hohen Anteil leicht abbaubarer Verbindungen. Der Inkohlungsgrad aus dem Inkohlungsdiagramm, die vorhandenen Braunhuminsäuren und die Anreicherung des organischen Kohlenstoffs in der Kohle deuten auf ein vergleichsweise stabiles Substrat hin. Im Fall der HTC-Kohle widersprechen sich jedoch die beiden strukturaufklärenden Analysemethoden. Das Inkohlungsdiagramm welches das H/C-Verhältnis beinhaltet und damit ein Anzeiger für die Molekülsättigung ist, deutet auf eine relativ stabile Verbindung hin. Das IR-Spektrum hingegen, welches die vorhandenen funktionellen Gruppen darstellt, belegt das Gegenteil. Auch hier sollten noch weitere Untersuchungen erfolgen, um die Strukturen der HTC-Kohle und damit ihre Verwendungsmöglichkeiten weiter aufzuklären.

Eine Charakterisierung der HTC-Kohle muss die verschiedenen Fraktionen des Substrates (Huminstoffe, ligninhaltige Bestandteile, aromatische Bestandteile u. a.) qualitativ und quantitativ bestimmen, um zu einer genauen Aussage über die Gesamtstabilität des Substrates zu gelangen.

Aus diesen Ergebnissen ist zu schließen, dass für die Bestimmung der Biostabilität von Treibsel Kompost, Treibsel Gärrest und der HTC-Kohle aus Treibsel mehrere Verfahren herangezogen müssen, um die Stabilität der jeweiligen Substrate zu charakterisieren.

### 6.3.1 Trockensubstanz und organische Trockensubstanz

#### Trockensubstanz und Wassergehalt

Das untersuchte Substrat wird durch die thermische Behandlung dehydratisiert. Diese Entwässerung führt zu einer erheblichen Volumen- und Gewichtsreduktion.

**Tabelle 47: Kohlenstoffgehalt pro kg Substrat und pro kg Frischmasse**

Substrat	TS [g] pro kg Substrat	C-Gehalt in % der Menge des Substrates	C-Gehalt [g] / kg Substrat	C-Gehalt [g] aus 1 kg Frischmasse
Treibsel Frischmasse	207	41,1	85,15	85,130
Treibsel Kompost	267	40,4	107,78	
Treibsel Gärrest	215	35,3	75,91	
HTC-Kohle Treibsel	858	51,5	441,76	82,07
Pyrolysekohle Treibsel	975	53,4	520,42	43,094
Steinkohle	989	87,6	866,71	

Für die Herstellung von 1 kg HTC-Kohle werden 5,4 kg Frischmasse benötigt, es findet eine Kohlenstoffanreicherung um etwa 500 % statt. für die Herstellung von 1 kg Pyrolysekohle werden 12 kg Frischmasse benötigt. Die Kohlenstoffanreicherung beträgt 600 %.

#### Organische Trockensubstanz

Es findet hier eine erhebliche Aufkonzentration des organischen Kohlenstoffs statt.

Die Wiederfindungsrate der Trockensubstanz im Feststoff bei der hydrothermalen Carbonisierung beträgt 77 %, im Pyrolyseprozess 39 %. Damit einhergehend enthält die HTC-Kohle mit 58 % der ursprünglichen oTS mehr organische Substanz als die Pyrolysekohle in der 23 % der ursprünglichen oTS enthalten sind.

Die Abnahme der oTS-Gehalte von der Frischmasse zu der HTC-Kohle und der Pyrolysekohle sind verfahrenstechnisch bedingt. Bei beiden Verfahren entstehen Fest-, Flüssig- und Gasphasen, die jedoch unterschiedliche Anteile des gesamten Ausgangsmaterials enthalten. Der hohe Aschegehalt der Pyrolysekohle lässt darauf schließen, dass sich die anorganischen Bestandteile bei der Pyrolyse überwiegend in der Feststoffphase anreichern, wohingegen ein größerer Teil der organischen Substanz in die Gasphase und in die Flüssigphase übergeht. Bei der hydrothermalen Car-

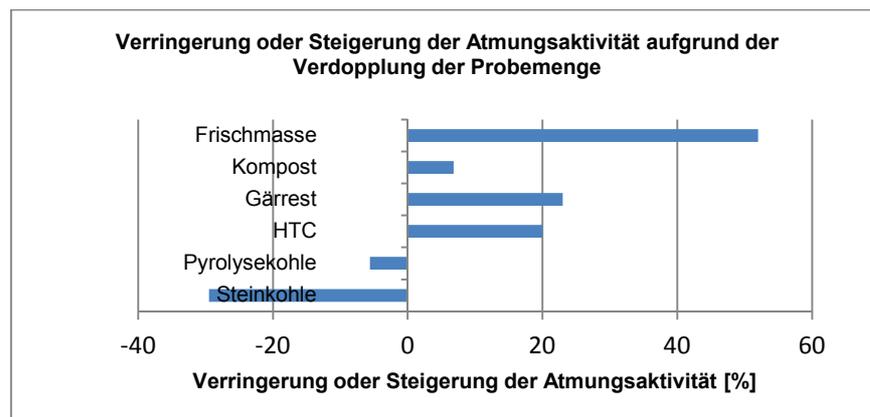
bonisierung hingegen ist der anorganische Anteil geringer, da ein Teil der Anorganik auch in die Flüssigphase überführt wird. Der geringe organische Anteil des Gärrestes liegt an dem relativ hohen Anteil des Kohlenstoffs, der durch die Fermentation in Methan umgesetzt wurde. Dies verringert den relativen Anteil der organischen Trockensubstanz und erhöht den relativen Anteil anorganischer Bestandteile.

### 6.3.2 Atmungsaktivität

Unabhängig von dem Mischungsverhältnis mit Kompost unterliegt frisches Treibsel am stärksten dem biologischen Abbau. Auch die HTC-Kohle weist eine hohe Atmungsaktivität auf. Demgegenüber stehen Stein- und Pyrolysekohle mit sehr geringen AT4-Werten. Gärreste und Kompost weisen eine ähnliche mittlere biologische Stabilität auf. Pyrolysekohle scheint den biologischen Abbau sogar zu hemmen. Um diese Vermutung zu bestätigen, sollten Atmungsaktivitätsmessungen über einen längeren Zeitraum (z. B. 21 Tage) durchgeführt werden.

#### Beurteilung des relativen Anteils leicht abbaubarer Substanzen

Die Steigerung der Atmungsaktivität der Substrate nach Erhöhung der Probemenge (vgl. 5.4.10.2) lässt auf den relativen Anteil leicht abbaubarer Substanzen im Verhältnis zu der in der Versuchszeit insgesamt abgebauten Substanzmenge schließen.



**Abbildung 81: Prozentuale Veränderung der Atmungsaktivität bei Probenverdopplung**

Ausgehend davon, dass die Anzahl der Mikroorganismen, die sich zu Versuchsbeginn im Kompost befindet, bei jedem Ansatz ähnlich ist, bedeutet die Steigerung der Atmungsaktivität bei Verdopplung der Probenmenge, dass sich umso mehr leicht abbaubare Substanzen in einer Probe befinden, je höher die Steigerung der Atmungsaktivität nach Erhöhung der Probemenge ausfällt.

Die Steigerung der Atmungsaktivität pro Gramm Substanz bedeutet, dass in der gleichen Zeit pro Gramm Substrat mehr Sauerstoff verbraucht, d. h. auch mehr Substrat abgebaut wird. Das kann nur erfolgen, wenn der Abbau schneller vollzogen wird und nur aufgrund des erhöhten Anteiles leicht abbaubarer Substanzen. Die relative Erhöhung des Anteils der leicht abbaubaren Substanzen, im Vergleich zu den gesamten in der Messzeit abgebauten Substanzen, in den einzelnen Proben wird durch die prozentuale Veränderung der Atmungsaktivität abgebildet.

Hiernach lässt sich für die untersuchten Substrate folgende Reihe aufstellen, in der der relative Anteil der leicht abbaubaren Substanzen abnimmt:

Treibsel Frischmasse – Treibsel Gärrest – HTC-Kohle aus Treibsel – Treibsel Kompost – Pyrolysekohle aus Treibsel – Steinkohle

### **Schimmelbildung bei der Messung der Atmungsaktivität der HTC-Kohle**

Die beobachtete Schimmelpilzbildung bei der Messung der Atmungsaktivität von HTC-Kohle muss durch weitere Untersuchungen bestätigt werden. Eine Ursache für die Entwicklung von Schimmelpilzen könnte ein hoher Gehalt an ligninhaltigen Verbindungen sein. Diese Verbindungen werden hauptsächlich unter aeroben Bedingungen von Schimmelpilzen abgebaut. Das setzt voraus, dass diese Pilzkultur im Kompost vorhanden ist. Diese Fakten sind zu prüfen, um den Gehalt an ligninhaltigen Verbindungen möglicherweise hierüber bestätigen zu können.

### **6.3.3 Bestimmung der Hummifizierungsart**

Die Bestimmung, der in den Proben enthaltenen Huminstoffarten, mittels photometrischer Messung führte für Treibsel Frischmasse, Treibsel Kompost und den Treibsel Gärrest zu annähernd gleichen Ergebnissen. Dies ist in Frage zu stellen, da für den Treibsel Kompost, auch aufgrund der niedrigen Atmungsaktivität, das ausgeprägtere Vorhandensein stabiler Huminstoffe zu erwarten war. Der überwiegende Anteil der Huminstoffe in der Treibsel HTC-Kohle hingegen liegt im Braunhuminsäurebereich, obwohl die Atmungsaktivität der HTC-Kohle fast dreimal so hoch ist, wie die des Kompostes aus Treibsel. Die Extinktionswerte für die Pyrolysekohle und die Steinkohle liegen im Bereich der Grauhuminsäuren und damit in einem Bereich stabiler Verbindungen. Dies wird für die beiden Substrate auch in der Gesamtheit ihrer Verbindungen durch die anderen Analysen bestätigt.

### **6.3.4 TOC und DOC**

Der gemessene gesamte Kohlenstoffgehalt (TC), der für die Bestimmung des TOC notwendig ist und aufgrund des sehr geringen anorganischen Kohlenstoffgehaltes (TIC) fast dem gesamten Kohlenstoffgehalt entspricht, hätte mit dem Wert des Kohlenstoffs der CHN-Analyse übereinstimmen müssen. Hier ergaben sich jedoch Abweichungen bis zu 10 %. Diese Abweichungen könnten aufgrund inhomogener Proben entstanden sein, aber auch messtechnische Ursachen haben

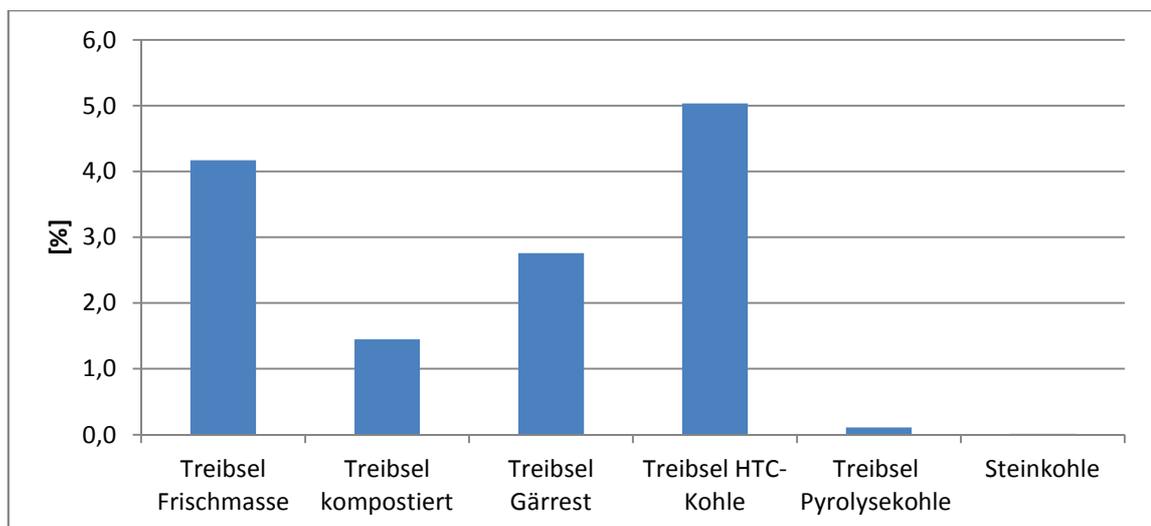
Beide Geräte zur Bestimmung des Kohlenstoffgehaltes arbeiten mit einer zulässigen Standardabweichung von 5 %, so dass es zu einer 10 %igen Abweichung kommen kann, wenn das eine Ergebnis nach oben und das andere nach unten abweicht. Zur Verbesserung der Aussagekraft sollte dies überprüft werden.

Die Treibsel Frischmasse enthält mit 1.540 mg/l einen hohen Anteil an gelöstem organischem Kohlenstoff. Das resultiert aus dem bereits begonnenen aeroben Abbau, bei dem die Polysaccharide bereits zersetzt wurden und dann zum Teil als Kolloide oder in gelöster Form im gelösten organischen Kohlenstoff (DOC) wiederzufinden sind. Für

kompostiertes Treibsel reduziert sich der Wert auf 534 mg/l. Hier ist zu erkennen, dass die Bildung von makromolekularen Huminstoffen während der Kompostierung ein Auswaschen der organischen Substanz vermindert. Für den Gärrest beträgt der DOC 889 mg/l und ist somit um 66 % höher als beim Kompost. Dies resultiert aus den organischen Säuren, die bei der Vergärung entstehen und im Gärrest noch als leicht eluierbare Bestandteile vorhanden sind. Die HTC-Kohle weist mit 2.337 mg/l den höchsten Anteil gelösten organischen Kohlenstoffs auf. Dies zeigt, auch im Zusammenhang mit der Atmungsaktivität, dass die bei der hydrothermalen Carbonisierung entstehenden Verbindungen nicht so komplex und damit stabil sind, wie die Position der HTC-Kohle im Inkohlungsdiagramm (vgl. Abbildung 54) es vermuten lässt. Bei der hydrothermalen Carbonisierung führen veränderte Ausgangssubstrate und Verfahrensparameter jedoch zu einer starken Veränderung der Struktur der Produkte (RAMKE, 2010, S. 8), so dass dieses Ergebnis nur zu einer Bewertung für das Ausgangssubstrat Treibsel mit den genannten Verfahreneinstellungen führt.

Aus der Pyrolysekohle und der Steinkohle lassen sich nahezu keine organischen Kohlenstoffe eluieren. Dies bestätigt im Zusammenhang mit der Atmungsaktivität, die hier ebenfalls gering ist, die hohe Stabilität der Verbindungen.

Bezieht man den gelösten organischen Kohlenstoff auf den gesamten organischen Kohlenstoff (TOC), liegen die Anteile mit Ausnahme von Pyrolysekohle und Steinkohle zwischen 1,5 und 5 % (Abbildung 82).



**Abbildung 82: Anteil des gelösten organischen Kohlenstoffs am gesamten organischen Kohlenstoff**

Der gelöste organische Kohlenstoff kann in Ackerböden zwischen 5 und 500 mg/l betragen, liegt aber in der Regel zwischen 15 und 50 mg/l (SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL, 2010, S. 124). Eine Charakterisierung des DOC ist schwierig, da sowohl die Bestandteile als auch die Molekülgrößen stark variieren (SILVEIRA, 2005, S. 504).

### 6.3.5 Infrarotspektroskopische Untersuchung

Aus den Ergebnissen der infrarotspektroskopischen Untersuchung ist darauf zu schließen, dass weder in den Substraten aus den biologischen Abbauprozessen noch in der Kohle aus der hydrothermalen Carbonisierung ein nennenswerter Abbau des Materials oder Umbau zu stabileren Verbindungen stattgefunden hat.

Da es sich bei Ausgangssubstraten um komplexe Gemische handelt, lassen die breiten und überlappenden Banden keine genauen Aussagen über die Zusammensetzung der untersuchten Substrate zu. Es ist also durchaus möglich, dass stabile Verbindungen in einigen Bereichen aufgebaut wurden, an anderer Stelle jedoch leichter abbaubare Fraktionen entstanden sind. Dies führt jedoch im Gesamtbild zu der Aussage, dass die Verfahren nur zu einem gewissen Anteil zu einer Stabilisierung des molekularen Aufbaus der Substrate geführt haben.

Das Spektrum der Pyrolysekohle hingegen zeigt, dass das Material durch die Pyrolyse so stark umgeformt wird, dass nur noch eine wenige funktionelle Gruppen in den molekularen Strukturen vorhanden sind. Dies führt auch im Vergleich mit der Steinkohle, die als Referenzwert analysiert wurde, zu dem Schluss, dass die Pyrolysekohle aus sehr stabilen Verbindungen besteht.

### 6.3.6 Analytik mittels REM und EDX

Anhand der Rasterelektronenmikroskopaufnahmen lässt sich erkennen, dass die Oberflächen der HTC-Kohle und der Pyrolysekohle, bezogen auf das Volumen sehr groß sind. Die unregelmäßigen Oberflächenstrukturen sprechen dafür, dass intermolekulare Reaktionen bis in das Innere der mikrokristallinen Teilchen hinein stattfinden. Hierbei scheint die HTC-Kohle insgesamt ein größeres Porenvolumen aufzuweisen, da bei der Pyrolysekohle immer wieder Teile mit offensichtlich größerer Dichte zu finden sind.

Die Bestandteile der anorganischen Substanz konnten mit der energiedispersiven Röntgenanalyse (EDX) näher bestimmt werden. Es handelt sich hierbei um Silikate, Natriumchlorid, Eisen, Aluminium, Magnesium, Calcium und Brom. Angaben zu den jeweiligen Mengen können nicht gemacht werden. Die Silikate jedoch haben einen hohen Anteil, da diese zur Stabilisierung der Zellwände der Salzwiesenpflanzen, aus denen Treibsel zu großen Teilen besteht, eingelagert werden.

### 6.3.7 CHN-Analyse

Die Abnahmen des Gehalts an Kohlenstoff von der Treibsel Frischmasse zum Treibsel Kompost und ebenso zum Treibsel Gärrest resultieren aus dem aeroben bzw. anaeroben Abbau der Substanzen, bei dem Kohlendioxid, Methan und Wasser freigesetzt werden.

Die Anreicherung des Kohlenstoffs in der HTC-Kohle und der Pyrolysekohle findet aufgrund prozessbedingter Umformungen der im Substrat enthaltenen Verbindungen statt. Hierbei kommt es zur Abspaltung von Heteroatomen und deren Freisetzung in die

Flüssig- und Gasphase, so dass sich die in der Festphase vorhandenen Kohlenstoffatome anreichern (KIESELER, 2010, S. 4).

**Tabelle 48: C, H, N, An- und Abreicherungen in den einzelnen Substraten**

Probe	C-Gehalt [%]	H-Gehalt [%]	N-Gehalt [%]
Treibsel-Frischmasse	0	0	0
Treibsel-Kompost	-1,8	-4,0	+46,8
Treibsel-Gärrest	-14,2	-15,7	+26,6
HTC-Kohle Treibsel	+ 25,2	-14,4	+48,7
Pyrolysekohle Treibsel	+29,8	-78,0	-3,16

Aus den Wiederfindungsraten für die Trockensubstanz im Feststoff, die für die hydrothermale Carbonisierung 77 % und für die Pyrolyse 39 % betragen, und den Kohlenstoffgehalten der Materialien, wird die C-Effizienzen bestimmt. Demnach finden sich 96 % des Kohlenstoffs der Treibsel Frischmasse in der HTC-Kohle und 50 % des Kohlenstoffs in der Pyrolysekohle wieder (auf 1 kg TS Frischmasse bezogen)

Die in der Treibsel Frischmasse und dem Treibsel Kompost annähernd gleichen Werte für die Kohlenstoff- und Wasserstoffgehalte resultieren daraus, dass die Treibsel Frischmasse keine wirkliche Frischmasse mehr ist, sondern ebenfalls schon, vom Zeitpunkt der Ablagerung am Deich bis zum Zeitpunkt der Probenahme, aeroben Abbauprozessen unterlag.

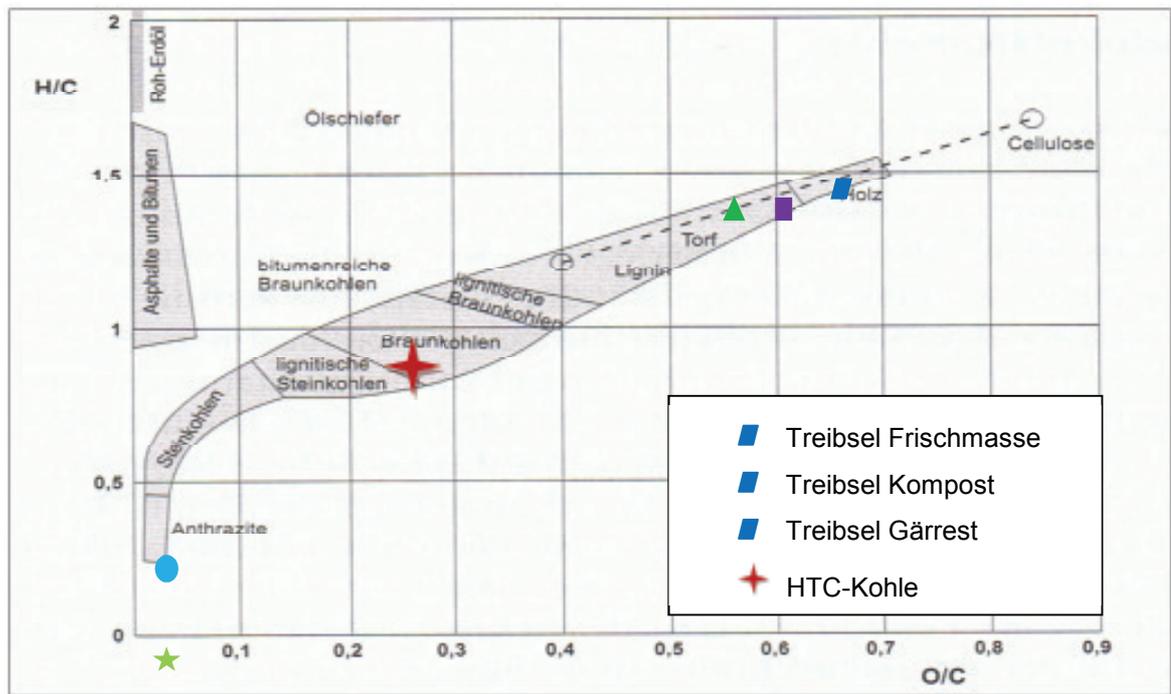
Die Abnahme des Wasserstoffgehalts von der Frischmasse zum Gärrest ist größer als von der Frischmasse zum Kompost. Dies resultiert daraus, dass beim anaeroben Abbau etwa 50 % der freigesetzten Gase aus Methan bestehen, welches vier Wasserstoffatome besitzt.

Die starke Abreicherung des Wasserstoffs bei der Pyrolyse ist damit zu begründen, dass der Feststoffanteil aus dem Pyrolyseprozess im Vergleich zum Feststoffanteil der hydrothermalen Carbonisierung geringer ist und sich somit die Wasserstoffatome prozessbedingt in den massenmäßig überwiegenden Anteilen der Flüssig- und Gasphase befinden. Besonders für die Synthese der Öle in der Flüssigphase sind viele Wasserstoffatome erforderlich.

Das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff (C/N-Verhältnis) ist ein Indikator für den Abbaugrad organischer Substanz. Je geringer das Verhältnis ist, desto weiter ist der Abbau der organischen Substanz fortgeschritten. Dies ist auch an den C/N-Verhältnissen der Treibsel-Frischmasse, des Komposts und des Gärrests zu erkennen. Durch die biologischen Abbauprozesse wird Kohlenstoff abgebaut und dadurch der Stickstoff angereichert.

Bei der Hydrothermalen Carbonisierung gehen Kohlenstoffatome in die flüssige und in die Gasphase über, während der Stickstoff im festen Material verbleibt. Das C/N-Verhältnis sinkt, ohne den Einfluss biologischer Prozesse.

Ähnlich verhält es sich bei der Pyrolyse. Auch hier wird durch den Erhitzungsprozess Kohlenstoff aus dem Ausgangssubstrat entfernt. Gleichzeitig wird auch ein großer Teil des enthaltenen Stickstoffs ausgetrieben, wodurch das C/N-Verhältnis ansteigt.



**Abbildung 83: Natürliches Inkohlungsdiagramm ergänzt mit den für die Substrate ermittelten Werten (verändert nach Belusa et al., 2010, S. 43)**

Ein Inkohlungsdiagramm zeigt, wie weit die Inkohlung eines Substrates fortgeschritten ist und damit auch wie stabil ein Substrat aufgebaut ist. Je kleiner das H/C-Verhältnis ist, umso weniger Wasserstoffatome besitzt ein Substrat im Verhältnis zu der Anzahl seiner Kohlenstoffatome. Ebenso verhält es sich mit dem O/C-Verhältnis. Die Zahl der Sauerstoff- und Wasserstoffatome im Verhältnis zu den vorhandenen Kohlenstoffatomen nimmt im Inkohlungsdiagramm von rechts oben nach links unten ab. Mit der verminderten Anzahl der Heteroatome und dem steigenden C-Gehalt nimmt bei natürlichen Inkohlungsprozessen auch die Stabilität der organischen Verbindungen zu. In Abbildung 83 ist ein um die Ergebnisse aus der Elementaranalyse der untersuchten Substrate ergänztes Inkohlungsdiagramm (BELUSA ET AL., 2010, S. 43) dargestellt.

Die Treibsel Frischmasse, der Treibsel Kompost und der Treibsel-Gärrest liegen leicht oberhalb des Bereiches für Holz. Die HTC-Kohle liegt im Bereich der Braunkohle und weist, verglichen mit den natürlich inkohlten Substraten, ein ähnliches Elementverteilungverhältnis wie die stabile Braunkohle auf. Die Ergebnisse der Steinkohle bestätigen das Material.

Die Pyrolysekohle liegt im Bereich des Anthrazit, was auf eine sehr stabile Verbindung schließen lässt. Das sehr niedrige H/C-Verhältnis lässt auf eine niedrige Molekülsättigung schließen und damit auf eine hohe Anzahl aromatischer Verbindungen (BISCHOFFBERGER, 2008; LEHMANN & JOSEPH, 2010).

Die Universität Bayreuth hat in Kooperation mit der Universität Georgia Grenzwerte zur Definition von Biokohlen festgelegt. Demnach muss das molare H/C-Verhältnis  $< 0,6$  und das molare O/C-Verhältnis  $< 0,4$  sein (GLASER, 2011). Diesen Wert erreicht die HTC-Kohle aus Treibsel nicht. Für andere HTC-Kohlen wurde ähnliches bestätigt (ebd., S. 2). Die Pyrolysekohle hingegen liegt unterhalb dieses Grenzwertes und wird hiernach als Biokohle bzw. Pflanzenkohle bezeichnet.

**Tabelle 49: Zusammenfassende Darstellung der Analyseergebnisse**

Probe/ Versuch	TS	AT 4	CHN- Ergebnisse C- Anreicherung Inkohlungsd. CN-Verhältnis	oTS	Humin- säure- bestim- mung	TOC [%]	REM	DOC [mg/l]	FTIR
Treibsel Frischmasse	20,7	15,7	0 Holz 25,99	84,4	Fulvo- säuren	36,9	Oberfläche mittel	1540	viele funkti- onelle Gruppen
Treibsel kompostiert	26,7	4,0	-1,8 % Holz 17,38	80,2	Fulvo- säuren	36,9	Oberfläche mittel	534	keine Ver- änderung
Treibsel Gärrest	22,0	4,1	-14,5 % Holz 17,68	68,4	Fulvo- säuren	32,2	Oberfläche mittel	889	keine Ver- änderung
HTC-Kohle aus Treibsel	85,1	11,0	+25 % Braunkohle 21,87	75,9	Braun- humins- säuren	46,4	große Ober- fläche und Porenvolu- men	2337	wenige Ver- ände- rungen
Pyrolyse- kohle aus Treibsel	97,5	0,7	+29,8 % Anthrazit 34,99	58,3	Grau- humins- säuren	54,8	große Ober- fläche und Porenvolu- men	61	inert
Steinkohle	99,0	1,8	nicht vergleich- bar Steinkohle 63,72	97,1	Grau- humins- säuren	89,5	nicht er- kennbar	12	inert

TS – Trockensubstanzgehalt

AT4 – Atmungsaktivität nach 4 Tagen

oTS - organischer Teil der Trockensubstanz

FTIR –Fourier Transformierte Infrarotspektro-  
skopie

Inkohlungsd. – Einordnung des Substrates im Inkoh-  
lungsdiagramm

TOC – gesamter organischer Kohlenstoffgehalt

REM – Rasterelektronenmikroskopaufnahmen

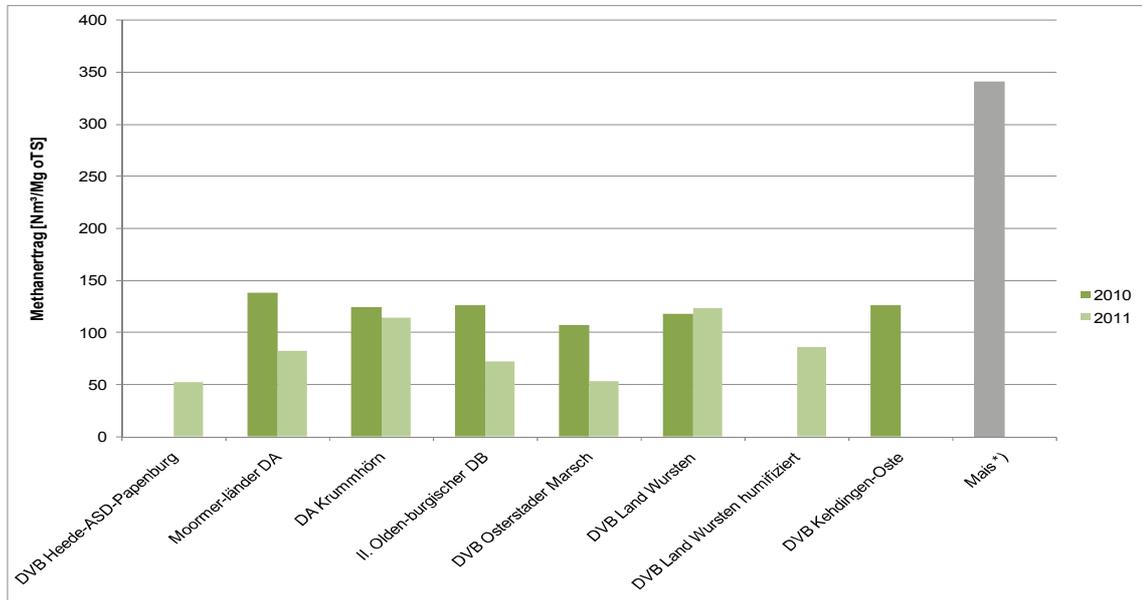
DOC – gelöster organischer Kohlenstoff

#### 6.4 Diskussion der Ergebnisse zur biochemischen Konversion von Treibsel

Als Alternative zum Ansatz der thermischen Verwertung von Treibsel ist die biochemische Konversion anzusehen. MEISGEIER (2008) liefert hierzu die Grundlagen und zeigt auf, dass sich Treibsel unter bestimmten Voraussetzungen als mögliches Substrat zur Biogaserzeugung eignet. Die Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes berücksichtigen unterschiedliche Aspekte der Vergärung von Treibsel.

### 6.4.1 GRW-Biogasertragstests

In der folgenden Abbildung sind die Ergebnisse der GRW-Batchgasertragstests der Untersuchungskampagnen aus den Jahren 2010 und 2011 im Vergleich zum Gasertrag von Maissilage dargestellt.



\*) Richtwert Maissilage nach KTBL, Faustzahlen Biogas, 2. Auflage, S. 94

#### Abbildung 84: Spezifische Methanerträge einzelner Standorte der Jahren 2010 und 2011

Die Biogaserträge der ersten Versuchsreihe (2010) des GRW-Biogasertragstests (Batch-Verfahren) liegen zwischen 197 und 248  $\text{I}_N/\text{kg oTS}$  bei Methangehalten von 53 bis 61 % (vgl. Tabelle 40). Die Biogaserträge der zweiten Versuchsreihe (2011) liegen zwischen 90 und 235  $\text{I}_N/\text{kg oTS}$  bei Methangehalten von 53 bis 60 % (vgl. Tabelle 41). Diese Ergebnisse setzen sich aus den Untersuchungen der Einzelproben aus sieben unterschiedlichen Standorten zusammen, die in zwei aufeinander folgenden Jahren hinsichtlich des Biogaspotenzials untersucht wurden. Die einzelnen Gaserträge werden dreifach wiederholt, was die Datensicherheit der Ergebnisse weiter erhöht. Während die Referenzprobe der Maissilage bereits nach 22 Tagen das Abbruchkriterium erreicht und einen spezifischen Methanertrag von 414  $\text{L}_N/\text{kg oTS}$  liefert, erreichen die Gaserträge aus Treibsel nach 80 Tagen der Versuchsdauer durchschnittlich ein Drittel des Maissilagepotentials. Somit wird ein bewertender Vergleich der einzelnen in der Praxis relevanten Substrate ermöglicht.

Die standortbezogene Bewertung der untersuchten Proben beider Untersuchungsjahre 2010 und 2011 zeigt, dass die Unterschiede eher jahresspezifisch als standortabhängig sind. Wie die folgende Abbildung zeigt, schwanken die spezifischen Methanerträge der gleichen Standorte sehr stark, wobei die Untersuchungsergebnisse der letzten zwei Jahre mit einer Stichprobengröße von  $n = 2$  nicht überbewertet werden sollten. Um das Biogaspotenzial einzelner Standorte abschließend bewerten zu können, sind weitere langwierige Untersuchungen der einzelnen Standorte notwendig.

Die untersuchten Treibselproben haben herkunftsbedingt einen relativ hohen Salzgehalt, so dass in diesem Zusammenhang mögliche Hemmmechanismen durch den Salzgehalt untersucht werden. Die ermittelten Methanerträge zeigen allerdings keine signifikanten Wechselwirkungen zwischen der Biogasaktivität und dem Salzgehalt in den untersuchten Proben, wobei einige Proben relativ hohe Chlorkonzentrationen aufweisen (Abbildung 85). Allerdings ist hier zu berücksichtigen, dass die Versuche in Batchfermentern durchgeführt wurden. Bei kontinuierlichen Verfahren mit Gärrestrückführung oder Garagenverfahren, die mit einer Kreislaufführung des Perkolats arbeiten, kann es unter Umständen zu einer stärkeren Aufkonzentrierung von NaCl kommen.

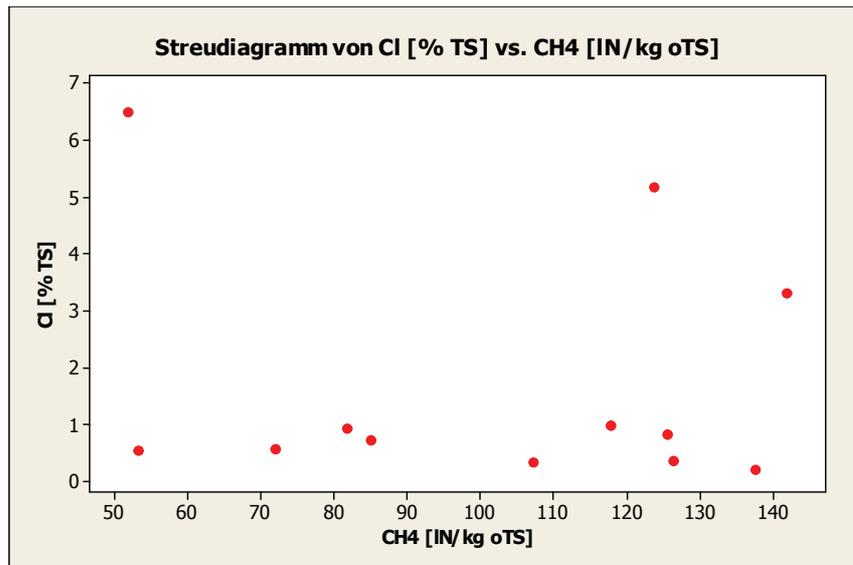


Abbildung 85: Zusammenhang zwischen Chlorgehalt und Methanertrag

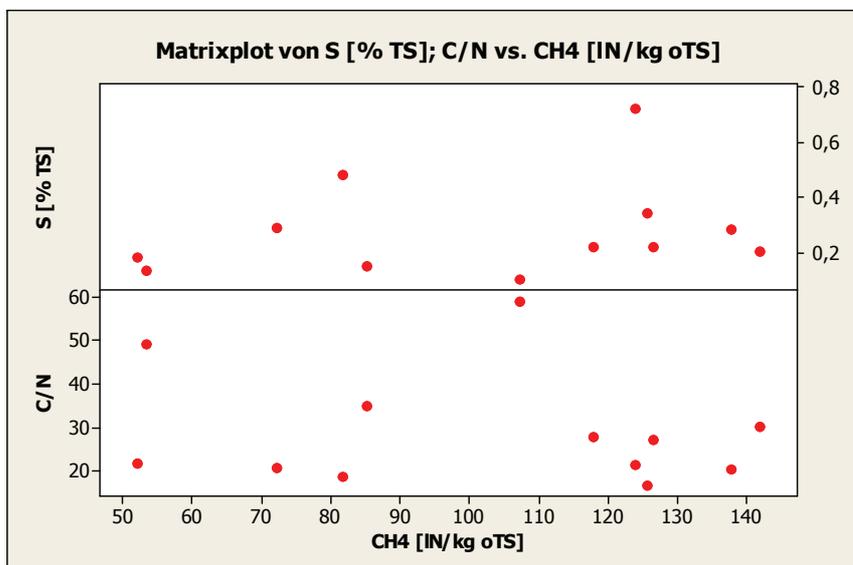


Abbildung 86: Zusammenhang zwischen Schwefelgehalt, C/N-Verhältnis und Methanertrag

Die untersuchten Nährstoffe wie Stickstoff und Schwefel sind für den Biogasprozess essentiell und können durch Mangel zu den geringen Biogaserträgen führen. Mögliche

Korrelationen von Schwefel und C/N Verhältnis mit dem oTS-bezogenen Methanertrag werden in der folgenden Abbildung untersucht.

Für einen stabilen Biogasprozess ist ein ausgewogenes C/N-Verhältnis der eingesetzten Treibselbiomasse wichtig. In der Literatur ist ein relativ breites Spektrum für den optimalen C/N-Verhältnis zwischen 10:1 bis 40:1 angegeben (WEILAND 2001, SCHULZ 2001 UND SCHATTAUER 2004 in FRITZ 2006). Demnach liegen die C/N-Verhältnisse der meisten Treibselproben im optimalen Bereich. Zwei der Proben liegen allerdings deutlich über 40:1, wobei in der Gegenüberstellung der C/N-Verhältnisse und der ermittelten Methanerträge keine Wechselwirkungen zu erkennen sind (vgl. Abbildung 86).

Schwefel stellt für die Methanbakterien einerseits einen essentiellen Nährstoff dar, wirkt aber andererseits in gelöster Form schon in geringen Konzentrationen als Zellgift. Die vorliegenden Untersuchungen lassen allerdings keinen Zusammenhang zwischen der Schwefelkonzentration und dem Methanertrag erkennen (vgl. Abbildung 86).

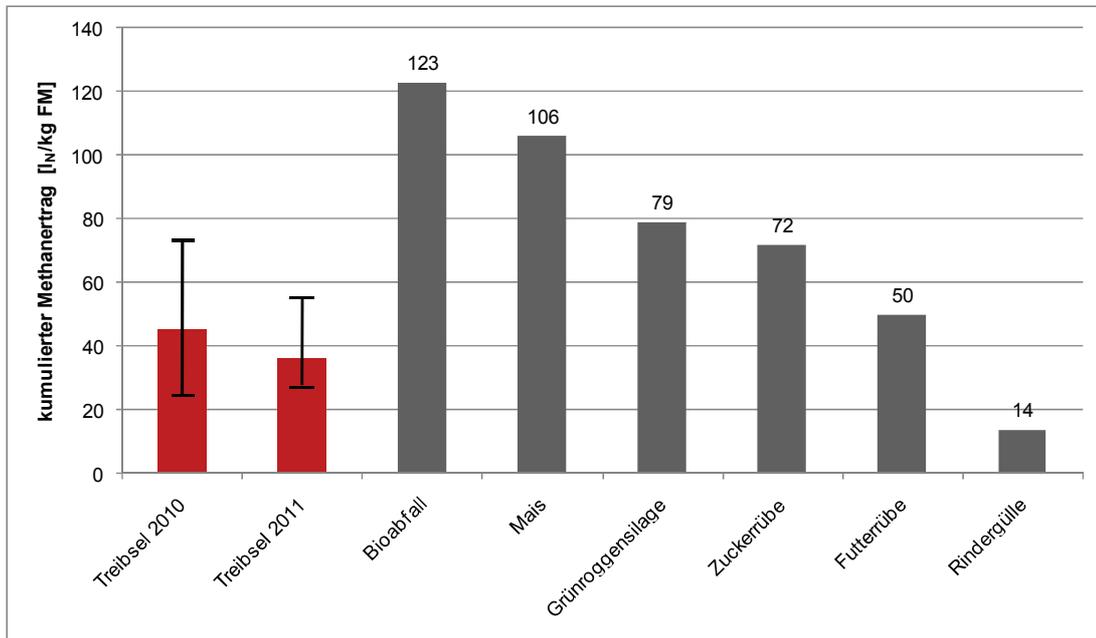
Um eine Einordnung des Biogaspotenzials der untersuchten Proben zu ermöglichen, werden im Folgenden die Methanerträge bezogen auf die Frischmasse mit Literaturwerten von anderen, in der Praxis der Biogaserzeugung relevanten Substraten verglichen. Als Vergleichssubstrate werden die folgenden Materialien betrachtet:

- Mais (FNR, 2010, S. 85)
- Grünroggensilage (FNR, 2010, S. 85)
- Zuckerrübe (FNR, 2010, S. 85)
- Futterrübe (FNR, 2010, S. 85)
- Rindergülle (FNR, 2010, S. 85)
- Kommunaler Bioabfall (KTBL, 2011)

Die Abbildung 87 veranschaulicht die im Rahmen dieses Projektes ermittelten Mittelwerte der Methanerträge bezogen auf Frischmasse im Vergleich zu Literaturwerten. Der durchschnittliche Methanertrag der Treibselproben des Jahres 2010 mit 45 l<sub>N</sub>/kg FM liegt im Vergleich zu anderen Biomassen teilweise deutlich niedriger. Er ist allerdings annähernd so hoch wie der Methanertrag der Futterrübe und bei einem der Standorte (DVB Land Wursten) mit etwa 73 l<sub>N</sub>/kg FM übersteigt er sogar den spezifischen Methanertrag der Zuckerrübe. Zudem ist der gemittelte Methanertrag des Treibsel in 2010 bezogen auf die Frischmasse rund dreimal so hoch wie der von Rindergülle.

Die untersuchten Treibselproben des Jahres 2011 erreichten einen gemittelten Methanertrag von lediglich 36 l<sub>N</sub>/kg FM. Dieser Wert liegt deutlich unter dem Durchschnittswert des Vorjahres, ist jedoch zwischen den Literaturangaben zwischen den Methanerträgen von Gülle und Futterrübe einzuordnen. Die zum Teil deutlich geringeren Gaserträge gleicher Standorte im Jahr 2011 im Vergleich zum Jahr 2010 sind nicht allein mit möglichen Unterschieden in der Zusammensetzung zu bewerten. Möglicherweise hat der im Jahr 2011 im Mittel höhere TS-Gehalt als wichtige stoffspezifische

Größe hinsichtlich der Bildung von Schwimmschichten dazu geführt, dass die Proben im GRW Gasertragstest nicht ausreichend durchmischt wurde. So könnte sich bei einigen Proben eine Schwimmschicht im Fermenter gebildet haben, die zu einer nicht optimalen Umsetzung der Proben führte.

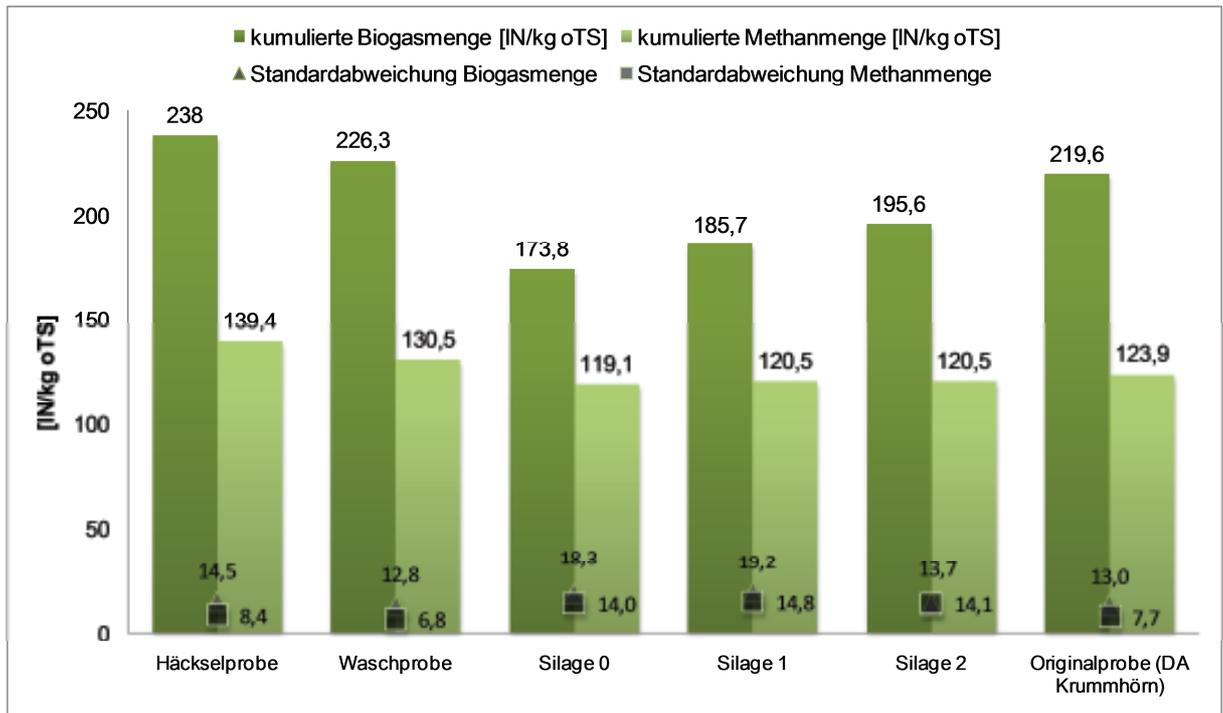


**Abbildung 87: Methanerträge von Treibsel gegenüber den Methanerträgen anderer Biogassubstrate (nach FNR, 2010, S. 85; KTBL, 2011)**

Der Bezug der ermittelten Gaserträge auf die Frischmasse ermöglicht u. a. auch eine Bewertung der Transportwürdigkeit des Treibsel im Vergleich zu anderen konventionellen Substraten. So wird im Ergebnis deutlich, dass die spezifische Transportkosten für Treibsel, die sich mit entsprechenden Biogaserträgen rentieren sollen, höher ausfallen werden, als die der meisten anderen Substrate. Dem stehen allerdings die Substratkosten gegenüber, die im Einzelfall gegenübergestellt und bewertet werden sollen. Bei der Betrachtung des Energiegehalts des Wirtschaftsdüngers sind die energiespezifischen Transportkosten des Treibsel deutlich günstiger zu bewerten.

#### 6.4.2 Gaserträge der aufbereiteten Treibselproben

Zur Steigerung des Biogaspotenzials bzw. Vergärbarkeit von Treibsel wurde eine Versuchsreihe, in der eine Treibselprobe unterschiedlich vorbehandelt bzw. aufbereitet und anschließend vergoren wurde, durchgeführt. Wie bereits im Kapitel 4.7 beschrieben, werden die Proben einer Konservierung mittels Silieren sowie Zerkleinerung und der Auswaschung von Störstoffen unterzogen. Die ermittelten Biogas- bzw. Methanerträge der aufbereiteten Treibselproben aus dem Zuständigkeitsbereich der DA Krummhörn des Jahres 2010 werden anschließend einer unbehandelten Probe gegenübergestellt und bewertet. In der Abbildung 88 werden die Gaserträge graphisch dargestellt.



**Abbildung 88: Biogas- und Methanerträge der aufbereiteten Treibselprobe der Deichacht Krummhörn (oTS-Bezug)**

Die Ergebnisse der mit unterschiedlichen Siliermitteln (Silage 1 und 2) bzw. ohne Siliermittel (Silage 0) behandelten Proben zeigen keine Verbesserung der Methanerträge gegenüber der unbehandelten Probe, lediglich sind die Methangehalte tendenziell höher als bei allen anderen Varianten.

Folglich ist festzuhalten, dass die untersuchten Varianten der Probenaufbereitung durch Einsilieren keine Vorteile bringen. Der Grund für dieses Ergebnis ist, dass das Einsilieren in sich nicht erfolgreich war, da die erwartete Milchsäurebildung ausblieb (vgl. Kapitel 5.6.2). Das liegt einerseits an der Beschaffenheit des Treibsel und andererseits an den Trockenmassegehalten der einsilierten Proben. Trotz einer zum Teil beobachteten Schimmelbildung der Silageproben konnten auch keine gegenteiligen Effekte wie der Rückgang der Methanbildung beobachtet werden.

Bei der Bestimmung des Biogas- bzw. Methanertrag der zerkleinerten Probe kann eine erhöhte Biogasbildung beobachtet werden. Dabei liegt der ermittelte Methanertrag mit knapp 140 l<sub>N</sub>/kg oTS um etwa 9 % höher als bei einer Vergleichsprobe, so dass unter Umständen das Häckseln des Treibsel vor der Vergärung eine sinnvolle Maßnahme darstellen könnte. Dieser Ansatz sollte deshalb weiter verfolgt und näher untersucht werden. Denkbar ist auch, dass das Häckseln des Substrats eine positive Auswirkung hinsichtlich der Verringerung der Neigung zur Bildung von Schwimmschichten haben könnte.

Einen geringfügig höheren spezifischen Biogas- bzw. Methanertrag bringt auch die Probe, die einem vorangehenden Waschversuch unterzogen wurde (vgl. Kapitel 5.6.3). Bei der Bewertung dieses Ergebnisses von etwa 5 % Steigerung sollte allerdings auch die Praxisrelevanz in Betracht gezogen werden.

### 6.4.3 Gaserträge aus der Festbett-Feststoffvergärung

Neben dem Versuchsaufbau zur Ermittlung des Gasertrags in Anlehnung auf die VDI-Richtlinie 4630 wurden weitere Testsysteme untersucht, die effektivere und eine gleichzeitig praxisrelevante Vergärung von Treibselbiomasse ermöglichen. So wurde im Technikumsmaßstab ein Biogasverfahren eingesetzt, das eine Kombination des Garagenverfahrens und eine Anstau-Boxenverfahrens darstellt (vgl. Kapitel 4.6.2). Auch bei diesem Verfahren handelt es sich um ein Batchverfahren, so dass eine gute Vergleichbarkeit mit dem GRW Gasertragstest möglich ist.

Auf Grund einer relativ langsamen aber kontinuierlichen Biogasbildung dauert es bei diesem Versuch vergleichsweise lange, bis das Abbruchkriterium erreicht wird, so dass der Versuch über eine Laufzeit von 135 Tage fortgesetzt wird. Der Biogas- bzw. Methanertrag nach Beendigung des Versuchs liegt bei 724 l<sub>N</sub>/kg oTS bzw. 358,6 l<sub>N</sub>/kg oTS. Der direkte Vergleich dieses Ergebnisses mit dem Gasertrag aus dem GRW-Gasertragstests für die gleiche Probe (Moormerländer DA) ist nicht ohne weiteres möglich, da die Versuchsdauer für die GRW-Gasertragstests 80 Tage für die Treibselprobe und 22 Tage für die Referenzprobe (Maissilage) beträgt.

Bei dem Vergleich der Methanerträge nach 80 Tagen für das Verfahren der Festbett-Feststoffvergärung mit dem GRW-Gasertragstest ergibt sich mit 264 L<sub>N</sub>/kg oTS ein nahezu doppelt so hoher Wert wie im GRW-Gasertragstest mit 137,7 L<sub>N</sub>/kg oTS. Dieses Ergebnis ist damit zu erklären, dass die Biomasse durch eine moderate Umwälzung der Flüssigphase (Perkolation) besser gelöst und damit hydrolysiert werden kann und anschließend im Festbett deutlich effektiver vergoren wird. Dabei verlaufen die Prozesse der Hydrolyse und der Methanogenese zum Teil räumlich getrennt voneinander, was die Bildung günstiger Milieubedingungen der einzelnen Mikroorganismengruppen zur Folge hatte. Zusätzlich wird im Verfahren der Festbett-Feststoffvergärung vermieden, dass es zur Ausbildung von Schwimmschichten kommt, da das Substrat gestapelt ist und von oben berieselt wird.

Angesichts einer einzigen Untersuchung, die zunächst einen orientierenden Charakter trägt, sollte das Ergebnis nicht überbewertet werden. Dabei wird das Ergebnis in der Praxis auf Grund sehr hoher Verweilzeiten nur bedingt zu erreichen sein. Auch der aufgestellte Vergleich der Referenzprobe zeigt, dass die notwendigen Verweilzeiten der Treibselbiomasse deutlich über denen herkömmlicher Biogassubstrate wie der Maissilage liegen.

Bewertend ist allerdings anzumerken, dass die eingesetzte Treibselbiomasse trotz einer langen Verweilzeit u. U. gut für die Vergärung geeignet ist. Die relativ langen Verweilzeiten sind auf einen hohen Anteil an Lignocellulose zurückzuführen. Somit gilt es ein geeignetes Konversionsverfahren zu finden, das eine Vergärung unter deutlich kürzeren Verweilzeiten ermöglicht.

#### 6.4.4 Gaserträge aus der zweistufigen Versuchsanlage

In einer eigens entwickelten zweistufigen Versuchsanlage werden die Vorteile einer kontinuierlichen Betriebsweise mit den Vorteilen einer Vergärung der Flüssigphase im Festbett kombiniert. Das im Kapitel 4.6.3 beschriebene Verfahren ermöglicht eine kontinuierliche Vergärung der Feststoffbiomasse kombiniert mit den Vorteilen eines Festbettreaktors, der sich durch einen stabilen Biogasprozess und relativ geringe Verweilzeiten auszeichnet. So ist mit dem realisierten Verfahren bereits bei einer Verweilzeit von 13 Tagen eine effektive Vergärung der Maissilage möglich. In der ersten Versuchsphase wird für Maissilage eine spezifische Methanausbeute von 433 L<sub>N</sub>/kg oTS ermittelt.

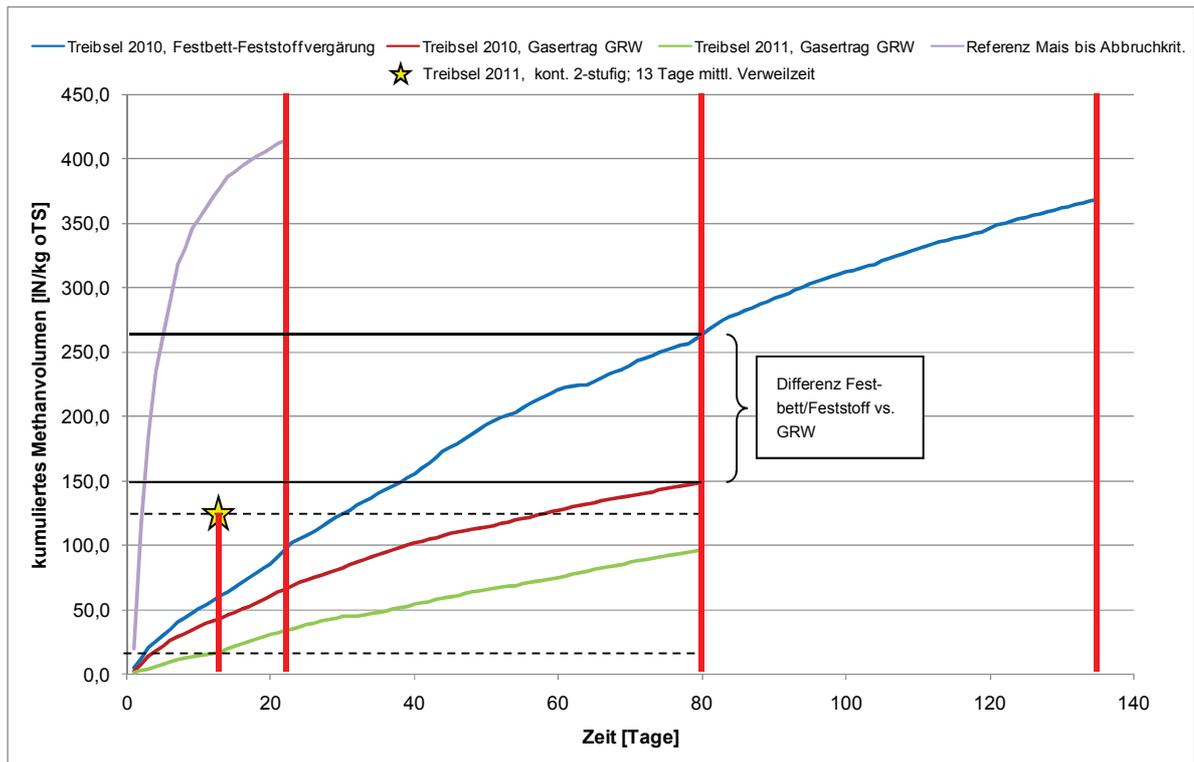
Im Anschluss an die Monovergärung von Maissilage als Referenzphase wird Treibsel als Co-Substrat eingesetzt. Daraus lässt sich eine Methanausbeute von 123 L<sub>N</sub> bezogen auf eingebrachte organische Trockenmasse aus Treibsel ermitteln (mittlere Verweilzeit 13 Tage). Bei der Berücksichtigung der Methangehalte des Hydrolysegases ergibt sich eine etwas höhere spezifische Methanausbeute für die eingesetzte Biomasse (vgl. Tabelle 50), sodass u. U. eine Verwertung des Hydrolysegases sinnvoll sein könnte.

**Tabelle 50: Ergebnisse des kontinuierlichen Versuches in der 2-stufigen Versuchsanlage**

	oTS-Input	Raumbelastung	Verweilzeit	Methanausbeute
	[kg/d]	[kg oTS/(m <sup>3</sup> AV×d)]	[d]	[L <sub>N</sub> /kg oTS]
<b>Maissilage (empirisch)</b>	0,425	1,7	13	<b>433</b>
<b>Maissilage+Treibsel (empirisch)</b>	0,850	3,4	13	<b>281</b>
<b>Treibsel (rechnerisch)</b>	0,425	1,7	13	<b>130</b>

Die spezifische Methanausbeute der Treibselmischprobe (Probenahme 2011) im kontinuierlichen Technikumsversuch liegt, verglichen mit den Mittelwerten von 123 L<sub>N</sub>/kg oTS (2010) bzw. 81 L<sub>N</sub>/kg oTS (2011) aus den GRW-Gasertragstests, deutlich höher (vgl. Abbildung 89). Neben dem signifikant besseren Gasertrag ist auch die Verweilzeit im kontinuierlichen Versuch mit 13 Tagen relativ kurz. Aufbauend auf dieses Ergebnis wird ein weiteres Potenzial zur Steigerung der Biogasausbeute aus der Treibselbiomasse deutlich, was schlussfolgernd mit Optimierung der Vergärungstechnik zusammenhängt.

In Abbildung 89 sind die, mit den unterschiedlichen Gärverfahren und Gasertragsuntersuchungen ermittelten Ergebnisse, vergleichend dargestellt.



**Abbildung 89: Gasertragsvergleiche unterschiedlicher Testsysteme mit Maissilagerferenzprobe**

### 6.5 Treibsel als Brennstoff

Die Verbrennung von Treibsel als Entsorgungsmethode ist spätestens seit Ende Mai 1998 gesetzlich verboten. Etwas ein Drittel des anfallenden Treibsel, vor allem die holzige Fraktion, wird als Brennstoff zur energetischen Nutzung verwendet.

Läuft die Verbrennung unvollständig ab, entstehen neben Kohlenstoffmonoxid und Stickoxiden, vor allem in der Gegenwart von Chlor, PCDD (Dioxine) und PCDF (Furane) deren Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit als schädlich gelten. Durch optimierte Verfahrensführung können die entstehenden Schadstoffe teilweise vermieden oder reduziert werden. Ob die aufwändige Auf- bzw. Umrüstung bestehender Verbrennungsanlagen in Anbetracht des unregelmäßigen Treibselanfalls sinnvoll ist, muss im Einzelfall geprüft werden.

Der Heizwert von trockenem Treibsel ist mit den Heizwerten etablierter biogener Brennstoffe vergleichbar. Das Treibsel an der Niedersächsischen Küste wird in der Regel im Frühjahr eingesammelt. Abhängig von der herrschenden Witterung liegt es feuchter oder trockener vor. Ob eine Trocknung auf dem Deich möglich ist, ist fraglich, da das Treibsel aus Deichschutzgründen möglichst schnell von diesen entfernt werden soll.

Aufgrund relativ hoher Schwermetallbelastungen und damit z. T. deutlicher Überschreitungen der in DIN 51731 vorgegebenen Grenzwerte, sowie teilweise vielfach erhöhten Chlorkonzentrationen gegenüber dem in der DIN 52731 festgelegten Grenzwert, ist das untersuchte Treibsel als Brennstoff nicht geeignet.

## **6.6 Aufbereitung des Treibsel**

Das Treibsel wurde auf verschiedene Weisen aufbereitet. An dieser Stelle werden die Aufbereitungsverfahren noch einmal kurz bewertet. Nähere Informationen zu dem Zusammenhang zwischen getrocknetem und gehäckseltem, gewaschenem oder siliertem Treibsel und der erzielten Biogas bzw. Methanausbeute sind in Kapitel 6.4.2 aufgeführt.

### **6.6.1 Trocknen**

Die Trocknung des Treibsel in dem Gewächshaus der HAWK in Göttingen verlief problemlos. Die Trocknungsdauer ist vom Feuchtegehalt des Substrats abhängig. Um Schimmelbildung und Fäulnis zu vermeiden, muss eine für ausreichende Belüftung des Materials gesorgt sein.

Mechanische Trocknungsverfahren sorgen zudem für die Entfrachtung von im Haftwasser gelösten oder suspendierten Substanzen. So hängen beispielsweise die tatsächlichen Chlorrückstände in der Probe vom Trocknungsverfahren ab. Durch die mechanische Trocknung kann im Wasser gelöstes Chlor entfernt werden. Durch die thermische Trocknung hingegen verdunstet nur das Wasser und das Chlor bleibt in der getrockneten Probe in Form von NaCl.

### **6.6.2 Silieren**

Alle durchgeführten Silierungsversuche sind fehlgeschlagen. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf, wenn Treibsel in der Zukunft durch Silierung konserviert werden soll, um es zu einem späteren Zeitpunkt z. B. in einer Biogasanlage zu vergären.

### **6.6.3 Waschversuch**

Durch Waschen der Treibselprobe kann der absolute Chlorgehalt verringert werden. Darum sollte Treibsel immer auf einem besonders befestigten Untergrund gelagert werden, um zu vermeiden, dass Chlor mit dem Regen ausgewaschen wird und in den Untergrund gelangt.

### **6.6.4 Hydrothermale Carbonisierung**

Treibsel ist als Substrat für die Hydrothermale Carbonisierung geeignet. Welche Eigenschaften die erzeugte Kohle als Brennstoff besitzt oder ob sie als Bodenverbesserer und zur Kohlenstoff-Sequestrierung geeignet ist, muss weiter erforscht werden.

### **6.6.5 Pyrolyse**

Pflanzkohle aus Treibsel ist sehr biostabil und könnte geeignet sein, um Kohlenstoff langfristig im Boden zu binden und dessen Funktionen wie Kationenaustauschkapazität und Wasserhaltevermögen positiv zu verändern. Jedoch besteht hier noch erheblicher Forschungsbedarf hinsichtlich der ökologischen und ökonomischen Effizienz des Verfahrens. Auch die rechtliche Anerkennung von Pflanzkohle aus Treibsel als Bodenzusatzstoff steht noch aus.

### 6.7 Logistikkonzept

Unter der Voraussetzung, dass zukünftig eine Verwertung von Treibsel in Biogasanlagen technisch möglich ist, erscheint eine weitere Umsetzung dieses Logistikkonzeptes insbesondere in den Deichverbandsbereichen II, IV und VI sinnvoll, da hier relativ große Treibselmassen mit erheblichen freien Anlagenkapazitäten korrelieren, siehe Abbildung 62. An dieser Stelle sei noch einmal vermerkt, dass sich in der Nähe der Nordseeküste deutlich mehr Biogasanlagen befinden, als in diesem Logistikkonzept aufgeführt sind. Wird die Nutzung von Treibsel als Substrat in Biogasanlagen in Erwägung gezogen, so sollten nochmals geeignete nahegelegene Anlagen gefunden und entsprechende Verhandlungen mit den Betreibern geführt werden. Anschriften von Biogasanlagenbetreibern die sich während der Forschungsarbeiten sehr interessiert an der Vergärung von Treibsel in ihren Anlagen zeigten, sind in Tabelle 45 grau hinterlegt. Bei der Suche nach geeigneten Biogasanlagen, sollte ein besonderes Augenmerk auf Anlagen gelegt werden, die mit dem sogenannten Garagenverfahren arbeiten. Es wird erwartet, dass Treibsel als Co-Substrat in diesen Anlagen problemlos eingesetzt werden kann. Bisher liegen nur Schätzungen für die Kosten des Treibseltransports vor. Hier müssen entweder genauere Kalkulationen durchgeführt oder praktische Erfahrungen gesammelt werden.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Motivation zur Durchführung der vorliegenden Forschungsarbeit entstand aus der Fragestellung wie das jährlich in unterschiedlichen Mengen und in verschiedener Qualität anfallende Treibsel nachhaltig und klimaneutral verwertet werden kann.

Die thermische Verwertung von Treibsel kann, aufgrund der teilweise relativ hohen Schwermetallbelastungen und des gegenüber anderen Biobrennstoffen erhöhten Gehalts an Chlor und Schwefel, nicht empfohlen werden. Sollten dennoch thermische Entsorgungs- bzw. Verwertungsverfahren eingesetzt werden, sind zumindest besondere Vorkehrungen zum Schutz der Verbrennungstechnik vor Verschlackung und Korrosion sowie zum Schutz der Umwelt und der Menschen vor dem Eintrag schädlicher Emissionen zu treffen.

Als deutlich geeignetere Verwertungsmethode ist die biochemische Konversion in Vergärungsanlagen zu bewerten. Die Zahl der Biogasanlagen ist in den vergangenen Jahren stark angestiegen. Allein in Niedersachsen waren, laut Fachverband Biogas e. V., im Juni 2011 über 1000 Biogasanlagen in Betrieb. Damit einher geht die Suche nach Substraten und die Weiterentwicklung und Verbesserung der Vergärungstechnologie.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden an der HAWK in Göttingen drei verschiedene Vergärungsverfahren mit Treibsel untersucht. Die herkömmliche Art der einstufigen Nassvergärung, wie sie in der Praxis für Mais und ähnliche Rohstoffe am häufigsten genutzt wird, brachte vergleichsweise geringe Gaserträge. Deutlich bessere Ergebnisse wurden in der Festbett-Feststoff-Fermentation erzielt. Dieses Verfahren ist an das praxiserprobte Garagenverfahren (vergleiche Kapitel 4.6.2) mit Perkolation angelehnt, unterscheidet sich jedoch durch den Einsatz einer Festbettschüttung von herkömmlichen Garagenverfahren. Mit dem Verfahren konnten aus Treibsel Methanerträge von ca. 360 L<sub>N</sub> pro kg oTS erzielt werden, die mit Mais vergleichbar sind. Allerdings erfolgte der Abbau sehr langsam, so dass das Abbruchkriterium erst nach 135 Tagen erreicht wurde. In einer dritten Versuchsreihe mit dem Verfahren der kontinuierlichen zweistufigen Vergärung wurde Treibsel als Co-Substrat eingesetzt. Die durchschnittliche Verweildauer des Treibsel betrug nur 13 Tage, während das in dieser Zeit gewonnene Biogasvolumen in der Größenordnung der Untersuchungen im GRW-Biogasertragstest nach 80 Tagen lag. Da jedoch die Gaserträge des GRW-Gasertragstests als sehr niedrig zu bewerten sind, wird vermutet, dass das Potential durch eine Verlängerung der Verweilzeit besser ausgeschöpft werden könnte.

Die beiden letzteren Vergärungsversuche belegen, dass Treibsel

- a) ein hohes Biogaspotenzial besitzt und
- b) durch eine Anpassung der Technologie beschleunigt umgesetzt werden kann.

Zusammenfassend ist Treibsel als ein vergleichsweise langsam zu vergärendes Substrat zu bewerten, dass zur Bildung von Schwimmschichten in vollaufmischten Fermentern neigt und eine angepasste Vergärungstechnologie erfordert, um das Gasbil-

dungspotenzial weitgehend ausschöpfen zu können. Da es bisher kein etabliertes Verfahren für die Vergärung von Treibsel gibt, besteht auf diesem Gebiet noch weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Verkürzung der Verweilzeit und der Steigerung der Gaserträge. Denkbar ist in diesem Zusammenhang auch die Sinnhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Aufschlussverfahren.

Besonders vor dem Hintergrund des unregelmäßigen Anfalles von Treibsel, sollte die Vergärung von Treibsel als Co-Substrat zu ähnlich strukturiertem Material, wie z. B. zu Pferdemist, in Betracht gezogen werden. Weitere Untersuchungen müssen u. a. darüber angestellt werden, wie sich eine Anreicherung von Chlor und anderen anorganischen Bestandteilen des Treibsel im Perkolationwasser, auf den Fermentationsprozess auswirkt.

Zur Umsetzung der biochemischen Konversion des Niedersächsischen Treibsel sollte auf Basis des durchgeführten Logistikkonzeptes eine weitergehende Recherche und Analyse der bestehenden Vergärungsanlagen in der Küstenregion erfolgen. Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführten Untersuchungen zur Konversion des Treibsel mittels Pyrolyse zu Pflanzenkohle oder mittels Hydrothormaler Carbonisierung zu HTC-Kohle, eröffnen vielversprechende neue Wege, die jedoch frühestens in einigen Jahren im größeren Maßstab eingesetzt werden könnten. Bis dahin ist noch sehr viel Grundlagenforschung bezüglich der Erzeugung, der Verwendung und den Auswirkungen der neuen Kohlen zu leisten.

## 8 Literaturverzeichnis

- ANTONIETTI, M., (2006). Zauberkohle aus dem Dampfkochtopf. Max Planck Forschung , S 20-25.
- ARBEITSGRUPPE ZUM TREIBSELPROBLEM (1996): Bericht – Treibselproblematik an den Hauptdeichen der niedersächsischen Nordsee und der von der Tide beeinflussten Flussläufe. Land Niedersachsen, Hannover
- BARTELS, G. (2009): persönliche Mitteilung. Telefonat vom 30.10.2009 mit dem Geschäftsführer des III. Oldenburgischen Deichbandes
- BECHER, S. & M. KALTSCHMITT (1997): Feste Bioenergieträger. In: Nachwachsende Energieträger – Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung. KALTSCHMITT, M. & G. A. REINHARD (Hrsg.), Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden
- BFN: Bundesamt für Naturschutz
- BELUSA, T., FUNKE, A., BEHRENDT, F., & ZIEGLER, F. (2010). Hydrothermale Karbonisierung und energetische Nutzung von Biomasse - Möglichkeiten und Grenzen. In Gülzower Fachgespräche Band 33 Hydrothermale Carbonisierung (S. 42-54).
- BISCHOFF, M. (2010): Interreg IV b, enercoast
- BISCHOFFBERGER, S. (2008). Black Carbon in the Soil Carbon Cycle: Is it an Oxidation Resistant End-Produkt? Institute of Biochemistry and Pollution Dynamics.
- BRÖCKER, A. (1999): Untersuchungen zur stofflichen und energetischen Verwertung von Treibsel (Treibgut) aus dem Bereich des Deichverbandes Osterstader Marsch. Diplom-Arbeit, Universität Rostock
- BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ (2009): Düngegesetz (DüngG). [www.gesetze-im-internet.de/d\\_ngg/BJNR005400009.html](http://www.gesetze-im-internet.de/d_ngg/BJNR005400009.html) vom 02.09.2009
- CORNELIUS, L. & R. WILKEN (2009): persönliche Mitteilung. Termin vom 01.09.2009 beim II. Oldenburgischen Deichband, Franz-Schubert-Straße 31, 26919 Brake
- DARON (2011): Deichverband Heede-Aschendorf-Papenburg
- DBFZ: Deutsches BiomasseForschungsZentrum gemeinnützige GmbH Torgauer Str. 116 D - 04347 Leipzig
- FARKE, H. (2009): UNESO-Kommission hat entschieden.  
[www.nationalparkwattenmeer.niedersachsen.de/master/C56595659\\_N6905445\\_L20\\_D0\\_I5912119.html](http://www.nationalparkwattenmeer.niedersachsen.de/master/C56595659_N6905445_L20_D0_I5912119.html) vom 04.08.2009
- FERNER, M. (02. 05 2001). REM und EDX. Abgerufen am 30. 05 11 von Universtitat Ulm: <http://www.uni-ulm.de/elektronenmikroskopie/Praktikumsbericht/main.htm>
- FNR: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
- FNR. (2010). Biogasmessprogramm II. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
- FNR. (2009). Handreichung - Biogasgewinnung und -nutzung. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe.
- FRERICHS (2011): Deichverbandes Kehdingen Oste

- GABRIEL, J. & K. JAHN (2008): Untersuchung energiewirtschaftlicher Optionen für das Gewerbegebiet Luneplate. Im Auftrag der Bremerhavener Gesellschaft für Investitionsförderung und Stadtentwicklung (BIS) mbH, [www.bremer-energieinstitut.de/download/bei2008.pdf](http://www.bremer-energieinstitut.de/download/bei2008.pdf) vom 10.07.2009
- GEIBLER, G. (WS 1998/99). Übungen im Experimentalvortrag-Chemie des Bodens. <http://www.chids.de/dachs/expvotr/625.pdf>.
- GEO DATAZONE. (2010). Inkohlung. Von <http://www.geodz.com/deu/d/Inkohlung> abgerufen am 25. 04.2010
- GERLACH, A., T. BRÜNING, K. BRÜNING (1999): Untersuchung zur Zusammensetzung und Herkunft von Getreibsel („Teek“) an der niedersächsischen Nordseeküste. Carl von Ossietzky – Universität Oldenburg, Fachbereich Biologie
- GLASER, B. (2011). Biokohle - Produktion, Entwicklung und Charakterisierung zur Anwendung als Bodenverbesserer/ Abschlussbericht BaCaTec- Bayrisch Californisches Hochzulzentrum. [http://www.bacatec.de/dl/Ge09\\_Glaser-Steiner\\_deu.pdf](http://www.bacatec.de/dl/Ge09_Glaser-Steiner_deu.pdf).
- GRIMM (2011): II. Oldenburgischer Deichband
- HANSEATISCHE UMWELT: „Energetische Verwertung von Landschaftspflegematerial Reet, Schilf, etc. - Herkunft Elbe- Weserufer, sowie Nordsee“
- HAWK-GÖTTINGEN (FG NEUTEc), (2010). Zwischenbericht Treibsel an den niedersächsischen Küsten – Aufkommen, Zusammensetzung und Möglichkeiten zur nachhaltigen klimaneutralen Verwertung
- HUPE, K., K.-U. HEYER, R. STEGMANN (2009): Biologische Bioabfallverwertung: Kompostierung kontra Vergärung. Hamburg, [www.ifas-hamburg.de/pdf/bioabfal.pdf](http://www.ifas-hamburg.de/pdf/bioabfal.pdf) vom 30.09.2009
- ISR (2001): Aufbereitung von Treibsel zur energetischen Verwertung. Studie im Auftrag der Itzehoer Schrott und Recycling GmbH (ISR), durchgeführt von Planungsbüro 2000 & G. A. U. Thomas Gerth, Norderstedt
- JOHANNES, C., & OTTOW, G. (2011). Mikrobiologie von Böden - Biodiversität, Ökophysiologie und Metagenomik. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- KALTSCHMITT, M., HARTMANN, H., & HOFBAUER, H. (2009). Energie aus Biomasse. Heidelberg: Springer Verlag.
- KALTSCHMITT, M. UND HARTMANN, H. (2001): Energie aus Biomasse. Springer Verlag
- KERN, M. (1999): Bio- und Restabfallbehandlung III – biologisch – mechanisch – thermisch. WIEMER, K. & M. KERN (Hrsg.), M.I.C. Baeza – Verlag, Witzenhausen
- KIESELER, S. (2010). Stand der Technik - Hydrothermale Carbonisierung. C.A.R.M.E.N Status-Seminar Aschaffenburg. Aschaffenburg.
- KÖGEL -KNABNER, I. (2008). Rundgespräche der Kommission für Ökologie 35: Humus in Böden. München: Dr. Fridrich Pfeil.
- KÖRNER, I. (2008). Stickstoffhaushalt bei der Kompostierung. Hamburg: Technische Universität Hamburg-Harburg.

- KTBL, KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V. [KTBL], (Hrsg.), KTBL-Schrift 468, Bonn
- LEINER, C. & C. MENKE (1998): Naturschutz und Landnutzung in Salzmarschen – Vorländer Ost-Frieslands zwischen natürlicher Dynamik und kulturlandschaftlichen Prozessen. In: Naturschutz und Landschaftsplanung 30, S. 8 f,  
[www.uni-kassel.de/fb13/fglaplan/artikel/salz.htm#\\_Toc410218728](http://www.uni-kassel.de/fb13/fglaplan/artikel/salz.htm#_Toc410218728) vom 17.09.2009
- LÜDERS, K. & G. LUCK (1976): Kleines Küstenlexikon. Verlagsbuchhandlung August Lax, Hildesheim
- LWF (2003): Merkblatt Nr. 12 – Der Energieinhalt von Holz und seine Bewertung. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Hrsg.), Freising
- MEISGEIER, S. (2008): Perkolierte Feststoffvergärung von Treibsel im Batchbetrieb. Diplom-Arbeit, Bauhaus Universität Weimar, <http://e-pub.uni-weimar.de/volltexte/2008/1423/> vom 11.07.2009
- ML [NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR DEN LÄNDLICHEN RAUM, ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ– REGIERUNGSVERTRETUNG OLDENBURG – LANDESENTWICKLUNG, RAUMORDNUNG] (2005): Raumordnungskonzept für das niedersächsische Küstenmeer.  
[www.waddensea-forum.org/Specialissues/CoastalPlanning/ICZM-ROKK\\_Niedersachsen.pdf](http://www.waddensea-forum.org/Specialissues/CoastalPlanning/ICZM-ROKK_Niedersachsen.pdf) vom 11.08.2009
- MUHMAN, C. (2006): Die Strohheizung – Planung – Umsetzung – Instandhaltung. C. F. Müller Verlag, Heidelberg
- MÜNNICH, K. (2011). Mitteilung per E-Mail. Braunschweig, Leichtweis-Institut.
- NIEDERSÄCHSISCHE STAATSKANZLEI (Hrsg.) (2004): Niedersächsisches Deichgesetz (NDG). [www.recht-niedersachsen.de/2820004/ndg.htm](http://www.recht-niedersachsen.de/2820004/ndg.htm) vom 06.07.2009
- NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ [NLWKN] (Hrsg.) (2007): Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen – Festland. Norden, [www.nlwkn.de](http://www.nlwkn.de) vom 27.06.2009
- NIEHAUS, H. (2009): persönliche Mitteilung, Telefonat vom 03.09.2009 mit dem Geschäftsführer des Deichverbandes Heede – Aschendorf – Papenburg.
- PROJEKT SAND: <http://projekt-sand.com/>
- PROKON NORD (2009): Biomasseheizkraftwerk Hamburg.  
[www.prokonnord.de/index.php?option=com\\_content&view=article&id=18&Itemid=18&lang=de](http://www.prokonnord.de/index.php?option=com_content&view=article&id=18&Itemid=18&lang=de) vom 26.10.2009
- RADEMACHER, P. (2010). Dr. Gottingen: Dept. of Wood Biology and Wood Products, Georg-August Universität Gottingen.
- RAMKE, H.-G. (2010). Analytik von Biokohle aus Hydrothormaler Carbonisierung von Biomasse. Essen: Fachgespräche Feststoffuntersuchung 2010.
- RAMKE, H.-G. (2006). Ermittlung geeigneter Parameter zur Bestimmung der biologischen Abbaubarkeit im Zusammenhang mit abfalltechnischen Untersuchungen. Fachgespräche Feststoffuntersuchung 2006 - Neue Entwicklungen in der Abfall-

- und Altlastenuntersuchung. Essen: BEW-MUNLV-Seminar, BEW Bildungsstätte Essen, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW.
- SCHATTAUER, A. & P. WEILAND (2006): Beschreibung ausgewählter Substrate. In: Handreichung – Biogasgewinnung und –nutzung. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (Hrsg.), tangram documents, Bentwisch
- SCHEFFER, F., & SCHACHTSCHNABEL, P. (2010). Lehrbuch der Bodenkunde. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- SCHLICHTING, E., BLUME, H.-P., & STAHR, K. (1995). Bodenkundliches Praktikum. Berlin/Oxford: Blackwell Wissenschaftlicher Verlag.
- SCHOLWIN (2009) Biogaserzeugung und –nutzung. Frank Scholwin, Jan Liebetrau, Werner Edelmann, Marco Ritzkowski und in Körner in Martin
- SCHÜBEL (2011); Deichverband Osterstader Marsch
- SCHULZ, H.; EDER, B. (2006): Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiel, 2. überarbeitete Auflage, Ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg
- SCHULZ, H. & B. EDER (2001): Biogas Praxis – Grundlagen-Planung-Anlagenbau - Beispiele. Ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg
- SILVEIRA, M. L. (2005). Dissolved organic carbon and bioavailability on N and P as indicators of soil quality. *Scientia Agricola* , 502-508.
- SMIDT, E., & SCHWANNINGER, M. (2005). Characterization of Waste Materials Using FTIR Spektroskopie: Process Monitoring and Quality Assessment. *Spectroscopy Letters*, 247-270.
- SMIDT, E., & TINTNER, J. (2011). Untersuchungsbericht zu 10 Proben aus Anaerobprozessen. Wien: Universität für Bodenkultur Wien- Institut für Abfallwirtschaft.
- SOLLINS, P., HOMANN, P., & CALDWELL, B. A. (1996). Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. Corvallis: Department of forest science Oregon State University Corvallis.
- STADTMÜLLER, U. (2004). Grundlagen der Bioabfallwirtschaft. Neuruppin: TK Verlag Karl Thome-Kozmiensky.
- STRECKER, M. (1995): Schadstoffemissionen bei der Verbrennung von Treibgut – Abschlussbericht über ein Messprogramm, durchgeführt im Auftrag des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie. Wilhelm – Kauditz – Institut, Fraunhofer – Institut für Holzforschung, Braunschweig
- STRÖER, T. (2009): persönliche Mitteilung. Telefonat vom 18.09.2009 mit dem Geschäftsführer des Deichverbands Osterstader Marsch
- SÜßMANN, M. (1997): Analyse zur energetischen Nutzung von Treibsel in Verbindung der Wärmeversorgung Norden aus der Industriebranche Doornkaat. Projekt – Nr.: 2538, Niedersächsische Energieagentur GmbH, Hannover
- UBA: Umweltbundesamt Dessau-Roßlau.
- ULM, U. (2001). Das Rasterelektronenmikroskop. Abgerufen am 30. 05 11 von <http://www.uni-ulm.de/elektronenmikroskopie/REMHerbst2001.html>

USACE: US Army Corps of Engineers

VON PUTTKAMER, T. (2005). Charakterisierung biogener Festbrennstoffe. Stuttgart: Universität Stuttgart.

WÄCHTER, G. (2000): Mobile Treibselentsorgung. Forschungsprojekt der Fachhochschule Emden in Zusammenarbeit mit der Firma Wittrock Landtechnik GmbH. [http://spot.fho-emden.de/eutec/mobile\\_treibselentsorgung.htm](http://spot.fho-emden.de/eutec/mobile_treibselentsorgung.htm) vom 10.08.2009

WASSER- UND SCHIFFFAHRTSDIREKTION NORDWEST (2009): Gewässerkundliche Daten für den Pegel Norderney im Zeitraum 2006 bis 2008, persönliche Mitteilung. E-Mail vom 30.09.2009 des Wasser- und Schifffahrtsamts Emden

WASSERVERBANDSTAG E. V. (2009): Ergebnis der Datenerhebung zum Treibselaufkommen sowie zu Methoden und Kosten der Treibselentsorgung der niedersächsischen Deichverbände, persönliche Mitteilung. E-Mail vom 20.08.2009 weitergeleitet von PLANUNGSGRUPPE GRÜN mit Einverständnis des WASSERVERBANDSTAGS E. V.

WEILAND, P. (2001): Verfahrenstechnik der anaeroben Behandlung organischer Abfälle. In: Kämpfer, P., Weißenfels, W. (Hrsg.): Biologische Behandlung organischer Abfälle. Berlin: Springer, 2001. – ISBN 3-540-41915-2, S. 99-122

WELLING, M. (2008): „Teller und Tank“ sind möglich.

<http://idw-online.de/pages/de/news?print=1&id=267647> vom 14.10.2009

WIEGMANN, G. (2009): persönliche Mitteilung. Gespräch vom 31.07.2009 mit dem Leiter des Betriebshofs des Wasser- und Schifffahrtsamtes Bremerhaven, Außenstelle Elsfleth, in 26931 Elsfleth

WILKEN (2011): Moormerländer Deichacht

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE-WERKSTÄTTEN GMBH. (2004). Applikationsbericht: Atmungsaktivität AT4. Weilheim.

WITTIG, S., D. KRAFT, S. MAI (2007): Die Jade – Weser – Region: Zustand und Entwicklung. In: Land unter? – Klimawandel, Küstenschutz und Risikomanagement in Nordwestdeutschland: die Perspektive 2050. SCHUCHARDT, B. & M. SCHIRMER (Hrsg.), oekom Verlag, München

WITTRÖCK, H. (2009): persönliche Mitteilung. Telefonat vom 26.08.2009 mit dem Geschäftsführer der Firma Wittrock Landtechnik GmbH, Dorfstr. 38, 26899 Rede – Brual

ZEDDIES, J. (2008): Globale Nutzungskonflikte und Auswirkungen auf die Agrarmärkte. In: Ökologische und ökonomische Bewertung nachwachsender Energieträger. KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V. [KTBL], (Hrsg.), KTBL-Schrift 468, Bonn

## 9 Anhang



**Kontaktdaten für Rückantwort und Fragen:**  
HAWK Göttingen, z.Hd. Finn Ahrens;  
Adresse: Rudolf-Diesel-Str. 12, 37075 Göttingen  
Telefon: 0551-30738-0 Fax: 0551-30738-21 E-Mail: neutec@hawk-hhg.de

**Fragebogen zu Aufkommen, Zusammensetzung und Verwertung von Treibsel im Zuständigkeitsbereich des Deichverbandes Osterstader Marsch**

Bearbeiter:..... Datum:.....  
Tel:..... E-Mail:.....

Wir bitten um baldige Rücksendung! Spätestens bis zum 14. September 2009.

**[r] Teil A: Allgemeine Angaben zum Deichverband und Angaben zu Treibsel**

1. Zur Charakterisierung des Deichverbandes Osterstader Marsch geben Sie bitte an:

a) Fläche: 45.352 ha  
b) Küstenlänge: .....

2. Für wie viele Deichkilometer ist der Deichverband Osterstader Marsch verantwortlich?

a) Hauptdeiche: 35,4 km b) Sommerdeiche:.....km  
c) Sonstige: .....km, Bezeichnung: .....

3. Machen Sie bitte Angaben zur Zusammensetzung des Treibsel in den vorgegebenen Zeiträumen und überprüfen Sie die angegebenen Volumina. Berichtigen Sie die Angaben ggf. bitte.

	2004	2005	2006	2007	2008
Volumen [m <sup>3</sup> ]	18.500	20.880	8.488	47.621	87.407
Zusammensetzung %					
Holzige Bestandteile					
Nicht verholztes Material					
Abfallstoffe/Müll					
Sonstige					

*Falls Untersuchungsberichte hinsichtlich der Zusammensetzung vorliegen, bitten wir Sie, diese dem Fragebogen beizufügen. Zur Beantwortung der Frage reicht es aus, Kopien oder Auszüge Ihrer Statistik dem Fragebogen beizulegen.*

4. Wie verteilt sich das Treibselaufkommen im Jahresverlauf?

a) Frühling.....%, Sommer.....%, Herbst.....%, Winter.....%  
b) Dazu ggf. Bemerkungen:.....  
.....  
.....

3

Abbildung 90: Seite 1 des Fragebogens der Umfrage



5. Wie wird das Treibselaufkommen in Ihrem Zuständigkeitsbereich ermittelt?

Erfassen der Masse (z.B. durch Wiegen von LKW-Ladungen)

Erfassen des Volumens (z.B. durch Zählen beladener LKW)

sonstige:.....

6. Bitte geben Sie die mittlere Schüttraumdichte des Treibfels [t/m<sup>3</sup>] an (sollten keine Messwerte vorliegen, bitte abschätzen).

.....t/m<sup>3</sup>

**[r] Teil B: Bergung und Transport des Treibfels**

7. Wer übernimmt die Bergung des Treibfels?

Eigenständige Bergung durch den Deichverband

Bergung durch Subunternehmer/Firma:.....

8. a) Welche Techniken werden eingesetzt, um Treibsel im Gebiet des Deichverbandes Osterstader Marsch zu bergen?

manuelle Bergung per Hand und Schubkarre

Bergung per Radlader

sonstige:.....

b) Wann erfolgt die Bergung von Treibsel (Mehrfachnennung möglich)?

regelmäßig, in einem Intervall von.....

nach Sturmfluten

nach regelmäßiger Begehung (Intervall:.....) und kurzfristiger Beauftragung

9. Wer führt den Transport des Treibfels durch?

Eigenständiger Transport durch den Deichverband

Abtransport durch Subunternehmen/Firma:.....

10. Wie erfolgt der Transport von Treibsel?

Transport per LKW

Transport per Traktor und Anhänger

Transport per Schiff

sonstige:.....

11. Erteilt der Deichverband Osterstader Marsch generell externen Unternehmen Aufträge

a) zur Bergung von Treibsel?

ja  nein

b) zum Abtransport von Treibsel?

ja  nein

4

Abbildung 91: Seite 2 des Fragebogens der Umfrage



**Teil C: Behandlung des Treibsel**

12. a) Wie erfolgt die Behandlung des Treibsel?

Verbrennung von .....%

Humifizierung von .....%

Entsorgung von .....% auf der Deponie .....

sonstige: Anteil .....%

.....

[r] b) Bitte beschreiben Sie die Verfahren in Stichworten. Verwenden Sie dazu ggf. die Rückseite.

13. Wie groß ist die Entfernung zur

— a) Verbrennung? .....

— b) Humifizierung? .....

— c) Deponie? .....

— d) Sonstiger Entsorgung? .....

14. a) Gab oder gibt es Überlegungen/Ansätze das Treibsel energetisch zu verwerten/verwerten zu lassen?

—  ja  nein

— b) Form der energetischen Verwertung

—  Einsatz als Brennstoff in einem Biomassekraftwerk (Stromerzeugung)

—  Einsatz als Brennstoff in einem Biomasseheizwerk (Wärmeerzeugung)

—  Einsatz als Brennstoff in einem Biomasseheizkraftwerk (Erzeugung von Strom und Wärme)

15. Gibt es für Ihren Deichverband Studien, Untersuchungsergebnisse, Berichte, Statistiken zum Thema Treibsel?

—  ja, folgende:

— .....

— .....

— .....

—  nein

**Vielen Dank für Ihre Mühe!**

5

Abbildung 92: Seite 3 des Fragebogens der Umfrage

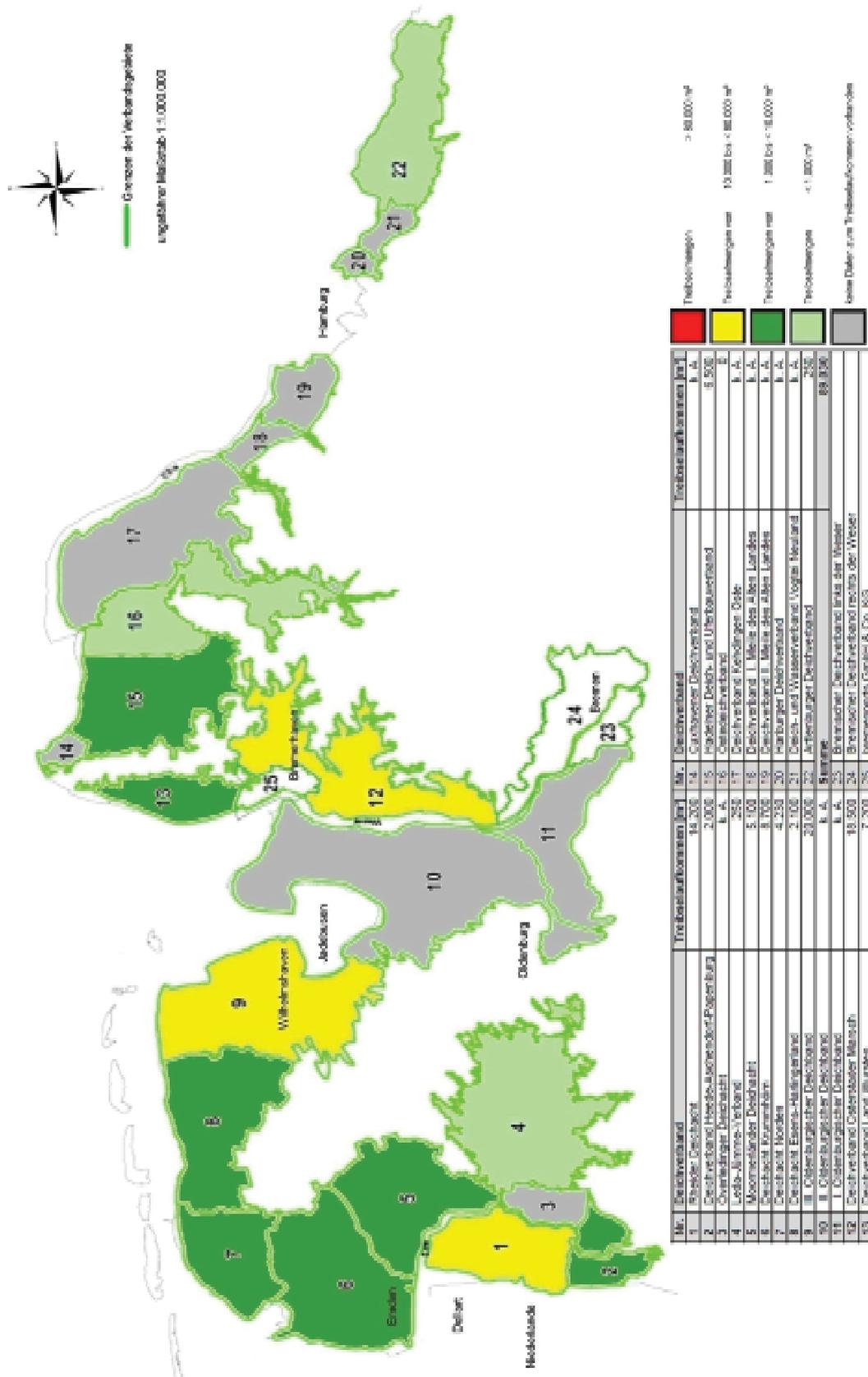


Abbildung 93: Treibselaufkommen des Jahres 2004

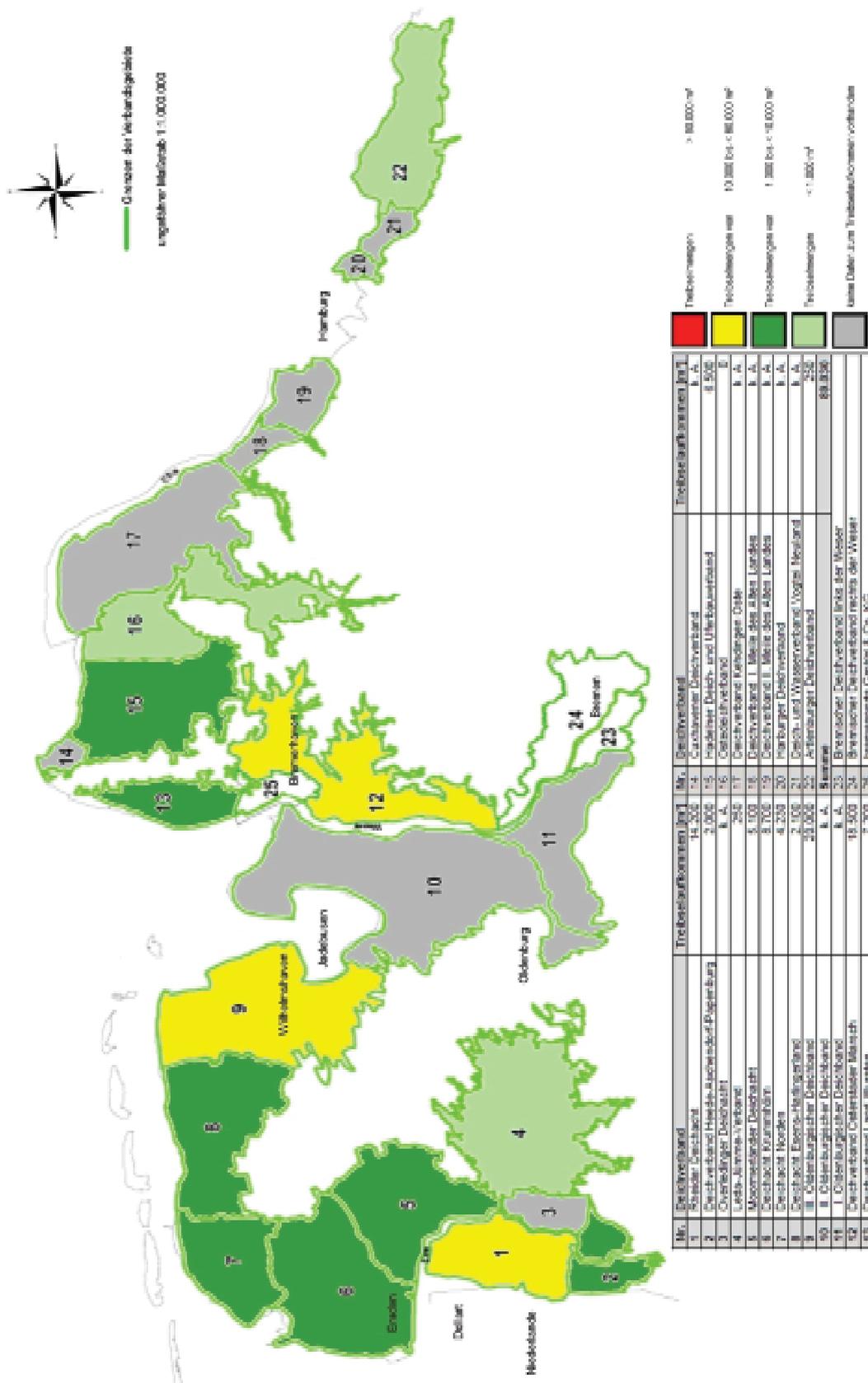


Abbildung 94: Treibselaufkommen des Jahres 2005

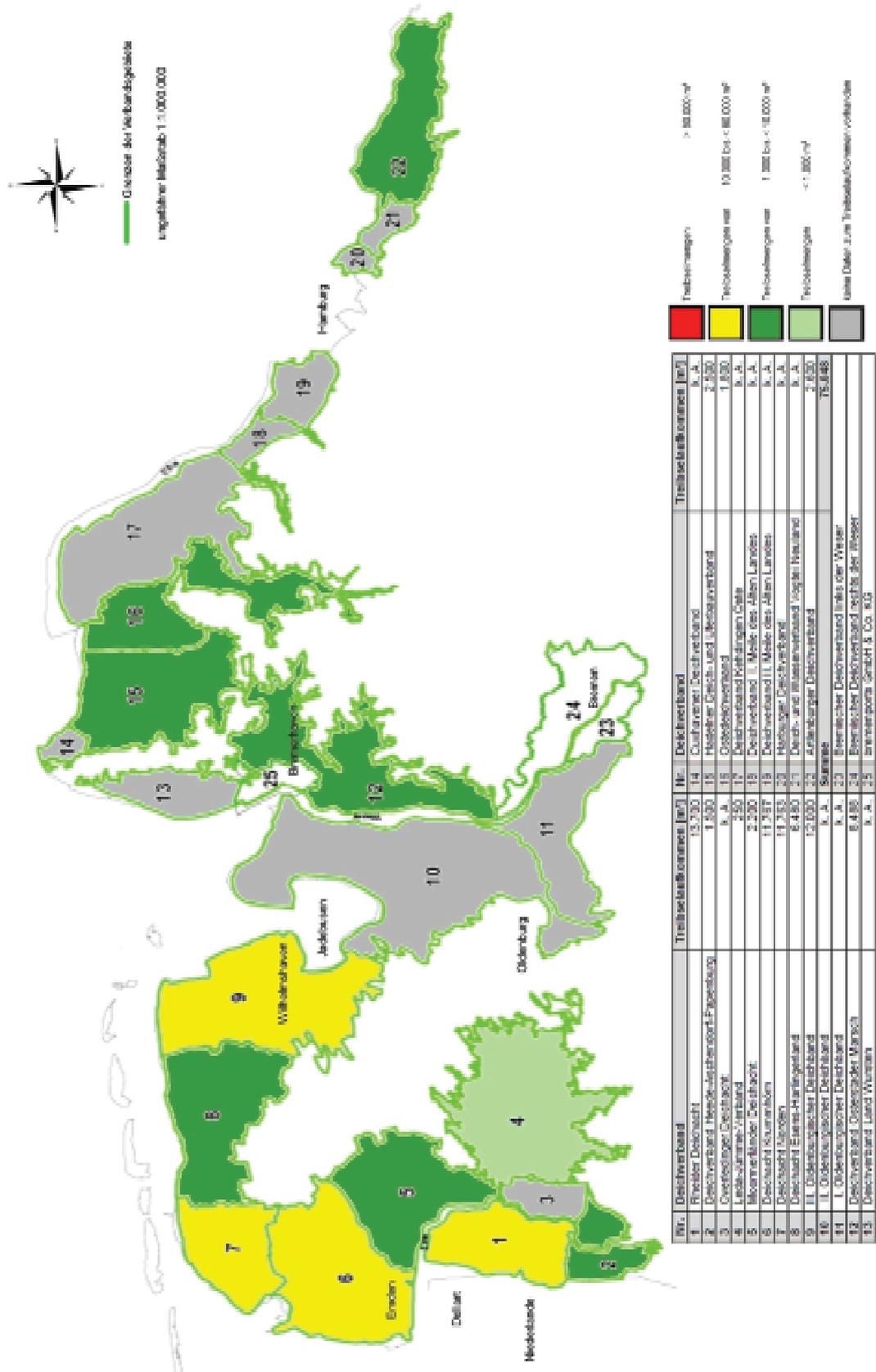
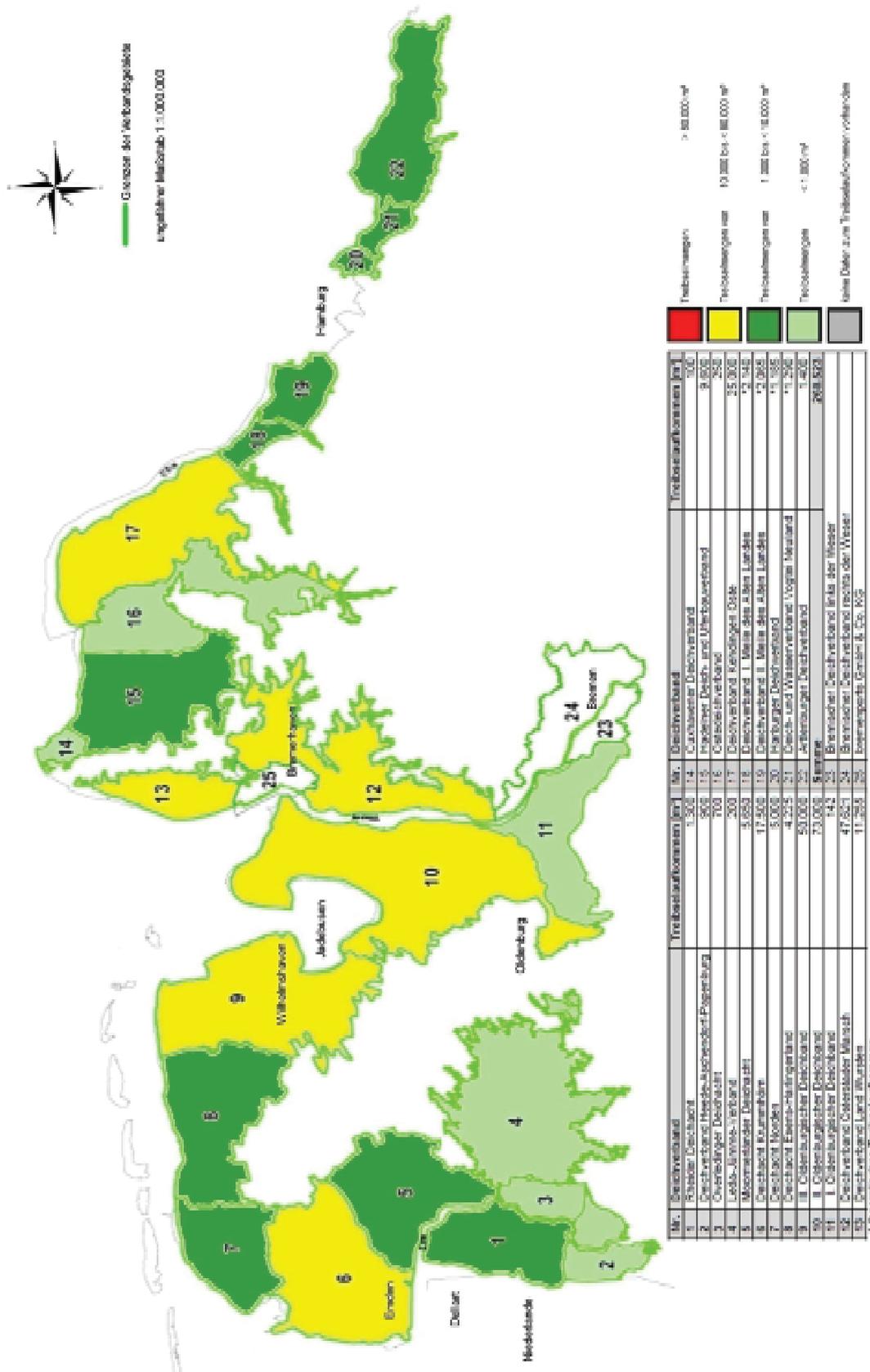


Abbildung 95: Treibselaufkommen des Jahres 2006



Nr.	Bezeichnung	Mr.	Treibserntekommen (t/ha)	Mr.	Bezeichnung	Treibserntekommen (t/ha)
1	Bechtelberg	1.500	14	Caarweier Dreiviertelberg	700	
2	Bechtelberg Heidesheimer Pflanzberg	500	15	Erbesler Dreiviertel- und Oberkellerberg	9.000	
3	Obermünger Dreiviertelberg	700	16	Geisbühlberg	250	
4	Leits-Jünger-Viertelberg	200	17	Geisbühlberg Kehlberger Seite	25.000	
5	Moselrandsberg	5.000	18	Geisbühlberg I. Mitte des Alten Landes	* 2.542	
6	Geisbühlberg	17.500	19	Geisbühlberg II. Mitte des Alten Landes	* 2.000	
7	Geisbühlberg Norderberg	5.000	20	Horbinger Dreiviertelberg	* 1.568	
8	Geisbühlberg Südberg	4.250	21	Deich- und Wasserberg	1.000	
9	III. Oberrautenberger Dreiviertelberg	50.000	22	Artenmünger Dreiviertelberg	1.000	
10	Oberrautenberger Dreiviertelberg	33.000	23	Erbesler	250	
11	Oberrautenberger Dreiviertelberg	140	24	Brennacher Dreiviertelberg links der Moser	250	
12	Oberrautenberger Dreiviertelberg	47.500	25	Brennacher Dreiviertelberg rechts der Moser	250	
13	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	26	Beinberg	1.000	
14	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	27	Beinberg	1.000	
15	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	28	Beinberg	1.000	
16	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	29	Beinberg	1.000	
17	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	30	Beinberg	1.000	
18	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	31	Beinberg	1.000	
19	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	32	Beinberg	1.000	
20	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	33	Beinberg	1.000	
21	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	34	Beinberg	1.000	
22	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	35	Beinberg	1.000	
23	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	36	Beinberg	1.000	
24	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	37	Beinberg	1.000	
25	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	38	Beinberg	1.000	
26	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	39	Beinberg	1.000	
27	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	40	Beinberg	1.000	
28	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	41	Beinberg	1.000	
29	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	42	Beinberg	1.000	
30	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	43	Beinberg	1.000	
31	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	44	Beinberg	1.000	
32	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	45	Beinberg	1.000	
33	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	46	Beinberg	1.000	
34	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	47	Beinberg	1.000	
35	Oberrautenberger Dreiviertelberg	11.250	48	Beinberg	1.000	

Abbildung 96: Treibselaufkommen des Jahres 2007

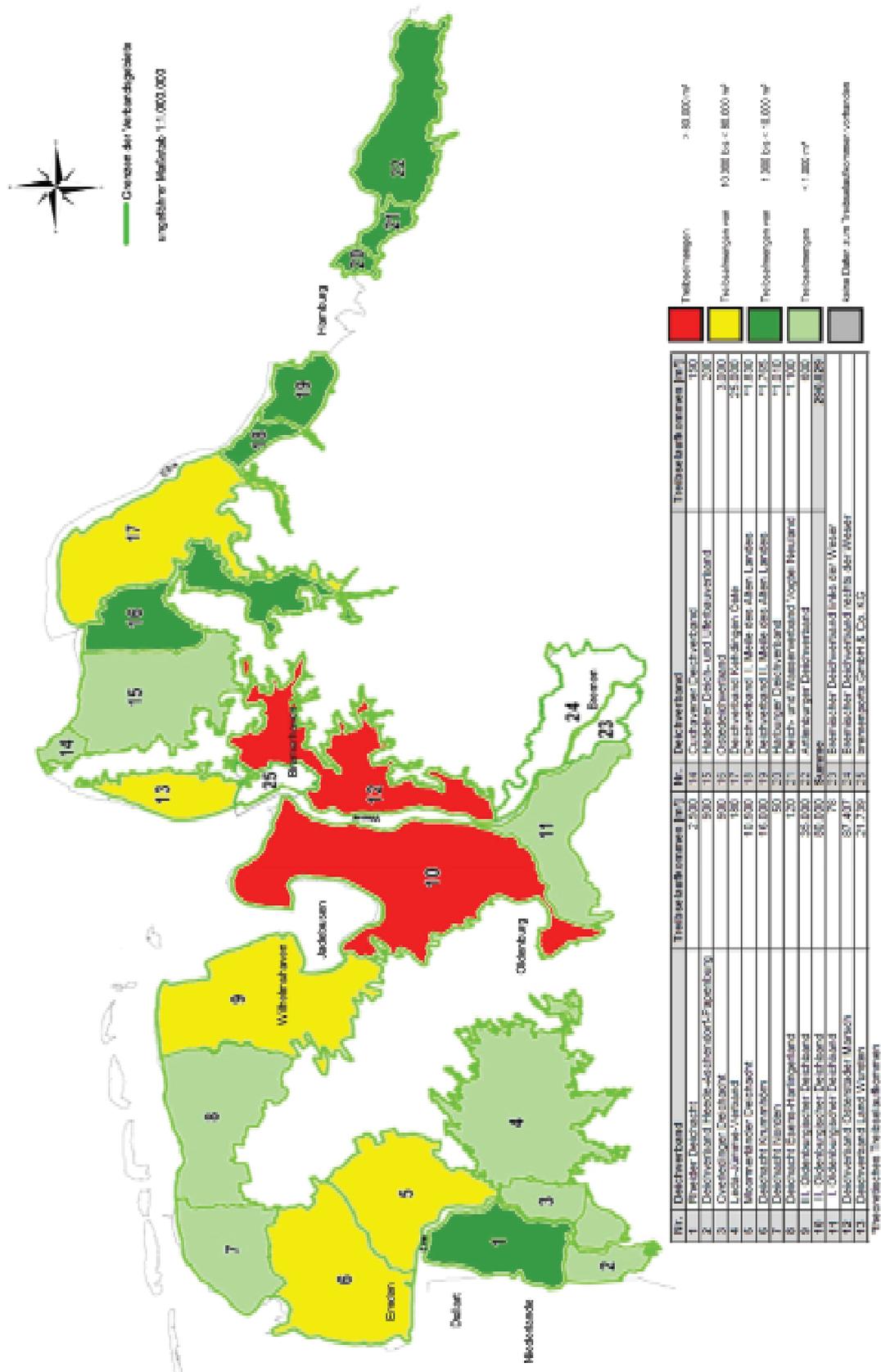


Abbildung 97: Treibselauflaufkommen des Jahres 2008

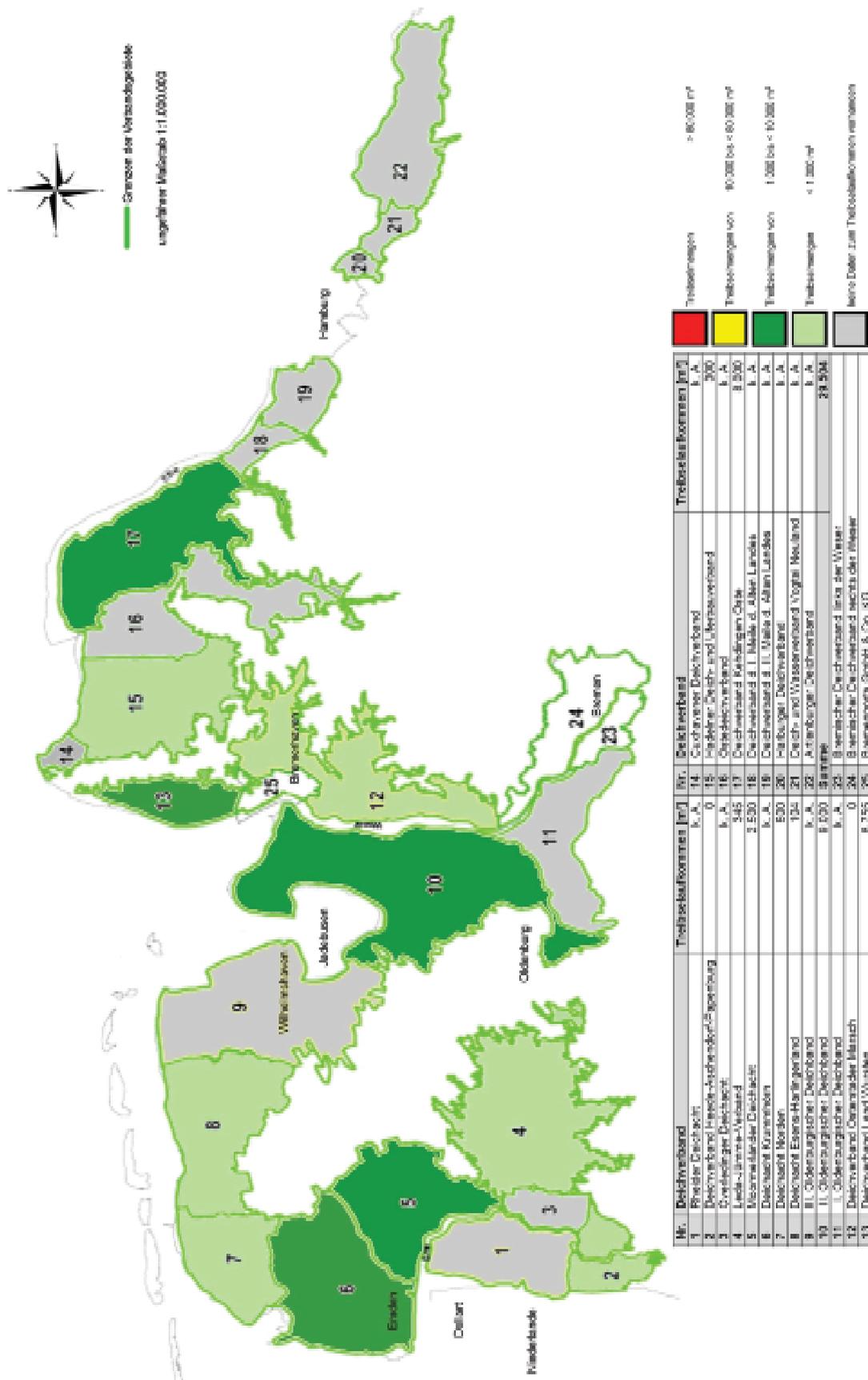


Abbildung 98: Treibselaufkommen des Jahres 2009

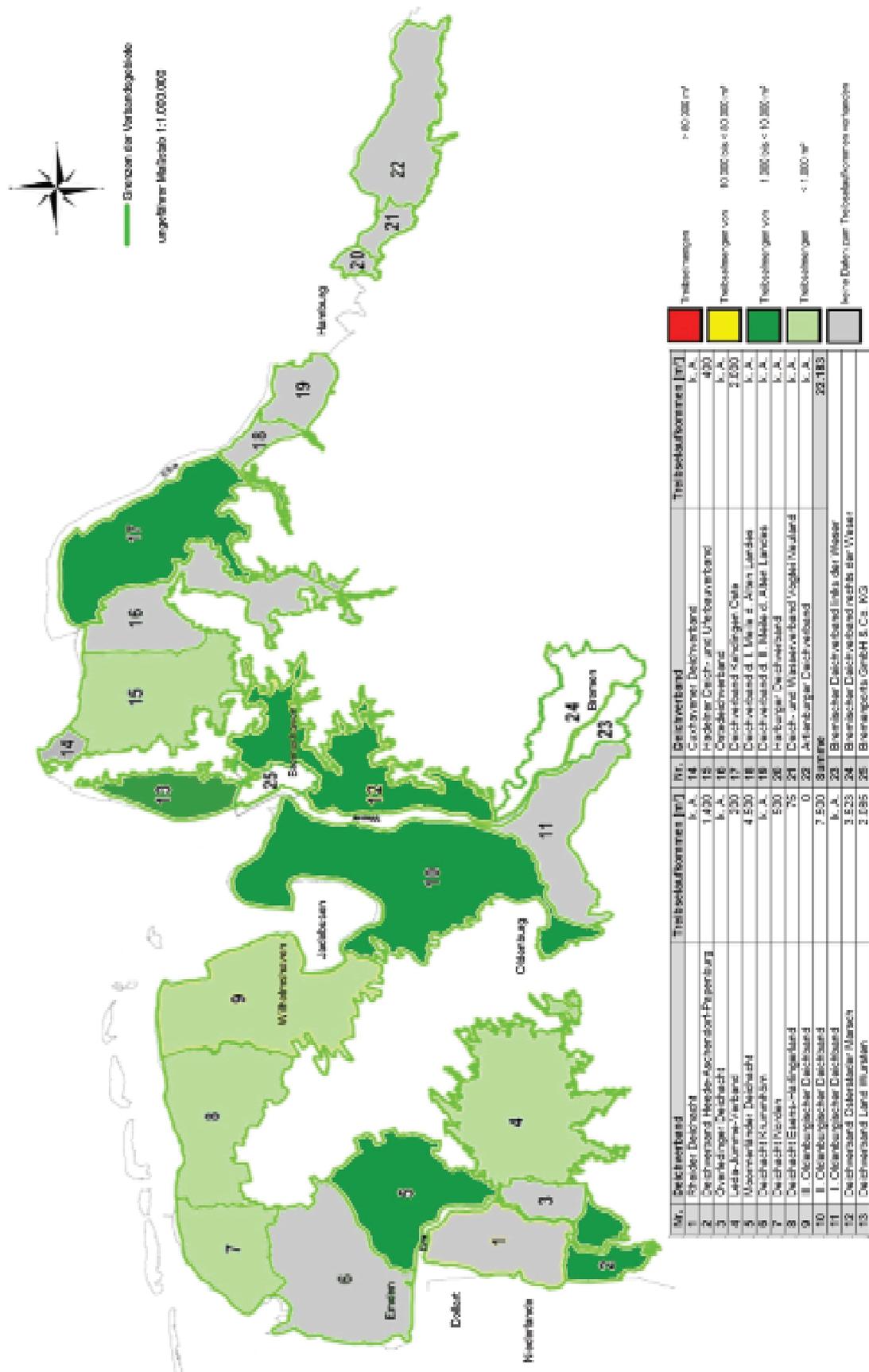


Abbildung 99: Treibselaufkommen des Jahres 2010

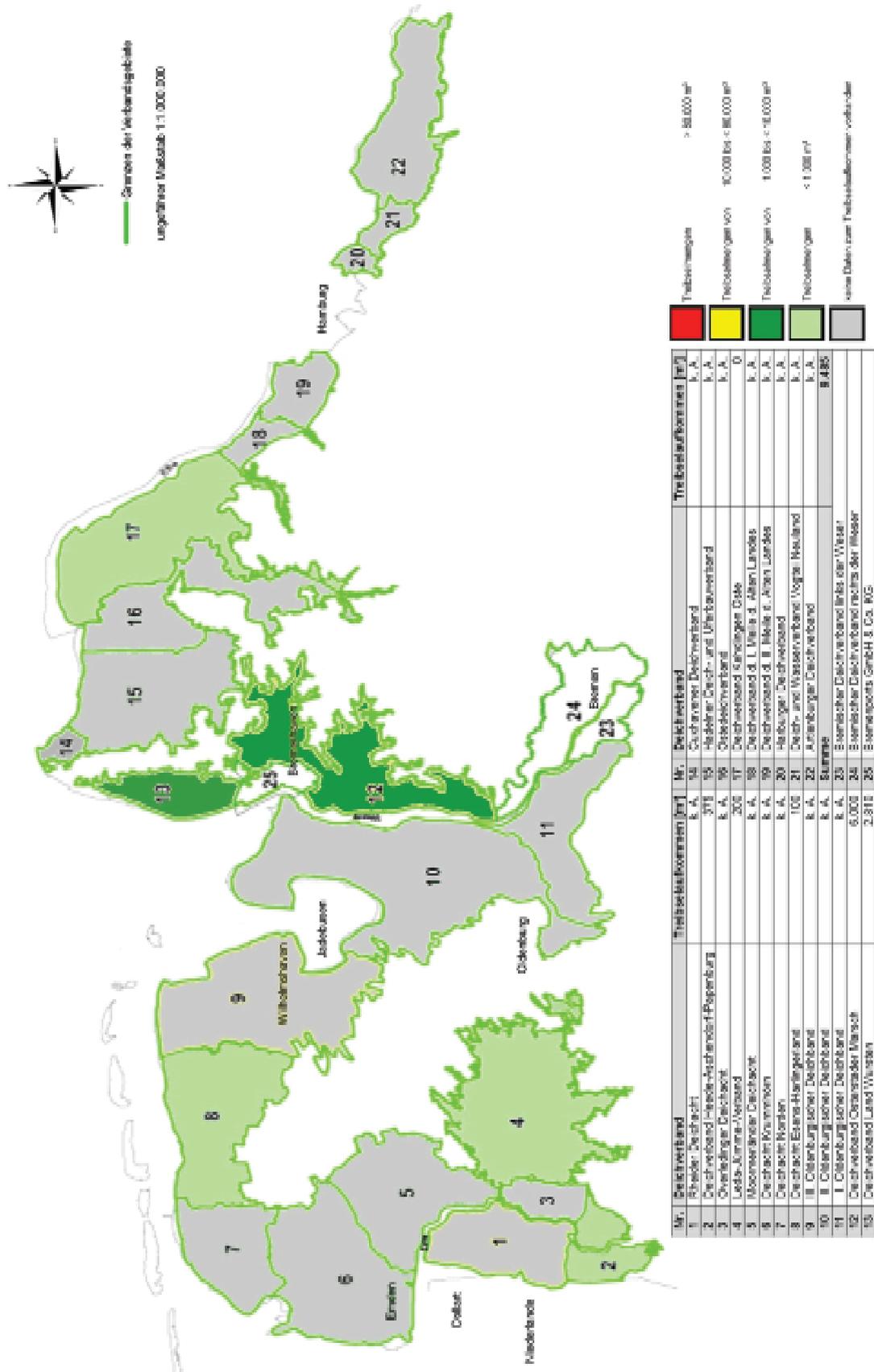


Abbildung 100: Treibselaufkommen des Jahres 2011

Tabelle 51: Umfrageergebnis: Aufkommen und Zusammensetzung von Treibsel 2004, 2005 (Frage Nr. 3)

Nr.	Deichverband	Mittlere Schüttraum-dichte [t/m <sup>3</sup> ]	2004		2005							
			Aufkommen [m <sup>3</sup> ]	Zusammensetzung [%]	Aufkommen [m <sup>3</sup> ]	Zusammensetzung [%]						
				Holzige Bestandteile	Nicht verholzte, sonst. Bestandteile	Abfallstoffe/ Müll	Sonstiges					
1	Rheider DA	k. A.	14.200	0,1	99,8	0,1	0	13.050	0,1	99,8	0,1	0
2	DVB Heede – Aschendorf – Papenburg	k. A.	2.000	2,0	95,0	3,0	0,0	2.800	2,0	95,0	3,0	0,0
4	Leda – Jümme – VB	0,40	250	0,0	92,5	7,5	0,0	130	0,0	95,0	5,0	0,0
5	Moorerländer DA	0,02 bis 0,05	5.100	1,0	98,0	1,0	0,0	5.500	1,0	98,0	1,0	0,0
6	DA Krummhörn	1,00 bis 1,50	8.600	5,0	90,0	5,0	0,0	7.933	5,0	90,0	5,0	0,0
7	DA Norden	1,00	4.230	0,5	99,0	0,5	0,0	4.741	0,5	99,0	0,5	0,0
8	DA Esens – Harlingerland	0,33	2.100	1,0	98,0	1,0	0,0	3.740	1,0	98,0	1,0	0,0
9	III. Oldenburgischer DB	0,75	20.000	0,5	99,0	0,5	0,0	5.000	0,5	99,0	0,5	0,0
10	II. Oldenburgischer DB	0,30	k. A.					k. A.				
11	I. Oldenburgischer DB	k. A.	k. A.					k. A.				
12	DVB Osterstader Marsch	0,50 bis 0,70	18.500	15,0	65,0	20,0	0,0	20.880	15,0	65,0	20,0	0,0
13	DVB Land Wursten	0,5	7.200	15,0	65,0	20,0	0,0	k. A.				
15	Hadelner Deich- & Uferbauverband	0,15 bis 0,25	6.500	2,0	94,0	3,0	1,0	4.000	2,0	94,0	3,0	1,0
16	Oste-DVB	0,80	0					0				
22	Artienburger DVB	1,60	250	10,0	70,0	20,0	0,0	250	15,0	65,0	15,0	5,0
	<b>Summe</b>		<b>88.930</b>					<b>68.024</b>				

Tabelle 52: Umfrageergebnis: Aufkommen und Zusammensetzung von Treibsel 2006, 2007, 2008 (Frage Nr. 3)

Nr.	Deichverband	Mittlere Schüttraum-dichte [t/m <sup>3</sup> ]	2006					2007					2008						
			Aufkommen [m <sup>3</sup> ]	Holzige Bestandteile	Nicht verholzte, sonst. Bestandteile	Abfallstoffe/ Müll	Sonstiges	Aufkommen [m <sup>3</sup> ]	Holzige Bestandteile	Nicht verholzte, sonst. Bestandteile	Abfallstoffe/ Müll	Sonstiges	Aufkommen [m <sup>3</sup> ]	Holzige Bestandteile	Nicht verholzte, sonst. Bestandteile	Abfallstoffe/ Müll	Sonstiges		
1	Rheider DA	k. A.	13.700	0,1	99,8	0,1	0,0	0,0	1.300	0,1	99,8	0,1	0	0,0	2.500	0,1	99,8	0,1	0,0
2	DVB Heede – Aschendorf – Papen- burg	k. A.	1.500	2,0	95,0	3,0	0,0	900	2,0	95,0	3,0	0,0	0,0	900	2,0	95,0	3,0	0,0	
4	Leda – Jümme – VB	0,40	250	0,0	92,5	7,5	0,0	200	0,0	95,0	5,0	0,0	0,0	180	0,0	94,0	6,0	0,0	
5	Moormerländer DA	0,02 bis 0,05	2.200	1,0	98,0	1,0	0,0	5.650	1,0	98,0	1,0	0,0	0,0	10.500	1,0	98,0	1,0	0,0	
6	DA Krummhörn	1,00 bis 1,50	11.767	5,0	90,0	5,0	0,0	17.500	5,0	90,0	5,0	0,0	0,0	17.500	5,0	90,0	5,0	0,0	
7	DA Norden	1,00	11.763	0,5	99,0	0,5	0,0	5.000	0,5	99,0	0,5	0,0	0,0	50	0,5	99	0,5	0,0	
8	DA Esens – Harlinger- land	0,33	6.480	1,0	98,0	1,0	0,0	4.225	1,0	98,0	1,0	0,0	0,0	120	1,0	98,0	1,0	0,0	
9	III. Oldenburgischer DB	0,75	12.000	0,5	99,0	0,5	0,0	50.000	0,5	99,0	0,5	0,0	0,0	36.000	0,5	99,0	0,5	0,0	
10	II. Oldenburgischer DB	0,30	k. A.					73.000	2,5	95,0	2,5	0,0	0,0	80.000	2,5	95,0	2,5	0,0	
11	I. Oldenburgischer DB	k. A.	k. A.					142	0,0	30,0	70,0	0,0	0,0	78	0,0	30,0	70,0	0,0	
12	DVB Osterstader Marsch	0,50 bis 0,70	8.488	15,0	65,0	20,0	0,0	47.621	15,0	65,0	20,0	0,0	0,0	87.407	15,0	65,0	20,0	0,0	
13	DVB Land Wursten	0,5	k. A.					11.255	15,0	65,0	20,0	0,0	0,0	21.739	15,0	65,0	20,0	0,0	
15	Hadelner DUVB	0,15 bis 0,25	2.500	2,0	94,0	3,0	1,0	9.600	2,0	94,0	3,0	1,0	1,0	200	2,0	94,0	3,0	1,0	
16	Oste-DVB	0,80	1.800	2,0	97,0	1,0	0,0	3.000	2,0	97,0	1,0	0,0	0,0	3.000	2,0	97,0	1,0	0,0	
22	Artienburger DVB	1,60	2.600	25,0	70,0	5,0	0,0	1.400	15,0	70,0	10,0	5,0	5,0	600	5,0	75,0	15,0	5,0	
	<b>Summe</b>		<b>75.048</b>					<b>230.793</b>						<b>260.774</b>					

**Tabelle 53: Treibselaufkommen pro Deichkilometer für 2004 bis 2008 (verändert nach WASSER-VERBANDSTAG, 2009, pers. Mitteilung)**

Nr.	Deichverband	Deichstrecke (Haupt- und Schutzdeiche) [km]	Treibselaufkommen [m <sup>3</sup> ]									
			2004	m <sup>3</sup> /km	2005	m <sup>3</sup> /km	2006	m <sup>3</sup> /km	2007	m <sup>3</sup> /km	2008	m <sup>3</sup> /km
1	Rheider DA	48,30	14.200	294	13.050		13.700		1.300		2.500	
2	DVB Heede – Aschendorf – Papenburg	22,00	2.000	91	2.800	127	1.500	68	900	41	900	41
3	Overledinger DA	17,50	k. A.		k. A.		k. A.		700	40	900	51
4	Leda – Jümme VB	2,50	250		130		250		200		180	
5	Moormerländer DA	25,00	5.100	204	5.500	220	2.200	88	5.650	226	10.500	420
6	DA Krummhörn	42,00	8.700	207	7.933	189	11.767	280	17.500	417	16.000	381
7	DA Norden	29,50	4.230	143	4.741	161	11.763	399	5.000	169	50	2
8	DA Esens - Harlingerland	29,00	2.100	72	3.740	129	6.480	223	4.225	146	120	4
9	III. Oldenburgischer DB	56,50	20.000	354	5.000	88	12.000	212	50.000	885	35.000	619
10	II. Oldenburgischer DB	100,00	k. A.		k. A.		k. A.		73.000	730	80.000	800
11	I. Oldenburgischer DB	62,00	k. A.		k. A.		k. A.		142	2	78	1
12	DVB Osterlader Marsch	35,40	18.500	523	20.880	590	8.488	240	47.621	1.345	87.407	2.469
13	DVB Land Wursten	26,70	7.200	270	k. A.		k. A.		11.255	422	21.739	814
14	Cuxhavener DVB	14,30	k. A.		k. A.		k. A.		100	7	150	11
15	Hadelner Deich- und Uferbau-VB	15,40	6.500	422	4.000	260	2.500	162	9.600	623	200	13
16	Oste-DVB	74,35	0	0	0	0	1.800	23	250	3	3.000	38
17	DVB Kehdingen Oste	155,00	k. A.		k. A.		k. A.		25.000	161	25.000	161
18	DVB I. Meile d. Alten Landes	11,20	k. A.		k. A.		k. A.		*2.140	*163	*1.830	*191
19	DVB d. II. Meile d. Alten Landes	10,80	k. A.		k. A.		k. A.		*2.065	*163	*1.765	*191
20	Harburger DVB	6,20	k. A.		k. A.		k. A.		*1.185	*162	*1.010	*191
21	DWVB Vogtei Neuland	7,00	k. A.		k. A.		k. A.		*1.290	*157	*1.100	*184
22	Artlenburger DVB	13,40	250	19	250	19	2.600	194	1.400	105	600	45
<b>Summe</b>		<b>804,05</b>	<b>89.030</b>		<b>68.024</b>		<b>75.048</b>		<b>260.523</b>		<b>290.029</b>	

Tabelle 54: Umfrageergebnis: Bergung des Treibseis (Fragen Nr. 7 und 8)

Nr	Deichverband	Bergung des Treibseis			
		Bergung durch	Eingesetzte Bergetechnik	Zeitpunkt der Bergung	Bemerkungen
1	Rheider DA	Subunternehmern	Radlader	Nach Sturmfluten und nach Abtrocknung des Deiches	Störstoffe werden per Hand aussortiert
2	DVB Heede – Aschendorf – Papenburg	Deichverband	Radlader, ggf. Häcksler	Regelmäßig in einem Intervall von einem Jahr	Das Verblasen erfolgt durch ein Subunternehmen
4	Leda – Jümme VB	Deichverband	Schlepper mit Frontlader, Bagger	Nach Sturmfluten	
5	Moormerländer DA	Subunternehmern durch Ausschreibung	Raupenbagger, Schlepper mit Dumper	Regelmäßig in einem Intervall von einem Jahr (April/Mai)	
6	DA Krummhörn	Deichverband, ggf. Subunternehmern	Schlepper mit Frontlader, Bagger	Nach Sturmfluten	Bei großem Treibselaufkommen wird ein Subunternehmen beauftragt
7	DA Norden	Subunternehmern	Bagger, Dumper	Nach Sturmfluten	Bergung erfolgt durch ortsnahes Lohnunternehmen nach Sturmflutereignissen
8	DA Esens - Harlingerland	Deichverband	Kettenbagger, Radlader	Nach Sturmfluten	
9	III. Oldenburgischer DB	Subunternehmern	Radlader, ggf. Häcksler	Regelmäßig in einem Intervall von einem Jahr (im Frühjahr)	Bergung erfolgt generell durch Subunternehmen/Firma, da kein eigener Betriebshof vorhanden ist
10	II. Oldenburgischer DB	Deichverband	Spezialanbau für Schlepper, Bagger	Nach Sturmfluten, bei getrocknetem Deich	
11	I. Oldenburgischer DB	Deichverband	Radlader	Regelmäßig in einem Intervall von einem Jahr	
12	DVB Osterlader Marsch	Firma	Bagger, Schlepper	Nach Sturmfluten	Größtenteils wird das Treibsel nicht geborgen, statt dessen wird es vor Ort verbrannt
13	DVB Land Wursten	Deichverband	Schlepper mit Frontlader	Nach Sturmfluten	
15	Hadelner Deich- und Uferbau-VB	Deichverband	Kettenbagger, Mobilbagger,	Regelmäßig in einem Intervall von einem Jahr und nach Sturmfluten	
16	Oste-DVB	Unterhaltungsverband Untere Oste	Bagger	Nach Sturmfluten	
22	Artlenburger DVB	Deichverband	Radlader, Schlepper mit Frontlader	Nach Sturmfluten und nach regelmäßiger Begehung	

Tabelle 55: Umfrageergebnis: Transport des Treibseils (Fragen Nr. 9; 10; 13)

Nr.	Deichverband	Transport durch	Transportmittel	Transportstrecke [km]
1	Rheider DA	Subunternehmen/Firma	Traktor + Anhänger und LKW	10,0 bis 20,0
2	DVB Heede – Aschendorf – Papenburg	Deichverband	Traktor + Anhänger	20,0
4	Leda – Jümme – VB	Deichverband	Traktor + Anhänger	20,0
5	Moormerländer DA	Subunternehmen/Firma	Traktor + Anhänger und LKW	5,0 bis 20,0
6	DA Krummhörn	Deichverband und Subunternehmen/Firma bei Bedarf	Traktor + Anhänger	max. 10,0
7	DA Norden	Subunternehmen/Firma	Traktor + Anhänger	1,0 bis 30,0
8	DA Esens – Harlingerland	Deichverband	Traktor + Anhänger	0,1 bis 20,0
9	III. Oldenburgischer DB	Subunternehmen/Firma	Traktor + Anhänger	25,0 bis 30,0
10	II. Oldenburgischer DB	Deichverband und Subunternehmen/Firma bei Bedarf	Traktor + Anhänger und LKW	10,0 bis 15,0
11	I. Oldenburgischer DB	Deichverband	LKW	
12	DVB Osterstader Marsch	Subunternehmen/Firma sowie vertraglich verpflichtete Landwirte	Traktor + Anhänger	max. 15,0
13	DVB Land Wursten	Deichverband	Traktor + Anhänger	max. 15,0
15	Hadeliner Deich- und Uferbau-VB	Deichverband	Traktor + Anhänger	10,0
16	Oste – DVB	Unterhaltungsverband Untere Oste	Traktor + Anhänger	0,5 bis 4,5
22	Artlener DVB	Deichverband	Traktor + Anhänger	15,0 bis 20,0

Tabelle 56: Umfrageergebnis: Verteilung der Treibselmengen auf die in 2008 angewendete Entsorgungsmethode (Frage Nr. 12)

Nr.	Deichverband	Treibsel- aufkommen [m <sup>3</sup> ]	Treibselmengen [m <sup>3</sup> ]						Verbrennung	Ausbringung auf landw. Flächen
			Kompostierung	Humifizierung	Deponierung	Verkuhlung	Häckseln Verblasen			
1	Rheider DA	2.500	2.500							
2	DVB Heede – Aschendorf – Papenburg	900			45			855		
3	Overledinger DA	900				900				
4	Leda – Jümme VB	180	180							
5	Moormerländer DA	10.500				9.975		525		
6	DA Krummhörn	16.000						16.000		
7	DA Norden	50								50
8	DA Esens - Haringerland	120	120							
9	III. Oldenburgi- scher DB	35.000						33.250		1.750
10	II. Oldenburgi- scher DB	80.000	76.000		4.000					
11	I. Oldenburgi- scher DB	78			78					
12	DVB Osterstader Marsch	87.407		26.222					61.185	
13	DVB Land Wurs- ten	21.739		6.522					15.217	
14	Cuxhavener DVB	150								
15	Hadelher DUVB	200	60						140	
16	Oste-DVB	3.000								3.000
17	DVB Kehdingen Oste	25.000			12.500				12.500	
18	DVB i. Meile d. Alten Landes	*1.830								
19	DVB d. II. Meile d. Alten Landes	*1.765								
20	Harburger DVB	*1.010								
21	DWVB Vogtei Neuland	*1.100								
22	Artlenburger DVB	600	600							

\* Daten wurden durch Interpolation erstellt; die Entsorgungsmethode ist unbekannt

**Tabelle 57: Übersicht der teilnehmenden Deichverbände mit den Informationen über das Datum der Zu- und Rücksendung des Fragebogens**

Nr.	Deichverband	Zusendung	Eingang der Antwort
1	Rheider Deichacht	24.08.2009	28.08.2009
2	Deichverband Heede – Aschendorf – Papenburg	25.08.2009	01.09.2009
4	Leda – Jümme – Verband	26.08.2009	26.08.2009
5	Moorerländer Deichacht	25.08.2009	04.09.2009
6	Deichacht Krummhörn	26.08.2009	21.09.2009
7	Deichacht Norden*	14.09.2009	14.09.2009
8	Deichacht Esens – Harlingerland	27.08.2009	02.09.2009
9	III. Oldenburgischer Deichband	17.09.2009	25.09.2009
10	II. Oldenburgischer Deichband*	01.09.2009	01.09.2009
11	I. Oldenburgischer Deichband	01.09.2009	28.09.2009
12	Deichverband Osterstader Marsch	27.08.2009	25.09.2009
13	Deichverband Land Wursten	27.08.2009	25.09.2009
15	Hadelner Deich- und Uferbauverband	26.08.2009	07.09.2009
16	Ostedeichverband	25.08.2009	26.08.2009
22	Artenburger Deichverband	25.08.2009	24.09.2009

\* Befragung durch Interview bei Ortstermin

