



Bestimmung der Sedimentakkumulation auf Hallig Hooge im Winter 2009/10

Anne Sander, Matthias Deicke & Volker Karius

Universität Göttingen, Geowissenschaftliches Zentrum, Deutschland

Abstract

The IPCC (2007) estimates for the 21st century a sea level rise of 18-59 cm. This scenario is alarming for coastal regions all over the world. The German Wadden Sea has to be protected not only for the anthropogenic/economic values but for the unique ecological system, which is placed on the World Heritage list by UNESCO. The mainland coastlines are protected by dykes. Offshore are small marsh islands (Halligen) and sand bars. They serve as a wave breaker. The Halligen in the district of Nordfriesland show an annual surface growth that is the result of hibernal flooding delivering sediments. This process is important for the existence of the Halligen and though probably constrained by relative sea level changes it is up to now not thoroughly quantified. The quantification of the sediment amount that is accumulated at Hallig Hooge was subject of a 9 week Bachelor thesis. Therefore different types of sediment traps were installed for the season of 2009/10 with one flooding. The sediments were differentiated in an organic, carbonaceous and a siliciclastic fraction. The median siliciclastic sediment amount of the 2009/10 flooding was between 388 g/m² and 725 g/m², equivalent to a surface growth between 0.26 mm and 0.48 mm depending on the type of sediment trap.

1 Einleitung

Im Zuge des mit dem globalen Klimawandel einhergehenden Meeresspiegelanstiegs sind die Küstenregionen der Welt in den Fokus des öffentlichen Interesses und der Forschung geraten. Die deutsche Nordseeküste stellt in diesem Zusammenhang eine vulnerable Region dar. Neben dem Druck durch den menschlichen Siedlungs- und Lebensraum, sind das Wattenmeer und die Halligen schützenswerte Naturlandschaften, von der UNESCO ausgezeichnet als „Biosphärenreservat Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer und Halligen“. Der zukünftige Erhalt von Halligen und Außensänden ist sowohl in ihrer Funktion als schützender Wellenbrecher vor dem nordfriesischen Festland, als auch für die Sicherung der Artenvielfalt des Lebensraumes Wattenmeer elementar. Ungleich den Inseln und des Festlandes, besitzen die Halligen keine Deiche.

Natürliche Aufschlickungsprozesse durch die winterlichen Überflutungen der Halligen führen zu einem dynamischen Gleichgewicht zwischen Meeresspiegel und Halligoberfläche. Diese zu quantifizieren ist Gegenstand des Projektes „Sedimentakkumulation Halligen“ (SAHALL), einer Forschungskoooperation zwischen dem Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (MLUR) der Landesregierung Schleswig-Holsteins und dem Geowissenschaftlichen Zentrum der Universität Göttingen.

2 Ziele

Entsprechende Untersuchungen werden seit 2006 auf Hallig Hooge (Deicke et al. 2007) und seit 2007 auf den Halligen Hooge, Langeness, Nordstrandischmoor und Süderoog durchgeführt (Deicke et al. 2009).

Wichtige Leitfragen dabei sind:

- Wie viel siliziklastisches Material wird pro Sturmflut und pro Jahr pro Quadratmeter abgelagert?
- Beeinflusst die Vegetationshöhe und die Entfernung zum Halligufer die Sedimentationsrate?
- Gibt es Tendenzen der Korngrößenverteilung innerhalb der Hallig?

In der vorliegenden Arbeit, die im Rahmen einer neunwöchigen Bachelor-Arbeit (Sander 2010) durchgeführt wurde, wird nur der ersten Frage nachgegangen.

3 Untersuchungsgebiet und Methoden

Die Hallig Hooge liegt im Wattenmeer 20 km vor der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste. Sie zeichnet sich durch das typisch flache Relief der Marsch im Supralitoral aus. Mit 2,10 m ü. NN in den Randbereichen fällt die Oberfläche bis auf 1,40 m ü. NN im Zentrum ab. Da das Springtidehochwasser zeitweise bis zu einer Höhe von 1,60 m ü. NN ansteigt, wurde von 1911 bis 1915 ein Sommerdeich angelegt. Dieser erreicht eine Höhe von 2,50 m ü. NN im Osten und bis zu 3,10 m ü. NN im Westen. Die einseitig höhere Deichkrone ist durch die im Westen größere Überflutungsgefahr zu erklären, welche ihren Ursprung in den vorherrschenden Westwinden hat. Somit ist der umgebende Sommerdeich Grund für die, im Vergleich zu den anderen Halligen, relativ seltenen Überflutungen Hooges pro Jahr. Um Landverlust durch Sturmfluten zu verhindern, schützt eine Uferbefestigung aus Basaltsäulen und nordischen Geschieben die Hallig ringsum.

Hydrographie

Auf der Hallig Hooge ist ein hochauflösender Binnenpegel des Landesbetriebs für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz, Schleswig-Holstein (LKN-SH) in dem zentralen Priel östlich der Ockelützwarft sowie ein weiterer Pegel an dem Hooger Anleger installiert. Durch Spundwände an den Auslässen der Hallig wird der Wasserstand künstlich auf einem Niveau von 97 cm ü. NN gehalten.

Der kritische Pegel der Hallig Hooge liegt für Überflutungen bei 2,50 m ü. NN. Während des Untersuchungszeitraumes gab es laut LKN-SH zwei Überschreitungen dieser Marke (Abb. 1). Die beiden Sturmfluten sind auf den 18.11.2009 und 23.11.2009 datiert.

Ein maximaler Wasserstand von 2,18 m ü. NN wurde am Binnenpegel der Hallig Hooge erreicht. Der Außenpegel am Hooger Anleger zeichnete eine Stunde zuvor den Höchstwasserstand von 2,88 m ü. NN auf (Abb. 2). Die Gesamtdauer des Überflutungsereignisses (in dieser Arbeit festgelegt als Wasserstand oberhalb eines Binnenpegelstandes von 1,10 m ü. NN) betrug ca. 28 Stunden. Die Zeitreihen zeigen einen wesentlich langsameren Rückgang des Binnenpegels zum Ausgangsniveau im Vergleich zum Außenpegel. Gründe sind die Spundwände und die wenigen Auslässe sowie auch der Sommerdeich.

Die Großwetterlage war knappe zwei Tage stabil bei einem konstanten Südwestwind mit durchschnittlichen 20 kt (\approx 5 Bft) Windgeschwindigkeit. Sieben Stunden vor Beginn der Überflutung auf der Hallig Hooge drehte der Wind mit der steigenden Flut auf Südsüdwest und erreichte Windgeschwindigkeiten von 39 kt (\approx 8 Bft). Beim Zeitpunkt des „Land unter“ drückte der einsetzende West- bis Westnordwestwind das Wasser mit einer Stärke von 45 kt (\approx 9 Bft) auf die Hallig (Abb. 3). Daraus lässt sich eine Richtung des einströmenden Wassers aus Westen schlussfolgern. Diese Annahme kann jedoch, in Anbetracht der erhöhten Deichkrone in Beziehung zu einem Spitzenpegelstand von 2,88m ü. NN, nicht standhalten. Die exakte Überflutungsrichtung bleibt unbekannt.

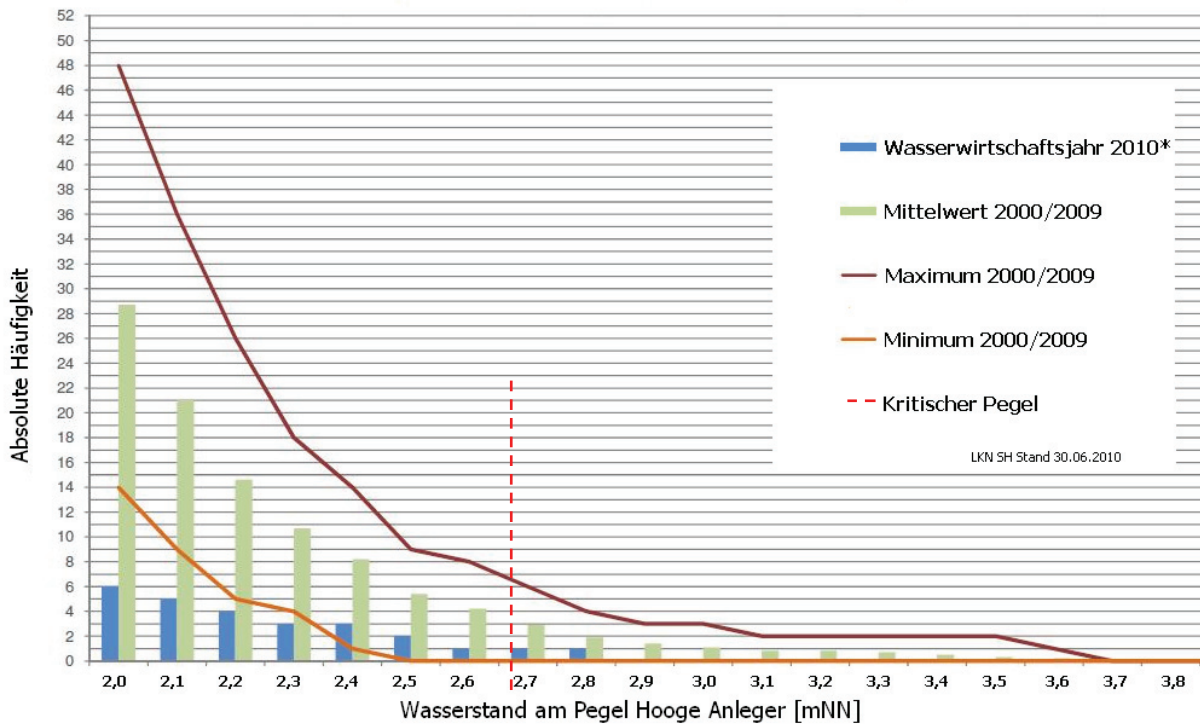


Abb. 1: Absolute Überschreitungshäufigkeiten am Pegel Hooe Anleger mit der eingezeichneten Minimalhöhe des Sommerdeiches und dementsprechendem Überflutungspegel bei 2,5 m ü. NN. *Wasserwirtschaftsjahr zum Erstellungsdatum noch nicht abgeschlossen (Grafik vom LKN-SH zur Verfügung gestellt).

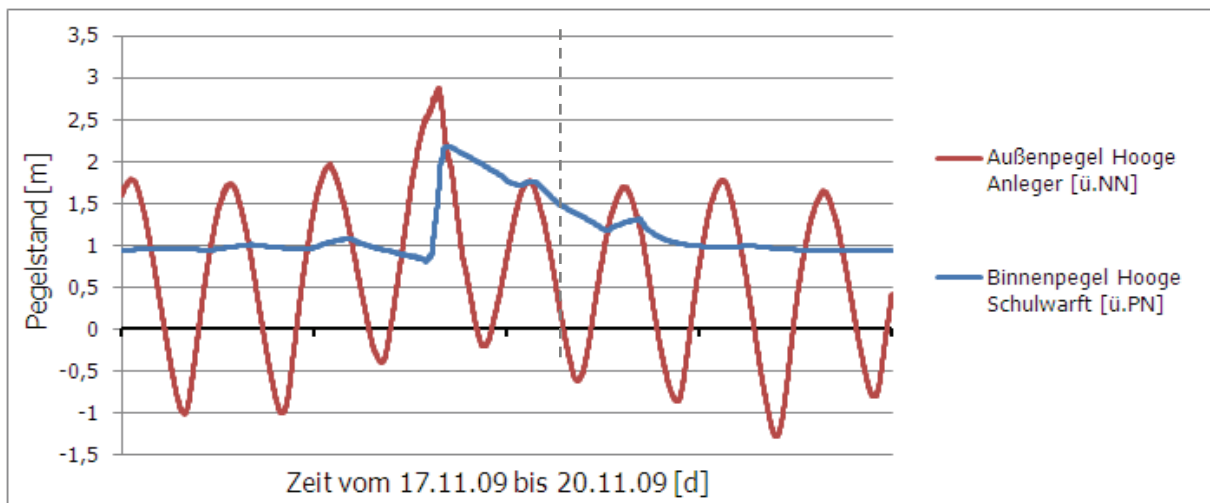


Abb. 2: Binnen- und Außenpegel der ersten Sturmflut im Untersuchungszeitraum mit gestrichelter, kritischer Überflutungslinie (2,50 m ü. NN) für die Hallig Hooge (Grafik vom LKN-SH zur Verfügung gestellt).

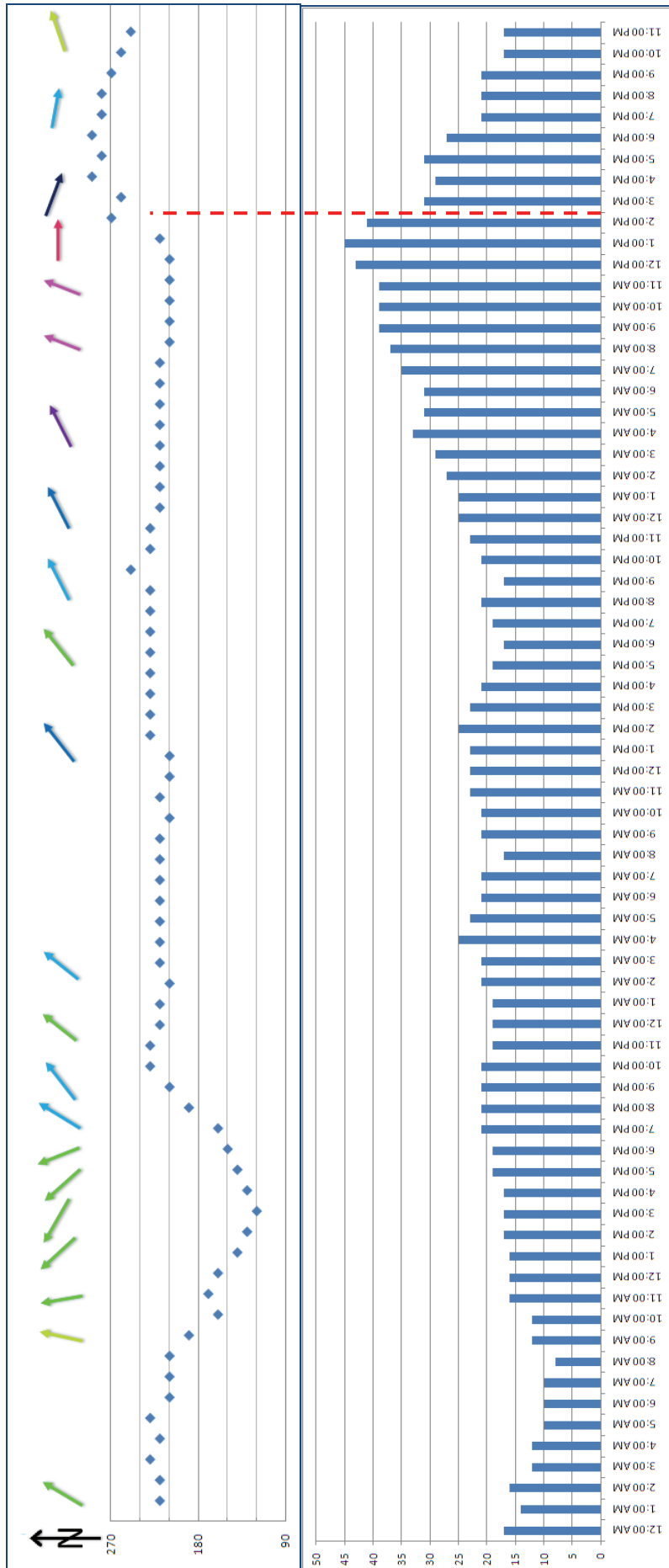


Abb. 3: Winddaten 16.11.2009 bis 18.11.2009 Hallig Hooge [h] mit Einsetzen der Überflutung (rot gestrichelte Markierung) (Windfinder 2010).
 Pfeile: Windrichtung und -stärke (gelb: <10kt; grün >15 kt; blau: > 20 kt; dunkelblau: > 25 kt; violett: >30 kt; rot: >40 kt)
 Rauten: Windrichtung [°]
 Säulen: Windstärke [kt]

Am 23. November 2009 kam es zwischen 06:09 Uhr und 22:01 Uhr des gleichen Tages zu erhöhten Binnenpegelständen ($> 1,10$ m ü. NN). Der höchste, gemessene Wasserstand des Binnenpegels betrug $1,41$ m ü. NN (Normalwert: $0,97$ m) und lag bei $2,52$ m ü. NN am Außenpegels. Da bei dieser Sturmflut die kritische Überflutungslinie von $2,50$ m ü. NN nur knapp erreicht wurde, schlugen nur die Wellenkämme über den Deich. Es kam zu einer sogenannten „Kantenflut“. Folglich wurde in der vorliegenden Arbeit von nur einer Überflutung im Untersuchungszeitraum ausgegangen, welche zu der Sedimentakkumulation führte.

Historische Daten geben Deicke et al. (2009) für 1978 bis 2007 mit durchschnittlichen $4,7$ Überflutungen pro Jahr an. Der Mittelwert für die Jahre 2000 bis 2009 liegt bei $5,4$ Überflutungen (Abb. 1).

Flächenauswahl

Für die Sedimentakkumulationsuntersuchungen im Winter 2009/10 wurden fünf Flächen auf der Hallig Hooge ausgewählt (Abb. 4). Diese unterschieden sich hinsichtlich ihrer Nutzung und entsprechend der Vegetationshöhe. Die im Westen nördlich der Ipkenswarft liegende Fläche „A“ wies die höchste Vegetation mit einer mittleren Wuchshöhe von 30 cm auf. Wesentlich geringer fiel diese auf der zweiten, stark beweideten Untersuchungsfläche „B“ westlich der Volkertswarft aus (Mittelwert = $5,5$ cm). Drei weitere Flächen, die mit „C“, „D“ und „E“ bezeichnet wurden, liegen nordwestlich und südlich der Hanswarft. Die Flächen „C“ und „D“ wiesen mit mittleren $6,1$ cm und $6,3$ cm Vegetationshöhe eine ähnlich intensive Nutzung, wie bereits Fläche „B“, auf. Die südlichste Fläche „E“ lag im Jahr 2009 brach und erreichte eine mittlere Bewuchshöhe von $20,0$ cm.

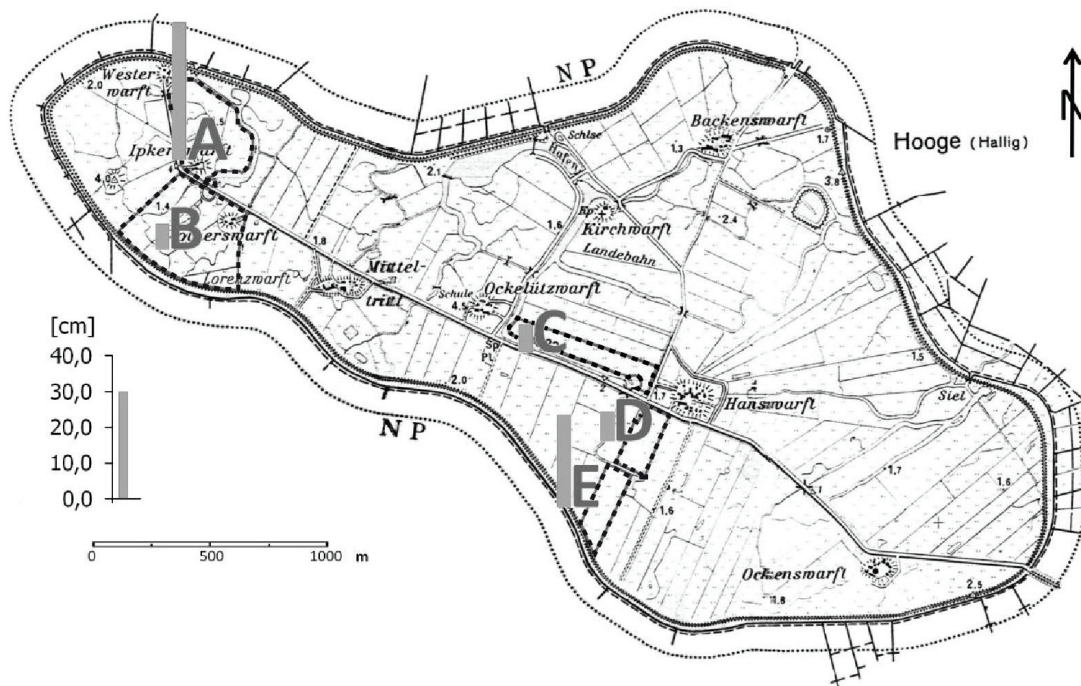


Abb. 3: Untersuchungsflächen A bis E mit mittlerer Vegetationshöhe auf Hallig Hooge im Winter 2009/10 (Kartengrundlage TK 25, Blatt 1417, Pellworm).

Probennahme

Ein seit Winter 2006/07 genutzter und bewährter Sedimentfallentyp (Deicke et al. 2007) war Grundlage für die Bestimmung der akkumulierten Sedimentmenge. Der Sedimentfallentyp bestand aus der Kombination einer PE-Weithalsschraubflasche und einer PVC-Matte, die in einem Abstand von ca. 50 cm zueinander installiert wurden. Die verwendeten Flaschen besaßen einen

Flaschenöffnungsdurchmesser von 5 cm und fassten ein Volumen von einem Liter. Um ein Aufschwimmen während der Überflutung zu verhindern, wurden die Flaschen bis zum Rand mit klarem Prielwasser gefüllt. In die Flaschen konnte bei „Land unter“ das Sediment absinken und von dort nicht wieder remobilisiert werden. Da die Flaschenöffnung die Akkumulationsfläche darstellte, wurde diese in der Berechnung der Oberflächenzuwachsrate mit einer Fläche von 19,63 cm² berücksichtigt.

Der zweite Sedimentfallentyp war eine PVC-Matte mit einer Größe von 20 x 30 cm und ca. 1 cm langen Borsten. Während sich auf der Matte weniger Sediment als bei natürlicher Vegetation abgelagerte, und in der ruhigen Wassersäule der Flasche deutlich mehr Sediment eingefangen wurde, kann angenommen werden, dass die tatsächliche Sedimentakkumulation der Hallig und damit der Oberflächenzuwachs zwischen den Werten der beiden Sedimentfallentypen lag. Der Oberflächenzuwachs wird für Matte und Flasche mit Formel 1 bestimmt, die Sedimentakkumulation mit Formel 2:

$$W = (m/A) \cdot \rho^{-1} \cdot 10 \quad (1)$$

$$S = m \cdot 10000/A \quad (2)$$

| | |
|----------|--|
| <i>W</i> | Oberflächenzuwachs [mm] |
| <i>S</i> | Sedimentakkumulation [g/m ²] |
| <i>m</i> | Masse siliziklastischer Feststoff [g] |
| <i>A</i> | Akkumulationsfläche [cm ²] |
| <i>ρ</i> | Trockenraumdichte des Sedimentes [1,5 g*cm ⁻³] (nach Deicke et al. 2009) |

Die vorgestellten Fallen wurden im Zeitraum vom 06. bis zum 08. November 2009 installiert und im Folgejahr im Zeitraum vom 29. und 30. März 2010 wieder eingeholt.

Probenaufbereitung

Zur Bestimmung des nachhaltigen Oberflächenzuwachses ist es notwendig die siliziklastische Sedimentmenge zu quantifizieren, da nur diese langfristig erhalten bleibt. Die organische Substanz wird zersetzt und das Karbonat gelöst. Die siliziklastische Sedimentmenge entspricht daher dem Gesamtsediment abzüglich der organischen Anteile sowie, bei der Sedimentfalle „Flasche“, des Salzgehaltes. Die Matten können durch den Niederschlag als ausgesüßt angesehen werden. Karbonatische Anteile wurden nicht berücksichtigt, da sie in den vorliegenden Proben nur einen sehr geringen Anteil ausmachen (< 3 %).

Die Matten wurden mehrere Tage im Trockenschrank bei 60 °C getrocknet und mit einer Messgenauigkeit von 0,01 g gewogen. Zur weiteren Bestimmung der Trockensubstanz und des Glühverlustes wurde eine repräsentative Menge Festsubstanz von der Matte abgeklopft. Abschließend wurden die gereinigten Matten erneut gewogen. Der verbleibende Wassergehalt wurde durch Trocknen eines Aliquotes bei 105 °C bestimmt.

Die Brackwassersuspension aus den Flaschen wurde dekantiert, eingedampft, getrocknet und gewogen, um die Trockenmasse der Probe zu ermitteln. Hierbei ergibt sich die Schwierigkeit, dass die verbleibende Trockensubstanz große Mengen an Salz aus dem Brackwasser enthält (Tab. 1). Um diesen Salzanteil zu ermitteln, wurde vor dem Eindampfen die Suspension gewogen. Aus der Massendifferenz vor und nach dem Eindampfen wurde das eingedampfte Wasservolumen berechnet.

Der Salzgehalt dieses Wasservolumens wurde für alle Proben über eine Leitfähigkeitsmessung errechnet. Vor dem Eindampfen der Suspension wurde die elektrische Leitfähigkeit LF des Wassers gemessen. Die LF-Daten wurden mit fünf verdünnten künstlichen Meerwasserstandards kalibriert und in Salzkonzentrationen umgerechnet. Details dieser Methode beschreiben Karius & Machunze (2010).

Tab. 1: Gesamt Feststoff und Salzanteil im Fallentyp Flasche nach Dekantieren und Trocknen bei 105 °C. Flasche HO 34 war während des Untersuchungszeitraumes mit Deckel verschlossen.

| Probe | | HO 01 | HO 02 | HO 03 | HO 04 | HO 05 | HO 06 | HO 07 | HO 08 | HO 09 | HO 10 |
|----------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ges. Feststoff | [g] | 4,3 | 5,8 | 2,9 | 2,9 | 3,5 | 2,5 | 5,6 | 7,0 | 3,0 | 2,8 |
| Salzanteil | [g] | 2,2 | 3,8 | 1,7 | 2,1 | 1,1 | 1,8 | 2,5 | 4,3 | 1,9 | 1,2 |
| Salzanteil | [%] | 51,7 | 65,6 | 59,6 | 72,5 | 32,4 | 71,7 | 44,6 | 61,0 | 64,7 | 45,2 |

| Probe | | HO 11 | HO 12 | HO 13 | HO 14 | HO 15 | HO 16 | HO 17 | HO 18 | HO 19 | HO 20 |
|----------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ges. Feststoff | [g] | 4,1 | 4,8 | 3,8 | 5,4 | 16,5 | 6,9 | 8,8 | 15,3 | 7,6 | 5,2 |
| Salzanteil | [g] | 2,4 | 2,4 | 1,8 | 3,1 | 14,0 | 4,4 | 4,1 | 12,5 | 4,0 | 4,3 |
| Salzanteil | [%] | 57,7 | 50,4 | 48,1 | 57,8 | 84,8 | 64,5 | 46,9 | 81,5 | 52,1 | 83,8 |

| Probe | | HO 21 | HO 22 | HO 23 | HO 24 | HO 25 | HO 26 | HO 27 | HO 28 | HO 29 | HO 30 |
|----------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ges. Feststoff | [g] | 2,7 | 5,4 | 5,1 | 3,9 | 4,0 | 3,8 | 5,3 | 7,5 | 3,8 | 2,5 |
| Salzanteil | [g] | 1,8 | 3,4 | 3,5 | 1,9 | 2,6 | 2,4 | 4,0 | 3,3 | 2,4 | 1,6 |
| Salzanteil | [%] | 67,4 | 62,8 | 68,6 | 49,1 | 64,8 | 62,6 | 75,9 | 43,5 | 63,6 | 64,0 |

| Probe | | HO 31 | HO 32 | HO 33 | HO 34 | HO 35 | HO 36 | HO 37 | HO 38 | HO 39 | HO 40 |
|----------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ges. Feststoff | [g] | 9,1 | 6,2 | 8,2 | n,a | 5,9 | 4,1 | 10,7 | 5,4 | 3,8 | 3,6 |
| Salzanteil | [g] | 6,2 | 2,7 | 1,7 | n,a | 4,4 | 1,4 | 8,7 | 3,6 | 0,8 | 1,5 |
| Salzanteil | [%] | 68,1 | 43,7 | 20,8 | n,a | 75,4 | 33,5 | 81,6 | 67,3 | 20,0 | 41,6 |

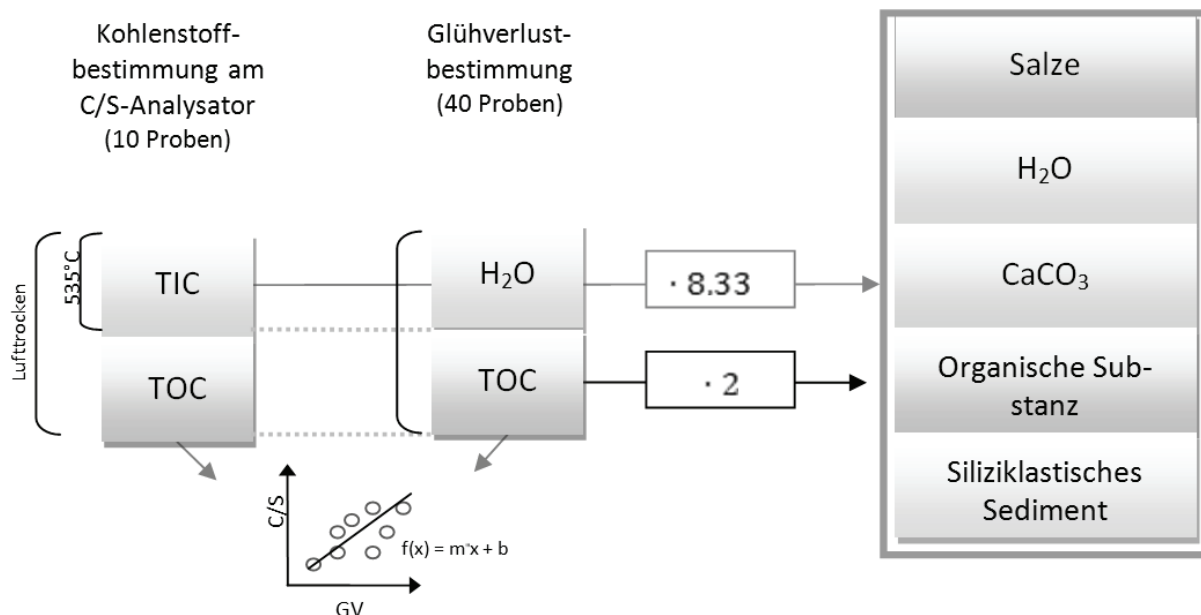


Abb 4: Schematische Darstellung der Zusammensetzung des Sediments und der Möglichkeiten zu Bestimmung des CaCO₃-Gehalts und der organischen Substanz durch Glühverlustbestimmung und C/S-Analyse. Die Klammern zeigen, welche Bestandteile durch die jeweilige Methode gemessen werden können: Glühverlust ergibt den TC, C/S-Analysator misst TIC und TC.

Bestimmung der organischen Substanz

Die organische Substanz wurde für alle Matten- sowie Flaschensedimente einheitlich mit der Glühverlustmethode (GV) bestimmt (Abb. 6). Bereits ausgeglühte Tiegel wurden gewogen, mit ca. 1 g Sediment gefüllt, erneut gewogen und anschließend im Muffelofen für 2 Stunden bei 535 °C geglüht. Bei dieser Temperatur wird die organische Substanz oxidiert, die Karbonate jedoch noch nicht zersetzt. Nach dem Abkühlen des Ofens auf ca. 80 °C wurden die Tiegel in den Exsikkator gestellt und anschließend bei Zimmertemperatur ausgewogen. Aus der Differenz der Gewichte ergibt sich der Glühverlust, welcher in etwa der organischen Substanz der Probe entspricht.

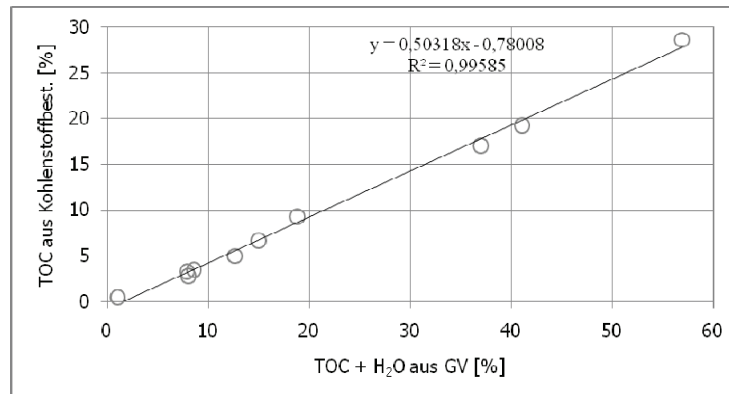


Abb. 5: Regression zwischen den Anteilen des Glühverlustes und Werten der Kohlenstoffbestimmung zur Entfernung des Kristallwasserfehlers für filtrierte Proben. Für statistische Validität wurden neben den fünf Proben von Hallig Hooge, fünf weitere Proben der Hallig Langeness (Vogt 2010a) mit einbezogen.

Da bei 535 °C jedoch auch Kristallwasser aus dem Sediment entwich, fiel der errechnete Glühverlust höher als der tatsächliche Anteil an organischer Substanz aus. Um diesen Kristallwasseranteil zu bestimmen, wurde an zehn Proben (darunter fünf filtrierte, salzfreie und fünf unfiltrierte, salzhaltige) eine Gesamtkohlenstoffbestimmung (TC) vorgenommen. Zusätzlich wurde an denselben Proben der inorganische Kohlenstoff (TIC) nach Glühen bei 535 °C bestimmt. Alle Kohlenstoffmessungen wurden mit einem C/S-Analysator (Eltra, CS 800) durchgeführt.

Die Methode zur Kristallwasserkorrektur sah nun vor, dass zunächst an einer getrockneten (105 °C) Teilmenge einer Probe der Gesamtkohlenstoffgehalt (TC) und anschließend an einer 535 °C-geglühten Teilmenge derselben Probe der anorganische Kohlenstoffgehalt (TIC) gemessen wurden. Daraufhin konnte der organische Kohlenstoffgehalt (TOC) mittels Subtraktion des anorganischen Kohlenstoffgehalts (TIC) vom Gesamtkohlenstoff (TC) ermittelt werden. Um nun die Kristallwasserkorrektur des Glühverlustes für jede Probe vorzunehmen, wurde das Verhältnis von GV zu TOC der fünf filtrierten ermittelt (Abb. 7). Ebenso wurde für die nicht filtrierten Proben vorgegangen (Abb. 8), da das Salz per se mehr Kristallwasser enthielt. Die daraus resultierenden Regressionsformeln 3 und 4

$$TOC (\text{filtriert}) = 0,50318 * GV - 0,78008 \quad (3)$$

$$TOC (\text{salzhaltig}) = 0,56378 * GV - 6,46448 \quad (4)$$

boten nun die Möglichkeit, die salzhaltigen und –freien Glühverlustwerte um den jeweiligen Kristallwasserfehler zu korrigieren und damit den Anteil des gesamten organischen Kohlenstoffs zu ermitteln. Für organische Substanz (OS) gilt näherungsweise die Formel $2 * TOC = OS$ (Schachtschabel et al. 1989). Um die organische Substanz aus GV Daten abzuschätzen, die wesentlich einfacher zu gewinnen sind als TOC Werte können also oben genannte Formeln mit Faktor 2 multipliziert werden.

Das Verfahren für salzhaltige Proben setzt allerdings voraus, dass der Salzgehalt nicht zu stark schwankt.

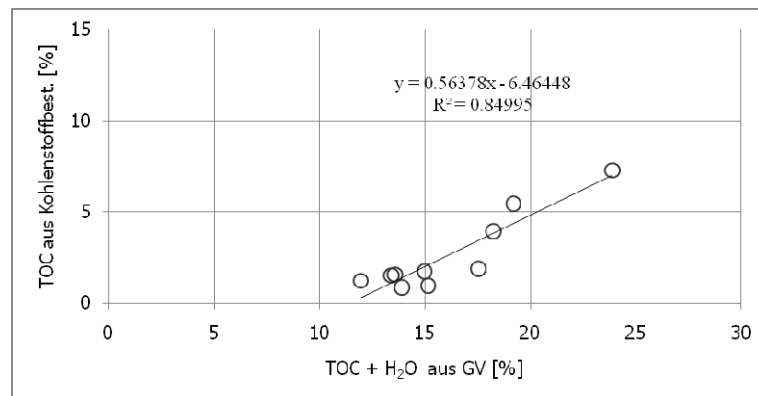


Abb. 6: Regression zwischen den Anteilen des Glühverlustes und Werten der Kohlenstoffbestimmung zur Entfernung des Kristallwasserfehlers für salzhaltige Proben. Für statistische Validität wurden neben den fünf Proben von Hallig Hooge fünf weitere der Hallig Langeness (Vogt 2010a) mit einbezogen.

4 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Sedimentquantifizierung sind in Tab 2 bis 6 dargestellt.

Tab. 2: Ergebnisse der Sedimentfallenuntersuchung auf Hallig Hooge im Winter 2009/10 - Fläche A (nahe Ipkenswarft).

| | | Sedimentakkumulation | Aufwuchs | siliziklastischer Anteil | | Organische Substanz | |
|-------|---------|----------------------|----------|--------------------------|------|---------------------|------|
| | | [g/m ²] | [mm] | [g] | [%] | [g] | [%] |
| HO 31 | Flasche | 1340 | 0,89 | 2,63 | 90,2 | 0,28 | 9,8 |
| | Matte | 216 | 0,14 | 12,94 | 87,5 | 1,86 | 12,5 |
| HO 32 | Flasche | 1726 | 1,15 | 3,33 | 96,1 | 0,13 | 3,9 |
| | Matte | 202 | 0,13 | 12,14 | 83,9 | 2,32 | 16,1 |
| HO 33 | Flasche | 2873 | 1,92 | 5,64 | 86,5 | 0,88 | 13,5 |
| | Matte | n,a, | n,a, | n,a, | n,a, | n,a, | n,a, |
| HO 34 | Flasche | n,a, | n,a, | n,a, | n,a, | n,a, | n,a, |
| | Matte | 96 | 0,06 | 5,74 | 84,1 | 1,08 | 15,9 |
| HO 35 | Flasche | 554 | 0,37 | 1,09 | 87,5 | 0,16 | 12,5 |
| | Matte | 61 | 0,04 | 3,67 | 80,9 | 0,87 | 19,1 |
| HO 36 | Flasche | 1342 | 0,89 | 2,58 | 94,5 | 0,15 | 5,5 |
| | Matte | 194 | 0,13 | 11,66 | 88,4 | 1,53 | 11,6 |
| HO 37 | Flasche | 702 | 0,47 | 1,38 | 85,5 | 0,23 | 14,5 |
| | Matte | 102 | 0,07 | 6,13 | 79,8 | 1,55 | 20,2 |
| HO 38 | Flasche | 727 | 0,48 | 1,43 | 88,8 | 0,18 | 11,2 |
| | Matte | 63 | 0,04 | 3,78 | 84,6 | 0,69 | 15,4 |
| HO 39 | Flasche | 1414 | 0,94 | 2,72 | 89,9 | 0,30 | 10,1 |
| | Matte | 45 | 0,03 | 2,69 | 64,3 | 1,49 | 35,7 |
| HO 40 | Flasche | 977 | 0,65 | 1,80 | 86,5 | 0,28 | 13,5 |
| | Matte | 93 | 0,06 | 5,60 | 83,3 | 1,12 | 16,7 |

n.a. = nicht analysiert

Tab. 3: Ergebnisse der Sedimentfallenuntersuchung auf Hallig Hooge im Winter 2009/10 - Fläche B (nahe Volkertswarf).

| | | Sedimentakkumulation | Aufwuchs | siliziklastischer Anteil | | Organische Substanz | |
|-------|---------|----------------------|----------|--------------------------|------|---------------------|------|
| | | [g/m ²] | [mm] | [g] | [%] | [g] | [%] |
| HO 13 | Flasche | 552 | 0,37 | 1,08 | 54,8 | 0,89 | 45,2 |
| | Matte | 69 | 0,05 | 4,13 | 54,3 | 3,48 | 45,7 |
| HO 15 | Flasche | 683 | 0,46 | 1,34 | 51,1 | 1,28 | 48,9 |
| | Matte | 54 | 0,04 | 3,24 | 71,3 | 1,30 | 28,7 |
| HO 16 | Flasche | 867 | 0,58 | 1,70 | 69,7 | 0,74 | 30,3 |
| | Matte | 126 | 0,08 | 7,57 | 69,8 | 3,28 | 30,2 |
| HO 17 | Flasche | 2292 | 1,53 | 4,33 | 92,4 | 0,35 | 7,6 |
| | Matte | 170 | 0,11 | 10,20 | 87,9 | 1,40 | 12,1 |
| HO 18 | Flasche | 809 | 0,54 | 1,59 | 66,8 | 0,79 | 33,2 |
| | Matte | 125 | 0,08 | 7,48 | 83,1 | 1,52 | 16,9 |
| HO 19 | Flasche | 1684 | 1,12 | 2,94 | 80,5 | 0,71 | 19,5 |
| | Matte | 44 | 0,03 | 2,65 | 82,1 | 0,58 | 17,9 |
| HO 21 | Flasche | 424 | 0,28 | 0,76 | 87,3 | 0,11 | 12,7 |
| | Matte | 6 | 0,00 | 0,38 | 52,8 | 0,34 | 47,2 |
| HO 22 | Flasche | 929 | 0,62 | 1,49 | 73,7 | 0,53 | 26,3 |
| | Matte | 33 | 0,02 | 1,96 | 64,6 | 1,07 | 35,4 |
| HO 25 | Flasche | 509 | 0,34 | 1,00 | 71,9 | 0,39 | 28,1 |
| | Matte | 24 | 0,02 | 1,44 | 72,8 | 0,54 | 27,2 |
| HO 26 | Flasche | 581 | 0,39 | 1,14 | 80,5 | 0,28 | 19,5 |
| | Matte | 23 | 0,02 | 1,38 | 71,1 | 0,56 | 28,9 |

Tab. 4: Ergebnisse der Sedimentfallenuntersuchung auf Hallig Hooge im Winter 2009/10 - Fläche C (nahe Hanswarf).

| | | Sedimentakkumulation | Aufwuchs | siliziklastischer Anteil | | Organische Substanz | |
|-------|---------|----------------------|----------|--------------------------|------|---------------------|------|
| | | [g/m ²] | [mm] | [g] | [%] | [g] | [%] |
| HO 01 | Flasche | 725 | 0,48 | 1,42 | 69,0 | 0,64 | 31,0 |
| | Matte | 132 | 0,09 | 7,92 | 71,5 | 3,16 | 28,5 |
| HO 02 | Flasche | 455 | 0,30 | 0,89 | 77,0 | 0,27 | 23,0 |
| | Matte | 110 | 0,07 | 6,59 | 74,2 | 2,29 | 25,8 |
| HO 05 | Flasche | 1087 | 0,72 | 2,04 | 87,1 | 0,30 | 12,9 |
| | Matte | 128 | 0,09 | 7,67 | 74,8 | 2,58 | 25,2 |
| HO 06 | Flasche | 341 | 0,23 | 0,54 | 74,8 | 0,18 | 25,2 |
| | Matte | 19 | 0,01 | 1,13 | 46,4 | 1,30 | 53,6 |
| HO 07 | Flasche | 1263 | 0,84 | 2,48 | 80,2 | 0,61 | 19,8 |
| | Matte | 182 | 0,12 | 10,93 | 73,2 | 4,00 | 26,8 |
| HO 08 | Flasche | 960 | 0,64 | 1,88 | 84,0 | 0,36 | 16,0 |
| | Matte | 212 | 0,14 | 12,72 | 85,5 | 2,16 | 14,5 |
| HO 10 | Flasche | 709 | 0,47 | 1,30 | 86,1 | 0,21 | 13,9 |
| | Matte | 106 | 0,07 | 6,37 | 71,2 | 2,58 | 28,8 |

Fortsetzung der Tab. auf der folgenden Seite.

Fortsetzung:

| | | Sedimentakkumulation | Aufwuchs | siliziklastischer Anteil | | Organische Substanz | |
|-------|---------|----------------------|----------|--------------------------|------|---------------------|------|
| | | [g/m ²] | [mm] | [g] | [%] | [g] | [%] |
| HO 12 | Flasche | 1129 | 0,75 | 2,05 | 86,2 | 0,33 | 13,8 |
| | Matte | 61 | 0,04 | 3,64 | 61,9 | 2,25 | 38,1 |
| HO 27 | Flasche | 284 | 0,19 | 0,56 | 57,2 | 0,42 | 42,8 |
| | Matte | 40 | 0,03 | 2,43 | 69,7 | 1,05 | 30,3 |
| HO 28 | Flasche | 1586 | 1,06 | 2,25 | 53,2 | 1,98 | 46,8 |
| | Matte | 51 | 0,03 | 3,04 | 56,0 | 2,39 | 44,0 |

Tab. 5: Ergebnisse der Sedimentfallenuntersuchung auf Hallig Hooge im Winter 2009/10 - Fläche D (nahe Hanswarft).

| | | Sedimentakkumulation | Aufwuchs | siliziklastischer Anteil | | Organische Substanz | |
|-------|---------|----------------------|----------|--------------------------|------|---------------------|------|
| | | [g/m ²] | [mm] | [g] | [%] | [g] | [%] |
| HO 09 | Flasche | 435 | 0,29 | 0,85 | 80,3 | 0,21 | 19,7 |
| | Matte | 59 | 0,04 | 3,52 | 66,5 | 1,77 | 33,5 |
| HO 11 | Flasche | 570 | 0,38 | 1,12 | 64,3 | 0,62 | 35,7 |
| | Matte | 38 | 0,03 | 2,25 | 69,7 | 0,98 | 30,3 |
| HO 14 | Flasche | 842 | 0,56 | 1,65 | 72,3 | 0,63 | 27,7 |
| | Matte | 48 | 0,03 | 2,87 | 68,9 | 1,29 | 31,1 |
| HO 20 | Flasche | 210 | 0,14 | 0,41 | 51,9 | 0,38 | 48,1 |
| | Matte | 29 | 0,02 | 1,75 | 66,1 | 0,90 | 33,9 |
| HO 23 | Flasche | 783 | 0,52 | 1,39 | 87,0 | 0,21 | 13,0 |
| | Matte | 14 | 0,01 | 0,87 | 58,1 | 0,63 | 41,9 |
| HO 24 | Flasche | 943 | 0,63 | 1,71 | 85,2 | 0,30 | 14,8 |
| | Matte | 50 | 0,03 | 3,01 | 70,3 | 1,27 | 29,7 |

Tab. 6: Ergebnisse der Sedimentfallenuntersuchung auf Hallig Hooge im Winter 2009/10 - Fläche E (nahe Hanswarft).

| | | Sedimentakkumulation | Aufwuchs | siliziklastischer Anteil | | Organische Substanz | |
|-------|---------|----------------------|----------|--------------------------|------|---------------------|------|
| | | [g/m ²] | [mm] | [g] | [%] | [g] | [%] |
| HO 03 | Flasche | 512 | 0,34 | 1,01 | 85,2 | 0,17 | 14,8 |
| | Matte | 28 | 0,02 | 1,67 | 61,9 | 1,03 | 38,1 |
| HO 04 | Flasche | 290 | 0,19 | 0,57 | 71,2 | 0,23 | 28,8 |
| | Matte | 36 | 0,02 | 2,15 | 63,4 | 1,24 | 36,6 |
| HO 29 | Flasche | 548 | 0,37 | 1,08 | 78,4 | 0,30 | 21,6 |
| | Matte | 26 | 0,02 | 1,56 | 57,0 | 1,18 | 43,0 |
| HO 30 | Flasche | 432 | 0,29 | 0,73 | 79,2 | 0,19 | 20,8 |
| | Matte | 2 | 0,00 | 0,12 | 26,6 | 0,33 | 73,4 |

Die Mittel- und Medianwerte der einzelnen Flächen sowie die Mittel- und Medianwerte aller Proben sind in Tab. 7 dargestellt.

Tab. 7: Mittelwerte und Medianwerte der Sedimentparameter für alle Untersuchungsflächen.

| | | Fläche A | | Fläche B | | Fläche C | | Fläche D | | Fläche E | | Gesamt | | |
|--------------------------|---------------------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|---------|-------|------|
| | | Flasche | Matte | Flasche | Matte | Flasche | Matte | Flasche | Matte | Flasche | Matte | Flasche | Matte | |
| Sedimentakkumulation | [g/m ²] | MW | 1295 | 119 | 933 | 67 | 854 | 104 | 630 | 40 | 446 | 23 | 861 | 80 |
| | | Med | 1340 | 96 | 746 | 49 | 842 | 108 | 676 | 43 | 472 | 27 | 725 | 59 |
| Aufwuchs | [mm] | MW | 0,86 | 0,08 | 0,62 | 0,04 | 0,57 | 0,07 | 0,42 | 0,03 | 0,30 | 0,02 | 0,57 | 0,05 |
| | | Med | 0,89 | 0,06 | 0,50 | 0,03 | 0,56 | 0,07 | 0,45 | 0,03 | 0,31 | 0,02 | 0,48 | 0,04 |
| siliziklastischer Anteil | [g] | MW | 2,51 | 7,15 | 1,74 | 4,04 | 1,54 | 6,24 | 1,19 | 2,38 | 0,84 | 1,38 | 1,69 | 4,79 |
| | | Med | 2,58 | 5,74 | 1,42 | 2,94 | 1,65 | 6,48 | 1,26 | 2,56 | 0,87 | 1,62 | 1,42 | 3,52 |
| | [%] | MW | 89,5 | 81,9 | 72,9 | 71,0 | 75,5 | 68,4 | 73,5 | 66,6 | 78,5 | 52,2 | 78,1 | 70,2 |
| | | Med | 88,8 | 83,9 | 72,8 | 71,2 | 78,6 | 71,3 | 76,3 | 67,7 | 78,8 | 59,5 | 80,5 | 71,1 |
| organische Substanz | [g] | MW | 0,29 | 1,39 | 0,61 | 1,41 | 0,53 | 2,38 | 0,39 | 1,14 | 0,22 | 0,95 | 0,44 | 1,56 |
| | | Med | 0,23 | 1,49 | 0,62 | 1,19 | 0,34 | 2,34 | 0,34 | 1,13 | 0,21 | 1,10 | 0,30 | 1,30 |
| | [%] | MW | 10,5 | 18,1 | 27,1 | 29,0 | 24,5 | 31,6 | 26,5 | 33,4 | 21,5 | 47,8 | 21,9 | 29,8 |
| | | Med | 11,2 | 16,1 | 27,2 | 28,8 | 21,4 | 28,7 | 23,7 | 32,3 | 21,2 | 40,5 | 19,5 | 28,9 |

Die medianen Gesamtsedimentanteile an siliziklastischem Material von 71,1 % (Matte) und 80,5 % (Flasche), an organischer Substanz 19,5 % (Flasche) und 28,9 % (Matte) entsprechen der zu erwarteten Zusammensetzung von Marschsedimenten (Reyer 2006).

Die große Differenz zwischen den beiden Fallentypen bezüglich der organischen Substanz resultiert daraus, dass die Matten so flach auf der Grasnarbe lagen, dass sie im Untersuchungszeitraum bereits von Gräsern überwachsen wurden.

Die große Wertevariabilität zwischen 11,6 % und 73,4 % organischer Substanz innerhalb der Sedimentfälle „Matte“ ist Resultat der Methodik. Die Vegetation hatte sich in einigen Matten zu stark verwurzelt, sodass nicht ohne Sedimentverluste hätte selektiert werden konnte. Dies schlug sich folglich in sehr hohen Werten der organischen Substanz nieder.

Kalziumkarbonat kann zum Oberflächenzuwachs beitragen, wie es in historischen Sedimenten eines Aufschlusses auf der Hallig Hooge in einer Tiefe von 87 cm nachgewiesen wurde (Reyer 2006). Dazu nötig sind dichte Schilllagen, die längerfristig erhalten bleiben. Diese sind bei der geringen Sturmflutintensität im Untersuchungszeitraum jedoch nur in direkter Ufernähe zu finden. Daher fielen die Kalziumkarbonatwerte in den untersuchten Sedimenten vernachlässigbar gering aus.

Der siliziklastische Oberflächenzuwachs für die Hallig Hooge lag im Winter 2009/10 zwischen medianen 0,04 mm und 0,48 mm der beiden Sedimentfallentypen Matte und Flasche. Die Mittelwerte lagen bei 0,05 mm (Matte) und 0,57 mm (Flasche). Es trat im Untersuchungszeitraum nur ein vollständiges „Land unter“ auf. Aus diesem Grund entspricht die genannte Spannweite dem diesjährigen Oberflächenzuwachs für ein Einzelüberflutungsereignis.

Generell gibt es eine große Diskrepanz zwischen der Sedimentakkumulation der Flasche und der Matte. Bei der Flasche ist davon auszugehen, dass einmal sedimentiertes Material nicht wieder aus der Sedimentfalle gelangen kann, während Material von der Matte leicht bei einem Regenereignis abgespült werden kann. Diese Annahme wird gestützt durch die Beobachtung, dass Sediment hauptsächlich in den von den Borsten gebildeten Körbchen der Matten gefangen wird. Wird nur die von den Körbchen eingenommene Fläche der Matte (90,71 cm²) bei der Berechnung der Sedimentakkumulation und des Aufwuchses berücksichtigt, so nähren sich die Werte der beiden Fallentypen deutlich an (Tab. 8).

Tab. 8: Mittel- und Medianwerte über alle Proben der Hallig Hooge im Winter 2009/10. Für die Berechnung der Mattendaten wurde die Körbchenfläche von 90,71 cm² zu Grunde gelegt.

| | | | Fläche A | | Fläche B | | Fläche C | | Fläche D | | Fläche E | | Gesamt | |
|----------------------|---------------------|-----|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|---------|-------|
| | | | Flasche | Matte | Flasche | Matte | Flasche | Matte | Flasche | Matte | Flasche | Matte | Flasche | Matte |
| Sedimentakkumulation | [g/m ²] | MW | 1295 | 788 | 933 | 446 | 854 | 688 | 630 | 262 | 446 | 152 | 861 | 529 |
| | | Med | 1340 | 632 | 746 | 324 | 842 | 714 | 676 | 282 | 472 | 178 | 725 | 388 |
| Aufwuchs | [mm] | MW | 0,86 | 0,53 | 0,62 | 0,30 | 0,57 | 0,46 | 0,42 | 0,17 | 0,30 | 0,10 | 0,57 | 0,35 |
| | | Med | 0,89 | 0,42 | 0,50 | 0,22 | 0,56 | 0,48 | 0,45 | 0,19 | 0,31 | 0,12 | 0,48 | 0,26 |

Um mit einem derzeitigen Anstieg des mittleren Tidehochwassers von 3,5 mm bis 4,2 mm pro Jahr (Jensen & Mudersbach 2007) mitzuhalten, wären nach den diesjährig gemessenen Sedimentzuwachsrate mindestens sieben Sturmfluten mit maximalen Sedimentakkumulationen pro Jahr notwendig. Dieser Wert liegt allerdings etwas oberhalb der derzeitigen Überflutungshäufigkeit, die bei etwa 5,4 Überflutungen pro Jahr liegt.

5 Schlussfolgerung

Die Oberflächenzuwachsrate für den Winter 2009/10 der Hallig Hooge liegt mit einem Wert von bis zu 0,48 mm sowohl weit unterhalb des derzeitigen Küstenpegelanstiegs von 4,2 mm pro Jahr, als auch unterhalb des durchschnittlichen Inselpegelanstiegs von 3,5 mm pro Jahr (Jensen & Mudersbach 2007). Hallig Langeness zeigt nach Vogt et al. (2010) im Winter 2009/10 bei der, verglichen mit Hallig Hooge, doppelten Anzahl von Überflutungen ungefähr den doppelten Sedimentaufwuchs von 1,04 mm (Median Flasche). Demnach hätte der Sommerdeich der Hallig Hooge negative Auswirkungen auf den Oberflächenzuwachs, da er die Anzahl der möglichen "Land unter" reduziert. Die durch Prielverbauungen erzielte längere Verweildauer des Wassers auf der Hallig Hooge nach einem „Land unter“ und die damit gegenüber Langeness erwartbare effektivere Sedimentation kann zumindest im betrachteten Zeitraum Winter 2009/10 nicht belegt werden. Allerdings muss hierbei berücksichtigt werden, dass die Sedimentfallenverteilung nicht flächendeckend über die ganze Hallig erfolgte.

Um eine nachhaltige Ergebnissicherung zu erzielen und die Oberflächenzuwachsraten weiter konkretisieren zu können, muss das Monitoring die nächsten Jahre weitergeführt werden. Um belastbare Werte zu erhalten, muss über längere Zeiträume gemessen und gemittelt werden.

Literatur

- Deicke, M., V. Karius & H. von Eynatten (2009): Bestimmung der Sedimentaufwachsraten auf den Halligen Hooge, Langeness, Nordstrandischmoor und Süderoog (SAHALL) Endbericht (unveröffentlicht).
- Deicke, M., V. Karius, W. Jahnke, W. Kallweit, M. Revens & D. Reyer (2007): Charakterisierung von Sturmflutablagerungen auf Hallig Hooge – Quantifizierung des Sedimentwachstums seit 1914. *Coastline Reports* 9, 93-102.
- International Panel on Climate Change IPCC (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Fourth Assessment Report, Geneva, 18, section 5.5.*
- Karius, V. & C. Machunze (2010): Bestimmung des Feststoffanteils in Brackwassersuspensionen. In: *Coastline Reports* (diese Ausgabe).
- Reyer, D. (2006): Korngrößenverteilung und Tonmineralogie in ausgewählten Sturmflutsedimentprofilen auf der Hallig Hooge. BSc-Arbeit, Universität Göttingen, GZG-Sedimentologie/Umweltgeologie (unveröffentlicht).

- Sander, A. (2010): Sedimentologische Untersuchungen der Sturmflutablagerungen auf der Hallig Hooge im Winter 2009/10. BSc-Arbeit, Universität Göttingen, GZG-Sedimentologie/Umweltgeologie (unveröffentlicht).
- Schachtschabel, P., H.-P. Blume, G. Brümmer, K.-H. Hartge & U. Schwertmann (1989): Lehrbuch der Bodenkunde. 12. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 491 S.
- Vogt, M. (2010a): Bestimmung der Sedimentakkumulation auf Hallig Langeness im Winter 2009/10. BSc-Arbeit, Universität Göttingen, GZG-Sedimentologie/Umweltgeologie (unveröffentlicht).
- Vogt, M., M. Deicke & V. Karius (2010): Bestimmung der Sedimentakkumulation auf Hallig Langeness im Winter 2009/10. In: Coastline Reports (diese Ausgabe).
- Jensen, J. & C. Mudersbach (2007): Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten. In: Glaser, R., W. Schenk, J. Vogt, R. Wießner, H. Zepp & U. Wardenga (Hrsg.): Berichte zur Deutschen Landeskunde, Themenheft: Küstenszenarien, Band 81, Heft 2, S. 99-112, Selbstverlag Deutsche Akademie für Landeskunde e.V., Leipzig.

Danksagung

Über die zahlreichen Beteiligten des SAHALL-Projektes der Abteilung Sedimentologie/Umweltgeologie hinaus, gilt der Dank im Besonderen dem Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig- Holstein und dem LKN Husum für weitreichende fachliche Unterstützung sowie dem Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (Kiel) für die Finanzierung.

Adresse

Dr. Volker Karius
Universität Göttingen
GZG-Sedimentologie/Umweltgeologie
Goldschmidtstr.3
37077 Göttingen, Germany

vkarius@uni-goettingen.de