

## Abschlussbericht

# Untersuchung der Sedimentdeposition auf unterschiedlich gemanagten und exponierten Flächen der Hallig Langeneß

April 2018

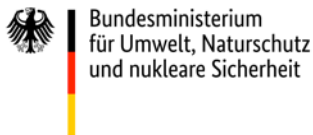
Auftraggeber: WWF Deutschland

Auftragnehmer: Universität Hamburg, BZF, Abteilung Angewandte Pflanzenökologie

Projektleiter: Dr. Stefanie Nolte & Prof. Dr. Kai Jensen

Projektmitarbeiter: Dennis Schulze

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS), im Programm „Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel“ (Förderschwerpunkt „Kommunale Leuchtturmvorhaben“). Die Beiträge geben die Meinung der Autoren wieder und müssen nicht mit der Meinung des BMU übereinstimmen.

Die Untersuchung erfolgte im Rahmen des WWF-Projekts Pilotmaßnahmen zur Klimaanpassung mit Kommunen in der schleswig-holsteinischen Wattenmeer Region (PiKKoWatt, [www.wwf.de/watt/pikkowatt](http://www.wwf.de/watt/pikkowatt)). Förderkennzeichen: 03DAS049

**Zitiervorschlag** : Nolte, S.; Jensen, K.; Schulze, D. (2018): Untersuchung der Sedimentablagerung auf unterschiedlich gemanagten und exponierten Flächen der Hallig Langeneß. Abschlussbericht. Universität Hamburg. Hamburg.

## **Inhalt**

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	3
<b>1. Einleitung</b> .....	4
1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	4
1.2 Forschungsstand.....	5
1.3 Fragestellungen.....	8
<b>2. Methoden/Arbeitsprogramm</b> .....	10
2.1 Studiengebiet.....	10
2.2 Untersuchungsflächen und Studiendesign.....	11
2.3 Sedimentfallen, Sedimentfracht-Flaschen und Berechnung der Aufwuchsraten.....	13
2.4 Höhenmessungen.....	16
2.5 Pegelrohre.....	17
2.6 Vegetationsparameter.....	17
2.7 Bohrkerne.....	18
<b>3. Ergebnisse</b> .....	20
3.1 Übersicht über die Überflutungszeiträume .....	20
3.2 Sedimentdeposition.....	21
3.3 Sedimentfracht.....	22
3.4 Bodenlagerungsdichte.....	23
3.5 Akkretion / Höhenwachstum.....	23
3.6 Einfluss der Überflutungshöhe auf die Sedimentdeposition.....	24
3.7 Einfluss der Vegetationshöhe auf die Sedimentdeposition.....	25
3.8 Bohrkerne ( <sup>137</sup> Cs) .....	26
<b>4. Diskussion</b> .....	28
4.1 Sedimentdeposition und Sedimentfracht.....	28
4.2 Akkretion / Höhenwachstum.....	29
4.3 Höhenwachstum und Meeresspiegelanstieg.....	30
<b>LITERATUR</b> .....	32

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Universität Hamburg führte im Auftrag des WWF Deutschland im Rahmen des Projekts „Pilotmaßnahmen zur Klimaanpassung mit Kommunen in der schleswig-holsteinischen Wattenmeer-Region“ (PiKKoWatt) Untersuchungen zur Sedimentationsdynamik auf der Hallig Langeneß durch. Gegenstand der Untersuchungen ist die Sedimentationsdynamik, also sowohl die Sedimentdeposition als auch das daraus resultierende vertikale Aufwachsen oder Höhenwachstum (Akkretion), und deren Einflussfaktoren. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt auf dem potentiellen Einfluss der Nutzung der Flächen durch Beweidung auf die Sedimentations- und Aufwuchsraten. Vorannahme der Untersuchung war, dass Beweidung die Höhe und Dichte der Vegetation und damit auch die Sedimentdeposition verringert. Des Weiteren könnten die Tiere durch die Verdichtung des Bodens auch direkt das Höhenwachstum verringern. Es wurde außerdem untersucht, in wie weit dieser Effekt von der Lage der Untersuchungsfläche auf der Hallig abhängt. Um diese Annahmen zu bestätigen, wurden im Herbst/Winter 2015/16 während fünf Landunter Ereignissen die Sedimentdeposition, sowie weitere Faktoren in unbeweideten und beweideten Flächen auf der Hallig Langeneß erfasst. In allen Flächen wurde eine höhere Sedimentdeposition und daraus resultierende Aufwachsen der unbeweideten Flächen gemessen. Dieser Unterschied ist deutlich ausgeprägter in den kantennahen Flächen. Vergleicht man die beweideten Flächen, sind die Sedimentdeposition und das Höhenwachstum in Kantennähe deutlich höher. Für den hier betrachteten Zeitraum wurden nach fünf Landunter Ereignissen mittlere Aufwuchsraten zwischen 0,1 mm/Jahr und 1,1 mm/Jahr bestimmt. Diese sind damit deutlich geringer als der künftig erwartete Meeresspiegelanstieg. Aus diesem Grund empfehlen wir als Anpassungsmaßnahme, eine häufigere Überflutung der Hallig, vor allem im Winter zuzulassen. Da die Beweidung bzw. Mahd auf den Flächen die Ablagerung von Sedimenten verringert, empfiehlt sich außerdem eine Veränderung der Nutzung, vor allem im Inneren der Hallig, wo die Aufwuchsraten generell niedriger sind.

## **1. Einleitung**

Die Universität Hamburg führte im Auftrag des WWF im Rahmen des Projekts „Pilotmaßnahmen zur Klimaanpassung mit Kommunen in der schleswig-holsteinischen Wattenmeer-Region“ (PiKKoWatt) Untersuchungen zur Sedimentationsdynamik auf der Hallig Langeneß durch, um zu überprüfen, wie groß die vertikalen Aufwuchsraten (Akkretion) auf ausgewählten Flächen sind.

### 1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Projekt liegt der Fokus auf einer naturverträglichen Klimaanpassung des Wattenmeeres und darauf, Maßnahmen zu entwickeln, welche diese Anpassung fördern. Ziel ist es, Bedingungen zu schaffen, welche vor allem den Salzmarschen helfen, sich beispielsweise durch erhöhte Aufwuchsraten an den beschleunigten Meeresspiegelanstieg anzupassen. Frühere Studien haben bereits festgestellt, dass aufgrund der Eindeichung und der daraus resultierenden geringen Überflutungshäufigkeit sehr geringe Aufwuchsraten vorliegen. Außerdem konnte bereits nachgewiesen werden, dass das Höhenwachstum im Inneren der Hallig, wahrscheinlich aufgrund des höheren Abstands zur Sedimentquelle, geringer ist als im Kantenbereich. Um die Erkenntnisse aus diesen früheren Studien weiter zu ergänzen, bestand die Hauptfragestellung der vorliegenden Studie nun deshalb darin, den Einfluss des Managements zu untersuchen. Aus diesem Grund wurde das Höhenwachstum auf ausgewählten Weide- und Brachflächen in der Sturmflutssaison 2015/2016 auf Langeneß bestimmt.

## 1.2 Forschungsstand

Gegenstand der Untersuchungen ist die Sedimentationsdynamik, also sowohl die Sedimentdeposition als auch das daraus resultierende vertikale Aufwachsen oder Höhenwachstum (Akkretion), und deren Einflussfaktoren auf der nordfriesischen Hallig Langeneß, die durchschnittlich nur 17 cm über dem mittleren Tidehochwasser liegt (Jensen 2014). Wir untersuchen diese Fragestellung im Hinblick auf die Bedrohung der Hallig in Zeiten des beschleunigten Meeresspiegelanstieges. Der Meeresspiegel in der Wattenmeer-Region steigt bereits seit der letzten Eiszeit an. In der Vergangenheit konnte tidegeprägte Gebiete wie die Salzmarschen, d.h. saline, tidebeeinflusste Küstenökosystem, im Wattenmeerraum mit diesem Meeresspiegelanstieg mithalten, da häufigere Überflutungen auch zu einer erhöhten Sedimentdeposition und Höhenwachstum führten (Kirwan et al. 2016). So wurde zum Beispiel in der Bucht von Esbjerg seit 1931 ein langfristiger Meeresspiegelanstieg von 2,3 mm pro Jahr festgestellt, während der Meeresspiegelanstieg im kurzfristigeren Zeitraum seit 1991 bereits auf 4.2 mm pro Jahr stieg (Bartholdy et al. 2004). Während dieser Zeiträume konnten die Salzmarschen in diesem Gebiet mit dem Meeresspiegelanstieg schritthalten (Bartholdy et al. 2004), denn es herrscht ein natürliches Gleichgewicht zwischen Überflutungshäufigkeit, der aus den Überflutungen resultierenden Sedimentdeposition und Höhenwachstum. Bei moderatem Meeresspiegelanstieg wird also davon ausgegangen, dass Salzmarschen, die häufig genug überflutet werden und bei denen die Sedimentzufuhr ausreicht, nicht vom beschleunigten Meeresspiegelanstieg bedroht sind (Kirwan et al. 2016). Jedoch kann dieses Gleichgewicht gestört werden, falls sich der Meeresspiegelanstieg stark beschleunigt (Bartholdy et al. 2004). Hinzu kommt, dass besonders in Europa viele Salzmarschen stark durch menschliche Eingriffe verändert worden sind, so dass z.B. Deiche eine Überflutung der Flächen verhindern und somit den Eintrag von Sedimenten erschweren (Temmerman et al. 2013). Dies ist auch auf vielen der Halligen wie Langeneß der Fall (Schindler et al. 2014a), wo das Höhenwachstum aufgrund der geringen Überflutungshäufigkeit zu niedrig ist, um mit dem Meeresspiegel Schritt zu halten. Hinzu kommt, dass auch andere anthropogene Einflüsse wie etwa die Nutzung der Flächen durch Beweidung sich negativ auf die Sedimentationsrate auswirken könnte (Elschot et al. 2013), und so zu einer Verschärfung des Problems führen könnten. Um eine sinnvolle Klimaanpassung der Halligen zu ermöglichen, ist es deshalb nötig genauer zu wissen, welche Faktoren die Sedimentdeposition und Höhenwachstum auf den Halligen beeinflussen.

Die Rate der Sedimentdeposition in Salzmarschen ist von verschiedenen internen und externen Faktoren abhängig (Nolte et al. 2013a). Zu den externen Faktoren, welche die

Sedimentationsdepositionsraten beeinflussen können, gehört die Verfügbarkeit von gelöstem Sediment im Wasser, der sogenannten Sedimentfracht (Butzeck et al. 2015), und die Häufigkeit von Sturmereignissen, die häufig zu einem hohen Eintrag von Sedimenten führen (Bartholdy et al. 2004; Schuerch et al. 2011). Innerhalb eines Gebiets wie z.B. einer Hallig, beeinflussen außerdem interne Faktoren die Sedimentdeposition. Zu den internen Faktoren gehört unter anderem die Geländehöhe, die sich direkt auf die Überflutungshäufigkeit und Dauer auswirkt. Das führt dazu, dass höher gelegene Flächen generell oft geringere Sedimentdepositionsraten aufweisen (Temmerman et al. 2003). Des Weiteren steuert auch der Abstand einer Fläche zur Sedimentquelle zur räumlich unterschiedlichen Verteilung der Sedimentdeposition bei. Aufgrund der physikalischen Sinkgeschwindigkeit der Sedimente im Wasser setzt sich mehr Sediment in der Nähe der Quelle, wie etwa dem Rand des Priels oder der Salzmarschkante ab (Temmerman et al. 2003). Im Fall der Halligen, bei denen das Prielsystem oft nicht mehr dauerhaft mit dem Wattenmeer verbunden ist, handelt es sich bei der Sedimentquelle meist entweder direkt um die Halligkante oder ein Sieltor (Schindler et al. 2014a). Diesen Effekt des Abstandes zur Sedimentquelle konnte für die Halligen Langeneß, Hooge und Nordstrandischmoor bereits nachgewiesen werden (Schindler et al. 2014a).

Ein weiterer Faktor, der die Sedimentdepositionsrate beeinflussen könnte, ist das Management (Beweidung oder Mahd). In unbeweideten und nicht gemähten Marschen ist die Vegetation hoch und dicht und wird z.B. von der besonders dicht wachsenden Strandquecke (*Elymus athericus*) dominiert (Kiehl et al. 1996). Solch hohe und dichte Vegetation verringert die Fließgeschwindigkeit des einströmenden Wassers bei Flut (Temmerman et al. 2005; Bouma et al. 2005). Eine verringerte Fließgeschwindigkeit wirkt sich positiv auf die Sedimentdeposition aus (Abb. 1). Im Gegensatz dazu wird das Wasser von der kurzgefressenen Vegetation in beweideten oder gemähten Marschen nur wenig abgebremst. So kann sich wahrscheinlich hier weniger Sediment absetzen. Allerdings könnte eine geringe Vegetationshöhe und -dichte auch dazu führen, dass zuerst mehr Sediment im einströmenden Wasser verbleibt und so weiter ins Innere der Hallig transportiert wird als in unbeweideten Marschen (Temmerman et al. 2012a). Da beweidete und unbeweidete Flächen auf den Halligen jedoch nicht regelmäßig angeordnet sind, lässt sich diese Vermutung nur schwer belegen. Trotzdem sollten in der hier vorgelegten Untersuchung nach Möglichkeit sowohl Flächen am Rand der Hallig als auch weiter im Innern gelegene Flächen untersucht werden. Da jedoch die räumliche Verteilung der Sedimentdeposition auf der Hallig mit Abstand zur Halligkante, sowie der Faktor Überflutungshäufigkeit bereits eingehend untersucht wurden

(Schindler et al. 2014a), liegt der Fokus der vorliegenden Studie auf dem potentiellen Einfluss des Managements.

Im Allgemeinen erwarten wir, dass wir in beweideten Marschen am Rand der Hallig weniger Sedimentdeposition finden als in unbeweideten Flächen am Rand der Hallig. Im Inneren der Hallig könnte dieser erwartete Beweidungseffekt dann weniger stark ausgeprägt sein, da generell weniger Sediment das Innere der Hallig erreicht.

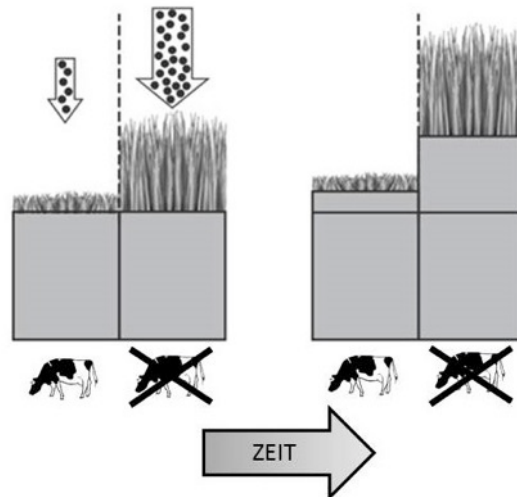


Abbildung 1: Hypothese indirekter Effekt von Beweidung auf die Sedimentdeposition und das daraus resultierende Höhenwachstum (Akkretion) durch die Vegetation.

Neben möglichen indirekten Effekten der Beweidung auf die Sedimentdeposition und das daraus resultierende Höhenwachstum durch die Modifikation der Vegetationsstruktur, könnte die Beweidung auch direkt das Aufwachsen beeinflussen. Das wiederholte Betreten der Flächen durch die Tiere führt zur Verdichtung des Bodens (Nolte et al. 2013b; van Klink et al. 2015), und dies könnte das Aufwachsen direkt reduzieren (Abb. 2). Eine Verdichtung des Bodens durch Vertritt erkennt man am besten an Hand der Bodenlagerungsdichte. Diese sollte in beweideten Flächen höher sein als in unbeweideten Flächen (Schrama et al. 2013; Elschot et al. 2013; Nolte et al. 2013b).

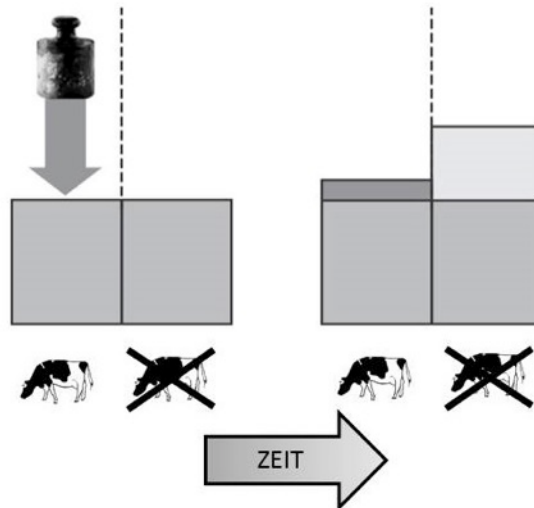


Abbildung 2: Hypothese direkter Effekt von Beweidung auf Höhenwachstum (Akkretion) durch Bodenverdichtung.

### 1.3 Fragestellungen

So ergeben sich die folgenden Fragestellungen und Hypothesen der aktuellen Untersuchung:

Frage 1: Wie beeinflusst Beweidung indirekt über die Vegetationsstruktur die Sedimentdeposition auf einer Hallig?

Hypothese (Abb.1): Die Beweidung verringert die Höhe und Dichte der Vegetation und damit auch die Sedimentdeposition.

Frage 2: Wie wirkt sich die Bodenverdichtung durch Beweidung auf das Aufwachsen (Akkretion) aus?

Hypothese: In beweideten Marschen ist das Aufwachsen geringer, da a) weniger Sediment abgelagert wird (Frage 1) und b) die Tiere durch die Verdichtung des Bodens direkt die das Aufwachsen verringern.

Frage 3: In welchen Bereichen (z.B. innere Marsch) kann unter welchen Bedingungen (Management) der Höhenzuwachs der Marsch nicht mit dem Meeresspiegelanstieg schritthalten?

Hypothese: Im inneren der Hallig erwarten wir aufgrund des weiteren Abstandes zur Sedimentquelle geringere Sedimentdepositions- und Aufwuchsraten.



Frage 4: Welche Schlussfolgerungen lassen sich daraus für ein naturverträgliches Management durch Beweidung ziehen, das ein Aufwachsen der Halligflächen begünstigt (oder zumindest nicht negativ beeinflusst)?

Wir können aus den Daten Schlussfolgern, ob sich Beweidung generell positiv oder negativ auswirkt, oder ob dies nur in bestimmten Bereichen der Marsch der Fall ist. Sollten wir feststellen, dass Beweidung vor allem bestimmte Gebiete der Marsch negativ beeinflusst, so könnte hier gezielt das Management angepasst werden.

## 2. Methoden/Arbeitsprogramm:

Um diese Fragen zu beantworten, wurden Untersuchungen in unbeweideten und beweideten Flächen auf der Hallig Langeneß durchgeführt. Die Sedimentdeposition findet hier vor allem bei kurzen Landunter Ereignissen statt und aus diesem Grund eignen sich vor allem Sedimentfallen zur Messung der Sedimentdeposition (Nolte et al. 2013a). Das Höhenwachstum ist dagegen ein eher langfristiger Prozess und wird am besten über mehrere Jahre hinweg mit Markerhorizonten oder anderen Methoden erfasst (Nolte et al. 2013a). Aufgrund des kurzen Untersuchungszeitraumes dieser Studie wird das Höhenwachstum daher indirekt aus der Sedimentdeposition und der Bodenlagerungsdichte errechnet (Butzeck et al. 2015). Historische Aufwuchsraten wurden zusätzlich durch Datierung von Bohrkernen bestimmt (Nolte et al. 2013b). Weiterhin werden auch noch andere Faktoren aufgenommen, die die Sedimentdeposition beeinflussen können, dazu gehören die Sedimentfracht, die Geländehöhe, die Überflutungsdauer und die Vegetationshöhe.

### 2.1 Studiengebiet

Die Felduntersuchungen wurden im Laufe einer Sturmflutsaison vom 01.10.2015 bis zum 15.03.2016 auf der Hallig Langeneß durchgeführt. Langeneß ist mit 9,2 km<sup>2</sup> die größte Hallig und liegt wie alle anderen Halligen im schleswig-holsteinischen Wattenmeer. Die vom Festland isolierten Marschinseln sind Relikte eines ehemals zusammenhängenden Festlandmarschlandes, welches durch zwei große Sturmflutereignisse 1362 und 1634 (erste und zweite „Grote Mandränke“) zerschnitten wurde. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde Langeneß mit einem etwa 1 m hohen Sommerdeich umfasst, um regelmäßige Überflutungen und vor allem kleinere „Landunter“ im Sommer zu verhindern (Abb. 3). Als Wellenbrecher und Befestigung ist dem Sommerdeich eine steinernes Deckwerk („Halligigel“) vorgelagert. Weiterhin wurden die Priele mit Flutoren ausgestattet, welche sich bei steigendem Pegel schließen und somit auch dazu beitragen, dass die Hallig erst bei hohen Wasserständen überflutet wird (Abb. 4). „Landunter“ treten auf Langeneß bei Wasserständen von ca. 1 m über NHN (Normalhöhennull) auf, welche überwiegend bei starken Sturmfluten zwischen Oktober und März erreicht werden (Schindler et al. 2014). Der Großteil der Flächen auf Langeneß wird beweidet oder gemäht, wobei das Weidevieh sich nur in der Sommersaison auf den Flächen befindet und vor der Sturmflutsaison zurück zum Festland transportiert wird. Folglich gibt es nur wenige Brachflächen auf Langeneß. Die Brachen sind aufgrund der unregelmäßigen Überflutungen dominiert von der Strandquecke (*Elymus athericus*) und bilden auch in Kantenlage eine mit dem Festland vergleichbare obere Marschzone.



Abbildung 3: Sommerdeich auf Langeneß mit vorgelagertem Deckwerk



Abbildung 4: Flutter auf Langeneß nahe Untersuchungsfläche 1

## 2.2 Untersuchungsflächen und Studiendesign

Insgesamt wurden vier Flächenpaare, bei denen jeweils eine unbeweidete Fläche an eine beweidete Fläche grenzte, ausgewählt. Folglich entstanden insgesamt acht Teilflächen, auf denen die Untersuchungen durchgeführt wurden. Abbildung 5 zeigt die Lage der Untersuchungsgebiete auf der Hallig. Zwei Flächenpaare (1 und 2) wurden im Westteil der Hallig gewählt, zwei weitere Flächenpaare im Ostteil (3 und 4).



Abbildung 5: Lage der Untersuchungsgebiete auf der Hallig Langeneß

Für jedes Flächenpaar wurden mit einem Geoinformationssystem je zwei etwa gleich große, definierte Flächen gezeichnet, um mit einem Tool in jeder der acht Teilflächen acht Zufallspunkte für die späteren Standorte der Sedimentfallen zu generieren. Somit wurden insgesamt 64 Standorte verwendet an denen je eine Sedimentfalle platziert wurde. Auf Abbildung 6 sind die Detailansichten der vier Flächenpaare und die genauen Standorte der Sedimentfallen dargestellt. In Tabelle 1 sind die Flächengrößen der Untersuchungsflächen aufgeführt.



Sedimentationsereignissen verschloss der Deckel die Sedimentfallen und das darin aufgefangene Sediment. Nach jedem Landunter Ereignis wurden die Sedimentfallen geleert, indem das darin enthaltene Sediment mit Süßwasser ausgespült und in Plastiktüten überführt wurde. Nach der Fallenleerung wurden die gesäuberten Sedimentfallen wieder am gleichen Standort platziert. Im Labor wurde das Sediment zunächst gesiebt, um größere organische Partikel wie Pflanzenreste oder Reste von Amphipoden zu entfernen (Maschenweite des Siebs: 500 µm). Anschließend wurden die Proben bei 90 °C bis zur Gewichtskonstanten getrocknet.



Abbildung 7: Sedimentfalle mit aufgefangenem Sediment in einer Brachfläche

Die Trockengewichte der Sedimentproben stellten folglich die Sedimentdeposition auf einer Fläche von 280.55 cm<sup>2</sup> dar (Fläche eines Sedimentfallentellers). Anschließend wurden die so erhobenen Gewichtsdaten pro Sedimentfalle auf eine Fläche von einem Quadratmeter umgerechnet, um die Masse des angelandeten Sediments pro Quadratmeter pro Landunter Ereignis zu erhalten (g m<sup>-2</sup>). Um die Zielgröße (vertikale Akkretion / Höhenwachstum) zu berechnen, wurden neben jeder Sedimentfalle auf einer ungestörten Fläche Bodenproben mit einem Stechring (100 cm<sup>3</sup>) genommen. Die in diesem Stechring entnommene Bodenprobe wurde getrocknet und anschließend das Trockengewicht bestimmt. Aus dem Trockengewicht pro Volumen ergibt sich die sogenannte Bodenlagerungsdichte (g cm<sup>-3</sup>). Man kann nun die Bodenlagerungsdichte nutzen, um zu berechnen wie viel Volumen das während der Überflutung abgelagerte Sediment ausfüllen würde. Das bedeutet, dividiert man die ermittelte Sedimentdeposition an einem Standort durch die spezifische Bodenlagerungsdichte erhält man die Akkretion / das Höhenwachstum (Butzeck et al. 2015). Das Höhenwachstum wurde sowohl nach jedem Landunter Ereignis als auch für den gesamten Untersuchungszeitraum (5 Landunter Ereignisse, siehe Ergebnisteil) berechnet. Die folgende Gleichung zeigt die Akkretionsberechnung (Berechnung des Höhenwachstum):

$$AR \text{ (mm Zeiteinheit}^{-1}\text{)} = SD \text{ (g cm}^{-2} \text{ Jahr}^{-1}\text{)} / BLD \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$$

(AR = Akkretionsrate, SD = Sedimentdeposition, BLD = Bodenlagerungsdichte)

Zusätzlich wurde neben jeder Sedimentfalle eine Sedimentfracht Flasche im Abstand von ca. 75 cm platziert (Abb. 8) (Nolte et al. 2013a). Mit den Flaschen wurden Wasserproben des initialen Flutwassers inklusive der gelösten Sedimentfracht für jedes Landunter Ereignis genommen. Die Proben wurden ca. 3 cm über der Marschkante genommen, in dem das Wasser einen kurzen Einlassschlauch mit einer Einflussrate von ca. 0,5 l min<sup>-1</sup> passierte, während die Luft aus den Flaschen über einen längeren Auslassschlauch abgeführt wurde. Das Gesamtvolumen der Flaschen beträgt 580 ml. Nach jedem Landunter Ereignis wurden die Flaschen gesammelt, verschlossen und durch leere Flaschen für das nächste Landunter Ereignis ersetzt.



Abbildung 8: Sedimentfracht Flasche in einer Weidefläche

Im Labor wurde aus jeder Flasche eine Teilprobe von 200 ml genommen, welche durch zuvor gewogene Cellulosefilter der Maschenweite 0,45 µm hindurch vakuumfiltriert wurde (Abb. 9). Der Sedimentüberstand wurde mit den Filtern bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanten getrocknet (Abb. 10) und anschließend gewogen, um die Masse an gelöstem Sediment pro 200 ml Flutwasser zu ermitteln. Für die Zielgröße Sedimentfracht in Milligramm pro Liter (mg l<sup>-1</sup>) wurden die Werte mit dem Faktor 5 multipliziert. Somit kann ermittelt werden, ob die Sedimentfracht sich zwischen den einzelnen Landunter-Ereignissen und abhängig vom Management (beweidet, unbeweidet) und der Lage (West, Ost / Kante, innerer Teil) unterscheidet. Die Sedimentfracht ist eine mögliche Erklärungsvariable für die endgültige

Nolte et al. 2018: Untersuchung der Sedimentdeposition auf der Hallig Langeneß

Sedimentdeposition. Sie korreliert z.B. in Festlandmarschen oft positiv mit der Sedimentdeposition und kann diese miterklären (Butzeck et al. 2015).



Abbildung 9: Vakuumfiltration der Sedimentfracht Teilproben im Labor



Abbildung 10: Sedimentüberstand einer 200 ml Teilprobe nach erfolgter Vakuumfiltration

#### 2.4 Höhenmessungen

Um bei einem Landunter Ereignis die korrekten Überflutungshöhen und die Überflutungsdauer über jeder Sedimentfalle ermitteln zu können (siehe Abschnitt 3.4), wurden die Höhenlagen der Sedimentfallenstandorte relativ zum jeweiligen Pegelrohr benötigt. Hierzu wurden mit einem dGPS (differentielles GPS, SUNNAV S100+, accuracy  $\pm$



2 cm) am 16.03.2016 Messungen an jedem Pegelrohr und jedem Sedimentfallenstandort durchgeführt. Die so erhaltenen relativen Höhendaten wurden, wie im Abschnitt 3.4 beschrieben, zur Berechnung der spezifischen Pegel verwendet.

## 2.5 Pegelrohre

In jedem der vier Flächenpaare wurde in der jeweiligen Brachfläche ein Pegelrohr mit einer Pegelsonde (Schlumberger Water Services; Delft, Netherlands: CTD- Diver and Cera Diver - resolution: 0,2 cm H<sub>2</sub>O; maximal accuracy, 2,5 cm H<sub>2</sub>O) installiert, um regelmäßig die spezifischen Wasserstände in den unterschiedlichen Flächen zu erfassen. In Kombination mit einer Barosonde (Schlumberger Water Service: Baro-Diver - resolution, 0,1 cm H<sub>2</sub>O; maximal accuracy, 2,5 cm H<sub>2</sub>O), welche in einem Baum auf der Peterswarf aufgehängt wurde, konnten so über den gesamten Untersuchungszeitraum eigene Pegel für die Flächen erstellt werden mit denen für jeden Standort einer Sedimentfalle die Überflutungshöhe und die Überflutungsdauer bei einer Flut ermittelt werden konnte. Die Messungen basieren auf Druckmessungen, welche bei nicht überfluteten Pegelrohren den Luftdruck erfassen und bei Flut eine Druckzunahme durch den Wasserkörper messen. Hierdurch kann durch Korrekturmessungen der Barosonde die Überflutungsfrequenz, die Überflutungsdauer und der Wasserstand über der Pegelsonde, dem Pegelrohr und der Marschoberfläche berechnet werden. Die Messungen erfolgten mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten.

## 2.6 Vegetationsparameter

Am 23./24.11.2015 und am 16.01.2016 wurde mit einer sogenannten Drop Disc (Nolte et al. 2014) die Vegetationshöhe neben jeder Sedimentfalle ermittelt. Hierzu wurde neben jeder Falle drei Messungen durchgeführt. Durch die Drop Disc ist ein Loch gebohrt, um diese an einem Messstab von oben auf die Vegetationsoberfläche fallen zu lassen (Abb. 11). Die Drop Disc landet auf der Vegetationsoberkante und die Vegetationshöhe kann am Messstab abgelesen werden. Mit dieser Methode kann man die mittlere Vegetationshöhe zuverlässig erfassen, da mit einer Zollstockmessung o.ä. eher Extreme wie sehr lange Halme gemessen werden. Mit den Messungen der Vegetationshöhe kann dargestellt werden, wie stark sich die beweideten und die unbeweideten Flächen voneinander unterscheiden, ob sich die gleichen Flächentypen zwischen den vier Untersuchungsstandorten unterscheiden und ob die Vegetationshöhe eine Erklärungsvariable für die Sedimentablagerung ist.



Abbildung 11: Messung der Vegetationshöhe mit Hilfe einer Drop Disc.

## 2.7 Bohrkerne

Insgesamt wurden im Dezember 2015 vier Bohrkerne entnommen, davon zwei in beweideten und zwei in unbeweideten Teilflächen (Flächenpaare 3 und 4, Abb. 12).



Abbildung 12: Entnahmestellen der vier Bohrkerne in den Untersuchungsflächen 3 und 4.

Die Bohrkerne wurden mit Hilfe von PVC Rohren entnommen und hatten eine Länge von ca. 1 m. Im Labor wurden die Bohrkerne in 1 cm dünne Scheiben geschnitten, bis zur Gewichtskonstanten getrocknet und gemörsert. Um ein benötigtes Äquilibrium zwischen

Bismut<sup>214</sup> und Radium<sup>226</sup> zu erreichen, wurden die Proben in Plastikgefäße überführt, versiegelt und für 3 Wochen gelagert. Anschließend wurden alle Proben in das Labor für Radioisotope (LARI) der Universität Göttingen geschickt. Die hier durchgeführten Gammastrahlenmessungen benötigten ca. 3 Tage pro Probe und sollten für jeden Bohrkern zwei Peaks in der Caesium<sup>137</sup>-Aktivität für die Bodentiefen entsprechend den Jahren 1963 und 1986 ermitteln (Schuerch et al. 2011; Nolte et al. 2013a; Nolte et al. 2013b). Der zu erwartende Peak für das Jahr 1963 ist auf eine Reihe von Atomwaffentests in der Atmosphäre in diesem Jahr zurückzuführen, während der zu erwartende Peak für das Jahr 1986 mit dem Unglück in Tschernobyl und dem daraus resultierenden Fallout erklärt werden kann. Wenn ein erster Peak beispielsweise in der achten Bohrkernscheibe von oben (8 cm Tiefe) gefunden wird, kann man schlussfolgern, dass die Marsch an der Entnahmestelle des Bohrkerns seit 1986 um 8 cm in die Höhe gewachsen ist. Hieraus kann dann das mittlere jährliche Höhenwachstum für den dreißigjährigen Zeitraum von 1986 bis 2016 berechnet werden, jedoch keine Aussage darüber getroffen werden wie stark die Marsch in den jeweiligen Einzeljahren in die Höhe gewachsen ist. In dem oben gegebenen Beispiel würde das mittlere jährliche Höhenwachstum ca. 2,7 mm betragen haben. Die Theorie ist auch für den tieferen Peak von 1963 anwendbar und untermauert mögliche Ergebnisse. Verlässliche Ergebnisse für diese Methode sind jedoch nur dann zu erwarten, wenn die Fläche an den Entnahmestellen in den letzten 30 bzw. 54 Jahren ungestört war.

### **3. Ergebnisse**

#### 3.1 Übersicht über die Überflutungszeiträume

Die folgende Tabelle zeigt die Überflutungszeiträume auf allen Untersuchungsflächen, welche durch die Pegelsonden ermittelt wurden. Als Überflutung wurden Ereignisse gewertet, bei denen der Pegel neben dem Pegelrohr mindestens 5 cm über der Marschoberfläche betrug. Insgesamt wurden in dem Untersuchungszeitraum nach fünf vollständigen Landunter Ereignissen beprobt. Bei 64 Sedimentfallen ergaben sich somit 320 Teilproben aus den Sedimentfallen und 320 Teilproben aus den Sedimentfracht Flaschen, wobei die Ausfallquote (Verlust oder Beschädigung) bei den Sedimentfallen insgesamt bei 3,44% lag und bei den Sedimentfracht Flaschen bei 2,19%. In Tabelle 1 sind die genauen Überflutungszeiträume für jede Fläche aufgeführt. Wie dargestellt, erstreckten sich einige Landunter Ereignisse auf einigen Flächen über mehrere Tage (z.B. Landunter Ereignis drei über Flächenpaar zwei). Durch generell hohe Wasserstände und die periodisch auftretende Ebbe und Flut, fielen einige Flächen für kurze Zeit trocken und wurden beispielsweise am Folgetag erneut überflutet. Somit erstrecken sich nach dieser Definition einige beprobte Landunter Ereignisse über mehrere Tage. Bei der Auswertung werden jedoch alle beprobten Landunter Ereignisse als ein Einzelereignis gewertet und verglichen. Eine Probennahme in kurzen Intervallen nach kurzem Trockenfallen einer Fläche während eines längeren Flutereignisses war nicht möglich. Folglich konnte die Beprobung immer erst nach komplettem Trockenfallen der Flächen und dauerhaft gesunkenem Pegel erfolgen.

Tabelle 1: Die spezifischen Überflutungszeiträume der vier Pegel während der fünf berücksichtigten Landunter Ereignisse

LU/Fläche	Flächenpaar 1	Flächenpaar 2	Flächenpaar 3	Flächenpaar 4
LU 1	14.11.15 <b>01:30</b> – 15.11.15 <b>08:00</b>	14.11.15 <b>02:05</b> – 15.11.15 <b>06:50</b>	14.11.15 <b>01:30</b> – 14.11.15 <b>11:10</b>	14.11.15 <b>01:40</b> – 15.11.15 <b>07:15</b>
LU 2	18.11.15 <b>04:35</b> – 20.11.15 <b>01:15</b>	18.11.15 <b>05:15</b> – 20.11.15 <b>01:35</b>	18.11.15 <b>04:30</b> – 18.11.15 <b>12:20</b> + 19.11.15 <b>06:10</b> – 19.11.15 <b>13:45</b>	18.11.15 <b>04:30</b> – 20.11.15 <b>11:00</b>
LU 3	28.11.15 <b>04:25</b> – 01.12.15 <b>09:05</b>	29.11.15 <b>05:05</b> – 29.11.15 <b>10:40</b> + 29.11.15 <b>17:45</b> – 30.11.15 <b>00:40</b> + 30.11.15 <b>03:05</b> – 01.12.15 <b>03:10</b>	30.11.15 <b>02:00</b> – 30.11.15 <b>12:05</b>	29.11.15 <b>04:10</b> – 01.12.15 <b>09:55</b>
LU 4	05.12.15 <b>09:35</b> – 07.12.15 <b>01:10</b> + 11.12.15 <b>01:50</b> – 12.12.15 <b>07:00</b>	05.12.15 <b>22:30</b> – 06.12.15 <b>19:55</b>	05.12.15 <b>21:35</b> – 05.12.15 <b>23:10</b>	05.12.15 <b>21:15</b> – 06.12.15 <b>23:45</b> + 11.12.15 <b>02:20</b> – 12.12 <b>10:20</b>
LU 5	30.01.16 <b>05:35</b> – 03.02.16 <b>16:00</b>	30.01.16 <b>06:30</b> – 31.01.16 <b>22:55</b> + 02.02.16 <b>08:10</b> – 03.02.16 <b>15:45</b>	30.01.16 <b>05:35</b> – 30.01.16 <b>10:05</b> + 31.01.16 <b>05:05</b> – 31.01.16 <b>12:10</b> + 02.02.16 <b>07:15-14:00</b> + 02.02.16 <b>18:50</b> – 03.02.16 <b>03:50</b>	30.01.16 <b>05:35</b> – 03.02.16 <b>23:35</b>

### 3.2 Sedimentdeposition

Die mittlere Sedimentdeposition aller fünf Landunter Ereignisse zeigt deutliche Unterschiede zwischen beweideten und unbeweideten Flächen (Abb. 13). In allen vier Flächen wurde eine höhere Sedimentdeposition in unbeweideten Flächen gemessen. Dieser Unterschied ist deutlich ausgeprägter in den kantennahen Flächen. Vergleicht man die unbeweideten Flächen, ist die Sedimentdeposition in Kantennähe deutlich höher. Außerdem ist die Sedimentdeposition im Osten der Hallig etwas höher. Diese Muster sind ebenfalls zu erkennen, wenn man einzelne Landunter Ereignisse betrachtet (Anhang, Abb. A.1 – A.5). Hier wird außerdem deutlich, dass sich die Raten zwischen einzelnen Ereignissen unterscheiden.

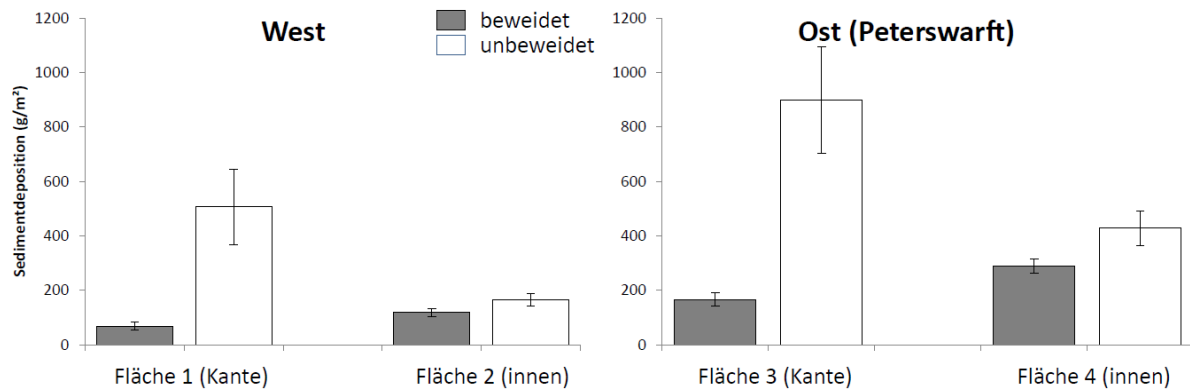


Abbildung 13: Mittlere Sedimentdeposition aller Ereignisse.

### 3.3 Sedimentfracht

Die im Flutwasser gelöste Sedimentfracht unterscheidet sich ebenfalls deutlich zwischen den Managementformen (Abb. 14). Wir haben in allen Flächen eine höhere Sedimentfracht in beweideten Flächen feststellen können. Die Sedimentfracht nimmt besonders im Osten mit einem höheren Abstand zur Kante ab. Im Osten finden sich außerdem generell höhere Sedimentfracht-Werte. Betrachten man die einzelnen Ereignisse fallen große Schwankungen zwischen den Landunter Ereignissen auf (Anhang, Abbildungen A.6 – A.10)

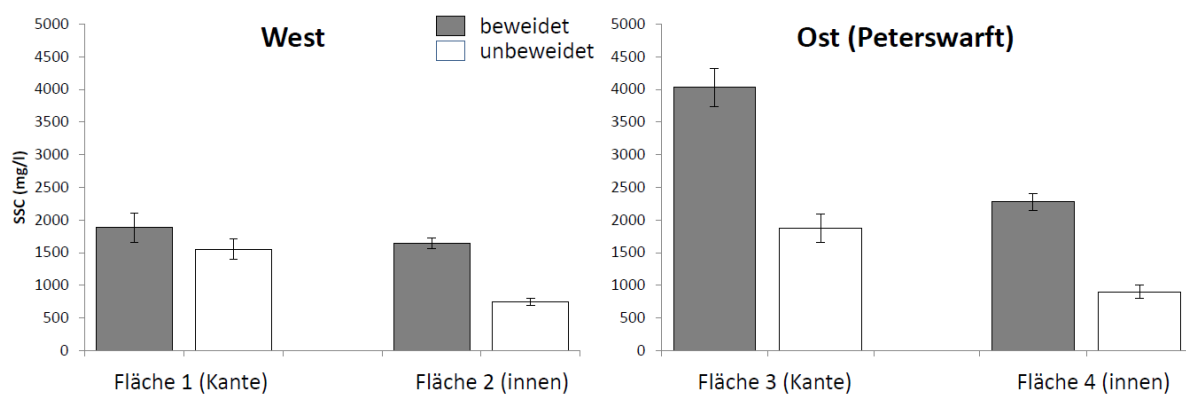


Abbildung 14: Mittlere im Wasser gelöste Sedimentfracht (Suspended sediment concentration = SSC) aller Ereignisse.

### 3.4 Bodenlagerungsdichte

Die Bodenlagerungsdichte der oberen 5cm des Bodens zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Managementformen (Abb. 15). Im Bereich der Kante ist der Boden allerdings geringfügig dichter.

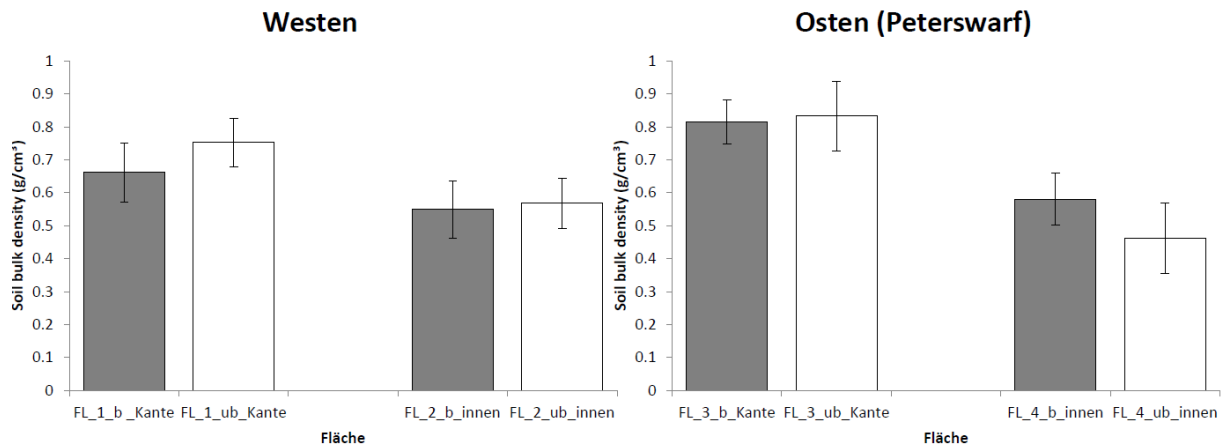


Abbildung 15: Mittlere Bodenlagerungsdichte.

### 3.5 Akkretion / Höhenwachstum

Das aus der gesamten Sedimentdeposition des Untersuchungszeitraums und der Bodenlagerungsdichte errechnete Höhenwachstum zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Managementformen (Abb. 16). In drei Flächen konnte ein deutlich höheres Aufwachsen in unbeweideten Flächen ermittelt werden, während dieses Muster in Fläche 2 zwar weniger deutlich aber signifikant unterschiedlich ist. Ein höheres Aufwachsen in Kantenflächen findet man besonders bei Aufgabe der Beweidung, während das Höhenwachstum in beweideten Flächen im Innern höher ist.

Insgesamt wurden für den hier betrachteten Zeitraum nach fünf Land- unter-Ereignissen mittlere Aufwuchsraten für die verschiedenen Flächen zwischen 0,1 mm/Jahr und 1,1 mm/Jahr bestimmt.

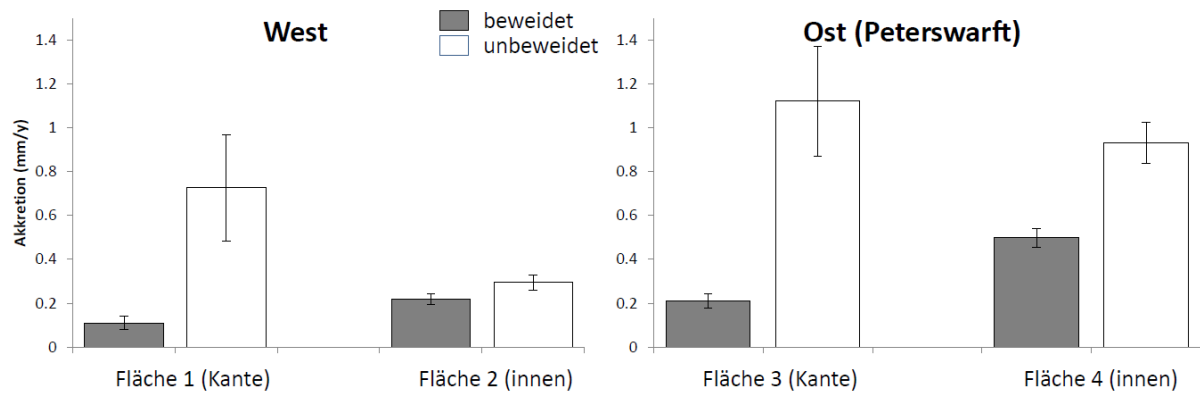


Abbildung 16: Berechnete Akkretion / Höhenwachstum für den Winter 2015/16.

### 3.6 Einfluss der Überflutungshöhe auf die Sedimentdeposition

Es konnte kein eindeutiger Hinweis für einen Einfluss der Überflutungshöhe auf die Sedimentdeposition festgestellt werden (Abb. 17). Der Trend, dass die Sedimentdeposition mit größeren Überflutungshöhen zunimmt, konnte aufgrund der großen Streuung nicht bestätigt werden. Auch eine getrennte Darstellung von beweideten und unbeweideten Aufnahmen führte zu keinem signifikanten Ergebnis.



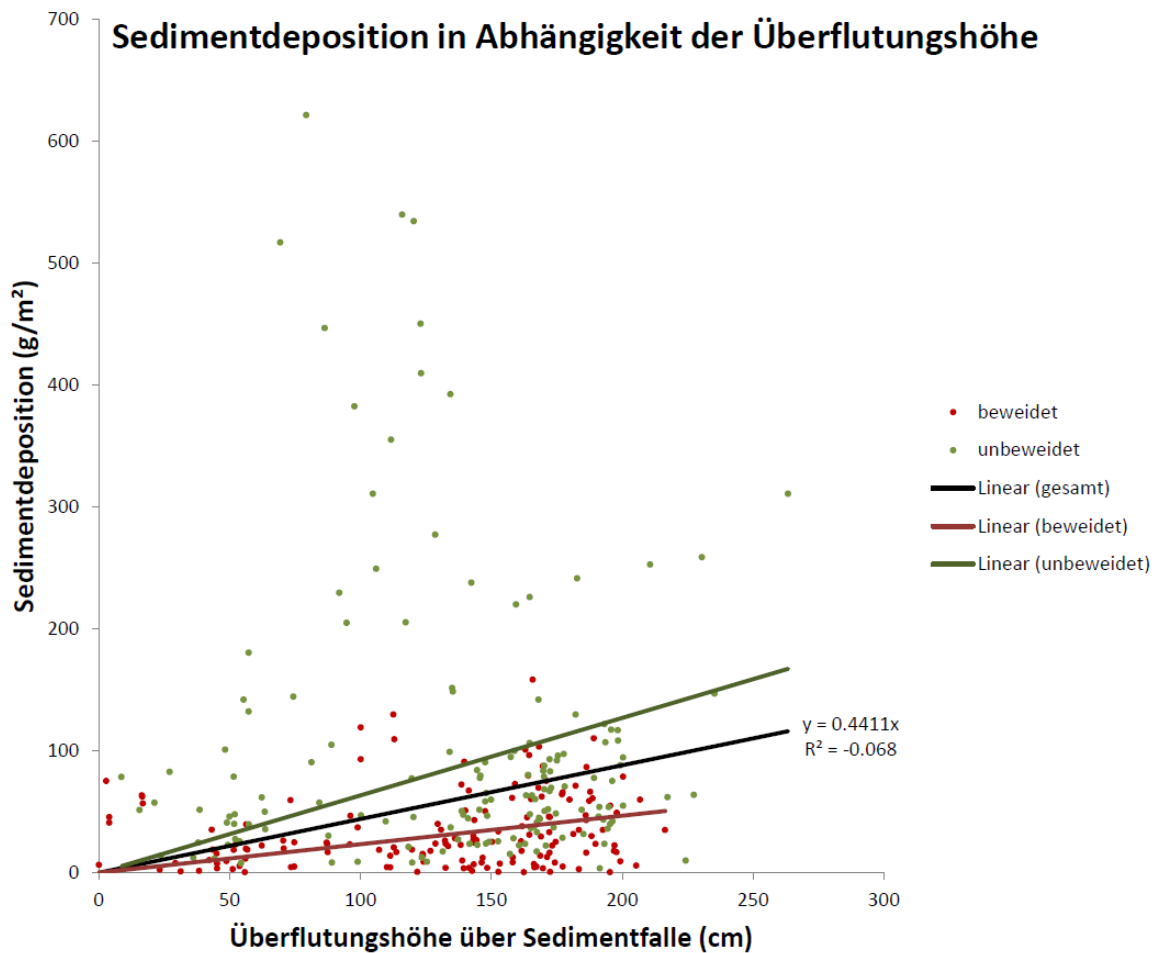


Abbildung 17: Einfluss der Überflutungshöhe auf die Sedimentdeposition.

### 3.7 Einfluss der Vegetationshöhe auf die Sedimentdeposition

Die Sedimentdeposition nimmt deutlich mit zunehmender Vegetationshöhe zu (Abb. 18). Es lässt sich auch erkennen, dass die Vegetationshöhe in unbeweideten Flächen deutlich höher ist. Hier finden sich viele sehr hohe Sedimentdepositionsraten über  $200\text{g/m}^2$ . Betrachtet man beweidete und unbeweidete Flächen getrennt, fällt auf, dass innerhalb der unbeweideten Flächen ein klarer Anstieg der Sedimentdeposition mit der Vegetationshöhe zu erkennen ist, während sich innerhalb der beweideten Flächen keinerlei Einfluss der Vegetationshöhe erkennen lässt.

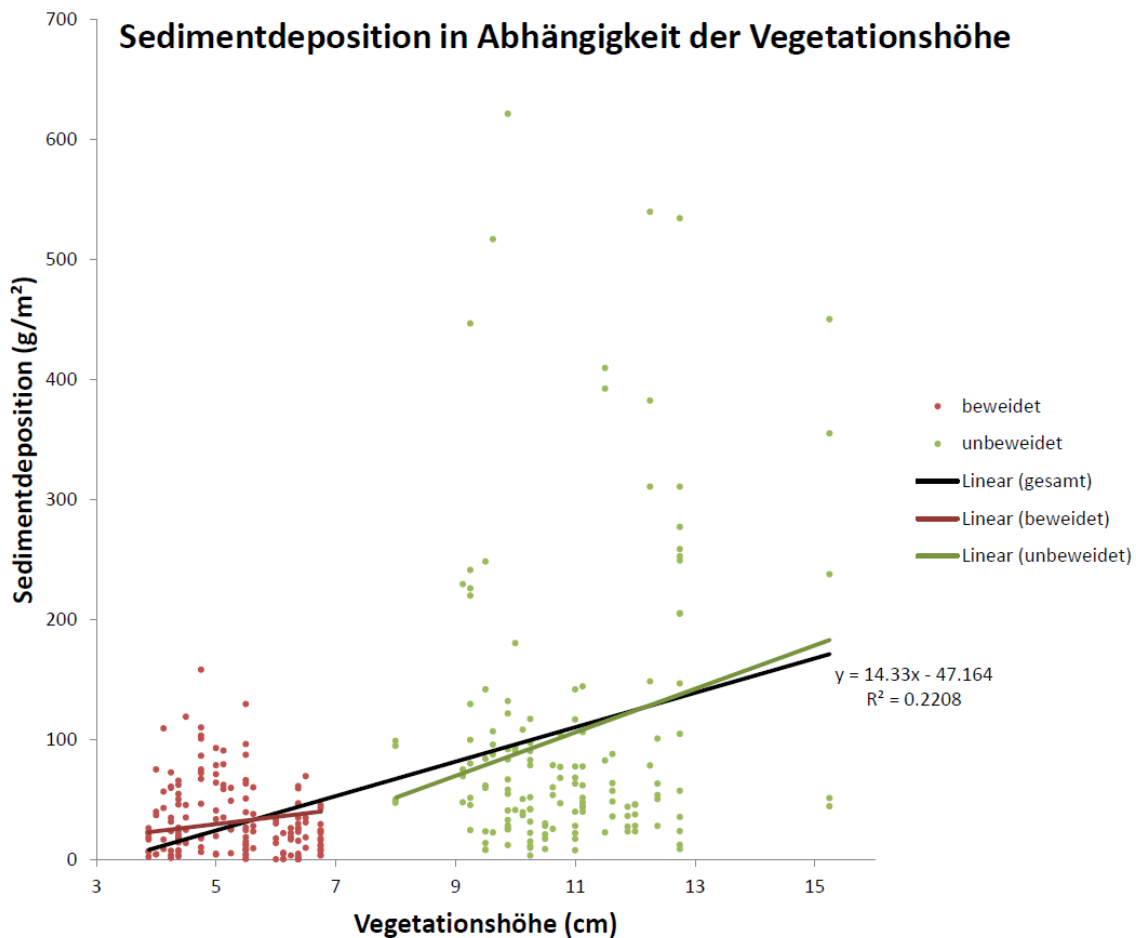


Abbildung 18: Einfluss der Vegetationshöhe auf die Sedimentdeposition.

### 3.8 Bohrkerne (<sup>137</sup>Cs)

In Tabelle 2 werden die Ergebnisse für die Messung der Aktivität von <sup>137</sup>Cs in verschiedenen Tiefen der Bohrkerne dargestellt. Blaue Balken innerhalb der Tabelle repräsentieren erhöhte Werte innerhalb des Bohrkerns. Für Fläche 3 (unbeweidet) konnte eine erhöhte <sup>137</sup>Cs-Aktivität in einer Tiefe von 13 cm festgestellt werden, während in der unbeweideten Fläche kein Peak gefunden wurde. In Fläche 4 wurden in beiden Kernen zwei Peaks gefunden. Bis auf die Peaks in Fläche 4 (unbeweidet) kann keiner der gefundenen Peaks eindeutig einem Jahr zugeordnet werden. In Fläche 3 (beweidet) könnte es sich bei dem Peak in 13 cm Tiefe um den Peak aus dem Jahr 1986 handeln, doch die <sup>137</sup>Cs Aktivität ist gering und das Fehlen eines zweiten Peaks macht die Bestimmung unsicher. In Fläche 4 (beweidet) sind zwei Peaks zu erkennen, die allerdings ähnliche <sup>137</sup>Cs Aktivitäten aufweisen. Aufgrund des radioaktiven Zerfalls von <sup>137</sup>Cs sollte jedoch der Peak aus dem Jahr 1963 eine deutlich geringere Aktivität aufweisen. Dies macht eine Bestimmung des Höhenwachstums zweifelhaft. Es ist möglich,

dass Umlagerungsprozesse so wie etwa Erosion an der Kante oder Erdarbeiten beim Aushub von Gräben zu einem gestörten Profil geführt haben.

Tabelle 2: Aktivität von <sup>137</sup>Cs in verschiedenen Tiefen der Bohrkern.

Proben	Cs-137 [Bq/kg]	FL 3_ub	Cs-137 [Bq/kg]	FL 4_b	Cs-137 [Bq/kg]	FL 4_ub	Cs-137 [Bq/kg]
FL_3_b_0-1 cm	1,423	FL_3_ub_0-1 cm	2,2	FL_4_b_0-1 cm	4,809	FL_4_ub_0-1 cm	8,19
FL_3_b_1-2 cm		FL_3_ub_1-2 cm		FL_4_b_1-2 cm		FL_4_ub_1-2 cm	
FL_3_b_2		FL_3_ub_2	2,405	FL_4_b_2		FL_4_ub_2	
FL_3_b_3	1,908	FL_3_ub_3		FL_4_b_3	7,792	FL_4_ub_3	115,8
FL_3_b_4		FL_3_ub_4	3,907	FL_4_b_4	10,44	FL_4_ub_4	51,24
FL_3_b_5	3,244	FL_3_ub_5	2,757	FL_4_b_5	13,13	FL_4_ub_5	24,03
FL_3_b_6	2,025	FL_3_ub_6	3,236	FL_4_b_6	104,1	FL_4_ub_6	27,32
FL_3_b_7	2,476	FL_3_ub_7	4,267	FL_4_b_7	58,97	FL_4_ub_7	55,3
FL_3_b_8	2,923	FL_3_ub_8	3,942	FL_4_b_8	20,98	FL_4_ub_8	54,56
FL_3_b_9		FL_3_ub_9		FL_4_b_9	40,63	FL_4_ub_9	9,995
FL_3_b_10	3,283	FL_3_ub_10	4,647	FL_4_b_10	100,9	FL_4_ub_10	2,669
FL_3_b_11		FL_3_ub_11	3,256	FL_4_b_11	30,13	FL_4_ub_11	
FL_3_b_12	7,353	FL_3_ub_12		FL_4_b_12		FL_4_ub_12	1,011
FL_3_b_13	48,47	FL_3_ub_13		FL_4_b_13	1,969	FL_4_ub_13	
FL_3_b_14	27,42	FL_3_ub_14	4,918	FL_4_b_14		FL_4_ub_14	0,8391
FL_3_b_15	11,22	FL_3_ub_15	6,167	FL_4_b_15	0,699	FL_4_ub_15	
FL_3_b_16	6,771	FL_3_ub_16	3,466	FL_4_b_16		FL_4_ub_16	0,2698
FL_3_b_17		FL_3_ub_17		FL_4_b_17		FL_4_ub_17	

## 4. Diskussion

### 4.1 Sedimentdeposition und Sedimentfracht

Die Ergebnisse dieser Studie bestätigen, dass Beweidung zu einer Reduktion der Vegetationshöhe führt und damit auch wie erwartet die Sedimentdeposition bei Landunter Ereignissen reduziert. Wahrscheinlich spielt hierbei vor allem die Reduktion der Fließgeschwindigkeit des Wassers in hoher Vegetation eine Rolle (Führböter 1992). Ein positiver Einfluss der Vegetation auf die Sedimentdeposition wurde bereits in früheren Studien nachgewiesen, indem die Vegetation gemäht (Temmerman et al. 2012b) oder durch Düngung gefördert wurde (Morris et al. 2002). Aus diesem Grund findet man diesen Effekt auch in vielen Sedimentdynamikmodellen (Fagherazzi et al. 2012). Ein positiver Einfluss der hohen Vegetation in unbeweideten im Vergleich zu beweideten Salzmarschen auf die Sedimentdeposition konnte jedoch bisher nicht nachgewiesen werden (Elschot et al. 2013; Nolte et al. 2013b). Diese Studien haben die Sedimentdeposition jedoch nur indirekt als Masse des anorganischen Anteils über einem Marker-Horizont im Boden bestimmt. Schindler et al. (2014b) haben im Gegensatz dazu die Sedimentdeposition in beweideten und unbeweideten Flächen ermittelt. Allerdings lag der Fokus der Studie auf einem Vergleich von zwei Sedimentfallentypen, so dass der Beweidungseffekt nicht systematisch analysiert wurde.

Interessanterweise ist, anders als die Sedimentdeposition, die Sedimentfracht in beweideten Flächen höher. Möglicherweise, weil in der beweideten Fläche das Sediment nicht ausgekämmt wird und so länger im Wasser verbleibt und die inneren Bereiche der Flächen erreicht. Damit ist im Gegensatz zu anderen Studien (Temmerman et al. 2003; Butzeck et al. 2015) die Sedimentfracht kein direkter Faktor der die Sedimentdeposition bestimmt. Diese früheren Studien fanden die Sedimentfracht jedoch besonders als bestimmenden Faktor für die temporären Schwankungen z.B. zwischen den Jahreszeiten (Temmerman et al. 2003; Butzeck et al. 2015). Im Unterschied dazu wurde in der vorliegenden Studie nur der Herbst/Winter als Zeit mit den allgemein höchsten Sedimentfrachten untersucht. Generell lässt sich jedoch ein Trend erkennen, dass Landunter Ereignisse mit einem hohen Sedimentfracht (Abb. A.10) auch zu einer hohen Sedimentdeposition führen (Abb. A.5). Aus der hier beobachteten geringeren Sedimentfracht in unbeweideten Flächen bei gleichzeitig höherer Sedimentdeposition schließen wir deshalb auf einen Auskämmeffekt.

#### 4.2 Akkretion / Höhenwachstum

Die Untersuchungen zeigten keine Unterschiede zwischen den Managementformen im Hinblick auf die Bodenlagerungsdichte. In früheren Studien wurde jedoch eine deutliche höhere Bodenlagerungsdichte in beweideten Salzmarschen festgestellt, da der Boden hier durch Tritt verdichtet wurde (Schrama et al. 2013; Elschot et al. 2013; Nolte et al. 2013b). Der fehlende Unterschied zwischen beweideten und unbeweideten Flächen in der vorliegenden Studie lässt sich wahrscheinlich durch die Methode der Beprobung erklären. Die Stechringe für Bodenproben zur Bestimmung der Bodenlagerungsdichte sind 5 cm lang und repräsentieren deshalb die obersten 5 cm des Bodens. Geht man von einer Aufwuchsrate von 2 mm im Jahr aus (Schindler et al. 2014a), dann handelt es sich also bei den 5 cm Boden in den Stechringen um Boden der in den letzten 25 Jahren entstanden ist. Bei vielen der untersuchten Flächen ist jedoch unklar, wann die Beweidung aufgegeben wurde. So ist der Boden in unseren Proben wahrscheinlich zu einem Teil auch in den unbeweideten Flächen noch unter Beweidung entstanden, während die Beweidungsaufgabe in anderen Studien meist länger zurückliegt (Elschot et al. 2013; Nolte et al. 2013b). In Zukunft könnten in den Brachflächen jedoch neuere Bodenschichten entstehen, die ohne den Einfluss der Beweidung dann höchstwahrscheinlich eine geringere Bodenlagerungsdichte aufweisen werden. Bei einer geringeren Bodenlagerungsdichte im Vergleich zu einer hohen Bodenlagerungsdichte führt die gleiche Sedimentdepositionsrate zu stärkerem Höhenwachstum, da das Sediment weniger dicht gelagert ist. Dies könnte also bedeuten, dass die von uns in den unbeweideten Marschen errechneten Aufwuchsraten unter den tatsächlichen liegen, da die hier ebenfalls recht hohe Bodenlagerungsdichte ein Artefakt aus der Zeit ist, als die Flächen noch beweidet wurden. Die hier dargestellten Unterschiede in der Aufwuchsrate beruhen also auf den Unterschieden in der Sedimentdeposition, während der Effekt von Bodenverdichtung noch nicht nachgewiesen werden kann. Nichtsdestotrotz untermauern die hier festgestellten höheren Aufwuchsraten die Ergebnisse anderer Studien (Andresen et al. 1990; Erchinger et al. 1996; Neuhaus et al. 1999; Stock 2011). Es ist jedoch zu beachten, dass mehrere dieser Studien den Beweidungseffekt auf das Höhenwachstum nur unter bestimmten Bedingungen z.B. im Bereich der unteren und nicht in der oberen Marsch beobachten konnten (Andresen et al. 1990; Neuhaus et al. 1999; Fraser et al. 2011). Die Vegetation auf der Hallig repräsentiert aufgrund der geringen Überflutungshäufigkeit jedoch eher die obere Marsch. Dass trotzdem ein Effekt von Beweidung festgestellt wurde, könnte jedoch eher am Abstand zur Sedimentquelle liegen. Untere Marschen liegen im allgemeinen näher an der Sedimentquelle (Temmerman et al. 2003), so dass eine höhere Sedimentfracht vorliegt (Butzeck et al. 2015)

und zu einem ausgeprägten Beweidungseffekt führt, während die oberen Marschen weiter entfernt von der Sedimentquelle liegen. Die besondere Situation auf der Hallig führt dazu, dass die Vegetation in allen Flächen auch bei unterschiedlichem Abstand zur Sedimentquelle ähnlich ist (Schindler et al. 2014a). Für Flächen in der Nähe der Halligkante wurde hier also ein deutlicherer Unterschied zwischen den Managementformen bei der Sedimentdeposition gefunden als im Inneren der Hallig.

In der vorliegenden Studie lag der Untersuchungsschwerpunkt auf Sedimentdeposition und Höhenwachstum. Aufgrund des begrenzten Untersuchungszeitraumes konnte der Einfluss des Management auf Erosion nicht betrachtet werden. Hierzu müssen Methoden wie der sogenannte ‚Sedimentation-Erosion Bar‘ (SEB) (Nolte et al. 2013a) eingesetzt werden. Früher wurde angenommen, dass aufgrund der mangelnden Bodenverdichtung in Brachen diese anfälliger für Erosion sind. Dies konnte jedoch nicht festgestellt werden (Führböter 1992), wahrscheinlich weil die dichte oberirdische Vegetation die Fließgeschwindigkeit verringert und so die Erosionsgefahr mindert (Führböter 1992). Auch unter Sturmflutbedingungen konnte im Wellenkanalversuch in unbeweideten Marschen nur eine sehr geringe Erosionsrate festgestellt werden, selbst nachdem die Vegetation entfernt wurde (Spencer et al. 2016). Leider ist nicht bekannt wie sich die Beweidung auf die Kantenerosion auswirkt (Führböter 1992; Marani et al. 2011). In anderen Studien konnte jedoch festgestellt werden, dass vor allem die Bodenbeschaffenheit ein entscheidender Faktor ist (Feagin et al. 2009).

#### 4.3 Höhenwachstum und Meeresspiegelanstieg

Für den hier betrachteten Zeitraum wurden nach fünf Landunter Ereignissen mittlere Aufwuchsraten für die Flächen zwischen 0,1 mm/Jahr und 1,1 mm/Jahr bestimmt. Dies ist mit in vorherigen Untersuchungen der Hallig Langeneß gefundenen Raten vergleichbar (Schindler et al. 2014a). Jensen (2014) hat für Langeneß die mittlere Anzahl der Landunterereignisse pro Jahrzehnt an Hand von Pegeldaten für die Jahre 1961 bis 2010 berechnet. Dabei wurden teilweise Landunter und vollständige Landunter unterschieden, wobei letztere auch das Halliginnere erreichen, und somit mit den Lanunter Ereignissen unserer Studie vergleichbar sind. Es wurden für Langeneß für die Jahre 1961 – 1970, 1991 – 2000 und 2001 – 2010 im Mittel drei vollständige Landunter Ereignisse festgestellt, während es für die Jahre 1971 – 1980 und 1981 – 1990 fünf vollständige Landunter waren. Somit ist die Anzahl der Landunter Ereignisse im hier vorliegenden Untersuchungszeitraum mit diesem Zeitraum zu vergleichen und repräsentiert eine durchschnittliche bzw. leicht erhöhte Überflutungshäufigkeit. Somit

können wir davon ausgehen, dass die Aufwuchsraten von 0,1 mm/Jahr bis 1,1 mm/Jahr der vorliegenden Studie aussagekräftig für die letzten Jahrzehnte sind.

Im Wattenmeer stieg der Meeresspiegel in den letzten 50-100 Jahren um 1-2 mm/Jahr (Oost et al. 2009). Der größte Teil der hier untersuchten Flächen kann also, unabhängig von der Beweidung, nicht mit dem aktuellen Meeresspiegelanstieg schritthalten. Ein für die Zukunft vorhergesagter beschleunigter Meeresspiegelanstieg (IPCC 2013) würde diese Situation noch verschärfen. Generell empfiehlt sich, um das Aufwachsen der Hallig zu erhöhen eine häufigere Überflutung und somit höheren Sedimenteintrag zuzulassen. Hierzu könnten periodische Öffnung von Sieltoren und andere Veränderungen an den Küstenschutzanlagen an der Halligkante beitragen (Jensen 2014). Die Öffnung von Sieltoren sollte vor allem im Herbst/Winter stattfinden, da in diesem Zeitraum die Sedimentfracht am höchsten ist (Butzeck et al. 2015) und die Auswirkungen auf die Nutzbarkeit der Flächen sowie Beeinträchtigungen von Brutvögeln geringer sind.

Die vorliegende Studie zeigt weiterhin, dass Beweidung die Ablagerung von Sedimenten und damit das Höhenwachstum der Hallig verringert, und dies bei der Bewirtschaftung der Flächen bedacht werden sollte. Eine Option könnte eine rotierende Brache darstellen, bei der in Jahren ohne Beweidung eine höhere Sedimentdeposition möglich wäre. Bei einer genügend hohen Sedimentzufuhr gehen wir allerdings davon aus, dass im Bereich der Kanten der negative Einfluss der Beweidung auf die Sedimentdeposition geringer ist. Es lässt sich also die Schlussfolgerung ziehen, dass eine Reduktion der Beweidung vor allem im inneren der Hallig zu empfehlen ist, um hier gezielt negative Auswirkungen auf die Sedimentdeposition zu verhindern.

## LITERATUR

- Andresen H, Bakker JP, Brongers M, et al (1990) Long-term changes of salt marsh communities by cattle grazing. *Vegetatio* 89:137–148.
- Bartholdy J, Christiansen C, Kunzendorf H (2004) Long term variations in backbarrier salt marsh deposition on the Skallingen peninsula - the Danish Wadden Sea. *Mar Geol* 203:1–21. doi: 10.1016/S0025-3227(03)00337-2
- Bouma TJ, Vries MBD, Low E, et al (2005) Flow hydrodynamics on a mudflat and in salt marsh vegetation: identifying general relationships for habitat characterisations. *Hydrobiologia* 540:259–274. doi: 10.1007/s10750-004-7149-0
- Butzeck C, Eschenbach A, Gröngröft A, et al (2015) Sediment Deposition and Accretion Rates in Tidal Marshes Are Highly Variable Along Estuarine Salinity and Flooding Gradients. *Estuaries and Coasts* 38:434–450. doi: 10.1007/s12237-014-9848-8
- Elschot K, Bouma TJ, Temmerman S, Bakker JP (2013) Effects of long-term grazing on sediment deposition and salt-marsh accretion rates. *Estuar Coast Shelf Sci* 133:109–115. doi: 10.1016/j.ecss.2013.08.021
- Erchinger HF, Coldewey HG, Meyer C (1996) Interdisziplinäre Erforschung des Deichvorlandes im Forschungsvorhaben “Erosionsfestigkeit von Hellern.” *Die Küste* 58:1–45.
- Fagherazzi S, Kirwan ML, Mudd SM, et al (2012) Numerical Models Of Salt Marsh Evolution: Ecological, Geomorphic, And Climatic Factors. *Rev Geophys* 50:1–28. doi: 10.1029/2011RG000359.1.INTRODUCTION
- Feagin R a, Lozada-Bernard SM, Ravens TM, et al (2009) Does vegetation prevent wave erosion of salt marsh edges? *Proc Natl Acad Sci U S A* 106:10109–13. doi: 10.1073/pnas.0901297106
- Fraser MD, Theobald VJ, Dhanoa MS, Davies OD (2011) Impact on sward composition and stock performance of grazing *Molinia*-dominant grassland. *Agric Ecosyst Environ* 144:102–106. doi: 10.1016/j.agee.2011.08.004
- Führböter A (1992) Festigkeit von Hellern. Braunschweig
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge and New York
- Jensen J (2014) KFKI-Projekt ZukunftHallig - Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels. Siegen
- Kiehl K, Eischeid I, Gettner S, Walter J (1996) Impact of different sheep grazing intensities on salt marsh vegetation in northern Germany. *J Veg Sci* 7:99–106.
- Kirwan ML, Temmerman S, Skeehean EE, et al (2016) Overestimation of marsh vulnerability to sea level rise. *Nat Clim Chang* 6:253–260. doi: 10.1038/nclimate2909
- Marani M, D’Alpaos A, Lanzoni S, Santalucia M (2011) Understanding and predicting wave erosion of marsh edges. *Geophys Res Lett.* doi: 10.1029/2011GL048995



Nolte et al. 2018: Untersuchung der Sedimentdeposition auf der Hallig Langeneß

- Morris JT, Sundareshwar P V, Nietch CT, et al (2002) Responses of coastal wetlands to rising sea level.
- Neuhaus R, Stelter T, Kiehl K (1999) Sedimentation in salt marshes affected by grazing regime, topographical patterns and regional differences. *Senckenbergiana Maritima* 29:113–116.
- Nolte S, Esselink P, Smit C, Bakker JP (2014) Herbivore species and density affect vegetation-structure patchiness in salt marshes. *Agric Ecosyst Environ* 185:41–47. doi: 10.1016/j.agee.2013.12.010
- Nolte S, Koppenaal EC, Esselink P, et al (2013a) Measuring sedimentation in tidal marshes: a review on methods and their applicability in biogeomorphological studies. *J Coast Conserv* 17:301–325. doi: 10.1007/s11852-013-0238-3
- Nolte S, Müller F, Schuerch M, et al (2013b) Does livestock grazing affect sediment deposition and accretion rates in salt marshes? *Estuar Coast Shelf Sci* 135:296–305. doi: 10.1016/j.ecss.2013.10.026
- Oost A, Kabat P, Wiersma A, Hofstede J (2009) Climate Change. Thematic Report No. 4.1. In: Marencic H, de Vlas J (eds). Wilhelmshaven, pp 1–16
- Schindler M, Karius V, Arns A, et al (2014a) Measuring sediment deposition and accretion on anthropogenic marshland - Part II: The adaptation capacity of the North Frisian Halligen to sea level rise. *Estuar Coast Shelf Sci* 151:246–255. doi: 10.1016/j.ecss.2014.08.027
- Schindler M, Karius V, Deicke M, von Eynatten H (2014b) Measuring sediment deposition and accretion on anthropogenic marshland - Part I: Methodical evaluation and development. *Estuar Coast Shelf Sci* 151:236–245. doi: 10.1016/j.ecss.2014.08.029
- Schrama M, Heijning P, Bakker JP, et al (2013) Herbivore trampling as an alternative pathway for explaining differences in nitrogen mineralization in moist grasslands. *Oecologia* 172:231–43. doi: 10.1007/s00442-012-2484-8
- Schuerch M, Rapaglia J, Liebetrau V, et al (2011) Salt Marsh Accretion and Storm Tide Variation: an Example from a Barrier Island in the North Sea. *Estuaries and Coasts* 35:486–500. doi: 10.1007/s12237-011-9461-z
- Spencer T, Möller I, Rupprecht F, et al (2016) Salt marsh surface survives true-to-scale simulated storm surges. *Earth Surf Process Landforms* 41:543–552. doi: 10.1002/esp.3867
- Stock M (2011) Patterns in surface elevation change across a temperate salt marsh platform in relation to sea-level rise. *Coastline Reports* 17:33–48.
- Temmerman S, Bouma TJ, Govers G, Lauwaet D (2005) Flow paths of water and sediment in a tidal marsh: Relations with marsh developmental stage and tidal inundation height. *Estuaries* 28:338–352. doi: 10.1007/BF02693917
- Temmerman S, Govers G, Wartel S, Meire P (2003) Spatial and temporal factors controlling short-term sedimentation in a salt and freshwater tidal marsh, Scheldt estuary, Belgium, SW Netherlands. *Earth Surf Process Landforms* 28:739–755. doi: 10.1002/esp.495
- Temmerman S, Meire P, Bouma TJ, et al (2013) Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. *Nature* 504:79–83. doi: 10.1038/nature12859

Nolte et al. 2018: Untersuchung der Sedimentdeposition auf der Hallig Langeneß

Temmerman S, Moonen P, Schoelynck J, et al (2012a) Impact of vegetation die-off on spatial flow patterns over a tidal marsh. *Geophys Res Lett* 39:L03406. doi: 10.1029/2011GL050502

Temmerman S, Moonen P, Schoelynck J, et al (2012b) Impact of vegetation die-off on spatial flow patterns over a tidal marsh. *Geophys Res Lett* 39:L03406. doi: 10.1029/2011GL050502

van Klink R, Schrama M, Nolte S, et al (2015) Defoliation and Soil Compaction Jointly Drive Large-Herbivore Grazing Effects on Plants and Soil Arthropods on Clay Soil. *Ecosystems* 18:671–685. doi: 10.1007/s10021-015-9855-z

**ANHANG:**

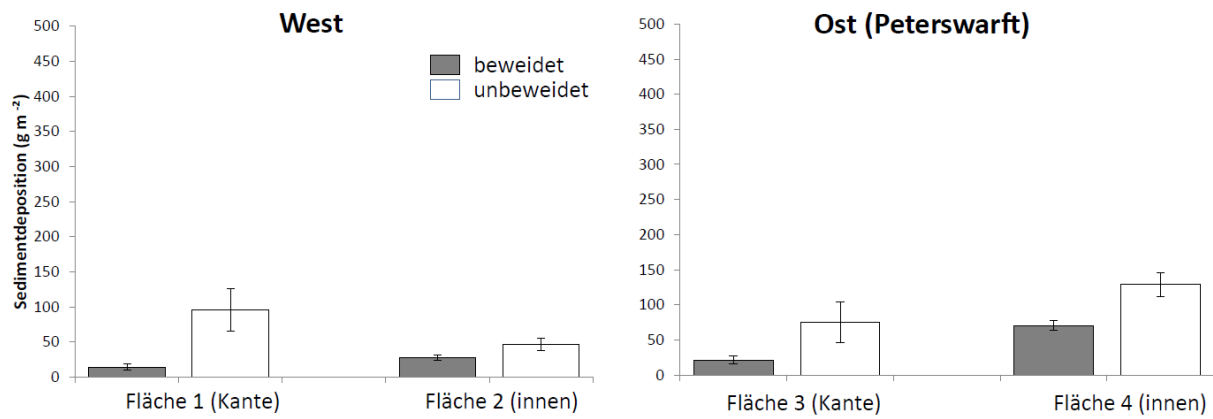


Abbildung A.1: Sedimentdeposition Landunter Ereignis 1 (14.11.15 – 15.11.15).

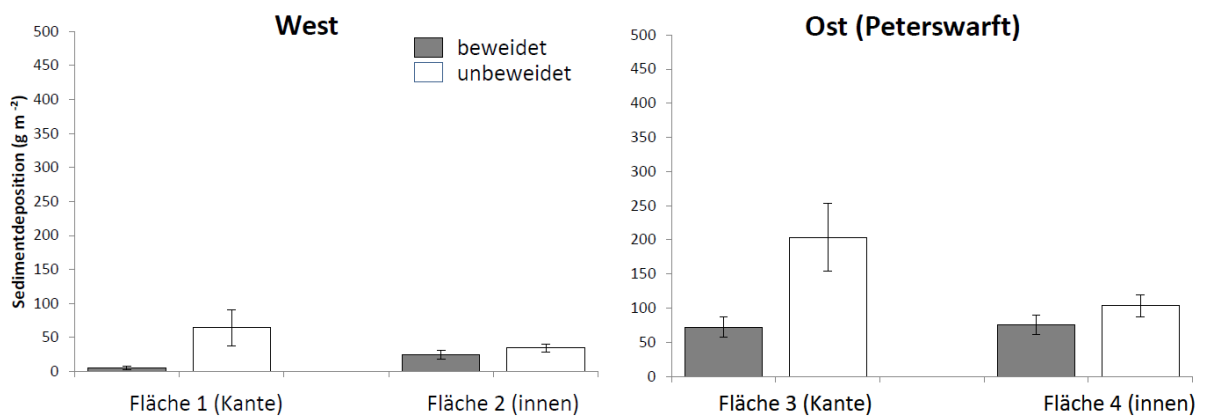


Abbildung A.2: Sedimentdeposition Landunter Ereignis 2 (18.11.15 – 20.11.15).

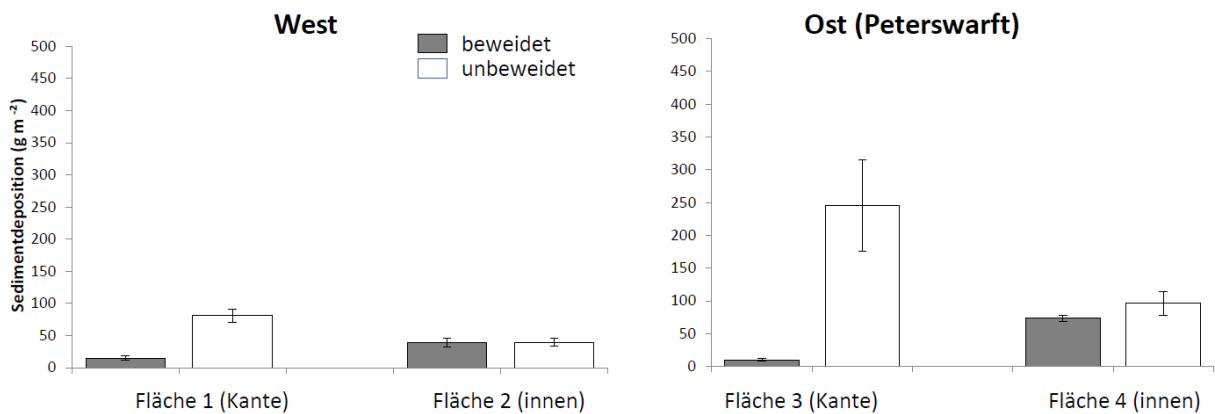


Abbildung A.3: Sedimentdeposition Landunter Ereignis 3 (28.11.15 – 01.12.15).

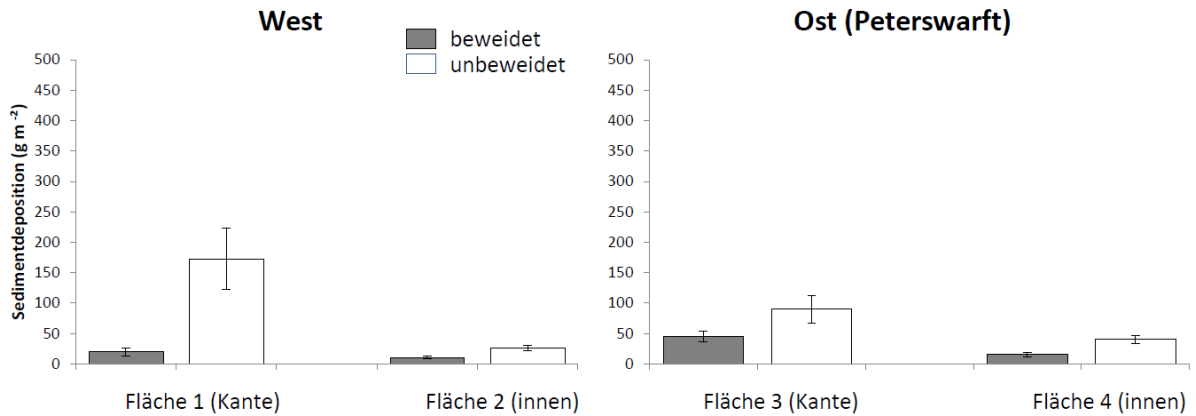


Abbildung A.4: Sedimentdeposition Landunter Ereignis 4 (05.12.15 – 7.12.15 & 11.12.15 – 12.12.15).

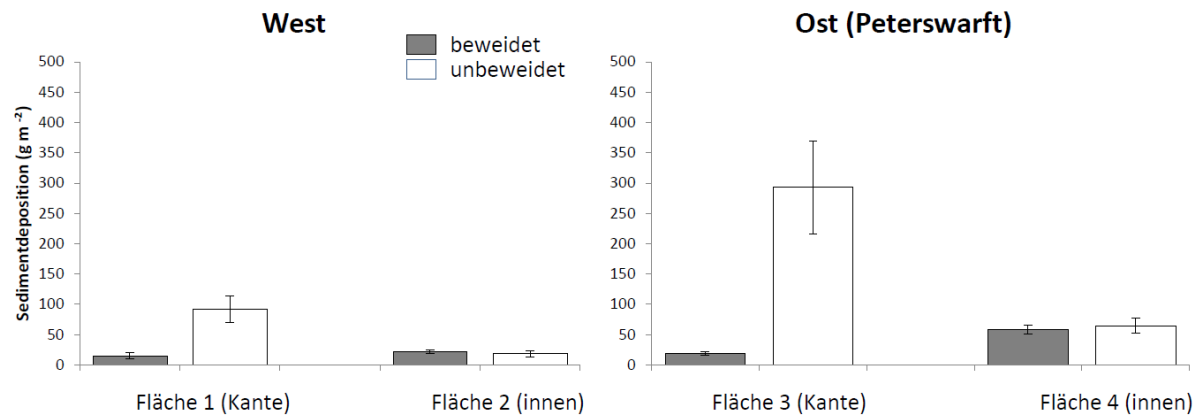


Abbildung A.5: Sedimentdeposition Landunter Ereignis 5 (30.01.16 – 03.02.16).

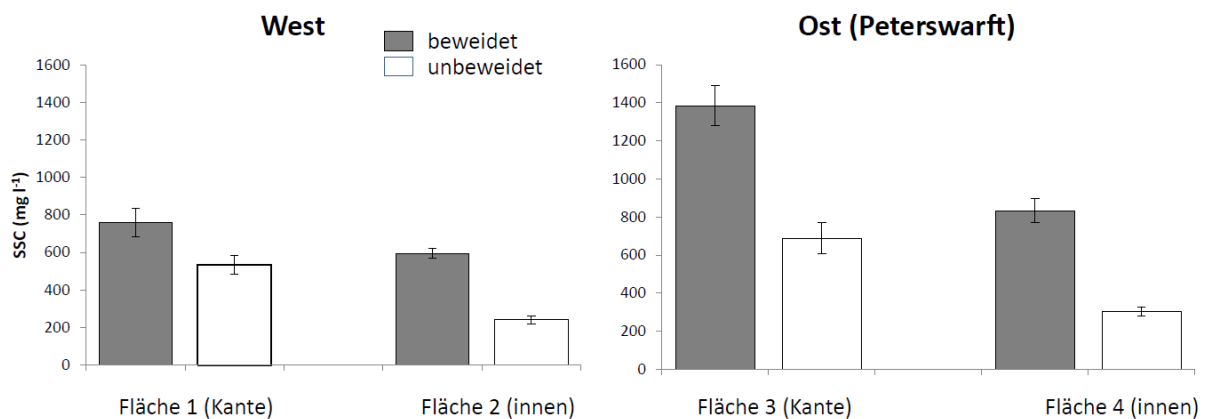


Abbildung A.6: Sedimentfracht (SSC) Landunter Ereignis 1 (14.11.15 – 15.11.15).

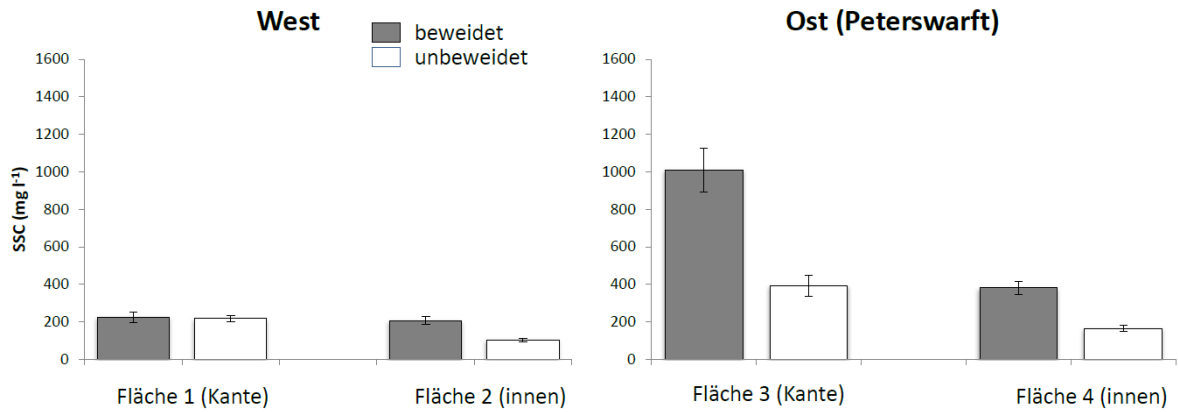


Abbildung A.7: Sedimentfracht (SSC) Landunter Ereignis 2 (18.11.15 – 20.11.15).

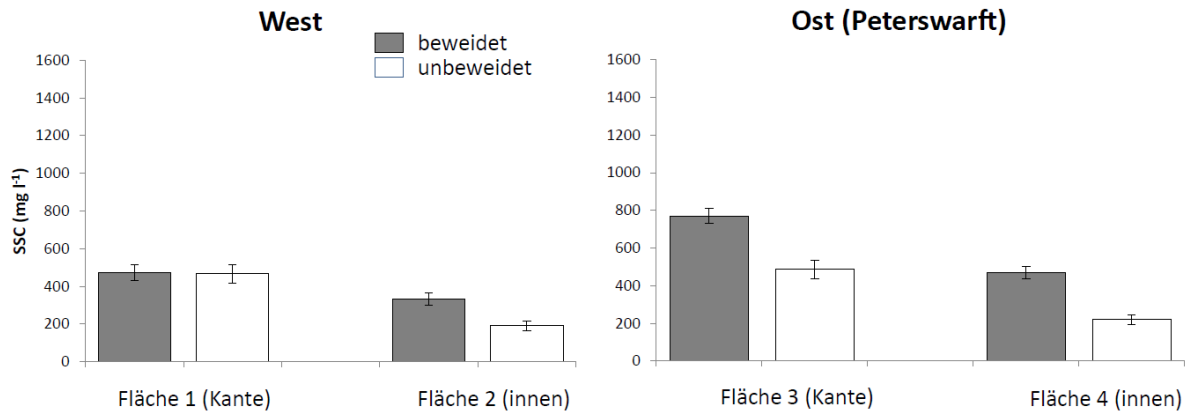


Abbildung A.8: Sedimentfracht (SSC) Landunter Ereignis 3 (28.11.15 – 01.12.15).

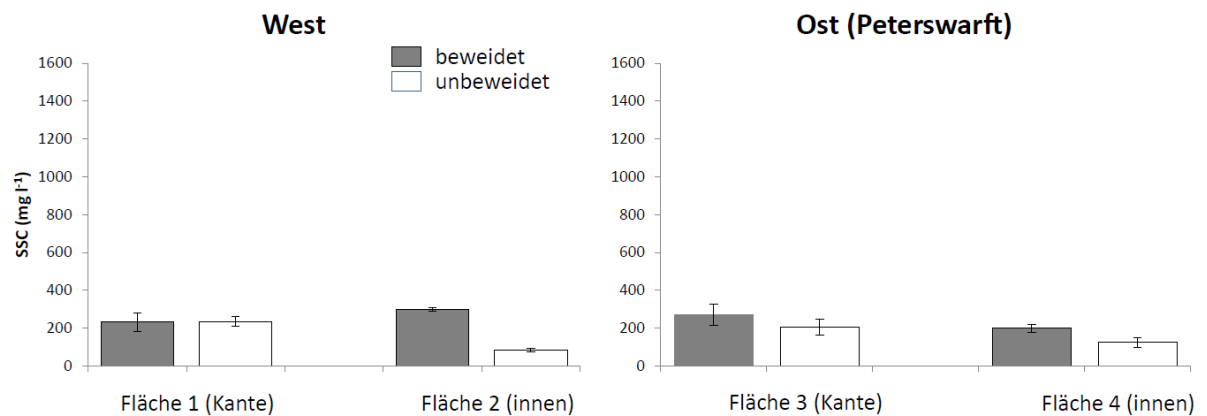


Abbildung A.9: Sedimentfracht (SSC) Landunter Ereignis 4 (05.12.15 – 7.12.15 & 11.12.15 – 12.12.15).

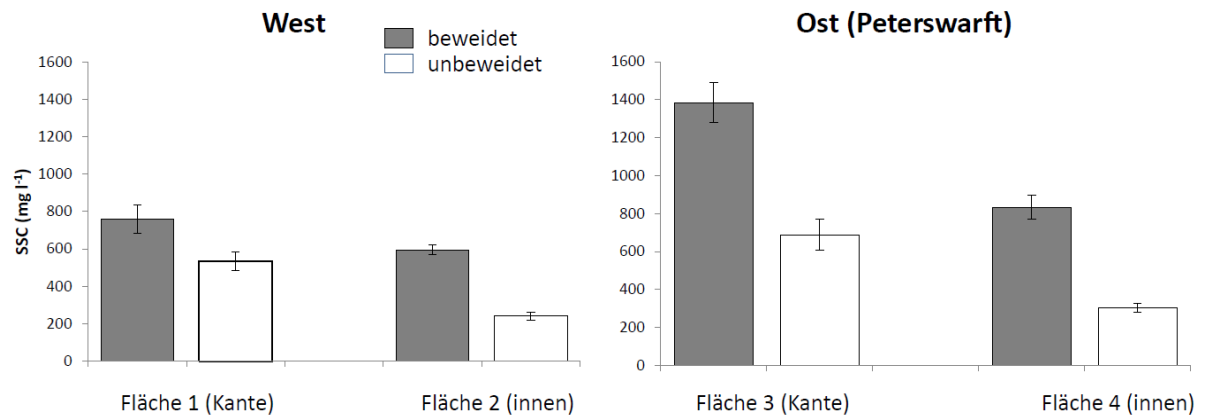


Abbildung A.10: Sedimentfracht (SSC) Landunter Ereignis 5 (30.01.16 – 03.02.16).