

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

## **Karius, Volker; Schindler, Malte; Deicke, Matthias; von Eynatten, Hilmar Sedimentologische Untersuchungen auf den Halligen**

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:  
**Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105214>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Karius, Volker; Schindler, Malte; Deicke, Matthias; von Eynatten, Hilmar (2016):  
Sedimentologische Untersuchungen auf den Halligen. In: Die Küste 84. Karlsruhe:  
Bundesanstalt für Wasserbau. S. 95-118.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Sedimentologische Untersuchungen auf den Halligen

*Volker Karius, Malte Schindler, Matthias Deicke und Hilmar von Eynatten*

## Zusammenfassung

Die nordfriesischen Halligen und niedrige Bereiche der ostfriesischen Inselmarschen stehen vor der Herausforderung steigender Wasserstände (relative mean sea level, RMSL, mean tidal high water, MThw, highest tidal high water, HThw). Quantitative Aussagen über das natürliche Anpassungspotential der regelmäßig überfluteten Bereiche zu treffen war das Ziel des Teilprojektes D (03KIS095) im Verbundprojekt „ZukunftHallig“ (JENSEN et al. 2016). Mittlere Sedimentaufwuchsraten im Zeitraum 1986–2011 belaufen sich auf  $1.4 \pm 0.6$  mm/a (Hooge),  $1.6 \pm 0.7$  mm/a (Langeneß) und  $3.2 \pm 1.6$  mm/a (Nordstrandischmoor). Auf den ostfriesischen Inseln wurden im Zeitraum 2011–2013 mittlere Raten von  $2.4 \pm 1.0$  mm/a (Norderney, östlicher Grohdelder) und  $0.75 \pm 0.25$  mm/a (Juist, südlicher Billpolder) gemessen. Dem steht ein Anstieg des RMSL gegenüber, der derzeit 2.6 mm/a (Pegel Wyk auf Föhr) beträgt bzw. ein Anstieg des MThw von 5.0 mm/a (Pegel Wyk auf Föhr). Durch die Diskrepanz zwischen Höhenentwicklung der Halligmarschen und der Wasserstandsentwicklung resultieren steigende hydrodynamische Belastungen auf die Marschen und die Warften. Diese bestehen aus höheren Wasserständen während eines Landunters sowie einem potentiell höheren Wellengang. Die Sedimentakkumulation auf den Halligen Hooge und Langeneß wird maßgeblich von der Anzahl an Sturmfluten gesteuert, die eine Höhe von 1.54 m über MThw überschreiten. Die Hallig Nordstrandischmoor profitiert dagegen auch von Überflutungen mit geringeren Wasserständen. Sedimente werden auf Langeneß bevorzugt dicht hinter der Uferlinie abgelagert, auf Hooge liegen die Gebiete mit hoher Sedimentdeposition in der Nähe der Sieltore, während auf Nordstrandischmoor die Sedimente weitgehend gleichmäßig über die Fläche verteilt werden. Ältere, im morphologischen Modell sichtbare Hochakkumulationsgebiete entlang der Binnenpriele werden dagegen heute nicht mehr bevorzugt mit Sedimenten versorgt. Es scheint angebracht, kurzfristige Maßnahmen zur technischen Sicherung und Verstärkung der Warften zu ergreifen und mittelfristig durch noch zu evaluierende Maßnahmen (z. B. Änderung der Be- und Entwässerungsstrategie an Deckwerken und Sieltoranlagen) dafür zu sorgen, dass die Sedimentdeposition an die Wasserstandsentwicklung angeglichen wird.

## Schlagwörter

Halligen, Hooge, Langeneß, Nordstrandischmoor, Norderney, Juist, Salzmarsch, Sedimentation, Sedimentaufwuchsrate, Sedimentfalle,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , Sturmflut, Meeresspiegelanstieg, ZukunftHallig

## Summary

*The north frisian Halligen are challenged by rising water levels (relative mean sea level, RMSL, mean tidal high water, MThw, highest tidal high water, HThw). The main aim of sub project D (03KIS095)*

*in the research project „ZukunftHallig“ (JENSEN et al. 2016) was to quantify the natural adaptive processes of the regularly inundated areas. The mean values of the accretion 1986-2011 amount to  $1.4 \pm 0.6$  mm/a (Hooge),  $1.6 \pm 0.7$  mm/a (Langeneß) and  $3.2 \pm 1.6$  mm/a (Nordstrandischmoor). On selected areas of the east frisian islands accretion mean values of  $2.4 \pm 1.0$  mm/a (Norderney, east part of Grobdepolder) and  $0.75 \pm 0.25$  mm/a (Juist, southern Billpolder) were measured in 2011-2013. The corresponding rise of RMSL and MThw is actually 2.6 mm/a and 5.0 mm/a (Gauge Wyk/Föhr). The difference in rates of accretion and water level rise will cause increasing hydrodynamic forces (hydrostatic pressure and swell) applied to the marsh areas and the dwelling mounts. The accretion at Hooge and Langeneß is mainly influenced by storm surges higher than 1.54 m above MThw. Nordstrandischmoor benefits also from minor inundation events. High sedimentation areas on Langeneß are mainly nearest to the waterline, on Hooge this areas are mainly behind the tide gates whereas on Nordstrandischmoor sediments are mostly even distributed. Former high sedimentation areas along interior tidal creeks are still visible in the morphological models of the Halligen. Nevertheless, there is no enhanced accretion today. In the short term technical measures should be taken to reinforce the dwelling mounts but in the longer term measures should be evaluated to increase the sediment accretion during inundations (e. g. modified bank protections and different operation modes for the tidal gates).*

## Keywords

*Halligen, Hooge, Langeneß, Nordstrandischmoor, Norderney, Juist, saltmarsh, sedimentation, accretion, sediment trap,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , storm surge, sea level rise, ZukunftHallig*

## Inhalt

1	Einleitung.....	97
2	Methoden.....	98
2.1	Häufigkeit von Landunterereignissen .....	98
2.2	Bestimmung der Bodendichte und des organischen Anteils.....	101
2.3	Messung der vertikalen Aufwuchsraten.....	101
2.3.1	Sedimentfallen .....	101
2.3.2	Sedimentdatierungen .....	103
2.4	Sedimentverteilung und Morphologie.....	104
3	Ergebnisse und Diskussion.....	105
3.1	Häufigkeit von Landunterereignissen .....	105
3.2	Bestimmung der Bodendichte und des organischen Anteils.....	107
3.3	Messung der vertikalen Aufwuchsraten.....	109
3.3.1	Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor .....	109
3.3.2	Ostfriesische Inseln Juist und Norderney.....	111
3.3.3	Isostatische Landbewegung und Kompaktion tieferer Schichten .....	111
3.4	Sedimentverteilung und Topographie der Halligen.....	112
3.4.1	Sedimentverteilung .....	112
3.4.2	Topographie.....	114
4	Fazit .....	115
5	Schriftenverzeichnis .....	116

## 1 Einleitung

Die vom Geowissenschaftlichen Zentrum Göttingen, Abteilung Sedimentologie und Umweltgeologie durchgeführten Arbeiten im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojektes „ZukunftHallig“ (JENSEN 2014) befassten sich mit dem natürlichen Anpassungspotential der nordfriesischen Halligmarschen sowie ausgewählter Bereiche der ostfriesischen Inseln an steigende Wasserstände. Konkret sollten folgende Fragen beantwortet werden.

- Wie häufig werden die Marschen der Halligen jährlich überflutet
- Wie hoch ist das mittlere vertikale Marschwachstum durch Sedimentablagerung (Sedimentaufwuchs)?
- Welche Parameter steuern das Sedimentationsgeschehen auf den Halligen und Inseln?
- Wie ist die räumliche Verteilung der Sedimentablagerungen?
- Was tragen regionale Setzungsprozesse und Krustenbewegungen zu vertikalen Landbewegung bei?

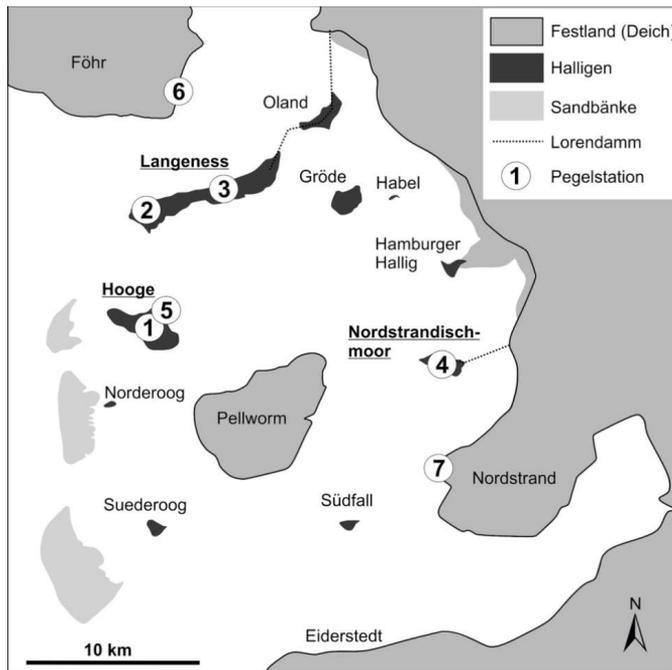


Abbildung 1: Lageskizze des Nordfriesischen Wattenmeeres zwischen der Halbinsel Eiderstedt (Süden) und Insel Föhr (Norden). Die drei in der vorliegenden Studie behandelten Halligen sind hervorgehoben. Die Nummerierungen kennzeichnen die Pegelstandorte der behandelten Binnen- und Außenpegel.

Dazu wurden im Zeitraum von November 2010 bis März 2013 Sedimentfallen auf den Halligen Nordstrandischmoor, Hooge und Langeneß sowie den Inseln Juist und Norderoog installiert und die Sedimentdeposition der stattgefundenen Sturmfluten quantitativ erfasst (SCHINDLER et al. 2014b). Weiterhin wurden Rammkernsondierungen auf allen

Halligen durchgeführt, die der Altersdatierung älterer Schichten dienen. Es wurden digitale Geländemodelle der Halligen ausgewertet und Wasserstandsdaten betrachtet, insbesondere um Kriterien für ein Landunter festzulegen und deren Anzahl für die Vergangenheit quantifizieren zu können. Fachliteratur wurde ausgewertet zur Einschätzung des regionalen Landsenkungspotentials und rezenter Landsenkungsprozesse. Das hauptsächliche Arbeitsgebiet der nordfriesischen Halligen ist in Abb. 1 dargestellt.

## 2 Methoden

### 2.1 Häufigkeit von Landunterereignissen

Die bisherige Dokumentation von Überflutungshäufigkeiten auf den einzelnen Standorten sowie die Definition von Referenzhöhen beruht vor allem auf Beobachtungen und mündlich überlieferten Richt- und Schätzwerten. DIBBER und MÜLLER-NAVARA (2009) legten erstmals für die Halligen Hooge, Gröde und Nordstrandischmoor Richtwerte in Form von Pegelständen für beginnende, sowie vollständige Überflutungen fest. Diese begründen sich sowohl auf Mitteilungen der Halligbewohner und des LKN-SH, als auch auf die Topographie der Halligen und deren Deckwerke. Basierend auf dem Ansatz von DIBBER und MÜLLER-NAVARA (2009) wurden Schwellenwerte sowohl für beginnende Landunterereignisse (im Folgenden als LU bezeichnet) sowie vollständige Landunterereignisse (im Folgenden als vLU bezeichnet) definiert. Es wurde besonders darauf geachtet, dass die alternativen Schwellenwerte in Form von Referenzhöhen bei topographischen Änderungen leicht reproduzierbar sind.

Digitale Geoinformationsdaten des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein (LVerma-SH) wurden über das LKN-SH bezogen. Hierzu zählen Ausschnitte des digitalen Geländemodells (DGM1 2005) und digitale Orthophotos (DOP) des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS) sowie Daten der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK). Differentielle GPS-Vermessungen (d-GPS) der Küstenschutzbauwerke und Warften wurden seitens des LKN-SH vorgenommen. Die genutzten Vermessungsdaten der Sommerdeichlinien stammen aus den Jahren 1999 (Hooge) und 2010 (Langeneß). Alle digitalen kartographischen Arbeiten wurden mittels der Software ArcGis 9.3 und 10.1 (Esri Inc.) ausgeführt.

Als Schwellenwert eines LU Ereignisses wurde die mittlere Höhe der Geländeoberfläche (GOF) der betreffenden Hallig gewählt. Erreicht der Binnenwasserstand das mittlere Niveau der GOF, sind weite Bereiche der Marsch bereits überflutet. Als Datengrundlage dient DGM1 basierend auf der landesweiten, luftgestützten LIDAR-Vermessung (light detection and ranging) mit einer Gitterweite von 1x1 m und einer Höhengenaugigkeit von  $\pm 15$  cm aus dem Jahr 2005. Vorbereitend erfolgte die Identifizierung und Eliminierung von fehlerhaften Datenpunkten mittels des ArcGis eigenen Tools „Ausreißer identifizieren“. Da anthropogen geformte Geländeerhöhungen und artifizielle Strukturen wie Deckwerke, Deiche und Warften bei der Berechnung mittlerer Geländehöhen unberücksichtigt bleiben sollten, wurden diese Strukturen aus dem DGM1 extrahiert.

Ein vLU Ereignis tritt ein, wenn der Wasserstand am Binnenpegel das Niveau der nicht Wasser permeablen Deckwerke der Hallig erreicht und somit eine vollständige Füllung der Hallig vorliegt. Als nicht permeable Deckwerke werden Sommerdeiche und Steinpflaster angesehen. Halligrauhstreifen, umgangssprachlich als „Halligigel“ bzw.

„Igel“ bezeichnet, schließen sich binnenseitig der Steinpflaster an. Sie sind als permeable Deckwerke konzipiert und werden somit bei der Berechnung der Höhe der nicht durchströmbaren Deckwerke nicht berücksichtigt. Die Berechnung der mittleren Kronenhöhe der Sommerdeiche auf Hooge und Langeneß basieren auf den d-GPS Vermessungen des LKN-SH. Nordstrandischmoor verfügt weder über einen Sommerdeich, noch ist es vollständig von einem Deckwerk umschlossen. Das nordöstliche Ufer in Richtung des Lorendamms geht in ein offenes Lahnungsfeld über. Zudem ist dort, wo Deckwerke und Halligrauhstreifen das Ufer befestigen, die Marschoberfläche oftmals über das Niveau des Deckwerks oder sogar der älteren Rauhstreifen hinaus gewachsen. Somit muss die mittlere Höhe der Marschoberfläche binnenseitig der Rauhstreifen als maßgebendes Überflutungshindernis angesehen werden. Die entsprechende Höhe wurde näherungsweise aus dem DGM1 abgeleitet. Den räumlichen Bezug gibt eine editierte Linie vor, welche direkt binnenseitig der Rauhstreifen die Marschfläche der Hallig umfasst. Zu beachten ist der Höhenfehler der LIDAR basierten DGM Daten von  $\pm 15$  cm im Gegensatz zu d-GPS Vermessungen mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich.

Die verwendeten Wasserstandsdaten in Form von Scheitelwerten der Tidenhochwässer (Thw) wurden vom LKN-SH aufbereitet und zur Verfügung gestellt. Die Standorte aller für die vorliegende Arbeit genutzten Pegel sind der Abb. 1 zu entnehmen. Unterschieden werden Binnenpegel, welche wenig bis keine Tidebeeinflussung zeigen, und die zugehörigen Außenpegel, welche tidebeeinflusst sind. Digitale Binnenpegel wurden auf den Halligen erst im Jahr 2009 installiert. Somit wurde auch auf benachbarte Außenpegel zurückgegriffen, deren Daten teilweise bis in die 50er Jahre zurückreichen (Pegel Wyk auf Föhr). Tab. 1 gibt eine Aufstellung der genutzten Binnen- und Außenpegel sowie deren Datenverfügbarkeit. Die Daten der Außenpegel Langeneß/Hilligenley und Nordstrandischmoor sind aufgrund der schlechten Qualität nicht nutzbar. Stattdessen wurden die Binnenpegel Langeneß/Kirchhofwarf und Langeneß/Kirchwarf dem Außenpegel Wyk/Föhr sowie der Binnenpegel Nordstrandischmoor dem Außenpegel Strucklahnungshörn/Nordstrand gegenüber gestellt.

Tabelle 1: Aufstellung der Binnenpegel sowie der zugeordneten Außenpegelstandorte nebst den Zeiträumen verfügbarer, digitaler Wasserstandsdaten. Die Standorte sind entsprechen der Nummerierung in der Lageskizze (Abb. 1) verortet.

Hallig	Binnenpegel	Außenpegel
Hooge	1 Schulwarf: Thw: 11.2009–04.2012	5 Anleger: Thw: 12.1976–04.2012
Langeneß (Nordmarsch)	2 Kirchhofwarf: Thw: 12.2009–05.2012	6 Wyk/Föhr: Thw: 11.1951–04.2012
Langeneß (Alt-Langeneß)	3 Kirchwarf: Thw: 12.2009–05.2012	6 Wyk/Föhr: Thw: 11.1951–04.2012
Nordstrandischmoor	4 N. Moor Hallig: Thw: 11.2009–04.2012	7 Strucklahnungshörn: Thw: 11.1994–03.2012

Alle Berechnungen anhand von Pegeldata basieren auf Wasserwirtschaftsjahren (WW, 1.11.–31.10.). Die Berechnung der langjährigen Überflutungshäufigkeiten, sowohl für LU als auch vLU, erfolgt anhand der Außenpegeldata, da diese eine wesentlich längere Zeitspanne abdecken als die 2009 installierten Binnenpegel. Eine direkte Anwendung der Binnenpegelschwellenwerte auf die assoziierten Außenpegel ist jedoch nicht möglich.

Aufgrund der nicht permeablen Deckwerke, erfolgt die Reaktion des Binnenpegels auf einen erhöhten Außenwasserstand erst, wenn Pegel und Seegang vor der Hallig die kritische Größe erreichen, ab welcher ausreichend Überflutungswasser, zunächst durch Wellenschlag, auf die Hallig gelangt. Die Überschreitung der definierten Schwellenwerte für ein Überflutungsereignis erfolgt daher je nach Außenwasserstand extrem verzögert bzw. bleibt vollständig aus, wenn der kritische Außenwasserstand nicht überschritten wird. Die Berechnung des Außenpegelschwellenwertes ( $H_A$ ) kann unterschieden für LU/vLU näherungsweise anhand von Wasserstandsdaten des Zeitraums 2009-2012 vorgenommen werden, welche sowohl für Binnen- als auch Außenpegel vorliegen. Die gesuchte Größe ( $H_A$ ) entspricht der Summe von Binnenpegelschwellenwert ( $H_B$ ) und der mittleren Höhendifferenz ( $\overline{\Delta h}$ ) zwischen Außenwasserstand  $h_A$  und Binnenwasserstand  $h_B$  zum Zeitpunkt  $t$  ( $H_B$ ). Es gilt:

$$H_A = H_B + \overline{\Delta h} \quad (1)$$

$$\overline{\Delta h} = \frac{\sum(h_A - h_B)}{n} \quad (2)$$

$H_A$ : Schwellenwert des Außenpegels für ein Überflutungsereignis (LU/vLU)

$h_A$ : Außenwasserstand

$H_B$ : Schwellenwert des Binnenpegels für ein Überflutungsereignis (LU/vLU)

$h_B$ : Binnenwasserstand

$n$ : Anzahl Wertepaare

$\overline{\Delta h}$ : mittlere Pegeldifferenz

Bei der Berechnung von  $H_{A(LU)}$  wurde lediglich die erste Tide einer Überflutung als Ereignis gewertet. Oftmals erfolgte während der Folgetiden eine erneute Pegelüberschreitung des Schwellenwertes  $H_B(LU)$  um wenige Zentimeter, welche aufgrund eines zu niedrigen Außenwasserstandes  $h_A$  jedoch nicht auf über das Deckwerk eindringendes Wasser zurück zu führen sein kann. Viel wahrscheinlicher ist der Grund für den Binnenpegelanstieg in geringen Undichtigkeiten der Siele zu suchen, wodurch etwas Wasser durch die Priele und Gräben eindringen kann. Um sicher zu stellen, dass Werte  $h_A$  während der Folgetiden signifikant niedriger ausfallen, wurden diese in zwei Datenkollektive unterteilt. (i) Wasserstände  $h_A$  zum Zeitpunkt der Schwellenwertüberschreitung  $H_B(LU)$  während der ersten Tide eines Ereignisses. (ii) Wasserstände  $h_A$  zum Zeitpunkt der Schwellenwertüberschreitung  $H_B(LU)$  während einer Folgetide eines Ereignisses. Mittels Zweistichproben-T-Test bei normal verteilten Datenkollektiven bzw. Mann-Whitney-U-Test bei nicht normal verteilten Datenkollektiven konnte nachvollzogen werden, dass Wasserstände  $h_A$  in Abhängigkeit von Folgetiden signifikant niedriger ausfallen. Bei der Berechnung der Außenpegelschwellenwerte  $H_{A(vLU)}$  wurden alle Außenpegelwasserstände  $h_A$  sowohl der ersten Tide als auch der Folgetiden in einem Datenkollektiv zusammen gefasst, da diese im Gegensatz zu den LU Ereignissen nicht signifikant unterschiedlich sind.

Abschließend erfolgte die Berechnung der jährlichen Überschreitungshäufigkeiten anhand der berechneten Außenpegelschwellenwerte  $H_{A(LU)}$  und  $H_{A(vLU)}$  und den

assozierten Außenpegelraten (vgl. Tab. 4). Da die Pegelzeitreihen oftmals zu kurz sind um Trendanalysen der jährlichen Häufigkeit mittels 19-jährigem gleitendem Mittel und damit unter Berücksichtigung eines möglichen Einflusses der Nodaltide anzufertigen (HOUSTON und DEAN 2011; WOODWORTH 2011) wurde ein 9-jähriges gleitendes Mittel angewandt.

## 2.2 Bestimmung der Bodendichte und des organischen Anteils

Zur Bestimmung der halligspezifischen Bodendichte wurden 1,20 m lange Rammkernbohrungen ( $d=100$  mm) in die Halligmarsch abgeteuft. Die Anzahl der Rammkernbohrungen beträgt auf Langeneß 6 ( $n=6$ ), Hooge 4 ( $n=4$ ) und Nordstrandischmoor 2 ( $n=2$ ). Der obere Bereich der Bohrkernbohrungen wurde bis zu einer Tiefe von 25 cm jeweils in Abschnitte von 1 cm Mächtigkeit unterteilt. Ab einer Tiefe  $>25$  cm wurden jeweils 5 cm Abschnitte gebildet. An diesen Abschnitten wurde die Trockenraumdichte (Bulk Dry Density, BDD) nach Trocknen bei  $105^{\circ}\text{C}$  bis zur Gewichtskonstanz durch Wägung bestimmt. Der Organikgehalt wurde als Glühverlust (Loss on Ignition, LOI) der getrockneten Abschnitte bei  $425^{\circ}\text{C}$  ermittelt. Wegen des Kristallwasserverlustes der Tonminerale kommt es bei dieser Methode zu einer Überschätzung des organischen Anteils. Der relative Fehler nimmt dabei mit zunehmendem Organikgehalt der Proben ab und beträgt bei den für die untersuchten Überflutungssedimente typischen mittleren Organikgehalten von 5–8 Gew % ca. 20–60 %.

## 2.3 Messung der vertikalen Aufwuchsraten

### 2.3.1 Sedimentfallen

In den Winterhalbjahren 2010–2013 wurden auf den zu untersuchenden Halligen im November 61 (Langeneß), 36 (Hooge) bzw. 12 (Nordstrandischmoor) Sedimentfallen des Typ A (11 LDPE-Weithalsflasche) und Typ B (Kunstrasen (B3)) ausgebracht und zur Laboranalyse im März des Folgejahres wieder entfernt (Abb. 2).

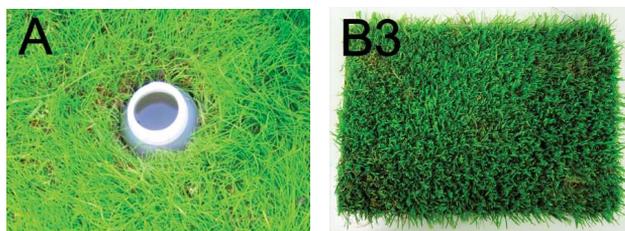


Abbildung 2: Verwendete Sedimentfallen. (A) 1-Liter-LDPE-Flasche im Marschboden eingelassen. (B3) Kunstrasen.

Während der Kunstrasen plan auf der Marschoberfläche befestigt wurde, wurde die mit Wasser gefüllte, geöffnete Weithalsflasche mit einem Stechzylinder im Boden versenkt. Die Fallentypen A und B wurden in einem Raster von ca.  $400 \times 400$  m (Abb. 3) jeweils parallel installiert.

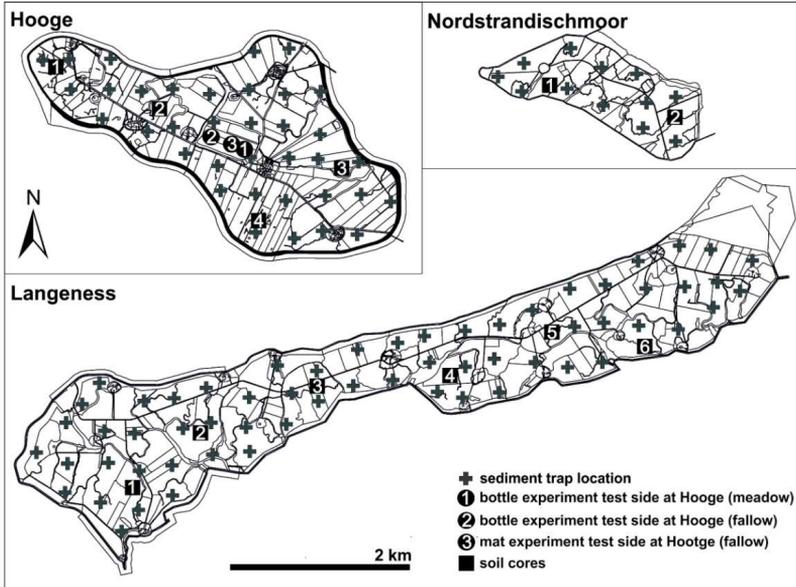


Abbildung 3: Darstellung der untersuchten Halligen mit den Positionen der Sedimentfallen (Pluszeichen, 61 (Langeneß), 36 (Hooge), 12 (Nordstrandischmoor)), den Bohrpositionen (Quadrate) und den Standorten der methodischen Untersuchungen (Kreise).

Die gewonnenen Sedimente des Fallentyps A wurden im Labor durch Filtration oder Dialyse entsalzt, bei 105°C getrocknet und anschließend bei 425°C verascht und gewogen. Aus der Gewichts­differenz der getrockneten und veraschten Proben wurden der siliziklastische und der organische Anteil der Sedimente quantifiziert (SCHINDLER et al. 2014a). Beim Fallentyp B wurde nach Trocknung die Gesamtmenge des auf der Falle abgelagerten Materials durch Wägung bestimmt und um den aus Fallentyp A bestimmten Anteil organischen Materials korrigiert. Die Ergebnisse der Fallentypen A+B wurden für die Berechnung der Sedimentaufwuchsrate an jeder Position gemittelt. Bei der Berechnung des Höhenwachstums ( $\Delta H$ ) wurde der mittlere Organikanteil im Boden berücksichtigt (Formeln 3–5).

$$M_{C_{trap}} = M_{S_{trap}} \cdot \frac{100 - LOI_{trap}}{100} \quad (3)$$

$M_{C_{trap}}$ : Siliziklastischer Anteil Typ A/B [g]

$M_{S_{trap}}$ : Gesamt Sedimentmasse inkl. Organik Typ A/B [g]

$LOI_{trap}$ : Glühverlust (LOI) Typ A (Flasche) [Gew %]

$$M_{accretion} = \frac{M_{C_{trap}} \cdot 100}{100 - LOI_{soil}} \quad (4)$$

$M_{accretion}$ : Zum Höhenwachstum beitragende effektive Masse Typ A/B [g]

$LOI_{soil}$ : Mittlerer halligspezifischer Glühverlust (seit 1915) [%]

$$\Delta H = \frac{M_{accretion}}{A} \cdot BDD^{-1} \cdot 10 \quad (5)$$

$\Delta H$ : Sedimentaufwuchsrate [mm/a]

A: effektive Fläche der Sedimentfalle (Type A, Bodenfläche der Flasche (70.88 cm<sup>2</sup>), Typ B, Gesamtfläche der Matte (600 cm<sup>2</sup>) [cm<sup>2</sup>]

BDD: Trockenraumdichte [g/cm<sup>3</sup>]

Ein halligspezifischer Mittelwert wurde durch Mittelung aller Fallenstandorte über den gesamten Beobachtungszeitraum von drei Jahren berechnet. Bei der Bestimmung der Unsicherheiten wurde eine Fehlerfortpflanzungsrechnung basierend auf den Standardabweichungen der Mittelwerte durchgeführt. Durch die hohe räumliche Variabilität der Sedimentakkumulation sowie der Bodendichten (lateral wie auch vertikal) sind systematische Fehler, die beispielsweise bei der Bestimmung des organischen Anteils durch die Glühverlustmethode auftreten zu vernachlässigen – hier erfolgt eine Überbestimmung wegen auftretender Kristallwasserverluste bei Tonmineralen.

### 2.3.2 Sedimentdatierungen

Sedimentdatierungen wurden mit der <sup>137</sup>Cs sowie der <sup>210</sup>Pb Methode durchgeführt. Aliquote der getrockneten und gemörserten Bohrkernabschnitte (35–70 g) wurden in Plastikdosen (39.3 cm<sup>3</sup>) gepresst und mit gasdichter Folie versiegelt (Parafilm®, Pechiney Plastic Packaging). Für kleinere Probenvolumina (meist organikreiche Schichten des Oberbodens) wurden Röhrchen mit 6.9 cm<sup>3</sup> benutzt. Alle Proben wurden vor der gammaspektrometrischen Analyse mindestens drei Wochen gelagert, um ein ausreichendes Gleichgewicht zwischen <sup>226</sup>Ra und seinen Zerfallsprodukten zu gewährleisten (GOODBRED und KUEHL 1998).

Die Gammaspektrometrie wurde am ISOLAB, Universität Göttingen durchgeführt. Es wurden die Aktivitäten der folgenden Radionuklide bestimmt <sup>137</sup>Cs (661.7 keV), <sup>210</sup>Pb (46.6 keV) und <sup>214</sup>Pb (295.2 und 351.9 keV). Es wurden drei low background Ge(Li) Detektoren verwendet. Die Messdauer betrug 250000 s (2,9 Tage)

Das Radionuklid <sup>137</sup>Cs ( $t_{1/2}$ =30.2 a) weist in der Region der Nordsee im Allgemeinen zwei Anreicherungshorizonte auf, die auf dem atmosphärischen Fallout von Tschernobyl (1986) sowie auf dem durch oberirdische Atomwaffentests (Maximum 1963) hervorgerufenen Fallout beruhen (CALLAWAY et al. 1996; KIRCHNER und EHLERS 1998a; SCHUERCH et al. 2012; KIRCHNER und EHLERS 1998b)

Das Radionuklid <sup>210</sup>Pb ( $t_{1/2}$ =22.3 a) wird kontinuierlich in der Atmosphäre durch radioaktiven Zerfall von <sup>222</sup>Rn ( $t_{1/2}$ =3.8 days) und dessen kurzlebigen Tochterisotopen <sup>214</sup>Pb ( $t_{1/2}$ =26.8 min) und <sup>214</sup>Bi ( $t_{1/2}$ =19.9 min) gebildet und mit  $\approx$ 50 Bq/(m<sup>2</sup> a) auf Böden und Sedimentoberflächen durch trockene oder nasse Deposition abgelagert (unsupported lead) (APPLEBY 2001). Eine zweite Quelle für <sup>210</sup>Pb stellt der Zerfall von <sup>222</sup>Rn, welches aus im Boden befindlichen <sup>226</sup>Ra entsteht (supported lead) (APPLEBY und OLDFIELD 1978; APPLEBY und OLDFIELD 1983).

Während “supported lead” kontinuierlich im Boden entsteht, wird “unsupported lead” mit zunehmender Zeit zerfallen und in der Konzentration mit der Tiefe abnehmen. „Unsupported lead” wird berechnet aus der Differenz von <sup>210</sup>Pb (gesamt) und dem mit <sup>210</sup>Pb (supported) im Gleichgewicht befindlichen <sup>214</sup>Pb. Wegen der diskontinuierlichen Sedimentation auf den Halligmarschen wurden die Pb-Alter nach dem CRS-Modell

(constant rate of supply) berechnet (APPLEBY und OLDFIELD 1978; APPLEBY und OLDFIELD 1983).

Bei der Berechnung von Sedimentaufwuchsraten auf Basis der Bohrkerne wurde die Mächtigkeit der einzelnen Kernabschnitte um die bei der Rammkernbohrung unvermeidliche Stauchung (hier zwischen 10–25%) korrigiert. Wegen der mit der Tiefe zunehmenden Bodendichte und dem abnehmenden Organikgehalt würden tiefere Sedimentbereiche geringere Sedimentaufwuchsraten ergeben als höhere. Um eine Vergleichbarkeit zu den mit Sedimentfallen ermittelten Werten herzustellen, wurde im Folgenden mit einheitlichen Werten für BDD und  $LOI_{\text{soil}}$  gerechnet (Tab. 2).

Tabelle 2: Tiefe des Markerhorizontes (Deichbau 1915), mittlere BDD, sowie Gehalte organischer Substanz im Boden ( $LOI_{\text{soil}}$ , Werte für den Zeitraum 1915-2011) und in den Sedimentfallen (Typ A) (LOI trap). BDD and LOI finden Eingang in die Berechnung der Sedimentaufwuchsraten.

	Tiefe (1915) (cm unter GOK)	BDD > 1915 (g/cm <sup>3</sup> )	$LOI_{\text{soil}} > 1915$ (%)	LOI trap (Typ A) (%)
Hooge	10.8 ± 1.6	0.64 ± 0.17	21.4 ± 6.6	8.0 ± 9.0
Langeneß	12.0 ± 2.6	0.67 ± 0.16	18.4 ± 5.9	7.0 ± 2.8
N. Moor	24.9 ± 0.7	0.83 ± 0.09	9.0 ± 1.4	5.7 ± 2.0

## 2.4 Sedimentverteilung und Morphologie

Um die räumliche Variabilität der durch Sedimentfallen quantitativ erfassten Sedimentdepositionen darzustellen, wurde ein Punkt-Kriging-Verfahren angewendet. Nach ASSELMAN und MIDDELKOOP (1995) sichert dieser Ansatz die besten Ergebnisse, wenn Punktinformationen auf einem semi-regulären Gitter basieren. Alle Berechnungen sowie die Visualisierung der 2D-Isolinienkarten wurden mittels der Softwarepakete Surfer 9 (Golden Software, Inc.) und unter Zuhilfenahme von ArcGis 10 (Esri Inc.) ausgeführt. Weitere raumbezogene Daten stellte das LKN-SH bereit. Diese beinhalten neben Geobasisdaten des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS) sowie des Amtlichen Liegenschaftskatasters (ALK) das digitale Geländemodell (DGM1) aus dem Jahr 2005 auf Basis von LIDAR Daten. Mit einem durchschnittlichen Höhenfehler von ±15 cm und einer Gitterweite von 1x1 m lässt sich die Topographie der Halligen detailliert abbilden und erlaubt somit Rückschlüsse auf morphologische Prozesse wie die Sedimentverteilung auf der Marschoberfläche. Kleinräumige morphologische Prozesse auf den vorgelagerten Wattarealen konnten nicht dargestellt werden, da es für den Bereich der Hallig vorgelagerten Watten keine LIDAR basierten Referenzdatensätze existieren. Eigene flächendeckende Kartierungsarbeiten mittels d-GPS Vermessungen konnten im Rahmen des Vorhabens nicht durchgeführt werden.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Häufigkeit von Landunterereignissen

In Abb. 4 werden die mittleren Gelände- und Deich/Deckwerkshöhen über Normalhöhennull (NHN) sowie das regionale MThw als Mittel der letzten Dekade (2001–2010) dargestellt. Die absolute Geländehöhe ist auf Hooge (151 cm NHN) im Vergleich zu Langeneß (153 cm ü NHN) nur geringfügig niedriger. Für beide Halligen wird ein MThw von 136 cm NHN angenommen, was dem mittleren 10-jährigen Hochwasser (2001–2010) des Pegels „Hooger Anleger“ entspricht. Daten des Pegels Langeneß Hilligenley sind lückenhaft und erlauben keine Berechnung eines 10-jährigen MThw. Die GOF sowie das MThw auf Nordstrandischmoor (Pegel Strucklahnungshörn 2001–2010) liegen mit 192 cm NHN (GOF) und 155 cm (MThw) deutlich höher. Der Gradient der mittleren Deich/Deckwerkshöhen beschreibt einen entgegengesetzten Verlauf von 290 cm NHN (Hooge) über 234 cm NHN (Langeneß) bis 225 cm NHN (Nordstrandischmoor).

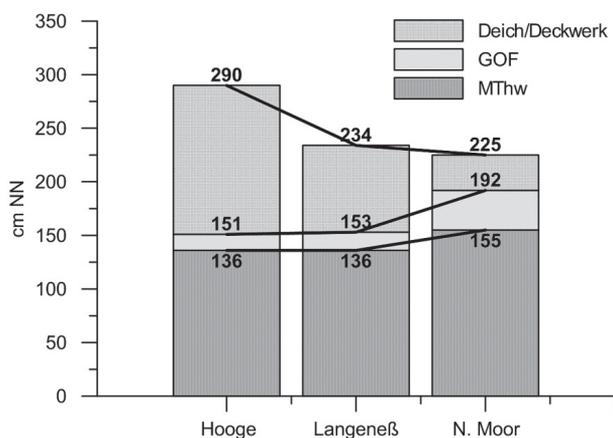


Abbildung 4: Mittlere Bezugshöhen der Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor über Normalnull (NHN). Dargestellt sind das mittlere Tidehochwasser (MThw), die mittlere Geländeoberfläche (GOF) und die mittlere Höhe der Sommerdeiche (Hooge und Langeneß) bzw. nicht Wasser permeablen Deckwerke (Nordstrandischmoor).

Um die Referenzhöhen der Binnenpegelschwellenwerte objektiv nach hydrologischen Gesichtspunkten bewerten zu können, ist deren Konvertierung in relative Höhen mit Bezug auf das regionale MThw notwendig (Tab. 3). Da auf Langeneß die berechnete mittlere Geländehöhe eine große Standardabweichung besitzt, wurde die Fläche der Hallig nochmals in die Areale der ehemaligen Halligen Nordmarsch (westlicher Teil) und Alt-Langeneß (östlicher Teil, vgl. (MÜLLER und FISCHER 1917)) unterteilt. Auch wenn Langeneß einheitlich betrachtet mit 17 cm ü. MThw geringfügig höher liegt als Hooge, ist das westlich gelegenen Nordmarsch mit lediglich 7 cm ü. MThw die am tiefsten gelegene aller betrachteten Halligmarschen.

Für die Berechnung der Außenpegelschwellenwerte  $H_{A(LU)}$  und  $H_{A(vLU)}$  anhand parallel vorhandener Zeitreihen von Außen- und zugehörigen Binnenpegeln standen jeweils Zeitreihen von 30 Monaten zur Verfügung. Die Anzahl der im Zeitraum beobachteten

Überschreitungen der Binnenpegelschwellenwerte für LU und vLU sowie die nach Formel (1) und Formel (2) berechneten Außenpegelschwellenwerte bezogen auf den Pegelnullpunkt (PNP) sind der Tab. 4 zu entnehmen. Eine größere Summe an vLU im Vergleich zu LU (Alt-Langeneß und Nordstrandischmoor) ist auf die Eliminierung der Folgetiden bei der Berechnung der LU Außenpegelschwellenwerte zurückzuführen. Auffällig ist die kleine Varianz von  $H_A(LU/vLU)$ , welche oftmals unter 1 % liegt. Die maximale Varianz beträgt 4.6 % für den Außenpegelschwellenwert  $H_A(LU)$  auf Alt-Langeneß (n=17).

Tabelle 3: Referenzhöhen der Binnenpegelschwellenwerte für Land unter (LU) sowie vollständige Land unter Ereignisse (vLU) bezogen auf Normalnull (NHN) sowie das mittlere Tidehochwasser (MThw).

Hallig	Geländehöhe (LU)		Deich / Deckwerk (vLU)	
	cm NHN	cm MThw	cm NHN	cm MThw
Hooge	151 ± 24	15	290 ± 21	154
Langeneß	153 ± 40	17	234 ± 19	98
(Alt-Langeneß)	162 ± 38	26	240 ± 16	104
(Nordmarsch)	143 ± 38	7	227 ± 20	91
Nordstrandischmoor	192 ± 28	37	225 ± 19	70

Die im ausgewerteten Zeitraum 1952 bis 2011 sturmflutaktivste Periode mit 14 (Hooge) bzw. 26 (Langeneß) LU pro Jahr ist das Wasserwirtschaftsjahr (WW) 1990. Prozentual erreichen auf Langeneß 58 % (Alt-Langeneß) bis 65 % (Nordmarsch) aller LU Ereignisse das Niveau eines vLU mit einer kompletten Füllung der Hallig bis zur mittleren Deichhöhe. Auf Hooge entwickeln sich lediglich 50 % aller Ereignisse zu einem vLU.

Tabelle 4: Außenpegelschwellenwerte  $H_A(LU/vLU)$  bezogen auf den Pegelnullpunkt (PNP) zur Berechnung langjähriger Überflutungshäufigkeiten für Land unter (LU) und vollständige Land unter (vLU) Ereignisse anhand der den Halligen zugeordneten Außenpegel. (RSD) Variationskoeffizient der angepassten Schwellenwerte. (n) Anzahl der zur Berechnung genutzten Wasserstände am Außenpegel.

Hallig	HA (LU)	RSD	n	HA (vLU)	RSD	n
	cm ü. PNP	%		cm ü. PNP	%	
Hooge						
(Hooger Anleger)	772,7	2,1	13	806,0	0,3	3
Alt-Langeneß (Wyk/Föhr)	740,4	4,6	17	772,7	0,9	15
Nordmarsch (Wyk/Föhr)	737,0	0,7	14	758,5	0,8	17
Nordstrandischmoor (Strucklahnungshörn)	744,6	0,9	32	761,4	2,1	35

Der Pegel Strucklahnungshörn, welcher als nächster verfügbarer Außenpegel der Hallig Nordstrandischmoor zugeordnet ist, stellt lediglich für die WW 1995–2011 Wasserstandsdaten bereit. Das überflutungsreichste Jahr im Beobachtungszeitraum ist das WW 2007 mit 28 LU. 64 % aller Ereignisse erreichen das Niveau einer vollständigen Überflutung (vLU).

Trendanalysen der jährlichen Überflutungshäufigkeiten (9-jähriges gleitendes Mittel) zeigen auf Hallig Langeneß eine Verdopplung der LU Anzahlen von 6 auf max. 12 Ereignisse in einem Zeitraum seit Beginn der Pegelaufzeichnungen 1951 bis Mitte der 1980er Jahre. Mit Ende der 1990er kehrt sich dieser Trend um. Hallig Hooge zeigt eine vergleichbare Trendentwicklung der LU Ereignisse. Sowohl Zunahme als auch erneutes Sinken der LU Häufigkeiten um den Zeitraum häufiger Überflutungen (1985–2000), fallen wesentlich sprunghafter aus als auf Langeneß. Innerhalb einer Zeitspanne von lediglich 5 Jahren (1994–1999) fällt das 9-jährige Mittel der Überflutungsanzahlen (LU) von 5 auf 3 Ereignisse pro Jahr. Die mittlere Anzahl der vLU folgt dem Trend der LU im Rahmen der allgemeinen Differenz zwischen LU und vLU Häufigkeiten. Aufgrund der kurzen Zeitreihe des Pegels Strucklahnungshörn von lediglich 16 Jahren 1995–2011 konnte für Nordstrandischmoor keine Trendanalyse der Überflutungshäufigkeiten erstellt werden.

Die Darstellung mittlerer Überflutungshäufigkeiten als 10-jähriges Mittel in dekadischer Form (Tab. 5) ermöglicht sowohl einen einfachen visuellen Vergleich der Halligen untereinander als auch den Vergleich mit Referenzwasserständen der Pegelhaupttabellen betreffender Außenpegel. Der Vergleich der Halligen untereinander zeigt eine deutliche Zunahme der Überflutungsanzahlen von Hooge über Langeneß zu Nordstrandischmoor. Während die jährlichen Überflutungsanzahlen zwischen Nordstrandischmoor und Alt-Langeneß/Nordmarsch im Zeitraum (2001–2010) lediglich um den Faktor 1,5 (LU) bis 2 (vLU) variieren, wurde Nordstrandischmoor 7- bis 10-fach häufiger überflutet als Hooge. Auch die dekadische Darstellung der Überflutungshäufigkeiten von Hooge und Langeneß verweist auf eine erhöhte Überflutungsfrequenz während der 1980er und 1990er Jahre. Das dekadische Mittel der höchsten jährlichen Tidehochwasserstände (MHThw) am Pegel Wyk auf Föhr zeigt im selben Zeitraum einen deutlichen Anstieg der Extremwasserstände.

Tabelle 5: Dekadische Aufstellung der mittleren jährlichen Häufigkeit von Land unter (LU) und vollständigen (vLU) Ereignissen auf den Halligen, sowie des MHThw nach der Pegelhaupttabelle (Wyk/Föhr).

Hallig	1961–1970 LU (vLU) /a	1971–1980 LU (vLU) /a	1981–1990 LU (vLU) /a	1991–2000 LU (vLU) /a	2001–2010 LU (vLU) /a
Hooge			4 (2)	4 (2)	2 (1)
Alt-Langeneß	6 (3)	6 (5)	11 (5)	11 (3)	9 (3)
Nordmarsch	7 (4)	7 (3)	12 (7)	12 (6)	10 (5)
Nordstrandischmoor					15 (10)
MHThw Wyk (cm NHN)	315	308	343	346	312

### 3.2 Bestimmung der Bodendichte und des organischen Anteils

Die Halligböden sind als junge, grundwasserbeeinflusste Gleye zu klassifizieren. Die obersten ca. 80 cm des Bodens sind nicht permanent wassergesättigt und durch braunrote Oxidationsfarben gekennzeichnet. Die Trockenraumdichte und der Glühverlust variieren deutlich mit der Tiefe (Abb. 5). Während in den Bohrkernen von Hooge und Langeneß beide Parameter mit deutlicher Krümmung nach unten hin zu (BDD) bzw. abnehmen (LOI) ist diese Tendenz auf Nordstrandischmoor weniger stark ausgeprägt.

BDD Werte variieren zwischen ca. 0,3 g/cm<sup>3</sup> an der Oberfläche und bis zu ca. 1,4 g/cm<sup>3</sup> in größerer Tiefe. Der Gehalt an organischer Substanz ist deutlich höher in den Böden von Hooge und Langeneß (>30 %) als von Nordstrandischmoor (>15 %).

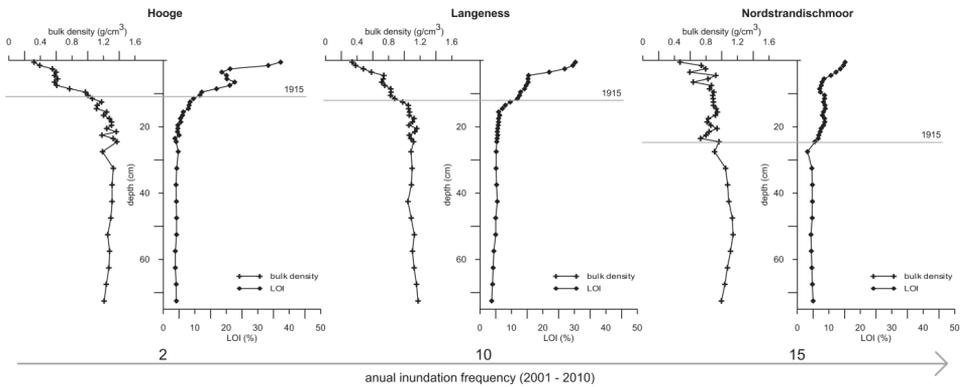


Abbildung 5: Mittlere BDD und LOI Werte als Proxies für organische Bodensubstanz bestimmt an Rammkernen von 2011 (a) Hooge, n=4, (b) Langeneß, n=6 (b) Nordstrandischmoor, n=2. Auflösung in 1 cm Abschnitten bis 25 cm Tiefe, darunter 5 cm. Der Horizont von 1915 markiert den Deichbau auf den Halligen und damit einhergehende hydraulische und sedimentologische Veränderungen.

Wegen der hohen Korrelation zwischen LOI und BDD ( $R^2=0.93$ ,  $p < 0.001$ ), ist es wahrscheinlich, dass Abbauprozesse organischer Substanz in den oberen Bodenhorizonten die Zunahme der Trockenraumdichte bedingt. BARTHOLDY et al. (2010a) finden ähnliche Zusammenhänge für vergleichbare Marschen im dänischen Wattenmeer. Unterhalb von 30 cm unter GOK zeigen BDD und LOI in den Halligböden nur noch geringe Variationen. LOI Werte sind mit 4–5 % nahezu konstant. Unter Einbeziehung des Kristallwasserfehlers tendiert der Gehalt an organischer Substanz gegen Null.

Tabelle 6: Tiefe des Markerhorizontes (Deichbau 1915), mittlere BDD, sowie Gehalte organischer Substanz im Boden (LOI<sub>soil</sub>, Werte für den Zeitraum 1915–2011) und in den Sedimentfallen (Typ A) (LOI trap). BDD und LOI finden Eingang in die Berechnung der Sedimentaufwuchsraten.

	Tiefe (1915) (cm unter GOK)	BDD >1915 (g/cm <sup>3</sup> )	LOI <sub>soil</sub> >1915 (%)	LOI trap (Typ A) (%)
Hooge	10.8 ± 1.6	0.64 ± 0.17	21.4 ± 6.6	8.0 ± 9.0
Langeneß	12.0 ± 2.6	0.67 ± 0.16	18.4 ± 5.9	7.0 ± 2.8
N. Moor	24.9 ± 0.7	0.83 ± 0.09	9.0 ± 1.4	5.7 ± 2.0

Der organische Anteil im Boden rührt einerseits von abgestorbener Vegetation her, andererseits bringen Überflutungswässer ebenfalls organische Substanz mit. Die Gehalte an Organik in den Sedimentfallen sind allerdings deutlich niedriger als die Gehalte in den oberen 30 cm des Bodens (Tab. 6). Auffällig ist der Organikgehalt der Sedimente vor dem Deichbau von 1915 (MÜLLER und FISCHER 1917), der deutlich niedrigere Werte aufweist als in der Zeit danach. Dieses Ergebnis ist in guter Übereinstimmung mit Untersuchungen von Marschböden durch CRAFT et al. (1993), wobei Marschen, die nur gelegentlich überflutet werden, einen höheren Organikgehalt aufweisen als solche, die

regelmäßig überflutet werden. Durch den Deichbau auf den Halligen Hooge und Langeneß bzw. der Uferbefestigung auf Nordstrandischmoor kam es vermutlich zu einer deutlichen Reduzierung der Überflutungshäufigkeiten und die seit 1915 deutlich angestiegenen Organikgehalte im Boden passen dazu.

### 3.3 Messung der vertikalen Aufwuchsraten

#### 3.3.1 Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor

Es besteht ein deutlicher Unterschied zwischen den Raten der bedachten Halligen Hooge und Langeneß gegenüber der nur mit einem Rauhstreifen umgebenen Hallig Nordstrandischmoor. Nordstrandischmoor wächst derzeit auf Basis des Zeitraumes 2010–2013 pro Jahr ca. 1 mm schneller als die beiden anderen Halligen (Tab. 7). Die Ergebnisse der Radionuklidatierungen sind im Rahmen des Fehlers (vgl. Tab. 7) seit 1963 nicht unterscheidbar von den Raten aus den Sedimentfallenuntersuchungen. Wird der längere Zeitraum seit dem Deichbau betrachtet, so ergeben sich im Mittel geringfügig geringere Raten, da die Sedimentaufwuchsraten in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts niedriger waren als heute (vgl. Abb. 7)

Tabelle 7: Sedimentaufwuchsraten für unterschiedliche Zeiträume nach Radionuklidatierung sowie nach den Ergebnissen der Sedimentfallen.

	Radionuklidatierung #1	Radionuklidatierung #1	Radionuklidatierung #2	Sedimentfallen #3
[mm/a]	1963–1986	1986–2011	1915–2011	2010–2013
Hooge	1.3 ± 0.7	1.4 ± 0.6	1.0 ± 0.3	1.5 ± 0.9
Langeneß	1.9 ± 0.9	1.6 ± 0.7	1.2 ± 0.3	1.2 ± 0.8
N. Moor	3.1 ± 1.9	3.2 ± 1.6	2.6 ± 0.9	2.6 ± 0.9

#1: Raten nach  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{210}\text{Pb}$  wurden gemittelt; #2: Raten nach  $^{210}\text{Pb}$ ; #3: Mediane Raten Fallentypen A und B wurden gemittelt.

Der Sedimentaufwuchs der einzelnen Halligen variiert deutlich von Jahr zu Jahr (Abb. 6) wobei kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Überflutungshäufigkeit und Sedimentakkumulation besteht. Es zeigt sich, dass die Rangfolge der Halligen in allen untersuchten Jahren gleich bleibt – Langeneß < Hooge < Nordstrandischmoor – und dass ein sturmflutreicher Winter wie 2011/2012 tendenziell mehr Sediment bringt als ein sturmflutärmerer. Ein scheinbarer Widerspruch besteht jedoch zwischen der Beobachtung, dass Langeneß stets gleiche oder geringere Wachstumsraten als Hooge aufweist, wohingegen die Überflutungsanzahl immer deutlich höher liegt. Die Differenz zwischen MThw und dem nicht permeablen Deckwerk ist auf Langeneß im Mittel 58 cm niedriger als auf Hooge (vgl. Abb. 4). Dies kann als Hinweis interpretiert werden, dass kleinere Landunter, deren Pegelstände zwar ausreichen um Langeneß zu überfluten (Hooge aber noch trocken liegt) keine oder nur sehr geringe Sedimentmengen mit sich bringen, während die Hauptsedimentmenge nur während höherer Sturmfluten abgelagert wird, die sowohl Langeneß als auch Hooge überfluten.

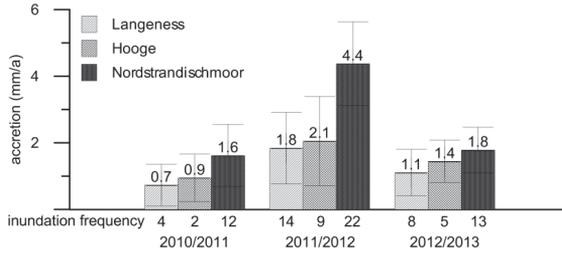


Abbildung 6: Mediane Sedimentaufwuchsraten für drei Beobachtungszeiträume (jeweils Oktober bis März, 2010 bis 2013) im Vergleich mit der Überflutungsanzahl (LU).

Vergleicht man die durch ein 19-jähriges gleitendes Mittel geglättete Kurve der jährlichen Anzahl der Sturmfluten >Deckwerkshöhe Hooge, 1,54 m NHN mit den Sedimentaufwuchsraten auf Basis der <sup>210</sup>Pb Datierungen so ergibt sich ein Zusammenhang (Abb. 7), der bei 4 von 12 Rammkernen statistisch signifikant ( $p < 0.1$ ) ist (exemplarisch Abb. 8).

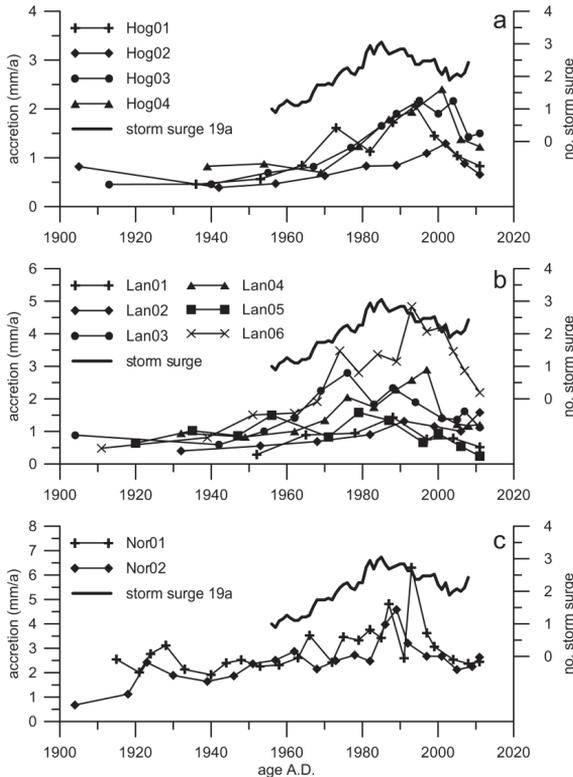


Abbildung 7: Vergleich der mittleren Sedimentaufwuchsraten (a) Hooge, (b) Langeneß und (c) Nordstrandischmoor mit der Sturmfluthäufigkeit. Die Sturmfluthäufigkeit beruht auf dem 19-jährigen gleitenden Mittel der jährlichen Überschreitungsanzahlen (1,54 m ü mThw) am Pegel Wyk auf Föhr.

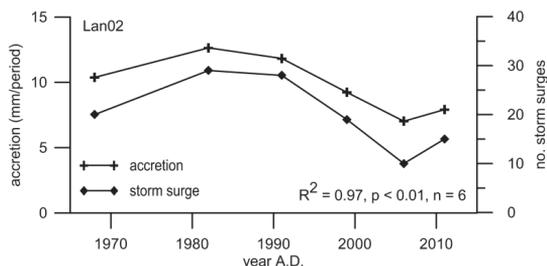


Abbildung 8: Sedimentaufwuchs (nach <sup>210</sup>Pb Alter) im Bohrkern Langeneß 2, verglichen mit der Anzahl an Sturmfluten über 1,54 m über MThw (MThw (Hooge) = 1,36 m über NHN im Zeitraum 2001–2010).

### 3.3.2 Ostfriesische Inseln Juist und Norderney

Messungen der Sedimentaufwuchsraten wurden auf Juist und Norderney in den Winterhalbjahren 2011–2012 und 2012–2013 durchgeführt. Das entsprechende Versuchsfeld liegt auf Juist südlich des eingedeichten Billpolders, auf Norderney östlich des Grohdepolders. Beide Flächen werden bei hohen Tidewasserständen überflutet. Exakte Informationen bezüglich der Überflutungswasserstände und Überflutungshäufigkeiten lagen zum Zeitpunkt der Berichtslegung nicht vor. Die Anzahl sowie die Anordnung der Sedimentfallen variierte zwischen den Jahren. Während in 2011–2012 lediglich 5 Fallenkombinationen A + B installiert waren, wurde das Messnetz im folgenden Winterhalbjahr auf 14 Standorte (Norderney) sowie 20 Standorte (Juist) erweitert. Da nur ungenügende Informationen bezüglich bodenphysikalischer Parameter vorlagen, wurden zur Berechnung der vertikalen Wachstumsraten BDD und LOI Werte der Hallig Hooge adaptiert. Die Wachstumsraten der beprobten Inselmarschflächen liegen im Bereich weniger Millimeter pro Jahr und entsprechen somit denen der Halligen (Tab. 8). Das Gelände südlich des Billpolders auf Juist liegt topographisch höher über dem MThw als die Fläche östlich des Grohdepolders auf Norderney. Dies erklärt, warum die mittleren Aufwuchsraten auf der Versuchsfläche Juist wesentlich geringer sind als die auf Versuchsfläche Norderney.

Tabelle 8: Vertikales Marschwachstum [mm/a] auf Juist und Norderney im Zeitraum von 2011–2013. Die angegebenen Daten sind Mittelwerte der beiden Sedimentfallentypen A (Flasche) und B (Matte).

[mm/a]	2011–2012	2012–2013
Norderney (östl. Grohdepolder)	2.5±1.0	2.3±0.9
Juist (südl. Billpolder)	1.3±0.4	0.2±0.1

### 3.3.3 Isostatische Landbewegung und Kompaktion tieferer Schichten

VINK et al. (2007) errechnen für den Zeitraum der letzten 8000 Jahre eine maximale isostatische Krustenbewegung von ca. -7,5 m entlang einer gedachten Linie von der niedersächsischen Nordseeküste bis zur Dogger Bank. In Richtung des ehemaligen Fennoskandinavischen Eischildes, nordöstlich der Linie maximaler Subsidenz und damit

in Richtung des Untersuchungsgebietes, nimmt die Rate der isostatischen Krustenbewegung ab, bis sich deren Bewegungsrichtung schließlich umkehrt. MÖRNER (1980) verortet die Kippachse der beiden gegenläufigen Bewegungsrichtungen entlang einer gedachten Linie von Rügen zur nordwestlichen Küste Dänemarks. Die isostatische Krustenbewegung im Bereich des Untersuchungsgebietes lässt sich somit auf eine Wertespanne zwischen 0 und -7.5 m (0–0.9 mm/a) für einen Zeitraum der letzten 8000 Jahre eingrenzen. Wird nun noch berücksichtigt, dass sich die Bewegungsgeschwindigkeit zusehends verlangsamt, kann der Prozess der isostatischen Krustenbewegung für die rezente Betrachtung vertikaler Landbewegungen im Bereich der Nordfriesischen Wattenmeer Küste lediglich von marginaler Bedeutung sein. VINK et al. (2007) errechnen für die kürzere Zeitspanne der letzten 5000 Jahre für die Deutsche Küste lediglich Subsidenzraten von  $\approx 0,4$  mm/a.

Setzungsprozesse junger Marschsedimente sind eng mit dem Vorkommen von Torflagen verknüpft, welche im Zuge steigender Auflast einer Kompaktion unterliegen (LONG et al. 2006). Die Auswertung der verfügbaren Baugrundgutachten, welche Informationen bezüglich der Zusammensetzung des Holozänen Sedimentkörpers unterhalb der Halligen liefern, zeigen lediglich unterhalb Nordstrandischmoor Torflagen mit einer Mächtigkeit von 0.7 bis maximal 2.2 m. Unterhalb der Hallig Hooge und Langeneß konnten organische Einschaltungen lediglich mit einer Mächtigkeit von wenigen Dezimetern verortet werden. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass der Datenbestand lediglich punktuelle Informationen für den Bereich des Sedimentkörpers unterhalb einzelner Warften zulässt und Aussagen somit nicht als allgemeingültig für die betreffende Hallig gelten können. Vom derzeitigen Wissensstand würden für den Sedimentkörper unterhalb von Nordstrandischmoor ein größeres Senkungspotential relativ zu Hooge und Langeneß erwartet werden. Stellungnahmen zu erwarteten Senkungsprozessen im Rahmen baulicher Maßnahmen (Verfüllung von Fethingen, Warftabflachung) unterstützen diese These.

## 3.4 Sedimentverteilung und Topographie der Halligen

### 3.4.1 Sedimentverteilung

Die Sedimentverteilung wurde als dreijähriges Mittel der vertikalen Aufwuchsraten aus den Sedimentfallenkombinationen A und B berechnet (Tab. 7). Die Verteilungskarten zeigen unterschiedliche Verteilungsmuster der Überflutungssedimente auf den Halligen. Obwohl die Distanz zwischen den Fallenstandorten mit 400x400 m recht groß ist, zeigen sich Verteilungsmuster, welche teilweise mit naturbelassenen Tidenmarschen vergleichbar sind (Abb. 9). Im Allgemeinen verringern sich die Raten mit steigender Entfernung des Beobachtungspunktes zur Uferlinie und den Sediment führenden Binnenprielern (TEMMERMAN et al. 2003; D'ALPAOS et al. 2007; BARTHOLDY et al. 2010b).

Hallig Hooge zeigt einen Gradienten ansteigender Wachstumsraten vom südwestlichen Ufer in Richtung Nordosten. Somit sind die Bereiche der höchsten Depositionsraten zwar in Ufernähe gelegen, auffällig ist aber, dass diese sich nicht in Hauptwindrichtung (Südwesten) befinden, sondern auf der Leeseite (Nordosten) exponiert sind. In Hauptwindrichtung befindet sich ein küstenparalleler Bereich der binnenseitig des Deckwerks untypisch niedrige Aufwuchsraten (0.7 bis 1.1 mm/a) aufweist. Im westlichen und

östlichen Langeneß sind Bereiche hoher Wachstumsraten direkt binnenseitig hinter den Deckwerken gelegen. Maximalwerte wurden jeweils in der Nähe der größten Siele gemessen, welche die Hallig nach einer Überflutung entwässern. Diese sind das Osterwehl (3.8 mm/a) sowie der Jelf (3.4 mm/a) (Abb. 9). Mit zunehmender Entfernung von den Deckwerken sinken die jährlichen Wachstumsraten auf Werte  $<1$  mm/a. Im mittleren Bereich der Hallig, wo die Distanz zwischen Nord- und Südufer lediglich 600 m entspricht, beträgt der jährliche Sedimentaufwuchs ebenfalls  $<1$  mm/a.

Regressionsanalysen bezüglich eines möglichen Zusammenhangs zwischen der punktuell erfassten Sedimentdeposition und räumlichen Variablen (Überflutungshöhe, Distanz zu Ufer, Deckwerken und Sielen) zeigen, dass besonders zwei Variablen einen nachweisbaren Einfluss auf die Sedimentdeposition haben. Diese sind die Distanz zwischen Sielen und Observationspunkt sowie die Distanz zwischen Uferlinie und Observationspunkt. In beiden Fällen resultiert die Zunahme der Distanz in einer signifikanten Abnahme der Sedimentdeposition und damit des vertikalen Wachstums ( $p < 0.05$ ). Es bleibt jedoch festzustellen, dass die Beziehung für die Distanz zu den Sieltoren lediglich auf Hooge signifikant ist, während auf Langeneß die Sedimentverteilung über die Distanz zwischen Observationspunkt und der Uferlinie gesteuert wird ( $p < 0.05$ ). Weiter zeigen Observationspunkte, welche in großer Entfernung zur Uferlinie liegen, jedoch direkt zu einem Binnenpriel benachbart sind, keine höheren Aufwuchsraten als Observationspunkte, welche sowohl entfernt zur Uferlinie als auch den Prielen gelegen sind. Somit kann Langeneß nach D'ALPAOS et al. (2007) zu den transportlimitierten Landschaften gezählt werden. Die Entkopplung der Binnenpriele vom Tidegeschehen durch automatisch schließende Sieltore verhindert einen effektiven Sedimenttransport und damit die Verteilung von Überflutungssedimenten im Hinterland. Observationspunkte, an denen die höchsten Aufwuchsraten beobachtet werden, liegen sowohl auf Hooge als auch auf Langeneß benachbart zu großen Sielanlagen (Abb. 9). Für diese Beobachtung erscheinen zwei Überlegungen plausibel. (i) Zu Beginn eines Überflutungsereignisses strömt Seewasser über das Deckwerk und sammelt sich zunächst im sielnahen Binnenpriel. Durch turbulente Strömungsbedingungen werden Sedimente der Prielsonne mobilisiert und zum Zeitpunkt des Überlaufens des Gerinnes auf benachbarten Flächen deponiert. (ii) Nach einer Überflutung wird die Hallig primär über die großen Sielanlagen entwässert. Eine Umlagerung von Überflutungssedimenten durch abfließendes Wasser in Richtung der Sielanlagen kann nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Aufgrund der kleinen Fläche von lediglich  $1.6 \text{ km}^2$  besitzt Nordstrandischmoor lediglich 12 Observationspunkte und zeigt eine eher chaotische Sedimentverteilung (Abb. 9). Ein Zusammenhang zwischen Sedimentverteilung und räumlichen Parametern konnte nicht nachgewiesen werden.

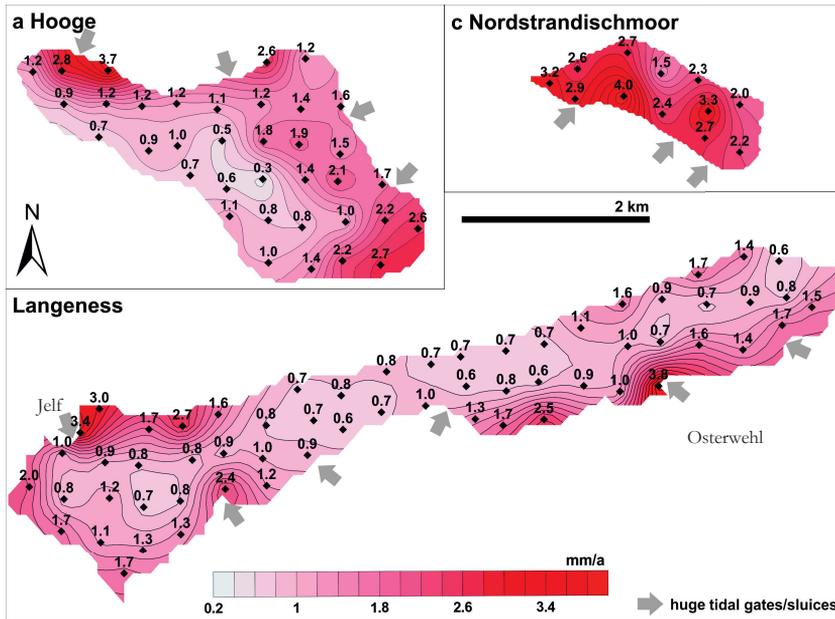


Abbildung 9: Verteilungskarten der Sedimentaufwuchsraten für die untersuchten Halligen. Dargestellt sind die Mittelwerte der Sedimentfallenuntersuchungen aus drei Jahren. Isolinien wurden mit linearem Kriging ohne Drift berechnet.

### 3.4.2 Topographie

Digitale Geländemodelle der Halligen (Abb. 10) basieren auf LIDAR Befliegungen des Jahres 2005 und zeigen deutliche Reliefunterschiede auf den Halligen. Mit einer Auflösung von 1 x 1 m und einer Höhengenaugigkeit von  $\pm 15$  cm können selbst mikroskalige Reliefelemente wie beispielsweise Uferwallstrukturen an Binnenpielen, deren Höhe im unteren Dezimeterbereich liegen, abgebildet werden. Neben den Uferwallstrukturen sind die Bereiche binnenseitig der Deckwerke in einem Bereich von 100 bis 200 m deutlich gegenüber den zentralen Flächen erhöht. Somit wäre die generelle Topographie der Halligmarsch mit denen einer natürlichen Salzmarsch vergleichbar (vgl. (TEMMERMAN et al. 2003; D'ALPAOS et al. 2007; BARTHOLDY et al. 2010b)). Allerdings weisen Messungen des Sedimentaufwuchses rechtwinklig zu Binnenpielen darauf hin, dass die Unterschiede im heutigen Sedimentaufwuchs wesentlich geringer sind als die im Geländemodell beobachteten Reliefunterschiede. Dies spricht eher dafür, dass diese morphologischen Strukturen älteren Datums sind und heute in dieser Form nicht mehr von der Sedimentation unterstützt werden.

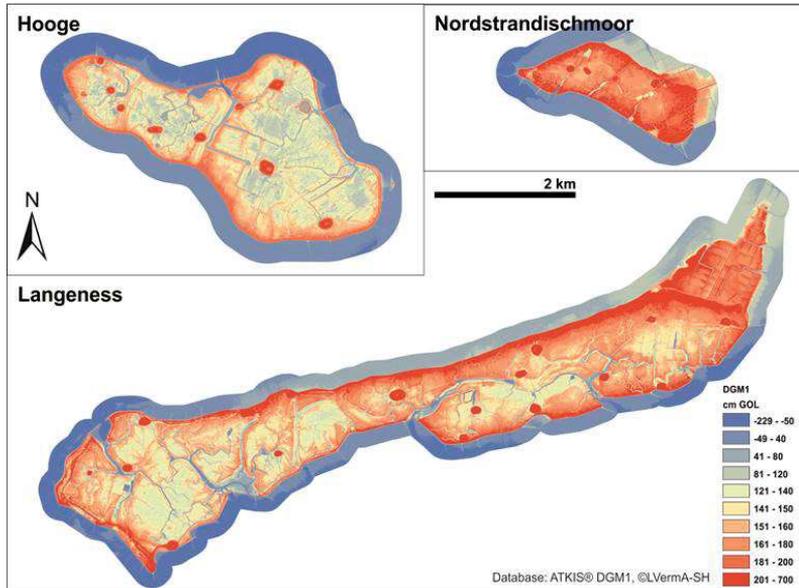


Abbildung 10: Digitales Geländemodell der Halligen Hooge, Langeneß und Nordstrandischmoor basierend auf LIDAR Daten (2005) mit einer Auflösung von 1 x 1 m.

#### 4 Fazit

Die Hauptziele der vorliegenden Studie waren die Beantwortung der eingangs gestellten Fragen:

- Wie hoch ist das mittlere vertikale Marschwachstum durch Sedimentablagerung (Sedimentaufwuchs)?
- Welche Parameter steuern das Sedimentationsgeschehen auf den Halligen und Inseln?
- Wie ist die räumliche Verteilung der Sedimentablagerungen?
- Was tragen regionale Setzungsprozesse und Krustenbewegungen zu vertikalen Landbewegungen bei?

Basierend auf den Ergebnissen der Studie lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Der Sedimentaufwuchs auf den Halligen (aktuell Hooge 1,5 mm/a, Langeneß 1,2 mm/a, Norstrandischmoor 2,6 mm/a) reicht derzeit nicht aus, die aktuelle Wasserstandsentwicklung von MThw zu kompensieren. Das bedeutet, der Abstand zwischen MThw und Halligoberfläche wird zukünftig weiterhin zunehmen, wenn keine geeigneten Maßnahmen gefunden werden, um das System Hallig wieder ins Gleichgewicht mit der Meeresspiegeländerung zu bringen. Daraus ergibt sich eine zunehmende Gefährdung für Warften und Bewohner auf Grund der zu erwartenden höheren hydrodynamischen Belastungen
- Die Sedimentdeposition der einzelnen Halligen ist unterschiedlich und wird auf den Halligen Hooge und Langeneß maßgeblich von der auftretenden Anzahl von

Sturmfluten gesteuert, die das Niveau des Hooger Sommerdeiches übersteigen. Nordstrandischmoor dagegen profitiert auch von geringeren Überflutungshöhen.

- Die Sedimente lagern sich derzeit auf der Hallig Langeneß bevorzugt in ufernahen Bereichen ab, auf Hooge scheint eine Beziehung zu den Sieltorauslässen zu bestehen, während die Verteilung der Sedimente auf Nordstrandischmoor weitgehend gleichmäßig über die gesamte Fläche geschieht. Ehemalige Sedimentakkumulationsgebiete entlang der Ufer von Binnenprielen sind heute nicht mehr aktiv. Dies resultiert wahrscheinlich aus um 1915 erfolgten Küstenschutzmaßnahmen (Deich- und Deckwerksbau, Entwässerung über Sieltore).
- Die durch Isostasie verursachten Subzidenzraten lassen sich für die vergangenen 8000 Jahre im Untersuchungsgebiet auf 0–0.9 mm/a bzw. für die vergangenen 5000 Jahre auf nur noch 0.4 mm/a beziffern. Daher ist der Effekt für das Untersuchungsgebiet vermutlich zu vernachlässigen. Setzungen, die durch Torfablagerungen im Untergrund bedingt werden, lassen sich nicht quantifizieren, sollten nach den vorliegenden Daten aber höchstens auf Nordstrandischmoor einen geringen flächenhaften Effekt haben.
- Zukünftige Forschung sollte sich u. a. auf die Frage konzentrieren, wie sich die Sedimentakkumulation auf den Halligen steigern lässt und unter welchen hydrologischen und meteorologischen Bedingungen eine ausreichende Sedimentverfügbarkeit gegeben ist. Dazu sind z. B. Trübungsmessungen und Sedimenttransportmodellierungen geeignet.

## 5 Schriftenverzeichnis

- APPLEBY, P.G.: Chronostratigraphic Techniques in Recent Sediments. In: LAST, W.M. and SMOL, J.P. (Hg.): Tracking Environmental Change Using Lake Sediments, Bd. 1: Springer Netherlands (Developments in Paleoenvironmental Research), 171–203, 2001.  
[http://dx.doi.org/10.1007/0-306-47669-X\\_9](http://dx.doi.org/10.1007/0-306-47669-X_9)
- APPLEBY, P.G. and OLDFIELD, F.: The calculation of lead – 210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported 210Pb to the sediment. CATENA 5 (1), S. 1–8, 1978.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0341-8162\(78\)80002-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0341-8162(78)80002-2)
- APPLEBY, P.G. and OLDFIELD, F.: The assessment of 210Pb data from sites with varying sediment accumulation rates. Hydrobiologia 103 (1), 29–35, 1983.
- ASSELMAN, N.E.M. and MIDDELKOOP, H.: Floodplain sedimentation: Quantities, patterns and processes. Earth Surf. Process. Landforms 20 (6), 481–499, 1995.
- BARTHOLDY, A.T.; BARTHOLDY, J. and KROON, A.: Salt marsh stability and patterns of sedimentation across a backbarrier platform. In: Marine Geology 278 (1–4), 31–42, 2010a.
- BARTHOLDY, A.T.; BARTHOLDY, J. and KROON, A.: Salt marsh stability and patterns of sedimentation across a backbarrier platform. In: Marine Geology 278 (1–4), 31–42, 2010b.
- CALLAWAY, J.C.; DELAUNE, R.D. and PATRICK, W.H.: Chernobyl 137Cs used to determine sediment accretion rates at selected northern European coastal wetlands. In: Limnology and Oceanography 41 (3), 444–450, 1996.

- CRAFT, C.B.; SENECA, E.D. and BROOME, S.W.: Vertical Accretion in Microtidal Regularly and Irregularly Flooded Estuarine Marshes. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 37 (4), 371–386, 1993.
- D'ALPAOS, A.; LANZONI, S.; MARANI, M. and RINALDO, A.: Landscape evolution in tidal embayments: Modeling the interplay of erosion, sedimentation, and vegetation dynamics. In: *Journal of Geophysical Research F: Earth Surface* 112 (1), 2007.
- DIBBER, S. und MÜLLER-NAVARA, S.: Wasserstände bei Sturmfluten entlang der nordfriesischen Küste. *Die Küste*, 76, 2009.
- GOODBRED, S. and KUEHL, S.: Floodplain processes in the Bengal Basin and the storage of Ganges-Brahmaputra river sediment: an accretion study using <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb geochronology. In: *Sedimentary Geology* 121 (3–4), 239–258, 1998.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6X-3VSP0K5-M/2/cfb872c631e220d52eed2cb023a4dd93>
- HOUSTON, J.R. and DEAN, R.G.: Accounting for the Nodal Tide to Improve Estimates of Sea Level Acceleration. *Journal of Coastal Research*, 801–807, 2011.
- JENSEN, J.; ARNS, A.; SCHÜTTRUMPF, H.; WÖFFLER, T.; HÄUBLING, R.; ZIESEN, N.; JENSEN, F.; VON EYNATTEN, H.; SCHINDLER, M. und KARIUS, V.: Zukunft Hallig – Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels. *Die Küste*, 84, 2016.
- JENSEN, J.: Abschlussbericht zur Entwicklung von nachhaltigen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien für die Halligen unter Berücksichtigung des Klimawandels (ZukunftHallig), 2014.
- KIRCHNER, G. and EHLERS, H.: Sediment Geochronology in Changing Coastal Environments. Potentials and Limitations of the <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb Methods. In: *Journal of Coastal Research* 14 (2), 483–492, 1998a.
- KIRCHNER, G. and EHLERS, H.: Sediment Geochronology in Changing Coastal Environments. Potentials and Limitations of the <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb Methods. In: *Journal of Coastal Research* 14 (2), 483–492, 1998b.
- LONG, A.J.; WALLER, M.P. and STUPPLES, P.: Driving mechanisms of coastal change. Peat compaction and the destruction of late Holocene coastal wetlands. In: *Marine Geology* 225 (1–4), 63–84, 2006.  
<http://dro.dur.ac.uk/1193/>
- MÖRNER, N.: The northwest European "sea-level laboratory" and regional holocene eustasy. In: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 29, 281–300, 1980.
- MÜLLER, F. und FISCHER, O.: Das Wasserwesen an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste. Teil 1, *Die Halligen*, 1917.
- SCHINDLER, M.; KARIUS, V.; DEICKE, M. and VON EYNATTEN, H.: Measuring sediment deposition and accretion on anthropogenic marshland – Part I: Methodical evaluation and development. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 151, 236–245, 2014a.
- SCHINDLER, M.; KARIUS, V.; DEICKE, M. and VON EYNATTEN, H.: Measuring sediment deposition and accretion on anthropogenic marshland – Part II: The adaptation capacity of the North Frisian Halligen to sea level rise. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 151, 246–255, 2014b.

- SCHUERCH, M.; RAPAGLIA, J.; LIEBETRAU, V.; VAFEIDIS, A. and REISE, K.: Salt Marsh Accretion and Storm Tide Variation: an Example from a Barrier Island in the North Sea. In: *Estuaries and Coasts* 35 (2), 486–500, 2012.
- TEMMERMAN, S.; GOVERS, G.; WARTEL, S. and MEIRE, P.: Spatial and temporal factors controlling short-term sedimentation in a salt and freshwater tidal marsh, Scheldt estuary, Belgium, SW Netherlands. In: *Earth Surf. Process. Landforms* 28 (7), 739–755, 2003.  
<http://dx.doi.org/10.1002/esp.495>
- VINK, A.; STEFFEN, H.; REINHARDT, L. and KAUFMANN, G.: Holocene relative sea-level change, isostatic subsidence and the radial viscosity structure of the mantle of northwest Europe (Belgium, the Netherlands, Germany, southern North Sea). In: *Quaternary Science Reviews* 26 (25–28), 3249–3275, 2007.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VBC-4PXG7NM-1/2/3c23053934568b9b88c872b04ec32dc2>
- WOODWORTH, P.L.: A Note on the Nodal Tide in Sea Level Records. *Journal of Coastal Research*. In: *Journal of Coastal Research*, 316–323, 2011.