

Risikoanalysen und Entwicklung neuer Küstenschutzkonzepte für die Halligen

Theide Wöfler und Holger Schüttrumpf

Zusammenfassung

Die im Bereich des Schleswig-Holsteinischen Wattenmeeres liegenden Inseln und Halligen sind im Wesentlichen durch Gezeiten, ausgedehnte Prielsysteme, das flache Relief des Meeresbodens und Sturmfluten geprägt. Die im Rahmen des Projekts ZukunftHallig (JENSEN 2014) zu untersuchenden, weltweit einzigartigen Halligen zeichnen sich vor allem dadurch aus, dass sie nicht eingedeicht und die Häuser der Bewohner zum Schutz vor Überflutungen auf Warften errichtet sind. Das vorrangige Ziel im Teilprojekt B (03KIS094) des Verbundprojektes „ZukunftHallig“ (JENSEN et al. 2016) ist die Entwicklung von nachhaltigen Bewirtschaftungskonzepten beziehungsweise Küstenschutzstrategien und -maßnahmen für die nordfriesischen Halligen. Dafür werden Impulse und Ideen im Rahmen von Zukunftworkshops generiert, bei denen die Halligbewohner ihre eigenen Ideen für neue Hochwasserschutzkonzepte unter wissenschaftlicher Begleitung entwickeln. Die anschließende wasserbauliche Bewertung stellt sicher, dass sowohl hydrodynamisch wirksame als auch von der Bevölkerung akzeptierte Maßnahmen identifiziert werden können. Die gewonnenen Ergebnisse stellen einen grundlegenden Beitrag für einen zukünftigen nachhaltigen Küstenschutz im Gebiet des nordfriesischen Wattenmeeres leisten und durch einzelne Teilergebnisse auch eine Erweiterung des Wissens für andere Küstenbereiche dar.

Schlagwörter

Halligen, Klimawandel, Meeresspiegelanstieg, nachhaltige Küstenschutzkonzepte, ZukunftHallig

Summary

The ten North Frisian Hallig islands are located in Schleswig-Holstein's part of the UNESCO world heritage Wadden Sea. They are of worldwide uniqueness and strongly influenced by tides, wide systems of tidal inlets and the shallow relief of the sea bottom. The unique features of these islands are the lack of dikes and the fact that the houses are built on artificial dwelling mounds in order to protect the inhabitants and their goods against frequently occurring inundations during storm surge seasons. In sub project B (03KIS094) of the research project "ZukunftHallig" (JENSEN 2014; JENSEN et al. 2016), new impulses and ideas for future protection measures are generated during future workshops where the inhabitants can develop their own coastal protection concepts under scientific advisory. The following evaluation from the hydraulic engineering perspective guarantee hydrodynamic effective and social accepted measures. The results provide a scientific contribution to future sustainable coastal protection measures in the area of the North Frisian Wadden Sea. Furthermore, partial results also represent an extension of knowledge for other coastal areas.

Keywords

small islands, climate change, sea level rise, sustainable coastal protection concepts, ZukunftHallig

Inhalt

1	Einleitung.....	68
2	Entwicklung von alternativen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien....	70
2.1	Bewertung der Ideen der Zukunftworkshops	71
2.2	Bepflanzung und Verbindung der Außensände	72
2.3	Raupflasterung der Warften.....	75
2.4	Mobiler Deichschlauch.....	76
2.5	Ringdeich als Wellenbrecher vor die Warft	78
2.6	Hydraulische Hochwasserschutzwand.....	82
2.7	Warftverstärkung durch Abflachung, Raupflasterung und Freiborderhöhung	83
2.8	Automatische Warfterhöhung durch Wasserkraft.....	87
2.9	Wirkungsvolle Schutzräume in den Häusern einrichten.....	88
2.10	Eindeichung des Wattenmeeres	88
3	Ergebnisse.....	89
3.1	Hydrodynamische Wirksamkeit	89
3.2	Betriebsicherheit.....	89
3.3	Bauaufwand	90
3.4	Landschaftsbild	90
3.5	Naturschutz	90
3.6	Akzeptanz	91
3.7	Ergebnis	91
4	Zusammenfassung und Ausblick	92
5	Schriftenverzeichnis	93

1 Einleitung

Die Abb. 1 zeigt das Untersuchungsgebiet des südlichen nordfriesischen Wattenmeeres mit den nordfriesischen Inseln und Halligen sowie typischen geomorphologischen Elementen wie den Außensänden, Prielen, Seegatts und Barren (EHLERS 1988). Anhand des Geländeprofils durch die Hallig Hooge wird eine Zuordnung der Arbeitspakete der folgenden Untersuchungen des Vorhabens ZukunftHallig-B zu den unterschiedlichen Teilbereichen der Halligen dargestellt.

Der Bereich A im unteren Teil der Abb. 1 umfasst das See- beziehungsweise Wattgebiet vor den Halligen. Für diesen Bereich wurden die vorherrschenden hydrologischen Bedingungen untersucht und der Aufbau eines numerischen Modells zur Simulation der Seegangsverhältnisse vorgenommen. Dieses Arbeitspaket dient somit der Bestimmung

der Randbedingungen der in den folgenden Schritten durchgeführten Untersuchungen für die übrigen Teilbereiche.

Der Bereich B beinhaltet das Gebiet der Halligkante. Für diesen Bereich wurden physikalische und numerische Untersuchungen zur Entwicklung eines Bemessungsansatzes für Halligraustreifen durchgeführt.

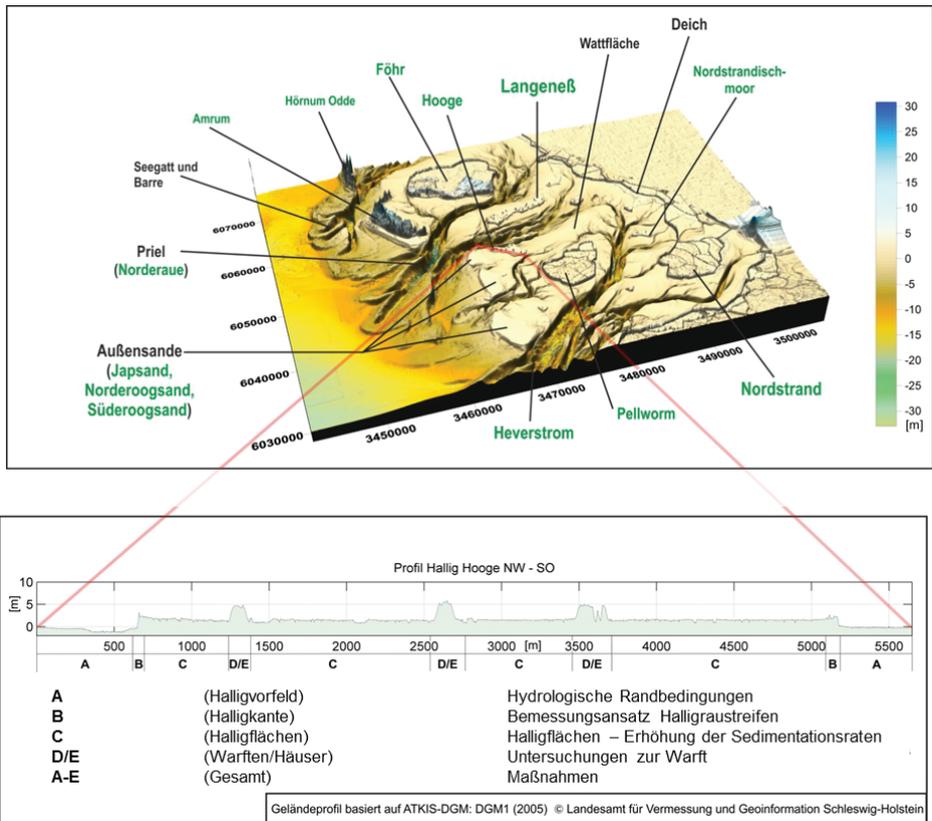


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet und Zuordnung der Untersuchungen zu den unterschiedlichen Halligabschnitten; Bathymetrie und Topographie des nordfriesischen Wattenmeeres (Verschnitt aus Wattgrundkarten, Seekarten, DGM1 und DGM25).

Der Bereich C umfasst die eigentlichen Halligflächen. Für diese wurden sowohl in-situ-Messungen im Entwässerungsgebiet der Siltoranlage Osterwehl als auch numerische Simulationen durchgeführt. Ziel der Untersuchungen für den Bereich der zentralen Halligflächen ist die Ermittlung von Maßnahmen, die eine Erhöhung der Sedimentationsraten bewirken. Dies kann beispielsweise durch ein Öffnen der Siltore bei bestimmten Wasserständen erreicht werden. Zum einen könnte so auf die Zahl der Landunter Einfluss genommen werden und zum anderen eine Flutung der Hallig über die Siltore erfolgen. Diese Maßnahme dient somit der Entwicklung einer neuen Küstenschutz- beziehungsweise Bewirtschaftungsstrategie, bei der mit der gezielten Flutung der Hallig zusätzliche Sedimente auf den Halligflächen abgelagert werden sollen.

Die Bereiche D und E umfassen die Warften (D) mit den darauf befindlichen Gebäuden (E). Für die Warften ist eine Ermittlung des Schutzstandards sowie eine risikoorientierte Gefährdungsanalyse durchgeführt worden. Im letzten Arbeitspaket wurden für die im Rahmen der soziologischen Begleitforschung mit den Halligbewohnern erarbeiteten Vorschläge für zukünftige Küstenschutzmaßnahmen Untersuchungen zur Machbarkeit und der hydrodynamischen Wirksamkeit durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen stellen den Hauptteil dieses Beitrags dar.

2 Entwicklung von alternativen Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien

Im Rahmen des Projektes wurden zwei Zukunftswerkshops auf den Halligen Hooge und Langeneß unter der Leitung des Instituts für Soziologie, Lehrstuhl Technik- und Organisationssoziologie (IfS) der RWTH Aachen durchgeführt. Das IfS lud zu diesem Workshop sowohl auf die Hallig Hooge am 17.06.2013 als auch auf die Hallig Langeneß am 18.06.2013 ein. Ziel der Workshops war es, die Halligbewohner und die im Verbundprojekt beteiligten Wissenschaftler zusammenzubringen und Raum für einen Dialog zu schaffen. Hierbei sollte es zu einem Austausch des fachlichen Wissens und der bereits gewonnenen Erkenntnisse aus dem Projekt seitens der Wissenschaftler mit den Erfahrungen und Wünschen der Bewohner kommen. Aus diesem Austausch ist eine Ideensammlung entstanden, die potentielle zukünftige Küstenschutzmaßnahmen hervorbringt. Dies soll zum einen technisch innovativ sein und zum anderen auf die Akzeptanz der Halligbewohner stoßen. Die Abb. 2 zeigt den Arbeitsablauf zwischen dem IfS und dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen University.

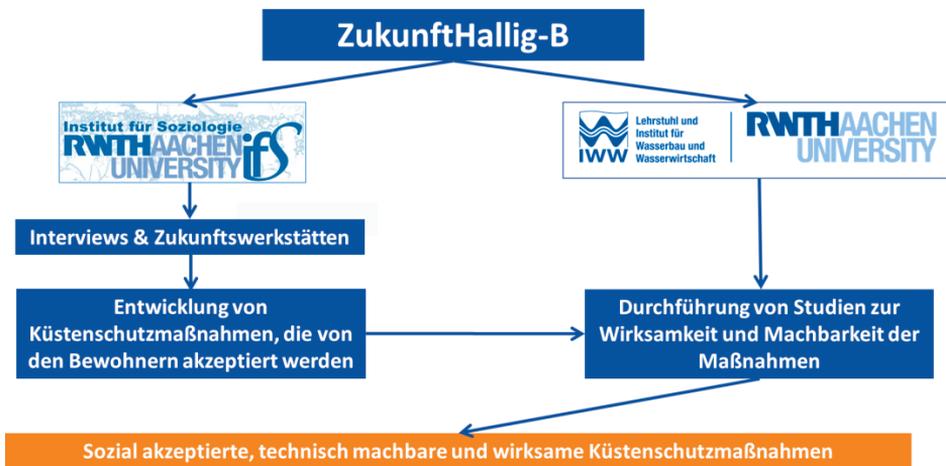


Abbildung 2: Kooperation zwischen dem IfS und dem IWW der RWTH Aachen University innerhalb des Vorhabens ZukunftHallig-B.

Während dieser Workshops entstand ein umfangreicher Katalog an Ideen für zukünftige Maßnahmen des Küstenschutzes auf den Halligen (JENSEN 2014). Im Folgenden befasst sich der vorliegende Beitrag mit der wasserbaulichen Bewertung ausgewählter Maßnahmen dieses Ideenkatalogs.

Dabei beschränkt sich die hier gezeigte Untersuchung auf die in der Tab. 1 dargestellten Ideen für Küstenschutzmaßnahmen, die in der dargestellten Reihenfolge von den Bewohnern der Halligen Hooge und Langeneß ausgewählt worden sind.

Tabelle 1: Von den Bewohnern ausgewählte Ideen für zukünftige Küstenschutzmaßnahmen zur weiteren Untersuchung.

Rang	Hooge	Langeneß
1	Verbindung/Bepflanzung der Außensande	Abflachung des Warftprofils
2	Raupflasterung der Warften	Hydraulische Warft
3	Mobiler Deichschlauch	Aufwartung/Anhebung der Häuser
4	Ringdeich um die Warft	Errichtung geeigneter Schutzräume
5	Hydraulische Hochwasserschutzwand	Eindeichung des Wattenmeeres

2.1 Bewertung der Ideen der Zukunftswerkshops

In den folgenden Kap. 2.2 bis 2.10 erfolgt eine Beschreibung und Bewertung der im Rahmen der Zukunftswerkshops auf Hooge und Langeneß entwickelten Ideen für zukünftige Küstenschutzmaßnahmen für die Halligen. Die Bewertung der hydrodynamischen Wirksamkeit der zukünftigen Küstenschutzmaßnahmen bezieht sich dabei auf die folgenden Parameter:

- Wasserstand
- Seegang
- Wellenüberlauf

Zur Bewertung der hydrodynamischen Wirksamkeit wurden einzelne Maßnahmen im numerischen Modell (Delft3D) umgesetzt und ihre Wirkung auf den Seegang simuliert. Delft3D verfügt dabei über das numerische Seegangsmodell SWAN (Simulating WAVes Nearshore) in der Version 40.41.

Die Bewertung der jeweiligen Machbarkeit der zukünftigen Küstenschutzmaßnahmen bezieht sich im Gegensatz dazu auf diese Aspekte:

- Betriebssicherheit
- Bauaufwand
- Landschaftsbild
- Naturschutz

Da die zu untersuchenden zehn Maßnahmen von den Halligbewohnern selbst entwickelt und für weitere Untersuchungen vorgeschlagen worden sind, ist von einer allgemeinen Akzeptanz der Maßnahmen auszugehen. Aus diesem Grund wird eine weitere Bewertung der Akzeptanz nicht vorgenommen.

Als ein vergleichbares Kriterium für die hydrodynamische Wirksamkeit der jeweiligen Maßnahme wird der Einfluss auf die Wellenüberlaufrate dargestellt. Dieser wird basierend auf den Formeln für die Berechnung der Wellenüberlaufrate bei Belastung durch Wellenspektren des Eurotop-Manual (PULLEN et al. 2007) berechnet:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = \frac{0,067}{\sqrt{\tan \alpha}} \gamma_b \cdot \xi_{m-1,0} \cdot \exp\left(-4,75 \frac{R_C}{\xi_{m-1,0} \cdot H_{m0} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v}\right) \quad (1)$$

Das Maximum ist dabei definiert als:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0,2 \cdot \exp\left(-2,6 \frac{R_C}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta}\right) \quad (2)$$

mit:

g	: Erdbeschleunigung	[m/s ²]
q	: mittlere Wellenüberlaufrate	[m ³ /(s · m)]
H_{m0}	: signifikante Wellenhöhe	[m]
α	: Böschungsneigung der Luv-Seite	[°]
$\xi_{m-1,0}$: $\tan \alpha / (H_{m0} / L_{m-1,0})^{1/2}$ Brecherparameter	[-]
γ_b	: Empirischer Beiwert für den Einfluss einer Berme	[-]
γ_f	: Empirischer Beiwert für den Einfluss der Böschungsrauheit	[-]
γ_β	: Empirischer Beiwert für den Einfluss der Wellenangriffsrichtung	[-]
γ_v	: Empirischer Beiwert für den Einfluss einer Kronenmauer	[-]

2.2 Bepflanzung und Verbindung der Außensände

Im Rahmen dieses Kapitels wird untersucht, in welcher Weise eine Sandaufspülung beziehungsweise Schließung des Hoogeloches zwischen den Sandplaten Japsand und Norderoogsand das Seegangsklima im Wattenmeer beeinflusst (vgl. Abb. 3).

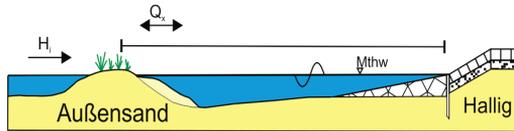


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Bepflanzung und Verbindung der Außensände.

Für die Berechnung der hydrodynamischen Wirksamkeit dieser Maßnahme wurde die zentral auf Hooge gelegene Hanswarft gewählt, von der aus ein sechs Kilometer langes Untersuchungsprofil in südwestliche Richtung verläuft. Der Referenzzustand und die Darstellung des Untersuchungsprofils sowie die Umsetzung der Sandaufspülung im Bereich des Hoogeloches sind in der Abb. 4 aufgezeigt.

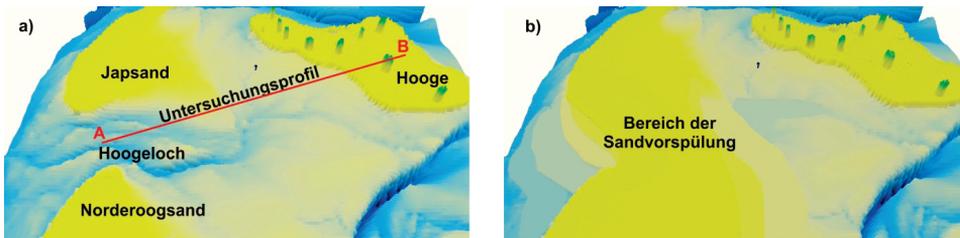


Abbildung 4: Referenzzustand und Darstellung des Untersuchungsprofils (a) und Sandaufspülung im Bereich des Hoogeloches im numerischen Modell (b).

Der Anfangspunkt des Profils (vgl. Abb. 4 und Abb. 5) liegt 2 m unterhalb von Normalhöhennull (NHN) im Hoogeloch zwischen den Sandplatten Japsand und Norderoogsand. Auf den ersten zweieinhalb Profilkilometern bleibt die Geländehöhe unterhalb von NHN und ist von einem unregelmäßigem Verlauf mit bis zu einem Meter hohen Geländesprüngen gekennzeichnet.

Zwischen den Profilstationen 2500 m und 3200 m kreuzt das Profil den südlichen Rand des Japsandes, so dass das Höhenniveau bis auf einen Meter über NHN ansteigt. Zwischen dem Sandplattenrand und der Halligkante (Profilstation 5150 m) liegt die Geländehöhe etwa auf dem Normalhöhennullpunkt, wobei eine steigende Tendenz zu beobachten ist. Die Hanswarft befindet sich etwa 500 m von dem 1,2 m hohen Sommerdeich entfernt (vgl. Abb. 5 unten).

Zur Ermittlung der maßgebenden Richtung des Seegangs und Windes werden die Verläufe der signifikanten Wellenhöhe und mittleren Wellenperiode für den Bemessungswasserstand BHW_{200} von NHN +5,40 m entlang des Profils ausgewertet. Die verwendeten Bemessungswasserstände setzen sich aus dem HW_{200} und einem Klimazuschlag von 0,5 m zusammen und basieren auf den regionalisierten Referenzwasserständen der IAWG, die vom LKN-SH im Rahmen des Projektes bereitgestellt worden sind. Wie in Abb. 5 zu erkennen ist, verhalten sich die Wellenhöhe und -periode für die Richtungen 240° und 270° annähernd identisch. Im Gegensatz dazu weichen die Wellenhöhen und -perioden für die Richtung 300° zwischen den Profilstationen 1000 m bis 3000 m um bis zu 0,25 m beziehungsweise 0,5 s ab. Schließlich wird die Seegangs- und Windrichtung von 270° als maßgebend definiert. Wie zu erwarten, wird der einlaufende Seegang durch die Sandplatten vom Profilanfang kontinuierlich bis zur Profilstation 3200 m gedämpft. Für den Bemessungswasserstand BHW_{200} werden die signifikanten Höhen der Wellen von 2,9 m auf 1,8 m (38 %) und die mittleren Wellenperioden von 5,3 s auf 3,9 s (26 %) reduziert. Daraufhin behalten die Wellen ihre Höhe und Periode bis zum Erreichen der Halligkante und des Sommerdeiches bei. Dort findet erneut eine Verminderung der Wellenhöhe und -periode um 0,4 m beziehungsweise 0,2 s statt.

Die westlich von Hooge gelegenen Sandplatten Japsand und Norderoogsand werden durch das Hoogeloch mit einer Breite von etwa einem Kilometer und einer mittleren Tiefe von 2 m unter NHN voneinander getrennt. Für die durchgeführte numerische Untersuchung wird am Referenzzustand (vgl. Abb. 4 links) eine Sandaufspülung im Bereich des Loches vorgenommen, sodass die Trennung der beiden Sandplatten aufgehoben wird. Die Sandaufspülung soll auf einer Länge von etwa zweieinhalb Kilometern eingebracht werden, wodurch sich ein abgeschätztes Sandvolumen von etwa 3,7 Mio. m^3 ergibt.

Die Ergebnisse der Simulationen am modifizierten System werden in Abb. 6 in Beziehung zum Referenzzustand gesetzt. Insbesondere im Bereich der durchgeführten Sandaufspülung vom Profilanfang bis zur Profilstation 2500 m ist eine erhebliche Beeinflussung der Seegangsparameter zu verzeichnen. An Profilstation 1700 m wird die maximale Geländehöhe der Sandaufspülung mit 2 m über NHN erreicht. Infolgedessen treten an dieser Stelle die niedrigsten Wellenhöhen und kürzesten Wellenperioden auf. Dort werden die signifikanten Wellenhöhen und mittleren Wellenperioden für den Bemessungswasserstand BHW_{200} (NHN +5,40 m) um 0,8 m (35 %) beziehungsweise um 1,13 s (24 %) reduziert. Nachdem der Seegang das Maximum der Geländehöhe der Sandaufspülung passiert hat, ist eine Vergrößerung der Höhe und Periode der Wellen zu beobachten. Auf einer Strecke von 1500 m nähern sich die Seegangsparameter des modifizierten

Systems wieder denjenigen des Referenzzustandes an. Folglich reicht die Übertragung der kinetischen Energie des Windes auf die Wellen entlang der vorliegenden Fetchlänge aus, um den Seegang wieder auf das ursprüngliche Niveau auszureifen. Demzufolge ist auf der Halligfläche und am Fuß der Hanswarft keine Veränderung der signifikanten Wellenhöhe und mittleren Wellenperiode infolge der Sandaufspülung festzustellen. Dies gilt neben der maßgebenden Seegangs- und Windrichtung auch für die Richtungen 270° und 300°. Des Weiteren wird die Beschränkung der hydrodynamischen Wirksamkeit auf den Bereich der Sandaufspülung in der zweidimensionalen Ebene bestätigt.

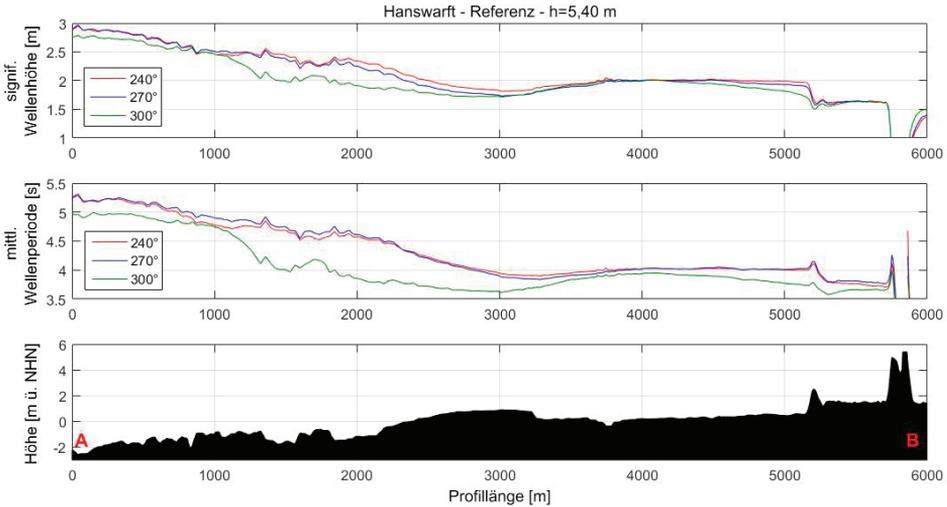


Abbildung 5: Referenzzustand für die Seegangs- und Windrichtungen 240°, 270° und 300°.

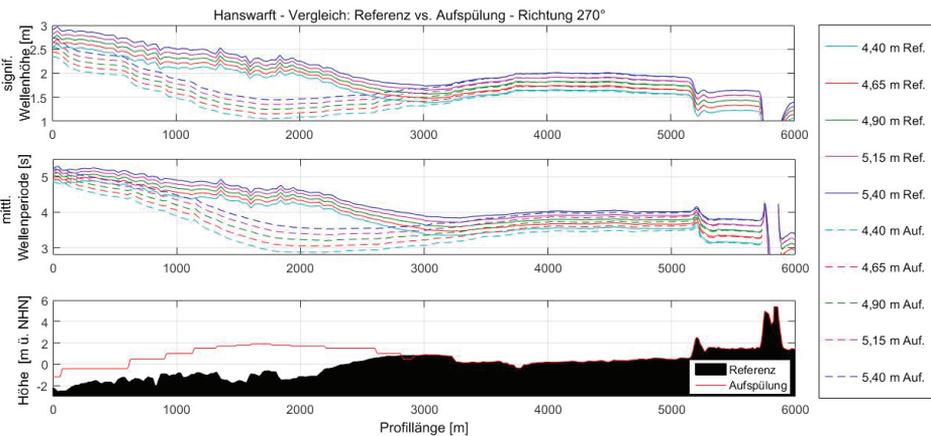


Abbildung 6: Wirkung der Sandaufspülung im Vergleich zum Referenzzustand.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Beeinflussung der signifikanten Wellenhöhe und mittleren Wellenperiode auf der Hallig und insbesondere am Warftfuß der Hanswarft nicht möglich ist. Als Hauptgrund hierfür wird die etwa 4 km große Distanz zwischen der

Sandaufspülung an den Sandplaten und dem Ort der Beurteilung am Fuß der Hanswarft angesehen.

Unter Berücksichtigung der mittleren Wellenrichtung auf Hooge und des grundsätzlich von Westen einlaufenden Seegangs ist ein Wandern der Sandplaten nach Osten zu erwarten. Der vorgestellte Referenzzustand zeigt somit eine Momentaufnahme der hydrodynamischen Wirksamkeit der Sandplaten, die durch gezielte Sandvorspülungen und biotechnische Maßnahmen erhalten werden könnte.

In einer ersten Abschätzung wurde das aufzuspülende Sandvolumen zu 3,7 Mio. m³ bestimmt. Als Vergleichswert kann die jährliche Sandersatzmenge von 1,019 Mio. m³ mit einem Kostenvolumen von 5,9 Mio. € an der Westküste der Insel Sylt aus dem Jahr 2011 dienen (LKN-SH 2014). Somit erfordert eine Umsetzung der Maßnahme gegenüber der Sandaufspülung vor Sylt mehr als die dreifache Menge an Material und Finanzmittel von etwa 18 Mio. €.

Abschließend lässt sich sagen, dass die hydrodynamische Wirksamkeit des Japsandes und Norderoogsandes durch die Ergebnisse des Referenzzustandes quantifiziert werden konnten. Von der vorgestellten Sandaufspülung wird auf Grund der wirtschaftlichen und technischen Dimension bei gleichzeitig geringer Wirkung der Seegangsdämpfung auf Hooge abgeraten.

2.3 Raupflasterung der Warften

Bei dieser zu untersuchenden Maßnahme werden die bereits vorhandenen Warften mit neuen Deckwerken versehen beziehungsweise Rauheitselemente an der Warftböschung aufgebracht (Abb. 7).

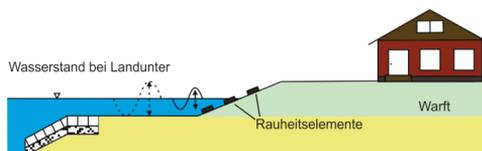


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Raupflasterung einer Warft.

Hierzu werden anstelle der aktuell zumeist mit Gras bewachsenen Böschungen Steine oder Blöcke verbaut. Dabei hängt die hydrodynamische Wirksamkeit der Blöcke stark von deren Größe sowie dem Abstand der Elemente zueinander ab (PULLEN et al. 2007).

Abb. 8 zeigt den Einfluss der Rauheit auf die relative Wellenüberlauftrate am Beispiel eines einfachen Warftprofils.

So kann, ausgehend von dem dargestellten Warftprofil, bei einem Einsatz eines Basaltdeckwerkes die Wellenüberlauftrate von 15,5 l/(s·m) um ca. 30 % auf 10,5 l/(s·m) im Vergleich zur Warft mit einer Grasoberfläche verringert werden. Mit Hilfe von Rauheitselementen oder einer aufgetragenen Elastocoast-Deckschicht, bei der mit Hilfe eines 2-Komponenten-Klebers Wasserbausteine an ihren Kontaktflächen zu einer rauen und durchlässigen Deckschicht verfestigt werden, kann die Wellenüberlauftrate noch weiter reduziert werden.

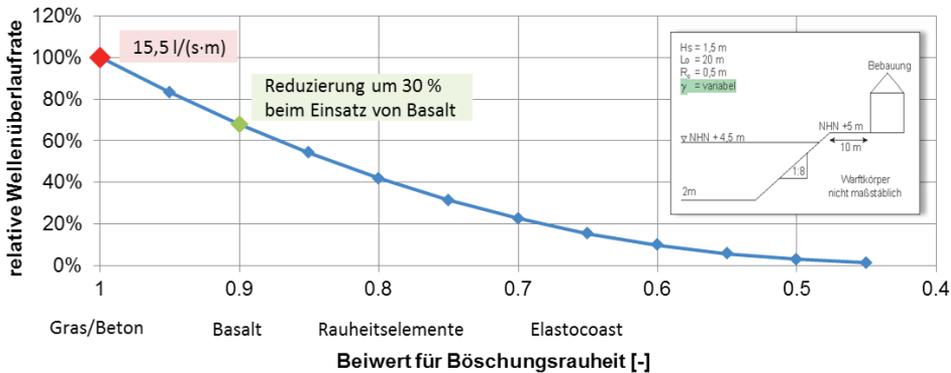


Abbildung 8: Einfluss der Rauheit auf die relative Wellenüberlauffrate nach 'Referenz'.

Hauptkritikpunkt an dieser Maßnahme ist der starke Eingriff in das Landschaftsbild der Halligen. So würden die Halligen ihr grünes Landschaftsbild dauerhaft verlieren und die teilweise denkmalgeschützten Warften als Fremdkörper auf der Hallig wahrgenommen werden.

Vorteil dieser Maßnahme ist die hohe Betriebssicherheit, da die Raupflasterung nicht erst im Fall einer Sturmflut aufgebaut werden müsste und durch die Erfahrungen an anderen Deckwerken sehr hohen Belastungen standhalten kann.

2.4 Mobiler Deichschlauch

Im Folgenden wird die Möglichkeit des Einsatzes eines Deichschlauches als Hochwasserschutz untersucht. In Abb. 9 ist die Umsetzung dieser Variante schematisch dargestellt. Aufgrund der Tatsache, dass im Falle einer Sturmflut nur die Bewohner der jeweiligen Warft für den Aufbau des Systems zur Verfügung stehen, muss ein schneller automatisierter Aufbau möglich sein, der durch einen geringen Arbeitsaufwand gekennzeichnet ist.

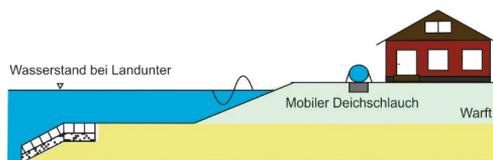


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Einsatzes eines Deichschlauches.

Im Bereich der Warftkante wird hierzu ein Graben ausgehoben, in den der Deichschlauch eingelassen wird. Der Schlauch muss im Sturmflutfall mit Wasser über Pumpen rechtzeitig gefüllt werden. Um einen zuverlässigen Hochwasserschutz gewährleisten zu können, muss ein redundantes Pumpen- und Zuleitungssystem installiert werden. Vor den Zuleitungen werden Gitter angebracht, die eine Verstopfung des Systems durch Treibsel oder anderes Material verhindern sollen. Bei der Betrachtung der Wirkung auf die relative Wellenüberlauffrate wird der mobile Deichschlauch als Kronenmauer betrachtet, da für einen mobilen Deichschlauch bislang keine durch physikalische Modellversuche abgesicherten Ergebnisse vorliegen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abb. 10 dargestellt.

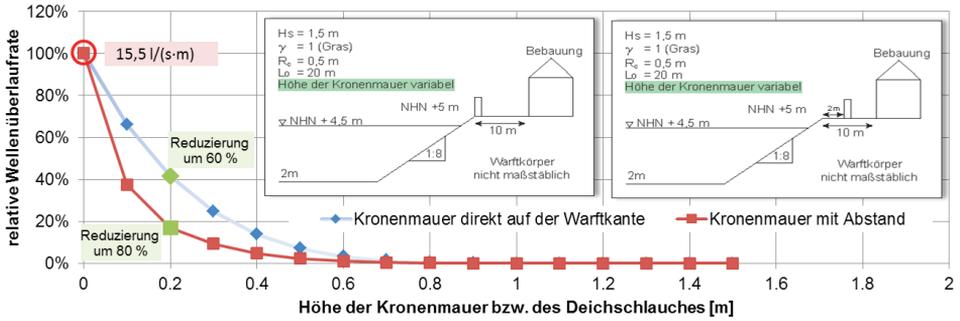


Abbildung 10: Einfluss einer Kronenmauer bzw. eines Deichschlauchs auf die relative Wellenüberlaufquote nach „Referenz“.

Die Ergebnisse zeigen, dass zum einen die Höhe des Deichschlauchs zum anderen aber auch die Entfernung des Deichschlauchs zur Warftkante von Bedeutung sind. So reduziert bei dem gegebenen Profil ein 0,2 m hoher Deichschlauch in zwei Metern Abstand zur Warftkante die Wellenüberlaufquote um 80 %. Ein Deichschlauch, der sich direkt auf der Warftkante befindet, reduziert hingegen die Wellenüberlaufquote des gegebenen Warftprofils um 60 % auf 6,5 l/(s·m).

Der Hauptkritikpunkt an diesem System ist die Betriebssicherheit, da das System fehleranfällig ist und sowohl die Pumpen als auch die Schläuche selbst im Sturmflutfall versagen könnten. Außerdem könnten während eines Eiswinters treibende Eisschollen oder anderes Treibgut die aufgepumpten Schläuche beschädigen. Da es keine Referenzprojekte gibt, müssten Voruntersuchungen stattfinden, die sich mit dem Bau dieser Maßnahme befassen. Durch die Ausführung der Hochwasserschutzwand als mobiler Schlauch wird das Landschaftsbild im Normalfall nicht beeinträchtigt. Der Schlauch ist, außer bei einer Sturmflut, nicht zu sehen, da er im Boden versenkt wird.

Eine Alternative, deren Betriebssicherheit weniger anfällig ist, stellt eine aufklappbare Hochwasserschutzwand dar (vgl. Abb. 11). Auch diese stellt im Normalfall keinen starken Eingriff in das Landschaftsbild dar. Ein Nachteil gegenüber den sich selbst aufbauenden Deichschläuchen ist, dass das System von den jeweiligen Warftbewohnern selbst aufgeklappt und gesichert werden müsste. Dabei kann unter Umständen starker Wind diese Arbeiten zusätzlich erschweren. Aus diesem Grund ist ein mobiles Hochwasserschutzsystem nur auf Warften einsetzbar, auf denen genug Personal zur Verfügung steht.

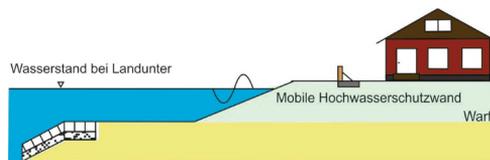


Abbildung 11: Schematische Darstellung des Einsatzes einer mobilen Hochwasserschutzwand auf einer Warft.

2.5 Ringdeich als Wellenbrecher vor die Warft

In diesem Kapitel wird sowohl die Möglichkeit der technischen Umsetzung als auch die hydrodynamische Wirksamkeit eines Ringdeiches, der um die Warft errichtet wird, untersucht. Abb. 12 zeigt schematisch die Umsetzung dieser Maßnahme.

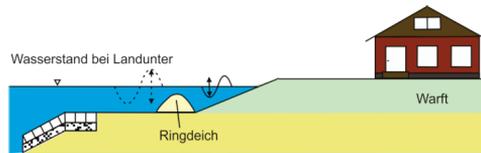


Abbildung 12: Schematische Darstellung eines Ringdeiches um die Warft.

An einem Untersuchungsprofil wird zunächst die Wirkung eines Ringdeiches auf der Halligfläche analysiert. Zur Beurteilung dient der Fuß der Christianswarft auf Langeneß, von der aus das etwa einen Kilometer lange Profil in südwestliche Richtung verläuft (vgl. Abb. 13).

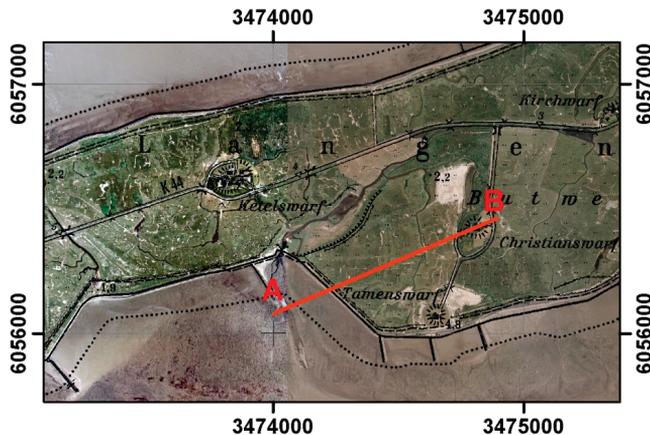


Abbildung 13: Untersuchungsprofil an der Christianswarft auf Langeneß.

Der Profilanfangspunkt (vgl. Abb. 13 und Abb. 14) liegt mit einer Höhe von 0,40 m unter Normalhöhennull (NHN) auf dem Halligvorland im Watt. An Profilstation 325 m beginnt die geböschte Halligkante und geht nach wenigen Metern in einen NHN +2 m hohen Regionaldeich über. Daraufhin verläuft die Geländehöhe der Halligfläche von anfänglich 1,7 m über NHN mit einem leichten Gefälle in Richtung Fuß der Christianswarft, der an Profilstation 900 m eine Höhe von 1,3 m über NHN aufweist.

Zur Bestimmung der maßgebenden Richtung des Seegangs und Windes wurden die Entwicklung der Seegangsparameter entlang des Profils für die Seegangs- und Windrichtungen von 240°, 270° und 300° für den Bemessungswasserstand BHW₂₀₀ von NHN + 5,70 m miteinander verglichen. Hieraus geht hervor, dass die signifikante Wellenhöhe und mittlere Wellenperiode auf dem Halligvorland und der Halligfläche für eine Richtung von 240° maximal werden. In Abb. 14 sind die Wellenhöhen und -perioden für die maßgebende Seegangs- und Windrichtung von 240° in Abhängigkeit von Wasserständen zwischen NHN +4,70 m und NHN +5,70 m wiedergegeben.

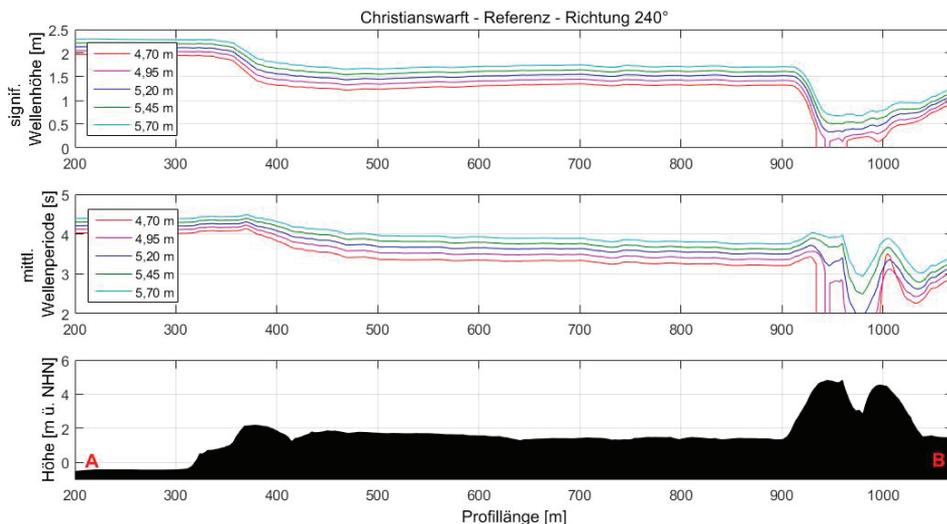


Abbildung 14: Referenzzustand für eine Seegangs- und Windrichtung von 240°.

Unter der Annahme des Bemessungswasserstandes BHW_{200} (NHN +5,70 m) ist der ausgereifte Seegang am Profilanfang durch eine signifikante Wellenhöhe von $H_s=2,3$ m und eine mittlere Wellenperiode von $T_m=4,4$ s gekennzeichnet. Der Seegang wird durch die Halligkante und -fläche sowie durch den Regionaldeich derart gedämpft, dass die Wellenhöhe und -periode bis zum Fuß der Christianswarft (Profilstation 900 m) um 0,6 m beziehungsweise 0,7 s reduziert werden.

Um die Christianswarft wird für die Untersuchungen ein System aus Ringdeichen angelegt (Abb. 15 unten). Die Untersuchungen zur hydrodynamischen Wirksamkeit des modifizierten Systems werden für Ringdeichhöhen von 1,0 m und 1,5 m durchgeführt.

Um die hydrodynamische Wirksamkeit der Maßnahme zu beurteilen, ist in Abb. 15 ein direkter Vergleich zwischen den Seegangsparametern des Referenzzustandes und des modifizierten Systems dargestellt.

Für den Bemessungswasserstand (NHN +5,70 m) werden die signifikanten Wellenhöhen infolge der 1,5 m hohen Ringdeiche um etwa 0,2 m verringert. In diesem Fall wird die mittlere Wellenperiode um 0,2 s verkürzt. Damit liegen bezüglich der Wellenhöhe und Wellenperiode am Warftfuß hydrodynamische Wirksamkeiten der 1,5 m hohen Ringdeiche von 10 % beziehungsweise 5 % vor. Werden die Ringdeiche mit einer Höhe von 1,0 m konstruiert, halbiert sich die seegangsdämpfende Wirkung. Hingegen wird bei einer Reduzierung des Bemessungswasserstandes um einen Meter eine Verdoppelung der hydrodynamischen Wirksamkeit erzielt. Diese Abnahme der hydrodynamischen Wirksamkeit bei wachsenden Wasserständen haben auch NIEMEYER und KAISER (2001) in ihren Untersuchungen festgestellt.

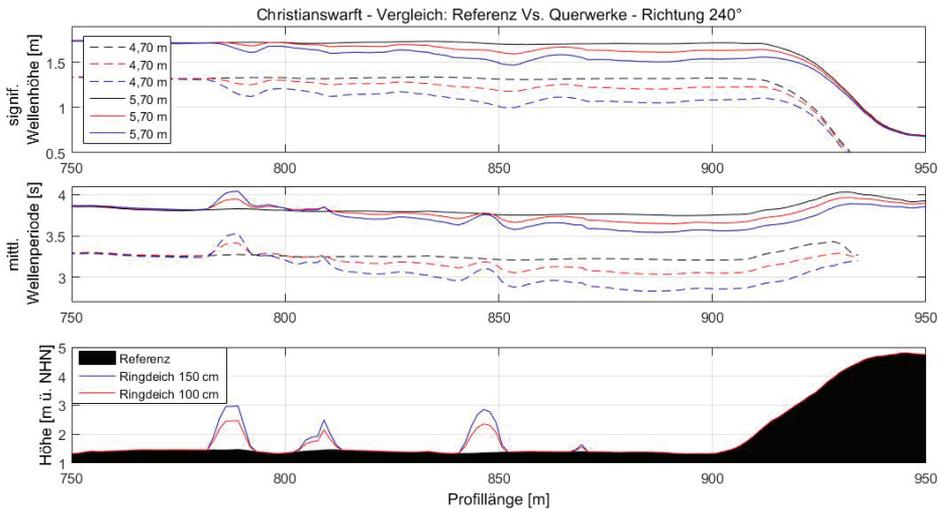


Abbildung 15: Wirkung der Ringdeiche im Vergleich zum Referenzzustand für eine Seegangs- und Windrichtung von 240°.

Aus Abb. 15 folgt, dass eine Vergrößerung der hydrodynamischen Wirksamkeit von einer Ringdeichlinie zur nächsten stattfindet. Der Anteil der Reduzierung von Wellenhöhe und -periode beträgt infolge der ersten Ringdeichlinie etwa 25 % der gesamten hydrodynamischen Wirksamkeit. Nachdem der Seegang die zweite Ringdeichlinie überwunden hat, sind mehr als 50 % der gesamten Wirksamkeit erreicht. Dieser Prozess setzt sich fort, bis nach der letzten Reihe die vollständige seegangsdämpfende Wirkung vorliegt. Damit erfolgt die Reduzierung der signifikanten Wellenperiode und mittleren Wellenhöhe schrittweise, woraus die Notwendigkeit der Anordnung hintereinander angeordneter Ringdeichlinien hervorgeht.

Die Untersuchungen des Referenzzustandes zeigen, dass der auf die Hallig treffende Seegang an der Halligkante und am Deckwerk gedämpft wird. Anschließend findet auf der Halligfläche keine weitere Seegangsdämpfung statt. Im Gegensatz dazu ist vielmehr eine Tendenz zur Erhöhung der Seegangsparameter auf der Halligfläche zu erkennen. Maßgebliche Bestimmungsgrößen sind dabei die Geschwindigkeit, Dauer und Streichlänge des einwirkenden Windes sowie der vorliegende Wasserstand. Demgemäß kommt es in besonderer Weise unter den untersuchten Worst-Case-Bedingungen zu einer erneuten Erhöhung der signifikanten Wellenhöhe und Verlängerung der mittleren Wellenperiode auf der Halligfläche. Grundidee der Anordnung eines Systems aus Ringdeichen ist eine Dämpfung des auf der Halligfläche wirkenden Seegangs unmittelbar vor der zu schützenden Warft.

Tatsächlich konnte am Fuß der Christianswarft eine Reduzierung der signifikanten Wellenhöhe um 10 % und der mittleren Wellenperiode um 5 % für den Bemessungswasserstand erzielt werden.

Abb. 16 und Abb. 17 stellen den Einfluss der signifikanten Wellenhöhe und der mittleren Wellenperiode auf die relative Wellenüberlaufquote dar. Mit einer wie im numerischen Modell erreichten Reduzierung der signifikanten Wellenhöhe um 10 % am Warftfuß könnte die Wellenüberlaufquote von $15,5 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m})$ um ca. 30 % reduziert werden (siehe

Abb. 16). Ähnlich verhält es sich bei der mittleren Wellenperiode. Eine Verringerung der mittleren Wellenperiode von 3,5 s auf 3 s hat nach Abb. 17 eine Reduzierung der relativen Wellenüberlauftrate um 57 % auf 6,6 l/(s·m) zur Folge.

Neben der Dämpfung der Seegangparameter wird folgender Sachverhalt als wesentlicher Erfolg der Maßnahme bewertet. Im Referenzzustand findet Brandung der Wellen an der Warft statt, wodurch der Warftfuß auch einen Angriffspunkt für mögliche Erosion darstellt. Durch die Anordnung der Längswerke beziehungsweise Ringdeiche kommt es zu einer Verlagerung der Brandungszone vom Warftfuß in das vorgelagerte Ringdeichsystem. Dies bedeutet, dass die Wellenenergie an den Ringdeichen umgewandelt wird und dadurch am Warftfuß nicht mehr für Erosionsprozesse zur Verfügung steht. Eine Steigerung der Energiedissipation kann durch eine Erhöhung der Bauwerke erreicht werden.

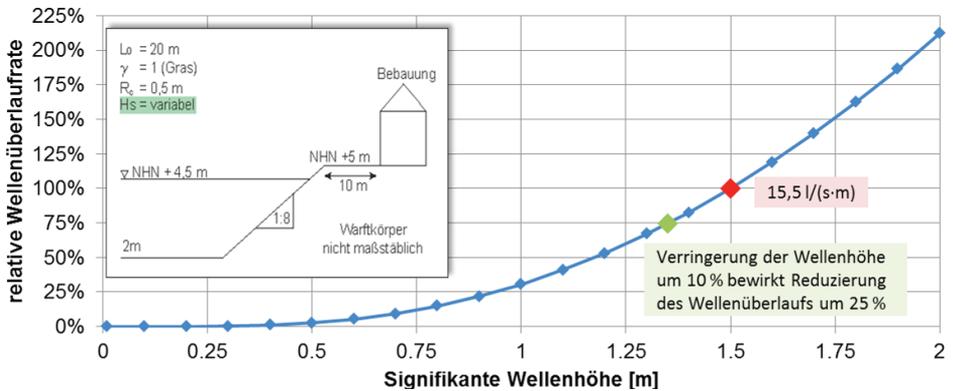


Abbildung 16: Einfluss der signifikanten Wellenhöhe am Warftfuß auf die relative Wellenüberlauftrate nach „Referenz“.

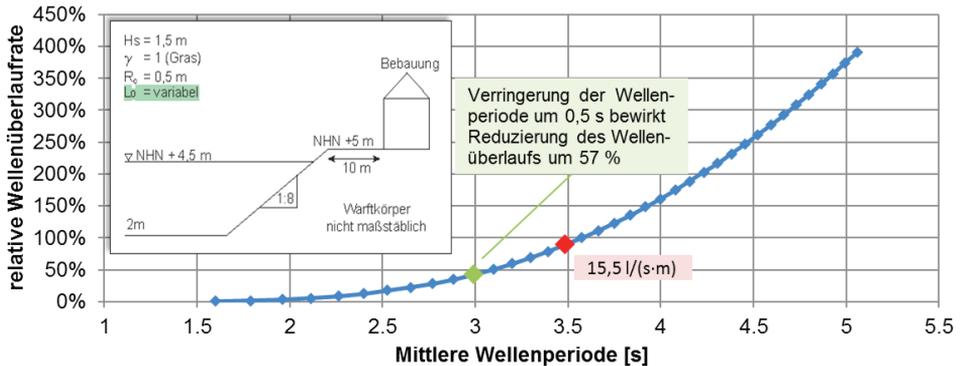


Abbildung 17: Einfluss der mittleren Wellenperiode auf die relative Wellenüberlauftrate nach „Referenz“.

Die Höhe und Abmessungen der Ringdeiche im numerischen Modell sind so gewählt, dass diese sich weitestgehend in die landschaftliche Umgebung einfügen. Außerdem ist eine Umsetzung der Maßnahme mit naturnahen Baumaterialien möglich, so dass der Einfluss auf die Ökologie bei dieser Maßnahme minimiert werden kann. Im Rahmen von

Parameterstudien müssen zukünftig Untersuchungen zur Optimierung der Lage und Geometrie des Ringdeichs durchgeführt werden.

Ein weiterer Vorteil dieser Maßnahme ist in der hohen Betriebssicherheit des Systems zu sehen, da die Ringdeiche eine dauerhafte Einrichtung darstellen würden. Der Eingriff in das Landschaftsbild der Halligen ist abhängig von der jeweiligen der Ausführung der Ringdeiche. Aus größerer Entfernung wäre ein Ringdeich um die Warft kaum zu erkennen.

2.6 Hydraulische Hochwasserschutzwand

Bei dieser vorgeschlagenen Maßnahme handelt es sich um eine Hochwasserschutzwand, die bei Landunter-Ereignissen selbstständig mit Hilfe von Schwimmkörpern aus dem Warftkörper ausgefahren wird. Die Hochwasserschutzwand wird ringförmig um die Warft angelegt, um den Wellenüberlauf entscheidend zu vermindern und damit vorbeugend die Warfthäuser zu schützen. Abb. 18 zeigt den schematischen Aufbau der hydraulischen Hochwasserschutzwand.

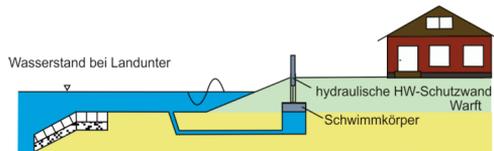


Abbildung 18: Schematische Darstellung einer hydraulischen Hochwasserschutzwand.

Auf der Darstellung ist zu erkennen, dass sich die Hochwasserschutzwand unmittelbar hinter der Warftkrone befindet und im normalen Zustand auf dem Warftkörper nicht zu sehen ist. Der durch sie technisch erforderliche Eingriff in den Warftkörper ändert das Landschaftsbild der Warft nicht. Während eines Landunters hebt sich der im Inneren der Warft befindliche Schwimmkörper infolge Auftrieb durch die mit dem Vorland verbundene kommunizierende Röhre. Der Schwimmkörper übt ab einem bestimmten Wasser-einstaugrad eine vertikale Kraft auf die Stützen aus, welche die Hochwasserschutzwand anheben. Die Wirkung auf die mittlere Wellenüberlaufrate ist bereits in Abb. 10 dargestellt worden.

Die hydraulische Hochwasserschutzwand stellt im Gegensatz zu den anderen Maßnahmen einen technischen Eingriff in den Warftkörper dar, der nach dem Generalplan Küstenschutz (MELUR-SH 2012) nicht erwünscht ist. Hauptkritikpunkt an dieser Maßnahme stellt allerdings die geringe Betriebssicherheit dar. Testläufe zur Funktionalität des Systems können gar nicht beziehungsweise nur schwer durchgeführt werden und diverse Einflussfaktoren wie beispielsweise Muschelbewuchs können bereits zu einem Versagen des Systems führen.

2.7 Warftverstärkung durch Abflachung, Raupflasterung und Freibord-erhöhung

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Möglichkeiten der Warftverstärkung untersucht. Da einige dieser Maßnahmen der Warftverstärkung (Rauheitselemente siehe Kap. 2.3) schon im Rahmen der auf Hallig Hooge generierten Vorschläge untersucht worden sind, wird an den jeweiligen Stellen auf das entsprechende Kapitel verwiesen.

Zu den hier zu untersuchenden Maßnahmen zählen unterschiedliche Maßnahmen an der Warft, durch die der Wellenüberlauf reduziert wird. Mögliche Verstärkungen an den Warften sind:

- Erhöhung der Krone des Ringdeichs
- Abflachung des Warftprofils
- Einbau einer Berme
- Aufschüttung der gesamten Warft
- Einbau von Rauheitselementen (vgl. Kap. 2.3)
- Einbau einer Kronenmauer

Eine Erhöhung der Deichkrone beziehungsweise der Einbau einer Kronenmauer vergrößern die Freibordhöhe R_C und verringern bei gleichbleibender Warftneigung die Wellenüberlaufrate. Um eine gleichbleibende Profilsteigung bei einer erhöhten Kronenhöhe zu gewährleisten, ist eine aufwendige Massenbewegung notwendig. Der Ringdeich von Warften sollte jedoch nicht beliebig hoch aufgeschüttet werden. Zum einen gibt es bei Warften aufgrund des bindigen Bodenaufbaus Setzungsprobleme und zum anderen sprechen sich gerade die vom Tourismus lebenden Bewohner gegen einen zu hohen Ringdeich aus. Abb. 19 stellt eine Abflachung eines schematischen Warftprofils dar.

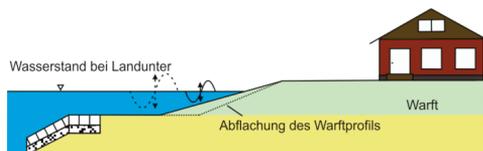


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Abflachung des Warftprofils.

Eine weitere Maßnahme, die keinen Einfluss auf den Wellenüberlauf ausübt, aber dennoch hier behandelt wird, ist die Anhebung der Häuser (vgl. Abb. 20).

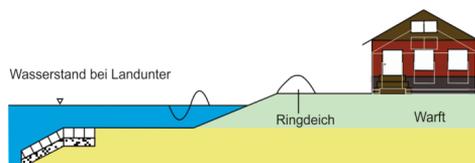


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Anhebung eines Warfthauses und des Einsatzes eines Ringdeiches.

In Abb. 21 ist der Einfluss der Warftneigung auf die relative Wellenüberlaufrate dargestellt. Eine Abflachung der Warft von 1:8 auf 1:10 bewirkt beispielsweise bei den gegebenen Randbedingungen eine Reduzierung der Wellenüberlaufrate von $15,5 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m})$ auf einen Wert von $5,8 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m})$. Je flacher ein Profil ausgebildet ist, desto mehr Energie

verliert die Welle durch Wellenbrechen beziehungsweise Reibung bei der Überwindung der horizontalen Strecke und läuft daher weniger hoch auf. Warften können jedoch nicht beliebig flach ausgebildet werden, da aufgrund der großen Massenbewegungen der Kosten-Nutzen-Faktor ungünstig ist.

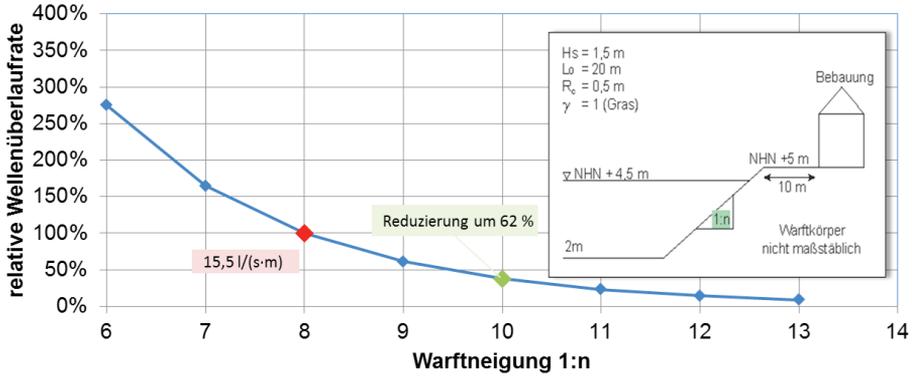


Abbildung 21: Einfluss der Warftneigung auf die relative Wellenüberlauftrate.

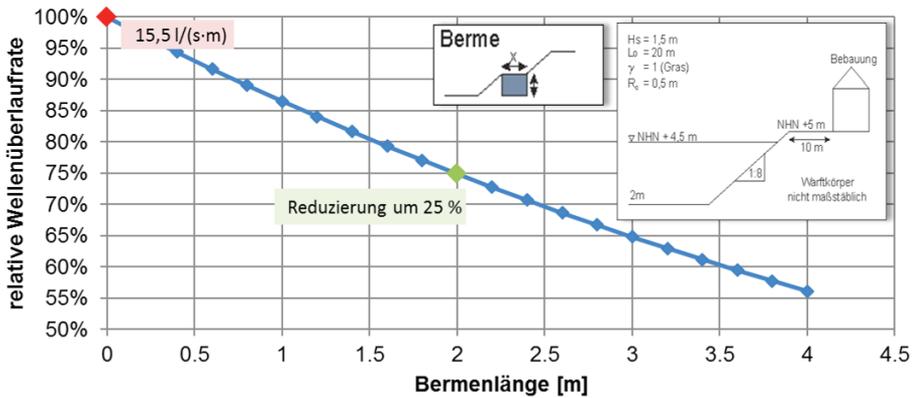


Abbildung 22: Einfluss einer Berme auf die relative Wellenüberlauftrate.

Auch eine Berme hat einen reduzierenden Einfluss auf die Wellenüberlauftrate. So bewirkt eine Berme mit einer Länge von zwei Metern in Höhe des Bemessungswasserstandes bei der gegebenen Warftgeometrie eine Reduzierung der relativen Wellenüberlauftrate um ca. 25 % (vgl. Abb. 22). Die Konstruktion und Aufschüttung einer Berme erfordert abhängig von deren Länge ebenfalls große Massenbewegungen. Sie verringert den Wellenüberlauf am effektivsten, wenn sie sich auf Höhe des maßgebenden Wasserstandes befindet.

In diesem Kapitel werden ebenfalls die Vor- und Nachteile möglicher Verstärkungsmöglichkeiten analysiert und ihr Einfluss auf den Wellenüberlauf ermittelt. Außerdem muss beachtet werden, dass jede Maßnahme entsprechend Platz zur Umsetzung erfordert. So ist für jede Warft eine individuelle Betrachtung notwendig. Bei der Analyse ist ebenso auf die Maßnahmenakzeptanz der Halligbewohner einzugehen, da ohne sie eine Durchführung einer Maßnahme nicht möglich ist.

Eine weitere Möglichkeit, die bei Weitem mit dem größten (finanziellen) Aufwand verbunden ist, ist die Aufschüttung der gesamten Warft. Große Massenbewegungen sind erforderlich und die Hallighäuser müssten künstlich erhöht oder neu gebaut werden. Das Prinzip dieser Maßnahme ist in Abb. 23 dargestellt. Die auf der Warft befindlichen Gebäude müssen im Zuge dieser Maßnahme an das neue Niveau angepasst werden.

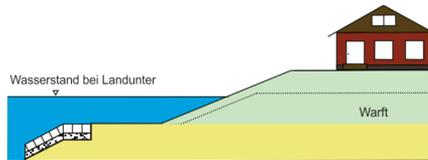


Abbildung 23: Schematische Darstellung einer Aufwärtung mit anschließendem Neubau.

So können die Gebäude entweder vollständig abgerissen und neugebaut oder künstlich angehoben werden. Eine weitere Möglichkeit wäre es, das unterste Stockwerk aufzugeben und die Häuser aufzustocken. All diese Maßnahmen sind zwar technisch möglich, aber mit einem großen Arbeits- und Kostenaufwand verbunden.

Die Wirksamkeit dieser Maßnahme auf die relative Wellenüberlauftrate ist in Abb. 24 dargestellt. So bewirkt eine Erhöhung des Freibords um 0,5 m auf 1,0 m eine Reduzierung der mittleren Wellenüberlauftrate von 15,5 l/(s·m) auf einen Wert von 0,5 l/(s·m) bei den gegebenen Bedingungen.

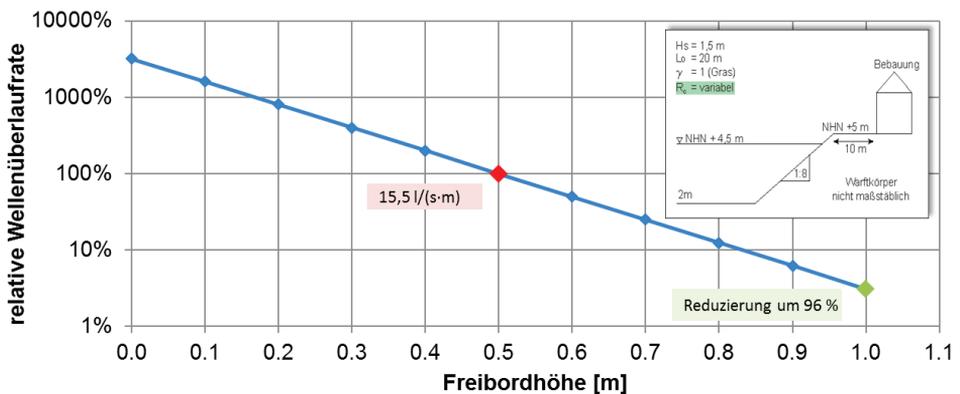


Abbildung 24: Einfluss der Freibordhöhe auf die relative Wellenüberlauftrate.

Abgesehen vom hohen technischen Aufwand zur Umsetzung stellt diese Maßnahme ein wirkungsvolles Konzept dar, das eine hohe Betriebssicherheit besitzt und keinen negativen Einfluss auf das Landschaftsbild der Halligen ausübt. Die Möglichkeit des Einbaus von Rauheitselementen stellt eine weitere Maßnahme der Warftverstärkung dar und ist bereits in Kap. 2.3 untersucht worden.

Um die oben genannten verschiedenen Verstärkungsmöglichkeiten einer Warft hinsichtlich ihres Nutzens und des dafür aufzubringenden Aufwandes bewerten zu können, werden anhand eines beispielhaften Warftprofils die Änderungen der Wellenüberlauftraten und der Wellenüberlaufgeschwindigkeit in Abhängigkeit der potentiellen Verstärkungsmöglichkeit errechnet. Abb. 25 zeigt das verwendete Warftprofil und die Verstärkungsmöglichkeiten mittels Ringdeich, Aufschüttung der Warft, Steigungsänderung und Berme.

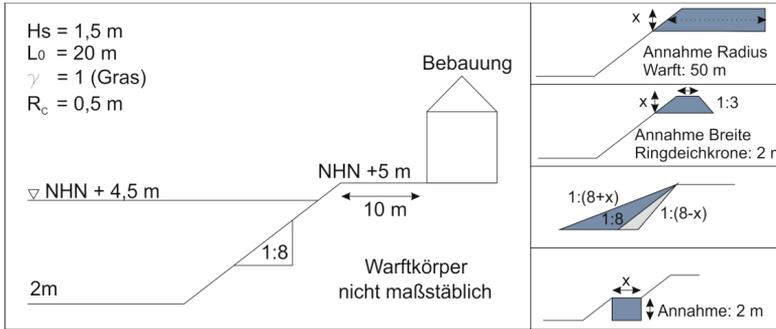


Abbildung 25: Exemplarisches Warftprofil.

In Abb. 26 sind die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt. Dabei wird das benötigte Erdvolumen in m^3 pro m in Abhängigkeit der Reduzierung der Wellenüberlaufraten für die Maßnahmen der kompletten Warfterhöhung, dem Ringdeich auf der Warftkrone, der Abflachung des Warftprofils und dem Einfluss einer Berme dargestellt. Bei einer Erhöhung der Freibordhöhe um $0,5 \text{ m}$ wird die Wellenüberlaufhöhe q im Beispiel auf knapp $0,1 \%$ des Ausgangswertes reduziert. Dabei erhöht sich das Erdvolumen um $25 \text{ m}^3/\text{m}$ bei einer kompletten Warfterhöhung und um $3,75 \text{ m}^3/\text{m}$ bei der Errichtung eines Ringdeiches.

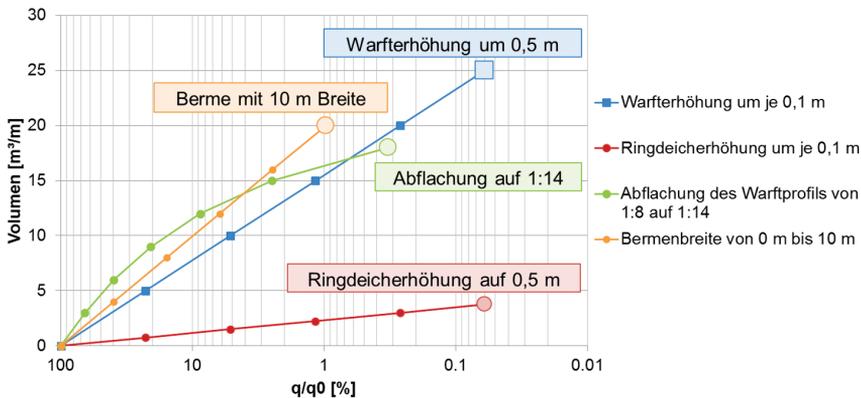


Abbildung 26: Benötigtes Erdvolumen in Abhängigkeit der Reduzierung der Wellenüberlaufhöhe.

Auf Grundlage der gezeigten Ergebnisse stellt sich die Erhöhung der Freibordhöhe als die effektivste Methode dar, den Wellenüberlauf und die Wellenüberlaufgeschwindigkeit bei möglichst geringer Erdvolumenzunahme zu verringern. Weiterhin ist bei der Erhöhung des Freibords der Bau eines Ringdeiches deutlich effektiver als die komplette Erhöhung einer Warft. Die Abflachung des Warftprofils stellt ebenfalls eine sinnvolle Maßnahme dar. Die benötigte Erdvolumenzunahme erhöht sich dabei allerdings im Gegensatz zur Profilerhöhung. Der Einfluss einer Berme führt zwar ebenfalls zu geringeren Wellenüberlaufhöhen und Geschwindigkeiten, allerdings nicht in dem Maße wie die Maßnahmen Ringdeich und Warfterhöhung. Solange sich das Erdgeschoss der Hallighäuser $0,5 \text{ m}$ über der Warft befindet und dadurch ein zusätzlicher Schutz für die Bebauung gegeben ist, kann als Empfehlung für die zukünftige Verstärkung der Warften weiterhin ein

Ringdeich gewählt werden. Dadurch wird die Kronenhöhe der Warft erhöht und der Wellenüberlauf verringert. Der Einstau von überlaufendem Wasser wird im möglichen Schadensfall dabei zwar größer, allerdings weisen die nach dem neuen Konzept erstellten Häuser genügend Widerstand auf, um diesem Schadensfall bei nicht zu großen Einstauhöhen zu widerstehen. Bei alter Bebauung könnte für die Verstärkung eine Warfterhöhung mit geringerer Steigung des Warftprofils vorgesehen werden, um erhöhten Einstau der Häuser zu vermeiden. Dies stellt jedoch eine deutlich kostenintensivere Maßnahme dar.

2.8 Automatische Warfterhöhung durch Wasserkraft

Das Prinzip dieser Maßnahme besteht darin, die komplette Warft hydraulisch zu lagern, sodass im Falle einer Sturmflut die Warft mit dem ansteigenden Wasser aufschwimmt. Das Prinzip der hydraulischen Warft ist in der Abb. 27 für den Zustand während eines Landunters schematisch dargestellt.

Zur Umsetzung wird ein Schacht rund um die Warft herum ausgehoben, in den ein Hohlkörper gesetzt wird. Die Warft soll anschließend auf einem Schwimmerkörper gelagert werden, so dass dieser sich bei einer Sturmflut hebt und die Warft mit ihm aufschwimmt. Dadurch wäre die Warft erhöht und vor höheren Wasserständen geschützt. Die reduzierende Wirkung auf den Wellenüberlauf ist mit der Wirksamkeit einer Kronenmauer zu vergleichen. Die Wirkung einer Kronenmauer auf die Wellenüberlaufrate ist bereits in Kap. 2.4 beziehungsweise in Abb. 10 dargestellt worden und soll an dieser Stelle nicht weiter erläutert werden.

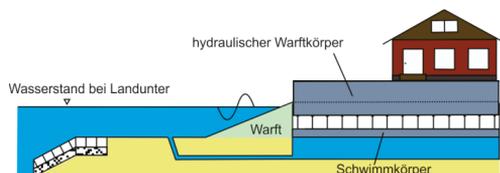


Abbildung 27: Schematische Darstellung einer hydraulisch gelagerten Warft.

Hauptkritikpunkt dieser Maßnahme ist neben dem enorm hohen Arbeitsaufwand die fragliche Betriebssicherheit dieses Systems. Da die hydraulische Warft im Normalfall nicht auf ihre Funktionalität hin überprüft werden kann, ist dieses System mit einem hohen Risiko und sehr hohen Kosten behaftet. Bei einem Versagen des Systems und dem nicht Vorhandensein anderer Schutzmaßnahmen könnte bei Extremereignissen Wasser in die Häuser eindringen und große Schäden verursachen.

2.9 Wirkungsvolle Schutzräume in den Häusern einrichten

Schutzräume existieren bereits in fast allen Hallighäusern. Sie wurden als Konsequenz der schweren Sturmfluten in den Jahren 1962 und 1976 erbaut. Diese Räume sind so konzipiert, dass sie unabhängig vom Rest des Gebäudes auf vier Pfählen gegründet sind (vgl. Abb. 28). Das bedeutet, dass selbst bei einer schweren Zerstörung des restlichen Hauses diese Räume bestehen bleiben (PETERSEN 1981). Jedoch ging mit den Jahren auch die Bedeutung der Schutzräume wieder zurück. So werden sie mittlerweile häufig als Abstellräume oder ähnliches genutzt. Für die Häuser, in denen noch keine Schutzräume existieren, müssten diese noch nachgerüstet werden.

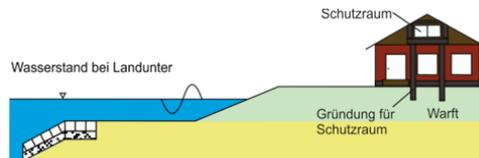


Abbildung 28: Einrichtung eines Schutzraumes in einem Hallighaus.

Selbst wenn alle anderen Küstenschutzmaßnahmen nicht mehr greifen, ist der Schutzraum ein Ort, der widerstandsfähig ist und in dem Menschenleben gerettet werden können. Die Schutzräume sind allerdings lediglich als letzter Zufluchtsort für die Halligbewohner gedacht und sollten lediglich als Kombination mit anderen Verstärkungsmaßnahmen angewendet werden.

2.10 Eindeichung des Wattenmeeres

Die Möglichkeit eines Deiches von rund 35 km Länge zwischen der Halbinsel Eiderstedt bis zur Insel Sylt wurde bereits als „Friesendamm“ von W. Dix in den Jahren 1927 und 1949 beschrieben (STADELMANN 2008). Der Deich würde eine Fläche von etwa 1000 km² Wattenmeer eindeichen und das gesamte Gebiet vor dem offenen Meer schützen. Durch den Bau könnte direkt Einfluss auf die vorherrschenden Wasserstände genommen werden, da die Halligen durch den Deich vor Sturmfluten und steigenden Wasserständen geschützt wären.

In der Abb. 29 ist eine mögliche Variante einer Umsetzung dieses Projektes dargestellt. Diese Variante hat eine Länge von 37,2 km und umfasst alle zehn Halligen.

Die Kosten dieses Projektes sind allerdings enorm hoch. Vergleichbare Projekte sind der Abschlussdeich in den Niederlanden sowie der Saemangeum Seawall in Südkorea. Letzterer wurde in den Jahren 1991 bis 2011 konstruiert und hat bei einer Länge von etwa 33 km Kosten in einer Höhe von 1,5 Mrd. € verursacht (CHO 2007).

Durch den Bau eines solchen Deiches würde das Ökosystem Wattenmeer eine starke Veränderung von nicht vorhersagbarem Ausmaß erfahren. Zudem besitzt das schleswig-holsteinische Wattenmeer den Status eines Nationalparks und UNESCO-Weltnaturerbes und würde durch ein solches Projekt diesen Status nicht länger behalten können.

Als Küstenschutzmaßnahme ist der Bau dieses Deiches von der hydrodynamischen Wirksamkeit zwar als positiv anzusehen, jedoch aus Sicht des Naturschutzes und den weitreichenden ökologischen Veränderungen generell als nicht umsetzbar zu bewerten.

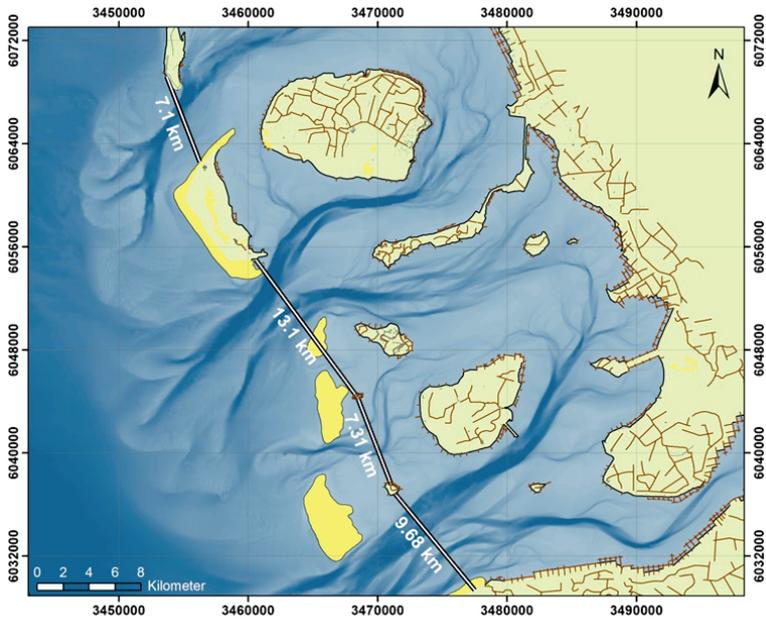


Abbildung 29: Variante der Eindeichung des südlichen nordfriesischen Wattenmeeres mit einer Gesamtlänge von 37,2 km.

3 Ergebnisse

3.1 Hydrodynamische Wirksamkeit

Wie in Kap. 2.1 erwähnt, erfolgt die abschließende Bewertung der hydrodynamischen Wirksamkeit anhand des Einflusses auf die mittlere Wellenüberlauftrate q und basiert auf den in Kap. 2.2 bis 2.10 gezeigten Untersuchungen.

3.2 Betriebssicherheit

Da eine Ermittlung der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden kann, wird ein vereinfachter Ansatz gewählt, um die Betriebssicherheit der einzelnen Maßnahmen zu bewerten. Dafür wird unterschieden, ob im Falle eines Extremereignisses die Betriebsbereitschaft zunächst hergestellt werden muss oder eine Maßnahme dauerhaft installiert ist. Zusätzlich geht in die Bewertung ein, ob zur Herstellung der geforderten Betriebssicherheit ein Eingriff der Bewohner in das jeweilige System möglich ist. Grundsätzlich wird im Rahmen dieser Bewertung bei stationären Maßnahmen von einer hohen Betriebssicherheit ausgegangen. Mobilien Maßnahmen hingegen wird eine geringere Betriebssicherheit zugewiesen, da diese Systeme im Vergleich zu den erdbaulichen Maßnahmen fehleranfälliger sind und eine höhere systemspezifische Vulnerabilität aufweisen (BWK 2005).

3.3 Bauaufwand

Der Bauaufwand der Maßnahmen wird über eine Abschätzung der beim Bau anfallenden ökonomischen Kosten durchgeführt. Diese setzen sich nach BACHMANN (2012) aus den Flächenkosten, Baukosten, ökologischen Ausgleichskosten und Planungskosten zusammen. Diese Berechnung kann vor allem bei erdbaulichen Maßnahmen durchgeführt werden. Für neue und innovative Maßnahmen fehlt bislang eine ausreichende Datengrundlage.

3.4 Landschaftsbild

Die Grundlage für die Bewertung des Einflusses auf das Landschaftsbild stellen die folgenden Indikatoren nach KIEMSTEDT et al. (1996) und DEMUTH (2000) dar:

- Verfremdung der Eigenart der Landschaft
- Vielfaltsverlust
- Oberflächenverfremdung
- Maßstabsverlust
- Lage-/Strukturstörung
- Überformung durch technische Elemente
- Reliefänderung
- Ausräumung der Landschaft
- Lärm- und Geruchsbelästigung

Diese potentiellen Einflüsse werden dem Referenzzustand der Hallig vor der Maßnahme gegenübergestellt und herausgestellt, ob eine negative Beeinträchtigung vorliegt.

3.5 Naturschutz

Die Bewertung des Einflusses der Maßnahmen auf den Naturschutz erfolgt nach KIEMSTEDT et al. (1996) auf Grundlage der folgenden potentiellen Beeinträchtigungen:

- Beeinträchtigung von Arten und Lebensgemeinschaften:
 - Flächenverlust von Lebensräumen
 - Beeinträchtigung der Standortbedingungen von Lebensräumen
 - Veränderung von Lebensraumstrukturen
 - Dezimierung von Pflanzen und Tieren
 - Veränderung des genetischen Austauschs
- Beeinträchtigung des Bodens
 - Bodenverlust, Bodenabtrag
 - Veränderung der Bodenorganismen
 - Veränderung des Nährstoff- und Wasserhaushalts
 - Beeinträchtigung der natürlichen biotischen Ertragsfähigkeit

Bei der Untersuchung des Einflusses auf den Naturschutz mit Hilfe dieser potentiellen Beeinträchtigungen müssen zusätzlich die betroffene Flächengröße sowie die jeweilige Dauer der Maßnahme berücksichtigt werden.

3.6 Akzeptanz

Die Bewertung der Akzeptanz basiert auf den in Tab. 1 aufgeführten Platzierungen der Maßnahmen, die von den Bewohnern der Halligen in dieser Reihenfolge gewählt wurden.

3.7 Ergebnis

In Tab. 2 ist eine zusammenfassende Bewertung der im Rahmen der Zukunftswerkshops auf Hooge und Langeneß generierten Ideen dargestellt. Dabei wird für die folgenden Kategorien jeweils eine Einzelbewertung vorgenommen, bei der Punkte von 0 bis 4 vergeben werden:

- Wirkung auf den Wellenüberlauf
- Betriebssicherheit
- Bauaufwand
- Landschaftsbild
- Naturschutz
- Akzeptanz

Die jeweilige Bedeutung der Bewertungspunkte der einzelnen Kategorien ist in der Legende der Tab. 2 aufgeführt. In der rechten Spalte der Tab. 2 wird das geometrische Mittel der einzelnen Bewertungen berechnet. Erhält eine Maßnahme in nur einer Bewertungskategorie null Punkte, ergibt die Gesamtwertung somit ebenfalls null Punkte.

Als technisch machbare und wirksame Maßnahmen belegen die Abflachung des Warftprofils beziehungsweise der Ringdeich auf der Warftkrone mit 2,99 Punkten den ersten Platz der untersuchten Maßnahmen. Der um die gesamte Warft errichtete Ringdeich sowie die Raupflasterung der Warften erhalten mit 2,57 Punkten die zweitbeste Bewertung. Auf den Plätzen dahinter folgen die Aufwartung sowie die Errichtung geeigneter Schutzräume mit je 2,40 Punkten. Gerade die Maßnahme der Schutzräume sollte jedoch als Ergänzung anderer Maßnahmen angesehen werden und mit diesen kombiniert angewendet werden. Diesen Maßnahmen konnte somit im Rahmen der Untersuchung die hydrodynamische Wirksamkeit, die technische Machbarkeit sowie die soziale Akzeptanz nachgewiesen werden. Der mobile Deichschlauch könnte durch eine Alternative der aufklappbaren Hochwasserschutzwand in der Kategorie der Betriebssicherheit noch besser bewertet werden. Die Maßnahme der Verbindung und Bepflanzung der Außensände wird aufgrund der nicht vorhandenen Wirksamkeit auf den Wellenüberlauf als bedeutungslos bewertet. Die hydraulische Hochwasserschutzwand wird aufgrund des sehr hohen Bauaufwandes sowie der geringen Betriebssicherheit als nicht zu empfehlende Maßnahme beurteilt. Die hydraulische Warft sowie die Eindeichung des Wattenmeeres fallen jeweils aufgrund mehrerer Faktoren aus dem Bereich der zu empfehlenden Maßnahmen. Während die Eindeichung des Wattenmeeres in den Kategorien des Bauaufwandes, des Landschaftsbildes sowie des Naturschutzes gleich in drei Fällen mit null Punkten die schlechteste Bewertung erhält, erreicht die hydraulische Warft in den Kategorien der Betriebssicherheit und des Bauaufwandes jeweils null Punkte.

Tabelle 2: Zusammenfassende Bewertung der im Rahmen der Zukunftsworkshops auf Hooge und Langeneß generierten Maßnahmen.

Maßnahme	Wirkung auf den Wellenüberlauf	Betriebs-sicherheit	Bauauf-wand	Landschafts-bild	Naturschutz	Akzeptanz der Bewohner	\bar{x}_{geom}
Abflachung des Warftprofils / Ringdeich auf Warft	3	4	3	2	2	5	2.99
Raupflasterung	3	4	3	1	2	4	2.57
Ringdeich um Warft (Wellenbrecher)	3	4	3	2	2	2	2.57
Aufwartung	4	4	1	2	2	3	2.40
Errichtung geeigneter Schutzräume	2	4	3	2	2	2	2.40
Anhebung der Häuser	2	4	1	2	2	3	2.14
Mobiler Deichschlauch	4	1	1	2	2	3	1.91
Bepflanzung/Verbindung der Außensände	2	2	1	1	1	5	1.65
Hydraulische Hochwasserschutzwand	4	0	0	2	2	1	0
Hydraulische Warft	4	0	0	1	1	4	0
Eindeichen des Wattenmeers	4	4	0	0	0	1	0
Legende	0: starke Erhöhung 1: leichte Erhöhung 2: kein Einfluss 3: Reduzierung 4: große Reduzierung	0: sehr fehleranfällig 1: fehleranfällig 2: gering fehleranfällig 3: zuverlässig 4: sehr zuverlässig	0: sehr groß 1: groß 2: mittlerer Aufwand 3: gering 4: sehr gering	0: stark negativer Einfluss 1: negativer Einfluss 2: kein Einfluss 3: positiver Einfluss 4: sehr positiver Einfluss	0: nicht vereinbar 1: teilweise nicht vereinbar 2: kein Konflikt 3: positiv 4: sehr positiv	1: Platz 5 2: Platz 4 3: Platz 3 4: Platz 2 5: Platz 1	

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die aufgeführten Untersuchungen innerhalb des Vorhabens ZukunftHallig-B stellen einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Küstenschutzmaßnahmen und Bewirtschaftungsstrategien dar. Mit dem aufgebauten numerischen Seegangmodell wird zunächst ein Werkzeug geschaffen, mit dem die weiteren Untersuchungen durchgeführt werden. Dabei folgen diese Untersuchungen dem Profil einer Hallig von der Halligkante, über die Halligfläche bis hin zur Warft mit den darauf befindlichen Gebäuden.

Im hier dargestellten Arbeitspaket werden unterschiedliche Küstenschutzmaßnahmen untersucht, die im Rahmen der durchgeführten Zukunft-Workshops entwickelt worden sind. Die Bewertung erfolgt anhand der Wirkung auf den Wellenüberlauf an der Warft, der Betriebssicherheit, dem Bauaufwand, dem Einfluss auf das Landschaftsbild sowie dem Naturschutz.

Diese Untersuchungen innerhalb des Teilprojektes ZukunftHallig-B machen deutlich, dass für jede Warft individuelle Lösungen entwickelt werden müssen, um diese auch vor zukünftigen Sturmfluten sicher zu schützen. Dabei müssen gemeinsam mit den jeweiligen Warftbewohnern Maßnahmen erarbeitet werden, die von diesen voll akzeptiert werden. Für eine mögliche Priorisierung von Verstärkungsmaßnahmen stellt die Quantifizierung des Schutzstandards ein wichtiges Instrument dar. Dabei sollten weiterhin Daten zu

Wasserständen und Seegang auf den Halligen während eines Landunters gesammelt werden, um das bestehende numerische Seegangmodell weiter kalibrieren zu können.

5 Schriftenverzeichnis

- BACHMANN, D.: Beitrag zur Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems zur Bewertung und Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen; Dissertation; Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2012.
- BWK: Mobile Hochwasserschutzsysteme – Grundlagen für Planung und Einsatz; Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) e.V.; ISBN 3-936015-19-8, 2005.
- CHO, D.-O.: The evolution and resolution of conflicts on Saemangeum Reclamation Project. *Ocean and Coastal Management*, Volume 50, Issues 11–12, 930–944, 2007.
- DEMUTH, B.: Das Schutzgut Landschaftsbild in der Landschaftsplanung – Methodenüberprüfung anhand ausgewählter Beispiele der Landschaftsrahmenplanung; Mensch und Buch Verlag; Berlin, 2000.
- EHLERS, J.: The Morphodynamics of the Wadden Sea. Rotterdam, A. A. Balkema, ISBN 90-6191-679-8, 1988.
- 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.
- KIEMSTEDT, H.; OTT, S. und MÖNNECKE, M.: Methodik der Eingriffsregelung – Gutachten zur Methodik der Ermittlung, Beschreibung und Bewertung von Eingriffen in Natur und Landschaft, zur Bemessung von Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen sowie von Ausgleichszahlungen; Institut für Landschaftspflege und Naturschutz der Universität Hannover, 1996.
- LKN-SH: Fachplan Küstenschutz Sylt. Husum: Landesamt für Küstenschutz, Naturschutz und Meeresschutz Schleswig-Holstein, 2014.
- MELUR-SH: Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein. Fortschreibung 2012.
- NIEMEYER, H.D. und KAISER, R.: Hydrodynamische Wirksamkeit von Lahnungen, Helmlern und Sommerdeichen. *Die Küste*, 64, 15–60, 2001.
- PETERSEN, M.: Die Halligen: Küstenschutz – Sanierung – Naturschutz. Karl Wachholtz Verlag, Neumünster, 1981.
- PULLEN, T.; ALLSOP, N.W.H.; BRUCE, T.; KORTENHAUS, A.; SCHÜTTRUMPF, H. and VAN DER MEER, J.W.: EurOtop. Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual, *Die Küste*, 73, 1–178, 2007.
- STADELMANN, R.: Den Fluten Grenzen setzen – Schleswig Holsteins Küstenschutz – Westküste und Elbe. Band 1, Nordfriesland, Husum, 2008.