

Modellbasierte Sicherheitsüberprüfung von Deichen an der Westküste Schleswig-Holsteins

Ulrich Winskowsky und Birgit Matelski

Zusammenfassung

Alle 10 bis 15 Jahre führt das Land Schleswig-Holstein eine Sicherheitsüberprüfung seiner Seedeiche durch. Durch die regelmäßige Überprüfung soll sichergestellt werden, dass kritische Veränderungen sowohl am Bauwerk als auch bei den zu erwartenden Belastungen infolge der Klimaänderung rechtzeitig erkannt werden. Mussten in der Vergangenheit die für die Überprüfung erforderlichen Seegangparameter noch aus Wellenaufmessungen und Treibselmessungen ermittelt werden, so wurde für den „Generalplan Küstenschutz 2012“ des Landes Schleswig-Holstein der Seegang mit einem numerischen Seegangsmodell berechnet. Das hat den Vorteil, einen an allen Deichstrecken mit einem einheitlichen Verfahren ermittelten Seegang in der erforderlichen Auflösung zur Verfügung zu haben, unabhängig von oftmals mit Messfehlern behafteten Naturdaten. Am Beispiel der Insel Pellworm wird das Verfahren vorgestellt.

Schlagwörter

Seedeiche, Sicherheitsüberprüfung, Seegangsmodell, Bemessungsseegang

Summary

Every 10 to 15 years, the German Federal State of Schleswig-Holstein performs a safety check of its sea dikes. The regular check shall ensure that critical changes both to the structure and to the expected hydrological forces as a result of climate change are detected in time. While in the past wave run-up or debris edge measurements were used to determine the necessary wave parameters for the safety check, for the “Coastal Defence Master Plan 2012” of Schleswig-Holstein these parameters were calculated with a numerical wave model. An advantage of this method is that wave data in the required resolution for all dikes are established with a uniform procedure, regardless of natural data with frequent measurement errors. In the present paper this procedure is exemplified for the island of Pellworm.

Keywords

sea dikes, safety check, wave model, design wave

Inhalt

1	Einleitung.....	522
2	Ermittlung des Bemessungsseegangs.....	523
3	Sturmflutwasserstand als Randbedingung.....	524

4	Wind als Randbedingung.....	524
5	Simulationen	525
6	Seegangparameter am Deich	525
7	Ergebnisse	527
8	Ausblick	529
9	Schriftenverzeichnis.....	529

1 Einleitung

Das zwischen der Nord- und Ostsee gelegene deutsche Bundesland Schleswig-Holstein verfügt über eine Küstenlinie von insgesamt 1105 Kilometern. Annähernd 430 km dieser Küstenlinie werden durch sogenannte Landesschutzdeiche (Abb. 1) geschützt, weitere 96 km durch sogenannte Regionaldeiche. Die Landesschutzdeiche erfüllen einen besonders hohen Sicherheitsstandard, da sie das Hinterland vor Sturmfluten schützen, häufig im Zusammenwirken mit einem weiteren Deich (zweite Deichlinie) oder sonstigen Hochwasserschutzanlagen (MELUR 2012). Für Regionaldeiche bestehen im Allgemeinen geringere Sicherheitsstandards.



Abbildung 1: Übersichtskarte von Schleswig-Holstein mit den Landesschutzdeichen (schwarze Linien), (LKN.SH (Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein)).

An der Westküste Schleswig-Holsteins überwiegt tiefliegendes Marschland. Die Küste wird hier über eine Länge von 228 km – mit wenigen Ausnahmen – durch Landesschutzdeiche geschützt. Weitere 131 km Landesschutzdeiche befinden sich an den Küsten der

Inseln (71 km) und entlang des Elbeästuars (60 km). Im Gegensatz dazu gibt es an der Ostküste von Schleswig-Holstein mit insgesamt 71 km vergleichsweise wenige Landesschutzdeiche.

Die Landesschutzdeiche Schleswig-Holsteins werden regelmäßig alle 10 bis 15 Jahre auf Einhaltung des Schutzstandards überprüft, letztmalig im Jahr 2011 (MELUR 2012). Als Sicherheitskriterium verwendet das im Generalplan Küstenschutz 2001 eingeführte dynamische Deichsicherheitssystem den Wellenüberlauf. In der Vergangenheit wurde die Wellenaufbauhöhe anhand von Treibselmessungen regional festgelegt. Das seit 2001 eingesetzte Verfahren hat den Vorteil, dass zusätzlich zu Wasserstand und Seegang die lokale Wellenangriffsrichtung und die Geometrie der Deichaußenböschung berücksichtigt werden.

Da geringe Überlaufmengen die Standsicherheit von Deichen nicht gefährden, ist in Schleswig-Holstein eine Überlaufmenge von maximal 2 Liter pro Sekunde und laufendem Meter zulässig. Dieser Wert gilt für Deiche mit einer intakten Grasnarbe auf der Binnenböschung. Für Deiche mit Deckwerken, beispielsweise Asphaltdeiche, werden höhere Werte beim Wellenüberlauf toleriert. Wenn die berechnete Überlaufmenge den zulässigen Grenzwert überschreitet, ist eine Deichverstärkung erforderlich.

Für den Generalplan Küstenschutz 2001 wurde ein verwaltungseigenes Verfahren angewendet, um die Seegangsparameter am Deichfuß aus Wellenaufbaumessungen und Treibselmessungen zu ermitteln. Diese Parameter wurden dann auf die gesamte Deichstrecke interpoliert. Es stellte sich später heraus, dass dieses Verfahren mit Schwächen behaftet ist. Einerseits sind die Treibselmessungen nicht ausreichend zuverlässig, andererseits ist die Extrapolation auf längere Deichabschnitte problematisch (PROBST 2004).

Seit 2008 erfolgt die Berechnung der Wellenüberlaufmengen anhand des deterministischen Verfahrens nach EUROTOP (2007). Zwischenzeitlich wurde auch das EAK-Verfahren (EAK 2002) verwendet, das jedoch im Vergleich geringere Überlaufmengen zum Ergebnis hatte. Die für das Verfahren erforderlichen Seegangsparameter werden seitdem mit Hilfe eines numerischen Seegangsmodells ermittelt.

2 Ermittlung des Bemessungsseegangs

Die Berechnung der Seegangsparameter für die Sicherheitsüberprüfung der Landesschutzdeiche 2012 erfolgte über das spektrale Seegangsmodell SWAN (Simulating Waves Nearshore). Die Eignung von SWAN zur Ermittlung der Seegangsverhältnisse während Sturmereignissen an der Westküste Schleswig-Holsteins wurde bereits durch MAI (2002) und NIEMEYER und KAISER (2003) beschrieben.

In den SWAN-Simulationen wurden alle verfügbaren physikalischen Prozesse, die den Seegang im Berechnungsgebiet beeinflussen, berücksichtigt. Dazu gehören der Energieeintrag durch Wind, Refraktion, Shoaling, tiefeninduziertes Wellenbrechen und Schaumkronenbrechen (White Capping), die nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen den Wellen (Triad- und Quadrupletinteraktion) sowie Bodenreibung.

Bei ausreichend hoher räumlicher Auflösung kann SWAN auch den Einfluss der Diffraktion berücksichtigen. Auf Grund der Größe des Untersuchungsgebiets konnte diese Option jedoch nicht angewendet werden. In Gebieten, die nicht der Hauptangriffsrichtung des Seegangs ausgesetzt sind, kann durch Diffraktion zusätzliche Wellenenergie eingetragen werden. Dieser Effekt ist zu berücksichtigen, wenn der Bemessungsseegang für Bereiche ermittelt werden soll, die vom Wellenangriff abgeschattet sind.

Als Worst-Case-Szenario für die Sicherheitsüberprüfung der Deiche wurde die Kombination aus dem Sturmflut-Referenzwasserstand und dem maximal möglichen Seegang definiert.

3 Sturmflutwasserstand als Randbedingung

Der in den Simulationen verwendete Sturmflutwasserstand wurde mit Hilfe eines neu entwickelten Verfahrens ermittelt, welches auf der instationären und regionalen Wahrscheinlichkeitsanalyse (MELUR 2012) beruht. Der festgelegte Referenzwasserstand entspricht einem Wasserstand mit einem statistischen Wiederkehrintervall von 200 Jahren (RHW200). Er ist regional unterschiedlich und erfordert für jeden Deichabschnitt einen separaten Modelllauf.

4 Wind als Randbedingung

Untersuchungen von Sturmflutwasserständen und den zugehörigen Windgeschwindigkeiten und -richtungen an der Westküste Schleswig-Holsteins führten zu der Schlussfolgerung, dass der Sektor zwischen SW und NW als signifikante Windrichtung für das Auftreten des Windstaus beim Referenzwasserstand definiert werden kann.

Zur Festlegung der höchsten zu erwartenden Windgeschwindigkeiten für diese Windrichtungen wurden die Daten aus regionalen Windmessungen verwendet. Tab. 1 zeigt für den Zeitraum 1969-2011 beispielhaft die höchsten gemessenen Windgeschwindigkeiten und zugehörigen Windrichtungen am Windmesser auf der Hallig Hooge im südlichen Nordfriesischen Wattenmeer während einer Sturmflut.

Tabelle 1: Höchste gemessene Windgeschwindigkeiten für unterschiedliche Windrichtungen während einer Sturmflut an der Messstation Hallig Hooge (DWD) für den Zeitraum 1969-2011 (* Pegel Husum (WSA Tönning); NHN: Normalhöhennull).

Datum	Name	Wasserstand * [NHN+m]	Wind	
			θ [-]	u [m/s]
24.11.1981	-	5,15	SW	26
08.01.2005	Freddy	3,46	WSW	25
03.12.1999	Anatol	5,37	W	29
03.01.1976	Capella	5,61	WNW	28
10.01.1995	-	4,37	NW	22

Auf Grundlage dieser Untersuchungen wurde die maximale Windgeschwindigkeit für Windrichtungen aus SW-NW mit 32 m/s festgelegt. Um das Risiko einer Unterschätzung des Bemessungsseegangs zu vermeiden, wurde die gewählte Windgeschwindigkeit grundsätzlich höher als die Messwerte angesetzt.

Die Wahl der höchsten Windgeschwindigkeit an der Westküste Schleswig-Holsteins hat sich bereits als zutreffend und als nicht zu hoch erwiesen. Während des Sturms „Christian“ am 28. Oktober 2013 betrug z. B. die gemessene Windgeschwindigkeit am Windmesser Hallig Hooge nahezu 32 m/s aus Richtung WSW.

5 Simulationen

Auf Grund der Größe des Untersuchungsgebiets, der Anzahl der Deichabschnitte und unterschiedlicher Genauigkeitsanforderungen an die Modellergebnisse wurden die Simulationen mittels genesteter Modelle mit unterschiedlicher Ausdehnung und Auflösung durchgeführt.

Die Bathymetrie des Modells basierte jeweils auf den neuesten verfügbaren Messdaten. Abb. 2 zeigt am Beispiel der Insel Pellworm das Vorgehen.

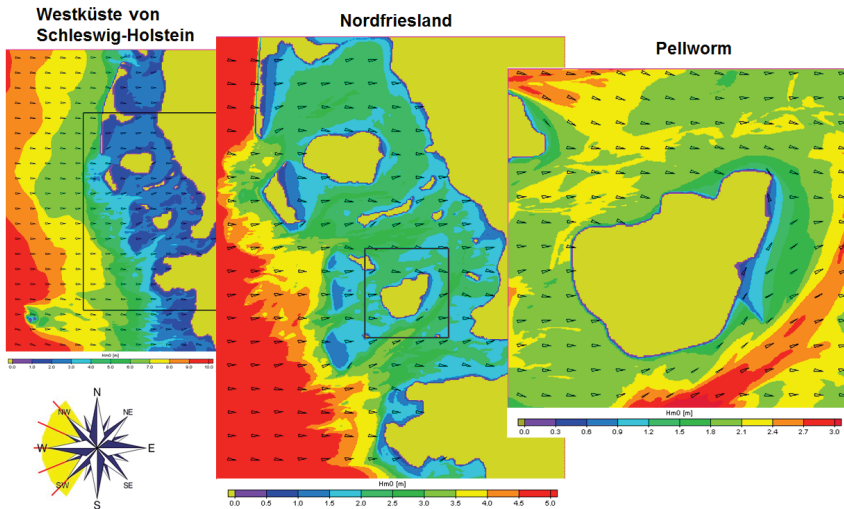


Abbildung 2: Berechnete signifikante Wellenhöhe und mittlere Wellenrichtung in den genesteten Modellen für das Szenario „Wind aus West“, (LKN.SH).

Die Grenzen des übergeordneten Modellgebiets (Deutsche Bucht Modell) wurden so gewählt, dass eine Beeinflussung der simulierten Seegangparameter im Bereich der Detailmodelle (Deichabschnittsmodelle) durch die am Rand eingesteuerten Wellenhöhen und -perioden ausgeschlossen ist. Der Seegang im Wattenmeer ist ohnehin geprägt durch den lokalen Wind, der einlaufende Seegang hat hier nur eine geringe Bedeutung.

Die Simulationen wurden stationär durchgeführt, d. h. mit einem räumlich und zeitlich als konstant angenommenem Wasserstand und Windfeld. Der maßgebende Windsektor zwischen SW und NW wurde dabei in fünf Windrichtungen im Abstand von jeweils $22,5^\circ$ unterteilt. Für jeden regional unterschiedlichen Referenzwasserstand (RHW200) wurden insgesamt fünf Modellläufe durchgeführt.

6 Seegangparameter am Deich

Für die Berechnung von Wellenauflauf und Wellenüberlauf nach EUROTOP (2007) werden die Seegangparameter unmittelbar am Deichfuß benötigt. Der Deichfuß ist bei scharliegenden Deichen der Übergang von der Deichböschung ins Watt, bei Vorlanddeichen der Übergang ins Vorland. An der Westküste von Schleswig-Holstein kann das

Vorland bis zu NHN +2 m hoch sein. Der Deichfuß ist somit der maßgebende Berechnungspunkt für den Seegang.

Die Sicherheitsüberprüfung an der Westküste von Schleswig-Holstein erfolgte in der Regel an Deichprofilen im Abstand von jeweils 500 m. Für diese Profile wurden die Seegangsparameter (aus Modellberechnungen) am Deichfuß benötigt.

Das Seegangsmodell SWAN erlaubt die Berechnung von Seegangsparametern in vorgegebenen Höhen an definierten Profilen. Wird davon ausgegangen, dass der Deichfuß an einem scharliegenden Deich bei NHN +1 m und bei einem Vorlanddeich bei NHN +2 m liegt, so können die maßgebenden Berechnungspunkte automatisch bestimmt und die Seegangsparameter für diese Punkte ausgegeben werden.

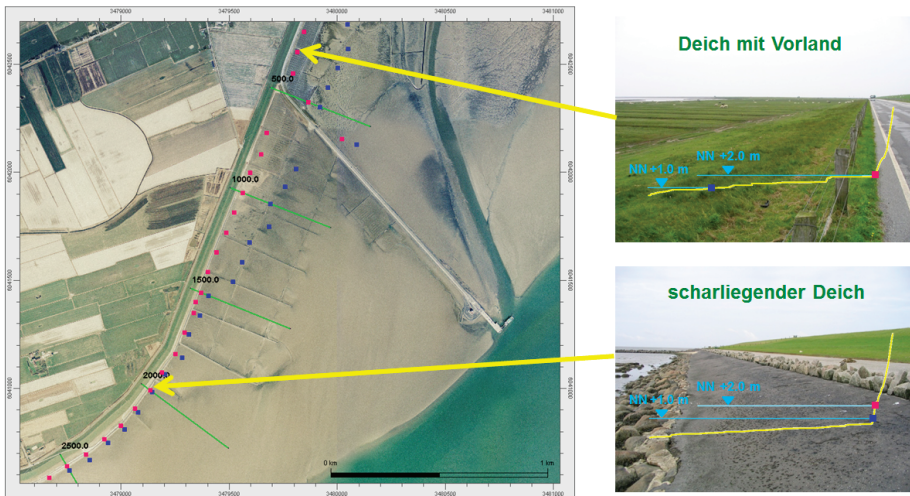


Abbildung 3: Berechnungspunkte für den Bemessungsseegang an der Ostseite der Insel Pellworm (rot: NHN +2 m; blau: NHN +1 m; Luftbild 2005), (LKN.SH).

Abb. 3 zeigt das Ergebnis dieses Verfahrens am Beispiel der Ostseite der Insel Pellworm mit dem Wattsockel, dem Gezeitenstrom Norderhever, dem Damm zum Fähranleger und der Hafenzufahrt zum alten Hafen von Pellworm. Südlich des Damms zum Tiefwasseranleger ist ab einer Entfernung von 1 km der Deich scharliegend, während sich im Nahbereich nördlich und südlich des Damms seit seiner Fertigstellung im Jahr 1991 Vorland gebildet hat.

Als Kriterium für die Bestimmung des höchsten Seegangs aus den Simulationsergebnissen für unterschiedliche Windrichtungen wurde die Höhe des zu erwarteten Wellenaufbaus verwendet. Die Festlegung des maximalen Seegangs, also die ungünstigste Kombination von Wellenhöhe, Wellenperiode und Wellenrichtung am maßgebenden Berechnungspunkt der Deichprofile, erfolgte aus den Simulationsergebnissen für die fünf Windsektoren unter Anwendung der Formel für den Wellenaufbau nach EUROTOP (2007).

7 Ergebnisse

Abb. 4 zeigt den Bemessungsseegang, der auf Basis der beschriebenen Simulationen für den Landesschutzdeich der Insel Pellworm ermittelt wurde. Für die Berechnung des Wellenüberlaufs nach EUROTOP (2007) werden die Parameter signifikante Wellenhöhe (H_{m0}) und mittlere Wellenperiode ($T_{m-1,0}$) benötigt. Erwartungsgemäß ist der Bemessungsseegang am Deichabschnitt an der Südseite Pellworms am höchsten. An den Deichabschnitten mit Vorland macht sich die dämpfende Wirkung des Vorlands auf den Bemessungsseegang deutlich bemerkbar.

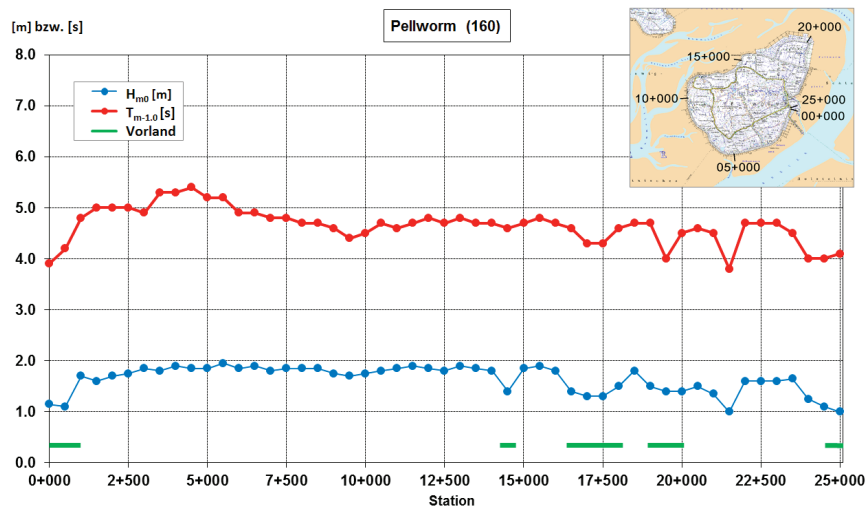


Abbildung 4: Modellbasierter Bemessungsseegang für die Sicherheitsüberprüfung des Landes-schutzdeichs der Insel Pellworm, (LKN.SH; oben rechts: DTK50-V LVermGeo SH).

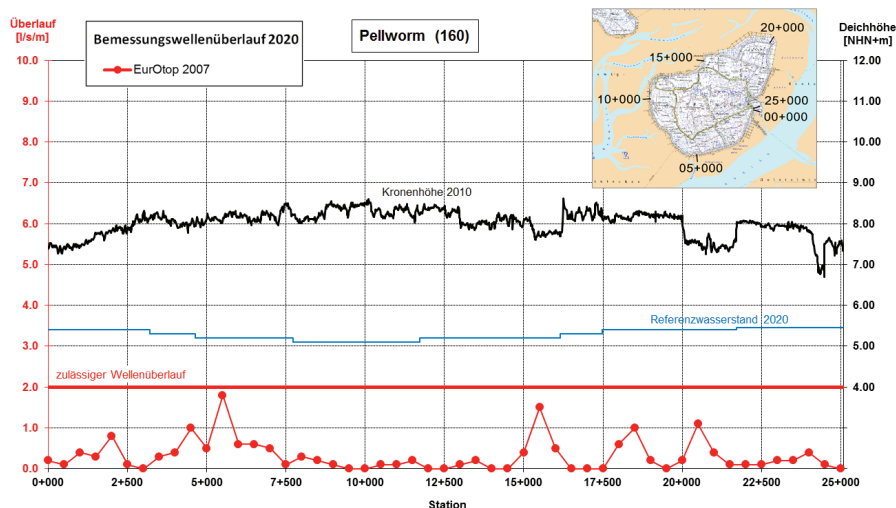


Abbildung 5: Bemessungswellenüberlauf für den Referenzwasserstand RHW200 am Landes-schutzdeich der Insel Pellworm, (LKN.SH; oben rechts: DTK50-V LVermGeo SH).

Simulationen von Sturmereignissen (Hindcasts) im südlichen Nordfriesischen Wattenmeer haben gezeigt, dass SWAN für die Wellenhöhe gute Ergebnisse im Vergleich zu den Messdaten liefert. Lediglich die mittleren Wellenperioden werden im Modell leicht unterschätzt. Weil nur wenige Messdaten für Sturmereignisse verfügbar sind, lässt sich derzeit kein zuverlässiger Wert für die Abweichung der Modelldaten von den Naturdaten ermitteln. Hinzu kommt, dass die Höhe der Abweichungen regional unterschiedlich ist. Um jegliches Risiko einer Unterschätzung der Wellenperiode auszuschließen, wurden für die Sicherheitsüberprüfung die modellbasierten Perioden mit einem Sicherheitsfaktor von 1,25 versehen. Die Ergebnisse liegen damit stets auf der sicheren Seite.

Das Ergebnis der Sicherheitsüberprüfung im Jahr 2012 für die Insel Pellworm ist in Abb. 5 dargestellt. Basierend auf dem berechneten Wellenüberlauf wird der zulässige Wellenüberlauf von 21 l/s/m an keinem der überprüften Deichprofile überschritten. Aus hydrologischer Sicht ist daher eine Verstärkung der Deiche auf der Insel Pellworm nicht erforderlich.

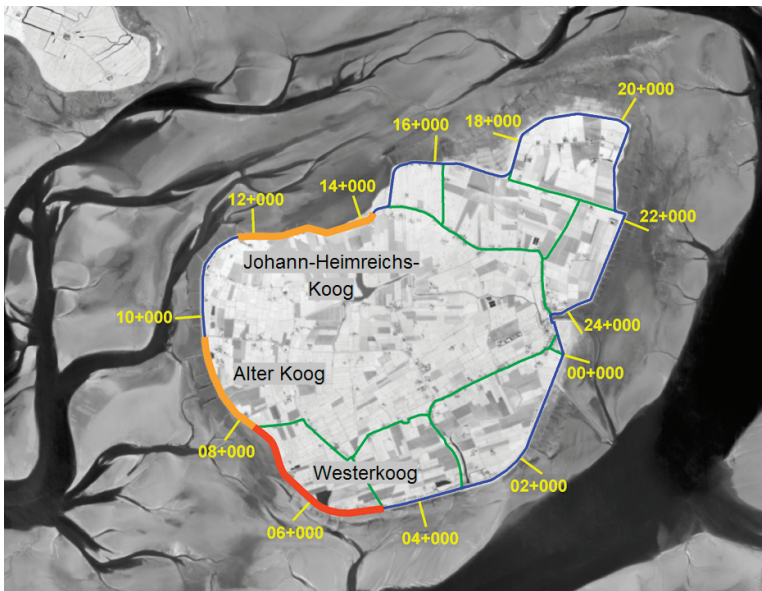


Abbildung 6: Geplante Deichverstärkungen auf der Insel Pellworm (rot: dringlich; blaue Linie: Landesschutzdeich; Luftbild 2000), (LKN.SH).

Abgesehen von hydrologischen Kriterien sind auch geotechnische Kriterien (z. B. Grasnarbe, Deichmaterial) und andere Faktoren, wie etwa das Vorhandensein einer zweiten Deichlinie, ausschlaggebend für die Sicherheit von Landesschutzdeichen. Auf Basis nicht-hydrologischer Kriterien wurde im Generalplan Küstenschutz 2012 für den Deichabschnitt „Westerkoog“ auf einer Länge von 3,1 km vordringlicher Verstärkungsbedarf festgelegt (Abb. 6). Weitere Verstärkungsmaßnahmen sind an den Abschnitten „Alter Koog“ und „Johann-Heimreichs-Koog“ auf einer Länge von insgesamt 4,5 km erforderlich.

Die Sicherheitsüberprüfung der Deiche an der Ostküste und am Elbeästuar wurde in ähnlicher Weise durchgeführt.

8 Ausblick

Schleswig-Holstein wird in den folgenden Jahren den Sicherheitsstatus der Regionaldeiche untersuchen. Hierfür wird ein Verfahren auf der Grundlage von kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wasserstand und Seegang zur Anwendung kommen.

9 Schriftenverzeichnis

- EAK 2002: Empfehlungen für Küstenschutzbauwerke. Die Küste, 65, 2002.
- EUROTOP: Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual, August 2007.
- MAI, S.: Seegangsausbreitung in Hever und Heverstrom. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, 87, 98-141, 2002.
- MELUR: Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein, Fortschreibung 2012.
- NIEMEYER, H. und KAISER, R.: Ermittlung des Bemessungsseegangs für Küstenschutzwerke und Randdünen mit Mathematischer Modellierung. Schlussbericht zum KFKI-Forschungsvorhaben „Bemessungsseegang“ KIS004, Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Forschungsstelle Küste, 2003.
- PROBST, B.: Dynamisches Deichsicherheitssystem in Schleswig-Holstein. In: GÖNNERT, G.; GRASSL, H.; KELLETAT, D.; KUNZ, H.; PROBST, B.; VON STORCH, H. und SÜNDERMANN, J. (Hrsg.): Klimaänderung und Küstenschutz, 29. und 30. November 2004, 223-231, 2004.