

# Integrierte Bemessung von See- und Ästuardeichen

*Cordula Berkenbrink und Hans Dieter Niemeyer*

## Zusammenfassung

Der Klimawandel und seine Folgewirkungen werden den Insel- und Küstenschutz vor erhebliche Herausforderungen stellen, da von stark wachsenden Beanspruchungen der Schutzwerke auszugehen ist. Beschleunigter Meeresspiegelanstieg, wachsender Stau von Sturmfluten bewirken einerseits höhere Bemessungswasserstände und andererseits höhere Wassertiefen, die wegen der Tiefenbegrenzung des Seegangs vor den Schutzwerken dessen Zunahme ermöglichen. Insofern ist von einem erheblichen Wachsen, der in den gängigen Bemessungsansätzen berücksichtigten hydrodynamischen Belastungen, auszugehen. Sie bestimmen bei der gegenwärtigen Bemessungspraxis allein die Dimensionierung von Deichen.

Im Sinne einer effektiveren Bemessung von See- und Ästuardeichen hinsichtlich Sicherheit und Wirtschaftlichkeit erscheint deshalb eine differenziertere Berücksichtigung der hydrodynamischen Belastungen in Verbindung mit der berücksichtigten bodenmechanischen Widerstandsfähigkeit der beim Deich verwendeten Erdbaustoffe unverzichtbar. Um diese Zielsetzung zu erreichen wurde ein entsprechendes Konzept für das Forschungsvorhaben „Integrierte Bemessung von See- und Ästuardeichen“ entwickelt, das vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) gebilligt und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde.

Die Umsetzung des Forschungsvorhabens erfolgte einerseits durch eine Identifikation geeigneter bodenmechanischer Parameter zur Charakterisierung der Widerstandsfähigkeit der verwendeten Erdbaustoffe gegenüber den erfolgenden hydrodynamischen Belastungen. Sie wurden andererseits wesentlich differenzierter analysiert als mit den gegenwärtig genutzten empirischen Bemessungsansätzen möglich, um ein integriertes hydrodynamisch-bodenmechanisches Bemessungsverfahren entwickeln zu können. Hierfür wurde das bei HR Wallingford entwickelte mathematische Wellenauf- und -überlaufmodell OTT-1D genutzt. Es wurde verifiziert, kalibriert und für die Anwendung in der Bemessungspraxis dahingehend tauglich gemacht und optimiert, dass die hydrodynamischen Belastungen der Innenböschungen quantifiziert werden können und Baukörperabschnitte mit unterschiedlichen Rauigkeitsabschnitten berücksichtigt werden können. Im Anschluss wird das neuentwickelte integrierte hydrodynamisch-bodenmechanische Bemessungskonzept repräsentativ auf einen exponierten Seedeich und einen Ästuardeich in Niedersachsen angewendet. Mit Hilfe des differenzierten Bemessungsansatzes werden für diese Deiche die Potenziale an Belastungsreserven aufgezeigt, die sich bei seiner konsequenten Anwendung in Zukunft nutzen werden lassen, um einen Teil der aus Klimaänderungsfolgen herrührenden zusätzlichen Belastungen ohne weitere Erhöhungen von Deichen kompensieren zu können.

## Schlagwörter

Insel- und Küstenschutz, integrierte Bemessung, Erdbaustoffe, Hydrodynamik, Bodenmechanik, Wellenüberlauf, Überlaufssicherheit, Klimaänderungsfolgen

## Summary

*The impact of the expected changes of global climate will create until now unknown challenges for coastal protection. The anticipated acceleration of sea level rise in combination with an expected higher set-up of storm surges will create both higher storm surge levels and accompanying increasing wave energy. Existing guidelines for dyke design heights only consider hydrodynamic loads and the geometry of the construction, whereas its resistance of the construction and in particular that of the soil of the cover layer is not considered as design criteria. In order to improve as well safety as cost effectiveness it is necessary for one thing to evaluate the hydrodynamic loads more differentiated than with the up to now applied empirical relationships and also apart from that resistance of the soil used for the construction of a dyke. This idea of an integrated design concept was the trigger for the project "Integrated Design of Sea- and Estuarine Dykes" which was approved by the German Coastal Engineering Research Council (KFKI), and funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF). In order to provide sufficiently differentiated hydrodynamic loads being necessary for checking the resistance capacity of the dyke construction in respect of the used soil material and its characteristics evaluated by soil mechanics, the mathematical model OTT-1d of HR-Wallingford was refined, validated and verified. The implementation of the model for design practice was achieved by introduction of an initially dry inner slope and by establishing of the capability to consider distinct sections of the construction with divergent roughness. The integrated design concept is applied for representative types of dykes at the coast and in an estuary of Lower Saxony for a wide range of hydrodynamic loads including scenarios for anticipated climate change impacts. Finally the effects of the new design concept as a countermeasure to climate change impacts are highlighted by determining potential reductions of design heights in comparison to empirical design for the same types of dykes.*

## Keywords

*coastal protection, integrated design of dykes, hydrodynamic loads, wave overtopping, clay, soil mechanics, overtopping security, climate change adaptation*

## Inhalt

1	Einleitung und Problemstellung .....	533
2	Jüngste Verbesserungen bei der Deichbemessung in Niedersachsen .....	534
3	Ansatz einer integrierten Bemessung.....	535
3.1	Struktur des modularen Aufbaus.....	535
3.2	Beschreibung des mathematischen Modells und erfolgter Modifikationen.....	536
4	Exemplarische Anwendungen des integrierten Bemessungskonzepts .....	537
5	Potenzial zur Kompensation künftiger Klimaänderungsfolgen.....	540
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	541
7	Danksagung.....	542
8	Schriftenverzeichnis.....	542

## 1 Einleitung und Problemstellung

Der Wellenüberlauf ist ein wichtiges Bemessungskriterium für Küstenschutzbauwerke; in der Vergangenheit waren Wellenüberlaufwirkungen häufigste Ursache für Deichversagen an der deutschen Nordseeküste. Vor diesem Hintergrund ist es naheliegend, differenzierte quantitative Kenntnisse über diese hydrodynamische Belastungsform mit zuverlässigen, leistungsfähigen Werkzeugen zu generieren, um angesichts zu erwartender Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs und erhöhter Sturmintensität die Widerstandsfähigkeit von Küstenschutzwerken gezielt verbessern zu können. Auf dieser Ausgangsgrundlage beruhten die Überlegungen, die zur Idee eines Konzepts einer integrierten Bemessung von See- und Ästuardeichen und zur Entwicklung eines Konzepts zur Umsetzung dieser Idee führten.

Aktuell erfolgt die Ermittlung von Wellenüberlaufmengen fast ausschließlich mittels empirischer Formeln (EurOtop, 2007), die aus den Ergebnissen hydraulischer Modellversuche für definierte Seegangsbedingungen und Bauwerksgeometrien hergeleitet worden sind. Für andere Bauwerksgeometrien oder Seegangsbedingungen als die in den grundlegenden hydraulischen Modellversuchen verwandten, sind die darauf aufbauenden empirischen Formeln nur eingeschränkt anwendbar und in solchen Fällen können dabei Über- oder Unterschätzungen auftreten. Mathematische Modelle sind hingegen in der Lage, Wellenüberlauf deutlich präziser zu reproduzieren als empirische Formeln, da mit ihnen nahezu jede Bauwerksgeometrie und jedes Seegangsspektrum berücksichtigt und mit geringem Aufwand variiert werden können. Von daher war es naheliegend für eine integrierte Bemessung von Deichen die hydrodynamischen Belastungen mit mathematischen Modellen für Wellenauflauf- und -überlauf zu ermitteln, wofür in der Forschungsstelle Küste die personellen und instrumentellen Voraussetzungen gegeben waren.

Für die Ermittlung der bodenmechanischen Widerstandsfähigkeit der im Deichbau verwandten Erdbaustoffe wurden die erforderlichen Beprobungen und Analysen vom Projektpartner Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Universität Duisburg-Essen vorgenommen (RICHWIEN et al. 2010). Für die Charakterisierung der bodenmechanischen Eigenschaften des Deichbaumaterials werden Kennwerte herangezogen, die den Parametern aus Standardanalysen in bodenmechanischen Labors entsprechen.

Naturversuche zur Überlauftoleranz in den Niederlanden ergaben, dass ein Deich Überlaufwerten von bis zu  $50 \text{ l}/(\text{m} \cdot \text{s})$  ohne Schaden standhalten konnte (Abb. 1) (VAN DER MEER et al. 2009). Das hat in Ländern mit Niederungsküsten wie Deutschland oder die Niederlande dazu geführt, ambitionierte Forschungsprogramme zu entwickeln, um die Kenntnisse zum Wellenüberlauf und damit zusammenhängende Deichsicherheit zu vertiefen und so weiter zu entwickeln, dass sie für eine künftige Bemessungspraxis umsetzbar werden.

Ziel des Projekts „Integrierte Bemessung von See- und Ästuardeichen“ ist es primär gewesen, das Kriterium für Deichsicherheit über den unmittelbaren Abgleich von lokalen hydrodynamischen Belastungen und spezifischer bodenmechanischer Widerstandsfähigkeit der Erbaustoffe in der Kleiabdeckung unter Einbeziehung der Bauwerksgeometrie festzulegen und sekundär damit gegebenenfalls Belastungsreserven bestehender Deiche zu quantifizieren. Weiterhin lassen sich mit dem Bemessungskonzept Sicherheitsdefizite bestehender Deiche identifizieren, um für Planungen von Deichverstärkungen eine gezielte Priorisierung zu ermöglichen.



Abbildung 1: Binnenböschung eines Deichs in Delftzijl bei Wellenüberlaufversuchen in der Natur.

Im Folgenden wird das Konzept der integrierten Bemessung aufgezeigt und beispielhaft die dabei erfolgende Zusammenführung hydrodynamischer Belastungen und bodenmechanischer Widerstandsfähigkeit demonstriert sowie die Nutzung des integrierten Bemessungskonzepts für eine wirtschaftlichere Dimensionierung von Deichen zur Kompensation von Klimaänderungsfolgen.

## 2 Jüngste Verbesserungen bei der Deichbemessung in Niedersachsen

Nach der Katastrophenflut vom Februar 1962 mit mehr als 300 Todesopfern wurde neben der Einführung einer festgelegten Berechnung von Bemessungswasserständen die Ermittlung des Bemessungswellenaufbaus für Deiche als relevanter Teil der Deichsicherheit in die Gesamtbemessung in Niedersachsen einbezogen (LÜDERS und LEIS 1964). Doch mangels Informationen über das lokale Seegangsklima in den morphologisch überaus differenzierten Küstengebieten und Ästuaren war anfangs nur eine Abschätzung auf empirischer Grundlage möglich. Die Bemessung orientierte sich an Daten, die während vergangener Sturmfluten zum Wellenaufbau ermittelt wurden. Um für das Hinterland ausreichenden Schutz zu gewährleisten, wurden Schätzungen zum Bemessungswellenaufbau ausgeführt, die zum Teil vergleichsweise hohe Werte für lange Deichstrecken als Bemessungsgröße lieferten (Abb. 2). Seit 1976 werden auf der Grundlage eingemessener Teekgrenzen nach Sturmfluten die zugehörigen kennzeichnenden Seegangsparameter abgeleitet und über örtlich konstante Relationen zur Wassertiefe für den Bemessungsfall extrapoliert und mit ihnen dann der Bemessungswellenaufbau ermittelt (NIEMEYER 1977), (NIEMEYER et al. 1995). Somit konnte – in Orientierung am Naturgeschehen – eine wesentlich differenziertere Festlegung des Bemessungswellenaufbaus als mit der vorher praktizierten pauschalen Festlegung erreicht werden (Abb. 2).

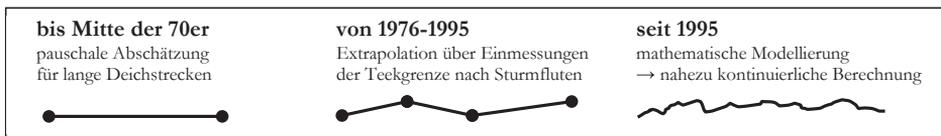


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Fortentwicklung von Bemessungsansätzen zur Ermittlung des Bemessungswellenaufbaus für Deiche in Niedersachsen in den vergangenen Jahrzehnten (NIEMEYER et al. 2010).

Seit 1997 wird der Bemessungsseegang unter Verwendung des vollspektralen Seegangsmodells der dritten Generation SWAN (RIS et al. 1995) ermittelt (NIEMEYER 2001, 2008; NIEMEYER et al. 2001), das die Eingangsgrößen für modifizierte Auflaufformeln (VAN DER MEER und DE WAAL 1993; VAN GENT 1999) unter Berücksichtigung einer Überlauftoleranz von 3 % (NIEMEYER 2001, 2008) liefert. Mit dieser Methodik wurde eine sowohl sicherere als auch wirtschaftlichere Bemessung von Deichen gegen Wellenauf- und -überlauf als bis dahin praktiziert möglich.

### 3 Ansatz einer integrierten Bemessung

#### 3.1 Struktur des modularen Aufbaus

Ziel des Forschungsvorhabens „Integrierte Bemessung von See- und Ästuardeichen“ ist die Entwicklung einer neuartigen Bemessungsmethodik, bei der einerseits in differenzierter Form die hydrodynamischen Belastungen ermittelt werden und andererseits neben der Geometrie der Deiche auch die Widerstandsfähigkeit des Erdbaustoffs Klei berücksichtigt werden kann. Dabei werden neue Elemente mit bewährten Methoden modular zu einem Gesamtsystem verbunden (Abb. 3), das auch für zukünftig mögliche Teiloptimierungen hinreichend flexibel ist.

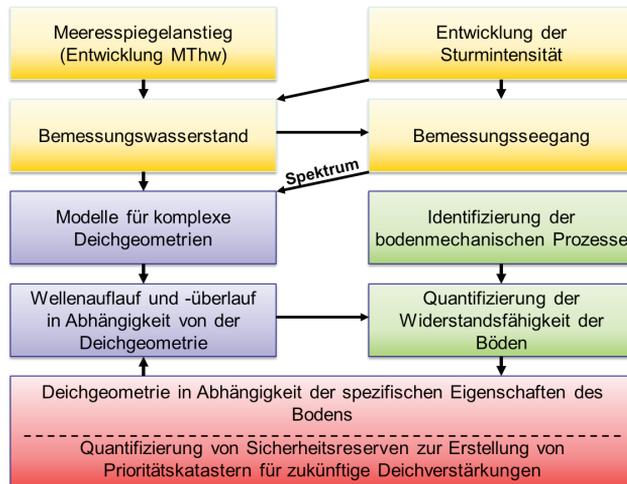


Abbildung 3: Ablaufschema der integrierten Bemessung.

Zur Ermittlung von Bemessungswasserständen und Bemessungsseegang wurden die Bemessungsmethoden des Landes Niedersachsen (NIEMEYER 2001, 2008) herangezogen. Im Gegensatz zum bisherigen Vorgehen werden aber Wellenauf- und Wellenüberlauf statt mit empirischen Formeln mit mathematischen Modellierungen differenziert ermittelt (BERKENBRINK et al. 2009, 2010), was den Vorteil bietet, dass nahezu jede Bauwerksgeometrie und jeder Bemessungsseegang berücksichtigt werden können. Darüber hinaus lassen sich so die jeweiligen hydrodynamischen Belastungen an jeder beliebigen Stelle der Bauwerks-oberfläche ermitteln, an dem die bodenmechanische Widerstandsfähigkeit des verwandten Erdbaustoffs relevant ist.

### 3.2 Beschreibung des mathematischen Modells und erfolgter Modifikationen

Die Modellierungen von Wellenauf- und -überlauf erfolgten mit dem bei HR Wallingford entwickelten Modell OTT-1d (DODD et al. 1998), das Teil der Modellgruppe ANEMONE (Advanced Non-linear Engineering Models for the Nearshore Environment) ist. Es ist in der Lage, die vollständige Überströmung eines Bauwerkes zu reproduzieren. Dies liegt im Wesentlichen an der Fähigkeit, mehrere Volumen bei diesem Vorgang getrennt zu identifizieren und zu quantifizieren wie die von Auflaufzunge, überströmendes Wasser, Wasserkörper in Lee.

Die mathematisch-physikalische Grundlage des Modells bilden die nicht-linearen Flachwassergleichungen. Sie gründen auf der Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung, bei der vertikale Geschwindigkeiten und Beschleunigungen vernachlässigt werden. Diese Bedingung ist für lange und flache Wellen weitestgehend erfüllt, da vertikale Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Flüssigkeitsteilchen beim Durchschwingen der Welle im Vergleich zu den horizontalen klein bleiben. Das Wellenbrechen wird über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Flachwasserwellen implizit modelliert. Der Wellenberg pflanzt sich auf Grund der größeren Wassertiefe schneller fort als das Wellental. Dadurch bildet sich eine vertikale Wellenfront aus, die als Bore angesehen werden kann und aus der sich der Wellenauflaufvorgang entwickelt.

Die Flachwassergleichungen werden in OTT-1d mit der Finiten-Volumen-Methode (FVM) explizit gelöst, womit ein Abbild des Wellenfeldes erstellt wird, mit dem seegangsbedingte sich transformierende Gestalt hochgradig zeit- und ortsauflösend beschrieben wird. Die Lösung der Flachwassergleichungen erfolgt nach dem Godunov-Verfahren, einer Standardmethode für FVM. Bei der FVM wird im Gegensatz zur Finite Differenzen Methode (FDM) die integrale Form der Gleichungen approximiert. Das hat den Vorteil, dass die bei hyperbolischen Gleichungen entstehenden Diskontinuitäten über die Integrale definiert sind, im Gegensatz zu den Ableitungen bei der FDM. Außerdem sind sie erhaltend, d. h. Masse, Impuls und Energie bleiben durch die Rechnung in deren gesamten Verlauf unverändert. Das Modell OTT-1d verfügt über robuste numerische Lösungsschemata; die Rechenvorgänge laufen effizient und stabil.

Um das Modell auf Bauwerke mit komplexen Strukturen im Naturmaßstab anwenden zu können, waren Modifizierungen seiner Ursprungsversion erforderlich (BERKENBRINK et al. 2009). In einem ersten Schritt wurden bestehende Beschränkungen von Eingangs- und Ausgabeparametern aufgehoben, so dass das Modellgebiet vergrößert werden konnte. Weiterhin wurde die Übertragung des Ruhewasserspiegels an der Seeseite auf die Binnenböschung eliminiert, um die dort stattfindenden Überlaufvorgänge und daraus resultierenden hydrodynamischen Belastungen im Modell naturähnlich reproduzieren zu können. Um unterschiedliche Baumaterialien berücksichtigen zu können, wurde der konstante Rauheitsansatz dahingehend geändert, dass über eine Kopplung der Rauheit an die Geometriedaten unterschiedliche konstruktive Ausbildungen berechnet werden können. Die Verlässlichkeit der Modellergebnisse nach den vorstehend beschriebenen Modifikationen konnte erfolgreich über seine Ausgabesignale nachgewiesen werden (BERKENBRINK et al. 2009, 2010).

#### 4 Exemplarische Anwendungen des integrierten Bemessungskonzepts

Im Rahmen des Projekts wurde das integrierte Bemessungskonzept für unterschiedliche Randbedingungen angewandt. Als repräsentatives Beispiel wird hier davon die Bemessung eines Deichquerschnitts an der ostfriesischen Küste in Niedersachsen wiedergegeben. Die Deichkrone befindet sich auf 8,0 m über NHN, die Außenböschung ist 1:6 geneigt, die Binnenböschung 1:3. Die Kleiüberdeckung ist auf der Außenböschung und unterhalb der Deichkrone 1,5 m mächtig, auf der Binnenböschung 1,0 m (Abb. 4).

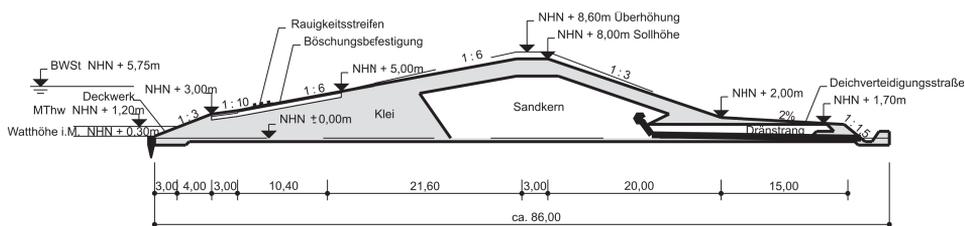


Abbildung 4: Querschnitt eines scharliegenden Deiches an der ostfriesischen Festlandsküste.

Nach der Erstellung des Konzepts für ein integriertes Bemessungsverfahren wurden für den Deich die hydrodynamischen Belastungen für verschiedene Szenarien um den damaligen Bemessungswasserstand von NHN +5,75 m pendelnd angesetzt. Beginnend bei NHN +5,00 m wurde der Ruhewasserspiegel im Modell in Schritten von 0,5 m auf bis zu NHN +7,50 m erhöht. Für alle als Randbedingung angesetzten Wasserstände wurde mit dem mathematischen Seegangmodell SWAN (BOOIJ et al. 1999) der dazugehörige Seegang modelliert (Abb. 5). Die Bandbreite signifikanter Wellenhöhen, Energieperioden und mittlerer Wellenrichtungen variiert für die untersuchten Wasserstände wie folgt:

$$1,76 \text{ m} \leq H_{m0} \leq 2,48 \text{ m}$$

$$3,6 \text{ s} \leq T_{m-1,0} \leq 5,4 \text{ s}$$

$$310^\circ \geq \theta_m \geq 303^\circ$$

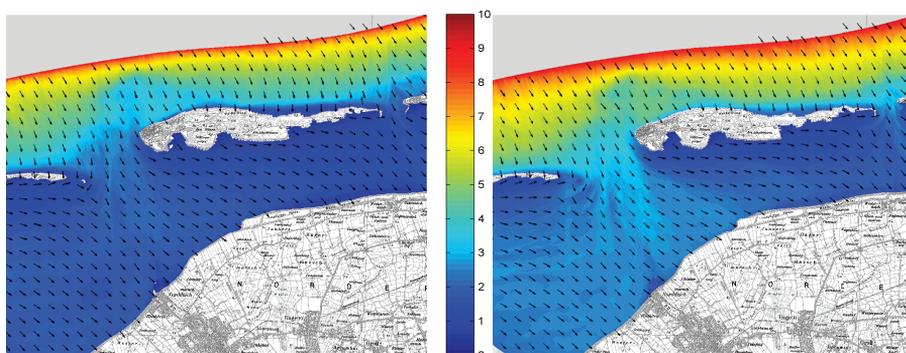


Abbildung 5: Räumliche Verteilung signifikanter Wellenhöhen  $H_{m0}$  [m] im Untersuchungsgebiet nach Modellierungen mit SWAN (links: Ruhewasserspiegel NHN+ 5 m; rechts: NHN+ 7,5 m) (BERKENBRINK et al. 2010).

Die für jeden der untersuchten Wasserstände ermittelten Seegangsspektren am Fuß des in exponierter Position liegenden Deichs dienen als Eingangswerte für die Modellierung des Wellenauf- und -überlaufs am Deich mit dem OTT-1d.

Die mittleren Wellenüberlaufhöhen erhöhen sich mit den steigenden Wasserständen und Seegangparametern überproportional (Abb. 6) und erreichen einen Maximalwert um  $200 \text{ l/(s}\cdot\text{m)}$  für einen Wasserstand von  $\text{NHN}+ 7,5 \text{ m}$ . Für den derzeit gültigen Bemessungswasserstand ergeben sich vergleichsweise niedrige Wellenüberlaufhöhen in der Größenordnung der aktuell anzuwendenden Überlaufhöhen. Für höhere Wellenüberlaufhöhen – wie sie beispielsweise in Delfzijl schadensfrei für einen Deich getestet wurden – könnte ein höherer Bemessungswasserstand zugelassen werden: bei einer Überlaufhöhe von  $50 \text{ l/(s}\cdot\text{m)}$  wäre für den hier untersuchten Deichquerschnitt das gleiche Maß an Sturmflutsicherheit noch für einen Bemessungswasserstand von  $\text{NHN}+ 6,70 \text{ m}$  gewährleistet. Die für die benannten Wasserstands- und Seegangsszenarien ermittelten mittleren Überlaufhöhen wurden als Grundlage für die Berechnung der zugehörigen Schichtdicken und Geschwindigkeiten des Wellenüberlaufs auf der Binnenböschung herangezogen, um auf dieser Grundlage in Umsetzung der integrierten Bemessung die Widerstandsfähigkeit für Bandbreiten der Kleiqualität zu ermitteln.

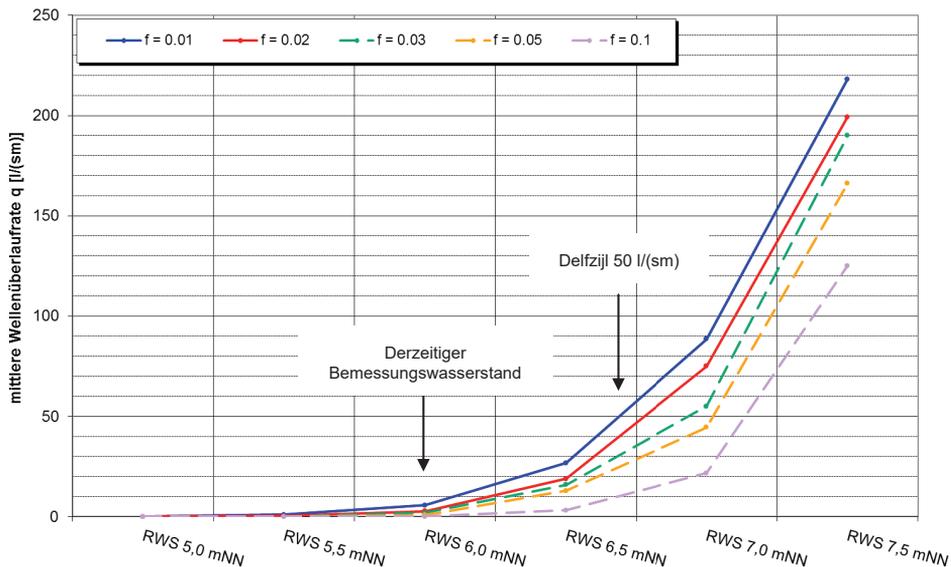


Abbildung 6: Mittlere Wellenüberlaufhöhen für unterschiedliche Szenarien von Ruhewasserständen und korrespondierendem Seegang sowie für verschiedene Rauigkeitsfaktoren von hydraulisch glatt (Klei) bis hydraulisch rau (Bruchstein).

Die hydrodynamischen Belastungen bewirken Vorgänge wie Erosion und Infiltration. Wegen der ständigen Vernässung wird der Boden weich und verliert an Festigkeit. Die Binnenböschung wird mit dem überströmenden Wasser gesättigt und in Kombination mit dem Eigengewicht des Bodens können die Strömungskräfte das hangparallele Gleiten der Abdeckung auslösen (Abb. 7). Dann ist der Sandkern den nachfolgenden überlaufenden Wellen schutzlos ausgeliefert (WEIBMANN 2003).



Abbildung 7: Hangparalleles Gleiten.

Die über Modellierungen mit OTT-1d ermittelten hydrodynamischen Belastungen ermöglichen es, im Zusammenhang mit den Kennwerten unterschiedlicher Bodenarten den Ausnutzungsgrad für hangparalleles Gleiten zu bestimmen. Nach dem Bewertungsverfahren von WEIßMANN (2003) werden die hier untersuchten Böden als „bedingt geeignet“ (Elisabethgroden 3,5), „gut geeignet“ (Elisabethgroden 9,0, Wustrow) bis „sehr gut geeignet“ (Cäciliengroden I, II, Hohenkirchen kategorisiert (Abb. 8)). Sämtliche Böden, mit Ausnahme von „Wustrow“, wo Mergel ansteht, bestehen aus Klei. Die Sicherheit gegen hangparalleles Gleiten wird durch den zulässigen Ausnutzungsgrad  $\alpha_s < 1$  definiert.

Für die untersuchten Böden wurde mit Ausnahme des Elisabethgroden 3,5 der Ausnutzungsgrad auch bei einer mittleren Wellenüberlaufrate von über 200 l/(s·m) bei einem Ruhewasserspiegel von NHN + 7,5 m nicht überschritten (Abb. 8). Der als „bedingt geeignet“ eingestufte Boden erfüllt bereits bei einer Wellenüberlaufrate von 0 l/(s·m) den Nachweis nicht, obwohl dieser Boden tatsächlich auf einem Deich eingebaut wurde und dieser Deich mit dieser Abdeckung über Jahrzehnte stand gehalten hat. Daraus kann gefolgert werden, dass mit dem hier verwendeten bodenmechanischen Ansatz Sicherheitsreserven verbunden sind, die eine höhere Belastung erlauben. Für die Bemessung wird der Boden als vernässt angesehen. Die Festigkeit der vernässten Abdeckung hängt davon ab, wie viel Wasser der Boden aufnehmen kann, was wiederum durch das Porenvolumen des Bodens bestimmt wird. Daher erhöht sich die Belastbarkeit der Böden durch zunehmende Verdichtung (Abb. 8).

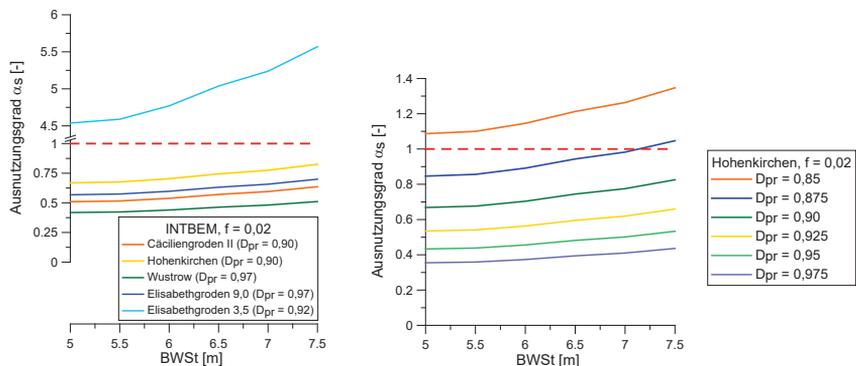


Abbildung 8: Ausnutzungsgrad der Sicherheit gegen hangparalleles Gleiten für unterschiedliche Böden und unterschiedliche hydrodynamischen Belastungen (links) und Einfluss des Verdichtungsgrades (rechts) (RICHWIEN et al. 2010).

## 5 Potenzial zur Kompensation künftiger Klimaänderungsfolgen

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts zeigen, dass die Kleiabdeckungen vieler Deiche höheren Wellenüberlauferten standhalten würden als bei ihrer Bemessung angesetzt wurden. Zur Quantifizierung dieses erheblichen Potenzials werden hier beispielhaft die dadurch kompensierbaren Erhöhungen des zulässigen Bemessungswasserstands in Abhängigkeit von der Wellenüberlauftoleranz jeweils für einen exponierten Seedeich und für einen Ästuardeich aufgezeigt (Abb. 9 und 10).

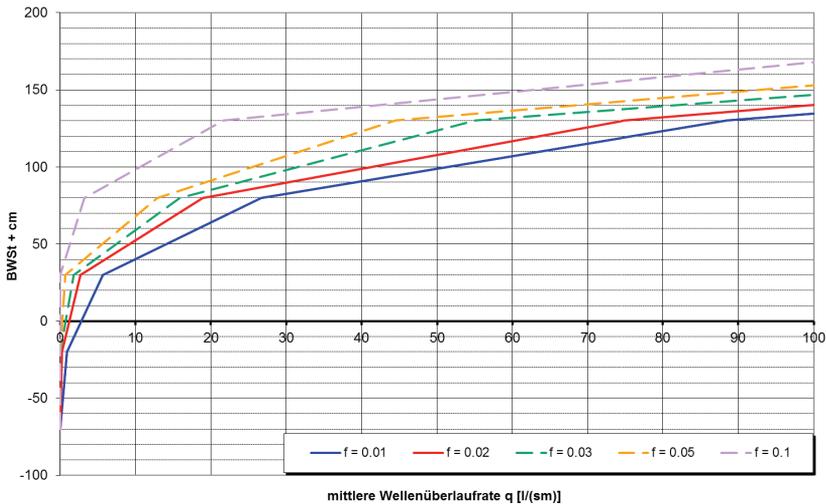


Abbildung 9: Effekt steigender Wellenüberlauftoleranz auf die Höhe des vom Deich zu kehrenden Bemessungswasserstands für einen exponierten Seedeich (NIEMEYER et al. 2010).

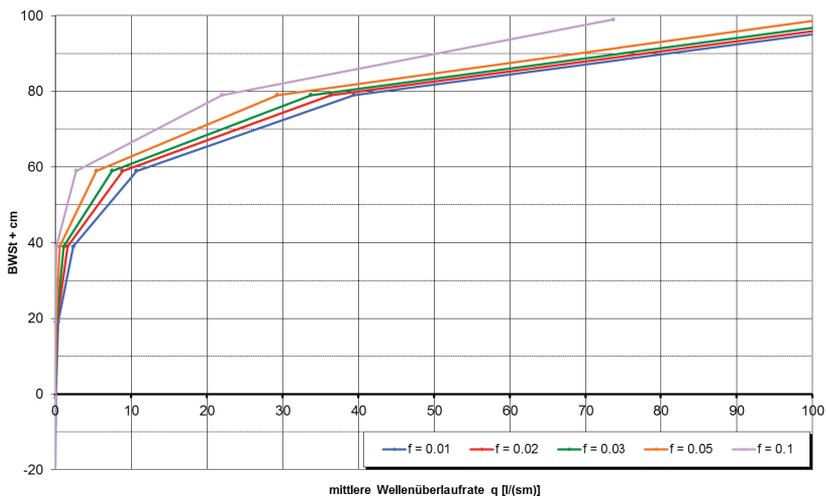


Abbildung 10: Effekt steigender Wellenüberlauftoleranz auf die Höhe des vom Deich zu kehrenden Bemessungswasserstands für einen Ästuardeich (NIEMEYER et al. 2010).

Der untersuchte exponierte Seedeich würde bei einem Rauigkeitswert von  $f = 0,02$  und einer Überlauftoleranz von  $10 \text{ l}/(\text{m}\cdot\text{s})$  eine Erhöhung des Bemessungswasserstands um mehr als 50 cm und bei einer Überlauftoleranz von  $15 \text{ l}/(\text{m}\cdot\text{s})$  eine Erhöhung von knapp 70 cm schadensfrei überstehen (Abb. 9), ohne das Bauwerk verstärken zu müssen. Diese Werte leiten sich nicht nur aus den Untersuchungen mit den angewandten mathematischen Modellen ab; sie liegen noch immer erheblich niedriger als die Maximalwerte der Naturversuche in Delfzijl, denen der Deich dort unbeschadet standhielt (AKKERMANN et al. 2007).

Ein ähnliches Ergebnis ergibt sich aus den Untersuchungen für einen Ästuardeich, der von wesentlich kurzperiodischeren Wellen als der Seedeich beaufschlagt wird (Abb. 10). Bei einer angenommenen Überlauftoleranz von  $10 \text{ l}/(\text{m}\cdot\text{s})$  wäre – ohne eine Deichverstärkung – ein um 50 cm höherer Bemessungswasserstand möglich, bei einer Wellenüberlauftrate von  $15 \text{ l}/(\text{m}\cdot\text{s})$  ein um 60 cm höherer Bemessungswasserstand (Abb. 10).

Diese Beispiele unterstreichen weitergehende Vorteile, die mit Anwendung einer integrierten Bemessung für See- und Ästuardeiche erreichbar werden. Voraussetzung für eine zuverlässige integrierte Bemessung ist das Vorliegen ausreichender Informationen zu relevanten Bodenparametern der an Deichen vorhandenen Kleiabdeckungen. Es ist davon auszugehen, dass angesichts der erwarteten Kosten von Verstärkungen für Schutzwerke Kampagnen zur Ermittlung der für eine integrierte Bemessung benötigten Bodenkennwerte ein sehr hohes Nutzen-Kosten-Verhältnis aufweisen. Es wird darüber hinaus erhöht, da durch solche Messkampagnen unerkannte Schwachstellen vorhandener Kleiabdeckungen offenbar würden, die dann zur Gewährleistung der aktuellen Sturmflutsicherheit unmittelbar behoben werden können.

## 6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Ziel des Projekts war die Entwicklung eines neuen Bemessungskonzepts für See- und Ästuardeiche mit einer differenzierten Ermittlung hydrodynamischer Belastungen und ergänzend zur Bauwerksgeometrie der Berücksichtigung der Widerstandsfähigkeit eingesetzter Erdbaustoffe.

Für die Ermittlung hydrodynamischer Belastungen wird das mathematische Wellenauf- und -überlaufmodell OTT-1d von HR Wallingford verwandt, und für großmaßstäbliche naturähnliche Bedingungen modifiziert. Das Modell berücksichtigt nun die detaillierte Geometrie und unterschiedliche Rauigkeiten von Bauwerken und erlaubt die Berechnung des Wellenauf- und Wellenüberlaufs und dabei auftretende Schichtdicken und Strömungsgeschwindigkeiten an jedem Punkt des Bauwerks.

Die hydrodynamischen Belastungen bewirken Erosion und Infiltration. Die ständige Vernässung des Bodens in Folge des Wellenüberlaufs verringert die Festigkeit des Bodens und die wachsende Sättigung der Binnenböschung mit Wasser kann in Kombination mit dem Eigengewicht des Bodens über Strömungskräfte das hangparallele Gleiten der Abdeckung auslösen, woraufhin der erosionsanfällige Sandkern gegen danach überlaufenden Wellen ungeschützt ist. Die Standfestigkeit des Deichkörpers wird über den Ausnutzungsgrad für die jeweiligen Lastfälle und Kennwerte der anstehenden Böden bestimmt.

Die Kombination hydrodynamischer Lasten mit der Widerstandsfähigkeit verwendeter Erdbaustoffe ergänzend zur differenzierten Abbildung der Bauwerksgeometrie ermöglicht eine effizientere Bemessung von See- und Ästuardeichen hinsichtlich Sicherheit

und Wirtschaftlichkeit als bisher. Damit lassen sich zudem Sicherheitsreserven oder Sicherheitsdefizite bestehender Deiche aufdecken und quantifizieren, was auch für zielgerichtete Priorisierung erforderlicher Verstärkungen nutzbar sein wird.

Es besteht erhebliches Potenzial an Belastungsreserven in den See- und Ästuardeichen in Bezug auf Überlauftoleranzen, das insbesondere den Investitionsbedarf im Hinblick auf die Vorsorge hinsichtlich von Klimaänderungsfolgen mindern kann. Die derzeit angewendeten Bemessungsverfahren mit sehr geringen Überlauftoleranzen bedingen vielfach größere Deichabmessungen als erforderlich. Die Forschung zur Erweiterung der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse und vor allem zu deren Umsetzung in die Praxis des Küstenschutzes sollte in naher Zukunft intensiviert werden, um sowohl Sicherheit als auch Wirtschaftlichkeit zu verbessern. Die dabei künftig erzielbaren Forschungsergebnisse können unmittelbar anwendbare, kostensparende Möglichkeiten aufzeigen, mit denen die Auswirkungen zu erwartender Klimaänderungsfolgen kompensiert werden können.

## 7 Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist ein Produkt des Forschungsvorhabens „Integrierte Bemessung von See- und Ästuardeichen“ (INTBEM), das über das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde (Förderkennzeichen: 03 KIS 061/062). Die Autoren danken den Projektpartnern Werner Richwien, Carsten Pohl und Lars Vavrina vom Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Universität Duisburg-Essen sowie ihrem Kollegen Ralf Kaiser von der Forschungsstelle Küste im NLWKN für Unterstützung, Anregungen und konstruktive Zusammenarbeit.

## 8 Schriftenverzeichnis

- AKKERMANN, G. J.; VAN GERVEN; K. A. J.; SCHAAP, H. A. and VAN DER MEER, J. W.: ComCoast – Workpackage 3: Development of Alternative Overtopping-Resistant Sea Defends, Rijkswaterstaat, Delft, 2007.
- BERKENBRINK, C.; KAISER, R. and NIEMEYER, H. D.: Prototype Overtopping Measurements and Model Verification. In: Proc. 31st Int. Conf. o. Coast. Eng. MC KEE SMITH, J. (Ed.), Bd. 4, Hamburg, 3009-3019, 2009.
- BERKENBRINK, C.; KAISER, R. und NIEMEYER, H. D.: Mathematische Modellierung hydrodynamischer Belastungen von Deichen. Die Küste, 77, KFKI (Ed.), Boyens & Co. KG, Heide i. Holstein, 2010.
- BOOIJ, N.; RIS, R. C. and HOLTTHUIJSEN, L. H.: A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions. Part I, Model Description and Validation, J. Geophys. Research, 104, C4, 1999.
- DODD, N.; GIARRUSSO, C. C. and NAKAMURA, S.: ANEMONE: OTT-1d – A User Manual. Report TR 50 – HR Wallingford, 1998.
- EurOtop: Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual, 2007. [www.overtopping-manual.com/manual.html](http://www.overtopping-manual.com/manual.html)
- LÜDERS, K. und LEIS, G.: Niedersächsisches Deichgesetz – Kommentar. In: Wasser und Boden, Hamburg, 1964.

- NIEMEYER, H. D.: The Estimation of Design Wave Run-up on Sea Dykes in Consideration of Overtopping Security. Proc. 17th IAHR-Congress, Baden-Baden, 1977.
- NIEMEYER, H. D.: Bemessung von See- und Ästuardeichen in Niedersachsen. In: Die Küste, 64, KFKI (ed.), Boyens & Co. KG, Heide i. Holstein, 2001.
- NIEMEYER, H. D.: Bemessung im Insel- und Küstenschutz in Niedersachsen. Forschungsbericht 01/2008, NLWKN-Forschungsstelle Küste, 2008.
- NIEMEYER, H. D.; GÄRTNER, J.; KAISER, R.; PETERS, K.-H. and SCHNEIDER, O.: Estimation of Design Wave Run-up on Sea Dykes under Consideration of Overtopping Security by Using Benchmarks of Flotsam. In: Proc. 4th Conf. Coast. & Port Eng. i. Develop. Countr., Rio de Janeiro/Brazil, 1995.
- NIEMEYER, H. D. and KAISER, R.: Design Wave Evaluation for Coastal Protection Structures in the Wadden Sea. In: Proc. 4th Int. Symp. Ocean Wave Meas. & Analysis 2001. San Francisco. ASCE, Reston/Va., USA, 2001.
- NIEMEYER, H. D.; KAISER, R. and BERKENBRINK, C.: Increased Overtopping Security: A Potential for Compensating Future Impacts of Climate Change. In: Proc. 32nd Int. Conf. Coast. Eng. Shanghai/China 2010.  
[www.journals.tdl.org/icce/index.php/icce/issue/view/154/showToc](http://www.journals.tdl.org/icce/index.php/icce/issue/view/154/showToc)
- RICHWIEN, W.; POHL, C. und VAVRINA, L.: Bemessung von Deichen gegen Einwirkungen aus Sturmfluten. Die Küste, 77, KFKI (Ed.), Boyens & Co. KG, Heide i. Holstein, 2010.
- RIS, R.; HOLTHUIJSEN, L. H. and BOOIJ, N.: A Spectral Model for Water Waves in the Nearshore Zone. In: Proc. 24th Int. Conf. Coast. Eng. Kobe/Japan. ASCE, New York, 1995.
- VAN GENT, M.: Wave run-up and Overtopping for Double Peaked Wave Energy Spectra. WL|Delft Hydraulics Report H 3351, 1999.
- VAN DER MEER, J. W. and DE WAAL, J. P.: Waterbeweging op taluds. WL|Delft Hydraul. Rapp. H 1256, 1993.
- VAN DER MEER, J. W.; STEENDAM, G. J.; DE RAAT, G. and BERNARDINI, P.: Further Developements on the Wave Overtopping Simulator. In: Proc. 31st Int. Conf. o. Coast. Eng., MCKEE SMITH, J. (Ed.). Bd. 4. Hamburg, 2957-2696, 2009.
- WEIBMANN, R.: Die Widerstandsfähigkeit von Seedeichbinnenböschungen gegenüber ablaufendem Wasser, Universität Duisburg-Essen, In: Mitteilungen aus dem Fachgebiet für Grundbau und Bodenmechanik, Heft 30, Glückauf Verlag, Essen, 2003.