

UNTERSUCHUNGEN ZUR VORBEMESSUNG EINES INNOVATIVEN DECKWERKS FÜR DEN KÜSTENSCHUTZ

von

Tijl Staal¹
Matthias Kudella²
Hocine Oumeraci³

ABSTRACT

Elastocoast is a new and innovative type of revetment for coastal protection, developed by the Elastogran GmbH. It consists of a gravel medium, bonded by means of a 2-component plastic polyurethane (PU), forming a monolithic structure with a high porosity and permeability. In order to improve the understanding of all relevant processes during wave-loading and, as a result, to come up with a reliable and practical design method, large scale experiments will be performed in the Large Wave Flume (Grosser Wellenkanal, GWK). This paper summarizes the pre-design of the model setup which was obtained by making use of empirical models, numerical simulations and experimental measurements previously performed on a similar dike in the GWK. The pre-design will serve as the main guidance for the realization of the model and measurement setup as well as for the testing program and procedure.

1 EINLEITUNG

Das von der Elastogran GmbH, ein Tochterunternehmen der BASF, entwickelte Küstenschutzsystem Elastocoast ist ein elastomeres Polyurethan-System (PUR), das aus einem zwei-Komponenten-Spezialkunststoff und einem Natursteingranulat besteht. Der PUR-Werkstoff bildet einen dünnen Film um das Granulat und verklebt den Natursteinschotter an den Kontaktflächen zu einer monolithischen Struktur, was zu einer dauerhaften und elastischen Verbindung der Gesteinsoberflächen führt. Im Gegensatz zu konventionellen Deckwerkskonstruktionen werden die Schottersteine durch den dünnen PUR-Film nur punktuell verbunden, wodurch die Struktur des Deckwerks offenporig bleibt. So soll ein

¹ Dipl.-Ing., Leichtweiß-Institut, Beethovenstraße 51a, 38106 Braunschweig

² Dipl.-Ing., Leichtweiß-Institut, Beethovenstraße 51a, 38106 Braunschweig

³ Prof. Dr.-Ing., Leichtweiß-Institut, Beethovenstraße 51a, 38106 Braunschweig

sehr widerstandsfähiges und flexibles Deckwerk entstehen, welches aufgrund der hohen Porosität die durch aufprallende Wassermassen auf das Deckwerk induzierte Energie gut absorbiert und somit eine Reduzierung des Wellenaufbaus bewirkt und das Schadenspotential verringert.

Aufgrund fehlender Erfahrungswerte und Richtlinien für die Bemessung der neuen Elastocoast-Deckwerke auf Seegangsbelastung sind großmaßstäbliche Modellexperimente im Großen Wellenkanal (GWK) des Forschungszentrums Küste (FZK) in Hannover vorgesehen. Um das Modell für die Versuche im GWK adäquat modellieren zu können, sind theoretische und numerische Untersuchungen zur Vorbemessung des Deckwerkes notwendig. Anhand der Ergebnisse können der erforderliche Deckwerksaufbau sowie eine sinnvolle Positionierung der Messeinrichtungen bestimmt werden.

2 MODELLAUFBAU UND HYDRAULISCHE BELASTUNG

Der den Untersuchungen zugrunde liegende Modellaufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Das Elastocoast-Deckwerk wird auf einem Sandkern mit einer seeseitigen Böschungsneigung von 1:3 eingebaut. Der an das Deckwerk anschließende Vorstrand hat eine Neigung von 1:20.

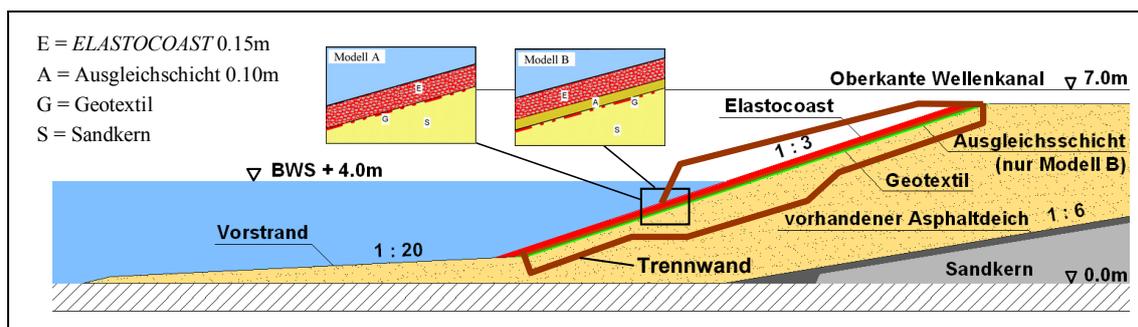


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des geplanten Modells im Großen Wellenkanal

Der Modellaufbau sieht zwei unterschiedliche Deckwerkstrukturen vor. Im Modell A liegt das Deckwerk direkt auf dem Sandkern auf. Ein Geotextil trennt die Deckschicht vom Sand und schützt den Untergrund vor Erosionsschäden. Im Modell B wird zusätzlich eine filterstabile Ausgleichsschicht aus Schotter zwischen Deckschicht und Geotextil aufgebracht. Beide Modellvarianten werden simultan im GWK untersucht. Die erforderliche hydraulische Trennung beider Varianten wird durch eine vertikale, dünne, wasserdichte Wand gewährleistet.

Maßgebende Wellenbelastungen können bei zwei Konditionen erwartet werden: i) eine hohe und steile Welle, die als Sturzbrecher hohe Druckschlagsbelastungen auf das Deckwerk ausübt und ii) eine lange Welle, die als Reflexionsbrecher einen hohen Wellenaufbau verursacht. Darauf basierend wurden folgende Wellenparameter, geltend sowohl für regelmäßige Wellen als auch Wellenspektren, als Grundlage für die Berechnungen gewählt:

- a) $H=1\text{m}$, $T=4\text{s}$ b) $H=1.5\text{m}$, $T=5\text{s}$ c) $H=2\text{m}$, $T=6\text{s}$ d) $H=1\text{m}$, $T=8\text{s}$

Der Bemessungswasserstand lag bei 4m und wurde nicht variiert und.

3 ERGEBNISSE DER NUMMERISCHEN UND EMPIRISCHEN UNTERSUCHUNGEN

Die nachfolgend aufgeführten Ergebnisse basieren neben empirischen Berechnungsansätzen auf numerische Simulationen mit dem hydrodynamischen RANS-VOF Modell „COBRAS_UC“ (Cornell Breaking Wave and Structures). Das Programm ist ein bidimensionales numerisches Modell, welches die Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) Gleichungen mit einem dreidimensionalen nichtlinearen k-ε Turbulenz Modell löst.

Wellenauflauf, Wellenablauf und Schichtdicke

Die Bestimmung des Wellenaufbaus, Wellenabbaus und der Schichtdicke bildet die Grundlage für die Entscheidung der Positionierung der Wellenaufbaupegel, der Schichtdickenpegel, der Videoüberwachung und der örtlichen Begrenzung von Porendruckmessungen unter dem Deckwerk. Auch geht die erforderliche Kronenhöhe sowie die erforderliche Ausbaulänge der Elastocoast Deckschicht aus dem maximal zu erwartenden Wellenaufbau und Wellenablauf hervor. Die über die empirischen Berechnungsansätze ermittelten Werte und sowie die Ergebnisse der numerischen Simulationen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die gewählten maßgeblichen Parameter sind rot markiert.

Tabelle 1: Bestimmung des Wellenaufbaus, Wellenabbaus und der Schichtdicken.

Wellenhöhe	Wellenperiode [s]	Brecherkennzahl [-]	Wellenaufbau [m]		Wellenablauf [m]	Schichtdicke beim Ablauf [m]	Schichtdicke an der Deichkrone [m]		
Formeln für unregelmäßige Wellen									
H	T	ξ	EurOtop (2007)		Cobras (gemittelt)	Schütterumpf (2001)	Schütterumpf (2001)	Schütterumpf (2001)	
			R _{u2%}	R _{u2%} (max)		R _u	z ₋₉₈	h _A	h _A
1,0	4,0	1,666	2,33	2,45		0,414	0,593	0,000	
1,5	5,0	1,700	3,57	3,69		0,651	0,912	0,188	
1,0	8,0	3,332	4,66	2,74		1,290	0,870	0,008	
Formeln für regelmäßige Wellen									
H	T	ξ	Schütterumpf (2001)		Cobras (gemittelt)	Schütterumpf (2001)	Schütterumpf (2001)	Schütterumpf (2001)	
			R _u			R _u	z ₋₉₈	h _A	h _A
1,0	4,0	1,666	1,23			0,73	0,414	0,355	0,000
1,5	5,0	1,700	1,87			1,45	0,651	0,544	0,000
1,0	8,0	3,332	1,68			1,91	1,290	0,641	0,000

Wie erwartet ist der durch Wellenspektren induzierte Wellenaufbau höher als der aus regelmäßigen Wellen resultierende Wellenaufbau, da die Wellenaufbauhöhe maßgeblich durch die langen Wellen im Spektrum bestimmt wird. Die mittels COBRAS_UC erzielten Werte unterschätzen den tatsächlich zu erwartenden Wellenaufbau deutlich, weshalb die erzielten Ergebnisse nicht weiter berücksichtigt wurden.

Welleninduzierte Druckschlagbelastung und Druckverteilung

Die durch brechende Wellen induzierten Druckschlagbelastungen und deren Druckverteilung, sowie der Auftreffpunkt auf der Böschung sind maßgebliche Parameter zur Bestimmung der optimalen Einbaupositionen für die Druckmessdosen auf und unter dem Deckwerk, sowie innerhalb des Deichkörpers.

Die zu erwartenden Druckschlagbelastungen wurden sowohl nach dem bestehenden Berechnungsansatz nach Führböter (1986) bestimmt, als auch anhand der numerischen Simulationen mit COBRAS_UC analysiert. Für die Druckverteilung auf der Böschung existiert bisher kein ausgereiftes Modell. Daher werden ausschließlich die Ergebnisse der COBRAS_UC Simulationen zur Bestimmung der Druckverteilung herangezogen, die zuvor anhand kürzlich durchgeführter Versuche an einem ähnlichen Deich (Neigung 1:3) im GWK validiert wurden. Die Druckverteilung wurde auf der Ober- und Unterseite des Deckwerks bestimmt. Exemplarisch sind in Abbildung 2 die Ergebnisse für eine regelmäßige Welle mit $H=1.0\text{m}$ und $T=4.0\text{s}$ dargestellt. Die Transmission des Druckes durch das poröse Deckwerk ist gedämpft, was zu einem leicht reduzierten aufwärts gerichteten Druck führt. Der resultierende Druck auf die ELASTOCOAST Schicht ist ebenfalls eingezeichnet.

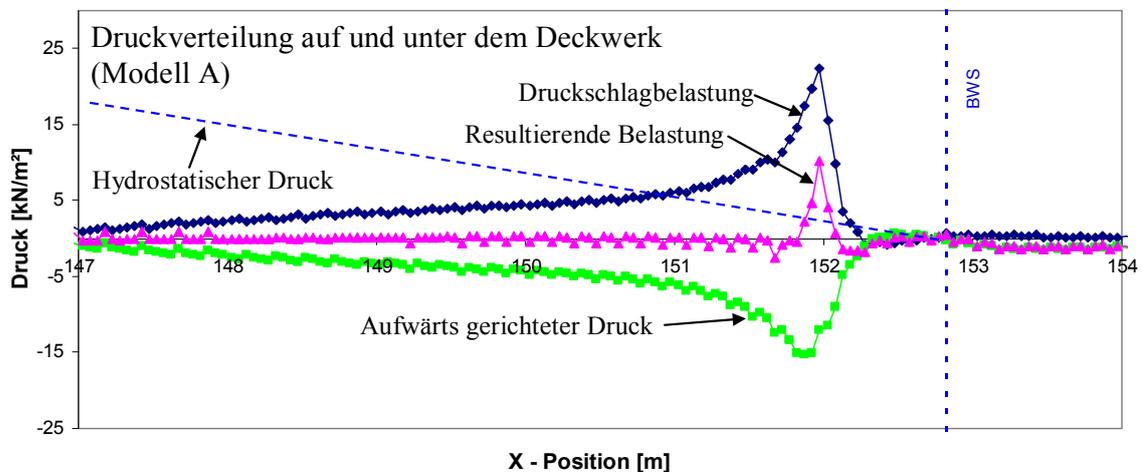


Abbildung 2: Druckverteilung auf und unter dem Deckwerk, sowie die resultierende Druckverteilung zum Zeitpunkt der maximalen Druckschlagbelastung für $H=1.0\text{m}$ und $T=4.0\text{s}$ (Modell A)

Es wird ersichtlich, dass nur im Bereich des hoch dynamischen Druckschlags eine resultierende Belastung auf das Deckwerk auftritt. Diese erstreckt sich über den Bereich des Auftreffpunktes der Wellenzunge mit einer Ausbreitung von weniger als 1.0m .

Die Position des Auftreffpunktes unter dem Ruhewasserspiegel wurde mit dem empirischen Berechnungsansatz nach Schüttertrumpf (2001) bestimmt und ergibt sich zu 0.85m unterhalb des Ruhewasserspiegels.

Verteilung des Porendruckes

Die Dämpfung des Porendruckes über die Tiefe wird durch eine exponentielle Funktion angenähert. Der vertikale Verlauf des Porendruckes kann über die Bestimmung der charakteristischen Tiefe nach De Groot et al. (2006) ermittelt werden. Obwohl der Ansatz nur für eine horizontale Sohle gilt, wird er als Näherung hier auch für die 1:3 geneigte Böschung unter dem ELASTOCOAST-Deckwerk verwendet.

Mit abnehmender Sättigung des Sandes mit Porenwasser und mit kürzeren Wellenperioden verringert sich die Ausbreitung des Porendruckes im Sandkern, wobei der Einfluss der Sättigung dominiert. Aus den Untersuchungsergebnissen zu der Entwicklung des Porendruckes wird ersichtlich, dass die Tiefe, in der nennenswerter Porendruck auftritt, mit zuneh-

mendem Abstand vom Auftreffpunkt des Druckschlags abnimmt. Längs der Böschung entwickelt sich der Porendruck im Untergrund entsprechend der anfänglichen Druckverteilung auf der Sandoberfläche.

Zusätzlich zu den zuvor beschriebenen Untersuchungen wurden statische Berechnungen zur Bestimmung der notwendigen Deckwerksstärke durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse bestätigten die Stabilität des Deckwerks für die gewählte Elastocoast-Schichtdicke von 15 cm.

4 POSITION DER MESSEINRICHTUNGEN

Auf der Basis der durchgeführten Analysen und Berechnungen wurde der in Abbildung 3 dargestellte Versuchsaufbau sowie die Anordnung der Messaufnehmer bestimmt. Der Wellenauflauf wird durch einen Auflaufpegel sowie mittels Videoaufzeichnungen bestimmt. Zur Messung der Schichtdicke der auflaufenden Wellen werden Schichtdickenpegel auf dem Deckwerk installiert. Druckmessdosen registrieren die Wellenbelastung auf der Oberseite des Deckwerks, sowie die an der Unterseite auftretenden Drücke. Im Sand unterhalb des Deckwerks wird an verschiedenen Positionen der Porenwasserdruck aufgezeichnet, um Rückschlüsse auf die Ausbreitung der welleninduzierten Druckbelastungen in den Untergrund und auf den Wasserstand innerhalb des Sandkerns ziehen zu können. Die Bewegungen des Deckwerks infolge der Wellenbelastung werden mit einem Wegaufnehmer, sowie einem Accelerometer aufgezeichnet. Das Versuchsprogramm umfasst regelmäßige Wellen und Wellenspektren mit Wellenhöhen zwischen 0.2 und 1.7m und Wellenperioden zwischen 3.0 und 8.0s. In den Versuchen werden für die regelmäßigen Wellen 100 und für die Wellenspektren 1000 Wellen generiert.

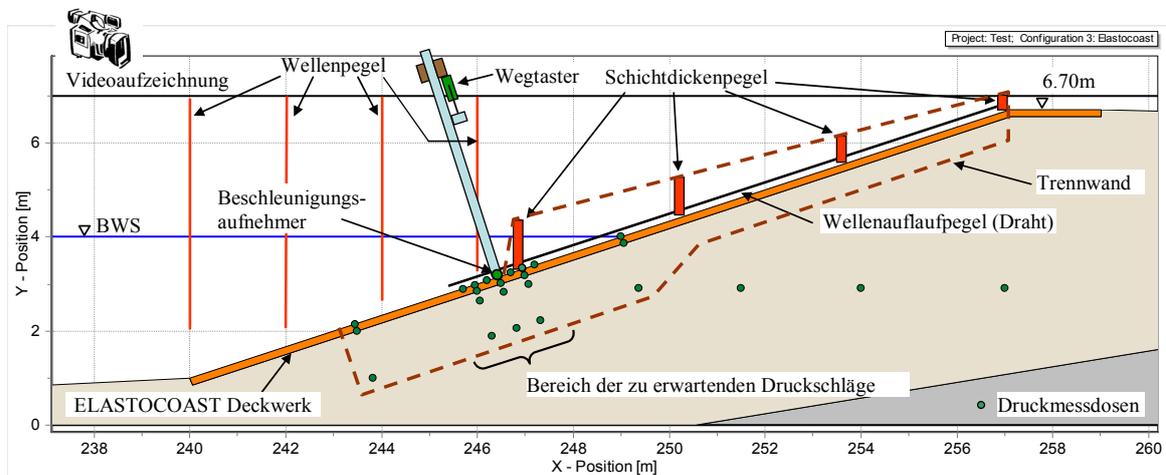


Abbildung 3: Position der Messaufnehmer auf und unter dem ELASTOCOAST Deckwerk (Modell A)

5 AUSBLICK

Die Großmaßstäblichen Modellexperimente werden von Mai bis Juni 2009 im Großen Wellenkanal (GWK) des Forschungszentrums Küste (FZK) in Hannover durchgeführt. Die dabei gewonnenen Ergebnisse werden verwendet, um einen zuverlässigen Bemessungsansatz für das ELASTOCOAST Deckwerk zu erarbeiten. Darüber hinaus werden die Versuchsdaten für eine Kalibrierung von COBRAS_UC verwendet, um anschließend ergänzende Untersuchungen mit dem numerischen Modell durchführen zu können.

SCHRIFTTUM

- DE GROOT, M.B.; BOLTON, M.D.; FORAY, P.; MEIJERS, P.; PALMER, A.C.; SANDVEN, R.; SAWICKI, A.; TEH, T.C.: Physics of liquefaction phenomena around marine structures. ASCE: *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, vol. 132, no. 4, pp. 227-243, 2006
- EUROTOP: European Overtopping Manual. Pullen, T.; Allsop, N.W.H.; Bruce, T.; Kortenhuis, A.; Schüttrumpf, H.; Van der Meer, J.W.; Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen: Die Küste, Heft 73, www.overtopping-manual.com, 2007
- FÜHRBÖTER, A.: Model and prototype tests for wave impact and run-up on a uniform 1:4 slope. *Coastal Engineering*, vol. 10, pp. 49-84, 1986
- SCHÜTTRUMPF, H.: Wellenüberlaufströmung bei Seedeichen - experimentelle und theoretische Untersuchungen. Fachbereich Bauingenieurwesen, Technische Universität Braunschweig. Ph.D. thesis, *Mitteilungen Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität, Braunschweig*, Germany, S. 1-124, 2001