

Herausforderungen und erste Ergebnisse bei der Optimierung permeabler Wellenbrecher zum Schutz von baulichen Anlagen

Abdou Diasso, Wolfgang E. Weber

Professur für Statik und Dynamik, HELMUT-SCHMIDT-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

Zusammenfassung: Wellenbrecher eignen sich zum Schutz von baulichen Anlagen und Gütern vor den Einwirkungen von Wasserwellen im küstennahen Bereich. Die Optimierung sowohl der einzelnen Wellenbrecher als auch deren Anordnung ist eine baupraktische Aufgabenstellung, deren Lösung einen skalenübergreifenden Ansatz erfordert. Der vorliegende Beitrag widmet sich der Vorstellung dieses Ansatzes und präsentiert erste Ergebnisse.

1 Motivation

Eine der Herausforderungen im küstennahen Bereich ist der Schutz von baulichen Anlagen und Gütern vor den Einwirkungen von Wasserwellen. Hierfür eignen sich Anordnungen von Wellenbrechern bzw. kontinuierliche Umhüllungen, vgl. Abb. 1a, 1b. Es existieren zahlreiche Konzepte zur Ausbildung von Strukturen zur Brechung von Wasserwellen, z. B. geschüttete Wellenbrecher aus bspw. Bruchsteinen oder auch regelmäßige Anordnungen von zylinder- oder quaderförmigen Strukturen aus Stahlbeton. Letztere haben den Vorzug, dass durch gezielte Anpassung der Geometrie sowohl der einzelnen Wellenbrecher als auch deren Anordnung untereinander vorab definierbare und besonders kritische Wellenlängen von Wasserwellen abgeschirmt werden können und somit den Bereich hinter den Wellenbrechern schützen. Gleichzeitig sind Anordnungen von zylindrischen Wellenbrechern denkbar, welche sich harmonischer in die maritime Umgebung einfügen als dies bei Schüttungen der Fall ist. Der thematische Schwerpunkt des vorliegenden Beitrages liegt auf (kreis-)zylindrischen Wellenbrechern. Die auf die (kreis-)zylindrischen Wellenbrecher wirkenden Belastungen infolge des Seeganges lassen sich u. a. dadurch reduzieren, dass die Wellenbrecher nicht massiv, sondern in Umfangsrichtung geschlitzt bzw. perforiert ausgebildet werden, vgl. Abb. 1b. Die Optimierung sowohl der Gestalt der einzelnen Wellenbrecher als auch deren Anordnung



(a) Einsatz von Wellenbrechern in Hanstholm (Dänemark), entnommen aus [10]



(b) Permeabler Wellenbrecher, entnommen aus [4]

Abbildung 1: Beispiele für Wellenbrecher

ist Gegenstand des fachübergreifenden Forschungsprojektes „Permeable Wellenbrecher zum Schutz von baulichen Anlagen und Gütern“, welches an der HELMUT-SCHMIDT-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg durchgeführt und von dieser gefördert wird. Im Abschnitt 2 dieses Beitrages werden einige der Forschungsfragen des Forschungsprojektes skizziert. Mögliche Ansätze zur Beantwortung derjenigen Forschungsfragen mit Bezug zur Statik und Dynamik werden ebenfalls in diesem Abschnitt 2 vorgestellt. Die Darstellung erster Ergebnisse folgt in Abschnitt 3. Der Beitrag schließt mit der Zusammenfassung in Abschnitt 4.

2 Offene Forschungsfragen und Einbettung in ein Forschungsprojekt

Um die angestrebte Optimierung permeabler Wellenbrecher und -anordnungen zu erreichen, ist eine Vielzahl von Forschungsfragen zu beantworten. Naheliegender ist zunächst die Geometrie der einzelnen Wellenbrecher, z. B. der Außenradius, die Ausführung der Schlitze/Perforationen, ein ggf. mehrschichtiger Aufbau aber auch deren Höhe über dem (derzeitigen) Ruhewasserspiegel unter Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels. Ebenso ist die Anordnung der Wellenbrecher in Wellenbrechergruppen, auch unter Berücksichtigung von bevorzugten Windrichtungen, zu optimieren. Hierfür ist zunächst eine adäquate Modellierung der Wellenbrecher erforderlich. Diese kann u. a. durch eine (semi-)analytische Beschreibung erfolgen. In [11] ist ein Ansatz für undurchlässige kreiszylindrische Wellenbrecher dokumentiert. Darauf aufbauend erfolgt die Berücksichtigung einer Permeabilität eines Wellenbrechers mit dem Ansatz aus [2], auch in Kombination mit mehrwandigen Wellenbrechern. Ein weiterer Ansatz basierend auf dem Gesetz von DARCY ist in [19] vorgeschlagen. Im Forschungsfokus stehen derzeit zweiwandige Wellenbrecher [3, 8]. Während in der Literatur in diesem Fall konzentrische Wellenbrecher untersucht werden, ist bei bevorzugten Ausbreitungsrichtungen der Wellen – d. h. bei bevorzugten Windrichtungen – auch ein optimierter Ansatz mit exzentrischen mehrwandigen Wellenbrechern denkbar. Die entsprechenden Modellierungsansätze können in modifizierter Form beispielsweise aus [17] entnommen werden. Die (semi-)analytische Beschreibung erlaubt auch andere Querschnittsgeometrien,

wobei dann die BESSEL- und HANKELfunktionen – welche für die Diskretisierung kreiszylindrischer Querschnitte geeignet sind – in den mathematischen Formulierungen ersetzt werden müssen. So ergeben sich im Falle elliptischer Querschnitte MATHIEUFunktionen [6, 16]. Sofern die maritime Umgebung z. B. infolge von Kaimauern aus mathematischer Sicht nicht als unendlich angesehen werden kann ist eine Einbeziehung entsprechender Randbedingungen gemäß [7] möglich.

Mittels numerischer Verfahren lassen sich eine Vielzahl weiterer Querschnittsvarianten untersuchen, z. B. rechteckige Wellenbrecher [14] oder auch offene Querschnittsgeometrien wie beispielsweise Kreisbögen [9]. Häufig verwendete numerische Verfahren sind z. B. die Randelementemethode [14], die Scaled Boundary Finite Element Method [9] oder die gekoppelte EULER-LAGRANGE-Methode (CEL-Methode). Diese ist bereits im FE-Programm *Abaqus* implementiert [15] und wird auch in der vorliegenden Arbeit verwendet.

Die infolge der Permeabilität reduzierten dynamischen Lasten gestatten eine effizientere Gründung der Wellenbrecher. Während diese Arbeiten auf der Makro-/Strukturskala stattfinden, werden als Grundlage jedoch Erkenntnisse aus der sogenannten Meso-Ebene benötigt. Exemplarisch sei das Strömungsverhalten des (Meer-)Wassers durch die Schlitze/Perforationen genannt, welches durch eine Formoptimierung der Schlitze/Perforationen beeinflusst wird. Hier sind auch Aspekte der dauerhaften Wirksamkeit der Wellenbrecher zu berücksichtigen, da sich im Zeitverlauf (Meeres-)Organismen in den Perforationen ansiedeln und damit deren Querschnitte verändern werden. Hierdurch ändern sich wiederum die dynamischen Lasten, welche die Bemessung der Wellenbrecher beeinflussen.

Weiterhin ist mit Blick auf die korrosive maritime Umgebung die Dauerhaftigkeit zu klären. Dies erfordert eine besondere Berücksichtigung der sogenannten Wechselzone im Übergangsbereich vom Wasser zur Luft [13]. Entsprechende Transportvorgänge sind auf der Mikroskala zu beschreiben. Auch eine Erhöhung der Lebensdauer durch erhöhte Bindung von Chloridionen [12] ist denkbar.

Bei sämtlichen Optimierungen muss selbstverständlich die baupraktische Umsetzbarkeit gewährleistet sein. Im Rahmen von Laborversuchen sind die Ergebnisse zudem zu verifizieren [1, 8]. Es bietet sich an, hierzu vorab mit den o. g. weiterzuentwickelnden Verfahren unter Berücksichtigung der inhärenten Ungewissheiten [18] zunächst vielversprechende Wellenbrechergeometrien und -anordnungen zu ermitteln.

Es fällt auf, dass bereits umfangreiche Forschungsarbeiten zu Teilaspekten der Wirkung (permeabler) Wellenbrecher erfolgt sind und weiter erfolgen. Jedoch herrscht Bedarf an übergreifenden Forschungsarbeiten, welche eine Optimierung der Wirksamkeit permeabler Wellenbrecher erlauben und dabei Aspekte der Ressourceneffizienz und Dauerhaftigkeit berücksichtigen. Um hier Abhilfe zu schaffen, wurde an der HELMUT-SCHMIDT-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg das fachübergreifende Forschungsprojekt „Permeable Wellenbrecher zum Schutz von baulichen Anlagen und Gütern“ initiiert und intern finanziert.

Dieses Forschungsprojekt besteht aus den folgenden Teilprojekten (TP)

TP 1 Formwiderstandsbeiwerte permeabler Wellenbrecher,

TP 2 Wellen-Boden-Bauwerk-Interaktion,

TP 3 Dauerhaftigkeit von Wellenbrechern in aggressiver Umgebung.

Im nachfolgenden Abschnitt 3 werden erste numerische Ergebnisse diskutiert, welche dem TP 2 zugeordnet sind. Im weiteren Projektverlauf werden (Zwischen-)Ergebnisse des TP 1 als Eingangsgrößen berücksichtigt, während die (Zwischen-)Ergebnisse des TP 2 Eingang in das TP 3 finden werden.

3 Erste numerische Ergebnisse

3.1 Numerisches Modell

Um die in Abschnitt 2 genannten Forschungsfragen beantworten zu können, erfolgt im TP 2 des Forschungsprojektes die Modellierung einzelner Wellenbrecher bzw. die Modellierung einer Anordnung mehrerer Wellenbrecher. Die Berechnungen erfolgen mit der CEL-Methode in Abaqus, Version 2023 [15]. Diese Methode kombiniert die Vorteile der LAGRANGE- und der EULER-Modellierung. Für die späteren Optimierungsaufgaben mit den hierfür notwendigen Änderungen in der Anzahl und Geometrie der Wellenbrecher ist eine händische Erstellung des FE-Modelles in Abaqus CAE nicht zweckmäßig. Daher erfolgt eine skriptgesteuerte Erstellung des Modelles mittels eines inhouse-Codes, welcher in python programmiert wurde. Dieser wird in Abaqus aufgerufen und somit zunächst die Geometrieparameter des Gesamtgebietes sowie der Wellenbrecher abgefragt. Es folgen die Eingabe der Wassertiefe, der Wellencharakteristik sowie der Angaben zur Diskretisierung. Aus den Eingaben wird die zu erwartende Wellenlänge und die relative Wassertiefe ermittelt, welche eine Zuordnung zu einem der Fälle Flach-, Tiefwasser, Übergangsbereich ermöglicht. Die Randbedingungen zur Erzeugung der Welle werden dementsprechend festgelegt. Die anschließende Netzgenerierung erfolgt automatisiert in Abaqus. Ein auf diese Weise erzeugtes beispielhaftes

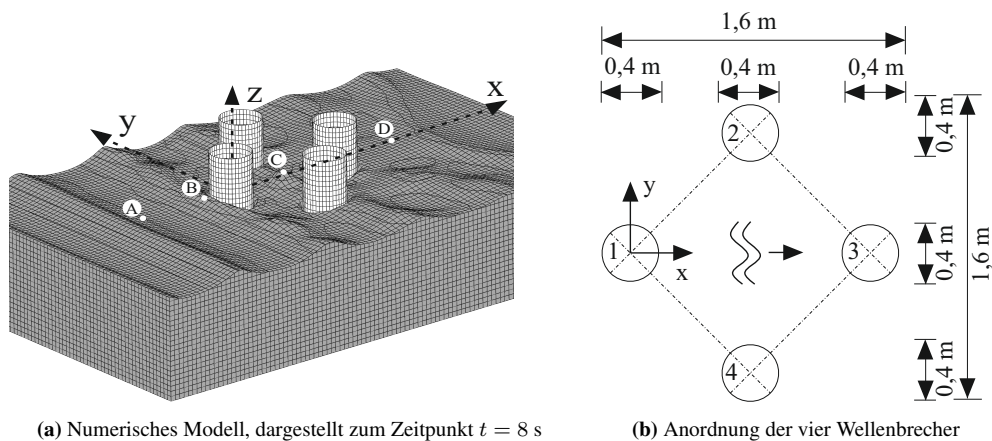


Abbildung 2: Numerisches Modell und relative Lage der Wellenbrecher zueinander

FE-Modell ist in Abb. 2a dargestellt. Es besteht aus insgesamt vier kreiszylindrischen Wellenbrechern, welche zunächst nicht permeabel sind. Die Wellenbrecher haben jeweils einen Radius von 0,2 m sowie eine Höhe von 1,5 m und befinden sich in einer Umgebung mit der

Material	Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Wasser	Dichte	ρ_w	1 000	kg/m ³
	dynamische Viskosität	η	0,001	Pa.s
	Schallgeschwindigkeit	c_0	1 483	m/s
Stahl	Dichte	ρ_s	7 850	kg/m ³
	Elastizitätsmodul	E	210 E ¹⁰	N/m ²
	POISSONZahl	μ	0,3	-

Tabelle 1: Materialparameter

Breite 3,2 m und der Länge 5,2 m. Damit ist im weiteren Projektverlauf ein Vergleich mit experimentellen Daten aus dem Forschungsprojekt möglich. Die Wassersohle ist horizontal ausgerichtet. Die Wassertiefe beträgt $d = 1$ m, sodass die Wellenbrecher 0,5 m über den Ruhewasserspiegel hinausragen. Die Lage des Koordinatensystemes kann Abb. 2b entnommen werden, der Ruhewasserspiegel liegt bei $z = 0$ m. Der CEL-Methode zufolge werden die Wellenbrecher, die keine große Verzerrungen erfahren, als LAGRANGE-Körper und das Wassergebiet entsprechend als EULER-Körper modelliert. Der Kontakt zwischen beiden wird in Abaqus/Explicit als *general contact* definiert. Da die EULERSchen Knoten während des Bewegungsvorganges des EULERSchen Materiales automatisch neu positioniert werden, können keine Verschiebungsrandbedingungen aufgebracht werden [15]. Daher werden an den Rändern $x = 3,2$ m, $y = \pm 1,6$ m, $z = 0,5$ m und $z = -1$ m gemäß Abb. 2a die Geschwindigkeiten normal zu den jeweiligen Rändern des Wassergebietes zu Null gesetzt und ein Ein- und Ausströmen verhindert. Die Modellierung sogenannter *quiet boundaries* ist in der verwendeten Version von Abaqus nicht möglich, für EULERSches Material können auch keine infiniten Elemente verwendet werden. Daher muss das diskretisierte Gebiet entsprechend groß gewählt werden um im jeweils interessierenden Berechnungszeitraum Einflüsse aus (unerwünschten) Randreflektionen zu vermeiden. Die in Abb. 2a erkennbare kleinere Größe des Gebietes dient jedoch dem Vergleich mit späteren Laborexperimenten im Forschungsprojekt und hält den Rechenaufwand angemessen. Für alle Wellenbrecher werden an den Knoten an der Wassersohle sämtliche Freiheitsgrade gesperrt. Die Diskretisierung des Wasservolumens erfolgt durch insgesamt 199 680 lineare hexaedrische Elemente des Typs EC3D8R. Die Diskretisierung der Wellenbrecher erfolgt durch jeweils 1 200 lineare Schalenelemente des Typs S4R. Als Materialmodell für das Wasser wird das lineare Zustandgleichungsmodell von MIEGRÜNEISEN verwendet. Für die Wellenbrecher wird ein linear-elastisches isotropes Materialmodell genutzt. Die verwendeten Materialparameter sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Die Wasserwelle wird durch ein Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz am Rand $x = -2$ m erzeugt. Die vorgeschriebene tiefenabhängige horizontale Geschwindigkeit v folgt nach [5] zu

$$v = H\omega e^{kz} \cos(kx - \omega t) \quad , \quad (1)$$

worin H die Wellenamplitude, k die Wellenzahl und ω die Kreisfrequenz bezeichnen. Die Wellenbrecheranordnung in Abb. 2b wird aus der Ruhelage heraus ab dem Zeitpunkt $t = 0,2$ s durch eine Wasserwelle von $k = 7,85$ m⁻¹, $\omega = 8,8$ s⁻¹ und $H = 0,1$ m belastet. Daraus ergibt sich eine Wellenlänge $\lambda \approx 0,8$ m und eine relative Wassertiefe von $d/\lambda \approx 1,25 > 0,5$, sodass nach [5] eine Tiefwasserwelle vorliegt. Die sich zu einem (beispielhaften) Zeitpunkt $t = 8$ s ergebende Verteilung der Wellenhöhe ist in Abb. 2a dargestellt. Es sei

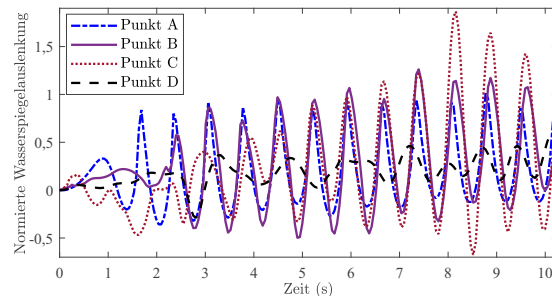


Abbildung 3: Darstellung der Wirkung der Wellenbrecheranordnung während des beginnenden Wellenereignisses anhand der auf H normierten Wasserspiegelauslenkung an vier ausgewählten Punkten gemäß Abb. 2a

darauf hingewiesen, dass sich das System noch im Einschwingvorgang befindet und somit keine zeitharmonische Antwort vorliegt.

3.2 Auswertung

Zur Ermittlung der Wirksamkeit der Wellenbrecher ist ein Vergleich der Amplitude der Wellenhöhe hinter den Wellenbrechern im Vergleich zur Amplitude H der ungestörten Welle zweckmäßig. In der vorliegenden Arbeit wird gleichwohl das beginnende Wellenereignis untersucht, sodass sich das System noch im Einschwingvorgang befindet.

Die auf H normierte Wasserspiegelauslenkung an den vier in Abb. 2a markierten Punkten (A: 1,2 m vor dem Wellenbrecher Nr. 1 gemessen von der Mittelachse, B: unmittelbar vor Wellenbrecher Nr. 1, C: mittig zwischen den Wellenbrechern und D: 0,8 m nach dem Wellenbrecher Nr. 3 gemessen von der Mittelachse) ist in Abb. 3 dargestellt. Erwartungsgemäß übersteigt die Wasserspiegelauslenkung am Punkt B die Wellenhöhe der eingepprägten Welle, im untersuchten Zeitbereich um bis zu etwa 25 %. Ebenso sind die Mehrfachreflektionen und die damit einhergehenden Wasserspiegelüberhöhungen am Punkt C innerhalb der Wellenbrecheranordnung sichtbar. Am Punkt D hinter den Wellenbrechern zeigt sich der gewünschte Effekt verringerter Wasserspiegelauslenkungen. Aus dem Zeitverlauf der Wasserspiegelauslenkung ist ebenfalls der Effekt des beginnenden Wellenereignisses sowie der rückwärtigen Begrenzung des Berechnungsgebietes erkennbar.

4 Zusammenfassung

Zum Schutz von baulichen Anlagen und Gütern vor den Einwirkungen von Wasserwellen bieten sich u. a. Anordnungen von Wellenbrechern an. Zur Verbesserung der Wirksamkeit der Wellenbrecheranordnungen und zur Erhöhung der Ressourceneffizienz und Dauerhaftigkeit ist eine Optimierung der einzelnen Wellenbrecher erforderlich. Dies umfasst im Falle von permeablen Wellenbrechern einerseits die Größe und Geometrie der Perforationen oder

Schlitzes sowie andererseits die Optimierung eines ggf. mehrschichtigen Aufbaues. Im vorliegenden Beitrag ist in einem ersten Schritt ein skriptgesteuerter Ansatz vorgestellt, welcher im nächsten Schritt eine automatisierte Parameterstudie gestattet. Für den Spezialfall einer Anordnung von insgesamt vier geschlossenen Wellenbrechern zeigen die Berechnungsergebnisse eine gute Übereinstimmung mit den Werten aus der Standardliteratur. Auf dieser Grundlage kann im nächsten Schritt die Modellierung permeabler Wellenbrecher erfolgen.

Danksagung

Die vorstehenden Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des fachübergreifenden Forschungsprojektes „Permeable Wellenbrecher zum Schutz von baulichen Anlagen und Gütern“ durchgeführt. Dieses Forschungsprojekt wird gefördert durch die HELMUT-SCHMIDT-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg.

Literatur

- [1] AHMED, H. ; SCHLENKHOFF, A. ; OERTEL, M. : Stokes second-order wave interaction with vertical slotted wall breakwater. In: TAKAHASHI, S. (Hrsg.) ; ISOBE, M. (Hrsg.) ; KOBAYASHI, N. (Hrsg.) ; SHIMOSAKO, K.-I. (Hrsg.): *Coastal Structures 2011*, World Scientific, 2011, S. 691–703
- [2] BASMAT, A. : Diffraction of water waves by a slotted cylindrical breakwater. In: *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics* 8 (2008), S. 10671–10672
- [3] BASMAT, A. : Diffraction of water waves by a slotted dual cylindrical caisson breakwater. In: *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics* 10 (2010), S. 491–492
- [4] CONTIE, M. : *MCP-01 Concrete Substructure – An Assessment of Proposals for the Disposal of the Concrete Substructure of Disused MCP-01 Installation*. Aberdeen : TOTAL E&P UK Limited, 2006
- [5] GRAW, K.-U. : *Wellenenergie – eine hydromechanische Analyse*. Wuppertal : Bergische Universität - Gesamthochschule Wuppertal, 1995 (Bericht Nr. 8 des Lehr- und Forschungsgebietes Wasserbau und Wasserwirtschaft)
- [6] GUTIÉRREZ-VEGA, J. C. ; RODRÍGUEZ-DAGNINO, R. M. ; MENESES-NAVA, M. A. ; CHÁVEZ-CERDA, S. : Mathieu functions, a visual approach. In: *American Journal of Physics* 71 (2003), Nr. 3, S. 233–242
- [7] KONISPOLIATIS, D. N. ; MAVRAKOS, S. A.: Theoretical Analysis of a Vertical Cylindrical Floater in Front of an Orthogonal Breakwater. In: *Fluids* 5 (2020), Nr. 3, S. 135–156
- [8] LIU, J. ; GUO, A. ; NANDASENA, N. ; MELVILLE, B. W. ; LI, H. : Theoretical and experimental investigation on wave interaction with a concentric porous cylinder form of breakwater. In: *Ocean Engineering* 160 (2018), S. 156–167

- [9] LIU, J. ; LIN, G. : Numerical modelling of wave interaction with a concentric cylindrical system with an arc-shaped porous outer cylinder. In: *European Journal of Mechanics B/Fluids* 37 (2013), S. 59–71
- [10] LYKKE ANDERSEN, T. ; ELDRUP, M. R. ; LAURIDSEN, H. ; GIERLEVSEN, T. : Stability Assessment of the New Cubipod[®] Armoured Breakwater in Hanstholm. In: GÖSEBERG, N. (Hrsg.) ; SCHLURMANN, T. (Hrsg.): *Coastal Structures 2019*. Karlsruhe : Bundesanstalt für Wasserbau, 2019, S. 674–684
- [11] MACCAMY, R. ; FUCHS, R. A.: *Wave forces on piles: a diffraction theory*. Washington D.C. : U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, 1954 (Technical Memorandum 69)
- [12] MIR, Z. M. ; BASTOS, A. C. ; GOMES, C. ; MUELLER, U. ; ALONSO, M. C. ; VILLAR, K. ; RABADE, M. P. ; MAIA, F. ; ROCHA, C. M. ; MAINCON, P. ; HÖCHE, D. ; FERREIRA, M. G. ; ZHELUDKEVICH, M. L.: Numerical and Experimental Analysis of Self-Protection in Reinforced Concrete due to Application of Mg–Al–NO₂ Layered Double Hydroxides. In: *Advanced Engineering Materials* 22 (2020), Nr. 11, S. 2000398
- [13] MIR, Z. M. ; HÖCHE, D. ; GOMES, C. ; SAMPAIO, R. ; BASTOS, A. C. ; MAINCON, P. ; FERREIRA, M. ; ZHELUDKEVICH, M. L.: Enhanced Predictive Modelling of Steel Corrosion in Concrete in Submerged Zone Based on a Dynamic Activation Approach. In: *International Journal of Concrete Structures and Materials* 13 (2019), S. 11–28
- [14] PANDURANGA, K. ; KOLEY, S. : Oblique Wave Scattering by A Rectangular Porous Floating Breakwater with Slotted Screens over A Sill-Type Seabed. In: *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements* 10 (2022), Nr. 2, S. 172–186
- [15] SIMULIA: *ABAQUS/CAE User's Guide, Version 2023*. United States : Dassault Systèmes Simulia Corp, 2023
- [16] WEBER, W. ; ZASTRAU, B. : On SH Wave Scattering in TRC-Part I: Concentric Elliptical Inclusion. In: *Machine Dynamics Problems* 33 (2009), Nr. 2, S. 105–118
- [17] WEBER, W. ; ZASTRAU, B. : Non-plane wave scattering from a single eccentric circular inclusion-Part I: SH waves. In: *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 49 (2011), Nr. 4, S. 1183–1201
- [18] WEBER, W. ; REUTER, U. : Fuzzy modeling of wave-shielding under consideration of cost-effectiveness for an efficient reduction of uncertainty. In: *Advances in Engineering Software* 109 (2017), S. 53–61
- [19] WILLIAMS, A. N. ; LI, W. : Water wave interaction with an array of bottom-mounted surface-piercing porous cylinders. In: *Ocean Engineering* (2000), Nr. 27(8), S. 841–866