

Theoretical Wave Power Potential Alongside the Klaipėda Seaport Breakwaters

Authors

Egidijus Kasiulis
Linas Šilinis

Keywords

theoretical wave power, OWC, breakwater, Klaipėda Seaport, Baltic Sea

Abstract

Favourable geographical position of the Klaipėda Seaport and its breakwaters can draw attention in the future as a suitable site for a wave energy converter in Lithuania. Firstly, it is the most northern ice-free port in the eastern Baltic Sea. And, secondly, prevailing western winds and long fetches are yielding here one of the highest waves in the Baltic Sea. Available multi-year (1970–2010) visual wave height observations at Klaipėda coastal hydrometeorological station were used as an initial data which allowed determining multi-year monthly average wave heights and average seasonal wave heights of the design years. Using these wave heights as offshore conditions in the numerical wind-wave model MIKE 21 NSW enabled to assess temporal distribution of the theoretical wave power potential alongside the Klaipėda Seaport breakwaters, taking into consideration different wave propagation directions. It was found that during the autumn-winter season the theoretical wave power potential can be several times higher than in the spring-summer season and that the loss of wave power flux is the least when waves are propagating from the southwest direction alongside the southern breakwater of the Klaipėda Seaport.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2018108

Received: 30.06.2017

Accepted: 04.07.2017

Available online: 31.08.2018

1. Introduction

There are many wave energy converters (WECs) prototypes in the world, but only few multi-turbine wave energy power plants are already built or are under construction. One of them was commissioned and connected to the national electricity grid in Mutriku (Spain) in 2011. It would be misleading to state that oscillating water column (OWC) technology, that Mutriku plant is utilizing, is the only way forward for the wave energy. Still, this plant proved two points: the technological readiness of the OWC and the possibility to build WECs in the existing seaports structures – breakwaters [1].

Installing WEC using existing seaport structures has several advantages. Firstly, it is the merit of using seaport infrastructure during the construction phase. Secondly, electricity consumer for the future plant is in the short distance. Here it is also worth to mention easier nature of construction of OWC plant with lesser amount of work under water comparing with other WECs, especially deep water ones.

On the other hand, the location of the seaport and the location of highest wave energy resources not necessary coincide. The geographical position of the Klaipėda Seaport is favorable in this case because it is the most northern ice-free port in the eastern Baltic Sea (Fig.1). Hence, there is a possibility of all year long electricity generation. The merit is also that the Baltic Sea seabed slope along the Lithuanian near-shore area is more or less even, what makes the wave energy resources increase steadily moving away from the shore. What makes the location of the Klaipėda Seaport not necessary in the area of highest wave energy resources, yet at the same not in the area of lowest resources either.

As the Mutriku OWC plant, other most noted OWC plants (Pico and Limpet) in Europe are also situated in the Northern Atlantic, the area with highest wave power potential in Europe. However, several latest studies concerning utilization of the wave energy potential in the Mediterranean Sea are proposing the development of the OWC wave energy converters in this lower wave power potential area.

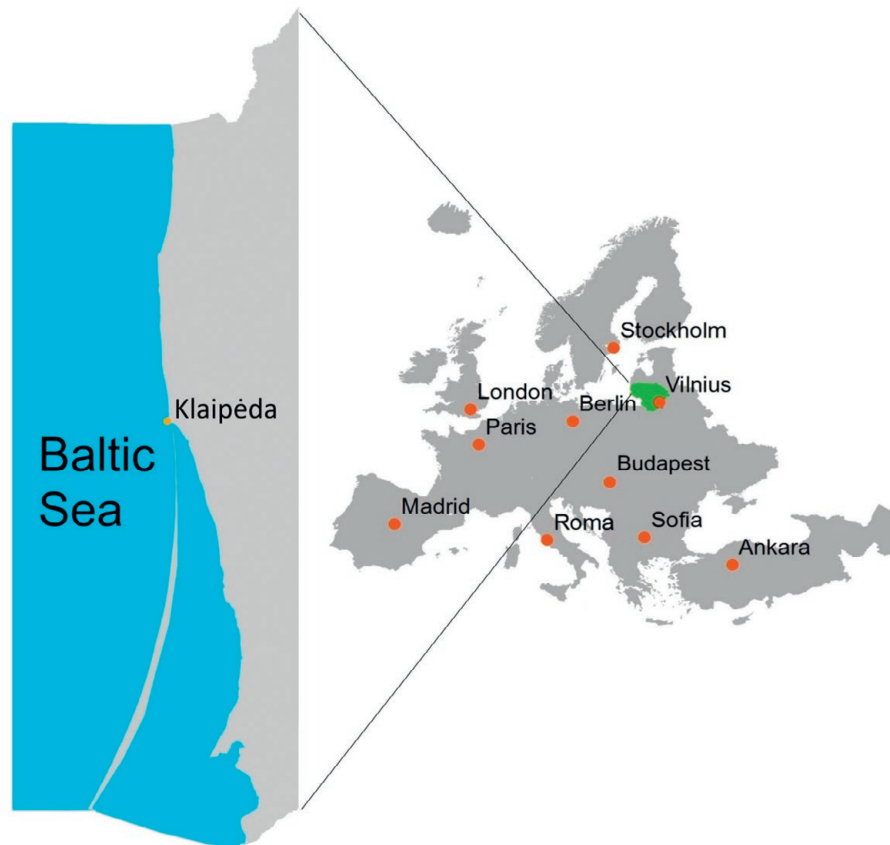


Fig. 1. Geographical position of the Klaipėda Seaport

P. Boccotti patented a novel OWC device with the additional vertical duct (U-OWC) [2, 3], which was later tested in the wave climate of province of Reggio Calabria, Italy [4]. This location in the center of the Mediterranean Sea has wave climate quite similar to the eastern Baltic Sea with significant wave heights ranging from 0.3 m to 1.2 m and peak periods – from 1.8 s to 2.9 s [4, 5]. In this test, highest efficiency of the U-OWC system occurred when wave states were between 0.4 and 0.6 m [4]. Interestingly, these are the most frequent wave states along the Lithuanian coast of the Baltic Sea [5]. The list of existing OWC installations can be found in [6].

Another type of WEC combining with rubble mound breakwater, OBREC (Overtopping Breakwater for Energy Conversion), was built in the Port of Naples in 2016 [7, 8]. OBREC is designed to operate in areas of lower wave power potential, like the Baltic Sea, Danish part of the Northern Sea and Mediterranean Sea.

The ongoing discussion concerning reconstruction of Klaipėda Seaport breakwaters could lead to a consideration of a construction of the wave energy converter. But before that the assessment of the wave power potential alongside these breakwaters must be carried out. The aim of this study is to assess temporal distribution of the theoretical wave power potential alongside the Klaipėda Seaport breakwaters, taking into consideration different wave propagation directions.

2. Methodology

Distribution of wave heights

The instrumental measurements of the wave heights along the Lithuanian coast of the Baltic Sea are scarce and consequently cannot be used for the wave power potential analysis. On the other hand, available continuous multi-year visual wave observations in the Klaipėda coastal observation site makes it possible to carry out statistical analysis, which afterwards can be used to achieve the aim of this study.

In this study data from 1970 to 2010 from the Klaipėda coastal observation site was used. A conventional method designed for calculating a distribution of annual variables using multi-year data was applied. The main goal of this method was to determine the distribution of monthly average and seasonal average wave heights in the selected design years. In this case, the selected design years were: high intensity (5% probability), median intensity (50% probability) and low intensity (95% probability) wave years. The detailed results of this method were published in [5]. Here the main results are presented in Tab. 1.

Wave power evaluation

Two features of the visual wave observations data allow the use of the wave spectrum to evaluate wave power flux. Visually measured wave height coincides rather well with significant wave height [9], while visually measured wave period corresponds to peak period [10]. Consequently, the equation to evaluate wave power flux is:

Design Years	Average Wave Heights [m]																
	Monthly												Seasonal				Annual
	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Spr	Sum	Aut	Win	
High intensity wave year (1973/1974)	0.68	0.85	0.58	0.74	0.68	0.81	1.09	1.00	1.66	1.24	0.82	0.57	0.70	0.74	1.25	0.88	0.89
Median intensity wave year (1994/1995)	0.83	0.40	0.45	0.77	0.36	0.51	0.62	0.69	0.85	0.77	0.71	1.07	0.56	0.55	0.72	0.85	0.67
Low intensity wave year (1976/1977)	0.68	0.62	0.41	0.58	0.48	0.38	0.58	0.52	0.57	0.60	0.46	0.49	0.57	0.48	0.56	0.52	0.53

Tab. 1. Average wave heights of design years in the Klaipėda coast

$$P = \rho g \int_0^{\infty} S(f) c_g(f) df \quad (1)$$

ρ – mass density of the water (the brackish water of the Baltic Sea,

$\rho = 1010 \text{ kg/m}^3$ [11])

g – gravitational constant [m/s²]

$c_g(f)$ – group velocity of waves [m/s]

$S(f)$ – spectral density [m²/Hz]

Spectral density is calculated using the parametrized JONSWAP wave spectrum, modified for the Baltic Sea [12]:

$$S(f) = K_m \frac{H_s^2 T_p}{(T_p f)^5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f_p}{f} \right)^4 \right] \gamma^\beta \quad (2)$$

K_m – empirically determined constant (0.1786)

H_s – significant wave height [m]

T_p – peak period [s]

f_p – peak frequency [Hz]

f – wave frequency [Hz]

γ – peak enhancement factor (4.0)

$$\beta = \exp \left(-\frac{(f - f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right) \quad (3)$$

$\sigma = 0,07$ for $f \leq f_p$, $\sigma = 0,09$ for $f > f_p$

σ – shape parameter

Numerical modelling

The numerical wind-wave model *MIKE 21 NSW* was used in this study. This model was selected because it takes into account effects of the refraction and energy dissipation due to the bottom friction. Since, the coastal bathymetry of the studied site is quite regular, there is no islands and therefore there is negligible diffraction effects, this allows to avoid more sophisticated near-shore wave propagation models.

Wave heights that were used as offshore conditions (in 20 m depth) and which propagation to the Klaipėda Seaport breakwaters site (in 8.5 m depth) was modelled are average wave heights of the design years (Tab. 1). Into the examined range of wave heights fall 69.9% of the average monthly wave heights from the period of 1970–2010, hence this study reflects the situation

during majority of the year alongside the Klaipėda Seaport breakwaters.

Three wave propagation directions were selected for the study: northwest, west and southwest. These directions were selected because they have the longest fetches in the Lithuanian coast yielding the highest and consequently the most powerful wind waves. Additionally, as can be seen from Fig. 2, where the bathymetry of the model area is presented, the Klaipėda Seaport breakwaters are open for an impact of the western waves.

To validate the performance of the model 4 days' span of instrumental measurements from the Klaipėda coastal observation site (N 55°43' 55", E 21°4'20", 10 m depth) was used. For offshore conditions, European Centre for Medium-Range Weather Forecast *ERA Interim* data (N 55°50' E 20°25', 50 m depth) [13] from the same period was used and the correspondence of the modelled significant wave heights and instrumentally measured significant wave height was evaluated by calculating root mean square error, bias and correlation coefficient. The values of the latter were 0.26; 0.11 and 0.71, respectively.

3. Results

The examination of the results of the numerical modelling of the wave propagation to the Klaipėda Seaport breakwaters revealed that the loss of the wave heights for each wave propagation direction alongside northern and southern breakwaters of the Klaipėda Seaport is different. Therefore, in this paper, the results are presented where these losses are the lowest: alongside northern breakwater, when waves are propagating from the northwest (NW) and west (W); and southern breakwater, when they are propagating from the southwest (SW). The results for the wave heights loss during the high intensity wave year considering this three wave propagation directions are presented in the Fig. 3.

From Fig. 3 it becomes clear that the rate of wave heights loss depends from the wave propagation direction and its initial height. While the loss when waves are propagating from the SW and W are quite similar, the corresponding loss when waves are propagating from the NW can be up to two times higher. For example, propagating higher waves (1.24 m) reach breakwaters losing 0.16 m when propagating from SW, 0.21 m from W and 0.33 m from NW. Lower waves (0.68 m) lose 0.04 m, 0.05 m and 0.11 m, respectively.

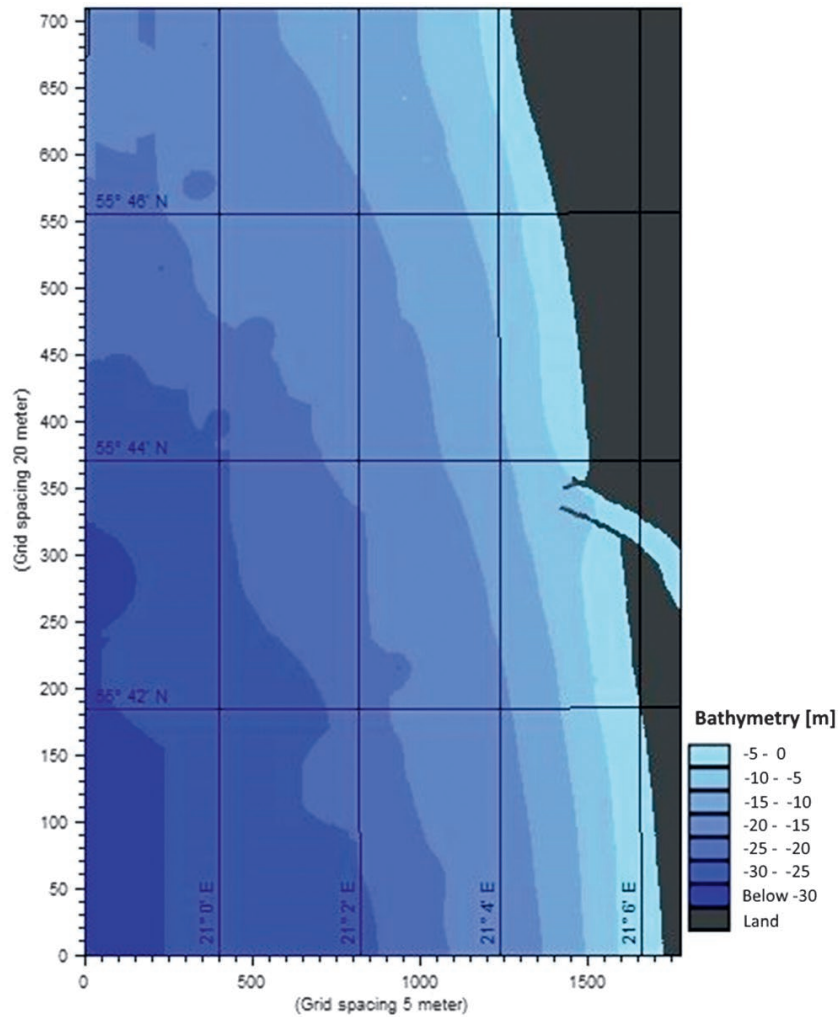


Fig. 2. Bathymetry of the Baltic Sea along the coast of Klaipėda

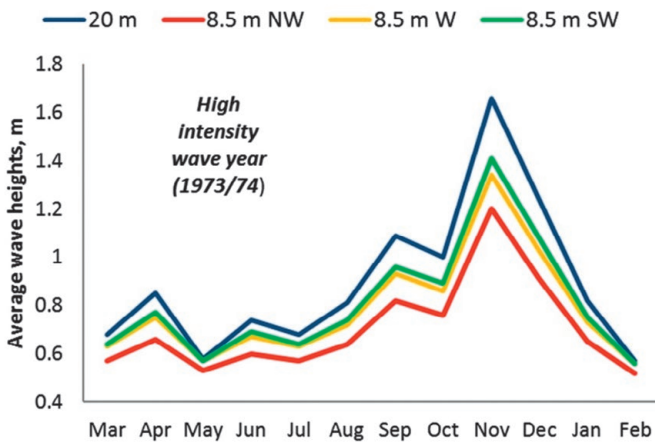


Fig. 3. Variation of high intensity wave year's monthly average wave heights offshore and alongside the Klaipėda Seaport breakwaters

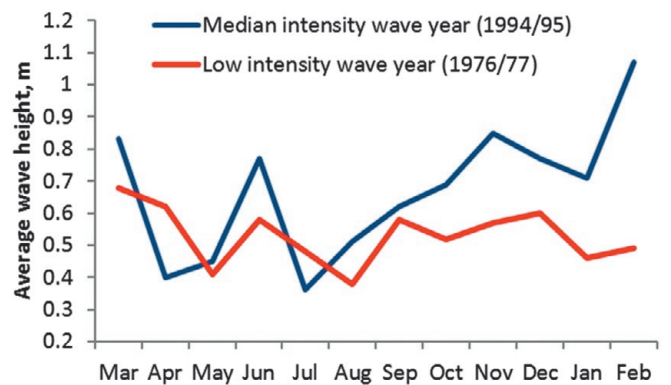


Fig. 4. Variation of median and low intensity wave years' monthly average wave heights offshore

Fig 3. also particularly well reflects the seasonal variations of wave heights in the Lithuanian coast of the Baltic Sea. Average wave heights in the winter period are generally higher than in the summer. Still, this cannot be taken as a rule, especially in current climate change background. In the last decades, the

highest annual wave heights and wind speeds in the Klaipėda coastal observation site were repeatedly recorded and during warm season. With this the limitations of the method used in this paper to determine design years' average wave heights, using distributions of particular year average wave heights, is related. This is illustrated in Fig. 4.

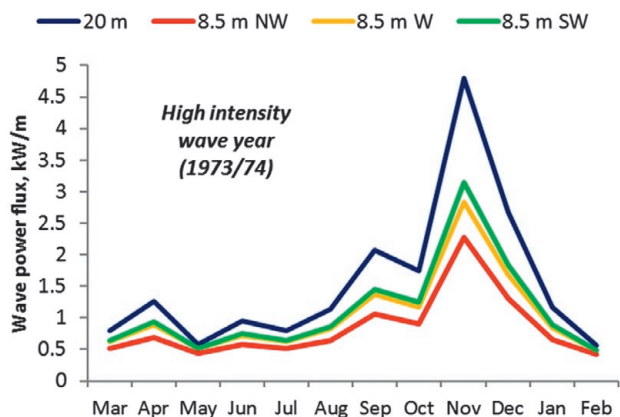


Fig. 5. Variation of high intensity wave year’s wave power flux offshore and alongside the Klaipėda Seaport breakwaters

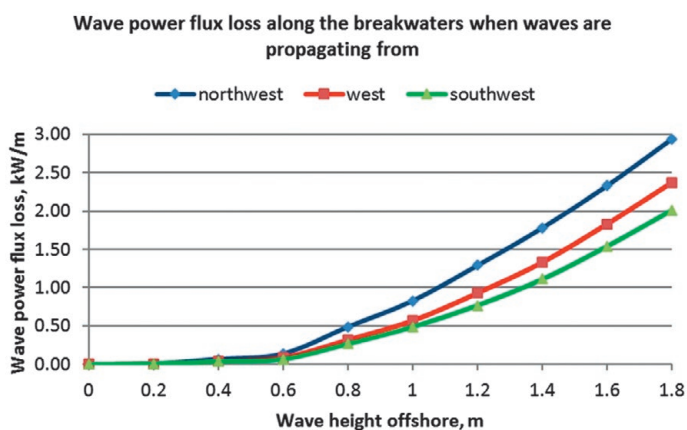


Fig. 6. The rate of loss of the wave power flux alongside the Klaipėda Seaport breakwaters

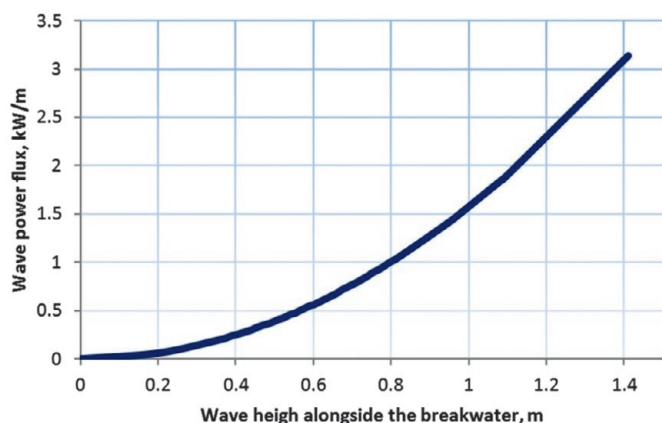


Fig. 7. Theoretical wave power potential alongside southern breakwater of the Klaipėda Seaport when waves are propagating from the southern direction

possibility of electricity generation in this season. On the other hand, there is an all year low wave height tendency during low intensity wave year indicating low possibility to generate electricity during the whole year. The trend of wave heights loss alongside the Klaipėda Seaport breakwaters in the median and low intensity wave years is similar to the shown in Fig. 3.

The effect of the loss of the wave heights of the waves, propagating from offshore to the Klaipėda Seaport breakwaters, on the wave power flux in the high intensity wave year is shown in Fig. 5. Higher waves (1.24 m), when they reach breakwaters, lose 31% of their wave power flux when they are propagating from the SW, 37% when they are propagating from the W and even 51% when they are propagating from the NW. Lower waves (0.68 m) lose 20%, 23% and 36%, respectively. Hence, at first site insignificant reduction of the wave height is causing substantial loss of the wave power flux alongside breakwaters. The rate of loss of wave power flux alongside the Klaipėda Seaport breakwaters is summarized in Fig. 6.

Fig. 6 well reflects the dependence of wave power flux loss alongside breakwaters on the height of the waves and their propagation direction. Wave of 1.6 m height is picked to analyze briefly here. The offshore wave power flux of this wave is 4.46 kW/m. While reaching breakwaters, wave of this height loses 1.54 kW/m when it is propagating from the southwest, 1.83 kW/m when it is propagating from the west and 2.33 kW/m when it is propagating from the northwest. Hence, not only, when it reaches breakwater, while propagating from the most favorable direction, it has already lost 34.5% of its power flux, when direction is the least favorable it adds another 17.5% to its initial loss. The Baltic Sea does not have high potential of the wave power, thus these losses are quite substantial. On the other hand, every consideration of building a wave energy converter not in offshore areas will inevitably encounter the loss of the wave power flux. Having this and the recent development of OWC plants in mind, the adoption of right technology and the construction of wave energy converter can be a possibility in both, northern and southern breakwaters of the Klaipėda Seaport.

In Fig. 7 the theoretical wave power potential alongside the southern breakwater of the Klaipėda Seaport is shown. Waves in this case are propagating from the most favorable studied direction – southwest.

So far, despite the climate change alterations, the annual variations of the wave heights in the Baltic Sea along the coast of Klaipėda led to the splitting of the wave power potential into two constituents: spring-summer and autumn-winter seasons. In Tab. 1 during all design years’ seasonal average wave height in winter is always higher than in the summer. And if we base our theoretical wave power potential assumptions on the Fig 7, it can be stated that this potential in the autumn-winter season can be up to two times higher, than in the spring-summer season. In summer alongside the breakwaters the average wave power flux can be up to 0.35 kW/m during low intensity wave year, 0.46 kW/m during median intensity wave year and 0.75 kW/m during high intensity wave year. In winter, these figures can grow to 0.41 kW/m, 0.93 kW/m and 1.01 kW/m, respectively.

On the one hand, there is an unexpectedly high spike in June in median intensity wave year, indicating occurrence of higher and more powerful waves in the warmer season, meaning the

4. Conclusions

The breakwaters of the Klaipėda Seaport are designed to protect the port from damaging effects of the Baltic Sea waves. They are facing the most powerful western directions waves and consequently could be used to generate electricity from them via OWC or other type wave power plant.

This study revealed that most frequent lower waves in the Baltic Sea along the coast of Klaipėda while propagating from the offshore to the breakwaters site in best case scenario (alongside southern breakwater when waves are propagating from southwest) are losing only approximately 20% of their power. The change in wave direction and intensification of the waves can considerably alter the wave power flux loss, which can grow up to 50%.

The seasonal variations of the wave power flux alongside the Klaipėda Seaport breakwaters are relatively high. The figures in the colder season can be several times higher than in the warmer season. The estimations of the theoretical wave power flux in this study ranges from 0.30 kW/m during low intensity wave year's summer when waves are propagating from the northwest to 1.87 kW/m during high intensity wave year's autumn when waves are propagating from the southwest.

Acknowledgement

The authors would like to acknowledge the Lithuanian EPA Department of Marine Research for providing Klaipėda coastal hydrometeorological station data.

REFERENCES

1. Torre-Enciso Y. et al., "Mutriku wave power plant: from the thinking out to the reality", in Proc. EWTEC '09, Southampton 2011.
2. Boccotti P., "Comparison between a U-OWC and a conventional OWC", *Ocean Eng.*, Vol. 37, 2007, pp. 799–805.
3. Boccotti P., "Design a breakwater for conversion of wave energy into electrical energy", *Ocean Eng.*, Vol. 51, 2012, pp. 106–118.
4. Arena F. et al., "A small scale field experiment on a U-OWC (REWEC3)", in Proc. EWTEC '13, Aalborg 2013.
5. Kasiulis E., Punys P., Kofoed J.P., "Assessment of theoretical near-shore wave power potential along the Lithuanian coast of the Baltic Sea", *Renew. Sust. Energ. Rev.*, Vol. 41, 2015, pp. 134–142.
6. Falcão A.F.O., Henriques J.C.C., "Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review", *Renew. Sust. Energ. Rev.*, Vol. 85, 2016, pp. 1391–1424.
7. Vicinanza D. et al., "Innovative rubble mound breakwaters for overtopping wave energy conversion", *Coast. Eng.*, Vol. 88, 2014, pp. 154–170.
8. Contestabile P. et al., "Economic assessment of overtopping breakwater (OBREC): a case study in Western Australia", *Sustainability-Basel*, Vol. 9, 2017, pp. 1–28.
9. Young I.R., "Wind Generated Ocean Waves", 1st ed., Bhattacharyya R., McCormick M.E., Ed., Oxford, Elsevier, 1999.
10. Hogben N., Dacunha N.M., Oliver G.F., "Global Wave Statistics", London, British Maritime Technology, 1986.
11. Lepparanta M., Myrberg K., "Physical Oceanography of the Baltic Sea", Chichester, Springer, 2009.
12. Feistel R., Nausch G., Wasmund N., "State and Evolution of the Baltic Sea, 1952–2005. A Detailed 50-year Survey of Meteorology and Climate, Physics, Chemistry, Biology, and Maritime Environment", New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2008.
13. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 2017 [online], www.ecmwf.int.

Egidijus Kasiulis

Aleksandras Stulginskis University

e-mail: egidijus.kasiulis@asu.lt

PhD, graduated in 2015 in environmental engineering from Aleksandras Stulginskis University in Lithuania. Since 2016 he is junior research fellow at the Institute of Water Resources Engineering. Main research interests – conventional and hydrokinetic (ocean waves, river flow) energy conversion and its environmental impact.

Linas Šilinis

Aleksandras Stulginskis University

e-mail: linas.silinis@stud.asu.lt

MSc, graduated in 2015 in hydraulic engineering from Aleksandras Stulginskis University in Lithuania. Since 2015 he is PhD student at the Institute of Water Resources Engineering. Main research interests – river hydrokinetic energy resources, hydropeaking and its environmental impact.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 77–82. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Teoretyczny potencjał energetyczny fal morskich wzdłuż falochronów w porcie w Kłajpedzie

Autorzy

Egidijus Kasiulis
 Linas Šilinis

Słowa kluczowe

potencjał energetyczny fal, kolumna oscylacyjna (OWC), falochron, port morski w Kłajpedzie, Morze Bałtyckie

Streszczenie

Dzięki korzystnemu położeniu geograficznemu port morski w Kłajpedzie i jego falochrony mogą w przyszłości okazać się odpowiednim miejscem na litewski konwerter energii fal. Po pierwsze jest to najdalej wysunięty na północ, niezamarzający port wschodniego Bałtyku. Po drugie zachodnie wiatry i ich długie rozbiegi wzbudzają tutaj jedne z najwyższych fal na Morzu Bałtyckim. Dostępne wieloletnie (1970–2010) obserwacje wysokości fali, prowadzone w przybrzeżnej stacji hydrometeorologicznej w Kłajpedzie, wykorzystano jako wstępne dane, które pozwoliły na określenie wieloletnich średnich miesięcznych wysokości fal i średnich sezonowych wysokości fal w latach projektowania. Wykorzystanie tych wysokości fal jako warunków przybrzeżnych w modelu numerycznym fal morskich MIKE 21 NSW umożliwiło ocenę czasowego rozkładu teoretycznego energetycznego potencjału fal wzdłuż falochronów w porcie morskim w Kłajpedzie, z uwzględnieniem różnych kierunków propagacji fal. Stwierdzono, że w okresie jesienno-zimowym teoretyczny potencjał energetyczny fal może być kilkakrotnie wyższy niż w okresie wiosenno-letnim, a strata energii strumienia fali jest najmniejsza, gdy fale zdążają z kierunku południowo-zachodniego wzdłuż falochronu południowego portu morskiego w Kłajpedzie.

Data wpływu do redakcji: 30.06.2017

Data akceptacji artykułu: 04.07.2017

Data publikacji online: 31.08.2018

1. Wstęp

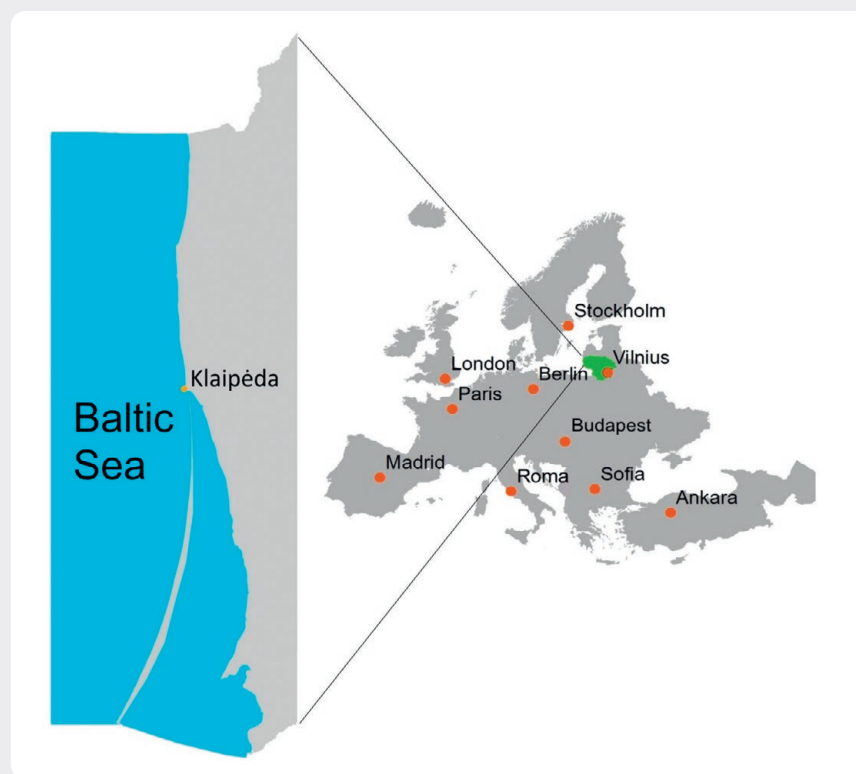
Na świecie wiele jest prototypów konwerterów energii fal (WEC, *wave energy converter*), ale dotychczas zbudowano lub niektóre są jeszcze w trakcie budowy zaledwie kilka wieloturbinowych elektrowni fal morskich. Jedną z nich oddano do użytku i przyłączono do krajowej sieci elektroenergetycznej w Mutriku (Hiszpania) w 2011 roku. Mylące byłoby stwierdzenie, że technologia kolumn oscylacyjnych (OWC, *oscillating water column*), którą zastosowano w Mutriku, to jedyna droga do spożytkowania energii fal. Mimo to instalacja ta udowodniła dwie kwestie: gotowości technologicznej OWC i możliwości budowy WEC w ramach istniejących struktur portów morskich – na falochronach [1].

Instalowanie WEC z wykorzystaniem istniejących struktur portów morskich ma kilka zalet. Po pierwsze umożliwia korzystanie z infrastruktury portu morskiego na etapie budowy. Po drugie odbiorca energii elektrycznej z przyszłej elektrowni jest usytuowany w niewielkiej odległości. Warto również wspomnieć, że budowa elektrowni OWC jest łatwiejsza i wymaga mniej prac podwodnych w porównaniu z innymi WEC, zwłaszcza głębinowymi.

Lokalizacja portu morskiego i położenie zasobów fal o najwyższej energii wcale nie muszą być takie same. Położenie geograficzne portu morskiego w Kłajpedzie w tym przypadku jest korzystne, ponieważ jest to najbardziej na północ wysunięty port we wschodniej części Morza Bałtyckiego (rys. 1). Daje to możliwość całorocznego wytwarzania energii elektrycznej. Inną zaletą jest również stok dna Morza

Bałtyckiego, który wzdłuż litewskiego obszaru przybrzeżnego jest mniej więcej równomierny, co powoduje, że energia fal stale rośnie przy oddalaniu się od brzegu.

Tak więc port morski w Kłajpedzie być może nie leży w obszarze zasobów najwyższej energii fal, ale też nie znajduje się w miejscu o energii najniższej.



Rys. 1. Położenie geograficzne portu morskiego w Kłajpedzie

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 77–82. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Tak jak elektrownia OWC w Mutriku, także inne najbardziej znane instalacje OWC (Pico i Limpet) w Europie usytuowane są na północnym Atlantyku, w obszarze o najwyższym potencjale energetycznym fal w Europie. Kilka najnowszych badań nad wykorzystaniem potencjału energii fal na Morzu Śródziemnym sugeruje jednak rozwój konwerterów energii fal OWC na obszarze cechującym się niższym energetycznym potencjałem fal.

P. Boccotti opatentował nowatorskie rozwiązanie OWC z dodatkowym kanałem pionowym (U-OWC) [2, 3], który przetestowano w klimacie falowym prowincji Reggio Calabria we Włoszech [4]. Ta lokalizacja w centrum Morza Śródziemnego ma klimat falowy dość podobny do wschodniego Bałtyku, z wysokościami fali znacznej od 0,3 m do 1,2 m oraz okresami szczytowymi wynoszącymi od 1,8 s do 2,9 s [4, 5]. W teście tym system U-OWC wykazał najwyższą sprawność, gdy wysokość fal wahała się od 0,4 do 0,6 m [4]. Co ciekawe, są to najczęstsze stany falowe na litewskim wybrzeżu Morza Bałtyckiego [5]. Wykaz obecnych instalacji OWC można znaleźć w [6].

Innego rodzaju konwerter energii fal (ang. *overtopping breakwater for energy conversion*, OBREC), połączony z falochronem narzutowym, zbudowano w porcie w Neapolu w 2016 roku [7, 8]. OBREC przeznaczony jest dla obszarów o niższym potencjale energetycznym fal, takich jak Morze Bałtyckie, duńska część Morza Północnego i Morze Śródziemne.

Trwająca dyskusja dotycząca przebudowy falochronów w porcie morskim w Kłajpedzie może doprowadzić do rozwiązania budowy konwertera energii fal. Przedtem jednak należy dokonać oceny energetycznego potencjału fal wzdłuż tych falochronów. Celem niniejszej pracy jest ocena czasowego rozkładu teoretycznego energetycznego potencjału fal wzdłuż falochronów w porcie morskim w Kłajpedzie, z uwzględnieniem różnych kierunków propagacji fal.

2. Metodyka badania

2.1. Rozkład wysokości fal

Instrumentalne pomiary wysokości fal wzdłuż litewskiego wybrzeża Morza Bałtyckiego są nieliczne i dlatego nie można ich wykorzystać do analizy energetycznego potencjału fal. Z drugiej strony dostępne ciągłe wieloletnie obserwacje fal przeprowadzane w nabrzeżnym obserwatorium w Kłajpedzie umożliwiają analizę statystyczną, którą następnie można wykorzystać do osiągnięcia celu tej pracy.

Do analizy wykorzystano dane z lat 1970–2010 z nabrzeżnego obserwatorium w Kłajpedzie. Zastosowano konwencjonalną metodę obliczania rozkładu zmiennych rocznych z wykorzystaniem danych wieloletnich. Głównym celem tej metody było określenie rozkładu średnich miesięcznych i średnich sezonowych wysokości fal w wybranych latach obliczeniowych. W tym przypadku wybranymi latami obliczeniowymi były lata o wysokiej intensywności (prawdopodobieństwo 5%), średniej intensywności (prawdopodobieństwo 50%) i niskiej intensywności (prawdopodobieństwo 95%) falowania. Szczegółowe wyniki tej metody opublikowano w [5]. W niniejszej pracy główne wyniki przedstawiono w tab. 1.

2.2. Ocena energii fal

Dwie cechy danych ze wzrokowych obserwacji fal pozwalają na wykorzystanie widma falowego do oceny strumienia energii fal. Wzrokowo zmierzona wysokość fali jest zbieżna z wysokością fali znacznej [9], natomiast wzrokowo zmierzony okres fali odpowiada okresowi szczytowemu [10]. W konsekwencji równanie do dokonania oceny strumienia energii fali jest następujące:

$$P = \rho g \int_0^{\infty} S(f) c_g(f) df \quad (1)$$

ρ – masa właściwa wody (słonej wody Morza Bałtyckiego, $\rho = 1010 \text{ kg/m}^3$ [11])

g – stała grawitacji [m/s^2]

$c_g(f)$ – prędkość grupowa fal [m/s]

$S(f)$ – gęstość widmowa [m^2/Hz]

Gęstość widmową oblicza się za pomocą sparametryzowanego widma fal JONSWAP (ang. *joint North Sea wave project*), zmodyfikowanego dla Morza Bałtyckiego [12]:

$$S(f) = K_m \frac{H_s^2 T_p}{(T_p f)^5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f_p}{f} \right)^4 \right] \gamma^\beta \quad (2)$$

K_m – empirycznie określona stała (0,1786)

H_s – wysokość fali znacznej [m]

T_p – okres szczytowy [s]

f_p – częstotliwość szczytowa [Hz]

f – częstotliwość fal [Hz]

γ – współczynnik szczytowego wypiętrzenia (4,0)

$$\beta = \exp \left(-\frac{(f - f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right) \quad (3)$$

$\sigma = 0,07$ dla $f \leq f_p$, $\sigma = 0,09$ dla $f > f_p$
 σ – parametr kształtu

2.3. Modelowanie numeryczne

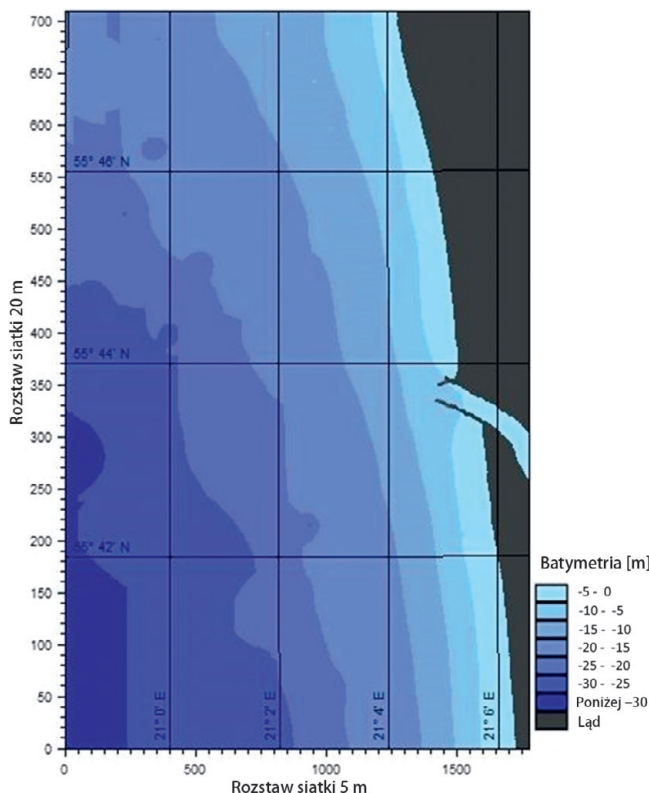
W niniejszej pracy użyto numerycznego modelu fal morskich MIKE 21 NSW. Wybrano ten model, ponieważ uwzględnia on skutki refrakcji i rozpraszania energii z powodu tarcia dna. Ponieważ przybrzeżna batymetria badanego miejsca jest dość regularna, nie ma wysp, a zatem efekty dyfrakcyjne można pominąć, dzięki czemu zastosowanie bardziej wyrafinowanych modeli propagacji fal przy brzegu nie jest konieczne. Wysokości fal przyjęte jako warunki przybrzeżne (głębokość 20 m), których propagację do falochronów w porcie morskim w Kłajpedzie (głębokość 8,5 m) modelowano, to średnie wysokości fal zmierzone w latach obliczeniowych (tab. 1). W badanym zakresie wysokości fal mieści się 69,9% średnich wysokości miesięcznych z lat 1970–2010, więc badanie to odwzwierciedla warunki panujące wzdłuż falochronów portu morskiego w Kłajpedzie przez większą część roku.

Lata obliczeniowe	Średnia wysokość fal [m]															Roczna	
	Miesięczna											Sezonowa					
	Marzec	Kwiecień	Maj	Czerwiec	Lipiec	Sierpień	Wrzesień	Październik	Listopad	Grudzień	Styczeń	Luty	Wiosna	Lato	Jesień		Zima
Rok wysokiej intensywności falowania (1973/1974)	0,68	0,85	0,58	0,74	0,68	0,81	1,09	1,00	1,66	1,24	0,82	0,57	0,70	0,74	1,25	0,88	0,89
Rok średniej intensywności falowania (1994/1995)	0,83	0,40	0,45	0,77	0,36	0,51	0,62	0,69	0,85	0,77	0,71	1,07	0,56	0,55	0,72	0,85	0,67
Rok niskiej intensywności falowania (1976/1977)	0,68	0,62	0,41	0,58	0,48	0,38	0,58	0,52	0,57	0,60	0,46	0,49	0,57	0,48	0,56	0,52	0,53

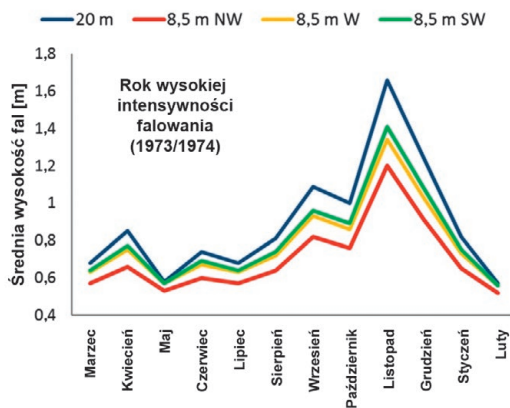
Tab. 1. Średnie wysokości fal w latach obliczeniowych na wybrzeżu w Kłajpedzie

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 77–82. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 2. Batymetria Morza Bałtyckiego wzdłuż wybrzeża Klaipėdy



Rys. 3. Zmienność średnich miesięcznych wysokości fal w roku o dużej intensywności falowania na morzu i wzdłuż falochronów w porcie w Klaipėdzie

Do badania wybrano trzy kierunki propagacji fal: północno-zachodni, zachodni i południowo-zachodni. Kierunki te wybrano, ponieważ więcej z nich wiatry mają najdłuższe rozbiegi na wybrzeżu litewskim, co wzbudza najwyższe, a co za tym idzie, najbardziej energetyczne fale morskie. Ponadto, jak widać na rys. 2, gdzie przedstawiono batymetrię obszaru modelu, falochrony w porcie morskim w Klaipėdzie są narażone na uderzenia fal zachodnich. Aby zweryfikować wydajność modelu, użyto pomiarów instrumentalnych z 4 dni, wykonanych w punkcie obserwacyjnym

na wybrzeżu Klaipėdy (N 55°43' 55", E 21°4'20", głębokość 10 m). Jako warunki przybrzeżne przyjęto dane z Europejskiego Centrum Prognoz Średnioterminowych ERA Interim (N 55°50' E 20°25', głębokość 50 m) [13] z tego samego okresu, a zbieżność znaczących wysokości fal modelowanych i zmierzonych instrumentalnie oszacowano, obliczając błąd średniokwadratowy, obciążenie i współczynnik korelacji. Wartości tego ostatniego wynosiły (odpowiednio) 0,26, 0,11 i 0,71.

3. Wyniki

Badanie wyników numerycznego modelowania propagacji fal ku falochronom w porcie morskim w Klaipėdzie wykazało, że spadki wysokości fal dla poszczególnych kierunków propagacji fal wzdłuż północnych i południowych falochronów portu morskiego w Klaipėdzie są różne. Z tego względu w artykule tym przedstawiono wyniki, przy których spadki te są najniższe: wzdłuż falochronu północnego przy propagacji fal z północnego zachodu (NW) i zachodu (W) oraz wzdłuż falochronu południowego przy propagacji z południowego zachodu (SW). Wyniki spadku wysokości fal w roku o wysokiej intensywności z uwzględnieniem tych trzech kierunków propagacji fal przedstawiono na rys. 3.

Na rys. 3 wyraźnie widać, że tempo spadku wysokości fal zależy od kierunku propagacji i wysokości początkowej. Choć spadki te przy propagacji fal z kierunków SW i W są dość podobne, przy propagacji z NW mogą być nawet dwa razy większe. Na przykład wyższe fale (1,24 m) docierają do falochronów, tracąc 0,16 m przy propagacji z SW, 0,21 m z W i 0,33 m z NW. Fale niższe (0,68 m) tracą odpowiednio 0,04 m, 0,05 m i 0,11 m.

Sezonowe zmiany wysokości fal na litewskim wybrzeżu Morza Bałtyckiego szczególnie wyraźnie widać na rys. 3. Średnie wysokości fal w okresie zimowym są generalnie wyższe niż latem. Nie można tego jednak przyjąć za regułę, zwłaszcza w kontekście obecnej zmiany klimatu. W ostatnich dziesięcioleciach najwyższe roczne wysokości fal i prędkości wiatru w nabrzeżnym punkcie obserwacyjnym w Klaipėdzie były wielokrotnie rejestrowane w sezonie letnim. W ten sposób powiązano ze sobą ograniczenia metody zastosowanej w tej pracy do wyznaczenia średniej wysokości fal w latach obliczeniowych z wykorzystaniem rozkładów średnich wysokości fal w konkretnym roku. Zależność tę pokazano na rys. 4.

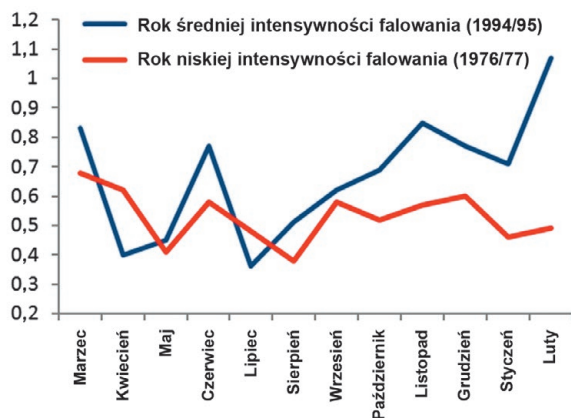
Z jednej strony występuje niespodziewanie wysoki wzrost w czerwcu w roku o średniej intensywności falowania, co wskazuje na występowanie wyższych i silniejszych fal w cieplejszym sezonie i możliwość generowania energii elektrycznej w tym okresie. Z drugiej strony przez cały rok o niskiej intensywności występuje tendencja do niskich fal, co oznacza niewielką możliwość generowania energii elektrycznej przez pełny okres roczny. Tendencja do spadku wysokości fal wzdłuż falochronów portu morskiego w Klaipėdzie w latach o średniej i niskiej intensywności falowania jest podobna do tendencji pokazanej na rys. 3.

Wpływ spadku wysokości fal po drodze z morza do falochronów portu w Klaipėdzie na strumień energii fal w roku o wysokiej intensywności falowania pokazano na rys. 5.

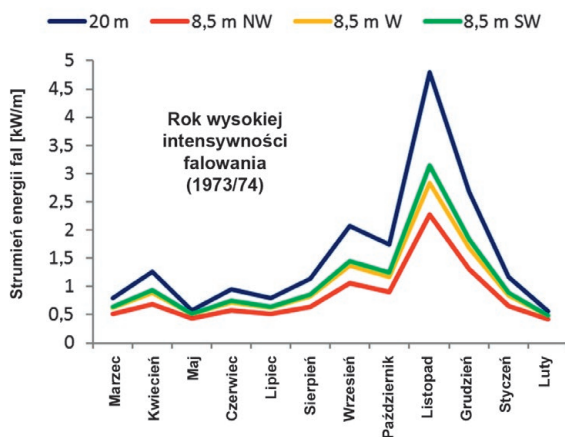
Gdy wyższe fale (1,24 m) docierają do falochronów, tracą 31% strumienia energii przy propagacji z SW, 37% z W, a z NW nawet 51%. Fale niższe (0,68 m) tracą odpowiednio 20%, 23% i 36%. W związku z tym w pierwszej kolejności nieznaczny spadek wysokości fal powoduje znaczną stratę strumienia energii fal wzdłuż falochronów.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 77–82. When referring to the article please refer to the original text.

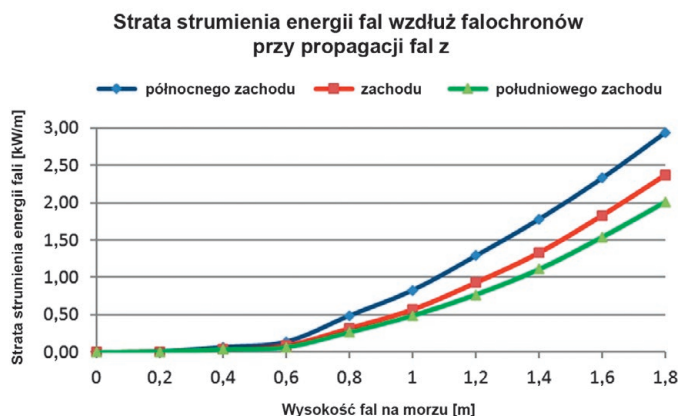
PL



Rys. 4. Zmienność średnich miesięcznych wysokości fal morskich w latach o średniej i niskiej intensywności falowania



Rys. 5. Zmienność strumienia energii fal w roku o wysokiej intensywności falowania na morzu i wzdłuż falochronów w Kłajpedzie



Rys. 6. Tempo straty strumienia energii wzdłuż falochronów w porcie morskim w Kłajpedzie

Tempo straty strumienia energii wzdłuż falochronów w porcie morskim w Kłajpedzie przedstawiono na rys. 6. Na rys. 6 dobrze odzwierciedlono zależność straty strumienia energii fal wzdłuż

falochronów od wysokości fal i kierunku ich propagacji. Do pobieżnej analizy wybrano falę o wysokości 1,6 m. Na morzu strumień energii tej fali wynosi 4,46 kW/m. Docierając do falochronów, fala o tej

wysokości traci 1,54 kW/m przy propagacji z południowego zachodu, 1,83 kW/m z zachodu i 2,33 kW/m z północnego zachodu. Gdy dociera do falochronu przy propagacji z najkorzystniejszego kierunku, traci 34,5% strumienia energii, a kiedy zmierza z najmniej korzystnego, traci kolejne 17,5%. Morze Bałtyckie nie ma dużego potencjału energii fal, zatem straty te są dość znaczne. Z drugiej strony każdy zamiar budowy konwertera energii fal w miejscu innym niż na pełnym morzu będzie nieuchronnie narażony na stratę strumienia energii fal. Mając na uwadze powyższe informacje, a także niedawno zrealizowane instalacje OWC, odpowiednie technologie i odpowiedni konwerter energii fal można zastosować zarówno na północnym, jak i na południowym falochronie portu morskiego w Kłajpedzie.

Na rys. 7 przedstawiono teoretyczny energetyczny potencjał fal wzdłuż południowego falochronu portu morskiego w Kłajpedzie. Fale w tym przypadku zmierzają z najkorzystniejszego badanego kierunku – południowego zachodu.

Do tej pory, pomimo zmian klimatycznych, roczna zmienność wysokości fal na Morzu Bałtyckim wzdłuż wybrzeża Kłajpedy doprowadziła do podziału potencjału energetycznego fal na dwie składowe: wiosenno-letnią i jesienno-zimową. Według tab. 1 we wszystkich latach obliczeniowych sezonowa średnia wysokość fal w zimie jest zawsze wyższa niż latem. Jeśli nasze teoretyczne założenia co do falowego potencjału energetycznego oparto by na rys. 7, można by wówczas stwierdzić, że potencjał ten w sezonie jesienno-zimowym może być nawet dwukrotnie wyższy niż w sezonie wiosenno-letnim. Średni falowy strumień energii wzdłuż falochronów może latem wynosić do 0,35 kW/m w latach o niskiej intensywności falowania, 0,46 kW/m w latach o intensywności średniej i 0,75 kW/m w latach o intensywności wysokiej. W zimie wartości te mogą wzrosnąć, odpowiednio, do 0,41 kW/m, 0,93 kW/m i 1,01 kW/m.

4. Wnioski

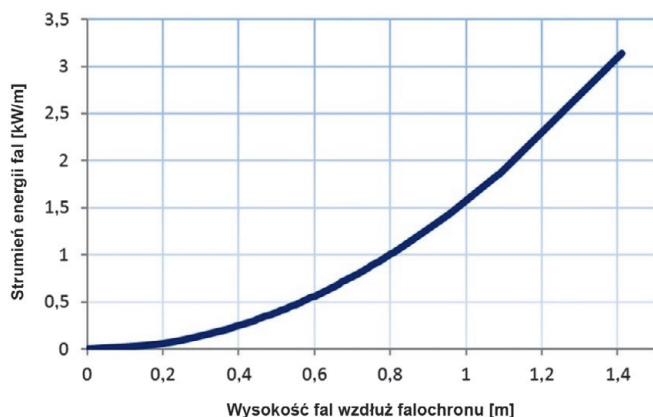
Falochrony portu morskiego w Kłajpedzie służą do ochrony portu przed szkodliwym oddziaływaniem fal Morza Bałtyckiego. Są narażone na działanie najsilniejszych fal z kierunku zachodniego i w konsekwencji mogą być wykorzystywane do generowania elektryczności w elektrowni OWC lub innej elektrowni fal morskich.

Badanie to wykazało, że najczęstsze, niższe fale w Morzu Bałtyckim wzdłuż wybrzeża Kłajpedy po drodze z morza do falochronów w najlepszym przypadku (wzdłuż południowego falochronu przy propagacji z południowego zachodu) tracą zaledwie około 20% energii. Zmiana kierunku fal i nasilenie falowania mają znaczny wpływ na straty strumienia energii fal, które mogą wzrosnąć do 50%.

Strumień energii fal wzdłuż falochronów w porcie morskim w Kłajpedzie wykazuje stosunkowo wysoką zmienność sezonową. W chłodniejszym sezonie wartości te mogą być kilkakrotnie wyższe niż w cieplejszym. Szacunki teoretycznego strumienia energii fal w tej pracy wahają się od 0,30 kW/m

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 77–82. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 7. Teoretyczny potencjał energetyczny fal wzdłuż południowego falochronu portu morskiego w Klaipėdzie przy propagacji fal z kierunku południowego

latem w roku o niskiej intensywności przy propagacji fal z północnego zachodu do 1,87 kW/m jesienią roku o wysokiej intensywności przy propagacji z południowego zachodu.

Podziękowanie

Autorzy dziękują Litewskiemu Działowi EPA ds. Badań Morskich za dostarczenie danych z hydrometeorologicznej stacji nabrzeżnej w Klaipėdzie.

Bibliografia

1. Torre-Enciso Y. i in., Mutriku wave power plant: from the thinking out to the reality [Elektrownia falowa Mutriku: od pomysłu do rzeczywistości], in Proc. EWTEC '09, Southampton 2011.
2. Boccotti P., Comparison between a U-OWC and a conventional OWC [Porównanie między U-OWC a konwencjonalnym OWC], *Ocean Eng.* 2007, Vol. 37, s. 799–805.
3. Boccotti P., Design a breakwater for conversion of wave energy into electrical energy [Projekt falochronu do konwersji energii falowej w elektryczną], *Ocean Eng.* 2012, Vol. 51, s. 106–118.
4. Arena F. i in., A small scale field experiment on a U-OWC (REWEC3) [Eksperyment terenowy na małą skalę z U-OWC (REWEC3)], Proc. EWTEC '13, Aalborg 2013.
5. Kasiulis E., Punys P., Kofoed J.P., Assessment of theoretical near-shore wave power potential along the Lithuanian coast of the Baltic Sea [Ocena teoretycznego potencjału energetycznego fal przybrzeżnych wzdłuż litewskiego wybrzeża Morza Bałtyckiego], *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2015, Vol. 41, s. 134–142.
6. Falcão A.F.O., Henriques J.C.C., Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review [Przegląd przekształtników energii falowej z oscylującym słupem wody i turbinami powietrznymi], *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2016, Vol. 85, s. 1391–1424.
7. Vicinanza D. i in., Innovative rubble mound breakwaters for overtopping wave energy conversion [Nowatorskie falochrony narzutowe OBREC], *Coast. Eng.* 2014, Vol. 88, s. 154–170.
8. Contestabile P. i in., Economic assessment of overtopping breakwater (OBREC): a case study in Western Australia [Ekonomiczna ocena falochronu narzutowego (OBREC): studium przypadku w Australii Zachodniej], *Sustainability-Basel* 2017, Vol. 9, s. 1–28.
9. Young I.R., Wind Generated Ocean Waves [Fale morskie generowane przez wiatr], ed. by Bhattacharyya R., McCormick M.E., 1st ed., Oxford, Elsevier, 1999.
10. Hogben N., Dacunha N.M., Oliver G.F., Global Wave Statistics [Globalna statystyka fal], London, British Maritime Technology, 1986.
11. Lepparanta M., Myrberg K., Physical Oceanography of the Baltic Sea [Oceanografia fizyczna Morza Bałtyckiego], Chichester, Springer, 2009.
12. Feistel R., Nausch G., Wasmund N., State and Evolution of the Baltic Sea, 1952–2005. A Detailed 50-year Survey of Meteorology and Climate, Physics, Chemistry, Biology, and Maritime Environment [Stan i ewolucja Morza Bałtyckiego, 1952–2005. Szczegółowy 50-letni przegląd meteorologii i klimatu, właściwości fizycznych, chemii, biologii i środowiska morskiego], New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2008.
13. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 2017 [Europejskie Centrum Średnioterminowych Prognoz Pogody] [online], www.ecmwf.int.

Egidijus Kasiulis

dr

e-mail: egidijus.kasiulis@asu.lt

Uniwersytet Aleksandras Stulginskis

Dyplom w dziedzinie inżynierii ochrony środowiska uzyskał na Uniwersytecie Aleksandras Stulginskis na Litwie (2015). Od 2016 roku pracuje jako asystent w Instytucie Inżynierii Zasobów Wodnych. Jego główne zainteresowania badawcze to konwersja energii konwencjonalnej i hydrokinetycznej (fale oceaniczne, przepływ rzeki) i jej wpływ na środowisko.

Linās Šilinis

mgr

e-mail: linas.silinis@stud.asu.lt

Uniwersytet Aleksandras Stulginskis

Dyplom w dziedzinie inżynierii wodnej uzyskał na Uniwersytecie Aleksandras Stulginskis na Litwie (2015). Od 2015 roku jest doktorantem w Instytucie Inżynierii Zasobów Wodnych. Jego główne zainteresowania badawcze to zasoby energii hydrokinetycznej rzek, krótkotrwałe zmiany przepływu i ich wpływ na środowisko.