

Zagrożenie zalania Mierzei Messyńskiej wodami Zatoki Gdańskiej

Mgr Magdalena Stella

Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku

Naturalną ochronę brzegów morskich, a także przybrzeżnych obszarów depresyjnych stanowią wydmy. Ulegają one stałym przeobrażeniom w wyniku abrazji, działalności człowieka oraz deflacji eolicznej. Zbadanie procesów niszczenia wydmy sprawia duże trudności, ponieważ wiele czynników wywołuje destabilizację linii brzegowej i wydmy. Są to m.in. ukształtowanie całego wybrzeża oraz czynniki dynamiczne i statyczne strefy brzegowej [22]. Wśród czynników dynamicznych najistotniejszą rolę odgrywa falowanie, w szczególności występujące jednocześnie ze sztormowym wzrostem poziomu morza (zwane wezbraniem sztormowym). Należy podkreślić, że znaczenie ma tu nie sam

fakt wystąpienia wysokich fal i wezbrania sztormowego, ale również czas trwania warunków sztormowych [10]. Wymienione hydrodynamiczne i hydrologiczne oddziaływania sztormowe wraz z silnym wiatrem powodują dewastację wydmy, skutkując wielkoskalowymi zniszczeniami morfologicznymi, krajobrazu, ptasich siedlisk i żerowisk oraz roślinności, jak również infrastruktury nadbrzeżnej [19].

Zwiększenie erozyjnego zagrożenia strefy brzegowej w Polsce spowodowane jest prognozowanymi zmianami klimatycznymi, związanymi przede wszystkim z globalnym ociepleniem, skutkującym m.in. wzrostem poziomu wód w Bałtyku oraz in-

tensyfikacją oddziaływań sztormowych. W ostatnim stuleciu, jako efekt podnoszenia się średniego poziomu morza, a także występowania ze znaczną częstotliwością wezbrań sztormowych, zaobserwowano cofanie się polskiej linii brzegowej średnio o 0,12 m na rok [16].

Artykuł ten poświęcony jest zagrożeniu rozmywania i niszczenia wydmy położonych na mierzei oddzielającej przybrzeżne jezioro od wód Zatoki Gdańskiej, tj. Mierzei Messyńskiej (rys. 1). Mierzeja ta, której większość obszaru pokrywają wydmy, narażona jest na abrazję oraz powodzie sztormowe ze względu na jej małą odporność wynikającą z ukształtowania (niska i wąska). W ramach analizy możliwości zalania plaży bądź przelania się wód do jeziora nad niższymi odcinkami tego wybrzeża, zbadano wpływ występowania wezbrań sztormowych w czasie obecnym oraz w przyszłości, z uwzględnieniem prognoz wzrostu poziomu morza za 100 lat. Uwzględniono ekstremalne stany morza w zależności od częstości ich występowania oraz podjęto próbę odpowiedzi na pytanie czy istnieje możliwość przerwania mierzei. W tym celu przeprowadzono analizę zmian średniego poziomu morza w badanym obszarze w następnym stuleciu, a także ich wpływ na wysokość wezbrania sztormowego, w tym skali zalewania i przelewania się wód przez mierzeję. Istotnym elementem analizy było uwzględnienie niepewności założonych prognoz. W studium wykorzystano Numeryczny Model Terenu (NMT), zwany także Cyfrowym Modelem Wysokościowym DEM (*Digital Elevation Model*), przedstawiający topografię badanego terenu.

WZROST POZIOMU WÓD

Globalne ocieplenie wiąże się ze wzrostem temperatury powietrza, co przyczynia się do zwiększenia częstotliwości opadów, topnienia lodowców, zmian cyrkulacji ośrodków barycznych, jak również wzrostu poziomu wód w oceanach. Wszystkie te czynniki powodują również podniesienie się średniego poziomu wody w mniejszych akwenach, zwłaszcza sąsiadujących z oceanami. W wielu raportach wykazano dodatni trend w zmianach średniego poziomu morza wywołany różnorodnymi procesami. W trakcie estymacji zmian rozważa się głównie zmiany objętościowe wszechoceanu, a także te, które wpływają na kształt i rozmiar zbiorników. W regionalnej skali duże znaczenie mają również zmiany w cyrkulacji oceanicznej i ośrodków barycznych [3], wpływ stratyfikacji i cyrkulacji wód, efekty grawitacyjne czy też napływ wód słodkich [8].

Największy wpływ na długookresowy wzrost średniego poziomu morza w Bałtyku mają czynniki regionalne, takie jak zmiany w lokalnych układach pól ciśnienia atmosferycznego w Europie i nad północnym Atlantykiem [9]. Zalicza się do nich również zmiany izostatyczne, czyli skutki podnoszenia się Płyty Skandynawskiej, w wyniku czego na południowym obszarze Morza Bałtyckiego można zaobserwować podnoszenie się średniego stanu wód o około 1,7 mm na rok [16]. Analiza sezonowa poziomów Bałtyku, przeprowadzona w latach 1960-1990, wykazała występowanie większych wartości średniego poziomu morza zimą, natomiast niższych wiosną i latem [17].

Poza archiwalnymi zmianami poziomów morza ciekawość badawczą budzą możliwe zmiany średniego poziomu wód Morza Bałtyckiego w przyszłości. W opracowaniu [17] założono

trzy scenariusze wzrostu poziomu wód Bałtyku w 2100 roku. Były to wartości wyznaczone jako średnie z różnych modeli. Pierwsza prognoza to wzrost poziomu o 9 cm, kolejna o 48 cm, natomiast najgorszy założony scenariusz przewiduje wzrost o 88 cm. W opracowaniu [22] wykorzystano trzy scenariusze zwiększenia poziomu morza za 100 lat, skupiające się na obszarze południowego wybrzeża Bałtyku. Pierwszym, najłagodniejszym założeniem jest wzrost o 30 cm. Kolejne, uznawane za najbardziej prawdopodobne, jest podniesienie poziomu wód o 60 cm, natomiast w trzecim scenariuszu zakłada się stan morza w następnym stuleciu wyższy o 100 cm. W pracy przyjęto wzrost poziomu morza według dwóch pierwszych scenariuszy z pracy [22], tj. 30 i 60 cm.

WEZBRANIA SZTORMOWE

Poważnym zagrożeniem dla południowych wybrzeży Bałtyku są wezbrania sztormowe, uznawane za jedno z najgroźniejszych zjawisk oddziałujących na brzeg morski. Efektem wezbrań sztormowych jest erozja i cofanie się linii brzegowej oraz zniszczenia budowli brzegowych i portowych. Jednym z rezultatów występowania sztormów są również zaburzenia stratyfikacji termicznej i zasolenia wody morskiej [13].

Dla polskich wybrzeży morza Bałtyckiego wezbraniem (spiętrzeniem) sztormowym określa się każde zjawisko hydrologiczne, podczas którego poziom morza wyniesie bądź przekroczy wysokość średniego poziomu wody o 70 cm [14]. Konwencjonalnie średnim poziomem wody był stan równy 500 cm, obecnie zaś uważa się, że średni stan wody w morzu na polskim wybrzeżu Bałtyku powinien być przyjmowany jako wyższa wartość, rzędu 504 ÷ 505 cm. Posługując się tradycyjnym kryterium (500 cm jako stan średni z wielolecia), wyznaczono 73 wezbrania sztormowe w latach 1976-2000 [18].

Na wodach Zatoki Gdańskiej wezbrania sztormowe związane są z silnymi wiatrami towarzyszącymi przejściu układów niżowych. Znacznym zagrożeniem są szczególnie wiatry z sektora północnego, które mogą wywołać spiętrzenia trwające od kilku do kilkudziesięciu godzin [15].

Ważnym parametrem uwzględnianym podczas badań zagrożenia strefy brzegowej jest także czas trwania wezbrań sztormowych. Autorka pracy [18] zaobserwowała najczęściej występujące spiętrzenia trwające 21 ÷ 30 h i 31 ÷ 40 h. W 12% przypadków w okresie 1976-2000 r. wezbrania trwały od 41 do 50 h, w 10,9% były to maksymalne poziomy morza trwające 51 i 70 h, dodatkowo 4 razy odnotowano spiętrzenia o czasie trwania ponad 80 h.

Według autora studium [15] w latach 1987-2006 liczba wezbrań sztormowych na wodach Zatoki Gdańskiej zwiększała się z roku na rok. Odnotowano prawie dwukrotny wzrost częstości ich występowania w stosunku do wcześniejszych 40 lat. Z największą częstością zarejestrowano stany wody od 570 do 590 cm oraz zaobserwowano wydłużenie sezonu sztormowego z 6 do 8 miesięcy [15]. Największe nasilenie spiętrzeń sztormowych miało miejsce w okresie od listopada do stycznia, przy czym ogólnie sezon sztormowy trwał od września do kwietnia. W analizowanym dwudziestolecu bardzo wysokie spiętrzenia sztormowe (charakteryzujące się stanem wody powyżej 600 cm) wystąpiły 15 razy z częstością średnio co 16 miesięcy.

MIERZEJA MESSYŃSKA

Mierzeja Messyńska znajduje się na kilometrażu polskiego wybrzeża (57,5 KM ÷ 59,4 KM) i oddziela jezioro Ptasi Raj od wód Zatoki Gdańskiej (rys. 1). Nazwa mierzei pochodzi od żaglowca Messina, który rozbił się w tym rejonie w 1867 roku. Obecnie powierzchnia badanego obszaru wynosi 175288 m², zaś szerokość waha się od 67 m do 244 m.

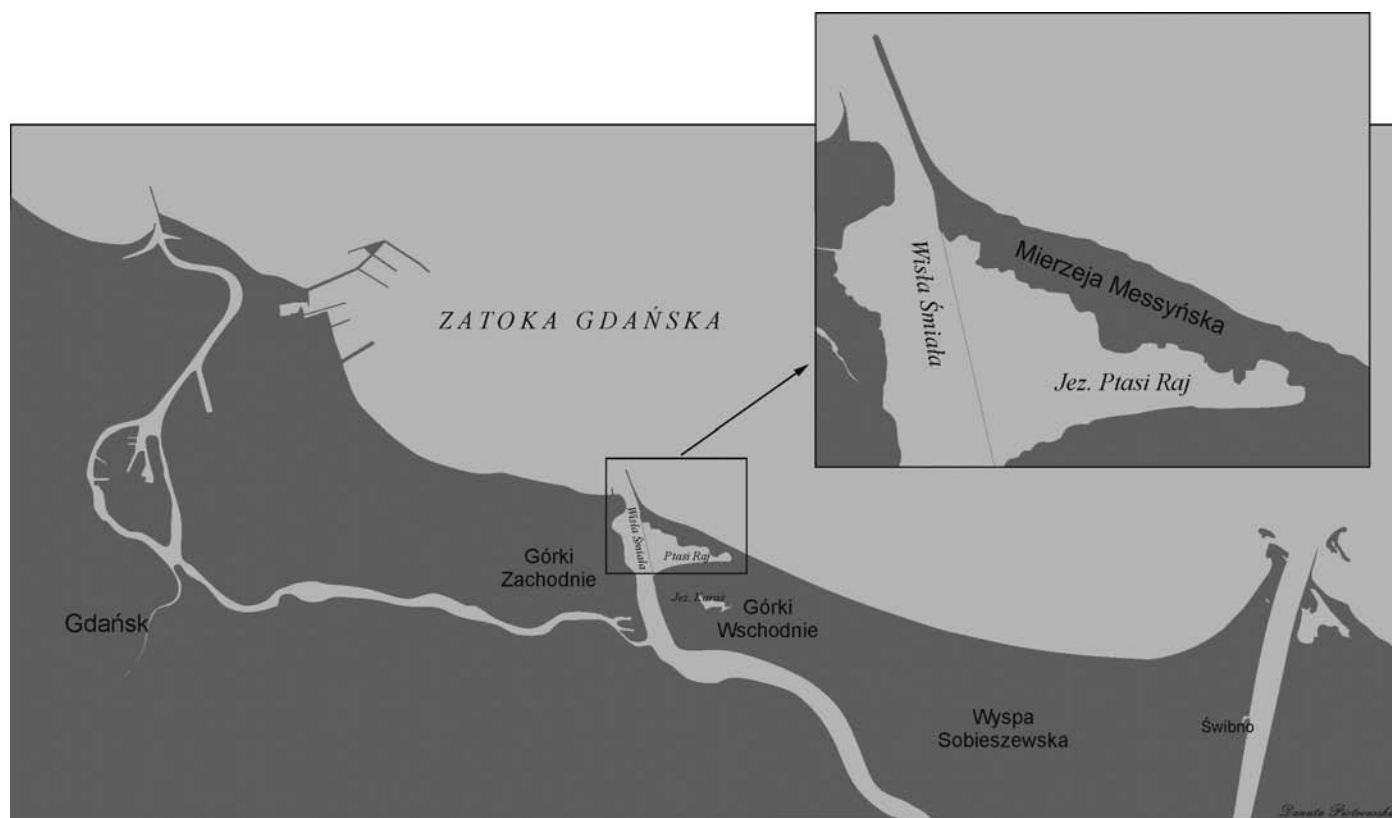
W 1840 r. powstanie zatoru lodowego na Wiśle i tym samym podniesienie poziomu jej wód o 6 m spowodowało zalanie i rozpołowienie miejscowości Gdańsk Górki. Powstało w ten sposób nowe ujście Wisły i w strefie przybrzeżnej morza zaczęły odkładać się duże ilości piaszczystego rumowiska rzeczne. Mierzeja Messyńska uformowała się podczas maksymalnej akumulacji rumowiska i materiału dennego nanoszonego przez rzekę na przybrzeżne płycizny [11, 12]. Po wykonaniu przekopu w Świbnie ustało dostarczanie materiału do stożka napływowego. Powolne rozmywanie stożka przez fale i prądy przybrzeżne skutkowało cofaniem się linii brzegowej w rejonie ujścia Wisły Śmiałej [1]. Wydmy powstałe na mierzei nie są znacznie rozbudowane. Mała wysokość mierzei sprzyja częstemu zalewaniu i rozmywaniu wydmy przez fale [11]. Podczas każdego silnego sztormu wydmy Mierzei Messyńskiej ulegają rozmyciu przez wody morskie przelewające się do jeziora Ptasi Raj. Nadwodna część mierzei w wyniku zalewania i erozji przesuwa się w kierunku południowym. Proces ten obrazuje powolne lecz konsekwentne powracanie brzegu do sytuacji sprzed 1840 roku, tzn. stopniowy zanik mierzei i jeziora. Na zjawisko to mają pewien wpływ czynniki, takie jak falochrony Portu Północnego i postępująca, akumulacyjna przebudowa brzegu w rejonie przekopu Wisły, które nie istniały w momencie kształtowania się stożka

usypowego w ujściu Wisły Śmiałej [2]. Nie bez znaczenia jest fakt, że w latach 1960-1980 w ujściu Wisły Śmiałej wykonywane były prace pogłębiarskie, co miało wpływ na wzmożoną abrazję brzegu [11].

Mierzeja Messyńska znajduje się na obszarze ornitologicznego rezerwatu „Ptasi Raj”, który jest fragmentem Obszaru Chronionego Krajobrazu Wyspy Sobieszewskiej. W Internecie [5] można przeczytać, że ta część wybrzeża należy do „ważnego przymorskiego ciągu zieleni Gdańska oraz regionalnego systemu przyrodniczego strefy nadmorskiej rejonu Zatoki Gdańskiej”. Rezerwat należy również do Obszarów Specjalnej Ochrony NATURA 2000. Według Ustawy z dnia 28 marca 2003 r. o ustanowieniu programu wieloletniego „Program ochrony brzegów morskich” dla odcinków brzegu Górek Wschodnich, ujścia Wisły Śmiałej oraz Górek Zachodnich (KM 56,9 ÷ 60,4) w załączniku do ustawy „Planowane szczegółowe nakłady na realizację zadań programu w latach 2004-2023” przewidziano sztuczne zasilanie oraz modernizację i budowę umocnień brzegowych.

W analizowanym odcinku brzegu Zatoki Gdańskiej największe znaczenie ma falowanie wywołane wiatrami z kierunków W – N – E. Przez prawie połowę dni w roku więcej słabsze wiatry o prędkości 1 ÷ 7 m/s, rzadziej występują wiatry 8 ÷ 9 m/s, natomiast silniejsze, przekraczające prędkość 10 m/s występują przez około 17 dni w roku. Z taką samą częstotliwością pojawia się falowanie wiatrowe odpowiadające poszczególnym parametrom wiatru. Bardzo istotną rolę odgrywają prądy pochodzenia falowego. W strefie załamania fal, prąd wzdłużbrzegowy może osiągnąć prędkość większą niż 2 m/s [1].

Dominującą rolę pełni wzdłużbrzegowy transport osadów w kierunku wschodnim, przy czym najwięcej materiału przemieszcza się w pasie o głębokości 0 ÷ 2 m [1]. W świetle opra-



Rys. 1. Położenie Mierzei Messyńskiej

cowania [11] falowanie z sektora NW-N po budowie Portu Północnego niekorzystnie oddziałuje na brzegi Mierzei Messyńskiej (zapewne ze względu na tzw. efekt zaprądowny), podczas gdy falowanie z sektora NNE-NE stanowi dla Mierzei Messyńskiej czynnik zdecydowanie niszczący.

NUMERYCZNY MODEL TERENU (DEM)

W pierwszym etapie wykonania analizy zagrożenia zalaniem plaży bądź przelania się wód Zatoki Gdańskiej przez Mierzę Messyńską należało utworzyć Numeryczny Model Terenu (DEM). Model ten odgrywa istotną rolę w badaniach związanych z hydrologią oraz stanowi podstawę do wykonania dalszej analizy zagrożeń. W niniejszej pracy, do realizacji początkowego etapu, wykorzystano pakiet narzędzi ArcGIS firmy ESRI. Umożliwia on pracę na geograficznych systemach informacyjnych – GIS (*Geographical Information Systems*).

Do wykonania DEM wykorzystano dane wysokościowe uzyskane z Zakładu Oceanografii Fizycznej Uniwersytetu Gdańskiego. Dzięki tym danym możliwe było odzwierciedlenie z jak najwyższą dokładnością zmienności przestrzennej badanego rejonu, czyli uzyskanie jak najmniejszego błędu szacowanych wartości z punktów pomierzonych do komórek rastra.

Do odpowiedniego przedstawienia rzeczywistego ukształtowania mierzei zbudowano model opierający się na interpolacji danych pomiarowych. Dzięki temu punkty w postaci wektorowej, zawierające dane o wysokości zmierzonej, przetransformowano w warstwę rastrową zawierającą ciągle pola zmiennych. Operacja ta umożliwia zobrazowanie rozmieszczenia przestrzennego i uzyskanie ciągłej powierzchni obszaru [20]. Do wyznaczenia dokładnej linii brzegowej oddzielającej Mierzę Messyńską od wód Zatoki Gdańskiej zastosowano tzw. maskę, utworzoną za pomocą reklasyfikacji danych. Do utworzenia maski pozwalającej na wyznaczenie dokładnej linii oddzielającej mierzę od jeziora Ptasi Raj wykorzystano natomiast zdjęcie satelitarne uzyskane z Zakładu Oceanografii Fizycznej Uniwersytetu Gdańskiego. Następnie do „wymaskowanego” DEM, stosując wzór (1), obliczono błąd średniokwadratowy RMS , któ-

rym opisuje się średni błąd modelu na podstawie różnic pomiędzy wartościami zmierzonymi a wyliczonymi przy interpolacji [20]:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Obs_i - DEM_i)^2}{n}} \quad (1)$$

gdzie:

OBS_i – wartość rzeczywista w punkcie kontrolnym i ,

DEM_i – wartość z utworzonego modelu,

n – liczba punktów kontrolnych.

Liczbę punktów kontrolnych wyznaczono ze wzoru (2):

$$n = \frac{z^2 RMS^2}{2e^2} \quad (2)$$

w którym:

z – odchylenie standardowe,

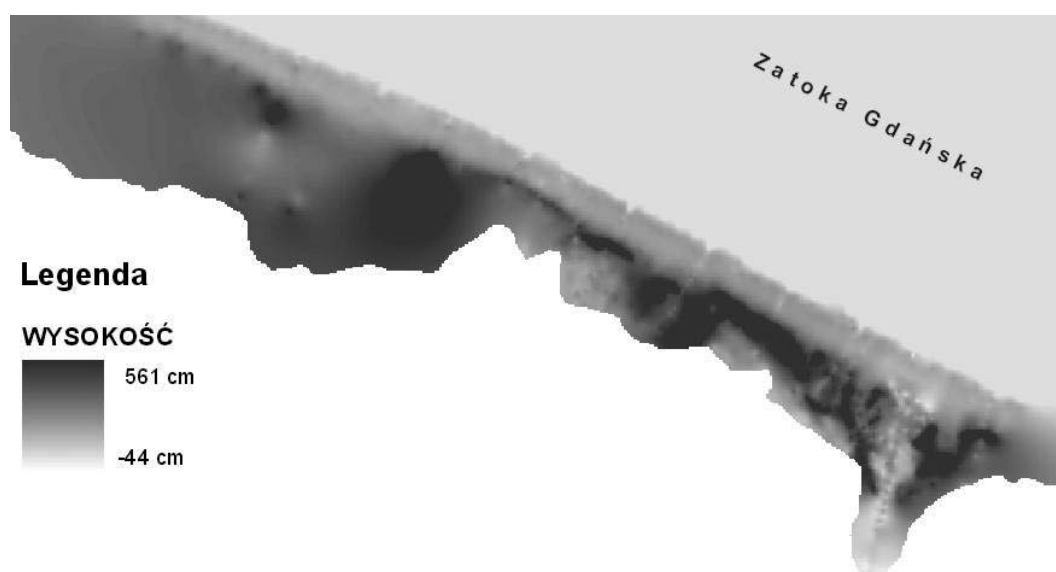
e – przedział ufności określenia RMS ,

RMS – estymacja błędu.

Po uruchomieniu modelu powstała ciągła mapa terenu (rys. 2).

UAKTUALNIENIE ARCHIWALNYCH MAKSYMÓW

W dalszych etapach analizy wykorzystano uzyskane z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej roczne maksymalne poziomy morza dla Gdańska z okresu 65 lat (1946-2011). Dla tych danych wykonano regresję liniową w zależności od czasu. Wykazują one wyraźny dodatni trend, z tego względu zmodyfikowano je, uwzględniając powstały trend, w celu pełniejszego uwiarygodnienia analizy zagrożeń w odniesieniu do chwili obecnej. Za pomocą równania regresji liniowej (3) obliczono zmianę wartości maksymalnych poziomów morza w ciągu 65 lat. Następnie obliczono różnicę między wartościami w 1946 i 2011 r. za pomocą wzoru (4). Końcowym etapem było, korzystając z wzoru (4), zastosowanie równania (5), które dodaje do archiwalnych maksimów rocznych korygujące wartości wynikające z długookresowego trendu podnoszenia się poziomu morza.



Rys. 2. DEM Mierzei Messyńskiej

$$y_i = -371,0141 + 0,4872i \quad (3)$$

gdzie:

y_i – wartość oczekiwana w i -tym roku,
 $i = 1946, 1947, \dots, 2011$.

$$r = y_{i=2011} - y_{i=1946} \quad (4)$$

gdzie:

r – wzrost wartości maksymalnych poziomów morza.

$$x_{2011-i} = p_{2011-i} + \frac{r}{65}i \quad (5)$$

gdzie:

$i = 0, 1, 2, 3, \dots, 65$,

x_{2011-i} – wartość maksymalnego poziomu morza obecnie w roku $2011 - i$,

p_{2011-i} – wartość zmierzonego maksymalnego poziomu morza w roku $2011 - i$.

Wynikiem wykonanych obliczeń na podstawie wzorów (3) i (4) jest wzrost maksymalnych poziomów morza, w okresie 65 lat, który wyniósł 32 cm. Po zastosowaniu wzoru (5) prze-liczono wartości maksymalnych poziomów morza na obecne i zaokrąglono do jedności.

PRAWDOPODOBIENSTWO WYSTĄPIENIA MAKSYMALNYCH POZIOMÓW MORZA

Wiele metod statystycznych skupia się na trendach wartości średnich, jednakże w badaniach naukowych często jest ważne wzięcie pod uwagę ekstremów z rozkładu danych. Mogą one pełnić ważną rolę w analizie, pomimo mniejszego prawdopodobieństwa ich wystąpienia [7]. Do obliczeń prawdopodobieństwa w teorii zdarzeń ekstremalnych stosuje się rozkład Uogólnionej Wartości Ekstremalnej (*Generalized Extreme Value* (GEV)).

Prawdopodobieństwo wystąpienia maksymalnych poziomów morza z częstością raz na 50 i 100 lat, obecnie i w 2112 r., obliczono przy wykorzystaniu pakietu narzędzi *Extremes Toolkit* (*Weather and Climate Applications of Extreme Value Statistics*). Pakiet ten umożliwia obliczenie prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń ekstremalnych, stosując, opierając się na klasach rozkładów max i min – stabilnych, teorię zdarzeń ekstremalnych [6].

Maksymalne poziomy morza dla Gdańska (po ich modyfikacji) wprowadzono do oprogramowania *Extreme Toolkit*. Po przeprowadzeniu aproksymacji danych rozkładem GEV

z rozkładu tego uzyskano wartości wysokości maksymalnych poziomów morza o częstościach wystąpienia wynoszących 50 i 100 lat (tabl. 1).

Do ekstremów obliczonych do sytuacji obecnej dodano wartości przewidywanego wzrostu poziomu morza za 100 lat (30 cm i 60 cm), uzyskując maksymalne stany morza w przyszłości (tabl. 2).

MODEL GIS ZALEWANIA BRZEGU

W strategicznej ocenie ryzyka zalaniem (zagrożenia powodziowego) bardzo często używa się metod opracowanych przy zastosowaniu GIS. Zapewnia to efektywną podstawę do integracji i analizy różnorodnych źródeł danych przyrodniczych. Uznaje się, że odpowiednimi sposobami zarządzania i rozwiązań badania stanu obszarów w przyszłości pod wpływem zmian klimatycznych są te oparte na systemach GIS. Dzięki nim możliwe jest wyraźnie zobrazowane i zrozumiałe dla odbiorców przedstawienie podstawowych założeń [4].

Zagrożenie zalaniem można badać na dwa sposoby: metodą deterministyczną lub metodą probabilistyczną. W pierwszej zakłada się brak błędu mapy i prognozy. Jej wynikiem jest mapa wykazująca jedynie fakt zalania bądź nie, terenu [21]. W drugiej z metod w toku analizy uwzględnia się ostateczny błąd wynikający z błędu modelu terenu oraz z błędu prognozy wzrostu poziomu morza. W ramach tej metody wyznacza się klasy terenów z wyznaczonym prawdopodobieństwem zalania przy użyciu zmiennych losowych standaryzowanych (*z-score*) [20].

W pracy wykonano analizę przy użyciu metody probabilistycznej. Przyjęto dwie prognozy wzrostu poziomu morza do 2112 roku – 30 i 60 cm oraz dwie częstości wystąpienia ekstremalnie wysokich poziomów morza, tj. 50 i 100 lat.

W metodzie probabilistycznej zakłada się (zob. [20]) rozkład normalny możliwych wartości komórek numerycznej mapy terenu, określony przez wartość średnią i odchylenie standardowe *Sp*. Ogólny błąd modelu, obliczany z wzoru (6), stanowi w tym przypadku odchylenie standardowe. Zawarty w nim jest błąd wywodzący się z szacowania wartości w trakcie interpolacji mapy terenu *RMS* oraz błąd prognozy wzrostu poziomu morza *S* (zob. wartości w tabl. 1).

Tabl. 1. Obliczone maksymalne stany morza w sytuacji obecnej

Częstość	Maksymalny poziom morza [cm]	Błąd prognozy <i>S</i> [cm]
Raz na 50 lat	648	±10
Raz na 100	653	±11,5

Tabl. 2. Maksymalne stany morza dla prognoz wzrostu poziomu wód za 100 lat

Częstość	Prognoza	
	0,3 m/100 lat	0,6 m/100 lat
Raz na 50 lat	678	708
Raz na 100 lat	683	713

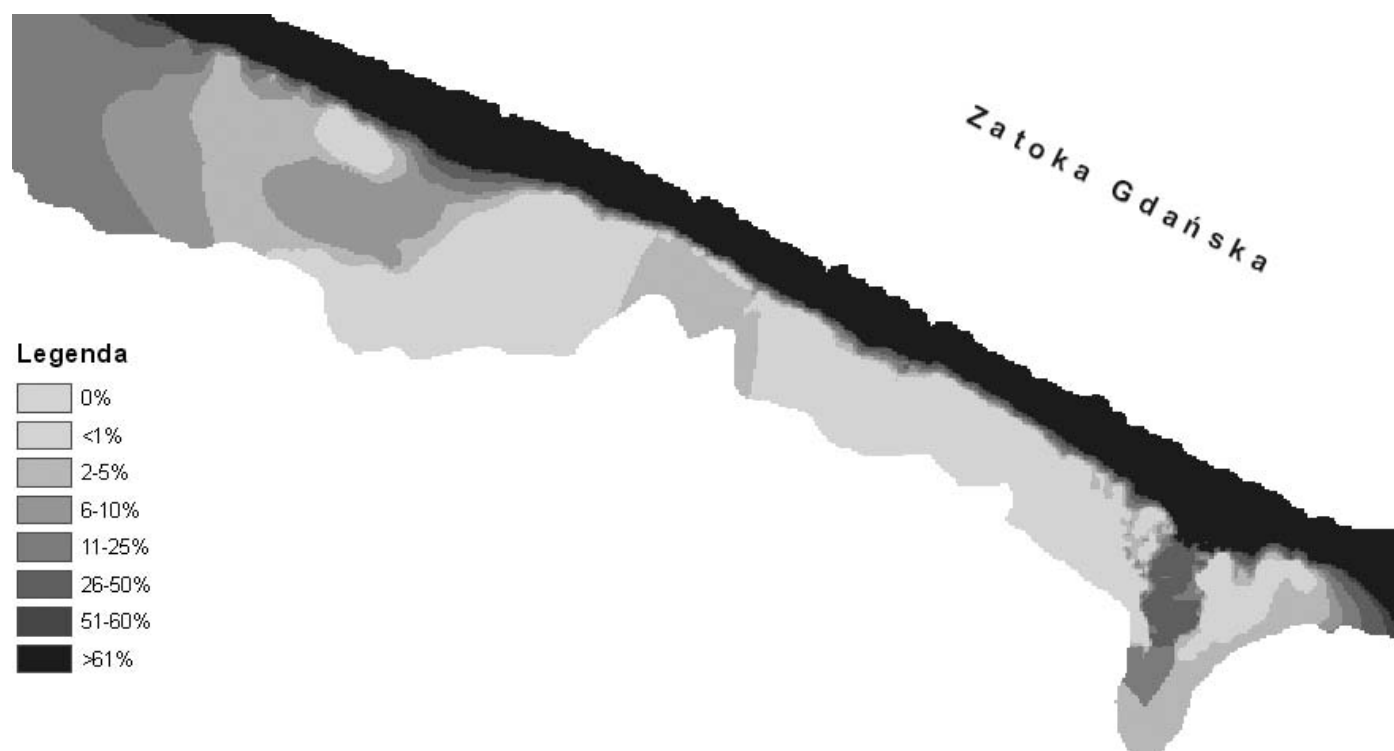
Tabl. 3. Prawdopodobieństwa przy danych klas wartości *z-score* [20]

Klasy	<i>z-score</i>	Prawdopodobieństwo
1	-322,295 – -3,091	0
2	-3,091 – -2,325	< 1%
3	-2,325 – -1,644	2 – 5%
4	-1,644 – -1,281	6 – 10%
5	-1,281 – -0,674	11 – 25%
6	-0,674 – 0,001	26 – 50%
7	0,001 – 0,254	51 – 60%
8	0,254 – 0,880	61 – 80%

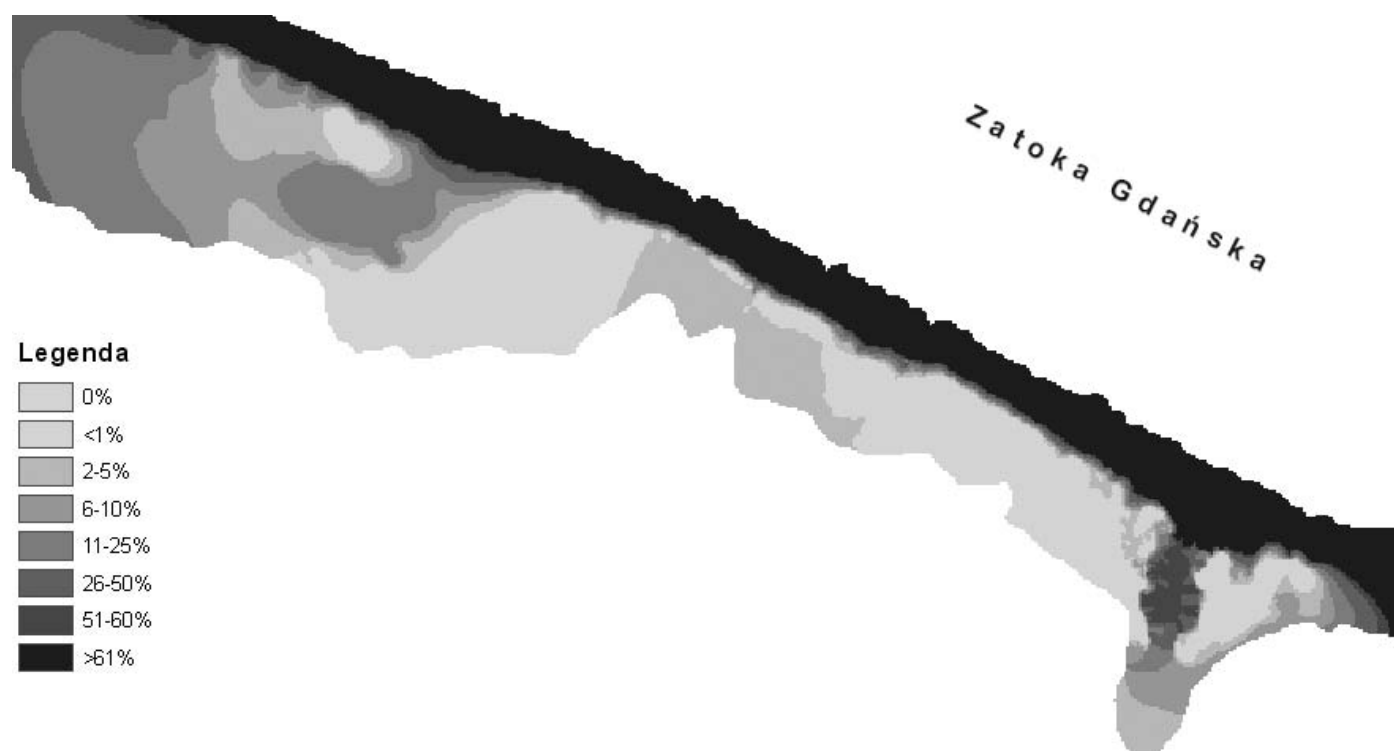
$$Sp = \sqrt{S^2 + RMS^2} \quad (6)$$

Do obliczenia prawdopodobieństwa wystąpienia zmiennych zastosowano metodę standaryzacji *z-score*. Z wzoru (7) obliczone zostały zmienne losowe standaryzowane (*z-score*), dzięki

którym możliwe było obliczenie prawdopodobieństwa wystąpienia komórek z mniejszą wartością niż zadany próg (poziom morza). W tym celu wykorzystano określenie powierzchni pod krzywą rozkładu w przedziale zmiennych od minus nieskończoności do zadanej wartości progowej.



Rys. 3. Mapy prawdopodobieństwa zalania mierzei obecnie z częstotnością wystąpienia wezbrania raz na 50 lat



Rys. 4. Mapy prawdopodobieństwa zalania mierzei obecnie z częstotnością wystąpienia wezbrania raz na 100 lat

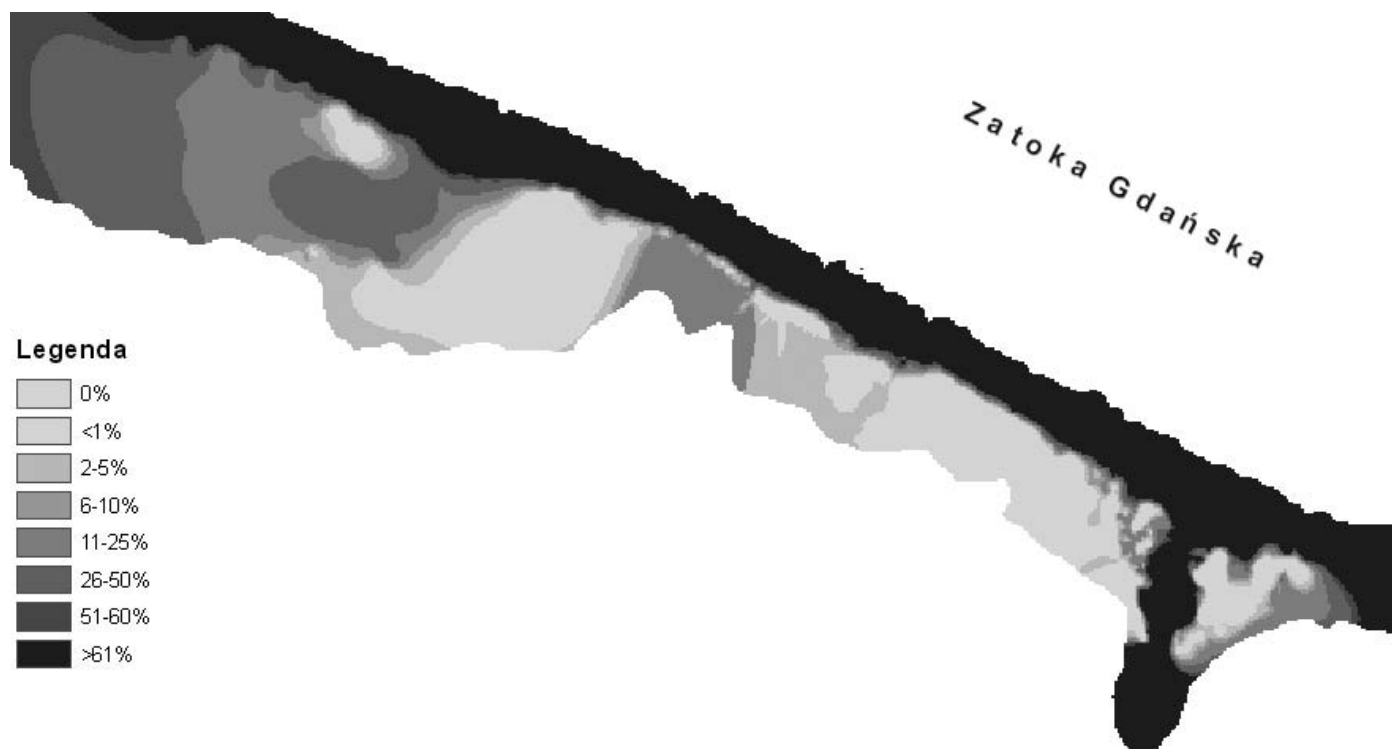
$$z_score = \frac{[PROGNOZA] - [DEM]}{Sp}$$

gdzie:

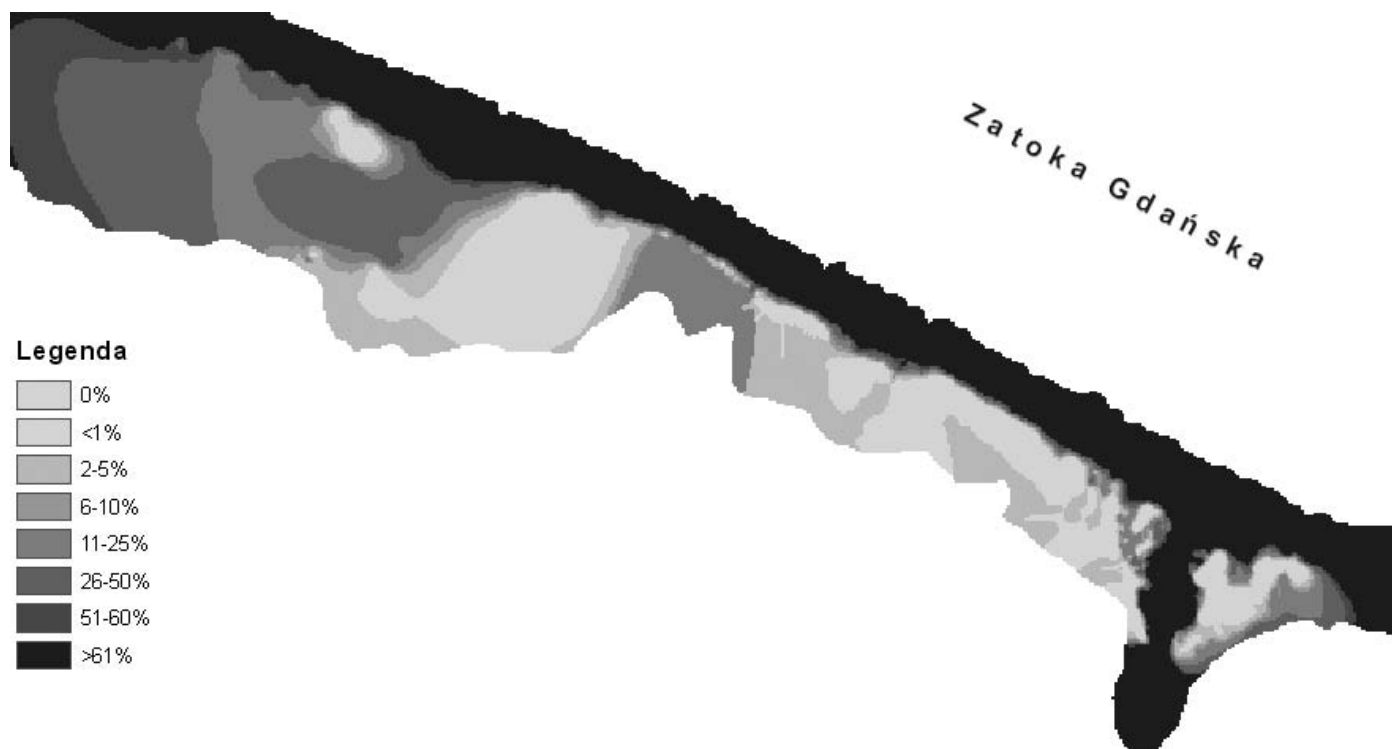
[PROGNOZA] – wyznaczony poziom wody (wartość progowa),
[DEM] – wartości komórek wysokościowej mapy terenu,
Sp – ogólny błąd mapy wynikowej.

(7) Odpowiednim przedziałom wartości *z-score* odpowiadają prawdopodobieństwa (tabl. 3) [20].

Mapa odzwierciedlająca wystąpienie maksymalnego poziomu morza w wysokości 648 cm raz na 50 lat (rys. 3) ukazuje możliwość przelania się wód z prawdopodobieństwem 25–50%. W przypadku wystąpienia poziomu morza wynoszącego 653 cm



Rys. 5. Mapy prawdopodobieństwa zalania mierzei przy prognozie wzrostu poziomu morza za 100 lat o 30 cm z częstością wystąpienia wezbrania raz na 50 lat

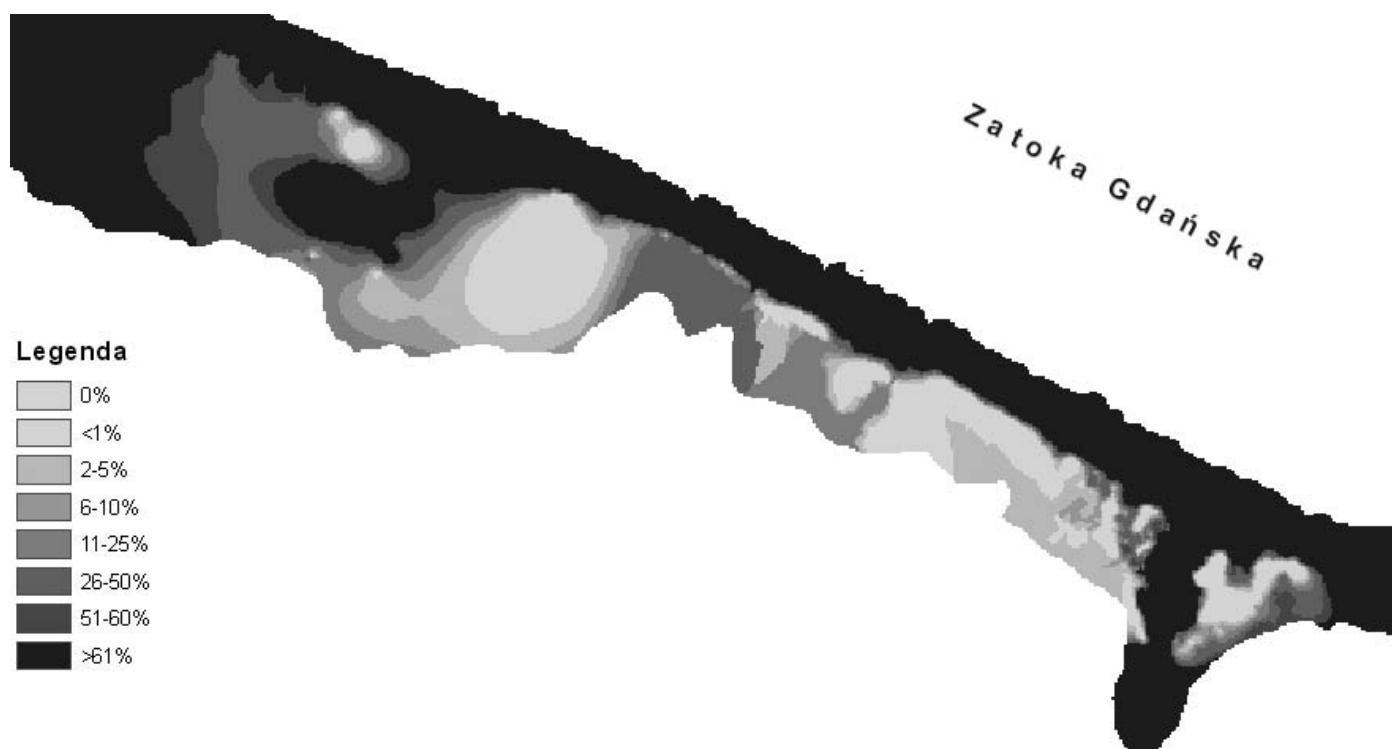


Rys. 6. Mapy prawdopodobieństwa zalania mierzei przy prognozie wzrostu poziomu morza za 100 lat o 30 cm z częstością wystąpienia wezbrania raz na 100 lat

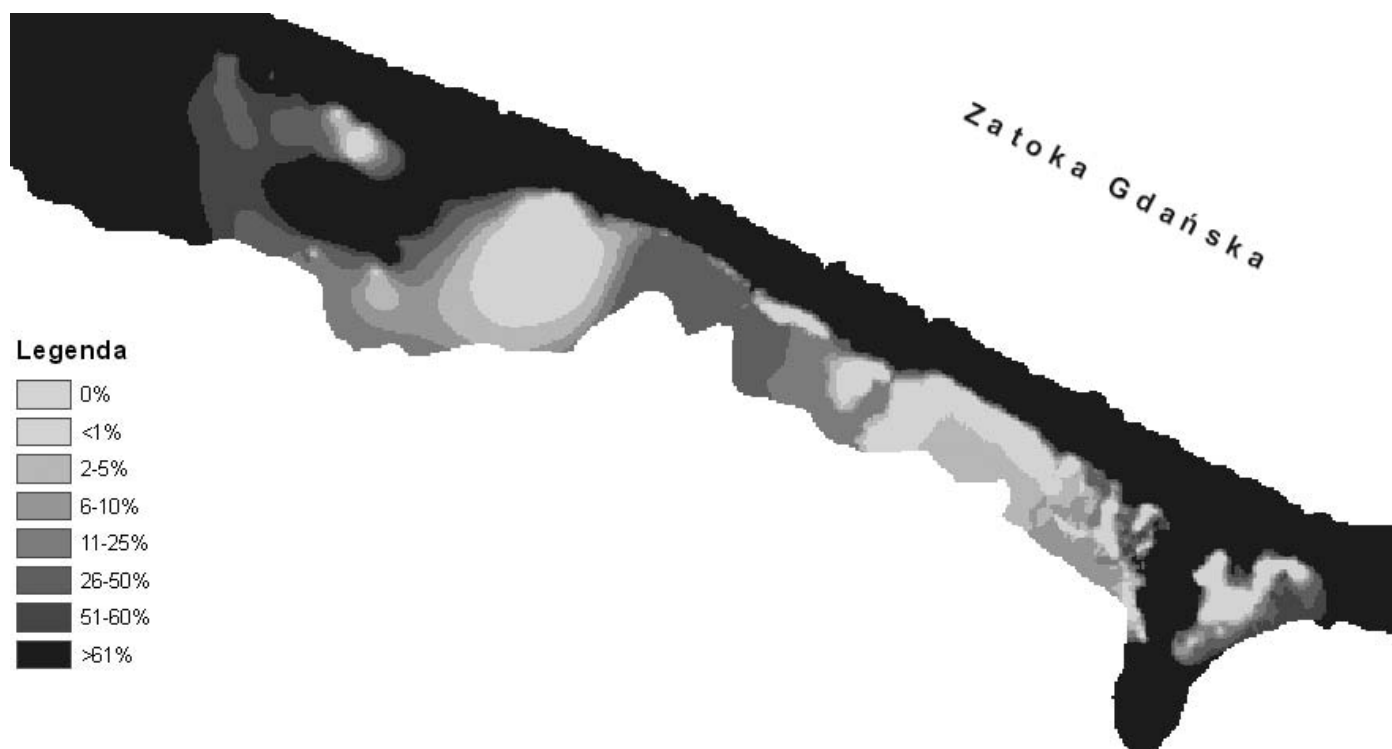
raz na 100 lat (rys. 4) sytuacja przedstawia się podobnie, przy czym większa jest szerokość plaży zalanej z ponad 61% prawdopodobieństwem.

Na kolejnej mapie przedstawiono zagrożenie zalaniem plaży podczas wystąpienia maksymalnego poziomu morza o wartości 678 cm raz na 50 lat (rys. 5) przy przyjęciu wzrostu poziomu

morza o 30 cm w 2112 roku. Zauważyć można, że zalana jest prawie połowa środkowej części mierzei z prawdopodobieństwem ponad 50%. Również z ponad 61% prawdopodobieństwem wody Zatoki Gdańskiej mogą przelać się przez mierzeję. Wystąpienie wezbrania o wysokości 683 cm raz na 100 lat (rys. 6), może spowodować znaczną abrazję większej części



Rys. 7. Mapy prawdopodobieństwa zalania mierzei przy prognozie wzrostu poziomu morza za 100 lat o 60 cm z częstotliwością wystąpienia wezbrania raz na 50 lat



Rys. 8. Mapy prawdopodobieństwa zalania mierzei przy prognozie wzrostu poziomu morza za 100 lat o 60 cm z częstotliwością wystąpienia wezbrania raz na 100 lat

obszaru wskutek przelania się wód morskich do jeziora w najniższym odcinku mierzei.

Ostatnie dwie mapy przedstawiają sytuację maksymalnych poziomów morza przy założeniu prognozy wzrostu poziomu wód Zatoki Gdańskiej o 60 cm za 100 lat. Przy wystąpieniu wezbrania o wysokości 708 cm (rys. 7), jak i 713 cm (rys. 8), nie zalany pozostanie tylko niewielki obszar mierzei w miejscach wyższego pasma wydym.

PODSUMOWANIE

Zbudowana z wydym Mierzeja Messyńska jest relatywnie wąska i niska, co powoduje jej podatność na zalewanie i abrazję w warunkach sztormowych. W pracy podjęto próbę dokładnego ilościowego określenia zagrożenia mierzei zalaniem przez wody Zatoki Gdańskiej. W tym celu wykorzystano oprogramowanie GIS, za pomocą którego opracowano numeryczny model terenu i wyznaczono obszary zalewania mierzei w przypadku wystąpienia ekstremalnie wysokich wezbrań sztormowych. Rozpatrzono ewentualność wystąpienia poziomów morza o okresie powtarzalności 50 i 100 lat zarówno w sytuacji obecnej, jak i w dwóch scenariuszach długoterminowego wzrostu średniego poziomu morza.

Analiza zagrożenia powodziowego przeprowadzona metodą probabilistyczną wykazała między innymi, że w czasie obecnym, raz na 50 lat, z prawdopodobieństwem ponad 51%, może zostać zalane 24% obszaru Mierzei Messyńskiej, natomiast raz na 100 lat – 27,6%. Przy założeniu wzrostu średniego poziomu morza w 2112 r. o 0,3 m, raz na 50 lat zalany będzie obszar stanowiący 36,4% mierzei, a raz na 100 lat – 39,6%. Przy przyjęciu scenariusza wzrostu poziomu morza w 2112 r. o 60 cm, 57,3% obszaru będzie zalane z ponad 51% prawdopodobieństwem raz na 50 lat, natomiast raz na 100 lat – aż 60,7%.

Największa możliwość przerwania mierzei istnieje w jej wschodniej części, gdzie przelewanie się wód morskich jest ułatwione ze względu na niskie rzedne terenu. Częste i długotrwałe występowanie warunków sztormowych może doprowadzić do utworzenia się stałej przetoki łączącej Zatokę Gdańską z jeziorem Ptasi Raj. W przypadku powstania przetoki i postępującej erozji brzegu morskiego w analizowanym rejonie, z dużym prawdopodobieństwem można oczekiwać szybko postępującej degradacji całej Mierzei Messyńskiej.

LITERATURA

1. Basiński, T. Ekspertyza dot. Regulacji ujścia Wisły Śmiałej. IBW PAN, Gdańsk 1992.
2. Basiński, T. Uzasadnienie konieczności odbudowy falochronu wschodniego w ujściu Wisły Śmiałej IBW PAN, Gdańsk 1993.
3. Bindoff, N. L., Willebrand, J. i inni. Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In: Climate Change. W S. D. Solomon, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. USA: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY 2007.
4. Brown, I., Modelling future landscape change on coastal floodplains using a rule-based GIS. Environmental Modelling & Software 2005.
5. Cecot, T. (2007). System przyrodniczy Gdańska. Pobrano czerwiec 08, 2012 z lokalizacji <http://www.fizjologii.za.pl/9.%20System%20przyrodniczy%20miasta.pdf>
6. Gilleland, E., & Katz, R., Extremes Toolkit (extRemes): Weather and Climate Applications of Extreme Value Statistics, 2005.
7. Gilleland, E., Nychka, D., & Schneider, U., Spatial models for the distribution of extremes. A tutorial for Uncertainty and Variability in Ecological Inference, Forecasting, and Decision Making An Introduction to Modern Statistical Computation. Summer Institute at the Center on Global Change. Duke University 2004.
8. Hünicke, B., What do we know about sea-level change in the Baltic Sea? Proceedings of the 6th Study Conference on BALTEX . Międzyzdroje, Island of Wolin 2010.
9. Jakuśnik, E., Wójcik, R., Biernaciak, D., & Miętus, M., Wpływ zmian pola barycznego nad Europą i Północnym Atlantykiem na zmiany średniego poziomu Morza Bałtyckiego w strefie polskiego wybrzeża. W E. W. Jakusik, Woda w badaniach geograficznych. Kielce 2010.
10. Judge, E., Overton, M., & Fisher, J., Vulnerability Indicators for Coastal Dunes. Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering, Vol 129, No. 6. 2003.
11. Kowalski, T., Zagadnienia ochrony brzegów w rejonie ujścia Wisły Śmiałej. Gdańsk 1982.
12. Łomniewski, K. Ujście Wisły. Roczniki Polskiego Towarzystwa Geologicznego , 29 (4), 1960.
13. Łomniewski, K., Zeszyty Geograficzne WSP w Gdańsku, „Sztormy na południowym Bałtyku”. Gdańsk 1962.
14. Majewski, A., Dziadusko, Z., & Wiśniewska, A., Monografia powodzi sztormowych 1951–1975. Warszawa: Kom. Łączn 1983.
15. Marosz, K., Wezbrania sztormowe w rejonie Gdańska w latach 1987 – 2006, Woda w badaniach geograficznych. Kielce: Instytut Geografii Uniwersytetu Jana Kochanowskiego, 2010.
16. Massel, S. R., Procesy hydrodynamiczne w ekosystemach morskich. Gdańsk 2010.
17. Meier, M., Broman, B., Kallio, H., & Kjellström, E., Projections of future surface winds, sea levels and wind waves in the late 21st century and their application for impact studies of flood prone areas in the Baltic Sea region. Geological Survey of Finland , Special Paper 41, 2006.
18. Sztobryn, M., Wezbrania sztormowe wzdłuż południowego Bałtyku (zachodnia i środkowa część). Monografie IMGW 2005.
19. Tomascchino, G., Sanchez-Arcilla, A., i inni. Large-scale experiments on dune erosion processes. Journal of Hydraulic Research , 49 (S1), 2011.
20. Urbański, J., GIS w badaniach przyrodniczych. Gdańsk: Wydawnictwo UG, 2008 (252).
21. Urbański, J., The impact of sea-level rise along the Polish Baltic coast. Journal of Coastal Conservation (7), 2001.
22. Zeidler, R., Assessment of the Vulnerability of Poland's Coastal Areas to sea level rise. Gdańsk: H*T*S . 1992.