

## PRODUKTY i METODY „WaterPUCK”

### *3D EcoPuckBay –*

### *Moduł rozptyłu biogenów w Zatoce Puckiej*

*Opis działania modułu rozptyłu biogenów modelu ekosystemu 3D EcoPuckBay w trybie operacyjnym*

Celem opracowanego trójwymiarowego modelu ekosystemu Zatoki Puckiej/wewnętrznej Zatoki Gdańskiej 3D EcoPuckBay przez zespół modelarzy IOPAN jako nowoczesnego narzędzia jest śledzenie i prognozowanie zachodzących w środowisku zmian dla zwiększenia zasobów danych i zrozumienia wobec potrzeb zrównoważonego rozwoju i przeciwdziałania zagrożeniom poprzez przedstawienie dziennych i sezonowych zmian zachodzących w środowisku Zatoki Puckiej, w aspekcie presji antropogenicznych związanych z wprowadzaniem zanieczyszczeń z wód powierzchniowych i gruntowych gminy Puck.

W odróżnieniu od metod tradycyjnych, model numeryczny pozwala na, ciągłe w czasie i w przestrzeni, kontrolowanie głównych charakterystyk ekosystemu. Takie podejście pozwala również, na uzyskanie szczegółowego ilościowego opisu zmienności fizycznych, dynamicznych i biochemicznych parametrów środowiska morskiego. Elementy te są niezbędne w nowoczesnym prognozowaniu ekologicznym środowiska morskiego.

Model EcoPuckBay został opracowany w ramach projektu WaterPUCK. Celem projektu było stworzenie zintegrowanej usługi informacyjno-prognostycznej dla Urzędu Gminy Puck poprzez opracowanie systemu komputerowego zapewniającego usługę WaterPUCK, która w jasny i praktyczny sposób oceni wpływ gospodarstw i struktur użytkowania gruntów na wody powierzchniowe i podziemne w Gminie Puck, a co za tym idzie - jakość wód Zatoki Puckiej [Dzierzbicka-Głowacka i inni., 2018, 2019a]. Budowa usługi oparta jest na badaniach in situ, danych środowiskowych (chemicznych, fizykochemicznych i hydrologicznych) i modelowaniu numerycznym. Usługa WaterPUCK to zintegrowany system składający się z połączonych ze sobą modeli, działający w sposób ciągły, dostarczając mu dane meteorologiczne i składa się z 8 głównych modułów:

- kompleksowy model spływu wód powierzchniowych oparty na kodzie SWAT
- numeryczny model przepływu wód podziemnych w oparciu o kod Modflow

- trójwymiarowy model numeryczny ekosystemu Zatoki Puckiej 3D EcoPuckBay, w skład którego wchodzi: model hydrodynamiczny, model biochemiczny z modułem pestycydów i **model rozptywu biogenów**;
- trójwymiarowy model numeryczny ekosystemu Morza Bałtyckiego z modułem upwellingu jako dynamiczny moduł wyznaczający warunki brzegowe na granicy woda-woda;
- kalkulator gospodarstw rolnych w Gminie Puck CalcGosPuck jako interaktywna aplikacja;
- kalkulator wymywania azotu z pól CalcNPuck jako interaktywna aplikacja.

W ramach projektu WaterPUCK, dzięki wysokiej rozdzielczości czasowej dostarczanych danych modelu SWAT w połączeniu z modelem EcoPuckBay możliwe było stworzenie narzędzia do symulacji rozptywów substancji biogenicznych pochodzących z rzek pozwalając na śledzenie kierunków i zasięgu przemieszczania się ich w wodach Zatoki Puckiej. Znajduje się ono na stronie [waterpuck.pl](http://waterpuck.pl) w zakładce PRODUKTY pod nazwą „EcoPuckBay – Model Rozptywu Biogenów”. Usługa pozwala na wygenerowanie mapy zasięgu rozptywu obrazując sposób rozchodzenia się depozycji rzecznej od momentu ujścia do Morza oraz czas potrzebny na rozprzestrzenienie się substancji biogenicznych w wybrane lokalizacje.

#### *Konfiguracja modułu rozptywu biogenów w modelu 3D EcoPuckBay*

Podstawą modułu rozptywu biogenów modelu 3D EcoPuckBay jest Community Earth System Model (CESM) (<http://www.cesm.ucar.edu/models/ccsm4.0>) opracowany przez NCAR. Podobnie jak model 3D CEMBS ([www.cembs.pl](http://www.cembs.pl)) na potrzeby projektu model CESM został dostosowany do regionu Zatoki Puckiej, rozwijany i rozbudowany w Instytucie Oceanologii Polskiej Akademii Nauk.

Model EcoPuckBay został rozbudowany o moduł dla wytypowanych, w ramach projektu, pestycydów i moduł rozptywu biogenów.

Rozdzielczość pozioma EcoPuckBay wynosi  $1/960^\circ$  co odpowiada nominalnej rozdzielczości 115 m. Rozdzielczość pionowa wynosi 0,4–0,6 m w górnych warstwach do 3 m, a następnie stopniowo wzrasta do 5 m na głębokości, łącznie 24 warstwami (Tabela 1). Pionowa dyskretyzacja wykorzystuje formułę z, a dolna topografia oparta jest na Baltic Sea Bathymetric Database (BSBD) z Baltic Sea Hydrographic Commission. Dane batymetryczne interpolowano do siatki modelu za pomocą metody Kriginga. Krok czasowy modelu oceanu wynosi 12 s.

Table 1. EcoPuckBay's vertical resolution.

Model Level	Thickness (m)	Lower Depth (m)	Mid-Depth (m)
1	0.60	0.60	0.30
2	0.40	1.00	0.80
3	0.40	1.40	1.20
4	0.40	1.80	1.60
5	0.40	2.20	2.00
6	0.50	2.70	2.45
7	0.60	3.30	3.00
8	0.80	4.10	3.70
9	1.00	5.10	4.60
10	1.40	6.50	5.80
11	1.80	8.30	7.40
12	2.50	10.80	9.55
13	4.00	14.80	12.80
14	5.00	19.80	17.30
15	5.00	24.80	22.30
16	5.00	29.80	27.30
17	5.00	34.80	32.30
18	5.00	39.80	37.30
19	5.00	44.80	42.30
20	5.00	49.80	47.30
21	5.00	54.80	52.30
22	5.00	59.80	57.30
23	5.00	64.80	62.30
24	5.00	69.80	67.30

### *Wymuszania atmosfery*

Model EcoPuckBay jest wymuszany przez 48-godzinne prognozy meteorologiczne z modelu UM dostarczonego przez Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Obliczeniowego Uniwersytetu Warszawskiego (ICM UW). Używane są następujące pola zewnętrzne:

- ✚ temperatura powietrza i wilgotność właściwa na poziomie 2 m,
- ✚ ciśnienie na poziomie morza,
- ✚ opad atmosferyczny,
- ✚ promieniowanie krótkofalowe i długofalowe,
- ✚ prędkość wiatru na poziomie 10m,
- ✚ gęstość powietrza na poziomie 2m.

Aby użyć danych z UM dostępne na innej siatce numerycznej niż siatka modelu EcoPuckBay konieczne jest przeprowadzanie interpolacji danych za każdym razem przy ich wczytywaniu.

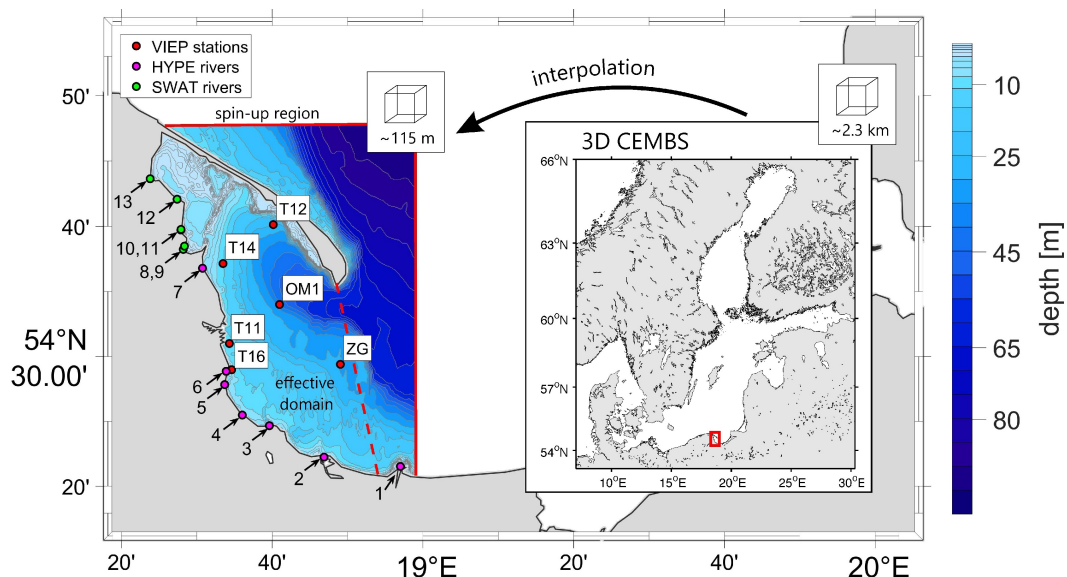
### *Warunki na granicy ląd-woda*

Informacje o objętości wody odprowadzanej przez rzeki w ujściach w rejonie Pucka (Rys. 1, liczby od 8 do 13) pochodzą z modelu hydrologicznego SWAT, który został wdrożony jako jeden z etapów projektu WaterPUCK. Prace przy modelu SWAT obejmowały przygotowanie złożonego modelu hydrologicznego z modułem stężeń substancji biogenicznych wykorzystującego dostępne dane meteorologiczne (opady, wiatr, temperatura, ciśnienie atmosferyczne). Jego mechanizm działania oparty jest na wykorzystaniu obserwacji w czasie rzeczywistym (lokalna stacja pogodowa) i krótkoterminowych prognoz pogody (strona internetowa ICM UW). Oprogramowanie SWAT pozwala na prowadzenie obliczeń hydrologicznych poprzez przekształcenie danych opadowych w spływ powierzchniowy za pomocą procedury liczby krzywych SCS (Soil Conservation Service) w skumulowaną objętość spływu i czas koncentracji (czas od początku zdarzenia opadowego do całego obszaru zlewni przyczyniające się do przepływu na wylocie). Model SWAT działała w trybie operacyjnym produkując dane wymuszające do modelu EcoPuckBay dla granicy ląd-woda w obrębie wewnętrznej Zatoki Puckiej. Dzięki wysokiej rozdzielczości czasowej dostarczanych danych, model SWAT w połączeniu z modelem EcoPuckBay możliwe było stworzenie narzędzia do symulacji rozptyłów substancji biogenicznych pochodzących z rzek pozwalając na śledzenie kierunków i zasięgu przemieszczania się ich w wodach Zatoki Puckiej. Znajduje się ono na stronie [waterpuck.pl](http://waterpuck.pl) w zakładce PRODUKTY pod nazwą „EcoPuckBay - Model Rozptywu Biogenów”.

Obszar działania modelu SWAT nie obejmuje całości domeny efektywnej modelu EcoPuckBay. SWAT dostarcza informacje jedynie o rzekach leżących w obrębie Gminy Pucka, natomiast do modelu EcoPuckBay uchodzą również cieki leżące na południe od rzeki Reda, tj. Kanał Ściekowy, Kacza, Kamienny Potok, Potok Oliwski, Wisła Martwa, Wisła Śmiała oraz Przekop Wisły. Wobec tego do pełnej informacji o strumieniach wody słodkiej w modelu EcoPuckBay należało pozyskać te dane z innego istniejącego modelu hydrologicznego. Do tego celu wykorzystywane są wartości liczbowe z symulacji modelu HYPE na podstawie historycznych szeregów czasowych (dostępne lata: 1980–2010). Jego domena geograficzna obejmuje zasięgiem całą Europę, a dane publiczne dostępne są w analogicznej do modelu SWAT rozdzielczości czasowej, czyli w postaci średnich dziennych przepływów w  $m^3/s$ . Z modelu HYPE wyodrębniono cztery podzlewnie – po jednej dla każdego z ujść Wisły oraz jedną dla pozostałych rzek na podstawie równomiernego podziału.

Wisła stanowi najbardziej istotne źródło objętości wody słodkiej uchodzącej do Zatoki Gdańskiej, co ma również wpływ na warunki środowiskowe wewnątrz efektywnej domeny modelu. Rząd wielkości przepływu jej wód jest średnio o około trzy rzędy wielkości większy niż pozostałych źródeł wody słodkiej w modelu EcoPuckBay. Cykl roczny Wisły wykazuje zbliżony charakter od dziesiątek lat z maksimami w miesiącach wiosennych – co związane jest z roztopami oraz minimami latem. Dzięki temu użycie historycznych szeregów czasowych dla Wisły stanowi dobre przybliżenie rzeczywistego przepływu dla ostatnich kilku lat.

Informacja o depozycji substancji biogenicznych z modelu HYPE udostępniania jest w postaci średnich miesięcznych. Na skutek obowiązywania dyrektyw HELCOM w ostatnich 30 latach rzeczywiste wartości uchodzące do Bałtyku z obszarów Polski uległy silnej redukcji. W związku z tym użycie średnich 30 letnich doprowadziły by do przeszacowania i zakłamania rzeczywistych spływów. Wobec tego bieżące depozycje ustalono na podstawie pracy [2] M. Pastuszek et al, 2018, „Reduction of nutrient emission from Polish territory into the Baltic Sea (1988-2014) confronted with real environmental needs and international requirements”. Na podstawie wyżej wymienionej pracy ustalono rzeczywiste koncentracje dla zawartych w uchodzących do Bałtyku wodach pochodzenia rzecznoego azotanów ( $0.9 \text{ mg dm}^{-3}$ ), amoniaku ( $0.07 \text{ mg dm}^{-3}$ ), fosforanów ( $0.07 \text{ mg dm}^{-3}$ ), oraz krzemianów. ( $1.1 \text{ mg dm}^{-3}$ ). Tak ustalone stężenia zostały odniesione do średnich dziennych objętości wody słodkiej uchodzącej dla rzek od 1 do 7 (Rys. 1) uzyskując depozycje zbliżone do rzeczywistych.



Rysunek 1. Efektywna domena modelu z topografią, lokalizacjami stacji pomiarowych wykorzystywanych do oceny oraz lokalizacje ujść cieków wodnych objętych domeną. Zielone kropki (8-13) oznaczają rzeki, które dostarczone są przy użyciu modelu hydrologicznego SWAT. Fioletowe (1-7) z wykorzystaniem przepływów z modelu hydrologicznego HYPE.

### Moduł rozptyłu biogenów

W celu modelowania rozptyłu zanieczyszczeń model hydrodynamiczny został połączony z modelem hydrologicznym opisującym procesy zachodzące w ciekach w Gminie Puck i rzekach w modelowym akwenu. W tym celu wykorzystano równania transportu substancji bierniej zapisanego w kartezjańskim układzie współrzędnych bez członów opisujących źródła i upusty zanieczyszczeń:

$$\frac{\partial C_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_H \frac{C_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_H \frac{\partial C_p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial C_p}{\partial z} \right) - \left( u \frac{\partial C_p}{\partial x} + v \frac{\partial C_p}{\partial y} + w \frac{\partial C_p}{\partial z} \right)$$

gdzie:

- $C_p$  – stężenie zanieczyszczeń w wodzie,
- $u$  – składowa prędkości przepływu wzdłuż osi  $x$ ;
- $v$  – składowa prędkości przepływu wzdłuż osi  $y$ ;
- $w$  – składowa prędkości przepływu wzdłuż osi  $z$ ;
- $D_H$  – masowy współczynnik poziomej turbulენტnej dyfuzji;
- $D_z$  – masowy współczynnik pionowej turbulენტnej dyfuzji;

Model hydrodynamiczny opisuje dyfuzję i adwekcję zanieczyszczeń pod wpływem prądów morskich. Dane o przepływie i stężeniach substancji biogenicznych są dostarczane raz na dzień na granicy ląd-morze z modelu SWAT.

Moduł składa się z czterech cząstkowych równań różniczkowych drugiego rzędu, dla stężeń substancji biogenicznych, azotanów plus azotyny, amoniaku i fosforanów oraz domieszki bierniej.

### Portal internetowy

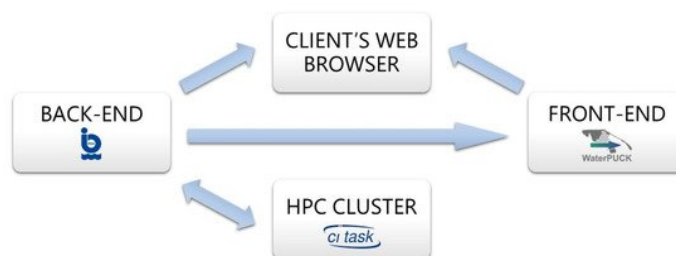
Model 3D EcoPuckBay – Moduł Rozptyłu Biogenów jest usługą udostępnioną w serwisie WaterPUCK ([www.waterpuck.pl](http://www.waterpuck.pl)), poprzez zakładkę „PRODUKTY” na pasku nawigacyjnym i wybraniu „EcoPuckBay - Model Rozptyłu Biogenów” (Rys. 2). Obecnie usługa ma zasięg czasowy od 2016 do dnia bieżącego z uwzględnieniem 48 – godzinnej prognozy.

Portal działa w oparciu o technologię front-end/ back-end (podobnie jak w przypadku usługi 3D EcoPuckBay – Moduł Hydrodynamiczny i Moduł Biochemiczny). Mechanizmy odpowiedzialne za wyświetlanie (front-end) są oddzielone od przetwarzania danych (back-end). To rozwiązanie pozwala zbudować portal o wysokich możliwościach skalowania, tj. zwiększający liczbę obsługiwanych połączeń jednocześnie. Ponadto oddzielenie wyświetlania od przetwarzania danych zapewnia dodatkowe bezpieczeństwo serwera i umożliwia niezależny rozwój obu części.



Rys. 2. Strona projektu WaterPUCK i wyboru produktu „EcoPuckBay – Model Rozptywu Biogenów”.

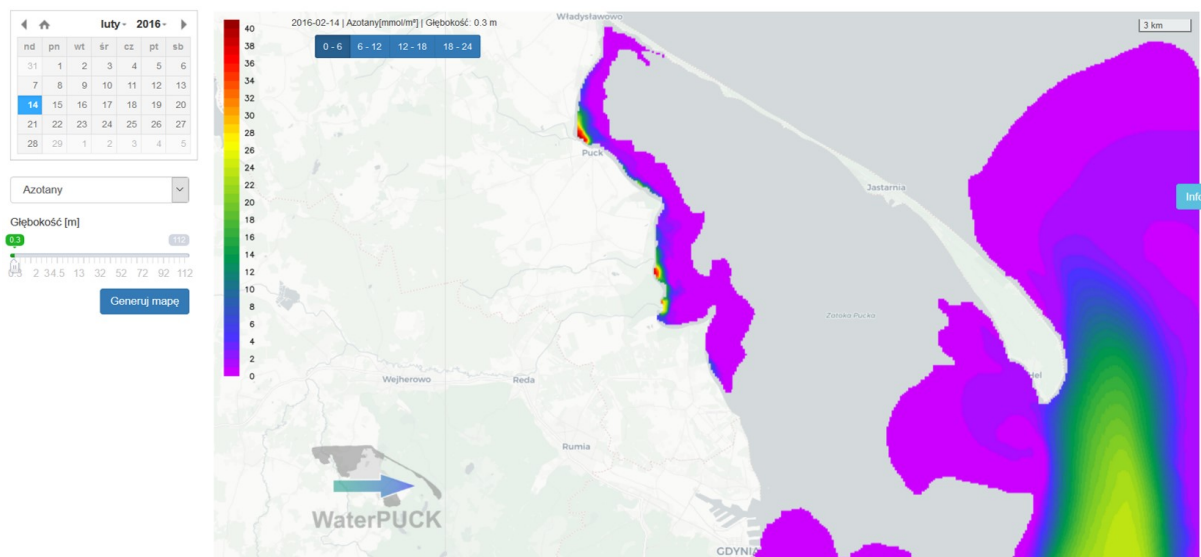
Warstwa frontonu odpowiedzialna za wizualizację danych została stworzona w technologii Bootstrap i przystosowana do obsługi z urządzeń mobilnych. Back-end odpowiedzialny za przetwarzanie danych i przenoszenie ich do części front-end został stworzony w technologii RESTful-API. Technologia ta opiera się na komunikacji między częściami portalu przy użyciu zapytań bezstanowych (Rys. 3).



Rys. 3. Schemat architektury usługi projektu WaterPUCK – EcoPuckBay – Model Rozptywu Biogenów.

Użytkownik ma możliwość tworzenia map rastrowych z wynikami obliczeń modelu rozptywu substancji biogenicznych dla określonego dnia z 10-dniowego okresu symulacji. Wizualizacji można dokonać dla zobrazowania skumulowanych stężeń trzech głównych związków nieorganicznych ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{PO}_4$ ) niesionych z wodami rzek uchodzących do Morza Bałtyckiego w obszarze domeny modelu przez wybranie odpowiedniego pola z listy rozwijanej:

**Azotany** – pole obrazujące skumulowane stężenie azotanów  $\text{NO}_3$  w jednostce objętości wody ( $\text{mmol}/\text{m}^3$ ) pochodzenia rzecznoego, w lokalizacjach do których mogą dotrzeć na skutek działania prądów i mieszania się wody morskiej od początku okresu rozptywu (Rys. 4).



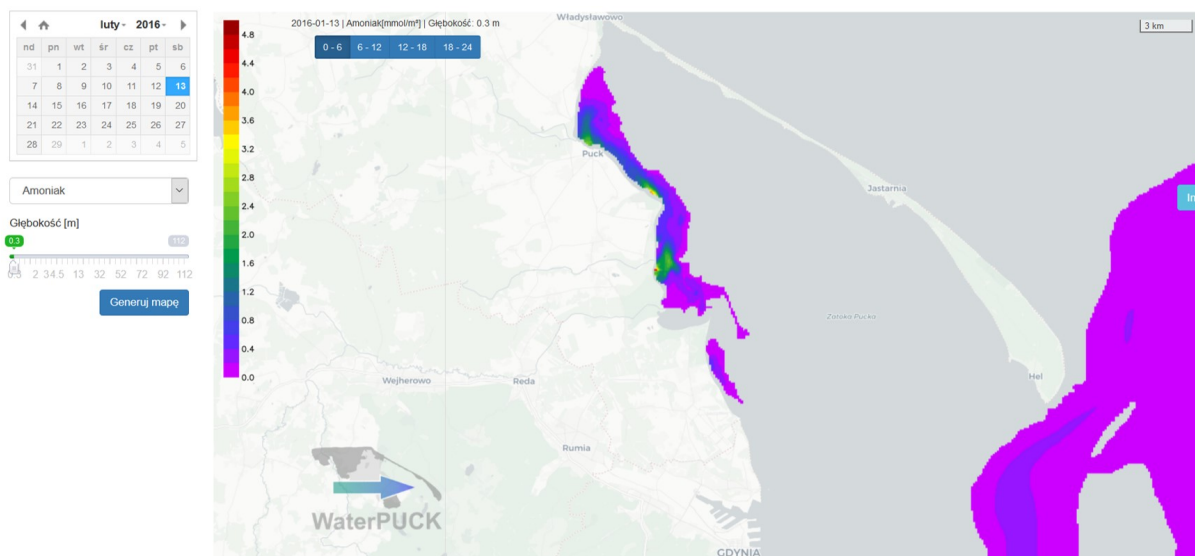
Rysunek 4. Wizualizacja stężenia ( $\text{mmol}/\text{m}^3$ ) dla rozptywu azotanów ( $\text{NO}_3$ ) w usłudze „EcoPuckBay – Model Rozptywu Biogenów”.

**Amoniak** – pole obrazujące skumulowane stężenie amoniaku  $\text{NH}_4$  w jednostce objętości wody ( $\text{mmol}/\text{m}^3$ ) pochodzenia rzecznoego, w lokalizacjach do których może dotrzeć na skutek działania prądów i mieszania się wody morskiej od początku okresu rozptywu (Rys. 5).

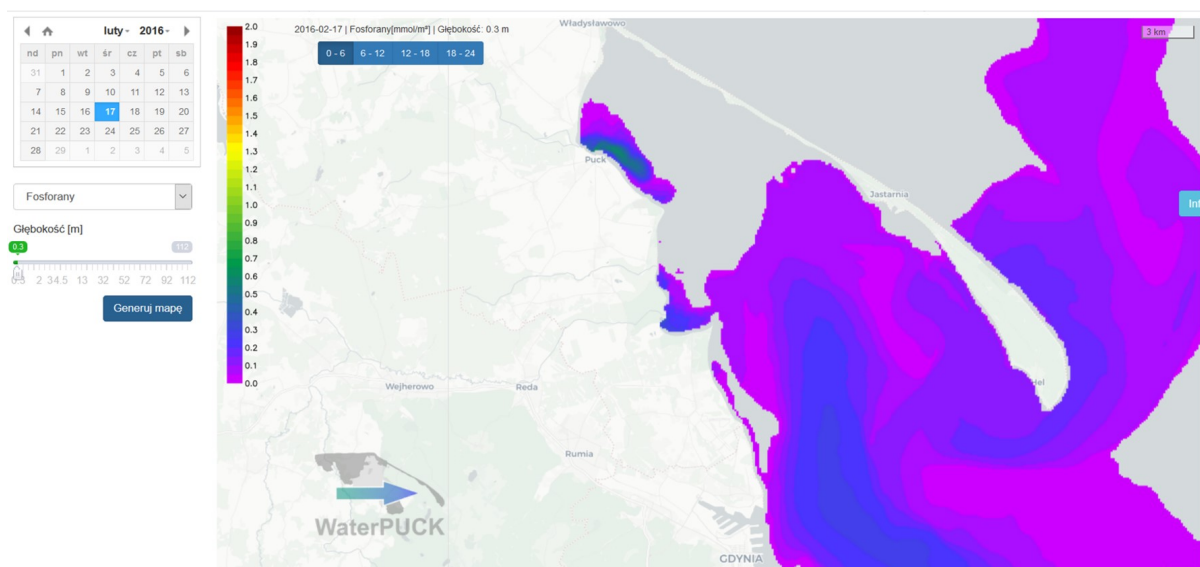
**Fosforany** – pole obrazujące skumulowane stężenie fosforanów  $\text{PO}_4$  w jednostce objętości wody ( $\text{mmol}/\text{m}^3$ ) pochodzenia rzecznoego, w lokalizacjach do których mogą dotrzeć na skutek działania prądów i mieszania się wody morskiej od początku okresu rozptywu (Rys. 6).

Dodatkowym produktem na liście rozwijanej, dla którego można przeprowadzić wizualizację jest „Zasięg Rozptywu” (Rysunek 7). Jest to pole bezwymiarowe obrazujące maksymalny obszar wpływu substancji biogenicznych pochodzenia rzecznoego, tj. miejsca, do których dla wybranej daty, może dotrzeć jakaś niezerowa ilość  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$  lub  $\text{PO}_4$  na skutek działania prądów i mieszania się wody morskiej od początku okresu rozptywu, jeśli wcześniej nie zostanie wykorzystana (zużyta) na produkcję pierwotną. Wygenerowanie mapy tego produktu skutkuje w otrzymaniu mapy z zaznaczonym obszarem objętym rozptywem.



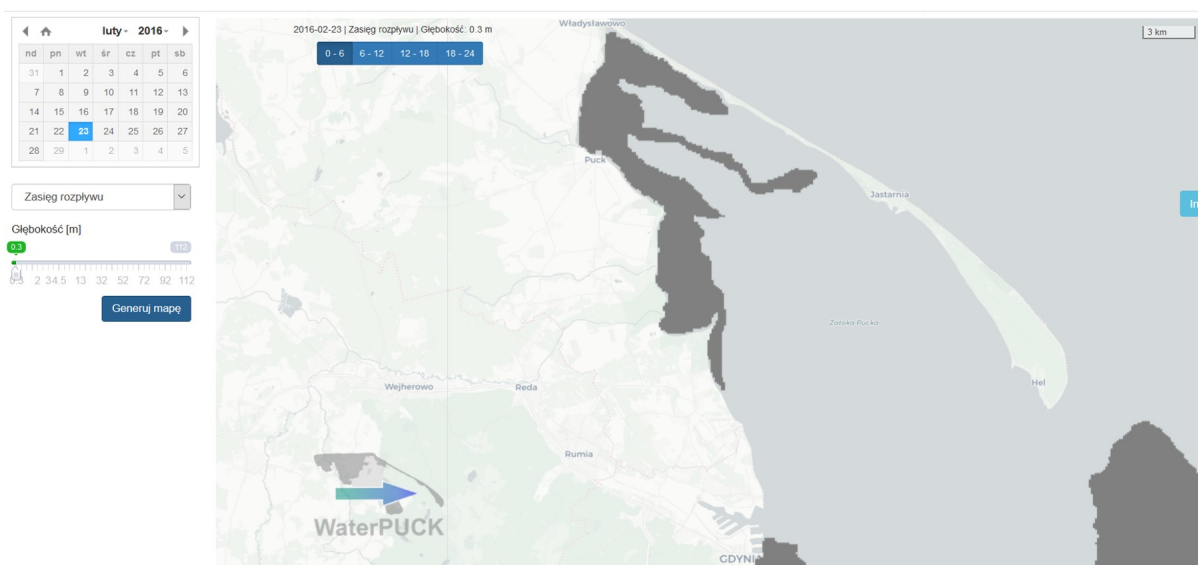


Rysunek 5. Wizualizacja stężenia ( $\text{mmol}/\text{m}^3$ ) dla rozptyłu amoniaku ( $\text{NH}_4$ ) w usłudze „EcoPuckBay – Model Rozptywu Biogenów”.



Rysunek 6. Wizualizacja stężenia ( $\text{mmol}/\text{m}^3$ ) dla rozptyłu fosforanów ( $\text{PO}_4$ ) w usłudze „EcoPuckBay – Model Rozptywu Biogenów”.

Początek okresu rozptyłu jest to dzień w którym następuje resetowanie pól rozptyłów poprzez zerowanie stężeń. W obecnej wersji modelu rozptyłów substancji biogenicznych jest to godzina 00:00 każdego 1-go, 10-go oraz 20-go dnia miesiąca.



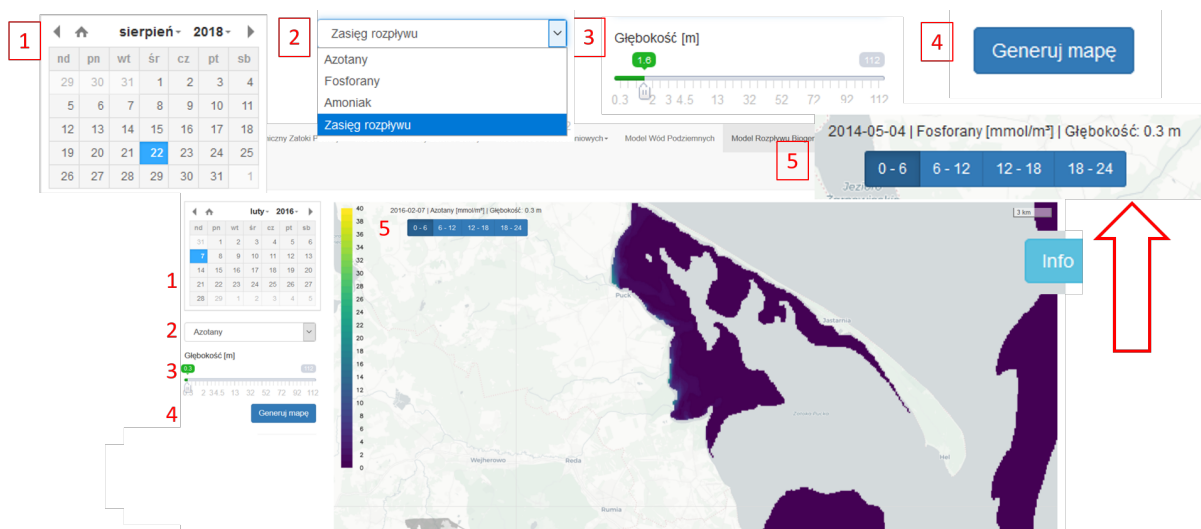
Rysunek 7. Wizualizacja zasięgu rozptyłu zanieczyszczeń jako domieszki biernej w usłudze „EcoPuckBay – Model Rozptywu Biogenów”.

#### *Przykład sposobu generowania map na stronie www*

Aby wygenerować mapę zasięgu rozptywu lub mapę stężenia rozptywu substancji biogenicznej użytkownik wybiera z kalendarza na stronie datę (Rys. 8 [1]), dla której chce obejrzeć wyniki. Z umieszczonej poniżej listy rozwijanej (Rys. 8 [2]), wybiera żądany produkt. Domyślnie wyniki są prezentowane dla warstwy powierzchniowej (dokładnie dla głębokości 30cm). Aby zmienić żadaną głębokość należy wybrać ją za pomocą suwaka (Rys. 8 [3]), znajdującego się poniżej listy rozwijanej. Po wybraniu wszystkich parametrów należy wcisnąć przycisk „Generuj mapę” (Rys. 8 [4]) i poczekać aż na panelu z domeną wygenerowana zostanie mapa rastrowa wynikami dla wybranych parametrów. Po wygenerowaniu mapy w jej lewym górnym rogu wyświetli się panel wyboru godziny (Rys. 8 [5]). Kliknięcie w odpowiednie pole pozwoli na zmianę godziny (średniej sześciogodzinnej) w wybranym dniu.

*Przykład 1:* Wybór pola „Azotany” dla daty 11 lutego 2016, (godzina 6-12) obrazuje skumulowane stężenie  $\text{NO}_3$  na skutek rozptywu, który rozpoczął się 10 lutego 2016 o godzinie 00:00.

*Przykład 2:* Wybór pola „Zasięg rozptywu” dla daty 9 lutego 2016, (godzina 6-12) obrazuje maksymalny możliwy obszar do którego mogą dotrzeć substancje biogeniczne na skutek rozptywu, który rozpoczął się 1 lutego 2016 o godzinie 00:00.



Rys. 8. Panel wyboru poszczególnych parametrów dla wizualizacji rozptyłu wybranej substancji biogenicznej lub zasięgu tego rozptyłu.

### Podsumowanie

Metodyka zastosowana w „EcoPuckBay – Model Rozptywu Biogenów” zakłada wizualizację rozptyłu substancji biogenicznych, która nie jest wykorzystywana do produkcji pierwotnej. W rzeczywistych warunkach środowiskowych prezentowane wyniki rozptyłów mogą być inne w związku z tym, że niesione przez wody morskie substancje biogeniczne mogą zostać zużyte przez fitoplankton do wzrostu w procesie produkcji pierwotnej, a jednocześnie ich stężenia mogą ulec zmianie również na skutek procesów chemicznych tj. remineralizacja w kolumnie wody i z osadów dennych oraz wydzielanie przez zooplankton. Model pokazuje potencjalny maksymalny zasięg na jaki mogą rozprzestrzenić się biogeny, i ich stężenia, gdyby na skutek wystąpienia odpowiednich warunków środowiskowych nie doszło do ich spadku lub wzrostu. Takie podejście do zagadnienia może mieć szczególne znaczenie przy przewidywaniu zdarzeń, skutkujących występowaniem stanów podwyższonego ryzyka czy nawet katastrof ekologicznych, poprzez wytypowanie potencjalnie zagrożonych obszarów, bądź wytypowanie rejonów bezpiecznych.

### Literatura

1. Dybowski D., Janecki M., Nowicki A., Kalinowska D. and Dzierzbicka-Głowacka L., (2020). *Assessing the impact of chemical loads from agriculture holdings on the Puck Bay environment with the High-Resolution Ecosystem Model of the Puck Bay, Southern Baltic Sea*. złożona w Water .
2. Pastuszek M., Bryhn A., Håkanson L., et al. (2018). *Reduction of nutrient emission from Polish territory into the Baltic Sea (1988–2014) confronted with real environmental needs and international requirements*. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 47(2), pp. 140-166. DOI:10.1515/ohs-2018-0015.