

STRATY FILTRACYJNE ZRZUTÓW ZE ZBIORNIKA JEZIORSKO ZASILAJĄCYCH PRZEPIŁY NIŻÓWKOWE WARTY

Zbigniew Walczak, Zbigniew Sroka, Wojciech Tschuschke
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Paweł Stefanek
KGHM Polska Miedź SA

Krzysztof Wrzosek
Politechnika Warszawska

Streszczenie. Analizowano straty filtracyjne wzdłuż około 80-kilometrowego odcinka rzeki, powstałe w wyniku spiętrzenia wody w rzece Warcie wywołanego zrzutami ze zbiornika retencyjnego Jeziorsko realizowanymi w celu zapewnienia przepływów niżówkowych (minimalnych) Warty. Przeanalizowano 12 hipotetycznych przebiegów fali w zależności od wielkości i czasu trwania zrzutu. Parametry określające właściwości filtracyjne podłoża wyznaczono na podstawie badań terenowych przeprowadzonych na terenie polderu Majdany, w przekroju znajdującym się w połowie analizowanego odcinka rzeki. Wyznaczono skumulowane wydatki filtracyjne, będące sumą strat, oraz chwilowe wydatki przez dno koryta rzeki. Straty porównano z objętościami zrzutów w poszczególnych symulacjach. Wykazano iż straty na rozpatrywanym odcinku nie są duże i sięgają maksymalnie 1,3% objętości zrzutu a udział procentowy maleje wraz ze zwiększaniem się wielkości zrzutu oraz czasem jego trwania. Rozwiązania uzyskano z wykorzystaniem MES zaimplementowanej w pakiecie oprogramowania komputerowego Hydrus, umożliwiającego analizowanie zagadnień niestacjonarnych ze zmiennymi w czasie warunkami brzegowymi.

Słowa kluczowe: filtracja z koryta rzeki, straty filtracyjne, MES, Hydrus, zmienne w czasie warunki brzegowe

Adres do korespondencji – Corresponding author: dr inż. Zbigniew Walczak, Instytut Budownictwa i Geoinżynierii, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Piątkowska 94A, 60-649 Poznań; e-mail: zbw@up.poznan.pl

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2017

WSTĘP

Przepływy niżówkowe w rzece Warcie zasilane są zrzutami wody ze zbiornika Jeziorsko. Natężenie przepływu i czas jego trwania powinny zależeć z jednej strony od celów, jakie ma spełniać alimentacja, a z drugiej strony od dostępnej objętości wody zretencjonowanej w zbiorniku. Fala formowana przez dodatkowy zrzut ze zbiornika przemieszcza się wzdłuż biegu rzeki, ulegając transformacji. Przebieg tego procesu odwzorowuje się zwykle tworząc model hydrodynamiczny oparty na równaniach de Saint-Venanta. Należy jednak pamiętać, że z modelu wiarygodne wyniki transformacji fali można uzyskać jedynie wtedy gdy zastosowano odpowiednio dokładny numeryczny model koryta rzeki [Laks i in. 2013], jak również właściwie dobrano parametry hydrauliczne [Chudziak 2013, Walczak i in. 2013a, Walczak i in. 2013b]. Podwyższenie stanów w korycie rzeki powoduje także infiltrację wody w podłoże gruntowe terasy zalewowej prowadzące do podwyższenia poziomów wód gruntowych w dolinie, co może mieć także wpływ na ich jakość, szczególnie w sytuacji długotrwałego piętrzenia [Worsa-Kozak i in. 2008, Traczyński i Grela 2011]. Oczywiście możliwa jest również sytuacja odwrotna, np. kiedy to rzeka drenuje tereny przyległe po przejściu wezbrania w trakcie osuszania polderu [Sroka i in. 2015]. Tutaj, przy wszelkich analizach istotne znaczenie ma dokładność stosowanego numerycznego modelu terenów przyległych do rzeki [Bates 2012, Yan i in. 2015, Laks i in. 2017] jak również wiarygodne rozpoznanie geotechniczne [Tschuschke 2006b; Tschuschke i in. 2014]. Warto też przypomnieć, że w dolinach rzecznych często występują grunty organiczne, które są wrażliwe na zmiany stosunków wodnych [Mioduszewski i in. 2004]. Wówczas model opisujący filtrację musi obejmować całą dolinę rzeki (płaski w planie 2D lub nawet 3D) [Łyczko i in. 2014].

Celem niniejszej pracy jest oszacowanie wielkości infiltracji wynikającej z podwyższenia stanów związanych z zasilaniem przepływów niżówkowych w rzece Warta poprzez zrzuty alimentacyjne ze zbiornika Jeziorsko. Rozważano krótkotrwałe (kilkudniowe) zasilanie dolnego stanowiska zapory zbiornika Jeziorsko ponad przepływ minimalny określony na $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Sformułowano tezę, że taki sposób alimentacji zmniejszy wielkość infiltracji w porównaniu z długotrwałym zasilaniem, lecz przepływem o mniejszym natężeniu.

W pracy Przedwojskiego i in. [1993] analizowano sytuację w roku suchym 1992. Zasilanie przepływów niżówkowych trwało od 16 V do 10 X, przez pierwszą część tego okresu od 16 V do 31 VII, czyli dwa i pół miesiąca z natężeniem $\Delta Q = 20\text{--}25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Oszacowano, że filtracja z koryta rzeki zanika po upływie 65 dni okresu zasilania. Na początku jest największa, a zmniejszenie się przepływu na odcinku od zapory w Jeziorsku do Poznania wynosi $5,78 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Szacowano także straty wody spowodowane parowaniem terenowym w dolinie rzeki. W czerwcu roku 1992 zmniejszenie przepływu na odcinku od Jeziorska do Poznania obliczono na poziomie $17,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Należy podkreślić, że rozważania przeprowadzono dla roku w którym alimentacja ze zbiornika następowała przez długi okres. Obliczenia natężenia filtracji spowodowane zwiększeniem napełnienia w korycie rzeki wykonano według uproszczonego rozwiązania Wierygina [Rembeza 1998]. Na całym mierzącym 240 km odcinku rzeki przyjęto przyrost stanów taki jak w Jeziorsku (maksymalny). Przyjęto także współczynnik filtracji zalegających w dolinie aluwiiów o znacznej wartości $40 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$. Spowodowało to zawyżenie obliczonych strat filtracyjnych. Szacowanie strat wywołanych transpiracją

roślinności porastającej dolinę dotyczą natomiast całego przepływu w rzece a nie tylko dodatkowego zrzutu alimentacyjnego.

Analizy rozpatrywane w niniejszej pracy przeprowadzono dla przekroju Warty w km 440+955, odległego o około 40 km od zapory czołowej w Jeziorsku, znajdującego się w obrębie polderu Majdany. Przekrój wybrano z uwagi na dostępność szczegółowych danych o ukształtowaniu terenu, stratygrafii podłoża i wodoprzepuszczalności gruntu, których znajomość warunkuje uzyskanie wiarygodnych wyników obliczeń symulacyjnych. Obliczenia filtracyjne wykonano na modelu numerycznym metodą elementów skończonych (MES) uwzględniając niestacjonarność zjawiska. Zastosowano oprogramowanie HYDRUS 3D [Šimůnek i in. 2014]. Niezbędne do przeprowadzenia symulacji przepływu filtracyjnego hydrogramy stanów w korycie rzeki uzyskano z modelu SPRUNER [Wosiewicz i in. 2013] – numerycznego modelu nieustalonego przepływu w korycie na odcinku od zbiornika Jeziorska do miejscowości Oborniki.

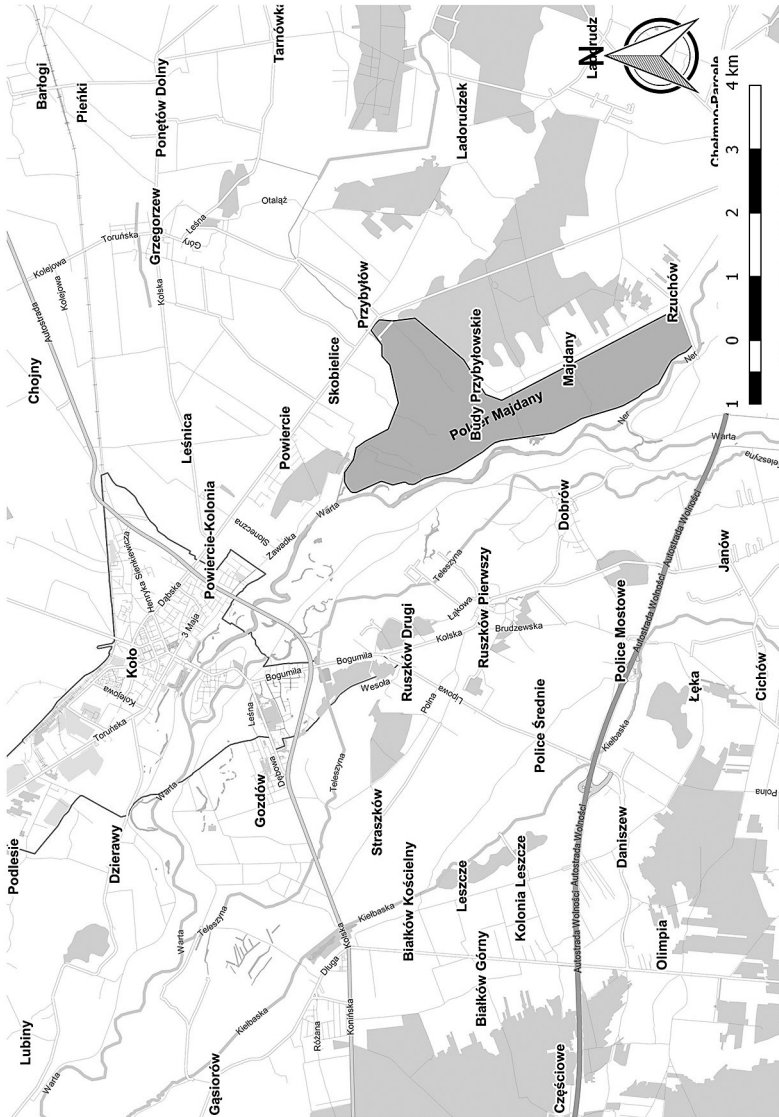
OBIEKT I BADANIA WSTĘPNE

Praktyczną eksploatację zbiornika Jeziorsko rozpoczęto w roku 1992. Jest to zbiornik wielozadaniowy i jego najważniejsze funkcje zestawiono w Instrukcji Gospodarowania Wodą (Hydroprojekt Poznań 2013). Do ważniejszych funkcji zbiornika należy wyrównywanie przepływów w okresach niżówkowych oraz poprawianie warunków żeglugowych na odcinkach żeglownych rzeki Warty. Obowiązujący aktualnie NPP wynoszący 120,00 m n.p.m. został wprowadzony w roku 2014 [Urząd Marszałkowski... 2014]. Pojemność użytkowa zbiornika wynosi zatem 114 mln m³ i jest o około 20 mln m³ mniejsza niż wcześniej gdy NPP wynosił 120,50 m n.p.m.

W odległości ok. 40 km poniżej zbiornika Jeziorsko, w pobliżu miejscowości Koło, zlokalizowany jest polder przyrzeczny Majdany (ryc. 1) [Walczak i in. 2016]. W obrębie polderu do rzeki Warta uchodzą Ner i Rgilewka a czasza odwadniana jest Tralalką i systemem rowów melioracyjnych, z których wody poprzez pompownię Powiercie uchodzą do Rgilewki.

Badania geotechniczne – oszacowanie współczynników filtracji gruntów podłoża.

Techniczne badania gruntów, w celu ustalenia warunków geologiczno-inżynierskich podłoża w rejonie polderu Majdany, wykonano metodą statycznego sondowania – CPTU, w czterech punktach pomiarowych, zlokalizowanych na linii przekroju obliczeniowego (ryc. 2). Sondowania o głębokości 20 m, w każdym punkcie pomiarowym przeprowadzono w dniu 03.09.2013 roku. Badania CPTU zrealizowane zostały sondą statyczną Hyson 200kN produkcji holenderskiej firmy H.P. van der Berg Machinefabriek. Sonda ta kwalifikuje się do I kategorii penetratorów [ISSMGE 1999]. W badaniach wykorzystano piezostożki elektryczne, których konstrukcja spełnia wymagania standardu testu CPTU. Podstawę do identyfikacji warunków geotechnicznych podłoża stanowiły oryginalne, zarejestrowane podczas realizacji testu, charakterystyki przedstawiające rozkłady z głębokością profilu: oporów stożka, tarcia na tulei czarnej oraz nadwyżki ciśnienia wody w porach. Do określenia budowy stratygraficznej podłoża oraz oszacowania wartości parametrów fizycznych, mechanicznych i cech wskaźnikowych wydzielonych w podłożu warstw gruntów wykorzystano opracowane w Instytucie Budownictwa i Geoinżynierii UPP systemy klasyfikacyjne



Ryc. 1. Lokalizacja polderu Majdany (opracowano na podstawie OpenStreetMaps.org CC-BY-SA 2.0)
Fig. 1. Location of polder Majdany (the map was compiled based on OpenStreetMaps.org CC-BY-SA 2.0)



Ryc. 2. Lokalizacja punktów sondowania CPTU na polderze Majdany (opracowano na podstawie OpenStreetMaps.org CC-BY-SA 2.0)

Fig. 2. Location of CPTU test points (the map was compiled based on OpenStreetMaps.org CC-BY-SA 2.0)

i procedury interpretacyjne dla gruntów aluwialnych [Tschuschke 2006a]. Dodatkowo, w ramach testów statycznego sondowania, w momencie zatrzymania penetracji piezostożka, przeprowadzono testy dyssypacji nadwyżki ciśnienia wody w porach. Generowana podczas penetracji piezostożka nadwyżka ciśnienia wody w porach, w momencie zatrzymania stożka na wybranej głębokości ulega rozproszeniu w funkcji czasu. Graficzny obraz wyników tego testu prezentują krzywe dyssypacji ciśnienia wody w porach (ryc. 3). Analiza krzywych dyssypacji umożliwia wyznaczenie dwóch charakterystycznych parametrów związanych z obecnością wody w profilu gruntowym, tzn. określenia rzędnej ustabilizowanego poziomu wody gruntowej w odniesieniu do głębokości, na której przeprowadzony był test dyssypacji oraz oszacowania wartości współczynnika wodoprzepuszczalności. Pierwszy z parametrów wyznacza się z krzywej dyssypacji, jako wartość ciśnienia ustabilizowanego po całkowitej dyssypacji ciśnienia wody w porach:

$$H = z - u_o$$

gdzie:

H – głębokość wody w profilu,

z – głębokość penetracji stożka, na której przeprowadzono test dyssypacji ciśnienia wody w porach,

u_o – końcowe ciśnienie wody po całkowitej dyssypacji nadwyżki ciśnienia.

W celu oszacowania współczynnika wodoprzepuszczalności warstw gruntu, w obrębie których prowadzone były testy dyssypacji nadwyżki ciśnienia wody w porach, wykorzystano oryginalną procedurę Pareza i Fauriela [Mayne 2007], bazującą na kształcie krzywej dyssypacji. Parametrem krzywej dyssypacji, na podstawie którego szacuje się współczynnik wodoprzepuszczalności jest czas potrzebny do 50% rozproszenia nadwyżki ciśnienia wody w porach:

$$k = (251 \cdot t_{50})^{-1,25} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$$

gdzie:

t_{50} – czas potrzebny do rozproszenia 50% nadwyżki ciśnienia wody w porach.

Analiza krzywych penetracji z badania CPTU oraz krzywych dyssypacji ciśnienia wody w porach umożliwiła opracowanie przekroju hydrogeologicznego, na którym umieszczono szczegółowe dane opisujące wodoprzepuszczalność gruntów budujących podłoże polderu (ryc. 4).

Wartości współczynnika filtracji dla podłoża w obrębie czaszy polderu przyjęto uśredniając wartości uzyskane na podstawie analizy wyników CPTU. W pierwszej kolejności uśredniono wartość współczynnika filtracji dla poszczególnych punktów pomiarowych, jak dla przepływu równoległego do warstw:

$$k_z = \frac{\sum k_i m_i}{\sum m_i}$$

gdzie:

m_i – miąższość i -tej warstwy,

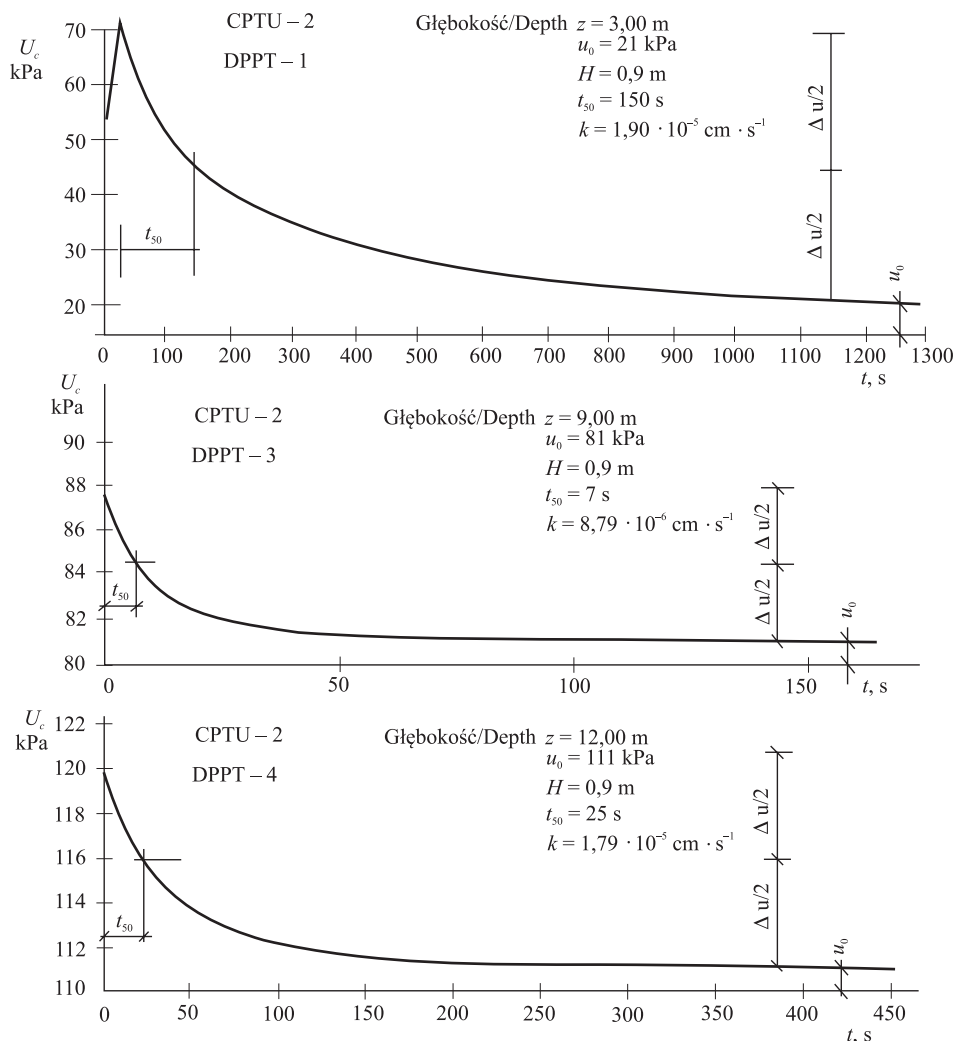
k_i – współczynnik filtracji i -tej warstwy.

Zastępczy współczynnik filtracji dla całej czaszy wyznaczono jak dla przepływu prostopadłego do warstw z zależności:

$$k_z = \frac{\sum l_i}{\sum \frac{l_i}{k_{zi}}}$$

gdzie:

- k_{zi} – współczynnik przypisany punktowi pomiarowemu (uśredniony),
- l_i – odległość między punktami pomiarowymi.



Ryc. 3. Przykładowe krzywe dyssypacji nadwyżek ciśnienia wody w porach
 Fig. 3. Examples of dissipation curves of excess pore water pressure

Do obliczeń przyjęto zastępczy współczynnik filtracji w podłożu $k_p = 7,63 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Oprócz sondowań statycznych w obrębie polderu wykonano także klasyczne płytkie odwierty geotechniczne i sondowania dynamiczne na wałach cieków Rgilewki i Warty. Pobrano próbki gruntów do oznaczenia składu granulometrycznego. Wyniki badań umożliwiły określenie współczynników wodoprzepuszczalności korzystając z nomogramu Bayera. Do obliczeń przyjęto uśredniony współczynnik, jak dla przepływu równoległego do warstw w wybranym profilu wału. Otrzymano wartość $k_z = 5,61 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Przeprowadzono także kompleksowe rozpoznanie gleboznawcze na terenie polderu. Obejmowało ono analizę map glebowo-genetycznych i glebowo-rolniczych oraz rekonesansowe badania pedogentyczne. Wyznaczono trzy reprezentatywne pedony. Z poszczególnych poziomów genetycznych w każdym pedonie zostały pobrane próbki gleb, zarówno o nienaruszonej, jak i o uszkodzonej strukturze. Badania laboratoryjne umożliwiły określenie podstawowych właściwości gleby a także wskaźnika wodoprzepuszczalności w warstwie o miąższości jednego metra. Po uśrednieniu, do obliczeń przyjęto wartość $k_z = 7,19 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Z uwagi na zbliżone wartości współczynnika filtracji warstwy gleby oraz korpusu wałów, w dalszych rozważaniach (symulacjach) przyjęto taką samą wartość dla obydwu, rekomendując wartość wyższą.

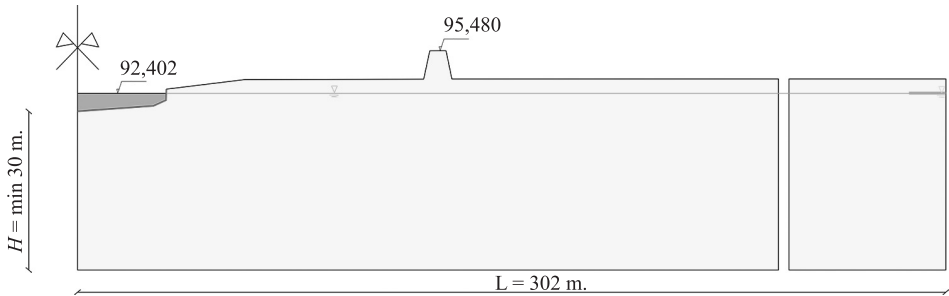
Pomiary geodezyjne, przekrój poprzeczny. W obrębie polderu Majdany wykonano również pomiary geodezyjne, między innymi w kilku charakterystycznych przekrojach poprzecznych. Pomiary wykonano zestawem GPS Sokkia GRX-1 o dokładności dla współrzędnych położenia X i Y równej $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm}$ a dla współrzędnej Z wynoszącej odpowiednio $20 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm}$. Do analizy wybrano przekrój P4, w którym zlokalizowano punkty sondowań CPTU (ryc. 2).

NUMERYCZNY MODEL FILTRACJI

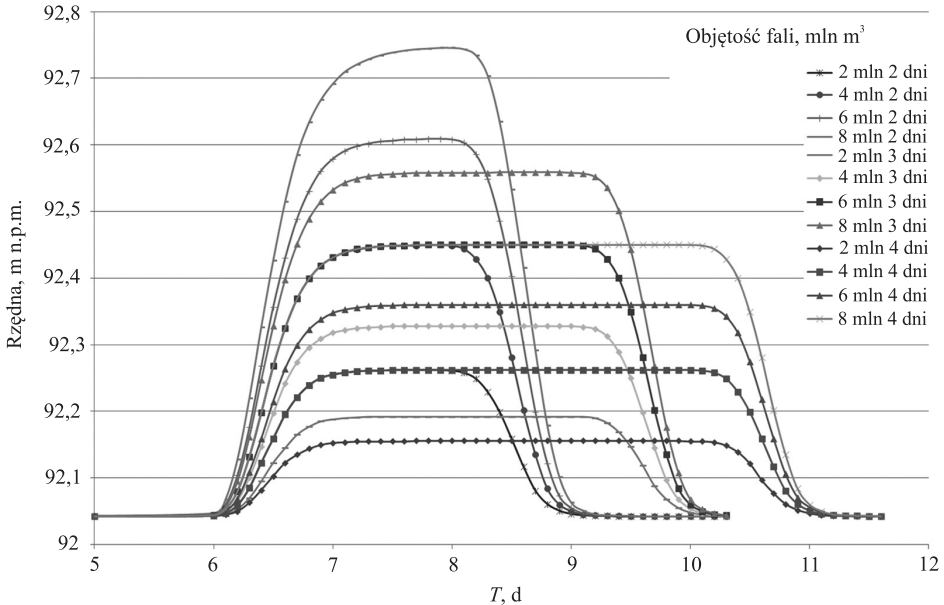
Zastosowany opis matematyczny procesu filtracji w podłożu gruntowym obejmuje strefę saturacji oraz aeracji. Przyjęto równanie Richardsa w formie ciśnieniowej. Jest to nieliniowe równanie różniczkowe rzędu drugiego o funkcyjnych współczynnikach wyrażających przewodność hydrauliczną ośrodka porowatego, stałą w strefie nasyconej i zależną od ciśnienia ssącego w strefie nienasyconej. Taki sposób analizy filtracji umożliwia realizację obliczeń w znanym obszarze przepływu i nie wymaga żmudnego, iteracyjnego (często też nieskutecznego) poszukiwania położenia krzywej depresji. Podstawy teoretyczne takiego podejścia do zagadnienia, można znaleźć na przykład w pracach [Fredlund i Rahardjo 1993, Sroka i in. 2004]. Rozwiązanie uzyskano z wykorzystaniem metody elementów skończonych [Sroka i in. 2004, Zienkiewicz i Taylor 2013] implementowanej w pakiecie oprogramowania komputerowego Hydrus. Obliczenia prowadzono poszukując rozkładu ciśnień (poszukiwana funkcja) w wyróżnionych punktach (węzłach) obszaru filtracji. Jako warunek początkowy przyjęto hydrostatyczny rozkład ciśnień w ośrodku gruntowym. Na brzegu stykającym się z korytem rzeki przyjęto zmienny w czasie warunek brzegowy, przypisując poszczególnym węzłom na brzegu stosowną wartość ciśnienia, zgodną z przebiegiem fali.

Obliczenia przeprowadzono dla wybranego przekroju poprzecznego przez rzekę Wartę oraz przez teren przyległy schematycznie zaprezentowanego na ryc. 5. Przyjęto

miąższość warstwy przepuszczalnej 30 m. Prawy brzeg obszaru filtracji odsunięto na odległości 302 m od osi rzeki Warty. Na podstawie symulacji obliczeń hydraulicznych (przepływu w korycie) dla przepływu SNQL uzyskano rzędną wody w korycie równą 92,042 m n.p.m. Wzdłuż brzegu koryta (czerwony kolor na ryc. 5) przyjęto zmienny w czasie warunek brzegowy I rodzaju – zadana wysokość ciśnienia hydrostatycznego. Hydrogram stanów (ryc. 6) uzyskano na podstawie symulacji przepływu w korycie przeprowadzonego systemem SPRUNER. Analizowano w sumie 12 hipotetycznych przebiegów fali, zmieniając wielkości zrzutu – 2, 4, 6, 8 mln m³ oraz czas jego trwania – 2, 3 i 4 doby. W tabeli 1 zestawiono maksymalne rzędne w analizowanym przekroju, dla poszczególnych fal.



Ryc. 5. Schemat obliczeniowy. Położenie krzywej zerowych ciśnień dla warunku początkowego
Fig. 5. Calculation scheme. Position of the zero pressure curve for the initial condition



Ryc. 6. Hydrogramy stanów dla przekroju Majdany w zależności od wielkości zrzutów ze zbiornika Jeziorsko i okresu jego trwania

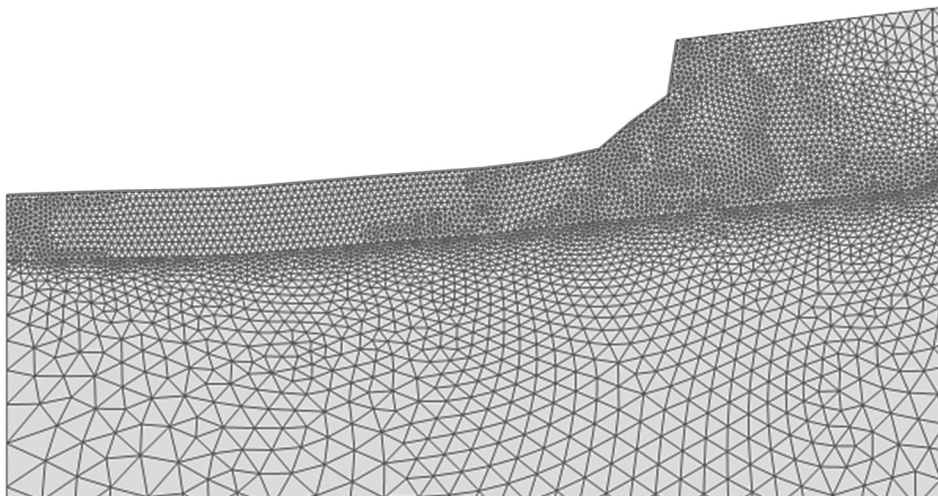
Fig. 6. Hydrograms of states for the section Majdany depending on the size of discharges from the reservoir Jeziorsko and its duration

Tabela 1. Zestawienie maksymalnych rzędnych zwierciadła wody w korycie Warty w analizowanym przekroju

Table 1. Summary of the maximum elevations of the water table in the Warta river bed in the analyzed section

Objętość zrzutu mln m ³ Volume of discharge million m ³	Max. rzędna fali w przekroju m n.p.m. Max. wave elevation in section m a.s.l. dla czasu, d for time, d			Różnica do rzędnej 92,042 The difference to the elevation 92.042 m dla czasu, d for time, d		
	2	3	4	2	3	4
2	92,262	92,192	92,156	0,220	0,150	0,114
4	92,450	92,328	92,262	0,408	0,286	0,220
6	92,609	92,450	92,360	0,567	0,408	0,318
8	92,746	92,559	92,450	0,704	0,517	0,408

Na pozostałych częściach brzegu przyjęto brak przepływu $q_n = 0$. Dla każdego zadania zastosowano taką samą siatkę podziału na elementy skończone składającą się z 10586 węzłów, 20666 elementów trójkątnych oraz 855 elementów 1D (do dyskretyzacji brzegów oraz krzywych wewnętrznych). Siatkę zagęszczono w pobliżu koryta Warty tak aby zapewnić dobre odwzorowanie nieustalonego procesu dla modelu. W pobliżu koryta rzeki i w najbliższym sąsiedztwie długość boku elementu była rzędu 0,1 m, a w pozostałej części obszaru około 2,0 m (ryc. 7).



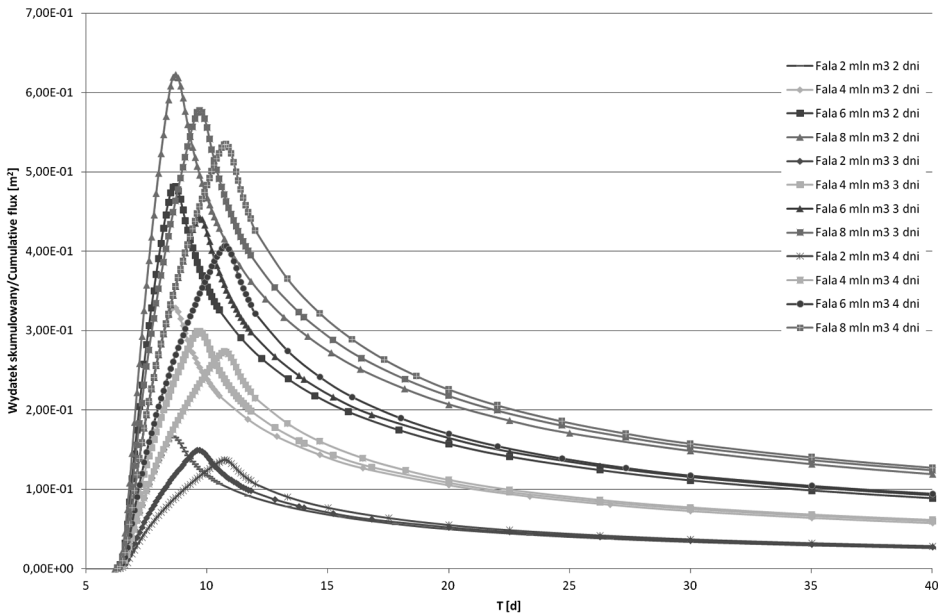
Ryc. 7. Podział obszaru filtracji w pobliżu koryta Warty na elementy trójkątne

Fig. 7. Division of the seepage area near the Warta River to the triangular elements

Obliczenia prowadzono ze zmiennym krokiem czasowym ($\min = 1e-5$ d, $\max = 5$ d) rozpoczynając od 0.0001 doby. Symulację prowadzono do czasu, w którym stwierdzono ustabilizowanie się zwierciadła wody gruntowej – do 100 doby.

WYNIKI OBLICZEŃ

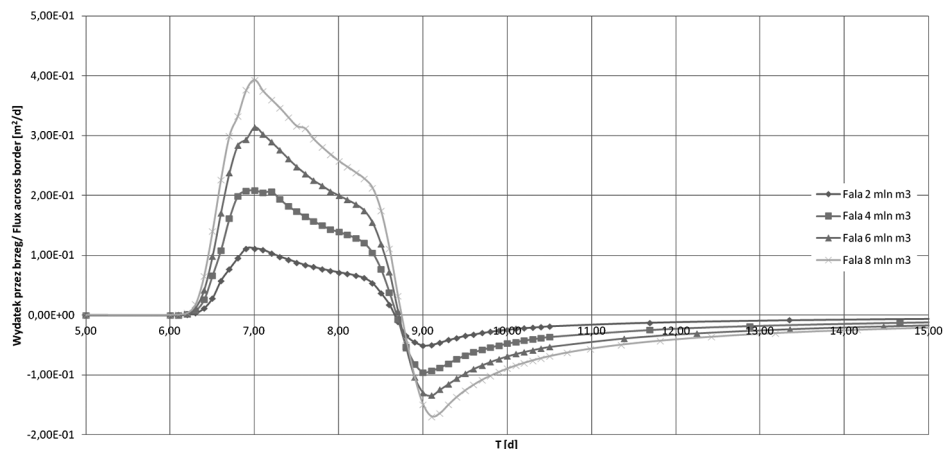
Uzyskany z obliczeń zmienny w czasie skumulowany wydatek jednostkowy przez brzeg koryta rzeki przedstawiono na ryc. 8. Wartość na osi pionowej przedstawia zatem objętość wody, która infiltrowała z koryta rzeki do gruntu od początku przejścia fali zrzutu a przypadająca na jeden metr biegu rzeki. Po przejściu fali rzędne w korycie układają się poniżej zwierciadła wody gruntowej i następuje przepływ w kierunku przeciwnym – wypływ z gruntu do cieku. Występujące ekstremum skumulowanego wydatku może być przyjęte jako miara strat filtracyjnych zrzutu zasilającego przepływ niżówkowy w cieku.



Ryc. 8. Skumulowany wydatek przez koryto Warty w analizowanym przekroju ($1/2 Q_{cum}$) w zależności od czasu trwania oraz wielkości zrzutu

Fig. 8. Cumulative seepage rate through the Warta channel in the analyzed section ($1/2 Q_{cum}$), depending on the duration and size of the discharge

Przepływ przez brzeg obszaru filtracji stykający się z korytem Warty zilustrowano dla wybranego czasu zrzutu równego dwóm dobom na ryc. 9.



Ryc. 9. Wydatek przez brzeg w zależności od czasu oraz wielkości zrzutu dla czasu trwania zrzutu 2 doby

Fig. 9. Seepage rate across the shore depending on time and discharge size for the 2 day dump

Charakterystyczne wartości maksymalnego wydatku oraz maksymalnego wydatku skumulowanego zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie skumulowanego wydatku przez dno koryta Warty dla poszczególnych scenariuszy

Table 2. A summary of the cumulative discharge through the bottom of the Warta river bed for each scenario

Objętość zrzutu mln m ³ Volume of discharge million m ³	Maksymalny Q_{cum} , m ² Max. Q_{cum} , m ² dla czasu, d for time, d			Max przepływ przez brzeg m ² · d ⁻¹ Max flow through the river bed m ² · d ⁻¹ dla czasu, d for time, d		
	2	3	4	2	3	4
2	3,34E-01	2,99E-01	2,75E-01	2,23E-01	1,46E-01	1,09E-01
4	6,60E-01	5,99E-01	5,47E-01	4,17E-01	2,87E-01	2,23E-01
6	9,63E-01	8,86E-01	8,13E-01	6,28E-01	3,37E-01	3,37E-01
8	1,25E+00	1,15E+00	1,07E+00	7,85E-01	5,50E-01	4,17E-01

PODSUMOWANIE

Straty filtracyjne wyznaczono na odcinku rzeki Warty o długości 78,5 km od zbiornika Jezioro do miasta Konin (Konin-Morzysław), dla którego analizowany przekrój leży pośrodku. Obliczone objętości strat filtracyjnych na tym odcinku oraz ich udział procentowy w całej objętości zrzutu dla wszystkich wariantów zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Objętość wody filtrującej z koryta Warty na odcinku od Skęczniewa (zapora Jeziorsko do Konina (Morzysław)

Table 3. The volume of water filtrated from Warta bed at the length from Skęczniew (Jeziorsko dam) to Konin (Morzysław)

Objętość zrzutu mln m ³ Volume of discharge million m ³	Objętość wody filtrującej z koryta m ³ Volume of water filtrated from bed m ³ dla czasu, d for time, d			Procent objętości zrzutu % Percent of discharge volume % dla czasu, d for time, d		
	2	3	4	2	3	4
	2	26203	23503	21556	1,31%	1,18%
4	51779	47037	42955	1,29%	1,18%	1,07%
6	75580	69520	63852	1,26%	1,16%	1,06%
8	97780	90652	83979	1,22%	1,13%	1,05%

Oszacowane straty dla wszystkich analizowanych wariantów zrzutu nie są duże. Największe straty, bo na poziomie 1,31% objętości wystąpiły dla zrzutu o objętości 2 mln m³ przeprowadzonego w czasie dwóch dób. Zauważyć można, że udział procentowy strat filtracyjnych w objętości zrzutu alimentacyjnego spada wraz z wydłużaniem się czasu trwania oraz wraz ze zwiększaniem się jego wielkości – w analizowanych wariantach do wartości 1,05%. Czterokrotny wzrost objętości zrzutu powoduje również prawie czterokrotny wzrost strat filtracyjnych, jednak ich udział procentowy maleje. Przy zwiększaniu się czasu trwania zrzutu zasilającego obserwuje się także zmniejszanie strat filtracyjnych. W obydwóch przypadkach zmiany procentowego udziału mają charakter zbliżony do liniowego. Należy zaznaczyć, że dobre oszacowanie strat filtracyjnych na długim odcinku (np. około 240 km od Skęczniewa do Poznania) wymaga szczegółowego rozpoznania geotechnicznego, układu warstw i ich przewodności hydraulicznej w kilku reprezentatywnych przekrojach. W każdym takim przekroju należy wtedy powtórzyć symulacje analogiczne do przedstawionych w niniejszej pracy.

PIŚMIENNICTWO

- Bates, P.D. (2012). Integrating remote sensing data with flood inundation models: How far have we got? *Hydrological Processes*, 26, 16, 2515–2521.
- Chudziak, Ł. (2013). Identyfikacja parametrów filtracyjnych w strefie współdziałania wód powierzchniowych i podziemnych. Uniwersytet Adama Mickiewicza, Poznań.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons, New York 1993.
- ISSMGE, I. (1999). International reference test procedure for the cone penetration test (CPT) and the cone penetration test with pore pressure (CPTU). Report of the ISSMGE Technical Committee, 16.
- Laks, I., Kałuża, T., Sojka, M., Walczak, Z., Wróżyński, R. (2013). Problems with modelling water distribution in open channels with hydraulic engineering structures. *Rocz. Ochr. Środ.*, 15(1), 245–257.

- Laks, I., Sojka, M., Walczak, Z., Wróżyński, R. (2017). Possibilities of using low quality digital elevation models of floodplains in hydraulic numerical models. *Water*, 9(4).
- Lyczko, W., Chalfen, M., Pływaczyk, L. (2014). Ocena możliwości podniesienia poziomu wód gruntowych poniżej stopnia piętrzącego Malczyce. *Inżyn. Ekol.*, 39, 95–104.
- Mayne, P.W. (2007). Cone penetration testing. Transportation Research Board, Washington DC.
- Mioduszewski, W., Ślesicka, A., Querner, E. (2004). Warunki zasilania doliny dolnej Biebrzy. *Woda Środ. Obsz. Wiej.*, 4, 67–78.
- Przedwojski, B., Przybyłek, J., Rembeza, L. (1993). Wpływ zbiornika Jeziersko na stosunki wodne w dolinie Warty. *Zesz. Nauk. AR Wrocław, Inżynieria Środowiska*, 4, 181–196.
- Rembeza, L. (1998). Przepływ wody i zanieczyszczeń w gruncie. Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Poznań.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M. T., Šejna, M. (2014). The HYDRUS software package for simulating two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, version 2. Technical manual, version 1, 241.
- Sroka, Z., Walczak, Z., Wosiewicz, B. J. (2015). Modelowanie filtracyjnego zasilania i odpływu z polderu Majdany. [W:] *Problemy modelowania pracy zbiornika przyrzecznego*. Red. B.J. Wosiewicz. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego, Poznań, 113–136.
- Sroka, Z., Wosiewicz, B., Walczak, Z. (2004). Analiza ustalonych przepływów wód gruntowych metodą elementów skończonych: Oprogramowanie inżynierskie. Wydawnictwo AR, Poznań.
- Traczyński, K., Greła, M. (2011). Wpływ zmian poziomu wód gruntowych wywołanych powodziowym stanem rzeki Wisły na warunki zabudowy w rejonie Warszawy. *Biuletyn PIG*, 446, 2, 493–497.
- Tschuschke, W. (2006a). Badania gruntu in situ. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 3, 181–188.
- Tschuschke, W. (2006b). Sondowania statyczne w odpadach poflotacyjnych. *Politechnika Śląska, Zesz. Nauk., Budownictwo*, 110.
- Tschuschke, W., Kumor, M. K., Walczak, M., Tschuschke, M. (2014). Cone penetration test in assessment of soil stiffness. *Geological Quarterly*, 59(2), 419–425.
- Urząd Marszałkowski Województwa Łódzkiego (2014). Decyzja w sprawie zmiany pozwolenia wodnoprawnego na piętrzenie i retencjonowanie wód rzeki Warty w zbiorniku Jeziersko: RŚ VI. 7322.3.2.2011.MC., Łódź.
- Walczak, N., Walczak, Z., Hämmerling, M. (2013a). Analytical model for vertical velocity distribution and hydraulic roughness at the flow trough river bed and valley with vegetation. *Rocz. Ochr. Środ.*, 15, 405–419.
- Walczak, N., Zawadzki, P., Walczak, Z. (2013b). Próba wykorzystania równania erguna do określania współczynnika szorstkości terenów zalewowych. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 12(3), 131–139.
- Walczak, Z., Sojka, M., Wróżyński, R., Laks, I. (2016). Estimation of Polder Retention Capacity Based on ASTER, SRTM and LIDAR DEMs: The Case of Majdany Polder (West Poland). *Water*, 8, 6, 230.
- Worsa-Kozak, M., Kotowski, A., Wartalski, A. (2008). Monitoring stanów wód podziemnych w rejonie Śródmiejskiego Węzła Wodnego we Wrocławiu. *Przegl. Geol.*, 56(4), 302–307.
- Wosiewicz, B. J., Laks, I., Sroka, Z. (2013). Dwadzieścia lat systemu analizy i prognozowania nieustalonych przepływów w rzekach nizinnych SPRuNeR. *Gospodarka Wodna*, 10.
- Yan, K., Di Baldassarre, G., Solomatine, D. P., Schumann, G. J. (2015). A review of low-cost space-borne data for flood modelling: Topography, flood extent and water level. *Hydrological Processes*, 29, 15, 3368–3387.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. (2013). *The finite element method*. McGraw-Hill, London, 2013.

REDUCTION OF THE WARTA RIVER FLOW CAUSED BY SEEPAGE FROM RIVER BED, DURING ADDITIONAL DISCHARGE FROM JEZIORSKO RESERVOIR

Abstract. Reduction of discharge from Jeziorsko reservoir supplementing flow in Warta River was analysed. Reduction was caused by seepage from river bed along the stretch of 80 km. Twelve hypothetical waves were analyzed according to the size and duration of the discharge. The parameters determining the seepage properties of the soil were determined on the basis of in situ test and field measurements carried out on the area of Majdany polder, in the cross section located in the half the length of analyzed stretch. Cumulative seepage flow and unit discharge through the river bed were determined. For all simulation, losses were compared with discharge volumes from Jeziorsko reservoir. It has been shown that the losses at the analysed river stretch are not large and reach a maximum of 1.3% of the discharge volume. The percentage decreases with increasing discharge volume and its duration. The solutions were obtained using FEM implemented in the Hydrus computer software package, which allows analysis of unsteady seepage flow with time-varying boundary conditions.

Key words: seepage, seepage from river bed, FEM, Hydrus, time variable boundary conditions.

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 1.12.2017.

Do cytowań – For citation: Walczak, Z., Sroka, Z., Tschuschke, W., Stefanek, P., Wrzosek, K. (2017). Straty filtracyjne zrzutów ze zbiornika jeziorsko zasilających przepływy niżówkowe Warty. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 16(4), 217–232.