

Zastosowanie metody statystycznej HSTP do oceny procesów degradacji zapory w Kozłowej Górze na podstawie pomiarów piezometrycznych

Application of HSTP method used to analysis of piezometric levels measurements of Kozłowa Góra dam

Piotr PRZECHERSKI, Krzysztof RADZICKI

Politechnika Krakowska, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Zakład Budownictwa Wodnego i Gospodarki Wodnej, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, Polska, tel. (12) 628 31 12, (12) 628 28 53, e-mail: przecherski.piotr@gmail.com, Krzysztof.Radzicki@iigw.pk.edu.pl

Stéphane BONELLI

National Research Institute of Science and Technology for Environment and Agriculture, Department of Waters, The Antony Centre, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes, CS 10030, 92761 Antony Cedex, France, tel. +33 (0)1 40 96 61 21

Andrzej SIUDY

Górnośląskie Przedsiębiorstwo Wodociągów S.A., 40-026 Katowice, ul. Wojewódzka 19, Polska

Streszczenie. W artykule przedstawiono wykorzystanie modelu HSTP do analizy pomiarów piezometrycznych z zapory Kozłowa Góra. Model HSTP jest modelem statystycznym, umożliwiającym określanie wpływu kilku, głównych czynników na zmienność wartości analizowanych pomiarów, ale w szczególności pozwalającym wyznaczać trendy zmian nieodwracalnych w ciągu pomiarów. Pozwala to identyfikować oraz określać dynamikę szeregu zjawisk mogących stanowić istotne zagrożenie dla bezpieczeństwa zapory, takich jak na przykład erozja wewnętrzna lub kolmatacja. Model ten jest w wielu krajach jednym z podstawowych, a nawet obligatoryjnych, narzędzi w ocenach stanu zapór betonowych oraz ziemnych, stosowanym już od kilkudziesięciu lat. Aplikacja modelu HSTP do analizy zmienności ciśnień piezometrycznych wykazała iż w badanym okresie czasu w zaporzce Kozłowa Góra i jej podłożu nie zachodzą zmiany charakteryzujące się dużą dynamiką wynikające z rozwoju procesów filtracyjno-erozyjnych.

1. Wprowadzenie

Zjawiska reologiczne zachodzące w korpusie lub podłożu zapory, np. erozja wewnętrzna, starzenie się budowli, kolmatacja mogą stanowić istotne zagrożenie dla bezpieczeństwa obiektu piętrzącego zwłaszcza w przypadku ich dynamicznego rozwoju. Dlatego też wymagają identyfikacji oraz rozpoznania dynamiki w celu określenia stanu obiektu oraz stopnia ewentualnego jego zagrożenia, jak również, w kolejnym kroku, podjęcia ewentualnych środków zaradczych.

Jedną z metod służącą temu jest analiza pomiarów z systemów technicznej kontroli zapór modelami statystycznymi, które umożliwiają zidentyfikowanie wpływów pochodzących od zjawisk odwracalnych i wydzielenie trendów nieodwracalnych. Metody te od kilkudziesięciu lat są podstawowymi metodami analizy danych pomiarowych z zapór w wielu krajach, na przykład we Francji, gdzie ich zastosowanie jest obowiązkiem prawnym [Łaptaś i in. 2006]. W Polsce metody te mają udokumentowaną historię aplikacji [Dobosz 1980; Opyrczał 1998] ale są stosowane sporadycznie.

Opisana w artykule statystyczna metoda analizy danych pomiarowych została opracowana pod koniec lat 60. przez francuską firmę EDF pod nazwą modelu HST (Hydrostatic, Season, Time). Na początku lat 80. rozbudowano ją o człon P (Precipitation) uwzględniający również wpływ opadów atmosferycznych. Powstało narzędzie, model HSTP, bardzo przydatne w ocenach stanu zapór ziemnych.

Model ten został zastosowany do analizy siedmioletniego okresu pomiarów poziomu zwierciadeł piezometrycznych na zaporze Kozłowa Góra. Najważniejsze elementy i wnioski z tej analizy przedstawiono w niniejszym artykule.

2. Model statystyczny HSTP

2.1. Podstawowe założenia modelu

Na zmiany zachodzące w korpusie zapory i jej podłożu ma wpływ wiele czynników zarówno wewnętrznych, jak i zewnętrznych. Dla rozpoznania tych zjawisk, ich przebiegu oraz wzajemnego powiązania należy wyodrębnić najważniejsze z nich oraz dokonać ich analizy. W modelu HSTP uwzględniono następujące czynniki:

- wpływ piętrzenia H ,
- wpływ sezonowości rocznej S ,
- wpływ zmian nieodwracalnych T ,
- wpływ opadu atmosferycznego P .

Uwzględniając je, ogólne równanie modelu jest następujące:

$$Y_n = Y_0 + H_n + S_n + T_n + P_n; \quad y_n = Y_n + \varepsilon_n \quad (1)$$

gdzie wartości Y_n są modelowane względem wartości pomiarów y_n z błędem ε_n , a Y_0 jest wartością stałą.

Kompletny model HSTP zawiera maksymalnie 18 parametrów (w zależności od analizowanego przypadku ich ilość może być zredukowana), których wartości są obliczane metodą wielokrotnej regresji liniowej, celem jak najlepszego dopasowania modelu z pomierzonymi danymi poprzez zastosowanie metody najmniejszych kwadratów i poszukiwanie największej wartości współczynnika determinacji R^2 . Wiarygodność analizy badana jest za pomocą kryterium Fichera-Snedecora, które weryfikuje czy ilość danych pomiarowych jest odpowiednio liczna w stosunku do ilości zmiennych. W metodzie HSTP zazwyczaj przyjmuje się poziom ufności 5%, dla którego współczynnik determinacji R^2 powinien mieć wartość większą niż 0,45 [Bonelli i in. 2005; Łaptaś i in. 2006].

Przy aplikacji modelu HSTP należy pamiętać, że jest to relatywnie prosty model liniowy. W przypadku zmian ciśnienia charakteryzujących się przebiegiem opisywanym histerezą w funkcji stanów zbiornika, związanych na przykład z obecnością powietrza w „nasyconym” ośrodku gruntowym, w niektórych przypadkach może nie być on wystarczający do poprawnego odwzorowania danych pomiarowych [Bonelli, Radzicki 2008, 2011].

2.2. Opis członów modelu HSTP

Każdy z występujących w równaniu (1) członów (wpływów) jest opisany charakterystyczną dla niego funkcją, które szerzej przedstawiono poniżej.

- Wpływ piętrzenia H opisuje funkcja wielomianowa 4. stopnia dla zredukowanej rzędnej (z) poziomu piętrzenia $Z(t)$ w analizowanym czasie t .

$$H_n = a_1 z_n + a_2 z_n^2 + a_3 z_n^3 + a_4 z_n^4 \quad z_n = \frac{Z(t_n) - \bar{Z}}{\sigma} \quad (2)$$

gdzie: \bar{Z} i σ są wartością średnią i odchyleniem standardowym dla wartości poziomów piętrzenia w analizowanym okresie czasu.

Wpływ H można wyrazić jako wartość zmiany poziomu zwierciadła piezometrycznego w centymetrach w stosunku do 1 metra zmiany poziomu piętrzenia wody w zbiorniku.

- Wpływ sezonowości. W określeniu wpływu sezonowości na wyniki pomiarów odgrywa rolę wiele czynników, z których najważniejszymi są sezonowa zmienność poziomu zwierciadła wody w zbiorniku oraz temperatury. Wpływ sezonowości S jest opisany przez sumę dwóch funkcji sinusoidalnych o okresach odpowiednio jednego roku i sześciu miesięcy, które tworzą dwa pierwsze człony rozwinięcia szeregu Fouriera.

$$S_n = b_1 \sin(\omega t_n) + b_2 \cos(\omega t_n) + b_3 \sin^2(\omega t_n) + b_4 \sin(\omega t_n) \cos(\omega t_n); \omega = 2\pi / 365 \quad (3)$$

- Wpływ trwałych zmian. W przypadku trwałych zmian w położeniu poziomu piezometrycznego zwierciadła wód, mogą one nastąpić przede wszystkim w związku ze starzeniem się budowli, erozją wewnętrzną, kolmatacją lub inną przyczyną powodującą zmianę parametrów ośrodka gruntowego, wpływającą na ułatwienie lub zablokowanie przepływu wody. Wpływ zmian nieodwracalnych T jest reprezentowany przez sumę liniowych składników, w funkcji czasu zredukowanego $\tau(t)$ w okresie od t_i , do t_f , następująco:

$$T(t) = c_1 \tau + c_2 e^\tau + c_3 e^{-\tau} \quad \text{gdzie} \quad \tau(t) = \frac{t - t_i}{t_f - t_i} \quad (4)$$

W analizie ciśnień piezometrycznych wpływ czasu jest wyrażany jako dodatnia lub ujemna trwała zmiana poziomu piezometrycznego w centymetrach w analizowanym okresie. Szczególnie istotne jest zwrócenie uwagi na wykładniczy wzrost wartości trwałej zmienności poziomu piezometrycznego w czasie.

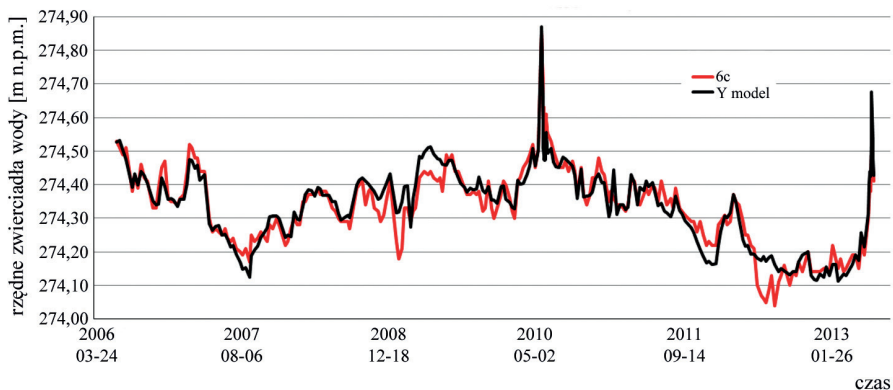
- Wpływ opadów. Wpływ opadów atmosferycznych jest modelowany przy pomocy zmiennych $p_k(t)$, które są średnią opadu z siedmiu dni liczoną dla kolejnych poprzednich k tygodni. W większości przypadków najistotniejszy dla modelowania jest człon ostatniego tygodnia pomiarów.

$$P(t) = d_1 p_1(t) + d_2 p_2(t) + d_3 p_3(t) + d_4 p_4(t) + d_5 p_5(t) + d_6 p_7(t) \quad (5)$$

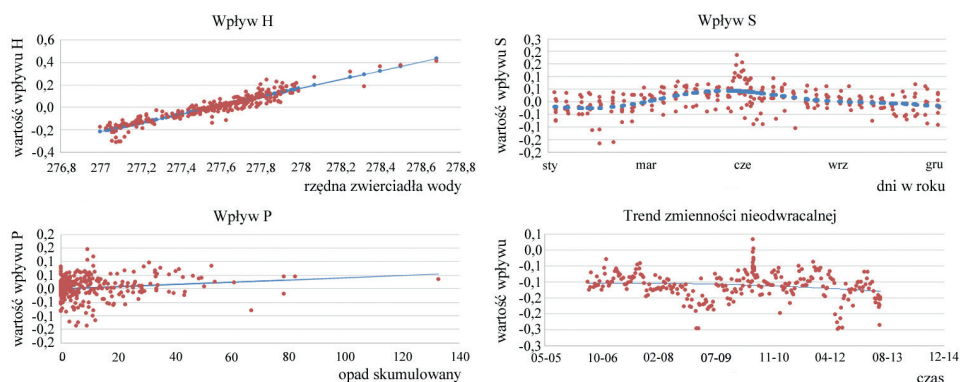
2.3. Przykład zamodelowania pojedynczej serii danych piezometrycznych

Na rys. 1 przedstawiono przykład odwzorowania modelem HSTP pomiarów piezometrycznych pomierzonych w piezometrze 6C zapory czołowej Kozłowa Góra w okresie 01.06.2006 – 21.06.2013. Współczynnik determinacji wyniósł

89,65%, a wartość parametru Fichera-Snedecora – 125,29. Na rys. 2 znajdują się wykresy obrazujące odwzorowanie przez model (linia ciągła) każdego z modelowanych wpływów w stosunku do rzeczywistych pomiarów (punkty).



Rys. 1. Dopasowanie funkcji obliczonej za pomocą modelu do rzeczywistego poziomu wody w piezometrze 6C



Rys. 2. Odwzorowanie przez model HSTP wpływów odwracalnych oraz trwałego trendu dla pomiarów zrealizowanych w piezometrze 6C

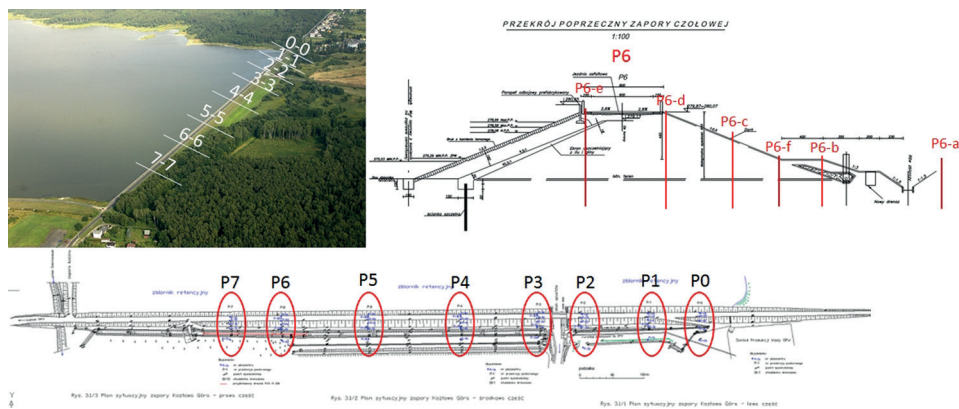
3. Analiza wyników pomiarów piezometrycznych zapory Kozłowa Góra

3.1. Krótka charakterystyka zapory

Zbiornik Kozłowa Góra został wybudowany w 28,0 km rzeki Brynicy w latach 1935-1938 z przeznaczeniem magazynowania wody dla celów obronnych (zatonienia doliny poniżej zapory). Obecnie głównym zadaniem zbiornika jest zaopatrzenie w wodę Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego.

Zapora czołowa typu ziemnego klasy II przegradza dolinę Brynicy na długości 1300 m. Wysokość zapory w najwyższym miejscu wynosi 8 m, normalny poziom piętrzenia – 278,08 m n.p.m., maksymalny poziom piętrzenia – 278,99 m n.p.m. Nasyp zapory czołowej o nachyleniu skarp 1:2,5 wykonany został z materiału miejscowego. Są to przede wszystkim okruchy skalne piaskowca i wapienia oraz piasek i piasek pylasty. Element szczelny zapory stanowi pochyły ekran iłowy o grubości 70 cm u podstawy i 18 cm u góry, sięgający do rzędnej 279,19 m n.p.m. Ekran przykryty jest warstwą gruntu (żwiru) o grubości 1,60 m, oraz położonym na niej brukiem kamiennym o grubości 30-35 cm osadzonym na zaprawie cementowej. W podłożu zapory na długości około 600 m wbita została drewniana ścianka szczelna połączona z ekranem iłowym, która prawdopodobnie nie została dogłębiona. Typowy przekrój poprzeczny przez zapórę pokazano na rys. 3.

Zabezpieczenie korony od strony wody górnej stanowi żelbetowy parapet pełniący funkcję falochronu. Po koronie zapory przebiega droga o nawierzchni asfaltowej. Skarpa odpowietrzna obsiana trawą rozdzielona jest ławeczką szerokości 4,0 m. Drenaż rurowy w obsypce filtra odwrotnego, poprowadzony wzdłuż ławeczki, ma za zadanie przechwytywać wodę przefiltrowującą przez korpus. Powódź w 2010 r. uszkodziła odcinek skarpy rowu drenażowego prawej części zapory w rejonie przekrojów piezometrycznych 6-6 i 7-7. Stało się to na skutek intensywnego naporu wody, przy braku dostatecznych zabezpieczeń przeciw filtracyjnym. W ramach prac naprawczych w 2012 r. przebudowano rów na długości ok. 200 m, jak również poprowadzono wzdłuż rowu dodatkowy rurociąg drenażowy ze studzienkami osadzonymi równoległe do starego rurociągu, z którym zapewniona jest współpraca nowego.



Rys. 3. Rozmieszczenie przekrojów piezometrycznych w zaporce, rozmieszczenie poszczególnych piezometrów w przekrojach piezometrycznych

3.2. Przygotowanie danych pomiarowych do analizy

Analizie modelem HSTP poddano dane piezometryczne z okresu od 01.06.2006 – 21.06.2013. W tym czasie prowadzone były codzienne pomiary opadu atmosferycznego. Natomiast odczyt poziomu zwierciadła wody w zbiorniku wykonywany był zazwyczaj co 10 dni, a w okresie wezbrań był zagęszczany do jednego dnia lub godzin.

W latach 2006-2007 rozpiętość stanów wody zmieniała się od rzędnej 278,41 m n.p.m. (roztopy wiosenne) do poziomu 277,00 m n.p.m., który miał miejsce na początku 2007 r. W latach 2008-2010 poziom piętrzenia utrzymywał się na ogół poniżej rzędnej roboczego poziomu piętrzenia, taki stan trwał do połowy maja 2010 r. Wówczas, w czasie wezbrania, poziom wody w zbiorniku osiągnął rzędną 278,68 m n.p.m. (było to najwyższe spiętrzenie powodziowe, jakie zanotowano w historii prowadzonych obserwacji na zbiorniku). W latach 2011-2013 poziom wody w zbiorniku utrzymywano z reguły poniżej poziomu roboczego z uwagi na uszkodzenia z 2010 r. W okresie od maja 2012 r. do końca pierwszego kwartału 2013 r. poziom utrzymywany był, z niewielkimi odchyleniami, blisko rzędnej 277,10 m n.p.m. [OTKZ 2013].

Na zaporze zainstalowanych jest 8 przekrojów piezometrycznych, w których do 2014 r. wykonywano ręcznie pomiary zwierciadeł piezometrycznych, średnio co dwa tygodnie z zagęszczeniem w trakcie wezbrań. Lokalizację przekrojów piezometrycznych na zaporze przedstawia rys. 3. Od 2014 r. w przekrojach piezometrycznych 1, 6 oraz 7 zainstalowano dodatkowo automatyczne czujniki ciśnienia.

W każdym przekroju pomiarowym zamontowanych jest od 5 do 8 piezometrów otwartych. Piezometry oznaczone literami E i D znajdują się na koronie zapory, C – w połowie skarpy odpowietrznej ponad ławeczką, F – na styku skarpy odpowietrznej i ławeczki. Piezometry B zlokalizowane są na krańcu odpowietrznym ławeczki, a piezometry A za rowem opaskowym. Podczas eksploatacji zapory niektóre piezometry zostały zakolmatowane. W takim przypadku w ich bezpośrednim sąsiedztwie zabijany był nowy piezometr. Usytuowanie piezometrów w przekroju zapory pokazane jest na rys. 3.

W analizowanym okresie zebranych zostało ponad 15000 danych pomiarowych, które przed aplikacją modelu HSTP poddano wstępnej obróbce w celu korekty grubych błędów pomiarowych. Wyłączono z analizy ciągi danych z piezometrów, które w analizowanym okresie nie dostarczyły odpowiedniej ilości danych pomiarowych (P7F, P6E, P4D, P1A, P0F). Zawierały one przerwy pomiarowe, wystarczająco duże lub liczne, które nie zapewniały odpowiedniej wiarygodności analizy statystycznej. W końcowym efekcie do modelowania wykorzystano 13350 danych.

3.3. Rezultaty analizy modelem HSTP pomiarów piezometrycznych zapory czołowej

Analizie modelem HSTP poddano dane piezometryczne z okresu 01.06.2006 – 21.06.2013. W dalszych analizach pominięto wyniki uzyskane dla piezometrów: P7A, P3F, P3A, P2A i P0A, ze względu na otrzymane dla nich za niskie wartości współczynnika determinacji R^2 , od 25 do 45% (tab. 1), w stosunku do założonego progu istotności. Niskie wartości tego współczynnika wskazują na inne istotne przyczyny zmienności zwierciadeł piezometrycznych niż te założone w modelu HSTP. Piezometry P0A i P2A, P3A położone są na przedpolu zapory, po drugiej stronie rowu opaskowego w stosunku do zapory. Reagują one w istotny sposób na zmiany poziomu wody gruntowej na zawalu [OTKZ 2013]. Dodatkowo, w piezometrze P3A wysokość ciśnienia zależy od intensywności pracy pompy odprowadzającej wodę z rowów drenażowych do koryta odpływowego [OTKZ 2013]. Natomiast piezometr P3F wskazuje najniższy poziom ciśnienia w całym przekroju P3. Być może układ filtracji wody został zaburzony dla tego piezometru poprzez wykonane w latach 90. zabiegi uszczelniania ekranu ilowego w rejonie przyczółka zapory [OTKZ 2013]. Współczynnik determinacji R^2 dla pozostałych piezometrów wykazał wartości w zakresie 50-89% (tab. 1), a więc z wystarczającym, założonym poziomem istotności.

Tabela 1. Współczynnik determinacji R^2 [%]

Przekrój Piezometr	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1	P0
E	71	brak danych	70	72	68	50	46	76
D	78	86	73	brak danych	68	66	61	72
C	85	89	85	82	57	68	68	83
F	brak danych	70	74	82	44	64	76	brak danych
B	81	71	80	59	68	60	64	83
A	45	72	77	53	25	45	brak danych	37

Wynik modelowania modelem HSTP wpływu piętrzenia wody w zbiorniku na zmienność poziomów zwierciadeł piezometrycznych mieści się w zakresie od 25 do 33 cm na 1 m zmiany poziomu zwierciadła wody w zbiorniku. Redukcja ciśnienia wywołana działaniem przesłony wynosi ok. 70%. Jest to wartość średnia obliczona na podstawie siedmioletniego okresu pomiarów. Krótkotrwałe

wysokie stany wody w trakcie powodzi 2010 r. nie miały wystarczającej wagi by wpłynąć w istotny sposób na wartość średnią. Ale z analizy poziomów wody zwierciadeł piezometrycznych dla okresu wezbrania w 2010 r. wynika, że w tym okresie redukcja poziomów piezometrycznych jest znacznie mniejsza. Jednakże może to być związane z prawdopodobną nieszczelnością w górnej części ekranu, wskazywaną już w ocenach stanu technicznego. Krótkotrwały okres wysokich stanów na zbiorniku wyłącznie w trakcie wezbrania w 2010 roku, w stosunku do całego analizowanego okresu czasu, powoduje, że wnioski z aplikacji modelu, a zwłaszcza wartości wpływów nieodwracalnych, dotyczą przede wszystkim obszaru podłoża i dolnej części korpusu, w których występowała filtracja w długim okresie czasu, przy niższych stanach niż 278,00 m n.p.m. Model poprawnie odwzorował również maksymalne stany zwierciadeł piezometrycznych w trakcie wezbrania w maju 2010 r.

W tabeli 2 przedstawiono współczynniki korelacji poziomu wody w piezometrach w stosunku do poziomu wody w zbiorniku. Wykazują one istotną korelację od 60 do 91%. Zwraca uwagę relatywnie niewielka redukcja wartości wpływu zbiornika lub jej brak dla kolejnych piezometrów w przekrojach piezometrycznych oddalonych od zbiornika, co wskazuje na zasilanie tych piezometrów podłożem przez warstwę utworów piaszczysto-żwirowych oraz niepogłębienie ścianki szczelnej w tej warstwie. Dotyczy to również piezometrów znajdujących się już za rowem opaskowym. Wpływ sezonowości na zmienność zwierciadeł piezometrycznych w analizowanym okresie czasu był niewielki, mniejszy niż 4% dla największych wartości jego oddziaływania. Z tego powodu nie został on szczegółowo przedstawiony w niniejszym artykule. Czwartym czynnikiem analizowanym

Tabela 2. Wartość korelacji zmiany zw. wody w piezometrze w centymetrach na 1 metr zmiany poziomu wody w zbiorniku

Przekrój Piezometr	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1	P0
E	74	brak danych	86	79	77	68	63	81
D	82	90	84	brak danych	76	79	76	79
C	89	86	84	89	69	79	80	86
F	brak danych	82	84	91	61	77	76	brak danych
B	89	86	82	59	75	76	77	86
A	wyłączony z analizy	82	80	63	wyłączony z analizy	56	brak danych	wyłączony z analizy

za pomocą modelu HSTP jest wpływ opadów atmosferycznych. Na podstawie wyników modelowania stwierdzono, że wody opadowe w około 10% oddziałują na zachowanie się zwierciadła wody w piezometrach P2A, P4A, P5A, P6A zlokalizowanych poza rowem opaskowym. Natomiast w przypadku piezometrów w korpusie zapory wpływ opadów atmosferycznych jest znikomy, mniejszy od 2%. Z tego powodu omówienie tego zagadnienia zostało pominięte w tym artykule.

W konsekwencji obliczenia i odjęcia wartości odwracalnej zmienności w pomiarach poziomu zwierciadeł piezometrycznych uzyskano wpływ trwałych, reologicznych zmian w ośrodku gruntowym na trwałą zmianę w położeniu zwierciadeł piezometrycznych, w centymetrach na rok, w analizowanym okresie 7 lat eksploatacji zapory. Żadne z trendów tych zmian nie mają charakteru wykładniczego, a ich całkowite wartości przedstawia tab. 3. We wszystkich przekrojach, z wyłączeniem przekroju P6, wartości te są dodatnie. Najistotniejsze trwałe wzrosty poziomu zwierciadła wody zachodzą w piezometrach grupy E zlokalizowanych na koronie zapory zwłaszcza – P1E oraz P2E, gdzie przekraczają 3 cm/rok. Świadczyć to może między innymi o stopniowym rozluźnianiu się gruntu w strefie okna filtracyjnego pomiędzy niedogłębioną ścianką szczelną a szczelną warstwą w podłożu, niepostępującym na razie w kierunku stopy odpowietrznej. Wraz ze zwiększaniem się odległości położenia piezometrów od zbiornika wielkości trwałych wzrostów maleją. Natomiast przekrój piezometryczny P6 wykazuje, dla piezometrów zlokalizowanych w korpusie, trwałe obniżanie się poziomu piezometrycznego o niewielkich wartościach, narastające w kierunku stopy odpowietrznej. Może to oznaczać powstawanie uprzywilejowanej drogi filtracji na całej długości tego przekroju, powiązanej z powolnym rozwojem pro-

Tabela 3. Trwała średnia zmiana poziomu zw wody w piezometrze w [cm/rok] w analizowanym okresie

Przekrój Piezometr	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1	P0
E	2,4	brak danych	1,18	1,59	2,11	3,6	3,66	2,11
D	1,28	-0,38	1,3	brak danych	2,09	1,59	1,84	2,39
C	0,7	-0,36	0,75	1,01	2,04	2,04	1,09	1,55
F	brak danych	-0,63	1,54	1	1,09	1,56	1,03	brak danych
B	0,66	-1,08	0,83	1,17	1,61	1,32	0,93	0,88
A	wyłączony z analizy	-0,72	0,43	1,85	wyłączony z analizy	2,11	brak danych	wyłączony z analizy

cesów erozyjnych w gruncie. W 2010 r. obserwowane były w tym przekroju znaczne wydatki drenażu oraz awaria skarpy rowu w trakcie wezbrania.

4. Podsumowanie

Analiza procesów filtracyjno-erozyjnych metodą HSTP wykazała, że w analizowanym, siedmioletnim okresie, w zaporze Kozłowa Góra nie zaszły istotne zmiany wynikające z rozwoju procesów filtracyjno-erozyjnych – zarówno w korpusie zapory, jak i w podłożu. Niemniej, procesy te nie są marginalne i wymagają dalszej obserwacji.

Wykorzystanie modelu HSPT do analizy danych pozyskanych z systemów technicznej kontroli zapór stanowi jedno z wiarygodnych narzędzi pozwalających na relatywnie szybką i efektywną ocenę procesów zachodzących we wnętrzu zapory. Model HSTP nie pozwala na ilościowe określanie procesów filtracyjnych i/lub erozyjnych, ale daje istotne informacje o trendach zmian i ich dynamice. Zastosowanie różnorodnych narzędzi w tym modelu pozwala na wiarygodniejsze definiowanie i potwierdzanie hipotez o stanie zapory i procesach zachodzących w jej korpusie i podłożu.

Literatura

- Bonelli S., Radzicki K., 2008, Impulse response function analysis of pore pressure in earth-dams, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 12 (3), 243-263, DOI: 10.1080/19648189.2008.9693012
- Bonelli S., Radzicki K., 2011, Zastosowanie funkcji odpowiedzi impulsowej do analizy ciśnień porowych w zaporach ziemnych, [w:] *Bezpieczeństwo zapór – nowe wyzwania*, J. Winter, A. Kosik, A. Wita (red.), IMGW-PIB, 150-158
- Bonelli S., Radzicki K., Szczęsny J., Tourment R., Felix H., 2005, L'auscultation des barrages en terre: unenécésité, *Ingénieries*, 41, 13-22
- Crépon O., Lino M., 1999, An analytical approach to monitoring, *International Water Power and Dam Construction*, 10 czerwiec, dostępne online 08.07.2015 (<http://www.waterpowermagazine.com/features/featurean-analytical-approach-to-monitoring/>)
- Dobosz W., 1980, Model opisujący przemieszczenia punktu na zaporze jako funkcję historii obciążenia i temperatury, *Gospodarka Wodna*, 4, 119-122
- Fiedler K., 1974, Współczesne metody interpretacji wyników pomiarów zapór wodnych, *Gospodarka Wodna*, 12, 264-267
- Guedes Q.M., Coelho P.S.M., 1985, Statistical behaviour model of dams, [w] *XV International Congress on Large Dams*, Lausanne, ICOLD, 319-334

- Kledyński Z., 2011, Monitoring i diagnostyka budowli hydrotechnicznych. Cz. 2, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, 3, 36-38
- Łaptaś A., Franik H., Felix H., 2006, Analiza procesów filtracyjnych w zaporze Klimkówka z zastosowaniem metody statystycznej, Czasopismo Techniczne: Środowisko, 103 (10-Ś), 77-87
- Marazio A., 1989, Monitoring of dams and their foundations – State of the art, ICOLD Bulletin, 68, 327 s.
- OTKZ, 2013, Zapora Kozłowa Góra, ocena stanu technicznego i bezpieczeństwa budowli hydrotechnicznych w roku 2013, IMGW-PIB, Warszawa
- Opyrchał L., 1998, Zastosowanie periodogramu do interpretacji wyników pomiarów w zaporach wodnych, Gospodarka Wodna, 11, 402-405
- Strzelecki T., i in., 2010, Kompleksowa ocena stanu technicznego zapory czołowej zbiornika retencyjnego Kozłowa Góra, Politechnika Wrocławska, Wrocław
- Szczęsny J., Dembski B., 2002, Opinia rzeczoznawców o stanie zapory Kozłowa Góra na rzece Brynnicy, przegląd 2001, 2002, Kraków