

Wykorzystanie termohydraulicznego modelu numerycznego do analizy danych z systemu termomonitoringu zapory Kozłowa Góra w celu weryfikacji hipotezy o nasileniu procesów filtracyjno-erozyjnych w podłożu

Application of thermo-hydraulic numerical model used to analyze thermal monitoring data in order to verify hypothesis of leakage and erosion processes development in the foundation of Kozłowa Góra dam

Paweł OPALIŃSKI, 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 28 53, e-mail: 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 termohydraulicznego modelu numerycznego dla wybranego przekroju zapory Kozłowa Góra w celu weryfikacji hipotezy o rozwoju procesów filtracyjno-erozyjnych w podłożu. Zapora ziemna Kozłowa Góra jest pierwszym w Polsce obiektem piętrzącym z zainstalowanym systemem termomonitoringu procesów filtracyjno-erozyjnych. Został on zaprojektowany jako nowoczesny system termomonitoringu quasi-3D, odznaczający się równocześnie cechami, które umożliwiają jego zastosowanie jako laboratorium polowe rozwoju metod

termomonitoringu. Przedstawiona w niniejszym artykule analiza pomiarów pozwoliła na dokładną ocenę zaawansowania procesów filtracyjnych w podłożu zapory metodą termomonitoringu. Metody termomonitoringu są rekomendowane na świecie oraz uważane za najbardziej obiecujące w detekcji i ocenie zjawisk filtracyjno-erozyjnych w ziemnych obiektach piętrzących. Skuteczna aplikacja tych metod na obiekcie pilotażowym w Polsce będzie miała duże znaczenie dla ich szerszego wdrażania w kraju.

1. Wprowadzenie

Metody termomonitoringu są obecnie rekomendowane oraz uważane za najbardziej obiecujące z metod detekcji i oceny zjawisk filtracyjno-erozyjnych w ziemnych obiektach piętrzących [Fry 2012; ICOLD 2013, 2014]. W wyniku zmian w polu termicznym spowodowanych filtracją, przeciekami przez korpus zapory lub jej podłoże możliwa jest identyfikacja i ocena nasilenia tychże procesów, a także pośrednia analiza procesów erozyjnych.

Na zaporze ziemnej Kozłowa Góra Zbiornika Świerklanieckiego, który jest istotny w ochronie przeciwpowodziowej oraz w systemie zaopatrzenia w wodę Górnego Śląska, zainstalowano pierwszy w Polsce, nowoczesny, zaawansowany system termomonitoringu [Radzicki i in. 2015], który jednocześnie został zaprojektowany jako laboratorium polowe rozwoju metod termomonitoringu procesów filtracyjno-erozyjnych. Zapora Kozłowa Góra jest własnością Górnośląskiego Przedsiębiorstwa Wodociągowego S.A.

Na zaporze tej obserwuje się szereg zjawisk filtracyjno-erozyjnych. Między innymi podczas powodzi w 2010 r. utracie stateczności uległa część ławeczki przyległa do rowu opaskowego na odcinku ok. 30 m na długości zapory.

Na podstawie dotychczasowych obserwacji, badań, analiz oraz ocen stanu technicznego można sformułować dwie hipotezy rozwoju procesów filtracyjno-erozyjnych w korpusie i podłożu zapory. Pierwsza z nich to nieszczelność górnej partii rdzenia ilowego i wytworzenie się w kierunku stopy odpowietrznej w korpusie statycznym zapory uprzywilejowanej drogi filtracji. Druga to erozja w podłożu zapory związana z niedogłębieniem i/lub nieszczelnością ścianki szczelnej. Hipotezy te opisano szerzej w rozdziale 4.

Pomiary termometryczne na zaporze Kozłowa Góra są prowadzone od 2014 r. Utrzymywany w tym czasie stosunkowo niski poziom piętrzenia na zaporze nie pozwolił na weryfikację pierwszej hipotezy, natomiast analiza drugiej hipotezy, metodą termomonitoringu, jest podstawowym celem niniejszego artykułu.

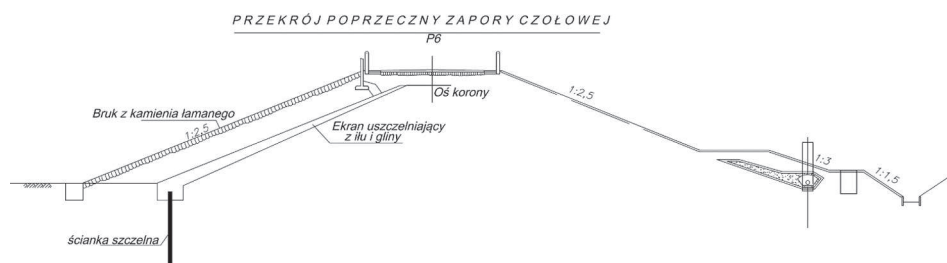
W metodzie termomonitoringu istnieje duże spektrum narzędzi analizy pomiarów temperatury [ICOLD 2014; Radzicki 2014]. Jednym z nich są mode-

le numeryczne termohydrauliczne badanego obiektu. Taki model nieustalonego przepływu ciepła i wody został przygotowany dla przekroju piezometrycznego nr 6 zapory Kozłowa Góra. Do zdefiniowania warunków brzegowych modelu wykorzystano ciągi pomiarów temperatury ze skarpy odwodnej oraz odpowietrznej mierzone na różnych wysokościach obu skarp zapory oraz stany wody górnej i dolnej. Zamodelowano okres od 24.05 do 04.08.2015 r. Przekrój ten znajduje się w obszarze, gdzie w 2010 r. nastąpiła wspomniana awaria skarpy rowu.

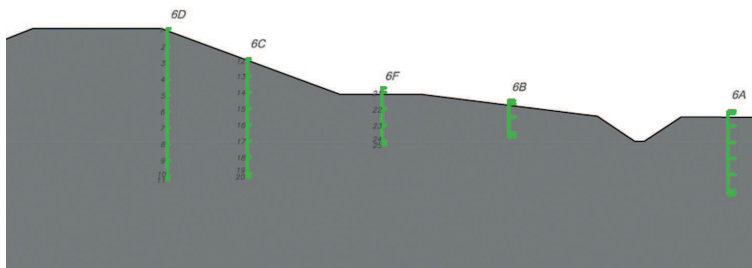
2. Zapora Kozłowa Góra

Zapora czołowa typu ziemnego została usypana z materiałów miejscowych. Jest to obiekt klasy II o wysokości 6 m. Zapora ziemna została wykonana w latach 1933-1939 jako obiekt tymczasowy do celów militarnych, mający służyć do zatopienia terenów w dole rzeki. W związku z pierwotną funkcją zbiornika przy budowie zapory nie zostały dotrzymane warunki techniczne, jakich wymagają budowle hydrotechniczne stale piętrzące wodę. Materiał na budowę nasypów nie był odpowiednio segregowany, nie prowadzono robót ziemnych z prawidłowym i kontrolowanym zagęszczeniem nasypów [Geoprojekt 1965; OTKZ 2013; Strzelecki i in. 2010]. Korpus zapory wykonano z okruchów skalnych piaskowca i wapienia, piasku i piasku pylistego. Elementem szczelnym jest pochyły ekran iłowy o grubości 0,70 m u podstawy i 0,18 m u góry (rzedną 279,19 m n.p.m.). W podłożu pod zaporą filtracja ograniczona jest przez drewnianą ściankę szczelną, zabitą u podstawy skarpy odwodnej. Łączy się ona z ekranem iłowym, tworząc przeponę wodoszczelną o długości ok. 600 m. Ekran iłowy zabezpieczono warstwą żwiru o grubości 1,60 m. Skarpa odwodna zabezpieczona jest brukiem kamiennym o grubości 30-35 cm ułożonym na zaprawie cementowej (rys. 1).

Skarpa odpowietrzna, obsiana trawą, rozdzielona jest dwoma ławeczkami o szerokości 4,0 m oraz 2,0 m. Woda z przesiąków zapory czołowej odprowadzana jest systemem drenaży ceramicznych w obsypce trójwarstwowego filtru żwirowego



Rys. 1. Typowy przekrój przez korpus zapory czołowej Kozłowa Góra



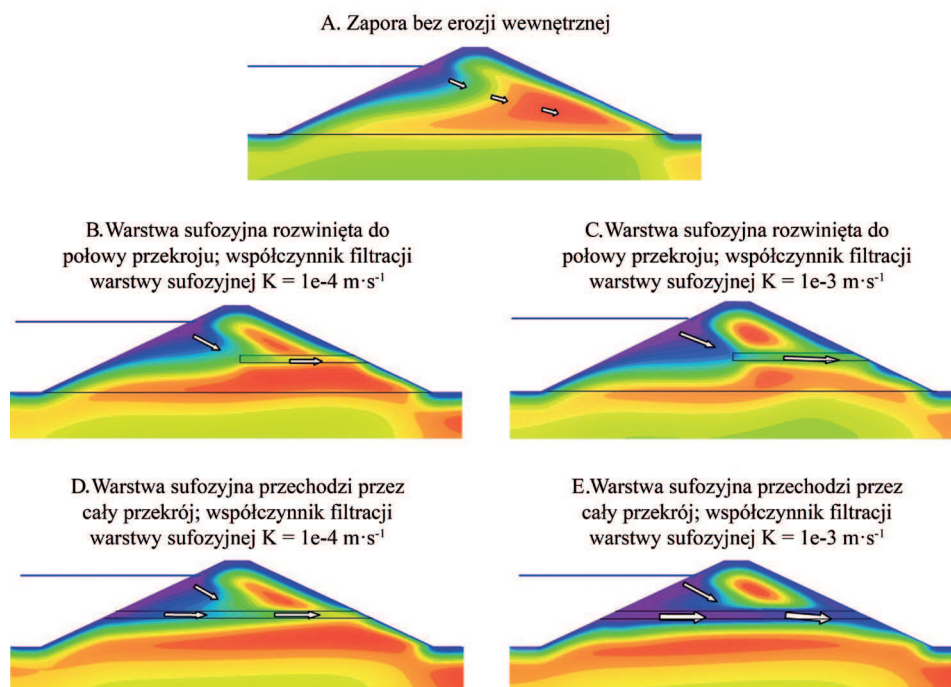
Rys. 2. Wycinek przekroju zapory Kozłowa Góra po stronie odpowietrznej z zaznaczeniem czujników temperatury zainstalowanych w piezometrach

umiejscowionego w stopie skarpy odpowietrznej. Wody z drenaży odpływają do rowu otwartego, biegnącego w odległości 6 m od osi drenażu. Zabezpieczenie korony od strony wody górnej stanowi parapet wykonany z prefabrykowanych elementów żelbetowych połączonych z łożowym ekranem szczelnym. Po koronie zapory przebiega droga o nawierzchni asfaltowej [OTKZ 2013; Strzelecki i in. 2010].

System termomonitoringu na zaprze Kozłowa Góra został zaprojektowany przez dra inż. Krzysztofa Radzickiego z Politechniki Krakowskiej, a wykonany przez Neostrain Sp. z o.o. Ten w pełni automatyczny system o charakterystyce monitoringu quasi-3D (ciągły na długości oraz w przekrojach poprzecznych) został szerzej opisany w [Radzicki i in. 2015]. Jego elementami są między innymi czujniki temperatury zainstalowane w przekrojach piezometrycznych, dla których wyniki analizy pomiarów przedstawiono w niniejszym artykule. W każdym z oprzyrządowanych przekrojów piezometrycznych czujniki temperatury rozmieszczono także na skarpie odwodnej, na różnych głębokościach zbiornika oraz w wybranych reprezentatywnych miejscach na skarpie odpowietrznej. Ponadto we wszystkich takich przekrojach zainstalowano czujniki temperatury w rozstawie co 1 m na wysokości każdej rury (rys. 2). Pozwala to mierzyć pionowe profile temperatury korpusu zapory oraz zewnętrzne obciążenia termiczne na jego skarpach. Mała średnica piezometrów oraz powolne i niewielkie zmiany poziomów piezometrycznych powodują, że w piezometrach nie ma ruchów konwekcyjnych lub adwekcyjnych i pomiary w ich wnętrzu oddają temperaturę otaczającego je gruntu.

3. Metoda termomonitoringu ziemnych obiektów piętrzących

Metoda termomonitoringu służy do detekcji i oceny procesów filtracyjno-erozyjnych na podstawie analizy pomiarów temperatury w ziemnych obiektach piętrzących. Jest to metoda dynamicznie rozwijana przez znaczące ośrodki na-



Rys. 3. Pola termiczne przekroju zapory ziemnej w tym samym momencie czasowym dla różnej długości warstwy sufozyjnej oraz różnego współczynnika filtracji dla tej warstwy [Radzicki, Bonelli 2012]

ukowe na świecie oraz w Polsce – przez Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej Politechniki Krakowskiej.

Termiczne metody analizy przepływu wody w gruncie opierają się na wzajemnej relacji transportu ciepła i cieczy, które są procesami sprzężonymi. Zależności te opisuje równanie zachowania energii. Przy zerowej wartości prędkości wody występuje wyłącznie przewodzenie ciepła, które jest relatywnie wolnym procesem. Jednakże już nawet sama zmiana wilgotności gruntu spowodowana minimalnym przeciekiem powoduje lokalną zmianę w prędkości przejścia frontu termicznego i zaburzenie lokalnego układu izoterm [Johansson 1997; Radzicki 2009]. W przypadku ruchu cieczy z masą wody transportowane jest również ciepło. Proces ten nazywa się adwekcją i jest dominujący w stosunku do przewodzenia. Ciepło wraz z wodą (filtracja, przeciek) wnika w głąb korpusu obiektu i powoduje znaczące zaburzenie w polu temperatury, tym większe, im większa jest prędkość filtracji.

W konsekwencji pomiar temperatur w korpusie i ich analiza pozwalają na identyfikację przecieków oraz monitoring procesów filtracyjnych. Ponieważ proces erozyjny zmienia strukturę i wartość parametrów gruntu, wpływa on na war-

tości oraz kierunki wektorów przepływu wody w polu filtracji i w konsekwencji pośrednio również na pole temperatury ośrodka gruntowego. Każdy z rodzajów procesu erozji powoduje charakterystyczne zaburzenia pola hydrotermicznego, umożliwiając jego rozpoznanie metodą termomonitoringu [Johansson 1997; Radzicki, Bonelli 2010, 2012]. Podsumowując, ta metoda umożliwia detekcję i analizę zarówno procesów filtracyjnych, jak i erozyjnych. Jako przykład na rys. 3. przedstawiono analizę numeryczną wpływu rozwoju procesów erozyjnych, takich jak sufozja, na pole termiczne w przekroju zapory, przy takich samych obciążeniach termicznych oraz hydraulicznych. Można zaobserwować, że wpływ temperatur wody na pole termiczne wewnątrz korpusu zapory jest dominujący w miejscach występowania największego gradientu hydraulicznego oraz zwiększa się wraz z rozwojem procesów erozyjnych.

4. Hipotezy przebiegu procesów filtracyjno-erozyjnych w korpusie i podłożu zapory czołowej

Jak wspomniano, we wprowadzeniu na zaporze czołowej obserwuje się szereg zjawisk filtracyjno-erozyjnych. Z analizy wieloletnia wynika, że jedną ze stref, gdzie zaobserwowano istotnie nasilone procesy filtracyjno-erozyjne jest sekcja pomiędzy oraz wokół przekrojów piezometrycznych 6 oraz 7, łącznej szerokości ok. 200 m. Repery zlokalizowane na koronie obiektu pokazały osiadania w tej strefie ok. 2 cm w czasie ostatnich 20 lat, w tym z nasileniem pomiędzy latami 1995 i 1998, kiedy wyniosły one 1 cm. Ponadto na kilkuset metrach ławeczki odpowietrznej wzdłuż prawej części zapory odnotowano obniżenie korony rzędu kilkudziesięciu centymetrów. Sondowanie zagęszczenia gruntu prowadzone z ławeczki po stronie odpowietrznej zapory wykazało, że na głębokości występowania krzywej filtracji w nasypie ławeczki stan zagęszczenia gruntu w większości otworów określony był jako luźny oraz bardzo luźny w warstwie o miąższości od ok. 0,3 do 0,6 m. Poniżej, w podłożu pod ławeczką, grunt jest średnio zagęszczony [Zakład... 2006]. W strefie przekrojów piezometrycznych 6 oraz 7 obserwowano ubytki i pęknięcia okładziny kamiennej na skarpie odwodnej, mogące wskazywać miejsca wnikania nasilonej filtracji w korpus. W tej strefie obserwowano również stosunkowo duże wydatki ze studni drenażowych oraz zawilgocenia na powierzchni ławeczki odpowietrznej. Analizy zmienności położenia zwierciadeł poziomów piezometrycznych w zaporze czołowej wskazują w szeregu przekrojów zapory, w tym w przekroju piezometrycznym 7, na prawdopodobne rozszczelnienie ekranu iltowego w jego górnej części [OTKZ 2013; Strzelecki i in. 2010; Szczęsny, Dembski 2002]. Szczególnie jest to zauważalne w okresie pod-

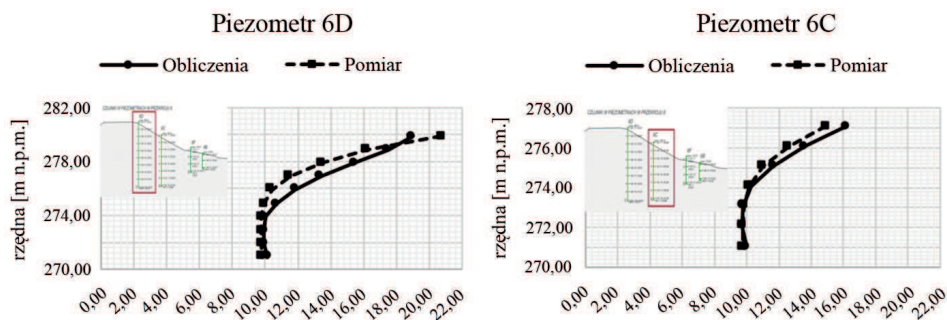
wyższych stanów zbiornika podczas wezbrania w 2010 r. Zdefiniowane zostały dwie hipotezy dotyczące rozwoju procesów filtracyjno-erozyjnych w korpusie zapory czołowej, z założeniem możliwości równoczesnego przebiegu obu. Pierwsza, uprawdopodobniona obserwacjami relacji zmian zwierciadeł piezometrycznych w stosunku do stanu zbiornika oraz badaniami geotechnicznymi korpusu zapory, zakłada, że ekran ilowy w górnej części powyżej rzędnej 277,80 m n.p.m. nie stanowi skutecznego zabezpieczenia przed filtracją, o czym świadczą przebiegi ciśnień piezometrycznych, w których przy wzroście piętrzenia zbiornika powyżej ww. wartości występuje bardzo znaczny przyrost ciśnień. Dodatkowo górna część rdzenia znajduje się powyżej strefy przemarzania. Przemarzanie elementów szczelnych zapór ziemnych wykonanych z łu i glin wpływa na powstanie horyzontalnych spękań i na potencjalny znaczny wzrost współczynnika filtracji. Wieloletnie piętrzenie, przed rokiem 2006 powyżej rzędnej 277,80 m n.p.m., mogło spowodować wykształcenie się uprzywilejowanej drogi filtracji pomiędzy górną, nieszczelną częścią rdzenia w kierunku stopy dolnej w korpusie obiektu. Druga hipoteza zakłada rozwój procesów sufozyjnych w trzeciorzędowym podłożu zapory spowodowanym niedogłębieniem i (lub) nieszczelnościami ścianki szczelnej. Ścianka szczelna przegradzająca dolinę rzeki najprawdopodobniej nie sięga do utworów nieprzepuszczalnych w dnie doliny i jest zawieszona w plejstocenicznym kompleksie utworów piaszczysto-żwirowych wypełniających dolinę rzeki. Dotyczy to szczególnie prawej części zapory (przekroje piezometryczne 4-4 do 7-7). Wątpliwości może budzić również szczelność samej drewnianej ścianki wbitej w podłoże po ponad 70-letniej eksploatacji.

Utrzymywanie w roku 2014 niskiego poziomu piętrzenia na zaporze uniemożliwiło weryfikację i analizę pierwszej hipotezy metodą termiczną. Natomiast możliwa była wieloscenariuszowa analiza drugiej hipotezy, z oszacowaniem wartości współczynnika filtracji w dolnej, nasyconej części nasypu oraz w podłożu, której rezultaty przedstawiono w dwóch następujących rozdziałach.

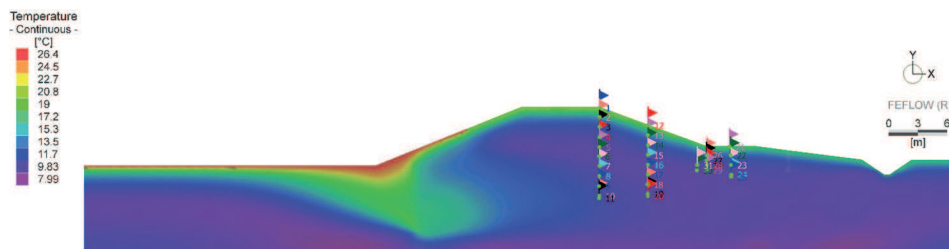
5. Dopasowanie termohydraulicznego modelu numerycznego przekroju zapory do pomiarów

Przekrój 6-6 zapory czołowej poddano odwzorowaniu w modelu numerycznym. Zastosowano model FeFlow, którego poprawność i kalibrację w tym zakresie potwierdzają liczne aplikacje oraz weryfikacje na modelach i obiektach fizycznych [Guidoux 2007]. Wykonano model numeryczny z nieustalonym transportem ciepła oraz zmiennym poziomem piętrzenia po stronie odwodnej w oparciu na rzeczywistych wielopunktowych pomiarach temperatury na skarpie odwodnej

i odpowietrznej oraz pomiarach położenia zwierciadła wody. Poprzez zastosowanie metody analizy wstecz (*back-analysis*) po pierwsze dopasowano wartości współczynnika filtracji korpusu zapory i podłoża w stosunku do wstępnie założonych parametrów literaturowych dla rodzajów gruntów zdefiniowanych poprzez badania geotechniczne, po drugie wyznaczono wysokość światła okna filtracyjnego pomiędzy pod niedogłębioną przesłoną. W trakcie dopasowywania modelu poszukiwano jak najlepszej korelacji zamodelowanego zwierciadła piezometrycznego oraz w szczególności zamodelowanych pionowych profili termicznych, pomierzonych w piezometrach dla przekroju 6 w analizowanym 3-miesięcznym okresie z rzeczywistymi pomiarami. Na rys. 4 porównano rzeczywiste i zamodelowane pionowe profile temperatury w piezometrach 6C oraz 6D. Średni błąd pomiędzy danymi uzyskanymi z termomonitoringu oraz modelowania wyniósł 0,66 [°C] dla piezometru 6D oraz 0,46 [°C]. Maksymalny błąd dla ciśnień piezometrycznych wyniósł 0,18 [m] dla piezometru 6D, natomiast dla piezometru 6C 0,10 [m]. Ostatecznie modelowania pozwoliły oszacować wartość współczynnika



Rys. 4. Pionowe profile termiczne w piezometrze 6D i 6C dla danych uzyskanych z modelu numerycznego oraz danych z termomonitoringu zapory Kozłowa Góra dla dnia 30.06.2014 r.



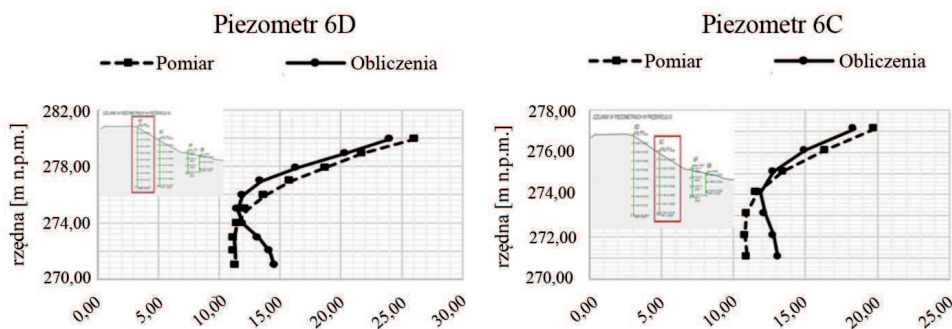
Rys. 5. Pole termiczne przekroju 6-6 zapory Kozłowa Góra zamodelowane dla dnia 30.06.2014 r.

filtracji dla podłoża równą $1e-5$ [$m^{-1}s$] oraz wysokość światła okna filtracyjnego pod niedogłębioną przesłoną równą $0,30$ [m].

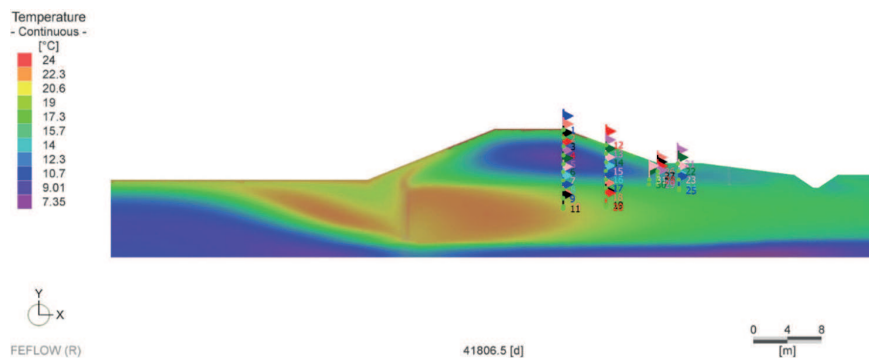
Uzyskane dane nie wykluczają możliwości istnienia procesów erozyjnych w podłożu, ale nie pokazały wytworzenia się strefy szczególnie uprzywilejowanego przepływu i erozji. Hipotetyczny wpływ pojawienia się takiej strefy na pomiary temperatury przedstawiono w rozdziale 6.

6. Zamodelowanie hipotetycznego przypadku wystąpienia procesów filtracyjno-erozyjnych w podłożu zapory

W poniższym rozdziale przedstawiono hipotetyczny wpływ strefy uprzywilejowanego przepływu o osłabionych parametrach gruntowych na pole temperatur przekroju 6-6, gdyby taka zaistniała w podłożu. Zwiększono współczynnik filtracji w podłożu o jeden rząd wielkości, tj. do $k = 1e-4$ $m^{-1}s$, w stosunku do



Rys. 6. Profile termiczne w piezometrze 6D i 6C dla danych uzyskanych z modelu numerycznego oraz danych z termomonitoringu zapory Kozłowa Góra w dniu 04.08.2014 r.



Rys. 7. Pole termiczne przekroju 6-6 zapory Kozłowa Góra zamodelowane dla dnia 04.08.2014 r.

skalibrowanego modelu numerycznego opisanego w rozdziale 5. Również w tym przypadku przesłona została identycznie niedogłębiona, jak w poprzednim, do warstw podłoża nieprzepuszczalnego. Następnie porównano zamodelowane pionowe profile temperatury w piezometrach 6C oraz 6D, a także zamodelowane rzędne zwierciadła wody w piezometrach z rzeczywistymi danymi. W analizowanych profilach termicznych widoczna jest istotna zmiana w polu termicznym w stosunku do rzeczywistych pomiarów. Od rzędnej 275,50 [m n.p.m.] widoczny jest wzrost różnicy temperatury modelowanej a rzeczywistej, rosnący wraz z głębokością. Tę anomalię termiczną powoduje zwiększona prędkość przepływu i w konsekwencji nasilony adwekcyjny transport ciepła w kierunku strony odwietrznej.

7. Podsumowanie i wnioski

W wyniku zastosowania na zaporze Kozłowa Góra pomiarów temperatury oraz termohydraulicznego modelowania numerycznego zweryfikowano i odrzucono hipotezę o potencjalnie nasilonych procesach filtracyjno-erozyjnych w podłożu zapory. Potwierdzono również fakt niedogłębienia przesłony, który jednakże nie powoduje istotnego nasilenia procesów filtracyjno-erozyjnych w podłożu zapory w zakresie analizowanego przypadku. Wykonane modelowania potwierdzają dużą wrażliwość metody termicznej na zmiany prędkości filtracji, co umożliwia szczegółowe analizy pola filtracji oraz dokładne dopasowanie wartości współczynnika filtracji gruntu, przy zastosowaniu metody analizy wstecz.

Niestety ze względu na niskie stany zwierciadła wody w zbiorniku w rozpatrywanym okresie nie można było metodą termiczną przeanalizować hipotezy o spękanej górnej części rdzenia. Metody termomonitoringu wraz z zaawansowaną analizą danych z powodzeniem służą do analizy złożonych problemów filtracji wody przez ziemne obiekty piętrzące. Zapora Kozłowa Góra ma zaawansowany system termomonitoringu, pozwalający na szerokie spektrum analiz, których wyniki będą przedstawiane w kolejnych artykułach. Jednakże aplikacja tej zaprezentowanej metody w aspekcie analizy przekroju z już istniejącym przekrojem piezometrycznym nie wymaga posiadania na zaporze stałego systemu pomiarów termometrycznych. Wystarczająca byłaby instalacja czujników temperatury, na przykład w opcji ich wypożyczenia, na czas kilku miesięcy (długość tego okresu zależy między innymi od wielkości zapory oraz parametrów gruntu podłoża i korpusu).

Literatura

- DHI-WASY Software, 2010, Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System (FEFLOW), White Papers FeFlow 6, WASY GmbH, Berlin, Germany
- Hellstron G., Mattsson H., Lundstrom T., 2008, Internal erosion in embankment dams. A literature survey of the phenomenon and the prospect to model it numerically, Research Report L, 14, 70 s.
- Fry J.J., 2012, How to prevent embankments from internal erosion failure?, [w:] International symposium on dams for a changing world, 5 June, Kyoto, Japonia, 6 s.
- Johansson S., 1997, Seepage monitoring in embankment dams, doctoral thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Szwecja, 62 s., dostępne online 17.07.2015 (http://www.smartlevec.nl/_sitefiles/file/kennis/Johansson%20PhD%20thesis_Seepage%20Monitoring.pdf)
- Geoprojekt, 1965, Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla zabezpieczenia zapory ziemnej w Kozłowej Górze, Gdańsk
- Guidoux C., 2007, Developpement et validation d'un systeme de detection et de localization par fibres optiques de zones de fuite dans digues en terre, Doctoral Thesis, Universite Joseph Fourier – Grenoble 1, Francja, 151 s., dostępne online 17.07.2015 (http://www.lthe.fr/PagePerso/boudevil/THESES/guidoux_07_version_publique.pdf)
- ICOLD, 2013, Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and Their Foundation, Bulletin No. 164, Volume 1: Internal erosion processes and engineering assessment, ICOLD, 151 s.
- ICOLD, 2014, Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and Their Foundation, Draft of Bulletin No. 164, Volume 2: Investigations, testing, monitoring and detection, remediation and case histories, ICOLD
- OTKZ, 2013, Zapora Kozłowa Góra, ocena stanu technicznego i bezpieczeństwa budowli hydrotechnicznych w roku 2013, IMGW-PIB, Warszawa
- Radzicki K., 2005, Badania filtracji w ziemnych budowlach piętrzących metodami termodetekcji, Gospodarka Wodna, 5, 372-376
- Radzicki K., 2009, Analyse retard des mesures de températures dans les digues avec application à la détection de fuites. PhD rapport, AgroParisTech, Paryż, Francja, 137 s., DOI: 10.13140/RG.2.1.1900.2401
- Radzicki K., 2010, Identyfikacja procesów erozyjnych w ziemnych obiektach hydrotechnicznych metodami termodetekcji, Sympozjum Naukowo-Techniczne Hydrotechnika XII, Ustroń, materiały pokonferencyjne
- Radzicki K., 2014, The thermal monitoring method – a quality change in the monitoring of seepage and erosion processes in dikes and earth dams, [w:] Modern monitoring solutions of dams and dikes, DHTL, Hoa Phong E&C, NeoStrain, 33-41, DOI: 10.13140/2.1.4752.8326
- Radzicki K., Bonelli S., 2010, A possibility to identify piping erosion in earth hydraulic works using thermal monitoring, [w:] 8h ICOLD European Club Symposium, Innsbruck, Austria, 618-623, dostępne online 17.07.2015 (http://www.researchgate.net/publication/259193325_A_Possibility_to_Identify_Piping_Erosion_in_Earth_Hydraulic_Works_Using_Thermal_Monitoring)

- Radzicki K., Bonelli S., 2012, Monitoring of the suffusion process development using thermal analysis performed with IRFTA model, [w:] 6th International Conference on Scour and Erosion, Paryż, Francja, 593-600, dostępne online 17.07.2015 (http://www.researchgate.net/publication/259193059_Monitoring_of_the_suffusion_process_development_using_thermal_analysis_performed_with_IRFTA_model)
- Radzicki K., Siudy A., Stoliński M., 2015, An innovative 3D system for thermal monitoring of seepage and erosion processes and an example of its use for upgrading the monitoring system at the Kozłowa Góra dam in Poland, Q.99-R.7, 25th Congress on Large Dam, 85-101
- Strzelecki T. i in., 2010, Kompleksowa ocena stanu technicznego zapory czołowej zbiornika retencyjnego Kozłowa Góra, Politechnika Wrocławska, Wrocław
- Szczęśny J., Dembski B., 2002, Opinia rzeczoznawców o stanie zapory Kozłowa Góra na rzece Brynnicy. Przegląd 2001, 2002, Kraków
- Zakład Prac Geologicznych KILAR, 2006, Dokumentacja geotechniczna, Zapora czołowa zbiornika wodnego Kozłowa Góra – badania gruntów rodzimych podłoża oraz nasypów wbudowanych w korpus obiektu, Tych

6. Dam enhancement by concrete cut-off walls – technical overview and selected projects worldwide

Henning LESEMANN, Peter BANZHAF

Worldwide, an increased need of nutrition and energy as well as the climate change and the risen danger of flooding require a proactive water management. Since the construction of new dams is more and more limited or completely prevented, existing dams must be rehabilitated and partly upgraded in order to increase the impoundment volume. Special techniques and new equipment technologies allow offering sustainable solutions by the execution of supplementary concrete cut-off walls. Depths of 150 m and more can be realized if profound knowledge of the construction methods, a wall design adequate for the geological conditions and a proper concrete design are employed.

7. Distributed Brillouin fiber optic sensor system for long-term structural health monitoring

Aleksander WOSNIOK, Katerina KREBBER

We report on the development of a distributed fiber optical sensor system for structural health monitoring of large-scale geotechnical and civil infrastructures. The system is based on Brillouin frequency domain analysis (BOFDA) for distributed measurement of strain and temperature along standard silica optical fibers used as sensors. By additional incorporation of the fiber optic sensors in geosynthetics, two-dimensional sensors can be realized. Such smart geosynthetics can be used for reinforcement of geotechnical and masonry structures and the embedded fiber optic sensors can provide information about the condition of the structures and detect the presence of any damages and destructions in real time.

8. Application of thermo-hydraulic numerical model used to analyze thermal monitoring data in order to verify hypothesis of leakage and erosion processes development in the foundation of Kozłowa Góra dam

Paweł OPALIŃSKI, Krzysztof RADZICKI, Stéphane BONELLI, Andrzej SIUDY

In this paper, application of thermo-hydraulic numerical model used to analyze thermal monitoring data in order to verify hypothesis of seepage in the foundation of Kozłowa Góra dam of embankment's dam cross section, is presented. Kozłowa Góra dam is the first embankment dam in Poland on which leakage and erosion thermal monitoring system have been installed. It was designed as, most up-to-date, quasi 3D monitoring system, which at the same time is full-scale experiment to improve quality of thermal monitoring methods. Analysis of monitoring data presented in this paper, provide assessment on development of leakage in the dam foundation by thermal monitoring method. Thermal monitoring methods are recommended and considered as the most promising methods used to detect and monitor seepage in embankment dams and levees. Successful applica-

tion of those methods for the very first time on Polish dam will have major impact for further development.

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

Paweł PRZECHERSKI, Krzysztof RADZICKI, Stéphane BONELLI, Andrzej SIUDY

In this paper application of Hydrostatic-Seasonal-Time-Precipitation (HSTP) model used to analyze piezometric levels on Kozłowa Góra dam is presented. The HSTP model is a statistical model, which allows to evaluate impact of some important factors on variation of analyzed data and especially to determine irreversible trends in monitoring data. It allows to identify and determine dynamics of potentially danger processes what is the key issue to evaluate dam safety, for instance internal erosion or clogging. The HSTP model has been applied successfully for several decades in safety evaluation of concrete and embankment dams, as a fundamental and in certain countries mandatory method. Application of HSTP model in order to analyze piezometric levels on Kozłowa Góra dam, led to conclusions that no important irreversible trends due to seepage and internal erosion have been observed in analyzed time period in the body of dam and in its foundation.

10. Technical condition assessment of observation wells networks of hydraulic structures

Wiesław WACHOWSKI

Results of seepage pressure measurement conducted on ground and concrete hydraulic structures constitute a relevant source of analysis leading to assessment of technical and safety conditions of such structures under the State Service for Hydraulic Structures. Piezometer measurements are continuously taken by hydraulic structure users during the entire period of being in service. Therefore, a periodical examination of technical condition of the entire piezometer network is indispensable, as a potential malfunction of piezometers can significantly affect technical condition assessment of the entire hydraulic structure. The report presents principles for preliminary technical condition assessment of a measurement network. It discusses a method of clearing piezometers using a pneumatic water pump. It also gives practical criteria for evaluating efficiency of piezometers used in a measurement network. About the accuracy of determining the volume of deposits and the capacity of small water reservoirs

11. Seepage under the Vogršček Dam – effectiveness of measures taken

Andrej KRYŽANOWSKI, Nina HUMAR

The Vogršček dam was completed in 1989 as a storage dam for irrigation and as a flood control dam. The dam is located in the Vipava River catchment area in western Slovenia. The design volume of

Eksploatacja budowli piętrzących – diagnostyka i zapobieganie zagrożeniom

Pod redakcją
Jana Wintera i Andrzeja Wity



Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej
Państwowy Instytut Badawczy

Warszawa 2015

Eksploatacja budowli piętrzących – diagnostyka i zapobieganie zagrożeniom

*Pod redakcją
Jana Wintera i Andrzeja Wity*



INSTYTUT METEOROLOGII I GOSPODARKI WODNEJ
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY
WARSZAWA 2015

MONOGRAFIE
INSTYTUTU METEOROLOGII I GOSPODARKI WODNEJ
PAŃSTWOWEGO INSTYTUTU BADAWCZEGO

Recenzenci:

M.Sc., C. Eng. Rodney Bridle; Prof. dr hab. inż. Ludwik Dąbkowski;
Prof. Jean-Jacques Fry; Prof. dr hab. inż. Zbigniew Kledyński;
Prof. dr hab. inż. Maciej Maciejewski; Prof. dr hab. inż. Wojciech Majewski;
Dr inż. Krzysztof Radzicki; Prof. PhD. DSc. Eng. Jaromír Říha;
Dr hab. inż. Paweł Popielski, prof. nadzw.; Dr hab. inż. Jan Winter, prof. nadzw.;
Dr inż. Andrzej Wita; Prof. dr hab. inż. Jan Żelazo

Redakcja merytoryczna:

Karolina Racka

Korekta tekstów angielskich:

Maria Merkel, Rafał Stepnowski

Skład i łamanie:

Rafał Stepnowski

Projekt okładki:

Rafał Stepnowski

Zdjęcie na okładce:

Anna Kosik

Komitet Redakcyjny Wydawnictw IMGW-PIB

prof. dr hab. inż. Janusz Zaleski – przewodniczący,
mgr Karolina Racka – sekretarz,
dr Rafał Bąkowski, dr inż. Ryszard Kosierb, dr Danuta Limanówka,
dr hab. Elżbieta Łysiak-Pastuszak, prof. dr hab. inż. Maciej Maciejewski,
prof. dr hab. inż. Wojciech Majewski, dr hab. inż. Mieczysław S. Ostojński, prof. nadzw.
prof. dr hab. inż. Laura Radczuk, prof. dr hab. inż. Kazimierz Rózdzyński,
mgr inż. Edmund Sieński, mgr Rafał Stepnowski, dr inż. Wiwiana Szalińska,
dr hab. Jan Szturc, dr hab. inż. Tamara Tokarczyk, prof. nadzw.,
dr inż. Tomasz Walczykiewicz, dr hab. inż. Jan Winter, prof. nadzw.

ISBN: 978-83-64979-09-5

Adres redakcji:

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy
01-673 Warszawa, ul. Podleśna 61, tel. 22 56 94 510

Spis treści

Wprowadzenie

<i>Jan Winter, Andrzej Wita</i>	9
---------------------------------------	---

I. Erozja wewnętrzna budowli ziemnych

1. Using ICOLD Bulletin 164 to investigate, analyze and monitor the vulnerability of dams to internal erosion <i>Rodney BRIDLE</i>	15
2. What do we learn from case studies of failures of embankment dams by overtopping or internal erosion? <i>Jean-Robert COURIVAUD, Alexius VOGEL, Katarzyna JARECKA</i>	27
3. Lessons learned from internal erosion incidents on water retaining structures based on ERINOH and other databases <i>Jean-Jacques FRY, Paul ROYET</i>	35
4. Modes of failures of zoned dams with pervious downstream shell <i>Remi BEGUIN, Jean-Jacques FRY, Jean-Robert COURIVAUD, Christophe PICAULT, Laurence DUCHESNE</i>	45
5. Lime treatment: new perspectives for the use of silty and clayey soils in hydraulic earthen structures <i>Gontran HERRIER, Daniel PUIATTI, Christophe CHEVALIER, Isabelle CHARLES, Stéphane BONELLI, Jean-Jacques FRY</i>	59
6. Experiments on flow-limiting and crack-filling actions during internal erosion in zoned dams <i>Ricardo CORREIA DOS SANTOS, Laura CALDEIRA, Emanuel MARANHA DAS NEVES</i>	75
7. Global and detailed internal erosion assessment of an embankment dam foundation <i>Marc SMITH, Vera van BEEK</i>	91
8. Use of the Sellmeijer model for prediction of backward erosion piping in field conditions <i>Vera van BEEK, Kristine VANDENBOER, Marc SMITH</i>	103
9. Predicting suffusion potential of dam core soil of glacial till <i>Hans RÖNNQVIST</i>	115
10. 80 km cumulative dikes of canal equipped with fiber optic monitoring systems: site experience feedback on the 4 past years <i>Cyril GUIDOUX, Jean-Robert COURIVAUD, Yves-Laurent BECK, Remi BEGUIN</i>	127

11. Laboratory experiments and numerical modelling of Backward Erosion Piping <i>Rebecca ALLAN, William PEIRSON, Kurt DOUGLAS</i>	141
12. The progress of internal erosion from typical hydromechanical response of contacts <i>Francesco FEDERICO, Ruggiero JAPPELLI, Marco IANNUCCI</i>	153
13. Discussion on the critical hydraulic gradient for uniform homogeneous glass beads <i>Zakaraya ALHASAN, Mario HALA, Tomáš JULÍNEK, Jaromír ŘÍHA</i>	165
14. Examining the potential for suffusion in micro-CT images of sands and glass beads <i>Howard F. TAYLOR, Way Way SIM, Catherine O'SULLIVAN</i>	173
15. Ocena podatności gruntów wałów przeciwpowodziowych na wystąpienie erozji wewnętrznej <i>Maria MERKEL</i>	189
II. Badania, eksploatacja i utrzymanie zapór	
1. Actual challenges in the Czech dam engineering <i>Ladislav SATRAPA</i>	205
2. Evaluation of the stability of slopes of dams of small water reservoirs in relation to the requirements of CSN 75 2410 <i>Jaromír ŘÍHA, Jan VRUBEL</i>	213
3. The results of a survey of the temperature of the asphalt-concrete facing of embankment dams <i>Karel ADAM, Jaromír ŘÍHA, Miroslav ŠPANO</i>	227
4. Ocena osiadań zapory na słabonośnym podłożu z wykorzystaniem badań DMT <i>Zbigniew LECHOWICZ, Simon RABARIJOELY, Monika KOSSOWSKA, Grzegorz WRZESIŃSKI</i>	241
5. Embankment monitoring above maximum historical level <i>Roger L. TORRES</i>	253
6. Dam enhancement by concrete cut-off walls – technical overview and selected projects worldwide <i>Henning LESEMANN, Peter BANZHAF</i>	261
7. Distributed Brillouin fiber optic sensor system for long-term structural health monitoring <i>Aleksander WOSNIOK, Katerina KREBBER</i>	271
8. Wykorzystanie termohydraulicznego modelu numerycznego do analizy danych z systemu termomonitoringu zapory Kozłowa Góra w celu weryfikacji hipotezy o nasileniu procesów filtracyjno-erozyjnych w podłożu <i>Paweł OPALIŃSKI, Krzysztof RADZICKI, Stéphane BONELLI, Andrzej SIUDY</i>	279