



Termomonitoring przecieków oraz procesów erozyjnych w analizie konstrukcji wykopów i budowli piętrzących

Krzysztof Radzicki¹, Paweł Popielski², Jürgen Dornstädter³



K. Radzicki



P. Popielski



J. Dornstädter

Thermal monitoring of leaks and internal erosion for analysis of deep excavation and damming structures. Prz. Geol., 65: 234–242.

Abstract. Increased seepage processes, including leaks and resulting internal erosion processes, are among the main threats to the safety of dams and levees and to the safety of deep excavations and nearby buildings. These processes can significantly affect the cost of exploitation of damming structures and the costs of construction of underground parts of buildings. One of the basic methods currently used in detecting and analysing these processes is the thermal monitoring method. This method has been used successfully for several decades, particularly in Western Europe and has evolved substantially in the last decade. Currently it is being implemented

in pilot applications in Poland. The paper describes the risks and consequences of leaks and internal erosion processes for a damming structure and deep excavation. The authors present the basic issues concerning the method of thermal monitoring based on their professional experience in numerous applications of thermal monitoring methods in both hydraulic engineering and geotechnics. The paper shows examples of thermal monitoring application in the analysis of dams and deep excavations.

Keywords: thermal monitoring, leak, internal erosion, dams, levees, deep excavation, construction safety

GeoSym²⁰¹⁶

Nasilona filtracja, przecieki oraz powiązane z nimi procesy erozyjne są podstawowymi zjawiskami, które mogą zagrozić bezpieczeństwu oraz znacząco wpłynąć na koszty eksploatacji budowli piętrzących takich jak zapory ziemne, obwałowania kanałów lub wały przeciwpowodziowe (ICOLD, 2013). Stanowią one również istotne zagrożenie przy realizacji głębokich wykopów dla konstrukcji wykopu oraz budowli sąsiadujących i mogą bardzo znacząco podnieść koszt wykonania inwestycji (Popielski, 2012; Słowikowski, 2013; Kłosiński, 2014).

Wczesne wykrycie i precyzyjne wyznaczenie miejsca przecieku oraz dynamiki rozwoju procesu destrukcyjnego są kluczowe dla minimalizacji ryzyka awarii lub jej zakresu, poprzez podjęcie wczesnych i optymalnych decyzji prowadzących do podjęcia skutecznych działań zapobiegawczych lub remontowych przy jednoczesnej minimalizacji ich kosztów.

Jednym z kluczowych i rekomendowanych narzędzi w wykrywaniu i monitoringu procesów filtracyjno-erozyjnych jest metoda termomonitoringu. Metoda ta została we wczesnych założeniach rozwinięta do monitoringu przecieków i procesów erozyjnych obiektów piętrzących takich jak zapory i wały (Dornstädter, 1997). Obecnie do tych

zastosowań jest ona rekomendowana między innymi przez ICOLD – *International Commission on Large Dams* (ICOLD, 2013). W tej dziedzinie metoda termomonitoringu oferuje obszerny zbiór, w tym innowacyjnych metod pomiarów temperatury oraz szereg zaawansowanych metod i modeli analizy danych, które zbiorczo przedstawił Radzicki (2009, 2011). Wybrane narzędzia tej metody zostały również zaadaptowane z bardzo dobrym efektem do wykrywania przecieków obudów głębokich wykopów (Dornstädter & Huppert, 1998).

Tylko w Europie metoda termomonitoringu została zastosowana do zbadania co najmniej stu kilkudziesięciu budowli piętrzących. Ponadto w Polsce, w 2014 r. zakończona została instalacja pierwszego w Polsce pilotażowego systemu do termomonitoringu procesów filtracyjno-erozyjnych na zaporze ziemnej Kozłowa Góra (Radzicki i in., 2015). Metodą tą zostało również do tej pory przebadanych ponad 170 głębokich wykopów, zwłaszcza w Niemczech, a obecnie technologia ta jest również wprowadzana do oceny bezpieczeństwa wykopów w Polsce.

Znaczne zagrożenie jakie stanowią procesy filtracyjno-erozyjne dla obiektów piętrzących i głębokich wykopów, kluczowe znaczenie metody termomonitoringu w lokalizacji i analizie tych procesów oraz liczne aplikacje tej metody, w tym omówienie wdrożenia pierwszego systemu pilotażowego w Polsce, skłaniają do przedstawienia i podsumowania tych zagadnień.

W artykule przedstawiono uporządkowane definicje erozji wewnętrznej zaproponowane przez EWGIE-ICOLD

¹ Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków; krzysztof.radzicki@iigw.pl.

² Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa; pawel.popielski@is.pw.edu.pl.

³ GTC Kappelmeyer GmbH, Heinrich-Wittmann-Str. 7a, D-76131 Karlsruhe; dornstaedter@gtc-info.de.

(*European Working Group on Internal Erosion of International Commission on Large Dams*) (ICOLD, 2013). Omówiono kluczowe zagrożenia i skutki generowane przez procesy filtracyjno-erozyjne dla budowli piętrzących oraz dla głębokich wykopów, dla których zaprezentowano autorską syntezę przypadków nieszczelności i scenariuszy rozwoju procesu erozyjnego.

Przedstawiono spektrum zagadnień związanych z metodą termomonitoringu i wybrane przykłady jej wykorzystania, opierając się w szczególności na swoich doświadczeniach zawodowych z licznych zastosowań tej metody w Europie oraz wyników realizacji pilotażowej aplikacji w Polsce.

RODZAJE I DEFINICJE EROZJI WEWNĘTRZNEJ

Istnieją różnice oraz nieścisłości w nazewnictwie i definiowaniu erozji, a zwłaszcza jej mechanizmów rozwoju, szczególnie w dziedzinie geotechniki oraz pomiędzy hydrotechniką i geotechniką. Wynika to z historycznych różnic w nomenklaturze i opisie zjawiska w ośrodkach naukowych w różnych krajach (Popielski, 2000; Popielski & Dąbska, 2014). Z uwagi na fakt, że jest to proces destrukcyjny, którego detekcji i analizie w szczególności służy metoda termomonitoringu, autorzy poniżej przedstawiają dla porządku, w skrócie przyjęte definicje. Ponieważ w budownictwie wodnym erozja jest jednym z głównych zagrożeń, były prowadzone w tej dziedzinie wieloletnie międzynarodowe intensywne badania podsumowane przez ICOLD (2013), który przyjął definicje mechanizmów inicjacji i rozwoju procesu erozji. Autorzy oparli się na tych definicjach.

Erozja wewnętrzna jest to proces wymywania drobnych cząstek gruntu poza jego obręb lub przenoszenie ich w inne miejsca przestrzeni porowej, w przeciwieństwie do erozji powierzchniowej, powodującej rozmywanie wyłącznie powierzchni terenu. W dalszej części artykułu pisząc w skrócie „erozja”, autorzy będą mieli na myśli „erozję wewnętrzną”.

Mechanizmy inicjacji i rozwoju procesu erozji przedstawiono schematycznie na rycinie 1, gdzie: (A) sufozja mechaniczna – proces wymywania drobniejszych cząstek spomiędzy większych cząstek szkieletu gruntowego, (B) erozja kontaktowa (zwana też międzywarstwową) – erozja powstająca na styku dwóch warstw gruntu o znacząco różnej granulacji, polegająca na przenoszeniu cząstek gruntu o drobniejszej frakcji pomiędzy cząstki grubszej frakcji, (C) erozja wsteczna – proces wymywania kawern w gruncie od strony odpowietrznej w głąb ośrodka gruntowego, (D) erozja skoncentrowanego przepływu, tj. erozja zapoczątkowana przez istniejącą szczelinę lub norę.

Rozwój erozji wewnętrznej może doprowadzić do powstania przebiccia hydraulicznego, tj. kanału w gruncie łączącego miejsce przyłożenia ciśnienia z miejscem o znacząco mniejszym ciśnieniu, zwłaszcza z powierzchnią terenu; np. kanał łączący skarpe odwodną z odpowietrzną budowlą piętrzącej albo warstwę gruntu o napiętym zwierciadle wody z dnem wykopu.

ZAGROŻENIA I KONSEKWENCJE ZWIĄZANE Z PROCESAMI FILTRACYJNO-EROZYJNYMI W BUDOWLACH PIĘTRZĄCYCH

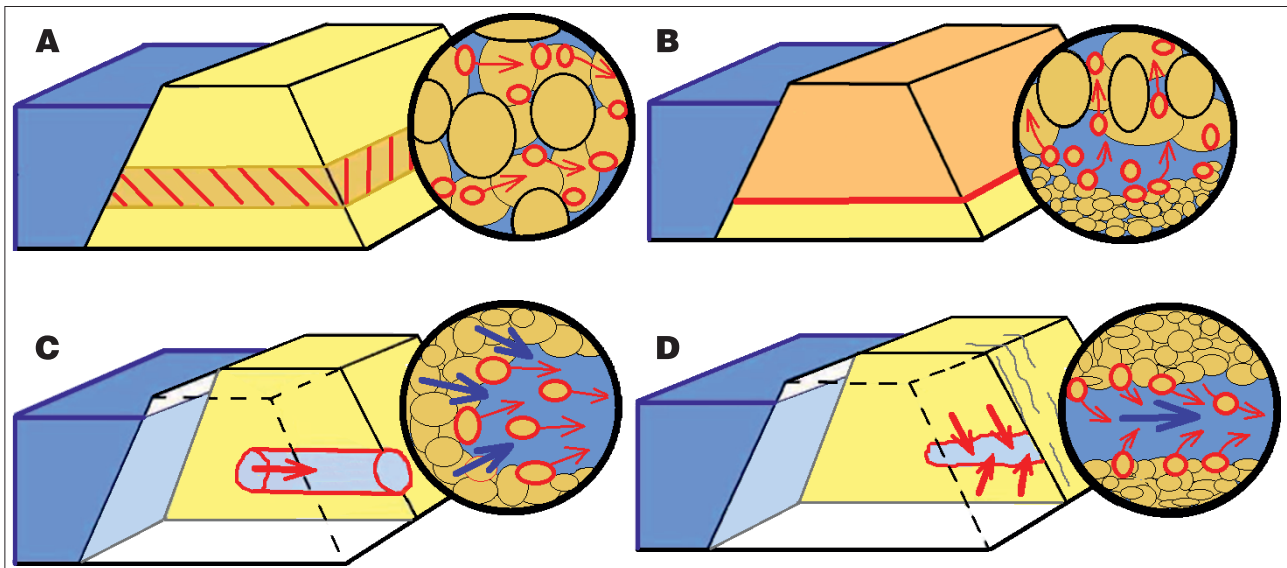
Zagadnienie zagrożenia bezpieczeństwa budowli piętrzącej procesami filtracyjno-erozyjnymi jest znane oraz licznie i dobrze opisane w literaturze, która to z kolei jest obecnie najpełniej podsumowana przez wspomniany biuletyn ICOLD'u (2013). W konsekwencji, w artykule przedstawiono tylko najistotniejsze fakty z tego zakresu.

Według Foster i in. (2000a), erozja wewnętrzna była bezpośrednią przyczyną 46% katastrof zapór ziemnych na świecie. Najpoważniejszym zagrożeniem dla bezpieczeństwa obiektów piętrzących jest wytworzenie się przebiccia hydraulicznego, na skutek procesu erozyjnego, które w szybkim czasie może doprowadzić do katastrofy obiektu (ICOLD, 2013). Większość katastrof i przerwania zapór zachodzi w ciągu 12. godzin od pierwszej wzmokowej identyfikacji rozwoju przebiccia, a w wielu przypadkach w czasie krótszym niż 6 godzin (Foster i in., 2000b). W przypadku wałów przeciwpowodziowych autorzy nie posiadają statystyk ze świata, ale w Polsce w trakcie powodzi w 2010 r. ok. 30% katastrof wałów było spowodowane czynnikami filtracyjno-erozyjnymi (Kledyński i in., 2012). Jednocześnie we wszystkich krajach o rozwiniętej sieci wałów przeciwpowodziowych przeważającą lub istotną ich część stanowią wały niezmodernizowane. Równocześnie w istotnej części nie są one w zadowalającym stanie technicznym, dlatego rozwinięcie się wewnętrznego procesu destrukcyjnego może być w znaczącym stopniu prawdopodobne. Zjawisko to bywa obserwowane nawet w wałach już zmodernizowanych (Makowski & Popielski, 2013).

Wczesna detekcja, ocena dynamiki rozwoju i zasięgu procesu destrukcyjnego pozwala, po pierwsze, na zminimalizowanie ryzyka awarii budowli piętrzącej. Ogranicza tym samym ryzyko potencjalnie bardzo poważnych strat powodziowych w wyniku oddziaływania, powstałej na skutek przerwania tej budowli, fali powodziowej. Po drugie, pozwala na minimalizację kosztów ewentualnych remontów. Dokładne rozpoznanie stanu obiektu i jego prognoza na przyszłość pozwalają zoptymalizować remonty, co ma szczególne znaczenie dla podmiotów zarządzających systemami obiektów piętrzących i planów eksploatacyjnych i remontowych (Radzicki, 2015).

ZAGROŻENIA I KONSEKWENCJE ZWIĄZANE Z NIESZCZELNOŚCIĄ OBUDÓW GŁĘBOKICH WYKOPÓW

Obecnie wykonuje się liczne budowle, zwłaszcza budynki, które posiadają głęboko posadowioną część podziemną. Jest to związane z masowością i wysokością tych obiektów, co w konsekwencji wymusza zastosowanie głębokiego posadowienia, wynikającego z wymogu zapewnienia odpowiedniej liczby miejsc parkingowych dla nowych budynków (Rozporządzenie, 2002). Zagadnienie to szczególnie dotyczy obszarów silnie zurbanizowanych, zwłaszcza aglomeracyjnych. Na przykład w samej Warszawie znajduje się obecnie w różnych etapach realizacji ok. 100 budynków mających ponad 55 m wysokości.



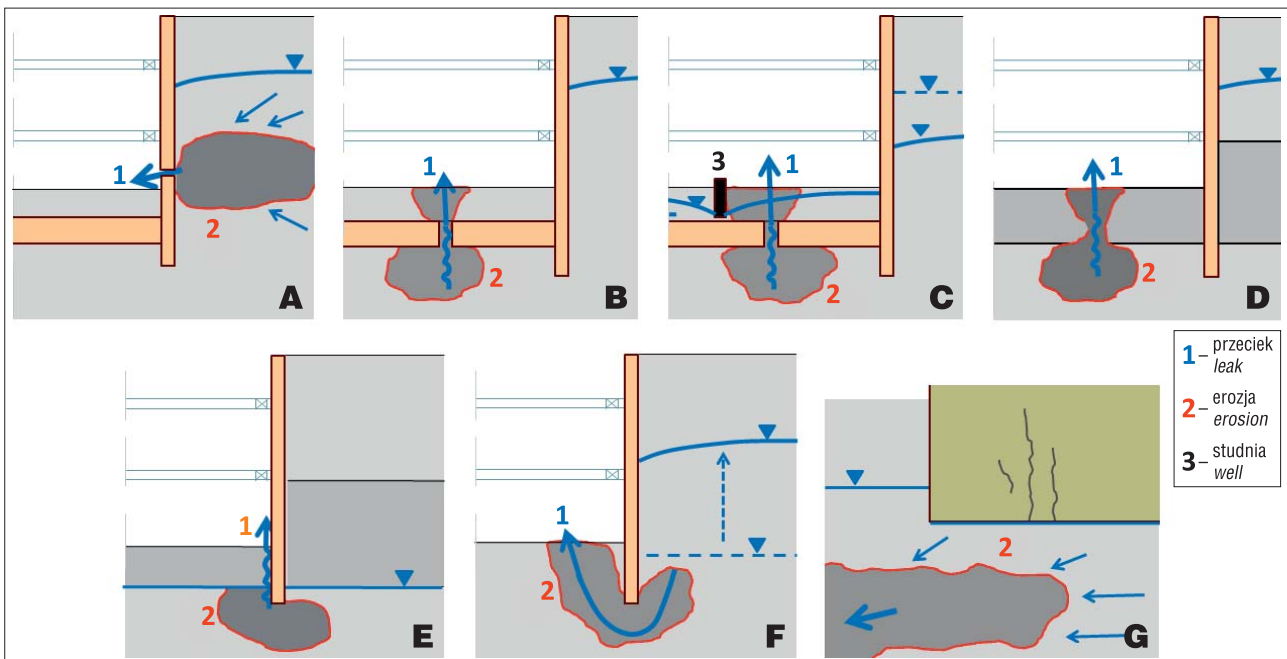
Ryc. 1. Typy inicjacji i rozwoju procesu erozji wewnętrznej: (A) sufozja mechaniczna, (B) erozja kontaktowa, (C) erozja wsteczna, (D) erozja skoncentrowanego przepływu (oprac. własne na podstawie rycin z Radzickiego, 2009 oraz definicji ICOLD, 2013)
Fig. 1. Mechanism of initiation and development of the internal erosion process: (A) suffosion, (B) contact erosion (C) backward erosion, (D) concentrated leaks erosion (compiled based on figures presented by Radzicki, 2009, and the definitions of ICOLD, 2013)

Fundamenty i elementy konstrukcyjne podziemnych części budowli są wykonywane w głębokich wykopach, zazwyczaj poniżej poziomu wody gruntowej (Nazarewicz & Popielski, 2010). Powszechnie stosowaną metodą zabezpieczenia głębokiego wykopu są obudowy, które równocześnie mogą stanowić elementy podziemnej konstrukcji budynku, np. ściany szczelinowe. Muszą one również zapewnić stateczność ścian wykopu i zabezpieczyć wykop przed napływem wody gruntowej (Popielski, 2012).

Jeśli obudowa wykopu lub, wykorzystana jako element strefy szczelnej wokół wykopu, warstwa nieprzepuszczalna gruntów w podłożu są nieszczelne, to głębienie wykopu, połączone z odwodnieniem gruntu w obrysie ograniczonym

ścianami obudowy, może doprowadzić do gwałtownego napływu wód gruntowych do jego wnętrza. W konsekwencji jest możliwe wystąpienie procesu erozji gruntu. Napływ do wykopu wody gruntowej stanowi istotną przeszkodę w planowym wykonaniu prac budowlanych, a w szczególności stanowi zagrożenie dla bezpieczeństwa wykopu oraz sąsiadujących z nim budowli i infrastruktury podziemnej.

Zdarzenia takie, o różnym nasileniu, występują relatywnie dość często, przynosząc jednak istotne konsekwencje. Jednakże w interesie wykonawców i inwestorów nie leży ich nagłaśnianie, w konsekwencji informacja o nich zazwyczaj nie dociera do szerszej wiadomości, o ile nie doszło do katastrofy budowlanej.



Ryc. 2. Typowe schematy nieszczelności wykopu (A-F) oraz scenariuszy rozwoju procesu erozyjnego (A-G) (Popielski i in., 2016, zmienione)
Fig. 2. Typical leakschemes of deep excavation (A-F) and scenarios of internal erosion development (A-G) (Popielski et al., 2016, modified)

Na rycinie 2 (od A do F) przedstawiono syntezę przypadków przecieków przez elementy podziemnej konstrukcji budynku opartą na pracach Clougha i O'Rurke'a (1990), Popielskiego (2012) oraz Kłosińskiego (2014) (A – przeciek przez ściany obudowy; B i C – przecieki przez przesłoną poziomą; D – nieszczelność lub powstanie przebiecia hydraulicznego w warstwie gruntów nieprzepuszczalnych w dnie wykopu; E – przeciek po obwodni konstrukcji; F – napływ wody do wykopu spowodowany spiętrzeniem wody za ścianą wykopu). Jednocześnie na rycinie 2 (od A do G) zaprezentowano schematy scenariuszy rozwoju procesu erozyjnego w konsekwencji zaistnienia przecieku. Przypadki od A do F przedstawiają proces erozji zagrażający bezpieczeństwu wykopu. Utrata stateczności wykopu może również zagrazić bezpieczeństwu budynków i infrastruktury w bezpośrednim otoczeniu wykopu. Dodatkowo przypadek G schematycznie przedstawia proces erozji mogący zaistnieć nawet w znaczącej odległości od wykopu, związany z nasileniem przepływu wody gruntowej w kierunku wykopu, który to proces także może wpłynąć na warunki stateczności budynków i infrastruktury technicznej (np. rurociągów).

Wystąpienie wymienionych przecieków i procesów erozyjnych może skutkować: podtopieniem lub zatopieniem wykopu, deformacją obudowy wykopu, zniszczeniem dna wykopu, awarią obudowy wykopu, zmianą warunków wodno-gruntowych otoczenia wykopu i warunków posadowienia sąsiadujących budowli, osiadaniami gruntu poza obudową wykopu, zapadnięciem gruntu (Popielski, 2012). Możliwe konsekwencje tych zdarzeń: wydłużenie czasu budowy, naprawa i/lub wykonanie wzmocnienia obudowy wykopu, przeprojektowanie wykonywanej budowli z uwagi na zmiany zaistniałe w podłożu gruntowym wokół wykopu, odszkodowania z tytułu uszkodzeń sąsiadujących z wykopem budynków oraz infrastruktury.

Celem sprawnego i planowego wykonania części podziemnej budowli i uniknięcia wspomnianych powyższych problemów jest dokładna detekcja wszelkich nieszczelności strefy wokół zaplanowanego wykopu, zanim głębienie wykopu zostanie rozpoczęte. Strefą tą są ściany obudowy zagłębione w istniejącej w podłożu poziomej warstwie gruntów nieprzepuszczalnych lub jeśli jej brak, połączone z wykonaną w jej miejsce poziomą przesłoną szczelną (np. wykonaną technologią iniekcji strumieniowej *jet grouting*). Detekcja nieszczelności pozwala na wykonanie precyzyjnego uszczelnienia z powierzchni terenu i dopiero po jego wykonaniu bezpieczne głębienie wykopu.

METODA TERMOMONITORINGU PROCESÓW FILTRACYJNO-EROZYJNYCH

Metoda termomonitoringu opiera się na sprzężonym transporcie ciepła i wody. Nawet, wyłącznie zmiana wilgotności gruntu znacząco wpływa na prędkość procesu przewodzenia ciepła w gruncie. Pojawienie się przepływu wody, w tym wystąpienie przecieku, lub zwiększenie prędkości jej przepływu generuje intensywny, adwekcyjny transport ciepła w gruncie, proporcjonalny do prędkości przepływu. Z kolei, na przepływ wody w gruncie wpływają procesy erozyjne, które w charakterystyczny sposób oddziałują na pole temperatury w gruncie (Guidoux, 2008; Radzicki & Bonelli, 2010, 2012a; Beguin, 2011). W konse-

kwencji metoda termomonitoringu pozwala na detekcję i analizę procesów filtracyjnych, w tym przecieków i procesów erozyjnych.

Celem bliższego zobrazowania powyższych zależności, na rycinie 3 przedstawiono przykład wpływu różnych stadiów rozwoju procesu sufozji na pole termiczne przekroju zapory. Białe strzałki pokazują przebieg największych gradientów hydraulicznych.

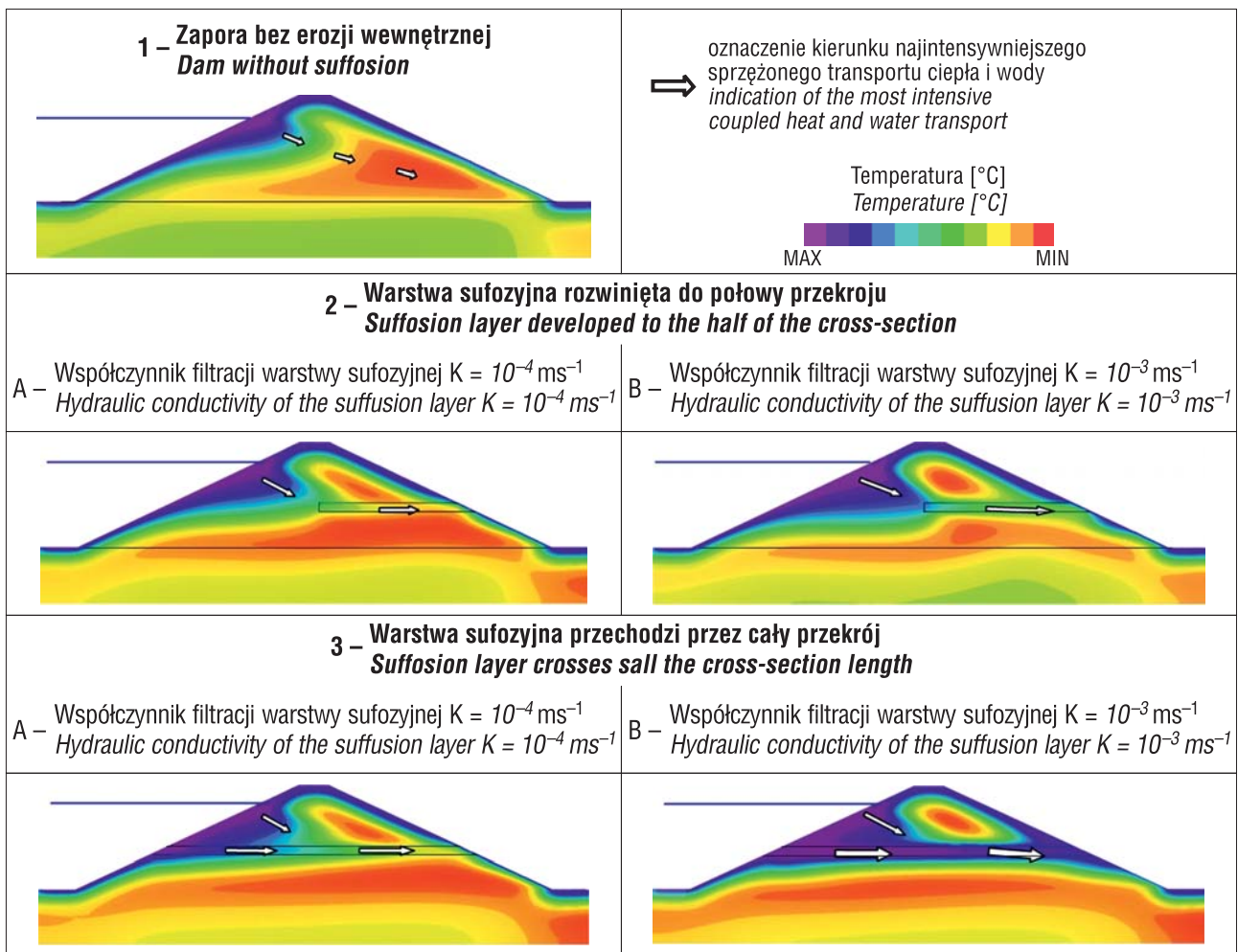
Metody termomonitoringu bazują na dwóch fundamentalnych podejściach, które w bardzo dużym stopniu zostały rozwinięte w ciągu ostatniej dekady, co doprowadziło do aktualnego poziomu skuteczności i rekomendacji tej metody. Pierwszym z nich są różne sposoby (również innowacyjne) pomiarów temperatury, drugim zaawansowane metody i modele analizy danych pomiarowych, umożliwiające odczytanie informacji o procesach filtracyjno-erozyjnych w gruncie z sygnału termicznego.

Charakteryzującym metodę termomonitoringu rodzajem czujników są zwłaszcza liniowe czujniki temperatury umożliwiające pomiar temperatury w sposób ciągły lub quasi-ciągły na całej długości opomiarowanego odcinka, na przykład wzdłuż budowli piętrzącej.

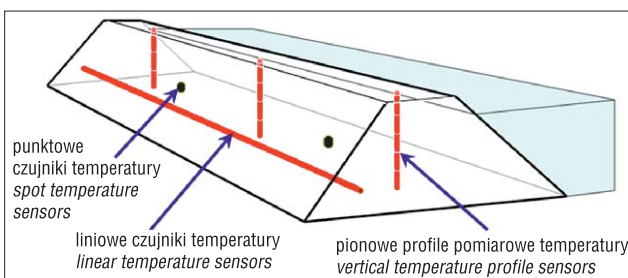
Liniowe czujniki temperatury zmieniły jakościowo monitoring procesów filtracyjno-erozyjnych w budownictwie wodnym, w porównaniu do dotychczasowych pomiarów punktowych w oddalonych od siebie przekrojach. Czujniki liniowe stosuje się również do wykonywania pionowych profili temperatury korpusu i podłoża, która to metoda znalazła szczególne zastosowanie w termomonitoringu szczelności głębokich wykopów (ryc. 4).

Czujniki liniowe umożliwiają zastosowanie na budowlach piętrzących oraz w monitoringu głębokich wykopów koncepcji monitoringu quasi-trójwymiarowego zaproponowanej i omówionej szczegółowo przez Radzickiego (2015). Koncepcja ta pozwala, przy odpowiednim rozmieszczeniu czujników, na monitoring kluczowych stref obiektu i detekcję procesów destrukcyjnych w sposób quasi-przestrzenny, ciągły na długości obiektu i optymalizujący efekt monitoringu w stosunku do jego kosztów, zwłaszcza aparaturowych.

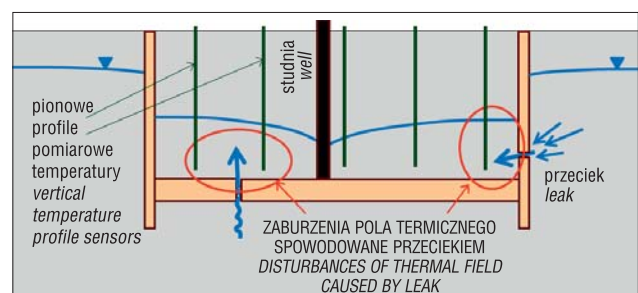
Jednym z rodzajów czujników liniowych są czujniki światłowodowe, tj. światłowody umieszczone w wodoodpornym, opancerzonym kablu. W światłowód wpuszczany jest impuls laserowy, który na całej długości światłowodu ulega rozpraszaniu. Światło rozproszone wraca do punktu wysłania impulsu, a analiza jego widma pozwala na określenie temperatury kolejnych odcinków, na których impuls uległ rozproszeniu. Technologia ta ma szereg istotnych zalet, ale również kilka ograniczeń (Radzicki i in., 2015). W wielu przypadkach, korzystne jest zastosowanie technologii pomiarowych opartych na wielopunktowych czujnikach pomiarowych, rozwiniętych jako alternatywne do czujników światłowodowych. W czujnikach wielopunktowych są zastosowane ciągi pojedynczych punktów pomiarowych, ale zlokalizowanych na tyle gęsto, że umożliwiają quasi-ciągłość pomiarów w przestrzeni. Przykładem takiej technologii są czujniki wielopunktowe montowane bezwykopowo, przez wbijanie z powierzchni kolejnych czujników temperatury w zaplanowanym ciągu, kolejno obok siebie. Czujniki te pozwalają na zainstalowanie termomonitoringu quasi-ciągłego na długości obiektu, szczególnie w jego stopie odpowietrznej, o dowolnym stopniu zagęsz-



Ryc. 3. Przykład wpływu rozwoju procesu sufozji na pole temperatury przekroju zapory (Radzicki & Bonelli, 2012a)
Fig. 3. An example of the impact of suffosion process development on the temperature field in earth dam cross-section (Radzicki & Bonelli, 2012a)



Ryc. 4. Rodzaje czujników temperatury stosowane w termomonitoringu (Popielski i in., 2016)
Fig. 4. The types of temperature sensors used in thermal monitoring (Popielski et al., 2016)



Ryc. 5. Schemat zastosowania metody termomonitoringu do detekcji przecieków konstrukcji, zaplanowanego głębokiego wykopu (Popielski i in., 2016)
Fig. 5. Scheme of the thermal monitoring method application for leak detection of underground construction for planned deep excavation (Popielski et al., 2016)

czenia czujników w przestrzeni. Procedury te zostały szerzej opisane przez Radzickiego i in. (2015).

Innym sposobem pomiarów temperatury, pozwalającym wykonywać profile pionowe temperatury gruntu, jest technologia rozwinięta przez GTC Kapellmayer w latach 90. XX w. (Dornstädter & Huppert, 1998) polegająca na zastosowaniu segmentowych rurek o wąskiej średnicy zabijanych w grunt z zamieszczonymi w nich łańcuchami czujników temperatur, rozmieszczonymi na całej długości rurki w odstępach co 1m. Pozwala ona na relatywnie niedrogo wykonywanie pomiarów pionowych profili temperatury

w gruncie do 40 m głębokości. Technologia ta została zastosowana do detekcji przecieków na kilkudziesięciu obiektach piętrzących oraz jest kluczowym narzędziem w termomonitoringu przecieków do głębokich wykopów.

Istnieje obszerna metodyka aplikacji procedury termomonitoringu procesów filtracyjno-erozyjnych na budowach piętrzących (Radzicki, 2011, 2014). W zależności od przypadku i indywidualnej charakterystyki budowli i problemu oraz celów badań stosuje się szereg metod graficz-

ných, których zestawienie opracował Radzicki (2009) oraz modele statystyczne i statystyczno-fizyczne (zbioreczno przedstawione przez Radzickiego, 2011), jak również symulacje numeryczne (Guidoux, 2008; Opaliński i in., 2015). Ich zastosowanie pozwala na szczegółowe analizy korpusu i podłoża obiektu, określanie parametrów termohydraulicznych ośrodka wodno-gruntowego, w tym wartości prędkości filtracji, a także na dokładne rozpoznanie lokalizacji i geometrii stref erozyjnych oraz zdefiniowanie współczynników filtracji gruntu.

W termomonitoringu przecieków głębokich wykopów jest stosowana wyłącznie jedna z metod graficznych analizy pomiarów temperatury, tj. jakościowa metoda detekcji zaburzeń pomiaru termicznego w czasie, w wersji pasywnej lub aktywnej. Opis aplikacji tej metody do detekcji przecieków wykopów przedstawiono obszerniej w kolejnym rozdziale.

BADANIE SZCZELNOŚCI GŁĘBOKICH WYKOPÓW METODĄ TERMOMONITORINGU

Badanie szczelności konstrukcji wykopu metodą termomonitoringu realizuje się po wybudowaniu z powierzchni terenu obudowy planowanego wykopu, ale jeszcze przed rozpoczęciem jego głębienia. Obniżenie, poprzez pompowanie, zwierciadła wody w obrysie planowanego wykopu powoduje napływ wody przez nieszczelności ścian lub podłoża, które można wykryć metodą termomonitoringu. Badanie przeprowadza się, opisanymi w poprzednim rozdziale, wbijanymi w grunt czujnikami do wykonywania pionowych profili pomiaru temperatury gruntu (ryc. 5).

Najpowszechniej stosowaną i najbardziej ekonomiczną procedurą termomonitoringu głębokich wykopów jest metoda pasywna, czyli wykorzystująca naturalne temperatury badanego ośrodka. W konstrukcji obudów głębokich wykopów wykorzystuje się materiały na bazie cementu w konstrukcji elementów szczelnych i nośnych zabezpieczających głęboki wykop (np. ściany szczelinowe). Podczas wiązania cementu jest wydzielane ciepło hydratacji, które powoduje zwiększenie temperatury podłoża w sąsiedztwie elementów uszczelniających. Ze względu na małą przewodność cieplną gruntu, temperatura w podłożu pozostaje podwyższona przez długi czas. Chłodniejsza woda gruntowa spoza obudowy wykopu, przedostając się przez nieszczelności obudowy wykopu, prowadzi do lokalnego szybkiego obniżenia temperatury podgrzanego gruntu w pobliżu nieszczelności. Ciepło hydratacji w zależności od przypadku może być wykorzystane do detekcji przecieków nawet do kilku tygodni po zakończeniu wykonywania obudowy. Metodą tą wykrywa się nieszczelności dla przepływu wody o prędkościach już rzędu 10^{-7} ms^{-1} . W przypadku, gdy nastąpiło ustanie hydratacji i rozproszenie powstałego ciepła lub wykonano obudowę wykopu z materiału nieemitującego ciepła (np. ścianek szczelnych), stosuje się aktywny sposób termomonitoringu. Wówczas są montowane w gruncie rurki pomiarowe z czujnikami temperatury zintegrowanymi z mikrogrzałkami, którymi ogrzewa się grunt w bezpośrednim otoczeniu czujnika. Analiza charakterystyki odprowadzania ciepła wygenerowanego przez grzałki pozwala na detekcję przecieków.

WYBRANE PRZYKŁADY ANALIZY METODĄ TERMOMONITORINGU PROCESÓW FILTRACYJNO-EROZYJNYCH W BUDOWLACH PIĘTRZĄCYCH

Poniżej przedstawiono kilka z licznych przykładów aplikacji metody termomonitoringu do detekcji i analizy procesów filtracyjno-erozyjnych w budowlach piętrzących.

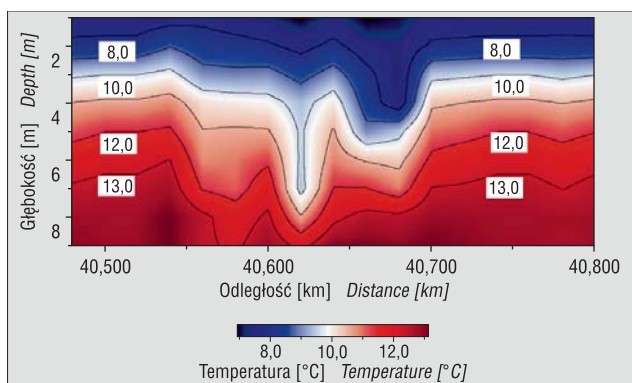
W pierwszej kolejności przedstawiono prostą metodę graficzną stosowaną w lokalizacji przecieków i procesów erozyjnych. Na rycinie 6 zaprezentowano pole temperatury w przekroju zapory, wykonane metodą interpolacji pomiarów profili pionowych temperatury, zrealizowanych z osi korony zapory w jej korpusie i podłożu. Wysokość zapory wynosiła ok. 6 m.

Aplikację prostej metody graficznej do analizy powyższych danych, przez porównanie temperatur przekroju termicznego z wybranym profilem charakterystycznym tego przekroju, przedstawiono na rycinie 7. Największe różnice temperatury wykazują strefy przecieków i równocześnie erozji w przekroju zapory.

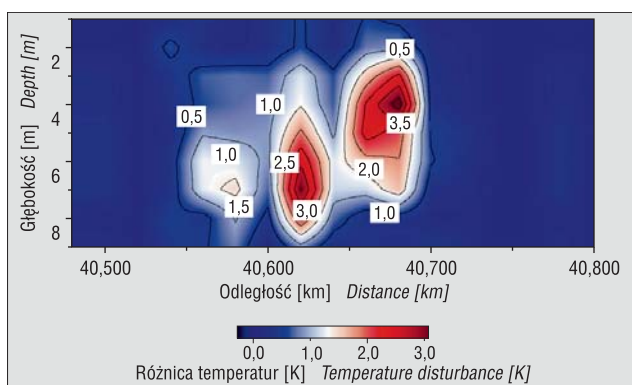
Z kolei na rycinie 8 zaprezentowano wynik aplikacji modelu statystyczno-fizycznego funkcji impulsowej IRFTA do detekcji miejsc przecieków francuskiego zbiornika Perine. Lokalizacja przecieków na długości obiektu została zaznaczona na rycinie zielonymi strzałkami.

Model IRFTA jest dedykowany zwłaszcza analizie pomiarów temperatury z liniowych czujników temperatury umieszczonych na długości budowli piętrzącej celem, po pierwsze detekcji przecieków, po drugie rozpoznania charakterystycznych stref hydrotermicznych obiektu i określeniu stopnia nasilenia procesu filtracyjnego (Radzicki, 2009; Radzicki & Bonelli, 2012b). Basen Perine został zaprojektowany ze specjalnymi strefami przecieków o kontrolowanym wydatku, celem weryfikacji metod detekcji przecieków. W toku wieloletnich badań tego basenu udowodniono m.in., że metoda termiczna z czujnikami liniowymi umieszczonymi w skarpie odpowietrznej pozwala na detekcję przecieku już na tyle niewielkiego, że powodującego wyłącznie lokalną zmianę wilgotności skarpy odpowietrznej (Radzicki, 2009).

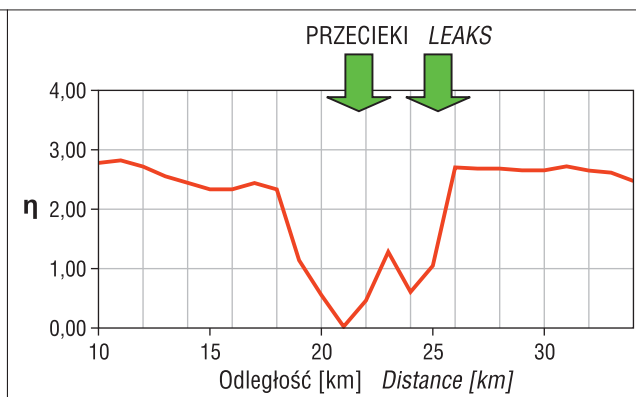
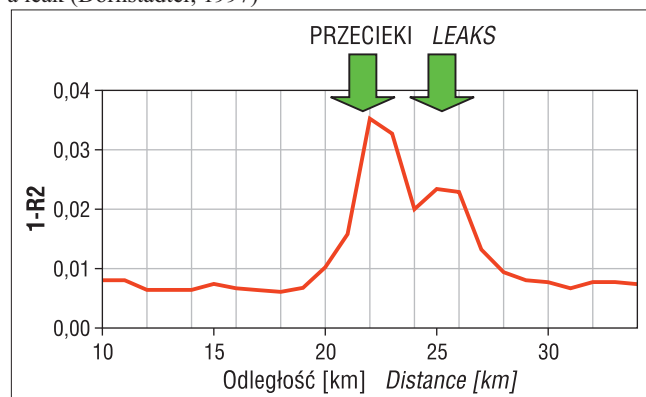
Kolejny przykład aplikacji metody termomonitoringu dotyczy pilotażowej instalacji Polsce. W 2014 r. ukończono na zaporze Kozłowa Góra instalację pierwszego w Polsce systemu termomonitoringu budowli piętrzącej. Zrealizowano ją w ramach współpracy Instytutu Inżynierii i Gospodarki Wodnej Politechniki Krakowskiej (odpowiedzialna za projekt systemu i nadzór naukowy w tym analizę pomiarów) ze spółką Neostrain (deweloper innowacyjnych czujników temperatury i instalatora systemu) oraz Górnośląskiego Przedsiębiorstwa Wodociągowego, właściciela obiektu. Opis zapory, zaobserwowane dotychczas procesy filtracyjno-erozyjne oraz zainstalowany na niej system pomiarowy w układzie termomonitoringu quasi-trójwymiarowego zostały szerzej opisane w pracy Radzickiego i in. (2015). Jednym z wyników aplikacji tego systemu i metody termomonitoringu było zdefiniowanie stanu podłoża przekroju 6–6 zapory. Dzięki pomiarom temperatury oraz ich analizie hydrotermicznej z zastosowaniem symulacji numerycznej i analizy wstecznej odwzorowano pomierzone temperatury,



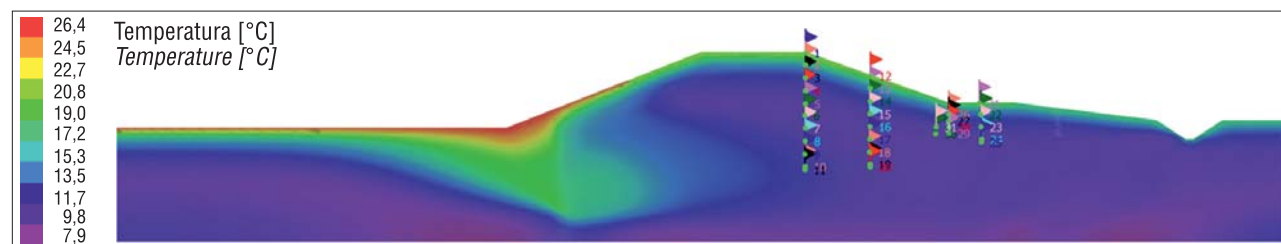
Ryc. 6. Pole temperatury w przekroju zapory (Dornstädter, 1997)
Fig. 6. Field temperature of earth dam cross-section (Dornstädter, 1997)



Ryc. 7. Pole największych zaburzeń temperatury spowodowanych przeciekiem (Dornstädter, 1997)
Fig. 7. Field of the largest temperature disturbances caused by a leak (Dornstädter, 1997)



Ryc. 8. Przykład detekcji przecieków na wale eksperymentalnym Perine modelem IRFTA (Radzicki & Bonelli, 2012B) gdzie „1-R2” oraz „η” są parametrami modelu
Fig. 8. An example of the detection of leaks in the levee of Perine experimental basin using IRFTA model (Radzicki & Bonelli, 2012B) where “1-R2” and “η” are model parameters



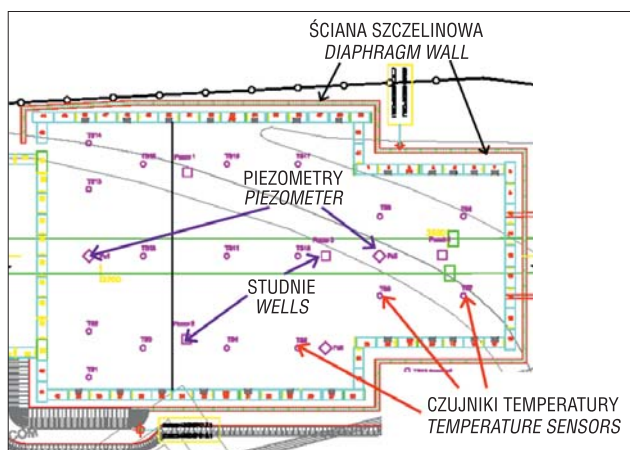
Ryc. 9. Numeryczne odwzorowanie rzeczywistego pola temperatury przekroju 6–6 zapory Kozłowa Góra w wybranej chwili czasowej (Opaliński i in., 2015)
Fig. 9. Numerical modelling of the temperature field of cross-section 6–6 of the Kozłowa Góra dam in a selected time moment (Opaliński et al., 2015)

skalibrowano model hydrauliczny i określono wartość przepływu pod niedogłębioną ścianką szczelną, jak również wartości współczynnika filtracji gruntu. Umożliwiło to wykluczenie istotnej dla użytkownika hipotezy o występowaniu w tym przekroju, w podłożu zapory, lokalnych lub intensywnych procesów erozyjnych (ryc. 9).

PRZYKŁADY DETEKCJI PRZECIEKÓW OBUDOWY WYKOPU METODĄ TERMOMONITORINGU

W rozdziale przedstawiono przykład aplikacji metody termomonitoringu do detekcji przecieków obudowy wykopu, zbudowanej kilka lat temu, włoskiej stacji metra. Obudowa wykopu została wykonana w formie szczelnej niecki. Jej ściany zabezpieczono metodą ścian szczelinowych, a poziomą przesłonę wewnątrz obrysu planowanego przeprowadzono metodą iniekcji strumieniowej. Do badania zastosowano 17 czujników wielopunktowych temperatury do wykonywania pionowych profili pomiarowych temperatury gruntu, które wbito w grunt do poziomu przesłony poziomej uszczelniającej dno wykopu. Zainstalowano je wzdłuż ścian oraz w osi obudowy, celem badania szczelności zarówno ścian, jak i dna wykopu. Ich lokalizację, zarys obudowy wykopu oraz położenie czterech studni odwadniających i dwóch piezometrów przedstawia rycina 10.

Pomiary temperatury wykonywano w trakcie próbnego odwodnienia wykopu metodą pompowania wody ze studni. Temperatura gruntu niezaburzona wpływem wykonania obudowy wykopu wynosiła kilkanaście stopni Celsjusza. Temperatura gruntu w bezpośrednim sąsiedztwie wykonanych ścian szczelinowych, tuż przed rozpoczęciem pom-



Ryc. 10. Plan wykopu z zaznaczoną lokalizacją czujników do termomonitoringu (T1 do T17), studni (różowe kwadraty) i piezometrów (różowe romby) (rys. GTC Kapelmayer)

Fig. 10. Excavation view with the location of thermal monitoring sensors (T1 to T17), wells (pink squares) and piezometers (pink diamonds) (by GTC Kapelmayer)

powania, wahała się od 35,6 do 45,7°C, w zależności od chwili wykonania danego fragmentu ściany szczelinowej i lokalizacji czujnika. Pomiar zerowy, przed rozpoczęciem pompowania, wskazywał na typowy rozkład temperatury gruntu w profilu pionowym, charakterystyczny dla obudowy wykopu wykonanej opisaną wyżej technologią. Wzdłuż całej wysokości ściany, z powodu wydzielanego przez nią ciepła na skutek hydratacji, temperatury gruntu były podwyższone w stosunku do temperatury „tła gruntu” poza wykopem. Ponadto, temperatury przy powierzchni terenu

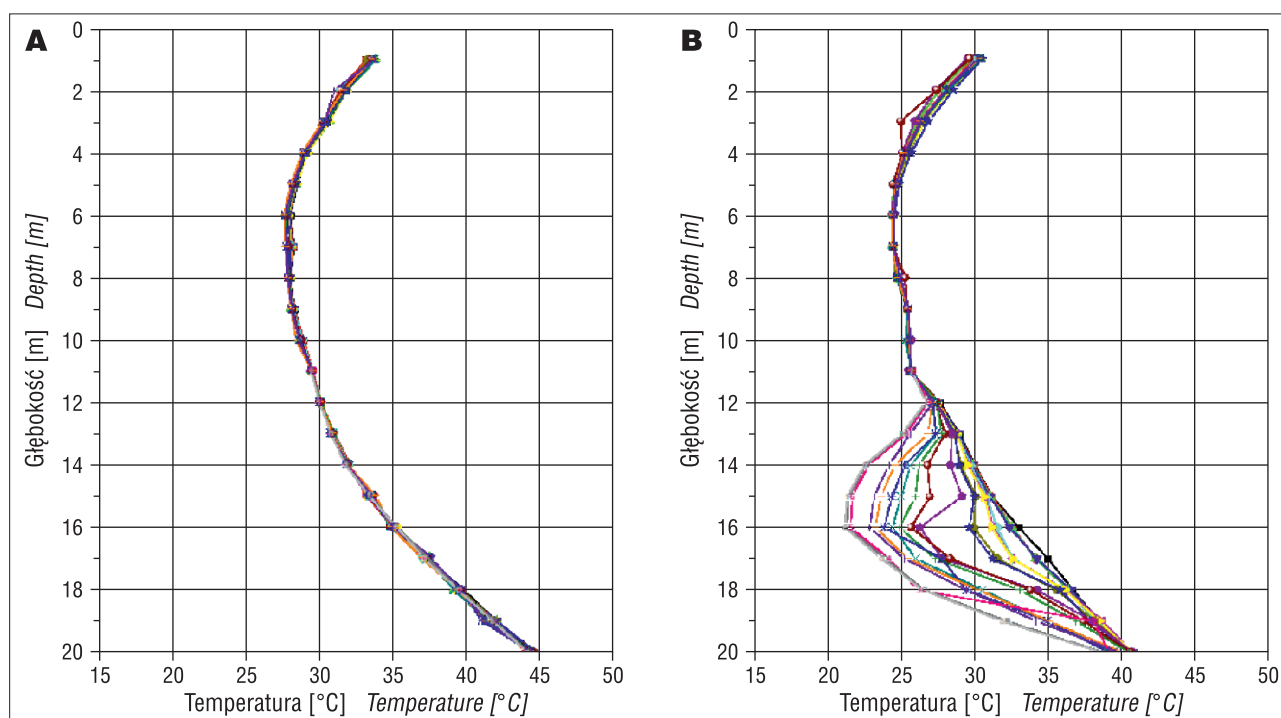
i w pobliżu płyty dennej były dodatkowo podwyższone, co było spowodowane odpowiednio wpływem promieniowania słonecznego oraz ciepłem powstałym na skutek hydratacji przesłony iniekcyjnej. Opisany rozkład temperatur pozostał niezmienny przez cały okres pomiarów w strefach, gdzie nie było przecieków. Przykład takich pomiarów przedstawia rycina 11A.

Jednocześnie, obniżenie zwierciadła wody w gruncie wewnątrz obrysu budowy planowanego wykopu spowodowało napływ chłodniejszej wody z zewnątrz przez nieszczelności obudowy i narastające wychładzanie gruntu w ich sąsiedztwie. Rycina 11B przedstawia profile pionowe temperatury mierzone w kolejnych dniach czujnikiem zlokalizowanym w pobliżu przecieku. W dolnej części wykresu wyraźnie widoczne szybkie wychładzanie się gruntu spowodowane przeciekiem, pozwalające na jego detekcję i dokładną lokalizację.

PODSUMOWANIE

Metoda termomonitoringu jest użytecznym i skutecznym narzędziem detekcji i analizy procesów filtracyjnych, w tym przecieków oraz procesów erozyjnych, stosowanym od dziesięcioleci i zweryfikowanym w licznych aplikacjach w budownictwie wodnym i geotechnice.

Posiada ona rozbudowane spektrum narzędzi pomiarowych temperatury i analizy danych w zakresie procesów filtracyjno-erozyjnych w budowlach piętrzących. Niektóre z nich okazały się być również bardzo przydatne w wyprzedzającej detekcji przecieków konstrukcji głębokich wykopów jeszcze przed wykonaniem głębienia wykopu.



Ryc. 11. Rozkład temperatury w profilach pionowych w kolejnych dniach pompowania, pomiarów dokonano czujnikami zlokalizowanymi w pobliżu ściany szczelinowej. **A** – profile temperatury dla przypadku braku przecieku (wg GTC Kapelmayer), **B** – profile temperatury pomierzone w strefie przecieku (rys. GTC Kapelmayer)

Fig. 11. Measurements of vertical profiles of temperature carried out on consecutive days of pumping by sensors located near the diaphragm wall. **A** – temperature profiles in the absence of leak (after Kapelmayer GTC), **B** – temperature profiles measured in the leak zone (by GTC Kapelmayer)

Szczególne znaczenie ma możliwa dzięki tej metodzie wczesna i dokładna detekcja przecieków i procesów erozyjnych dla zapobiegania awariom i ograniczenia kosztów remontów, a więc kluczowych zagadnień związanych z budową i eksploatacją obiektów.

W pracy zaprezentowano wyniki prac badawczo-rozwojowych prowadzonych przez autorów artykułu między innymi w ramach projektów: Erinoh (2007–2009) „Erosion interne des ouvrages hydrauliques” finansowanego przez francuskie Ministerstwo Środowiska, projektów badawczych własnych N N506 266339 (2010–2011) „Metoda termicznej detekcji i oceny procesów filtracyjnych w ziemnych obiektach piętrzących” oraz N N523 563638 (2010–2011) „Oddziaływanie głęboko posadowionych obiektów budowlanych na środowisko wód gruntowych w terenach silnie zurbanizowanych” finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego RP, jak również MRPO.02.02.01-12-2-0559-4-13 (2012–2014) „Opracowanie innowacyjnego systemu wielowymiarowego (przestrzennego) monitoringu stanu technicznego obiektów budowlanych” finansowanego z Małopolskiego Regionalnego Programu Operacyjnego. Autorzy składają serdeczne podziękowania redaktorowi naczelnemu dr. hab. Andrzejowi Gąsiewiczowi oraz recenzentom dr. hab. inż. Eugeniuszowi Kodzie i dr inż. Aleksandrze Boreckiej za cenne dla przygotowania artykułu uwagi.

LITERATURA

- BEGUIN S. 2011 – Etude multi-échelle de l'érosion de contact au sein des ouvrages hydrauliques en terre. Praca doktorska. Uniwersytet Grenoble, Grenoble.
- CLOUGH G. & O'RURKE T. 1990 – Construction induced movements of in situ walls, Proc. of Conf: Design and Performance of Earth Retaining Structures, New York: 67–79.
- DORNSTÄDTER J. 1997 – Detection of internal erosion in embankment dams. XIX ICOLD Congress, Q73 R.7, Florence: 87–101.
- DORNSTÄDTER J. & HUPPERT F. 1998 – Thermische Leckortung an Trogbaugruben mit tiefliegenden Sohlen, Vorträge der Baugrundtagung 1998 in Stuttgart. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V: 179–187.
- FOSTER M., FELL R. & SPANNAGLE M. 2000a – The statistics of embankment dam failures and accidents. Canadian Geotech. J., 37 (5): 1000–1024.
- FOSTER M., FELL R. & SPANNAGLE M. 2000b – A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping. Canadian Geotech. J., 37 (5): 1025–1061.
- GUIDOUX C. 2008 – Développement et validation d'un système de détection et de localisation par fibres optiques de zones de fuite dans les digues en terre. Praca doktorska. Uniwersytet Joseph Fourier, Grenoble.
- ICOLD 2013 – Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and Their Foundation, Bulletin no. 164, Vol. 1: Internal erosion processes and engineering assessment: 151.
- KLEDYŃSKI Z., LEJMAN W. & MIODUSZEWSKI W. 2012 – Analiza uszkodzeń wałów przeciwpowodziowych w okresie letnich wezbrań 2010 roku. Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie, 55 (2): 64–69.
- KŁOSIŃSKI B. 2014 – Sprawdzanie stateczności dna głębokich wykopów. Geoinżynieria drogi mosty tunele, 46 (1): 38–44.
- MAKOWSKI R. & POPIELSKI P. 2013 – Wykorzystanie terenowych badań geograficznych i modelowania numerycznego do oceny zmodyfikowanych wałów przeciwpowodziowych Zapory: bezpieczeństwo i kierunki rozwoju. IMGW, Warszawa: 117–131.
- NAZAREWICZ M. & POPIELSKI P. 2010 – Analiza oddziaływania czasowego odwodnienia w trakcie realizacji głębokich wykopów fundamentowych na budynki sąsiednie. Czasopismo Techniczne; ser.: Środowisko, 107 (1-Ś) (14): 1–18.
- OPALIŃSKI P., RADZICKI K., BONELLI S. & SIUDY A. 2015 – Wykorzystanie termohydraulicznego modelu numerycznego do analizy danych z systemu termomonitoringu zapory Kozłowa Góra w celu weryfikacji hipotezy o nasileniu procesów filtracyjno-erozyjnych w podłożu, Eksploatacja budowli piętrzących – diagnostyka i zapobieganie zagrożeniom. IMGW, Warszawa: 279–290.
- POPIELSKI P. 2000 – Model sufozji mechanicznej w ujęciu metody elementów skończonych. Praca doktorska, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, Warszawa.
- POPIELSKI P. 2012 – Oddziaływanie głębokich posadowień na otoczenie w środowisku zurbanizowanym, Politechnika Warszawska Prace Naukowe Inżynieria Środowiska, 61, OWPW, Warszawa.
- POPIELSKI P. & DĄBSKA A. 2014 – Numerical model of suffusion. [W:] Izvestia Vsesouznogo Naucno-Issledovatel'skogo Instituta Gidrotehniki Imenii B.E. Vedeneeva, Energia, (271): 23–33.
- POPIELSKI P., RADZICKI K. & DORNSTÄDTER J. 2016 – Badania szczelności obudowy głębokiego wykopu metodą termomonitoringu. Acta Sci. Pol. Architectura, 15 (3): 127–138.
- RADZICKI K. 2009 – Analyse retard des mesures de températures dans les digues avec application à la détection de fuites. Praca doktorska, AgroParisTech, Paryż.
- RADZICKI K. 2011 – Bezpieczeństwo zapór – nowe wyzwania. Zastosowanie termomonitoringu do detekcji przecieków oraz erozji wewnętrznej w ziemnych budowach piętrzących. IMGW, Warszawa: 230–239.
- RADZICKI K. 2014 – The important issues of levees monitoring with special attention to thermal-monitoring method application. South Baltic Conference on New Technologies and Recent Developments in Flood Protection, Gdańsk, s.10.
- RADZICKI K. 2015 – Innowacyjne, instrumentalne systemy pomiarowe quasi-3D monitoring procesów filtracyjno-erozyjnych oraz odkształceń w zaporach i wałach. Ceramic materials, 67 (1): 81–87.
- RADZICKI K. & BONELLI S. 2010 – A possibility to identify piping erosion in earth hydraulic works using thermal monitoring, 8th ICOLD European Club Symposium, Innsbruck: 618–623.
- RADZICKI K. & BONELLI S. 2012a – Monitoring of the suffusion process development using thermal analysis performed with IRFTA model. 6th ICSE, Paryż: 593–600.
- RADZICKI K. & BONELLI S. 2012b – Physical and parametric monitoring of leakages in earth dams using analysis of fibre optic distributed temperature measurements with IRFTA model, Q. 95 – R. 7, 24th ICOLD Congress, Kioto: 93–112.
- 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 International Congress on Large Dams, Stavanger: 85–101.
- ROZPORZĄDZENIE. 2002 – Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, wraz ze zmianami. Dz.U. 2002 nr 75 poz.690.
- SŁOWIKOWSKI D. 2013 – Likwidacja przebieg hydraulicznych w podłożu gruntowym – praktyczne doświadczenia z realizacji. Geoinżynieria drogi mosty tunele, 45 (4): 60–64.

Praca wpłynęła do redakcji 11.05.2016 r.
Akceptowano do druku 19.01.2017 r.