

# ISTOTNE ASPEKTY TERMOMONITORINGU PROCESÓW DESTRUKCYJNYCH WAŁÓW PRZECIWPOWODZIOWYCH

---

dr inż. Krzysztof Radzicki<sup>1</sup>

**Streszczenie:** Termomonitoring światłowodowy obiektów hydrotechnicznych umożliwia ciągłą na ich długości oraz wczesną detekcję procesów destrukcyjnych filtracyjno-erozyjnych. W artykule omówiono kluczowe elementy tej metody w aspekcie termomonitoringu wałów przeciwpowodziowych. Szczególną uwagę zwrócono na rezultaty testu IjkDijk zrealizowanego w 2009r. w Holandii. Celem tego testu było obiektywne porównanie istniejących metod detekcji i monitoringu rozwoju procesu erozyjnego w ziemnym obiekcie piętrzącym. Metoda termomonitoringu została uznana za najskuteczniejszą spośród wszystkich zastosowanych.

**Słowa kluczowe:** przeciek; erozja; wał przeciwpowodziowy; Termomonitoring; sprzężony transport ciepła i wody

## 1. Wprowadzenie

Katastrofa wału przeciwpowodziowego skutkuje często dużymi stratami ekonomicznymi i społecznymi, jak to miało miejsce na przykład w trakcie powodzi w 2010r. w Polsce. Jednym z głównych zagrożeń dla bezpieczeństwa wału jest rozwój procesów filtracyjno-erozyjnych zarówno w jego korpusie jak i podłożu [4]. Dotychczasowa praktyka monitoringu i oceny stanu wałów przeciwpowodziowych są niewystarczające do zapewnienia bezpieczeństwa tym obiektom. Opierają się one przede wszystkim na inspekcji lokalnej oraz realizacji badań geotechnicznych w oddalonych od siebie przekrojach. Identyfikacja procesów filtracyjno-erozyjnych zwłaszcza w ich początkowej fazie rozwoju oraz ocena ich kinetyki tymi metodami jest zazwyczaj niemożliwa.

Monitoring wałów przeciwpowodziowych wymaga metody monitorowania stanu konstrukcji typu SHM (structural health monitoring) która będzie charakteryzowała się:

---

<sup>1</sup> Politechnika Krakowska, Katedra Budownictwa Wodnego, Wydział Inżynierii Środowiska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel. + 48 (012) 6282810, e-mail: radzicki@hotmail.fr.

- monitoringiem procesów destrukcyjnych w czasie rzeczywistym w trakcie trwania wezbrania,
- ciągłym w przestrzeni na długości obiektu monitoringiem,
- wczesną i precyzyjną detekcją procesu destrukcyjnego,
- możliwością oceny kinetyki procesu destrukcyjnego,
- możliwością opracowania automatycznego systemu alarmu informującego o wystąpieniu procesu destrukcyjnego,
- odpornej na uszkodzenia instalacji działającej bezobsługowo.

Warunki te spełnia metoda termomonitoringu procesów filtracyjno-erozyjnych z zastosowaniem opancerzonego, wodoszczelnego światłowodu jako wielopunktowego czujnika temperatury. Metoda ta jest rekomendowana przez Międzynarodowy Komitet Wielkich Zapór (ICOLD) do detekcji i analizy procesów filtracyjno-erozyjnych w ziemnych obiektach piętrzących [4].

Autor artykułu, w trakcie kilku ostatnich lat rozwijał oraz wdrażał metodę termomonitoringu procesów filtracyjno-erozyjnych we Francji między innymi w ramach współpracy naukowej Politechniki Krakowskiej i Instytutu Naukowego Cemagref (Francja). Realizował również badania post-doktoranckie w tej dziedzinie dla firmy EDF (Electricite de France). Obecnie jest między innymi ekspertem w Komisji ds. Erozji Międzynarodowego Komitetu Wielkich Zapór w zakresie metod termomonitoringu.

Światłowodowy termomonitoring obiektów hydrotechnicznych rozwija się bardzo dynamicznie na świecie, w szczególności w Europie, zarówno w zakresie „know-how” jak i rosnącej liczby monitorowanych tą metodą obiektów. Celem artykułu jest wyszczególnienie istotnych zagadnień i elementów dotyczących termomonitoringu procesów filtracyjno-erozyjnych wałów przeciwpowodziowych. w oparciu o rezultaty aktualnych światowych badań w tym wspomnianych powyżej prac badawczych.

W drugim rozdziale przedstawiono ogólny opis relacji w sprzężonym transporcie ciepła i wody, metodę światłowodowego pomiaru temperatury oraz podstawowe cechy pasywnego i aktywnego termomonitoringu. Informację te będą stanowić podstawę do omówienia zagadnienia termomonitoringu wału przeciwpowodziowego przedstawionego w rozdziale trzecim.

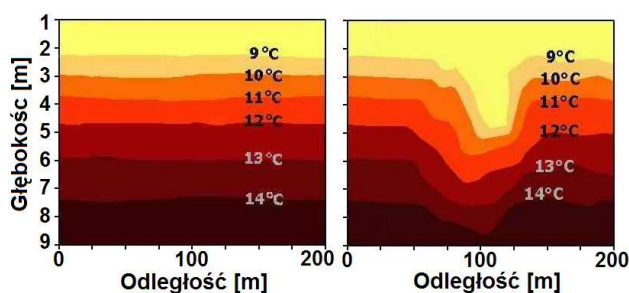
## **2. Wprowadzenie do metody termomonitoringu**

### **2.1 Sprzężony transport ciepła i wody**

Termiczne metody analizy przepływu wody w gruncie opierają się na relacji w procesach 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 nawet sama zmiana wilgotności gruntu spowodowana minimalnym nawet przeciekiem powoduje lokalną zmianę w prędkości przejścia frontu termicznego i zaburzenia układu izoterm. W przypadku zaistnienia 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 temperatur (Przykład, Rys. 1), 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 wartości oraz kierunki wektorów przepływu wody w polu filtracji i w konsekwencji pośrednio wpływa również na pole temperatury ośrodka gruntowego. Każdy z rodzajów procesów erozyjnych powoduje charakterystyczne zaburzenia pola hydro-termicznego, umożliwiając jego rozpoznanie metodą termomonitoringu [10, 12]. Podsumowując, metoda termomonitoringu umożliwia detekcję i analizę zarówno procesów filtracyjnych jak i erozyjnych.



Rys. 1. Przykład wpływu przecieku na rozkład temperatury w poprzecznym przekroju ziemnego obiektu piętrzącego. a) Brak przecieku. b) Zaburzenie termiczne spowodowane przeciekiem.

## 2.2 Światłowodowy pomiar temperatury

Technologia umożliwiająca zastosowanie kabla światłowodowego jako wielopunktowego czujnika do pomiaru temperatury (distributed temperature sensing) wprowadziła jakościową zmianę w monitoringu procesów filtracyjno-erozyjnych w stosunku do monitoringu realizowanego jedynie w wybranych przekrojach obiektu. W światłowodzie wprowadzany jest impuls laserowy. Przy przejściu światła przez rdzeń światłowodu na jego molekułach następuje zjawisko rozpraszania fotonów. Część fotonów wraca do punktu nadania impulsu jako tzw. rozproszenie wsteczne. Analiza widmowa rozproszenia

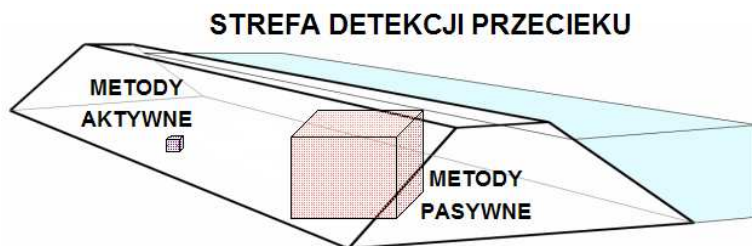
wstecznego i porównanie jej z widmem światła wprowadzonego do światłowodu pozwala między innymi określić temperaturę światłowodu w miejscu powstania rozproszenia. Ponieważ prędkość światła jest wielkością stałą można obliczyć odległość, jaką przebyło światło i określić lokalizację miejsca powstania rozproszenia wstecznego. Obecnie standardowa aparatura stosowana do monitoringu obiektów hydrotechnicznych umożliwia pomiar temperatury światłowodu z rozdzielczością pomiarową jednego metra. Oznacza to że na przykład dla światłowodu o długości 10 kilometrów zainstalowanego w korpusie obiektu hydrotechnicznego na całej jego długości znajduje się 10000 czujników po jednym na każdym jego metrze [13]. W konsekwencji zainstalowanie światłowodu na długości obiektu, na przykład w korpusie wału przeciwpowodziowego, pozwala na ciągły w przestrzeni monitoring procesów filtracyjnych i erozyjnych.

Innymi zaletami światłowodowego pomiaru temperatur, jest kalibracja tylko jednego czujnika, jakim jest jeden światłowód i brak konieczności instalacji systemów złożonych z setek czy też tysięcy czujników. Wiąże się to z minimalizacją złożoności systemu i zwiększeniem jego niezawodności. Światłowody stosowane do pomiaru temperatury na obiektach hydrotechnicznych posiadają specjalnie wzmocnione płaszcze. Umożliwia to ich łatwą instalację na budowie, szczelność, bardzo dużą wytrzymałość oraz gwarantuje trwałość sięgającą minimum kilkudziesięciu lat [8].

### **2.3 Pasywny i aktywny monitoring termiczny**

Wyszczególnia się pasywną oraz aktywną metodę termomonitoringu procesów filtracyjno-erozyjnych. W termomonitoringu pasywnym analizuje się naturalną temperaturę obiektu. Temperatura w punkcie pomiaru jest kształtowana przede wszystkim przez zewnętrzne obciążenia termiczne. Sygnał termiczny przechodząc ze skarp obiektu do punktu pomiarowego ulega modyfikacji w zależności od parametrów ośrodka przez który przeszedł, a więc zawiera informacje o tym ośrodku, szczególnie o zachodzących w nim procesach filtracyjno-erozyjnych. W konsekwencji metoda pasywna termomonitoringu pozwala monitorować cały przekrój obiektu i analizować zachodzące w nim procesy filtracyjno-erozyjne [2,7].

W termomonitoringu aktywnym, oprócz czujnika temperatury w grunt wprowadza się również generator ciepła, którym może być rozgrzewany z wykorzystaniem oporu elektrycznego metalowy drut zatopiony w kablu światłowodowym. Badanie charakterystyki dystrybucji wygenerowanego ciepła pozwala określić prędkość filtracji wody opływającej kabel światłowodowy. Jednakże, zasięg monitoringu metodą aktywną ograniczony jest do strefy od kilku do maksymalnie kilkudziesięciu centymetrów wokół generatora ciepła [5].



Rys. 2. Schemat zasięgu strefy detekcji przecieku za pomocą pasywnych i aktywnych pomiarów temperatury dla pojedynczego punktu pomiarowego

### 3. Termomonitoring wału przeciwpowodziowego

Rezultaty prac badawczo-wdrożeniowych w tym prowadzone przez autora artykułu we współpracy ze światowymi liderami w zakresie metody termomonitoringu firmą GeophyConsult oraz EDF (Electricite de France), pozwalają sformułować cztery kluczowe elementy skutecznego termomonitoringu wału przeciwpowodziowego:

- zastosowanie instalacji termomonitoringu pasywnego oraz aktywnego,
- właściwe zlokalizowanie czujników światłowodowych,
- użycie do analizy danych zaawansowanych, zweryfikowanych modeli analizy pomiarów pasywnych i aktywnych,
- prowadzenie termomonitoringu z zastosowaniem automatycznej analizy danych z równoczesną analizą danych realizowaną przez eksperta.

#### Instalacja termomonitoringu pasywno-aktywnego

W przypadku zapory ziemnej, podstawowym systemem termomonitoringu jest system termomonitoringu pasywnego. Termomonitoring aktywny instalowany jest na zaporach sporadycznie jako system uzupełniający [11]. Natomiast w przypadku wału przeciwpowodziowego należy stosować instalację termomonitoringu pasywno-aktywnego. Wynika to z relatywnie krótkiego czasu trwania piętrzenia w trakcie wezbrania, jak również z ryzyka szybkiego rozwoju procesów filtracyjno-erozyjnych z powodu małej skali przekroju obiektu oraz częstokroć złego stanu wału.

Koncepcja pasywno-aktywnej instalacji termomonitoringu wału przeciwpowodziowego łączy zalety obu tych metod i umożliwia: przeciwpowodziowego:

- precyzyjną na długości wału identyfikację procesu-filtracyjno erozyjnego już w początkowej fazie jego rozwoju z możliwością jego wstępnej identyfikacji z pomocą automatycznego systemu alarmu,
- pomiar wartości prędkości filtracji w przypadku nasilenia się procesu filtracyjnego,
- analizę kinetyki procesu,
- szeroki zakres przestrzenny monitoringu przekroju obiektu,

Ponadto pasywno-aktywna instalacja termomonitoringu pozwala na weryfikację wniosków z monitoringu z zastosowaniem dwóch niezależnych metod.

#### Lokalizacja światłowodowych czujników temperatury

Właściwa lokalizacja czujników temperatury jest kluczowa dla realizacji skutecznego termomonitoringu. Jej wybór jest zawsze przedmiotem studium przeprowadzanego indywidualnie dla każdego obiektu, włącznie ze stworzeniem modelu numerycznego termo-hydraulicznego obiektu i symulacji różnych scenariuszy przecieków. W przypadku nowo budowanego wału przeciwpowodziowego instalacja czujników światłowodowych w dowolnym miejscu przekroju wału jest prosta i tania (wyłącznie koszt kabla światłowodowego i jego położenia). Natomiast, w przypadku wału istniejącego, należy uwzględnić koszt dodatkowych robót instalacyjnych, w tym ziemnych.

Dwie typowe strefy lokalizacji termometrycznych czujników światłowodowych na wale przeciwpowodziowym są to:

- bezpośrednio pod ekranem szczelnym położonych w skarpie odwodnej wału (o ile zastosowano takie rozwiązanie uszczelnienia wału),
- stopa odpowietrzna wału.

Testy zrealizowane na wale eksperymentalnym w Aix-en-Provence, pokazały że zastosowanie czujników światłowodowych pod ekranem szczelnym położonym w skarpie odwodnej pozwala wykryć punktowy przeciek o wartości zaledwie 0,2 litra na minutę [3]. Oznacza to że detekcja utraty szczelności uszczelnienia nastąpi jeszcze zanim przeciek przeniknie w głąb korpusu obiektu. Położenie kabla światłowodowego pod ekranem realizowane w ramach modernizacji lub przebudowy uszczelnienia wału jest tanie i proste.

Instalacja kabla światłowodowego w stopie odpowietrznej wału jest najmniej kosztowną opcją która wymaga niewielkiej ilości robót ziemnych oraz minimalnego naruszeniu korpusu wału. Odpowiednia lokalizacja kabla światłowodowego w tej strefie pozwala monitorować procesy filtracyjno-erozyjne zachodzące zarówno w korpusie wału jak i jego podłożu. W testach zrealizowanych na wale eksperymentalnym w Aix-en-Provence lokalizacja czujnika temperatury w stopie odpowietrznej pozwalała wykryć przeciek rzędu 1 litra na minutę, przy czym wydatek przecieku był mierzony na skarpie odwodnej, a sam przeciek został wykryty wyłącznie na skutek zmiany

wilgotności gruntu w stopie odpowietrznej, zanim wystąpił proces filtracyjny [3, 9].

### Analiza pomiarów temperatury

Kolejnym kluczowym elementem niezbędnym do prowadzenia skutecznego termomonitoringu zarówno pasywnego jak i aktywnego procesów filtracyjno-erozyjnych oprócz technologii światłowodowego pomiaru temperatury jest posiadanie narzędzi i „know-how” umożliwiających analizę pomiarów temperatury i odczytanie zawartych w nich informacji. Wymaga to prowadzenia monitoringu przez ekspertów z udokumentowanym doświadczeniem w tym zakresie oraz zastosowania zaawansowanych modeli analizy danych pomiarów temperatury.

W metodzie aktywnej termomonitoringu do określenia prędkości filtracji stosuje się rozwiązania ściśle oraz bazy funkcji dystrybucji temperatury sporządzone na podstawie badań laboratoryjnych oraz modelowań numerycznych porównując z nimi funkcje dystrybucji temperatury pomierzone w rzeczywistości w punkcie pomiarowym [5]

W przypadku metody pasywnej termomonitoringu dopiero od 2009 roku kiedy został przeprowadzony test IjkDijk można mówić o potwierdzonej weryfikacji tej metody w aspekcie monitoringu wału przeciwpowodziowego. Ze względu na ważne wnioski płynące z tego testu, poniżej zostały streszczone jego cele i najważniejsze rezultaty.

Od 2008 roku rząd holenderski realizuje cykl testów pod nazwą IjkDijk [14] polegających na metodycznej weryfikacji metod umożliwiających detekcję i monitoring procesów filtracyjno-erozyjnych, celem ich zastosowania do monitoringu holenderskich wałów kanałów, rzek oraz wałów morskich. W tym celu konstruowane są badawcze, ziemne obiekty piętrzące w rzeczywistej skali, a następnie doprowadza się do ich katastrofy poprzez wytworzenie i rozwój procesu erozyjnego.



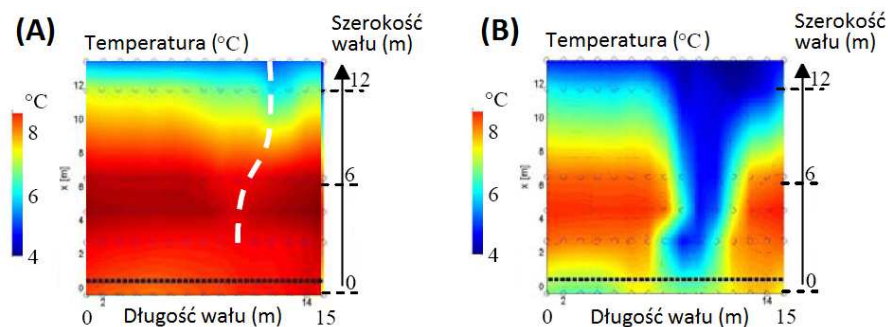
Rys. 3. Katastrofa wału ziemnego na skutek przebiccia hydraulicznego, projekt IjkDijk (fot. Deltares) [6].

W testach sprawdzane są metody tradycyjne (ciśnienia, drenaż, przemieszczenia) jak i geofizyczne (termiczne, elektrooporności, potencjału własnego, sejsmiczne, akustyczne i inne). Prowadzone badania porównawcze są szczególnie cenne z uwagi na bezstronność holenderskiej agencji rządowej. W roku 2009 przeprowadzono badania rozwoju przebiccia hydraulicznego na styku korpusu wału ziemnego (wysokości 3,5m) i podłoża w warunkach zbliżonych do przejścia fali powodziowej dla wału przeciwpowodziowego. Przeprowadzono cztery testy, każdorazowo aż do katastrofy obiektu, czyli przerwania wału ziemnego (Rys. 3). Metoda termomonitoringu pasywnego okazała się najskuteczniejsza w porównaniu z innymi zastosowanymi metodami, umożliwiając lokalizację przecieków i przekroju przerwania wału (Rys. 4) ze znacznym wyprzedzeniem przed momentem katastrofy już w początkowym stadium rozwoju procesu erozyjnego [6]. Jedyne pomiar ciśnień z czujnika zainstalowanego specjalnie dokładnie w strefie przebiccia umożliwił również wczesną detekcję. Szczególnie wartościowa okazała się analiza pomiarów termicznych modelem DAM (Daily Analysis Model) dziennej analizy sygnału przy równoczesnym posprocesingu pomiarów zrealizowanym przez firmę GeophyConsult. Przyjmując za czas trwania testu okres pomiędzy początkiem napełniania zbiornika a przzerwaniem wału, testy trwały kolejno 4, 6, 5 oraz 5 dni. W trzech testach identyfikacja miejsca przyszłego przerwania wału nastąpiła już po pierwszym dniu pomiarów. [2, 6].

Daily Analysis Model (DAM) jest modelem statystycznym rozwiniętym przez firmę EDF [2, 7], który wykorzystując metody analizy sygnału analizuje zmienność pomiarów temperatury na długości światłowodu w czasie, identyfikując i odfiltrowując wpływ poszczególnych źródeł sygnału termicznego. Model ten umożliwia również stworzenie systemu automatycznego alarmu o wystąpieniu procesu destrukcyjnego. Informacja ta musi następnie zostać zweryfikowana i potwierdzona przez eksperta.

Model DAM w ramach współpracy badawczo-wdrożeniowej Politechniki Krakowskiej oraz francuskich firm EDF oraz GeophyConsult jest udostępniony Politechnice Krakowskiej do aplikacji na polskich obiektach hydrotechnicznych.





Rys. 4. Pola temperatury stopy obiektu w początkowym (A) oraz końcowym (B) stadium rozwoju przebiecia hydraulicznego pomierzone w ramach projekt IjkDijk, zrealizowane przez GeophyConsult, EDF, Tencat. Opracowane na podstawie [1].

**Podziękowania:** Część informacji zawartych w artykule jest rezultatem wspólnych prac badawczo-wdrożeniowych realizowanych przez autora artykułu z francuskimi firmami GeophyConsult oraz EDF (Electricite de France) w tym w ramach prac badawczych prowadzonych na Politechnice Krakowskiej.

#### 4. Wnioski

Metoda termomonitoringu procesów filtracyjno-erozyjnych daje możliwość jakościowej zmiany w monitoringu wałów przeciwpowodziowych w stosunku do stosowanych dotychczas metod tradycyjnych. Jej skuteczność została potwierdzona między innymi w niezależnych testach badawczych rządu holenderskiego na obiektach badawczych w rzeczywistej skali.

Zastosowanie tej metody umożliwia znaczące podniesienie bezpieczeństwa wału w trakcie trwania wezbrania poprzez wczesną identyfikację procesów filtracyjno-erozyjnych oraz ocenę stopnia ich rozwoju. Informacja ta pozwala w trakcie trwania akcji przeciwpowodziowej na optymalizację wykorzystania zasobów materialnych i ludzkich celem ochrony najbardziej zagrożonych odcinków wału. Po zakończeniu akcji powodziowej szczegółowa informacja o zidentyfikowanych procesach filtracyjno-erozyjnych i ich parametrach umożliwia identyfikację przekrojów które wymagają natychmiastowego remontu oraz precyzyjnie określić jego zakres. W konsekwencji oprócz zapewnienia bezpieczeństwa obiektowi, istotną zaletą zastosowania metody termomonitoringu jest minimalizacja kosztów remontów i optymalizacja zarządzania systemami obiektów hydrotechnicznych. Z tych powodów instalacje takie powstają coraz liczniej na całym świecie zwłaszcza we Francji.

W Polsce obecnie nie zainstalowano dotychczas jeszcze instalacji termomonitoringu wału przeciwpowodziowego. Aby pierwsza instalacja w Polsce była skuteczna i stanowiła rekomendację dla dalszego rozwoju tej metody w Polsce, zarówno w zakresie samej instalacji jak i monitoringu prowadzonego za jej pomocą muszą zostać spełnione warunki sprecyzowane w niniejszym artykule.

### Literatura

- [1] Artieres O., Galiana M., Royet P., Beck Y.L., Cunat P., Courivaud J.R., Fry J.J., Faure Y.H., Guidoux C., Fiber optics monitoring solution for canal dykes. PIANC MMX Congress, 10-14 may 2010, Liverpool, United Kingdom, 2010.
- [2] Beck Y.L., Cunat P., Guidoux C., Artieres O., Mars J., Fry J.J. Thermal monitoring of embankment dams by fiber optics. Proc. 8th ICOLD European Club Dam Symposium. Innsbruck, Austria, September 22-23, pp.461- 465, 2010
- [3] Cunat P. Adaptation of a controlled site for leakage detection and quantification with fiber optics. Workshop of European Working Group in Internal Erosion of ICOLD, 12-14 kwiecień, Granada, Hiszpania, 2010.
- [4] Fry J.J., Fell R. Internal erosion of existing embankment dams and their foundations. Draft of ICOLD bulletin presented at Workshop of European Working Group in Internal Erosion of ICOLD, Granada, Spain, 2010.
- [5] Guidoux C. ,Développement et validation d'un système de détection et de localisation par fibres optiques de zones de fuite dans les digues en terre. PhD rapport, Université Joseph Fourier de Grenoble, p. 201., 2008.
- [6] Koelewijn. A. IJkdijk Piping experiments-four large-scale field tests leading to failure by seepage erosion, instrumented with both traditional and experimental detection techniques. Workshop of European Working Group in Internal Erosion of ICOLD, Granada, Spain, 2010.
- [7] Pinette P., Guidoux C., Artieres O., Khan A.A., Beck Y.L., Courivaud J.R. Fry J.J. Return on experience from the 2009 Ijkdijk piping tests : early detection of Internal Erosion precursors with Fiber Optics Early Warning Systems, Presentation at the Workshop of European Working Group in Internal Erosion of ICOLD, Granada, Spain, 2010.

Radzicki.K (2012). Istotne aspekty termomonitoringu procesów destrukcyjnych wałów przeciwpowodziowych. INFRAEKO 2012, 31 maj – 1 czerwiec 2012 (Kraków), p. 213-222,

- [8] Radzicki K. Analyse retard des mesures de températures dans les digues avec application à la détection de fuites (Zastosowanie analizy odpowiedzi opóźnionej w pomiarach temperatury ziemnych obiektów hydrotechnicznych do identyfikacji przecieków), Praca doktorska, AgroParisTech (Paryż), 2009.
- [9] Radzicki K. Bonelli S. Thermal seepage monitoring in the earth dams with Impulse Response Function Analysis model, 8h ICOLD European Club Symposium, 22-25 september, pp. 649-654, Innsbruck, Austria, 2010.
- [10] Radzicki K. Bonelli S., A possibility to identify piping erosion in earth hydraulic works using thermal monitoring, 8h ICOLD European Club Symposium, 22-25 September, p. 618-623, Innsbruck, Austria, 2010.
- [11] Radzicki K., Zastosowanie termomonitoringu do detekcji przecieków oraz erozji wewnętrznej w ziemnych budowlach piętrzących, XIV Międzynarodowa konferencja technicznej kontroli zapór. Bezpieczeństwo zapór - nowe wyzwania, 13 - 16 juin 2011, Zamek Książ – Wałbrzych, Poland, p.230-239, 2011.
- [12] Radzicki K., Bonelli S., Monitoring of the suffusion process development using thermal analysis performed with IRFTA model, 6th ICSE, 27 - 31 august, Paris, France, p.593-600, 2012.
- [13] Vogel L. B., Cassens C., Graupner A., Trostel A. Leakage detection systems by using distributed fiber optical temperature measurements. Proc. SPIE Smart Structures and Materials 2001, vol. 4328, pp. 23–34, 2001.
- [14] IJkdijk-Piping, Leaflet available on the website [www.ijkdijk.eu](http://www.ijkdijk.eu), 4p., 2009.