

MEng PhD Krzysztof Radzicki^{1)*}

ORCID: 0000-0002-1302-9799

MEng Marek Stoliński²⁾

ORCID: 0000-0001-9753-6909

Development of thermal leak detection method and monitoring of seepage and internal erosion processes in earth dams, levees and dikes and their implementation in Poland

Rozwój metody termicznej detekcji przecieków i monitoringu procesów filtracji oraz erozji w zaporach i wałach oraz wdrożenie jej w Polsce

DOI: 10.15199/33.2024.12.08

Abstract. To reduce the costs of repairs and the risk of damming structures failures, methods for their investigations and monitoring are currently being intensively developed. The thermal method is globally recommended for studying intensive seepage, including the detection of leaks and internal erosion processes in earth damming structures such as earth dams, canal dikes, and levees. The article presents the key aspects of the development of this method and its implementation in Poland. It describes its principles and pilot applications on existing and newly constructed dams and levees in Poland, using thermal sensors for linear measurements, such as the MPointS multipoint sensor and fiber optic cables. The development of a thermo-hydraulic numerical modelling for the highly accurate determination of the geometry of individual zones and the hydraulic conductivity values within the cross-section of an existing earth dam, including the identification of erosion process zones, is presented.

Keywords: thermal monitoring method, leak and erosion process detection, linear sensors, thermo-hydraulic numerical modelling, dams.

Streszczenie. W celu ograniczenia kosztów remontów oraz ryzyka katastrof budowli piętrzących intensywnie rozwijane są obecnie metody ich badań oraz monitoringu. Metoda termiczna jest rekomendowana na świecie do badania nasilonej filtracji, w tym detekcji przecieków oraz erozji wewnętrznej w ziemnych budowlach piętrzących, takich jak zapory ziemne, wały kanałów i wały przeciwpowodziowe. W artykule przedstawiono najistotniejsze zagadnienia rozwoju tej metody i jej wdrożenia w Polsce. Opisano jej podstawy oraz aplikacje pilotażowe na istniejących i nowo budowanych zaporach i wałach w Polsce, z zastosowaniem termicznych czujników do pomiarów liniowych, jak wielopunktowy czujnik MPointS oraz kable światłowodowe. Przedstawiono także rozwinięcie metody termohydraulicznego modelowania numerycznego do bardzo dokładnego określania geometrii poszczególnych stref i wartości współczynnika filtracji w przekroju istniejącej zapory ziemnej, w tym identyfikacji stref procesu erozyjnego.

Słowa kluczowe: monitoring metodą termiczną; detekcja przecieków i procesów erozyjnych; czujniki liniowe; termohydrauliczne modelowanie numeryczne; zapory.

For earth damming structures such as earth dams, levees, canal dikes, and tailings dam embankments, a primary cause of deterioration is the occurrence of destructive processes linked to intensified seepage. These particularly include leaks and associated phenomena such as internal erosion, which represent some of the most critical threats to the safety of these structures. Internal erosion, in particular, ranks as the second most common cause of failure in such systems [1 ÷ 5].

Every structure has a defined and anticipated lifespan. A substantial proportion of hydraulic structures, in many countries, are several decades old, with many exceeding half a century. All of these structures undergo aging, and at some point, destructive processes inevitably emerge in each of them [6]. This issue has become a rapidly growing global concern, with numerous damming structures requiring renovation.

W przypadku ziemnych budowli piętrzących, takich jak zapory ziemne, wały przeciwpowodziowe oraz wały kanałów i obwałowania zbiorników pofloatacyjnych, główną przyczyną pogarszania się ich stanu są procesy destrukcyjne nasilonej filtracji, a przede wszystkim przecieki oraz powiązane z nimi procesy erozji wewnętrznej. Procesy te są też jednym z największych zagrożeń bezpieczeństwa tych budowli i drugą najczęstszą przyczyną ich katastrof [1 ÷ 5].

Każda budowla ma określony, przewidywany czas użytkowania. Bardzo dużo budowli piętrzących, w wielu krajach, ma po kilkadziesiąt lat. Wszystkie ulegają starzeniu. W każdej z nich, w pewnym momencie pojawiają się procesy destrukcyjne [6]. Ta sytuacja tworzy obecnie na całym świecie bardzo szybko narastający problem licznych budowli piętrzących wymagających remontu, a niejednokrotnie będących w złym stanie technicznym lub/oraz zagrażającym ich bezpieczeństwu. Jest to duże wyzwanie zarówno dla krajów wysoko, jak i średnio rozwiniętych, np. zgodnie z raportem z 2021 r. [7] w USA

¹⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

²⁾ Neostrain Sp. z o.o.

^{*}) Correspondence address: krzysiek.radzicki@gmail.com

Many are in poor technical condition and/or pose serious safety risks, presenting a substantial challenge even for highly developed countries. For example, according to a 2021 report [7], out of 91,000 dams in the United States, 15,600 have been classified as "high-risk" structures. Alarming, the number of dams in this category has doubled over the past two decades. Furthermore, the average age of dams in the U.S. is 57 years, with 70% of them exceeding 50 years of age. Moreover, a 2022 report [8] estimates that the necessary repairs for 88,634 dams outside federal jurisdiction would cost approximately \$75.69 billion. Of this amount, around \$24.04 billion is required specifically for dams classified as "high-risk." Similarly, a confidential report prepared by EDF in 2006 and disclosed by the newspaper Capital in 2007 highlights the severity of the issue in France. Although the report is now outdated, it remains a valuable source of information. The analysis revealed that nearly 200 of the 450 dams owned by EDF were in poor condition, showing significant structural deterioration and clear signs of aging [9].

In Poland, all hydrotechnical structures, including damming structures, are classified into four classes (categories) ranging from I to IV. Class I encompasses the most critical structures, either due to their function or the significant hazards associated with their potential failure. In contrast, Class IV includes structures with the least functional or safety significance. The article [10] summarizes the report of Poland's National Service for Safety of Damming Structures, performed by the Centre for Technical Control of Dams. The report evaluates the condition of Class I and II damming structures in Poland for the year 2023. Firstly, the state of so-called Hydrotechnical Structure Complexes belonging to Class I and II is presented. Such a complex consists of at least one or more dams, e.g. a main dam and side dam and accompanying hydrotechnical structures, e.g. a hydro-power plant. Approximately 53% of Hydrotechnical Structure Complexes in Poland are classified as being in sufficient condition, while 21% are assessed as insufficient, including 17% that pose a safety hazard. Of Poland's 8.5 thousand kilometers of levees, 65% are in sufficient condition, whereas 3% are deemed insufficient. Given that a significant percentage of these structures require imminent maintenance or repairs, which is expected to place a considerable financial strain on the State Treasury in the coming years. Consequently, minimizing costs and optimizing repair schedules are critical priorities.

The occurrences of destructive processes are not confined only to long-standing or poorly maintained structures. They can also affect newly constructed or modernized facilities. These processes are frequently linked to design deficiencies or construction flaws. For dams, this phenomenon is evident in a statistically significant increase in the risk of failure or catastrophic events during the first five years of operation, as demonstrated in [3] through a global analysis of such incidents. In the case of newly built or modernized levees, additional risks emerge from the necessity of leaving seepage pathways within the permeable layers of their foundations, which allows groundwater to flow toward the river. Furthermore, significant uncertainties and errors often arise when interpolating geological survey results between widely spaced investigation boreholes.

na 91000 zapór 15600 zostało zakwalifikowanych jako budowlę „wysokiego ryzyka”. Co istotne, liczba zapór w takim stanie podwoiła się w ciągu ostatnich dwudziestu lat. Średni wiek zapór w USA to 57 lat, a 70% zapór ma więcej niż 50 lat. Ponadto wg raportu z 2022 r. [8] koszt koniecznych napraw 88 634 zapór niebędących w gestii rządu federalnego wynosi 75,69 mld USD, w tym w przypadku zapór „wysokiego ryzyka” jest szacowany na 24,04 mld USD. W 2007 r. gazeta „Capital” ujawniła poufny raport firmy EDF z 2006 r., który obecnie jest już nieaktualny, ale pokazuje skalę omawianego problemu także we Francji. W raporcie odnotowano, że na 450 zapór firmy energetycznej EDF aż 200 jest w złym stanie z zaawansowanymi oznakami starzenia [9].

W Polsce istnieją 4 klasy (kategorie) budowli hydrotechnicznych od I do IV, gdzie do klasy I należą budowle o najistotniejszej funkcji lub w przypadku których katastrofa wywołałaby największe szkody, a do IV o najmniejszym znaczeniu. W raporcie współtworzonym przez przedstawicieli polskiej Państwowej Służby ds. Bezpieczeństwa Budowli Piętrzących, którą pełni Centrum Technicznej Kontroli Zapór [10], podsumowano stan budowli piętrzących I i II klasy w Polsce w 2023 r. Po pierwsze przedstawiono stan tzw. Zespołów Budowli Hydrotechnicznych (ZBH) I i II klasy. Zespół taki stanowi co najmniej jedna lub więcej zapór, np. zapora czołowa i zapory boczne oraz towarzyszące jej budowle hydrotechniczne, np. elektrownia wodna. 53% ZBH jest w stanie dostatecznym i aż 21% w stanie niedostatecznym, w tym 17% w stanie zagrożającym bezpieczeństwem. Z 8,5 tys. km wałów przeciwpowodziowych w Polsce 65% jest w stanie dostatecznym, a 3% niedostatecznym. Biorąc pod uwagę to, że znaczna liczba z nich będzie wymagać remontu w niedługiej perspektywie czasowej, to powstanie bardzo istotne potencjalne obciążenie budżetu Skarbu Państwa w wieloletnim, a zagadnienie minimalizacji kosztów remontów i optymalizacji ich realizacji w czasie jest bardzo istotne.

Rozwój procesów destrukcyjnych może mieć miejsce nie tylko w już długo istniejących i nieremontowanych budowlach, ale także w nowych lub zmodernizowanych. Mogą one wynikać z błędów projektowych lub wykonawczych. W przypadku zapór fakt ten potwierdza, m.in. statystycznie, znacznie wyższe ryzyko awarii lub katastrofy w pierwszych pięciu latach użytkowania zapory. Wskazano je w [3] na podstawie analizy tych zdarzeń wykonanej na całym świecie. W przypadku nowych lub zmodernizowanych wałów przeciwpowodziowych, większe ryzyko generuje natomiast konieczność zostawienia okien filtracyjnych w przepuszczalnych warstwach ich podłoża w celu umożliwienia przepływu nimi wód gruntowych w kierunku rzeki. Dodatkowo często spotyka się wysokie niepewności lub błędy w interpolacji wyników badań geologicznych podłoża pomiędzy rzadko rozmieszczonymi otworami badawczymi. Obie te przyoczyny prowadziły niejednokrotnie w przeszłości do lokalnego powstawania rozmyć i kawern pod dolnymi krawędziami elementów szczelnych wałów i obrywania się tych elementów. To ryzyko zwiększyło się obecnie wraz z wprowadzeniem i popularyzacją technologii wykonywania przesłon

These issues frequently contribute to localized erosion and the formation of cavities beneath the lower edges of impermeable elements in levees, leading to these elements collapse. Such risks have been further exacerbated by the growing use of the continuous deep mixing method for constructing seepage cut-off barriers with trenchers [11]. While this method often reduces costs and expedites the construction process compared to traditional approaches, it results in barriers with exceptionally smooth side surfaces. As a result, in cases involving undermining or installation on weak soils, the risk of structural collapse of the barrier becomes significant [11, 12].

The costs of repairing earth damming structures to mitigate damaging processes – such as the installation of new impermeable elements, rehabilitation and reconstruction of drainage systems, and the compaction of embankments – are often substantial [13, 14]. The total costs associated with essential and urgent repairs to hydraulic structures, both on a regional and national scale, are exceptionally high. This presents a significant challenge not only for Poland but also for other economically advanced nations [8, 15].

To summarize the information presented above, first, the destructive processes of increased seepage, including leakage and internal erosion, pose a very significant risk to the safety of earth damming structures. Second, a serious problem and challenge is the large, continuously growing number of earth damming structures that are now several decades old, with many exceeding 50 years of operation. As they continue to age, problems related to their insufficient condition will increase, especially in terms of the development of the aforementioned destructive processes and of the increasing risk of extreme floods associated with climate change. Third, the maintenance and repair of dam structures incur significant costs. Reducing and optimizing these costs is a crucial aspect of managing not only individual structures but also groups and systems of such infrastructure on regional and national scales. In light of these threats and challenges, especially over the last two decades, new methods for investigating and monitoring destructive processes in dam structures have been developed globally. These methods aim to enable the earliest possible detection of such processes while providing highly reliable and precise information about their location, geometry, parameters, and dynamics of progression [4, 16, 17]. **The primary goals are twofold: first**, minimizing the risk of structural failures and optimizing repair costs and **second**, early and accurate identification of destructive processes typically leads to a more targeted and cost-effective repair scope. Reducing uncertainties about the extent of destructive processes and the condition of the structure mitigates the risk of overestimating the necessary scope of repairs and conducting them unnecessarily. This often allows for localized repairs to be undertaken effectively deferring the need for general renovations. The frequency of such general overhauls plays a pivotal role in managing the long-term maintenance costs of multiple dam structures.

The traditional, „classical” methods for detecting, monitoring, and analysing destructive processes in earth damming structures have often proven inadequate in identifying and quantifying the parameters and dynamics of these processes at

przeciwfiltracyjnych metodą ciągłego wgłębego mieszania gruntu (CDMM – Continuous Deep Mixing Method) za pomocą trenażera [11]. Z jednej, istotnej strony zmniejsza ona często koszty i przyspiesza prace wykonania przesłony w porównaniu z metodami dotychczas stosowanymi, ale przesłona ma bardzo gładkie pobocznicze. W związku z tym, w przypadku podmycia lub oparcia na słabych gruntach, ryzyko jej oberwania się jest duże [11, 12].

Koszty remontów ziemnych budowli piętrzących, związanych z ograniczeniem procesów destrukcyjnych, takie jak np. remonty istniejących lub wykonywanie nowych elementów szczelnych, remonty i przebudowa systemów drenażowych oraz dogęszczenia korpusu i/lub podłoża ziemnego, są często bardzo duże [13, 14]. Sumaryczne koszty remontów budowli piętrzących w skali regionu lub poszczególnych krajów, które są konieczne i powinny być wykonane natychmiast lub w krótkiej perspektywie czasowej, stanowią wyzwanie nie tylko dla Polski, ale nawet dla innych zamożniejszych państw [8, 15].

Podsumowując, procesy destrukcyjne nasilonej filtracji, w tym przecieki oraz erozja wewnętrzna, stanowią bardzo istotne ryzyko dla bezpieczeństwa ziemnych budowli piętrzących. Dużym problemem i wyzwaniem jest też ciągle rosnąca liczba budowli piętrzących mających po kilkadziesiąt lat. Wraz z ich dalszym starzeniem się, problemy związane z niedostatecznym stanem będą się zwiększały, szczególnie w aspekcie rozwoju wymienionych procesów destrukcyjnych i coraz większego ryzyka ekstremalnych powodzi powiązanych ze zmianami klimatu. Ponadto, remonty budowli piętrzących generują bardzo znaczne koszty. Ich redukcja i optymalizacja jest zasadniczą kwestią w zarządzaniu zarówno pojedynczymi budowlami, jak i ich grupami oraz systemami w skali regionów i całych państw. W związku z wymienionymi zagrożeniami i wyzwaniami, w drugiej dekadzie nowego milenium rozwijane są na świecie metody badania i monitoring procesów destrukcyjnych w budowlach piętrzących tak, aby umożliwić ich jak najwcześniejszą detekcję oraz otrzymywać wiarygodne oraz dokładne informacje o lokalizacji, geometrii, parametrach i dynamice rozwoju tych procesów [4, 16, 17]. Celem jest oczywiście, **po pierwsze** minimalizacja ryzyka awarii budowli, a **po drugie** i bardzo istotne optymalizacja oraz minimalizacja kosztów ich remontów. Im wcześniej i dokładniej rozpoznany będzie proces destrukcyjny, tym zakres i koszt odpowiednio zaplanowanego i przeprowadzonego remontu będzie zazwyczaj ograniczony. Zmniejszenie niepewności o zakresie procesu destrukcyjnego i stanie budowli ogranicza ryzyko przeszacowywania remontów i wykonywania ich „na wyrost”. Często prowadzi też do sytuacji, że konieczne jest wykonanie tylko lokalnych napraw i możliwe jest znaczne odsunięcie remontu generalnego w czasie. Z kolei częstość wykonywania generalnych remontów ma zasadnicze znaczenie w zarządzaniu kosztami utrzymania wielu budowli piętrzących w wieloletniu.

Dotychczasowe, „klasyczne” metody detekcji, monitoringu oraz badań procesów destrukcyjnych, na ziemnych budowlach piętrzących często nie pozwalały wykryć i określić parametrów i dynamiki rozwoju procesu destrukcyjnego wystarczają-

an early stage and with the required precision. A comprehensive overview of these „classical” methods, emphasizing their advantages and limitations, has been presented, among others, in [17]. A qualitative shift occurred in the early 21st century, particularly over the last decade, driven by the global advancements in thermal techniques for investigating seepage and erosion phenomena. These innovations have significantly enriched and expanded the scope of existing research methodologies [4, 16, 17]. Polish technical innovation has played a significant role in this progress, notably through the development and implementation of the innovative linear, passive-active Multi-Point Thermal Sensor (MPointS) and the advancement of numerical thermo-hydraulic modelling. These tools have enabled precise identification of structural defects in impermeable elements, zones of intensified seepage, and potential erosion areas within the structure’s body and/or foundation, as well as their localization, geometry, and hydraulic coefficient values [17, 18, 19].

In the following sections, this article presents: (1) a concise overview of the fundamentals of the thermal method, including key aspects of its development and essential guidelines; (2) a detailed description of methods and tools developed in Poland for the implementation of this approach; and (3) pilot and reference implementations of the thermal method conducted in Poland on various hydraulic structures, using diverse tools of this technique.

Fundamentals of the Thermal Method and Monitoring with Linear Sensors

Fundamentals, Development, and Recommendations of the Thermal Sensing Method. We distinguish two groups of thermal methods: passive and active. In passive methods, the natural ground temperatures are measured and analyzed or/ modeled. In such cases, the coupled heat and water transport relationships are utilized. This relationship is described by the parabolic energy balance equation [20, 21]. It is based, first on the principle that the higher the soil moisture, the faster heat is transferred through conduction. Secondly, when water flow occurs, heat is transported together with the mass of water. This is a process known as advection. The higher the seepage velocity, the greater the amount of heat transported. As a result, thermal anomalies will appear in areas with intensified seepage, such as leakage zones, in contrast to areas without such intensification. Furthermore, if internal erosion takes place in the soil, they change the local hydraulic conductivity values, and consequently the directions and velocities of water flow, thereby altering heat transport in a characteristic way [22 ÷ 24]. An example of the effect of these relationships is presented in Figure 1, which shows the results of numerical simulations of a cross-section of a homogeneous virtual earth dam at the same moment in time, subjected to identical external hydro-thermal loads, but with varying lengths and values of the hydraulic conductivity coefficient for the erosive layer of suffosion. This clearly illustrates significant changes in the isothermal pattern due to the development of the erosion process. In summary, by analyzing the variability of the thermal field, it is possible to directly examine seepage processes and, indirectly, infer the presence and nature of erosion phenomena. In active methods, a thermally

co wcześniej i niewystarczająco precyzyjnie w stosunku do potrzeb. Dokładny opis tych „klasycznych” metod wraz z wyszczególnieniem ich zalet i ograniczeń przedstawiono m.in. w [17]. Jakościowo sytuację tę zmienił w nowym mileniu, a zwłaszcza w ostatniej dekadzie rozwój na świecie termicznych metod badania procesów filtracyjnych oraz erozyjnych, które uzupełniły dotychczasową metodę badań [4, 16, 17]. Istotną rolę w tym rozwoju odegrała też polska myśl techniczna, w tym opracowanie i wdrożenie innowacyjnego, liniowego, pasywno-aktywnego Wielopunktowego Czujnika Termicznego (*Multi Points Thermal Sensor* – MPointS) oraz rozwinięcie zastosowania numerycznego modelowania termohydraulicznego w dokładnym rozpoznawaniu nieszczelności elementów szczelnych budowli, przebiegu stref nasilonej filtracji i potencjalnych stref erozyjnych w korpusie i/lub podłożu budowli, ich lokalizacji, geometrii i wartości współczynnika filtracji [17, 18, 19].

W dalszej części artykułu przedstawiono w skrócie podstawy metody termicznej i najistotniejsze fakty dotyczące jej rozwoju i istotnych rekomendacji, a także jej narzędzia rozwinięte w Polsce. Ponadto przedstawiono pilotażowe, referencyjne wdrożenia metody termicznej w Polsce, które miały miejsce na różnego rodzaju obiektach piętrzących z zastosowaniem różnych narzędzi tej metody.

Podstawy metody termicznej oraz monitoringu czujnikami liniowymi

Podstawy, rozwój i rekomendacje metody termicznej. Wyróżniamy dwie grupy metod termicznych – pasywne oraz aktywne. W pasywnych jest mierzona i analizowana lub/oraz modelowana naturalna temperatura gruntu. W takim przypadku wykorzystuje się zależności sprężonego transportu ciepła i wody. Zależność tę opisuje paraboliczne równanie zachowania energii [20, 21]. Polega ona po pierwsze na tym, że im większa jest wilgotność gruntu, tym ciepło przemieszcza się w nim szybciej przez przewodzenie. Po drugie, gdy zaistnieje przepływ wody, to ciepło jest transportowane razem z masą wody. Jest to proces adwekcji. Im większa prędkość filtracji, tym proporcjonalnie zwiększa się ilość transportowanego ciepła. Wynika z tego, że w strefach nasilonej filtracji, w tym przecieków, pojawią się anomalie termiczne na tle obszarów bez takiego nasilenia. Ponadto, jeśli występują procesy erozji wewnętrznej gruntu, to wpływają one na lokalne wartości przepuszczalności gruntu, a więc na kierunek i prędkość przepływu wody, a przez to w charakterystyczny sposób na transport ciepła [22 ÷ 24]. Przykład efektu tych zależności przedstawia rysunek 1. Widać na nim wyniki symulacji numerycznej przekroju wirtualnej jednorodnej zapory ziemnej w tym samym momencie czasowym dla identycznych zewnętrznych obciążeń hydrotermicznych, ale przy różnej długości oraz różnych wartościach współczynnika filtracji warstwy erozyjnej (sufozyjnej). Są to bardzo istotne zmiany w układzie izoterm w wyniku rozwoju tego procesu erozyjnego. Analizując zmienność pola termicznego, można bezpośrednio badać procesy filtracyjne oraz pośrednio wnioskować o występowaniu i rodzaju procesów erozyjnych. W metodach aktywnych stosuje się termoaktywny czujnik temperatury

sensitive temperature sensor integrated with a heating element is employed. The higher the moisture content, and especially the increased seepage velocity, the smaller the temperature rise of the sensor, as it is subjected to cooling by the water flowing around it due to convective heat transfer. In the laboratory, under controlled conditions, such a sensor can be calibrated by determining its heating characteristics depending on the seepage velocity. During in-situ testing, for example, in an earth dam body, the heating curve of the sensor from the field

measurement is compared with the database of laboratory measurements, from which the in-situ seepage velocity is determined [17, 25, 26].

The first attempts to apply simple thermal methods, borrowed from hydrogeology and geothermal science, to the analysis of seepage processes in earth damming structures such, date back to the 1960s [27]. However, it was not until the 1990s that these methods began to be more widely applied for this purpose and adapted to the specifics specific requirements of water engineering [21, 28]. At the turn of the century, a significant breakthrough occurred with the **application of linear sensors in the monitoring of leakage in earth damming structures**, such as dams and dikes of canals. This development enabled continuous monitoring of seepage processes and the detection of leaks along the entire length of these structures. At that time, the only type of linear sensor available was **optical fiber cable**, which was used exclusively for measuring natural temperature variations [29, 30]. A few years later, a thermo-active method was introduced, which involved heating a wire integrated with a fiber optic cable through electrical resistivity, as described in [25, 26]. **Fiber-optic sensors** represent an excellent solution for newly constructed or renovated structures, as they can be easily and cost-effectively installed. However, in the case of existing structures, their installation is often associated with high costs and technical challenges. The primary disadvantage lies in the need for installation in trenches or using cable plows, methods that can create loosened zones and potential leakage paths, which may even pose a threat to the safety of the structure. A detailed description of this issue is provided in [17]. In response, a new type of linear sensor, **the passive-active Multi-Point Thermal Sensor (MPoints)**, was developed. This sensor is specifically designed for installation in existing dams and levees and allows for

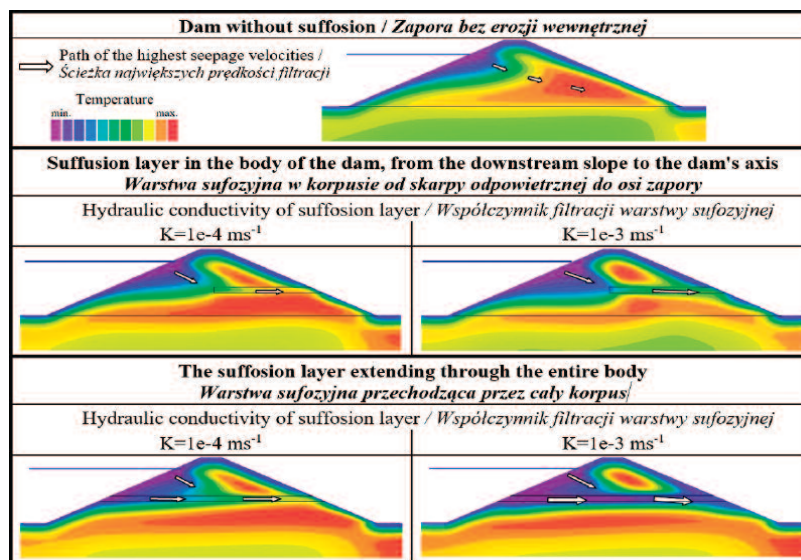


Fig. 1. A virtual, numerically modeled example of the impact of the development of an erosive suffusion layer on the temperature field in an earth dam, for the same time moment but with different varying lengths and hydraulic conductivity values of the suffusion layer [based on 22]

Rys. 1. Wirtualny, zamodelowany numerycznie przykład wpływu rozwoju erozyjnej warstwy sufozycznej na pole temperatury w zaporze ziemnej, w przypadku tej samej chwili czasowej, ale różnej długości oraz wartości współczynnika filtracji warstwy sufozji [na podstawie 22]

równuje się krzywą rozgrzewania czujnika z tego badania z bazą danych pomiarów wykonanych w laboratorium i tak określa prędkość filtracji in situ [17, 25, 26].

Pierwsze próby zastosowania prostych metod termicznych, zaczerpniętych z hydrogeologii i geotermii, do analizy procesów filtracyjnych w ziemnych budowlach piętrzących miały miejsce już w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku [27], ale dopiero w latach dziewięćdziesiątych zaczęły być częściej stosowane do tego celu i dostosowywane do specyfiki budownictwa wodnego [21, 28]. Na przełomie stuleci przełomowym momentem było **zastosowanie czujników liniowych w monitoringu przecieków ziemnych budowli piętrzących**, takich jak zapory i wały kanałów. Pozwoliło to na ciągłe monitorowanie procesów filtracyjnych i detekcję przecieków na długości tych budowli. W tamtym okresie jedynym czujnikiem liniowym był **kabel światłowodowy**, służący wyłącznie do pomiarów naturalnej temperatury [29, 30]. Kilka lat później zaczęto również stosować metodę termoaktywną, polegającą na rozgrzewaniu elektrooporowego drutu zintegrowanego z kablem światłowodowym [25, 26]. **Czujnik światłowodowy** jest bardzo dobrym rozwiązaniem do zastosowania w nowo budowanej lub modernizowanej budowli, gdyż w łatwy sposób i niewielkim kosztem możemy go wtedy w niej zainstalować. Natomiast na istniejących budowlach jego montaż jest często związany z wysokimi kosztami i trudnościami technicznymi. Główną wadą jest konieczność instalacji czujnika światłowodowego w wykopie lub pługiem kablowym, ponieważ te metody tworzą strefy rozluźnień i potencjalne przecieki, co może nawet stanowić zagrożenie dla bezpieczeństwa budowli [17]. Z tego powodu rozwinięto nowy rodzaj czujnika liniowego, **pasywno-aktywny Wielopunktowy Czujnik Termiczny (Multi Points Thermal Sensor – MPointS)**, dedykowany do instalacji na istniejących zaporach i wałach, który umożliwia quasi-cią-

zintegrowany z rozgrzewającą go grzałką. Im większa wilgotność, a przede wszystkim im większa prędkość filtracji, tym rozgrzanie się czujnika będzie mniejsze, ponieważ będzie bardziej chłodzony przepływającą wokół niego wodą. W laboratorium, w kontrolowanych warunkach, można skalibrować taki czujnik, określając jego charakterystykę rozgrzewania się w zależności od prędkości filtracji. Podczas badania in situ, np. w korpusie zapory ziemnej, po-

quasi-continuous measurements as well as thermo-active testing. Moreover, its installation does not create loosened zones, does not leave openings, and does not introduce potential leakage paths [17, 19]. MPointS sensors are typically used for the precise local detection, monitoring, and in-depth analysis of seepage and erosion process parameters, including the dynamics of their development. They are applied often following preliminary detection of signs indicating the occurrence of these processes in the structure or its foundation by the user. This preliminary detection is often carried out through visual inspection, geophysical surveys, or the analysis of piezometric measurements. Secondly, MPointS sensors are employed for long-term monitoring of seepage processes through the structure and its foundation, particularly in the case of older earth structures, with the aim of early and accurate detection of leaks and erosion processes along the entire length of the structure, as well as continuous monitoring of these processes over time.

The thermal method has been validated in numerous laboratory studies, including large-scale experiments in Germany using a 30-meter-long artificial channel [29], at the experimental dike in Aix-en-Provence, France, which featured artificial "leak" zones and the ability to control seepage values within them [31, 32], and especially in the studies conducted on the IJkDijk experimental dike in the Netherlands, which included simultaneous simulations of embankment failure due to erosion in the form of piping [33]. Furthermore, over the past two decades, thermal methods have been applied in the study of hundreds of hydraulic structures worldwide, including in numerous permanent or periodic monitoring systems [17, 19, 34 ÷ 36]. The positive results from these various applications, confirmed by the aforementioned tests, have led to these methods being particularly recommended for the investigation and monitoring of intensified seepage and internal erosion processes. This recommendation is especially endorsed by the most prestigious global institution in the field of hydraulic engineering, the International Commission on Large Dams (ICOLD). In its bulletin [4], ICOLD states that **the most promising method for detecting leaks is temperature measurement**, which enables inference about local water flow and allows for the monitoring of large areas of the structure. Additionally, this method has significant potential for verifying whether a leak has caused an erosion process.

Linear Sensors and Quasi 2D and 3D Monitoring. Linear sensors, such as those enabling continuous monitoring of seepage processes along their length, such as fiber optic sensors or quasi-continuous monitoring, like the MPointS sensor, have significantly enhanced the capabilities for studying these processes. These sensors are part of a broader trend of applying linear technologies in modern structural health monitoring systems [37, 38]. The appropriate placement of linear sensors allows not only for continuous spatial monitoring of destructive processes along a structure but also for the achievement of quasi-2D or even quasi-3D monitoring. The main objective is to comprehensively monitor key zones of the structure. This concept was defined and further described by Radzicki [18, 39] in the context of earth dams. In 2010, he proposed this approach for the Racibórz dry dam project, before the embank-

łość pomiarów oraz badania termoaktywne. Jego instalacja nie powoduje powstania rozluźnień, nie pozostawia otworów i nie stwarza potencjalnych stref przecieków [17, 19]. Czujniki MPointS stosuje się zazwyczaj do dokładnej, lokalnej detekcji i monitoringu oraz pogłębionej analizy parametrów procesów filtracyjno-erozyjnych, w tym ich dynamiki rozwoju, po uprzednim, wstępnym wykryciu przez użytkownika symptomów występowania któregoś z tych procesów w budowlę i/lub jej podłożu. To wstępne wykrycie odbywa się często metodą wizji lokalnej, badaniami geofizycznymi lub w wyniku analizy pomiarów piezometrycznych. Czujniki MPointS są stosowane do długotrwałego monitoringu procesów filtracyjnych przez budowlę i jej podłożę, szczególnie w przypadku starych budowli ziemnych, w celu wczesnej i dokładnej detekcji przecieków i procesów erozyjnych na całej długości obiektu oraz monitoringu tych procesów w przyszłości.

Metoda termiczna została zweryfikowana w wielu badaniach laboratoryjnych, w tym w dużej skali w Niemczech na sztucznym kanale długości 30 m [29], na wale eksperymentalnym Aix-en-Provence we Francji, który miał sztuczne strefy „przecieków” i możliwość sterowania w nich wartością filtracji [31, 32] oraz szczególnie w badaniach na wałach eksperymentalnych IJkDijk w Holandii z jednoczesnymi symulacjami zniszczenia wału z powodu erozji w postaci przebiccia hydraulicznego [33]. Ponadto, w ciągu ostatnich dwóch dekad, metody termiczne zostały użyte w badaniach kilkuset budowli piętrzących na całym świecie, w tym w licznych stałych lub okresowych systemach monitoringu [17, 19, 34 ÷ 36]. Pozytywne doświadczenia z licznych aplikacji, potwierdzone wspomnianymi testami sprawiły, że metody te są szczególnie rekomendowane w badaniu i monitoringu nasilonej filtracji oraz procesów erozji wewnętrznej, szczególnie przez najbardziej nobilitowaną globalną instytucję w dziedzinie inżynierii wodnej, a mianowicie Międzynarodową Komisję ds. Wielkich Zapór (ICOLD). W biuletynie [4] stwierdza ona, że **najbardziej obiecującą metodą w wykrywaniu przecieków są pomiary temperatury**, które umożliwiają wykrycie lokalnego przepływu wody i objęcie pomiarami dużych obszarów obiektu. Ponadto mają duży potencjał w weryfikacji, czy przeciek wywołał proces erozji.

Czujniki liniowe oraz monitoring quasi-2D i 3D. Czujniki liniowe to takie, które umożliwiają ciągły monitoring procesów filtracyjnych na swojej długości. Należą do nich czujnik światłowodowy lub quasi-ciągły monitoring oraz czujnik MPointS. Wpisują się one w szerszy kontekst stosowania czujników liniowych w nowoczesnych systemach badania stanu konstrukcji [37, 38]. Odpowiednie ułożenie czujników liniowych umożliwia nie tylko ciągły w przestżeni monitoring procesów destrukcyjnych wzdłuż budowli, ale także uzyskanie efektów monitoringu quasi-2D lub nawet quasi-3D, których celem jest całościowe objęcie monitoringiem kluczowych stref obiektu. Ideę tę zdefiniował i szerzej opisał Radzicki [18, 39] w aspekcie ziemnych budowli piętrzących. Zaproponował on ją w 2010 r. do aplikacji w zaprze suchego zbiornika Racibórz, jeszcze przed budową jej nasypów, gdy była możliwość (relatywnie niewielkim kosztem i w optymalnych lokalizacjach) umieścić w niej nowo-

ments were constructed. At that stage, it was possible – at relatively low cost and in optimal locations – to integrate modern sensors into the design. As shown in Figure 2, this concept included, first, monitoring of seepage processes along the dam, which involved several lines of fiber optic thermometric cables in a quasi-2D configuration for monitoring the impermeability of the barrier. Additionally, two lines of similar cables were placed along the structure's landside toe.

The measurement setup was complemented by thermal cross-sectional monitoring with vertical profiles of temperature measurements. Together, all the sensors created a system enabling quasi-3D monitoring, for early detection of any leaks in the dam's sealing screen in the waterside slope, and monitoring the potential „outflow” of a leak on the landside of the structure. This system was further supplemented with cross-sectional monitoring of seepage and erosion processes at selected sections of the dam. Secondly, the use of linear and multipoint sensors was proposed for monitoring displacements along the crown axis at the interface between the foundation and the embankment and on the crown of the dam. This concept was discussed by decision-making bodies as part of the update of the design solutions for the Racibórz dam. However, at that time, this solution was still considered too innovative for Poland and, unfortunately, was not implemented. This remains a significant loss, as the construction of the facility represented a unique opportunity for the low-cost installation of linear sensors in an optimal configuration, which would have enabled the development of a highly accurate and advanced early detection system for destructive processes. It was not until 2014 that the first thermal monitoring system for seepage and erosion processes in Poland was installed in 2014 at the existing Kozłowa Góra earth dam [19, 40]. Subsequently, in 2017, the first thermal monitoring system for an existing levee was implemented in Wawrzeńczyce near Kraków [17], followed by the installation in 2020 of the first monitoring system for a canal dike on a section of the Elbląg Canal near the Całuny Lock. All these systems utilized MPointS passive-active sensors. MPointS sensors were also employed for monitoring seepage processes and detecting leaks in a flood protection dike of the North Sea in the Netherlands in 2018 [41], as well as in one of the largest earth dams in Central Europe, located in Ukraine, for monitoring the development of erosion tunnels in its foundation in 2021. Moreover, in 2021 and 2023, during the construction of the dry reservoirs Roztoki and Boboszków, respec-

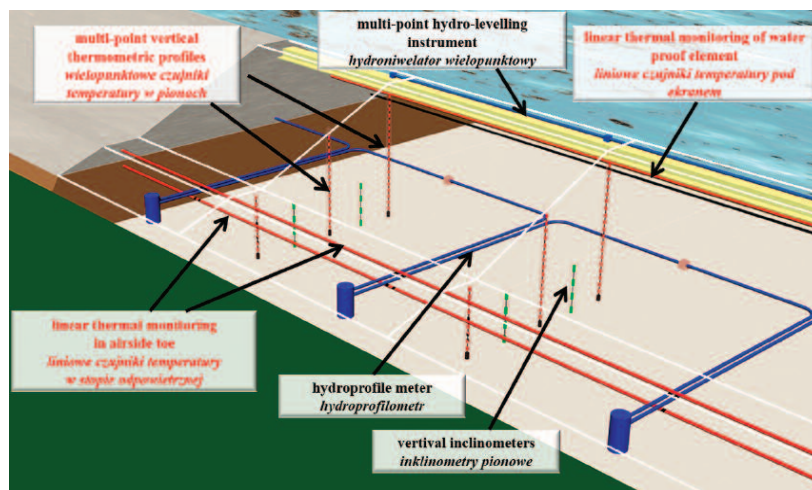


Fig. 2. The proposal for a modern monitoring of leaks and displacements using linear sensors in a quasi-2D and quasi-3D system, based on linear and multipoint sensors, presented in 2010 for the Racibórz Dolny earth dam

Rys. 2. Propozycja nowoczesnego systemu monitoringu przecieków oraz przemieszczeń czujnikami liniowymi w układzie quasi-2D oraz quasi-3D, opartego na czujnikach liniowych i wielopunktowych przedstawiona w 2010 r. w przypadku zapory ziemnej zbiornika Racibórz Dolny

czesne czujniki. Jak pokazano na rysunku 2, koncepcja ta obejmowała monitoring procesów filtracyjnych wzdłuż zapory, w tym kilkoma liniami termometrycznych kabli światłowodowych w układzie quasi-2D szczelności ekranu oraz stopy odpowietrznej budowli w takim samym układzie dwiema liniami tych kabli. Uzupełnieniem aparatury pomiarowej był monitoring termiczny przekrojowy z pionowymi profilami do pomiarów

temperatury. Łącznie wszystkie czujniki tworzyły układ umożliwiający monitoring quasi-3D wczesnej detekcji nieszczelności ekranu szczelnego w skarpie odwodnej zapory oraz monitoring ewentualnego „wylotu” przecieku po stronie odpowietrznej budowli, uzupełnione również monitoringiem przekrojowym procesów filtracyjno-erozyjnych w wybranych przekrojach zapory. Ponadto zaproponowano zastosowanie czujników liniowych i wielopunktowych do monitoringu przemieszczeń na styku podłoża i korpusu w osi korony oraz na koronie zapory. Koncepcja ta była dyskutowana w ośrodkach decyzyjnych w ramach aktualizacji rozwiązań projektowych zapory Racibórz. W tamtym okresie było to rozwiązanie zbyt innowacyjne w Polsce i nie zostało niestety zaimplementowane. Jest to duża strata, ponieważ budowa obiektu jest jedyną i wyjątkową okazją niskokosztowej instalacji czujników liniowych w optymalnym układzie, pozwalającą uzyskać bardzo dokładny i zaawansowany system wczesnej detekcji procesów destrukcyjnych. Dopiero w 2014 r. zainstalowano w Polsce pierwszy system termomonitoringu procesów filtracyjnych i erozyjnych. Miało to miejsce na istniejącej zaporze ziemnej Kozłowa Góra [19, 40]. Następnie w 2017 r. wykonano pierwszy w Polsce system termomonitoringu na istniejącym wale przeciwpowodziowym w miejscowości Wawrzeńczyce k. Krakowa [17] oraz w 2020 r. także pierwszy system termomonitoringu wału kanału, którym był odcinek kanału Elbląskiego koło śluzy Całuny. We wszystkich zastosowano czujniki pasywno-aktywne MPointS. Wykorzystano je również do monitoringu procesów filtracyjnych i detekcji przecieków na wale przeciwpowodziowym Morza Północnego w Holandii w 2018 r. [41] i jednej z największych zapór ziemnych na Ukrainie. Z kolei w 2021 r. oraz w 2023 r. w trakcie budowy odpowiednio zapór suchego zbiornika Roztoki, a następnie suchego zbiornika Boboszków zainstalowano tam pierwsze w Polsce systemy termodetekcji aktywnej przecieków na bazie czujników świa-

tively, the first systems in Poland for active thermal leak detection using fiber-optic sensors were installed. These systems represent the first thermal monitoring solutions in Poland to be implemented during the construction of new damming structures.

The Passive-Active Multipoint Thermal Sensor (MPointS) has been designed to facilitate the widespread application of linear thermal monitoring for seepage and erosion processes in existing earth damming structures. The individual sensors of this device are installed in a single line within the ground, spaced closely enough to provide quasi-continuous monitoring of destructive processes. The sensor spacing is tailored to the specific requirements of each structure, determined through a detailed analysis of multiple influencing factors. Generally, this spacing reflects a balance between the desired sensitivity for early detection of destructive processes, the spatial accuracy of their localization, and the overall financial implications of the monitoring system. Greater localization precision and earlier detection require closer sensor placement, leading to a higher number of sensors and, consequently, increased system costs. Soil type plays a pivotal role in determining sensor spacing. Additionally, it is crucial to establish whether the primary aim of the monitoring system is merely to detect the occurrence of seepage anomalies or also to accurately locate potential erosion zones. In the latter scenario, the sensor density is significantly higher. Other critical factors include the accuracy of temperature measurements provided by the sensors, their positioning within the structural cross-section or foundation, and their proximity to impermeable elements, such as drainage systems.

The sensors are installed using a trenchless method, where each sensor is driven vertically from the surface. The primary benefits of this approach, as detailed in [17], include, foremost, **the prevention of soil loosening during installation**. Soil loosening can result in preferential seepage pathways, which are especially undesirable in the area near the landside toe of a damming structure. This issue is particularly critical for the levees when the surface layer of the foundation soil consists of cohesive soils. In practical applications, one frequently encountered challenge is the inadequate compaction of backfilled linear excavations, such as gaps left by a plow or soil milling machine. However, the impact of soil loosening is mitigated when the linear fiber-optic sensor is installed immediately upstream of drainage. In the case of MPointS sensors, the small-diameter hole created during the installation of each sensor is adequately secured in every instance by filling it with bentonite. Additionally, **the MPointS installation is quick, does not require heavy equipment, and can be executed at significant depths**, enabling the monitoring of deeper soil layers when necessary. Furthermore, **potential sensor damage is not a critical concern; a new sensor can be readily installed adjacent to the damaged one and integrated into the monitoring system**. These features make the system suitable for safe and straightforward installation in existing earth damming structures – a task previously challenging or impractical when using fiber optic cables.

A monitoring system utilizing MPointS sensors may comprise a single measurement line, but more often, two or more sensor lines are installed at different depths. This configura-

tionary. Są to pierwsze w Polsce systemy termomonitoringu zainstalowane w trakcie budowy nowych budowli piętrzących.

Pasywno-aktywny Wielopunktowy Czujnik Termiczny (MPointS) został zaprojektowany tak, aby umożliwić upowszechnienie stosowania liniowego monitoringu termicznego procesów filtracyjnych i erozyjnych na istniejących ziemnych budowlach piętrzących. Pojedyncze sensory tego czujnika są umieszczane w jednej linii w gruncie, na tyle gęsto jeden obok drugiego, aby utworzyć quasi-ciągłość monitoringu procesów destrukcyjnych. Rozstaw sensorów każdorazowo jest dobierany indywidualnie do danego obiektu po analizie znacznej liczby czynników. Generalnie, rozstaw zależy od oczekiwanego poziomu wczesności detekcji procesu destrukcyjnego i dokładności jego lokalizacji przestrzennej w relacji do kosztów systemu. Im wymagana jest dokładniejsza lokalizacja i im we wcześniejszej fazie rozwoju ma być wykryty proces, tym zmniejsza się rozstaw sensorów, a w efekcie zwiększa ich liczba i co za tym idzie koszt całego systemu. Bardzo istotny wpływ na rozstaw sensorów ma rodzaj gruntu. Kluczowe jest także to, czy celem monitoringu jest wyłącznie detekcja pojawienia się anomalii filtracyjnej, czy także dokładna lokalizacja potencjalnej strefy erozji. W drugim przypadku zagęszczenie sensorów będzie znacznie większe. Ponadto na rozstaw sensorów ma wpływ dokładność pomiaru temperatury, jaką ma sensor, oraz położenie sensorów w przekroju obiektu i/lub jego podłożu, także w odniesieniu do odległości od elementu szczelnego, a przede wszystkim od drenażu. Czujniki montowane są bezwypokowo przez wbicie każdego z nich pionowo z powierzchni.

Główną zaletą tego rozwiązania, dokładniej opisanego w [17], jest **niepowodowanie rozluźnienia gruntu w trakcie instalacji**, które może stać się uprzywilejowaną drogą filtracji. Rozluźnienie jest szczególnie niepożądane w strefie stopy wału przeciwpowodziowego, gdy dotyczy wierzchniej warstwy gruntów podłoża złożonej z gruntów spoistych. W praktyce wykonawczej, niestety dość powszechnym problemem jest nieprawidłowe dogęszczanie likwidowanych wykopów liniowych, a przede wszystkim szczelin po pługu lub frezie gruntowym. Problem rozluźnienia gruntu jest mniej istotny, gdy czujnik liniowy jest instalowany tuż przed drenażem od jego odwodnej strony. Otwór o małej średnicy, po montażu każdego sensora, jest odpowiednio zabezpieczony przez wypełnienie bentonitem. Ponadto, **instalacja MPointS jest szybka, nie wymaga ciężkiego sprzętu i można ją stosować na dużej głębokości**, a więc pozwala, jeśli to konieczne, na monitoring głębokich warstw podłoża. Kolejną zaletą jest to, że ewentualne **uszkodzenia czujników nie są dużym problemem, ponieważ nowy czujnik można łatwo zainstalować w gruncie obok uszkodzonego i dopiąć do systemu**. Są to kluczowe cechy umożliwiające łatwą i bezpieczną instalację systemu MPointS w istniejącej ziemnej budowli piętrzącej, których brak uniemożliwiał stosowanie do tego celu kabli światłowodowych.

System bazujący na czujnikach MPointS może składać się z jednej linii pomiarowej, ale najczęściej wykorzystuje się dwie lub więcej linii sensorów, zlokalizowanych na różnej głębokości tworzące quasi-płaszczyznę monitoringu procesów filtracyjnych

tion forms a quasi-plane for observing seepage and erosion processes. Figure 3 presents the layout of the system with two monitoring lines and their respective installation. Typically, sensors are positioned at the landside toe of the damming structure. This placement minimizes installation costs and time while providing the critical advantage of early detection of erosive processes. Such processes usually initiate at the landside toe and propagate through the body or foundation of the structure towards the waterside slope. Each sensor in the MPointS system is identical, comprising a temperature measurement element integrated with a micro-heater. The system operates in two modes: passive, where the natural ground temperature is monitored, and active, where sensors are subjected to controlled heating.

The active mode facilitates both qualitative and quantitative data analysis. In the qualitative approach, differences in sensor heating are evaluated. Zones with intensified seepage, particularly leakage areas, exhibit a lower temperature increase during heating compared to sensors in unaffected regions, as schematically shown in Fig. 4 [17, 19].

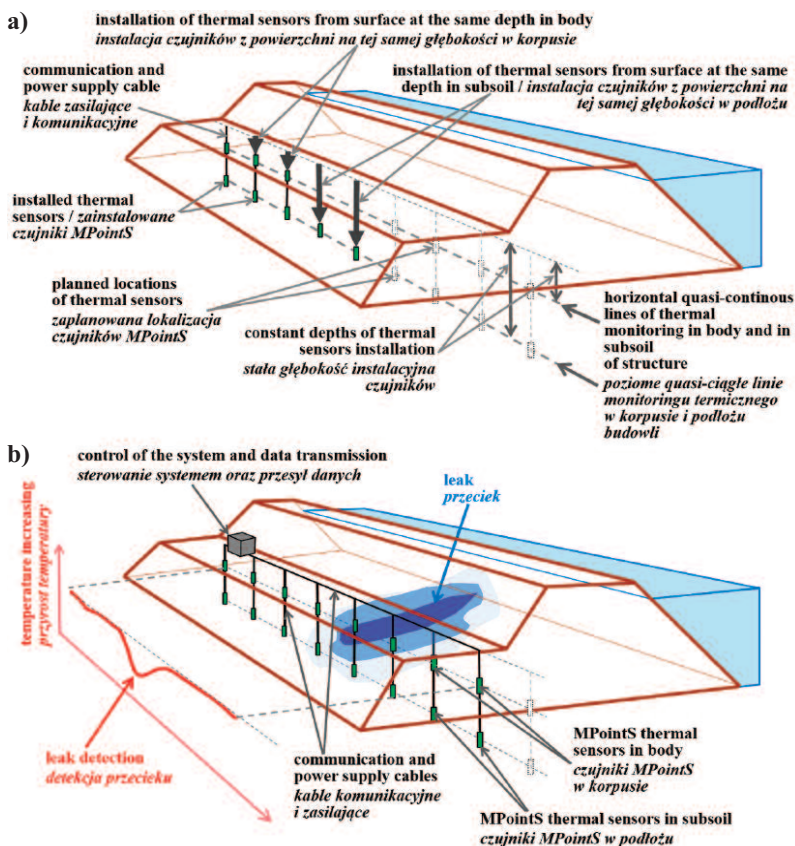


Fig. 3. Schema of MPointS system installation with two lines of sensors (a) and its application for quasi-linear monitoring of leakages in the body and foundation of earth damming structure (b) [17]

Rys. 3. Schemat instalacji systemu MPointS z dwiema liniami czujników (a) oraz jego zastosowania do quasi-liniowego monitorowania przecieków w korpusie i podłożu ziemnej budowli piętrzącej (b) [17]

i erozyjnych. Schemat systemu w przypadku dwóch linii monitoringu oraz jego instalacji przedstawia rysunek 3. Zazwyczaj czujniki są montowane w stopie odpowietrznej budowli piętrzącej. Ogranicza to koszty instalacji i skraca jej czas. Co najistotniejsze, ta lokalizacja umożliwiła wczesne wykrywanie procesów erozyjnych, które zazwyczaj rozwijają się właśnie od strefy stopy odpowietrznej w korpusie lub podłożu w kierunku części odwodnej budowli. Każdy sensor w czujniku MPointS jest identyczny. Składa się z elementu do pomiaru temperatury ze zintegrowaną z nim mikrogrzałką. W związku z tym badania można prowadzić w trybie pasywnym przez pomiar naturalnej temperatury gruntu, ale przede wszystkim w trybie aktywnym, podczas którego ogrzewa się czujniki. W trybie aktywnym dostępna jest jakościowa oraz ilościowa metoda analizy danych.

W metodzie jakościowej porównuje się stopień rozgrzania się sensorów. Strefy nasilonej filtracji, a szczególnie przecieków będą się charakteryzowały mniejszym przyrostem temperatury sensora podczas ogrzewania w porównaniu z sensorami zlokalizowanymi poza tą strefą, jak to schematycznie pokazano na rysunku 4 [17, 19].

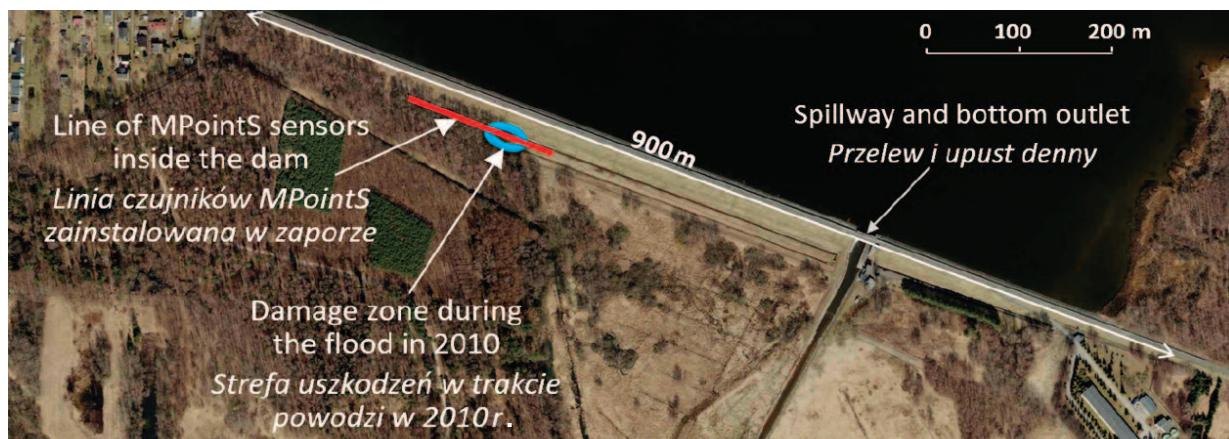


Fig. 4. The Kozłowa Góra dam with location of MPointS sensor line

Rys. 4. Zapora Kozłowa Góra z zaznaczeniem lokalizacji linii czujników MPointS

The quantitative method involves determining seepage velocities. The sensors were calibrated in a laboratory setting. Under controlled and constant seepage velocities, the heating characteristics of the sensors were recorded for various seepage velocities. By automatically comparing the heating curve obtained from field measurements in situ with a database of curves measured in the laboratory, the local seepage velocity in the soil surrounding each sensor is determined. This provides quantitative and critical information on seepage parameters, including leakage. Repeated measurements, or continuous monitoring of seepage velocities, allow for the identification of local anomalies. Such anomalies may indicate the initiation of seepage processes in areas where they should not occur or significant local increases in seepage velocity, suggesting leakage or the development of erosive processes. The monitoring system can be automated and configured to alert users to the occurrence of such events [17].

The world's first MPointS application and the first thermal monitoring installation for seepage processes in Poland. As stated at the outset, the pilot implementation of thermal monitoring for seepage processes – including applications in leak detection and erosion process monitoring – was conducted in 2014 on the Kozłowa Góra (Figure 4) earth dam. This marked the first such application in Poland and represented the inaugural global deployment of the MPointS system. The dam is located on the Brynica River, upstream of Piekary Śląskie in the Silesian Voivodeship of Poland. It extends 1,300 meters in length and rises 8 meters in height. Its structure was constructed using heterogeneous local materials, including sands, silty sands, and rock fragments composed of sandstone and limestone. The dam's foundation comprises highly permeable Quaternary alluvial deposits, primarily medium-grained sands interbedded with gravels of variable thickness, which locally reach up to 11 meters. Below these layers lie impermeable Carboniferous shale strata. The dam features an inclined clay core in the waterside slope, serving as its impermeable barrier. The lower section of this core connects to the upper edge of a wooden cut-off wall embedded in the alluvial foundation. Additionally, a drainage system is installed at the landside toe of the dam to manage seepage. A cross-section of the dam is shown in Figure 5.

At the dawn of the new millennium, particularly during the 2010 flood, alarming symptoms indicative of intensified seepage and the potential for erosional processes were observed. These phenomena were especially pronounced over a several-dozen-meter section of the right-bank dam, where minor slope failure of the drainage ditch occurred. To monitor these processes, the initial consideration involved installing a local monitoring

W metodzie ilościowej określa się prędkość filtracji. Sensory zostały skalibrowane w laboratorium. W warunkach kontrolowanej i stałej prędkości filtracji zarejestrowano charakterystykę rozgrzewania się sensorów do różnej prędkości filtracji. Przez automatyczne porównanie krzywej rozgrzewania się sensora z pomiaru polowego, in situ na obiekcie, z bazą krzywych pomierzonych w laboratorium określa się lokalną wartość prędkości filtracji w gruncie wokół każdego z sensorów. W ten sposób uzyskuje się ilościową, kluczową informację o parametrach filtracji, w tym przecieków. Prowadzenie powtarzalnych pomiarów, czyli stały monitoring prędkości filtracji, pozwala wykrywać lokalne anomalie, tj. pojawienie się procesu filtracyjnego w miejscu, gdzie nie powinien być obecny, lub istotne lokalne zwiększenie prędkości filtracji wskazujące na zaistnienie przecieku lub/ oraz rozwój procesów erozyjnych. Monitoring może być zautomatyzowany i informować użytkownika o wystąpieniu takich zdarzeń [17].

Pierwsza na świecie aplikacja MPointS i jednocześnie pierwsza w Polsce instalacja monitoringu termicznego procesów filtracyjnych. Jak wspomniano na wstępie, pilotażowe, pierwsze w Polsce, zastosowanie monitoringu termicznego procesów filtracyjnych, w tym detekcji przecieków oraz procesów erozyjnych i jednocześnie pierwsza na świecie aplikacja MPointS miały miejsce w 2014 r. na zaporze ziemnej Kozłowa Góra (rysunek 4). Zapora zlokalizowana jest na rzece Brynicy ponad Piekarami Śląskimi w woj. śląskim. Ma 1300 m długości oraz 8 m wysokości. Jej korpus został wykonany z niejednorodnego materiału miejscowego o dużej różnorodności, przede wszystkim z piasku i piasku pylastego oraz okruchów skalnych piaskowca i wapienia. Podłoże zapory stanowią silnie przepuszczalne aluwialne utwory czwartorzędowe, piaski średnioziarniste przewarstwione żwirami o różnej miąższości dochodzącej lokalnie do 11 m. Pod nimi znajdują się nieprzepuszczalne łupkowe warstwy karbońskie. Jako element szczelny zapora ma pochyły ekran łożowy w części odwodnej korpusu. Dolna część ekranu obejmuje górną krawędź drewnianej ścianki szczelnej wbitej w podłoże aluwialne zapory. W stopie odpowietrznej zapory znajduje się drenaż. Przekrój zapory przedstawia rysunek 5.

Z początkiem nowego milenium, a szczególnie w trakcie powodzi w 2010 r. zaobserwowano niepokojące symptomy świadczące o występowaniu nasilonej filtracji i możliwości rozwoju procesów erozyjnych. Szczególnie nasilone były one na kil-

kudziesięciometrym odcinku zapory prawobrzeżnej, gdzie doszło nawet do niewielkiego obsunięcia się skarpy rowu opaskowego. W celu monitoringu tych procesów, w pierwszej kolejności rozważano instalację lokalnego systemu monitorin-

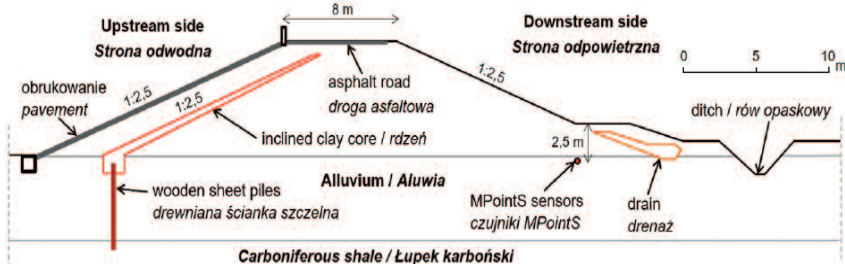


Fig. 5. Cross-section of the Kozłowa Góra dam with the location of MPointS sensors in its airside bench

Rys. 5. Typowy przekrój zapory Kozłowa Góra z zaznaczeniem lokalizacji czujników MPointS w jej ławeczce odpowietrznej

system at the landside toe of the dam using a fiber-optic thermal cable. However, this solution was abandoned following a detailed analysis that identified numerous limitations associated with its application to the existing structure. A critical issue was the high location of the seepage curve at the downstream toe of the Kozłowa Góra dam, which could have exacerbated erosional processes during earthworks for cable installation. Additionally, the relatively high costs of such a localized monitoring system presented another significant challenge. Consequently, it was not until 2014, with the development of an innovative thermal investigation method using MPointS sensors, that a thermal monitoring system – including thermo-active monitoring – was implemented. This system marked the first pilot application of thermal monitoring for seepage and erosion processes in hydraulic structures in Poland. A single line of MPointS sensors was installed at a depth of 2.5 meters below the surface (Fig. 5), with a horizontal spacing of 1 meter between sensors. The location of this sensor line on the dam is indicated by a red line in Fig. 4. It spans a section of the right-bank dam, specifically targeting the enhanced monitoring and understanding of seepage and erosion processes in the zone previously identified as exhibiting intensified seepage symptoms.

Figure 6 presents the seepage velocities measured at each sensor along the monitored section's entire length. These velocities were calculated from the temperature increase curves obtained through the active sensor heating method. To enhance clarity, the figure displays selected measurement series conducted every seven days at the same time (12:00 PM). From the analysis of these results, two primary conclusions emerge. First, seepage was observed along the entire monitored section. Second, two zones of intensified seepage were identified: between 32 and 35 meters and between 87 and 128 meters, where velocities were markedly higher relative to the remaining portion of the monitored section. Considering the lowered water level in the reservoir during the analysis period, the seepage velocities did not pose a significant risk of ongoing erosion processes at that time.

The pilot application of MPointS sensors at the Kozłowa Góra dam demonstrated their capability to enable precise, linear monitoring of seepage processes along earth damming structures. These sensors not only detect zones of intensified seepage, including potential leaks, but also allow for monitoring the temporal variability of seepage dynamics. Importantly, they provide local seepage velocity measurements, which are critical for evaluating the progression

gu w stopie odpowietrznej zapory z zastosowaniem termometrycznego kabla światłowodowego. Odstąpiono jednak od tego rozwiązania po analizie i identyfikacji, wspomnianych wcześniej, licznych jego ograniczeń w aplikacji na istniejącym obiekcie. Szczególnie istotnym problemem było wysokie położenie krzywej filtracji w stopie odpowietrznej zapory Kozłowa Góra, które mogłoby skutkować rozwojem procesu erozyjnego w trakcie robót ziemnych przy instalacji kabla, a po drugie relatywnie wysokie koszty takiego lokalnego układu monitoringu. W konsekwencji, dopiero wraz z opracowaniem nowej metody badań termicznych z zastosowaniem czujników MPointS, w 2014 r. został zainstalowany system monitoringu termicznego, w tym termoaktywnego. Był to, jak wspomniano wcześniej, pilotażowy i pierwszy w ogóle system termicznego monitoringu procesów filtracyjno-erozyjnych na budowlu piętrzącej w Polsce. Zainstalowano pojedynczą linię czujników MPointS na głębokości 2,5 m pod powierzchnią (rysunek 5) z rozstawem czujników w poziomie równym 1 m. Jej położenie na zaporze zaznaczono czerwoną linią na rysunku 4. Obejmuje ona odcinek zapory prawobrzeżnej, mając na celu jego dokładniejsze rozpoznanie i monitoring zachodzących tam procesów filtracyjno-erozyjnych zwłaszcza w strefie zaobserwowanych wcześniej symptomów nasilonej filtracji.

Rysunek 6 prezentuje prędkość filtracji określoną w przypadku każdego czujnika na całej długości opomiarowanego odcinka, określoną na podstawie krzywych przyrostu temperatury otrzymanych w wyniku zastosowania metody aktywnej i ogrzewania czujników. Celem większej przejrzystości

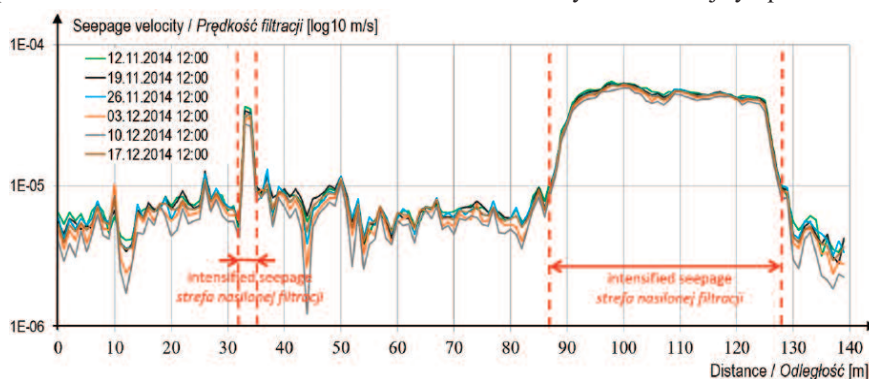


Fig. 6. Seepage velocities determined in 2014 by thermo-active MPointS sensors placed along the Kozłowa Góra dam in its airside bench at a depth of 2.5 meters [19]

Rys. 6. Prędkość filtracji określona w 2014 r. termoaktywnymi czujnikami MPointS umieszczonymi wzdłuż zapory Kozłowa Góra w jej laweczce odpowietrznej na głębokości 2,5 m [19]

wizualizacji tych wyników na rysunku pokazano wybrane serie pomiarów wykonane co siedem dni o tej samej godzinie 12:00. Dwa kluczowe wnioski z analizy tych wyników, to po pierwsze – na całej długości monitorowanego odcinka miała miejsce filtracja, a po drugie – wykryto dwie strefy nasilonej filtracji od 32 do 35 m oraz od 87 do 128 m, gdzie prędkość jest wyraźnie wyższa w stosunku do reszty monitorowanego odcinka. W związku z tym, że w analizowanym okresie zwierciadło wody w zbiorniku było obniżone, prędkość filtracji nie była duża, biorąc pod uwagę ryzyko występowania w danym momencie procesów erozyjnych.

Pilotażowa aplikacja czujników MPointS na zaporze Kozłowa Góra wykazała, że umożliwiają one dokładny, liniowy monitoring procesów filtracyjnych wzdłuż ziemnej budowli piętrzącej. Ponadto pozwalają nie tylko na detekcję miejsc nasilonej filtracji, w tym przecieków, ale także na monitoring zmienności procesów filtracyjnych w czasie. Umożliwiają określenie lokalnej prędkości filtracji, który to parametr jest kluczową informa-

of seepage processes and assessing the risk of erosion phenomena.

The first levee monitoring system for intensified seepage and leaks detection in Poland. In 2017, the first thermal monitoring system for seepage and erosion processes was installed in Poland on an existing levee. This system was implemented on the left-bank levee of the Vistula River in the village of Wawrzeńczyce, near Kraków, in the Małopolskie Voivodeship (Figure 7). The installation was driven by the need

cją dla osób oceniających zaawansowanie procesów filtracyjnych albo ryzyka wystąpienia procesów erozyjnych.

Pierwszy w Polsce system monitoringu nasilonej filtracji i detekcji przecieków na istniejącym wale przeciwpowodziowym. W 2017 r. zainstalowano pierwszy w Polsce lokalny system monitoringu termicznego procesów filtracyjnych oraz erozyjnych na istniejącym wale przeciwpowodziowym. Był nim lewobrzeżny wał Wisły w miejscowości Wawrzeńczyce k. Krakowa w województwie małopolskim (rysunek 7).

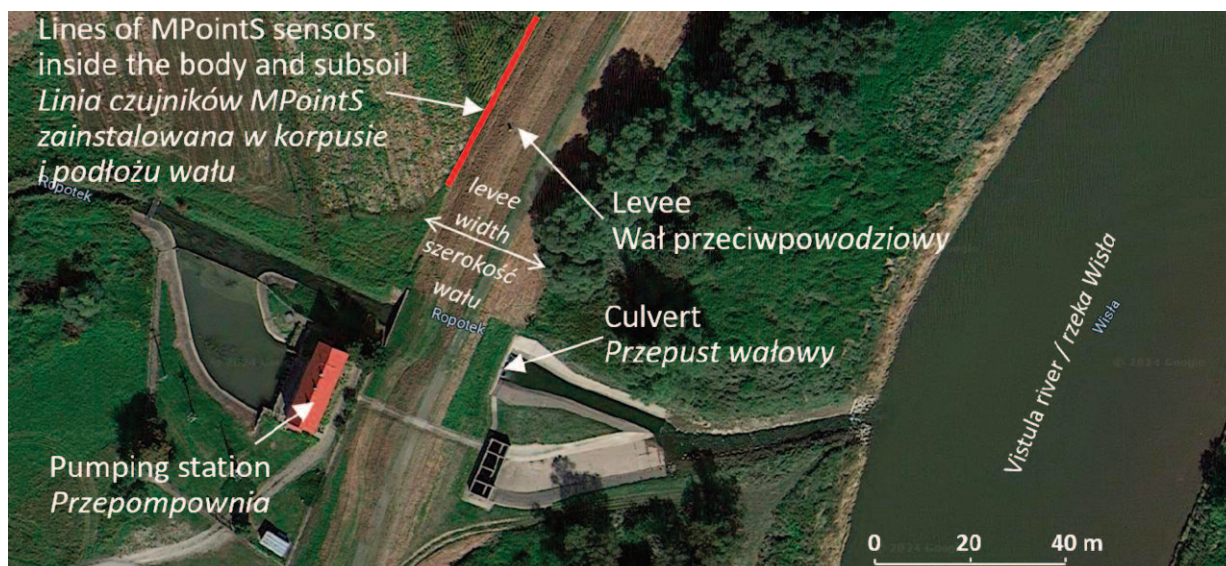


Fig. 7. Location of the thermal leak monitoring system using MPointS sensors in the levee of the Vistula River in Wawrzeńczyce (map: www.google.pl/maps)

Rys. 7. Lokalizacja systemu monitoringu termicznego przecieków czujnikami MPointS w wale przeciwpowodziowym rzeki Wisły w Wawrzeńczycach (map: www.google.pl/maps)

for more precise monitoring of a several dozen-meter-long section of the levee, where, during the 2010 Vistula River flood, significant water seepage and the initial stages of erosion phenomena were observed at the landside toe of the levee. Two MPointS sensor lines were installed along the levee to conduct thermoactive leak monitoring, as shown in the cross-section of the structure (Figure 8). These lines are positioned one beneath the other, under the crown of the embankment bench, with the first sensor line installed at a depth of 1.5 m in the embankment body, and the second 2 meters deeper, within the embankment foundation. The sensors in both lines are spaced 2 meters apart. Figure 9 presents the results of the measurements taken during the first flood event following the system installation on the Vistula River in 2019. This was a minor flood event that submerged only the waterside toe of the levee. However, it was sufficient to detect leakage zones in the levee foundation with the deeper sensor line and to determine their seepage velocities. During this event, the higher sensor line was not affected by water seepage from the river side. Therefore, the dimension-

Powodem tej instalacji była potrzeba dokładnego monitorowania kilkudziesięciometrowego odcinka tego wału, gdzie w trakcie powodzi w 2010 r. zauważono znaczne wysięki wody w jego stopie odpowietrznej i początkowe stadium rozwoju procesów erozyjnych. Na długości wału zainstalowano dwie linie czujników MPointS do termoaktywnego monitoringu przecieków (rysunek 8). Są one zlokalizowane jedna pod drugą, pod koroną ławeczki, pierwsza w korpusie na głębokości 1,5 m oraz druga 2 m głębiej już w podłożu wału. W obu liniach czujniki umieszczone są w rozstawie 2 m. Rysunek 9 przedstawia wyniki badań wykonane w trakcie pierwszego, po instalacji systemu, wezbrania na Wiśle w 2019 r. Było to niewysokie wezbranie, które zatopiło tylko stopę odwodną wału. To wystarczyło jednak, aby w jego trakcie wykryć strefy przecieków w podłożu wału, zainstalowaną głębiej linią czujników oraz określić ich prędkość filtracji. W przypadku tego wezbrania położona wyżej linia czujników nie została w żadnym miejscu objęta strefą infiltracji wody od strony rzeki, dlatego wartości bezwymiarowego przyrostu temperatury na rysun-

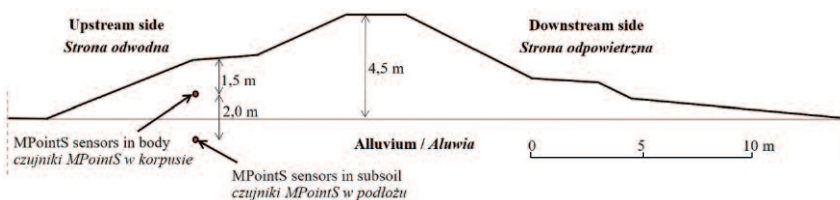


Fig. 8. Cross-section of the levee in Wawrzeńczyce with the location of MPointS sensors in its airside bench

Rys. 8. Przekrój wału przeciwpowodziowego w Wawrzeńczycach z zaznaczeniem lokalizacji czujników MPointS w jego ławeczce odpowietrznej

less temperature increase values shown in Figure 9 before and after the flood, represented by the green lines for these sensors, are nearly identical. The dimensionless temperature increase was defined as the ratio of the temperature increase recorded by a specific sensor to the maximum temperature increase recorded by any sensor along the entire measurement section in the study [17]. During the flood, how-

ever, in the leakage zone, the lower sensor line showed a significant decrease in the dimensionless temperature increase (solid blue line) along the section from 3 to 14 meters, compared to post-flood measurements (dashed blue line). The measured seepage velocities, visualized by the dashed orange line, are not significant. They ranged between 1.0×10^{-3} and 4.0×10^{-4} cm/s – well below the threshold levels capable of initiating erosion processes [16]. This outcome aligns with the limited water level rise observed on the embankment's drainage side. This is understandable due to the low water level rise on the levee's waterside. Nevertheless, the results confirmed the effectiveness of MPointS in early-stage leak detection and as a reliable tool for local monitoring of sensitive levee sections. These results were instrumental in the decision to make renovation of this levee section. In the near future, two additional MPointS sensor systems are planned for installation on levees in southern Poland.

In addition to the thermal monitoring system implemented on the levee in Wawrzeńczyce, extensive geophysical and geotechnical investigations have been conducted there on multiple occasions. The findings of these studies, along with the conceptual framework for investigating levees using modern, advanced research methodologies – such as the thermal method – are comprehensively detailed in [17]. The primary objective of the MPointS application for levees is to enable precise monitoring of previously identified local zones with intensified seepage symptoms, including areas at high risk of erosion or internal erosion. This monitoring is designed to operate effectively even during minor increases in river water levels. Its main goal is to collect detailed data on the intensity and dynamics of seepage processes, as well as the potential risk of internal erosion. By providing such data, this monitoring system aims to support the optimization of decisions regarding the scope and timing of levee maintenance, particularly before critical flood events. This approach is intended to enhance the overall safety of flood protection systems while simultaneously

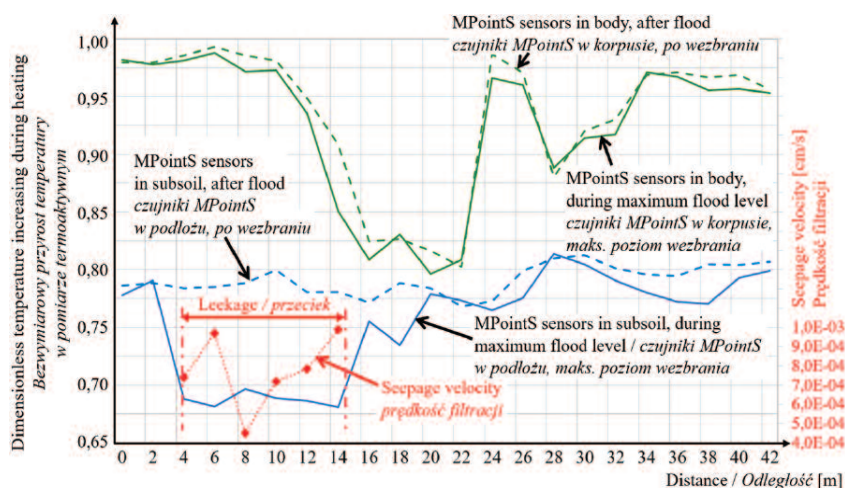


Fig. 9. Leakage zone detection in the subsoil and determination of seepage velocity using the thermo-active method along a section of the levee monitored by MPointS sensors during flooding on the Vistula river in 2019 [based on 17]

Rys. 9. Detekcja strefy przecieków w podłożu oraz określenie ich prędkości filtracji metodą termooaktywną wzdłuż monitorowanego czujnikami MPointS odcinka wału w Wawrzeńczycach w trakcie wezbrania na Wiśle w 2019 r. [na podstawie 17]

brania w strefie przecieków na niższej linii czujników, na odcinku 3 – 14 m miało miejsce znaczne zmniejszenie wartości bezwymiarowego przyrostu temperatury (ciągła niebieska linia) w porównaniu z pomiarami po wezbraniu (niebieska linia przerywana). Zmierzone prędkości filtracji, zwizualizowane pomarańczową linią przerywaną, są znacznie mniejsze od prędkości mogących uruchomić proces erozji [16] i wynoszą $1,0 \times 10^{-3}$ – $4,0 \times 10^{-4}$ cm/s. Jest to zrozumiałe ze względu na niewysokie piętrzenie po stronie odwodnej wału, ale otrzymane wyniki zweryfikowały pozytywnie zastosowanie MPointS w detekcji przecieków we wczesnych ich stadiach i jako skuteczne narzędzie lokalnego monitoringu wrażliwych odcinków wałów. Były też istotnym argumentem, który doprowadził do wykonania monitorowanego odcinka wału. Planowana jest też instalacja kolejnych dwóch systemów z zastosowaniem czujników MPointS na wałach przeciwpowodziowych w południowej Polsce.

Oprócz systemu termomonitoringu, na wale w Wawrzeńczycach prowadzono także kilkakrotnie szeroko zakrojone badania geofizyczne oraz geotechniczne. Wyniki wszystkich badań przedstawiono obszernie w [17], jak również koncepcję metody badania wałów przeciwpowodziowych z uwzględnieniem aktualnych, nowoczesnych metod badań, w tym z zastosowaniem metody termicznej. Podstawowym celem aplikacji MPointS na wałach przeciwpowodziowych jest monitorowanie, nawet podczas niewielkiego podniesienia się poziomu wody w rzece, rozpoznanych już wcześniej innymi metodami lokalnych stref zaobserwowanych symptomów nasilonej filtracji, a zwłaszcza erozji lub stref wysokiego ryzyka wystąpienia takich procesów. Ich celem jest gromadzenie informacji dotyczących intensywności i rozwoju przecieków oraz ryzyka erozji wewnętrznej. Mają one umożliwić optymalizację decyzji remontowych wałów, co do zakresu i czasu ich realizacji, przed wystąpieniem krytycznych powodzi. Ma to prowadzić do zwiększenia bezpieczeństwa systemu ochrony przeciwpowodziowej przy jednoczesnej minimalizacji kosztów remon-

ku 9, przed i po wezbraniu, pokazane w postaci zielonych linii są do siebie zbliżone. Bezwymiarowy przyrost temperatury był zdefiniowany jako stosunek przyrostu temperatury określonego czujnika w trakcie pomiaru do maksymalnego odnotowanego przyrostu temperatury, w przypadku któregośkolwiek czujnika na całej długości odcinka pomiarowego w danym badaniu [17]. Natomiast w trakcie wez-

reducing repair costs. In the longer term, data from MPointS systems transmitted to levee monitoring centres will enable real-time monitoring of levee conditions during floods.

However, achieving this functionality requires further development of monitoring centres and related infrastructure, in alignment with advancements in "smart infrastructure" and the concept of "smart levees." Furthermore, MPointS sensors can also be employed for proactive monitoring of critical flood levee, particularly those safeguarding vital infrastructure or areas of exceptionally high strategic value. This application seeks to maximize safety levels and enable the early detection of potentially destructive processes, thereby preventing significant structural failures.

Fiber optic cables are employed as linear sensors across diverse fields, including research, technology, and construction [37, 38, 42]. Within hydrotechnical applications, optical fibers are primarily utilized for temperature monitoring based on the principle of Raman scattering. The fiber optic cables employed in hydrotechnics are equipped with specialized high-durability armouring that enables their installation in soil while ensuring resistance to water-related conditions. A laser pulse transmission unit, integrated with an analyzer for the spectrum of the returning light, is connected to the cable. This setup enables fully automated temperature measurements and data recording. In hydrotechnical systems, the measurement setup is calibrated to measure average temperature values along each meter of the optical fiber, achieving a resolution of 0.1°C , over distances extending up to several tens of kilometres on a single continuous cable. For applications involving the thermo-active method, the thermo-resistive technique is employed by introducing electrical voltage to metallic wires integrated into one of the layers of the optical fiber's armor.

The first fiber-optic leakage monitoring system in Poland installed on a newly constructed hydraulic structure. Although, as previously mentioned, linear fiber-optic sensors have been widely used and installed worldwide since the beginning of the new millennium for monitoring seepage processes in earthen hydraulic structures, the first such system in Poland was installed in a newly constructed, permanent structure only in 2019. This system was installed in the Roztoki dry reservoir earth dam, located a few kilometers south of Bystrzyca Kłodzka, on the Goworówka stream, a tributary of the Nysa Kłodzka River. The cross-section of the dam, along with the marked locations of the fiber-optic sensors, depicts Figure 10.

Figure 11 illustrates a visualization of a leakage detection simulation using these sensors as part of the dam's monitoring system. Red areas indicate significant leakage, yellow represents minor leakage, and green signifies the absence of leakage.

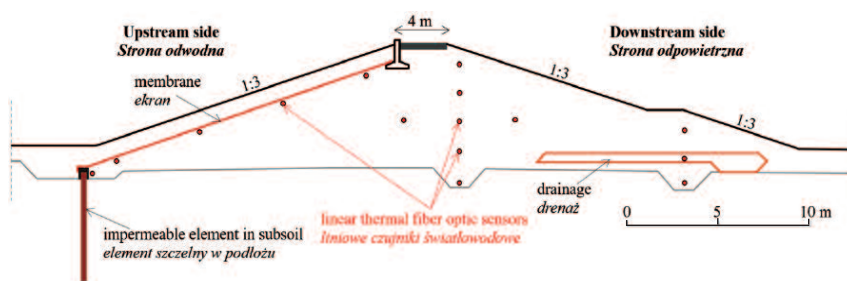


Fig. 10. Locations of linear-thermal fiber optic sensors for leak detection in cross-section of the Roztoki dam

Rys. 10. Lokalizacja liniowych, termicznych, światłowodowych czujników do detekcji przecieków w przekroju zapory Roztoki

tów. W przyszłości dane z systemów MPointS, przesyłane do centrów monitoringu wałów będą służyć kontroli stanu wałów w czasie rzeczywistym podczas powodzi. Wymaga to jednak rozwoju tych centrów i infrastruktury w kontekście rozwoju „inteligentnej infrastruktury” i „inteligentnych wałów – smart levees”. Ponadto czujniki MPointS, oprócz monitoringu odcinków wałów z już odnotowanymi symptomami przecieków, mogą być stosowane do monitoringu prewencyjnego szczególnie istotnych, istniejących już wałów przeciwpowodziowych, chroniących krytyczną infrastrukturę lub inne tereny bardzo wysokiej wartości, w celu maksymalizacji poziomu ich bezpieczeństwa i wczesnej detekcji potencjalnych procesów destrukcyjnych.

Kable światłowodowe są używane jako liniowe czujniki w wielu obszarach badań, technologii i budownictwa [37, 38, 42]. Do zastosowania w hydrotechnice stosuje się zazwyczaj światłowody umożliwiające pomiary temperatury z wykorzystaniem zjawiska rozpraszania ramanowskiego. Wykorzystywane w hydrotechnice światłowodowe kable pomiarowe mają specjalne wysokoodporne opancerzenie, umożliwiające ich instalację w gruncie i zapewniające odporność na warunki wodne. Do kabla podłącza się jednostkę nadawania impulsu laserowego zintegrowaną z analizatorem widma światła powracającego, która w sposób w pełni automatyczny wykonuje pomiary temperatury i rejestruje dane. W hydrotechnice stosuje się jednostki o parametrach, które pozwalają na pomiar średniej temperatury z każdego metra światłowodu z rozdzielczością $0,1^{\circ}\text{C}$ na długości nawet kilkudziesięciu kilometrów na jednym, ciągłym kablu. W celu zastosowania metody termooptycznej, używa się metody termoopornościowej przez wprowadzenie napięcia do kabli metalowych, które stanowią jedną z warstw pancerza światłowodu.

Pierwszy w Polsce system światłowodowego monitoringu przecieków na nowo budowanej budowli piętrzącej. Mimo że liniowe czujniki światłowodowe były już od początku nowego milenium licznie instalowane na całym świecie do monitoringu procesów filtracyjnych w ziemnych budowlach piętrzących, to w Polsce pierwszy taki system został zainstalowany na nowo budowanej, stałej budowli dopiero w 2019 r. Była to zapora ziemna suchego zbiornika Roztoki, zlokalizowanego kilka kilometrów na południe od Bystrzycy Kłodzkiej na potoku Goworówka, stanowiącym dopływ rzeki Nysy Kłodzkiej. Przekrój zapory wraz z zaznaczoną lokalizacją czujników światłowodowych przedstawia rysunek 10. Rysunek 11 prezentuje natomiast wizualizację z symulacji detekcji przecieków z zastosowaniem tych czujników w systemie monitoringu zapory. Pola oznaczone kolorem czerwonym oznaczają intensywny przeciek, żółtym – niewielki, zielonym – brak przecieku.

Cross-sectional numerical thermo-hydraulic modelling using back-analysis approach

Description of the Method. Numerical modelling, particularly using the finite element method, is one of the most widely used tools for analyzing the behavior of structures and the processes occurring within them and their surroundings. In hydraulic engineering, it is primarily employed to analyze seepage processes, including the seepage velocity field, pressure distribution, changes in the position of the water table, and, subsequently, to verify the stability of the modelled object, taking these parameters into account. When modelling an existing structure, an appropriate model calibration procedure is required, known as the „back analysis” method. This involves selecting the geometry and parameter values of individual elements and soil layers of the structure and its foundation in the numerical model step by step, such that, with a certain idealization (simplification), it accurately represents the real-world scenario. The accuracy of the representation is verified by comparing actual measurements of specific parameters with the values obtained in the model. For example, in the analysis of seepage processes, the most common measurements are water table levels in piezometers, while in the model, it is the position of the saturation curve. If the discrepancy is significant, the distribution and parameter values in the model are adjusted in subsequent steps to achieve consistency with real measurements. In practice, this is an iterative process, during which the geometry and material parameters of homogeneous regions of the continuous medium in the model are repeatedly modified. It is a labor-intensive task that requires substantial experience with the method, modelling software, and a deep understanding of the physics of the modelled processes, the working conditions, and the behaviour of structures at different stages of their life cycle. This includes accounting for aging processes, potential damage scenarios, and the development of destructive processes.

In the case of earth damming structures, this knowledge also encompasses potential discontinuities in impermeable elements and the development patterns of seepage and erosion processes. What is particularly important, one of the key challenges in numerical modelling of existing hydrogeological systems is the **significant difficulty, or even sometimes the impossibility, of calibrating the model based solely on piezometric measurements of the water table.** This issue typically arises from the excessive complexity of the modelled me-

Przekrojowe modelowanie numeryczne termo-hydrauliczne z wykorzystaniem „analizy wstecz”

Opis metody. Modelowanie numeryczne, szczególnie za pomocą metody elementów skończonych, jest jednym z bardzo często stosowanych narzędzi w analizie zachowania się budowli i procesów zachodzących w nich i w ich otoczeniu.

W hydrotechnice używane jest przede wszystkim do analizy procesów filtracyjnych, w tym pola prędkości filtracji, rozkładu ciśnienia, zmienności położenia zwierciadła wody, a następnie z uwzględnieniem wpływu tych parametrów do weryfikacji stateczności modelowanego obiektu. W przypadku modelowania istniejącej budowli konieczna jest odpowiednia procedura kalibracji modelu zwana metodą „analizy wstecz”. Polega to na takim dobieraniu w modelu numerycznym, w ko-

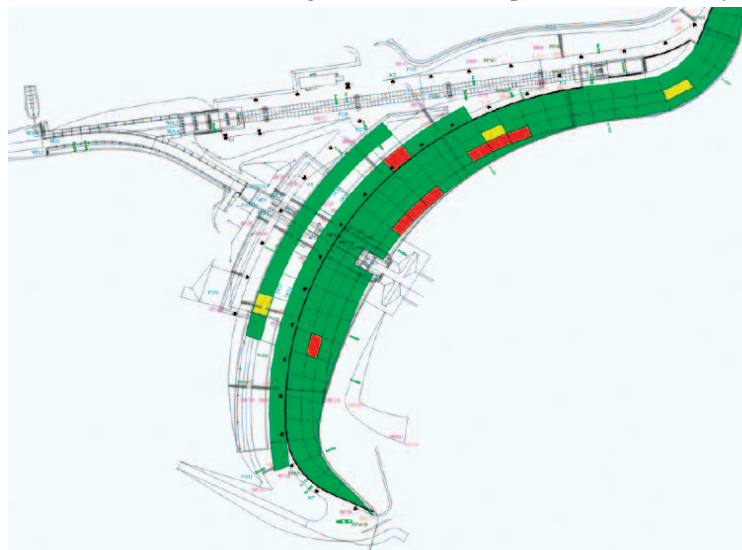


Fig. 11. Simulation of leak visualization in the monitoring system of the Rostoki dam using fiber optic sensors

Rys. 11. Symulacja wizualizacji przecieków w systemie monitoringu zapory Rostoki z zastosowaniem czujników światłowodowych

lejnym krokach, geometrii i wartości parametrów poszczególnych elementów i warstw gruntowych obiektu i podłoża, aby przy pewnej ich idealizacji (uproszczeniu) odwzorować prawdziwą sytuację. Weryfikację poprawności odwzorowania wykonuje się przez porównanie wartości pomiarów rzeczywistych określonego parametru z jego wartościami uzyskanymi w modelu. Przykładowo, w analizie procesów filtracyjnych są to najczęściej pomiary poziomu zwierciadła wody w piezometrach, a w modelu – położenie krzywej nasycenia. Jeśli różnica jest duża, to wykonuje się korektę rozkładu i wartości parametrów w modelu, starając się uzyskać w kolejnych krokach zgodność z pomiarami w rzeczywistości. W praktyce jest to proces wieloiteracyjny, podczas którego zmienia się wielokrotnie krok po kroku geometrię oraz wartości parametrów materiałowych jednorodnych stref ośrodka ciągłego w modelu. Jest to żmudne działanie i wymagające dużego doświadczenia w opanowaniu metody i oprogramowania do modelowania numerycznego, ale też wiedzy o fizyce modelowanych procesów, warunkach pracy i zachowaniu się budowli w kolejnych etapach ich życia, procesach ich starzenia się, a także możliwych scenariuszach zaistnienia uszkodzeń i rozwoju procesów destrukcyjnych. W przypadku ziemnych budowli piętrzących jest to wiedza także o możliwych nieciągłościach w elementach szczelnych i schematach rozwoju procesów filtracyjnych oraz erozyjnych.

Jednym z klasycznych problemów w modelowaniach numerycznych, odwzorowujących istniejące układy hydrogeologiczne, jest często **duża trudność lub nawet niemożność kalibracji modelu wyłącznie na podstawie pomiarów piezometrycznych zwierciadeł wody.** Przyczyną takiego stanu rzeczy jest zazwyczaj zbyt duża złożoność modelowanego ośrodka w stosun-

dium in relation to the limited information available about the hydraulic field and its variability, which is derived solely from piezometric data [43 ÷ 45]. This problem also extends to the application of the back analysis method for modelling seepage processes in earth damming structures [45]. The risk of unsuccessful modelling increases as:

- The geological survey lacks accuracy;
- The geological system is highly complex, particularly in areas affected by internal erosion;
- Piezometers are sparsely distributed;
- Hydraulic boundary conditions are stable.

Depending on the level of model-data fitting error deemed acceptable by the modeler, as well as their experience, there are cases where the final geological configuration or the local parameters of dam's sealing elements may be significantly misjudged. This suggests that the model may have only been seemingly calibrated, and subsequent analyses of the dam's condition based on this model may be erroneous. Importantly, situations involving incorrect model calibration are difficult to detect by subsequent users of the modelling results, unless an obvious and clear mistake has been made, especially since these users are typically not experts in numerical modelling.

The previously described relationships between the coupled transport of heat and water indicate that local changes in seepage velocity significantly affect the local heat transport, and thus the local temperature field variations. This fact can be utilized by using heat as a valuable additional indicator, enabling reliable and, most importantly, correct calibration of the hydraulic model. In such cases, the "back analysis" process additionally compares the temperature field distribution in the model with temperature measurements taken in the structure. Several examples of numerical modelling, specifically thermo-hydraulic modelling of existing earth damming structures, can be found in the literature, where the back analysis method was applied. In one of these examples, Johansson [46] emphasized that only the use of the thermal field as an additional indicator allowed the correct calibration of the hydrogeological model in the case he described. This was due to his observation that modelling the hydraulic field alone for several different, plausible geological scenarios produced similar results for the water table position. This made it impossible to determine which hydrogeological model was the one truly representing the real case. However, so far, only one case described in the literature involved the thermo-hydraulic numerical modelling of an earth damming structure with an existing erosion zone. This was the modelling of the QA-01 earth dam in Canada [47]. In this case, a layer of increased hydraulic conductivity within the core of the dam was modelled as an internal erosion zone. This study represents the first known instance of numerical thermo-hydraulic modelling applied to an existing earth damming structure by the authors. In subsequent publications, thermo-hydraulic numerical modelling was used to investigate the theoretical impact of a hypothetical erosion zone with increased permeability on the temperature field distribution. These studies focused on both real and virtual embankments. However, they did not include cases involving actual erosion

ku do zbyt ubogiej informacji o polu hydraulicznym i jego zmienności, pochodzącej tylko z pomiarów piezometrycznych [43 ÷ 45]. Ten problem dotyczy także zastosowania metody analizy wstecz do odwzorowania procesów filtracyjnych w ziemnych budowlach piętrzących [45]. Ryzyko niepowodzenia jest tym większe, im:

- mniej dokładne jest rozpoznanie geologiczne;
- bardziej skomplikowany jest układ geologiczny, a szczególnie gdy w układzie tym pojawiają się obszary erozji wewnętrznej;
- rzadziej rozmieszczone są piezometry;
- hydrauliczne warunki brzegowe są ustalone.

W zależności od wartości błędu dopasowania modelu z rzeczywistymi danymi, przyjmowanego jako dopuszczalny przez osobę wykonującą modelowanie, zdarzają się nawet sytuacje, gdy ostateczny układ geologiczny lub lokalne parametry szczelności elementów szczelnych budowli są w istotnym zakresie przyjęte błędnie. Oznacza to, że model został tylko pozornie skalibrowany, a kolejne analizy dotyczące stanu budowli, bazujące na wynikach tego modelu, mogą być błędne. Co istotne, takie błędne kalibracje modelu, o ile nie został popełniony jakiś oczywisty i wyraźny błąd, są trudne do wychwycenia przez kolejnych użytkowników wyników modelowania, szczególnie że zazwyczaj nie są oni ekspertami w realizacji modelowań numerycznych.

Z opisanych wcześniej zależności pomiędzy sprzężonym transportem ciepła i wody wynika, że lokalna zmiana prędkości filtracji wpływa bardzo istotnie na lokalny transport ciepła, a więc i na lokalne zmiany pola temperatury. Ten fakt można wykorzystać, używając ciepła jako bardzo wartościowego, dodatkowego wskaźnika umożliwiającego wiarygodną i przede wszystkim poprawną kalibrację modelu hydraulicznego. W takim wypadku, w procesie „analizy wstecz” dodatkowo porównuje się rozkład pola temperatury w modelu z pomiarami temperatury wykonywanymi w budowli. W literaturze można znaleźć opisy kilku przykładów takiego modelowania numerycznego, czyli modelowania termohydraulicznego istniejących ziemnych budowli piętrzących z zastosowaniem metody „analizy wstecz”. W jednym z nich, Johansson [46] podkreślił, że tylko wykorzystanie pola termicznego jako dodatkowego wskaźnika umożliwiło poprawne skalibrowanie w opisywanym przez niego przypadku modelu hydrogeologicznego. Wynikało to z jego obserwacji, że modelowanie wyłącznie pola hydraulicznego w przypadku kilku różnych, prawdopodobnych scenariuszy geologicznych dawało podobne wyniki położenia zwierciadła wody. Uniemożliwiało to więc stwierdzenie, który model hydrogeologiczny jest tym jedynym modelem odwzorowującym rzeczywisty przypadek. Dotychczas tylko w jednym przypadku opisanym w literaturze zamodelowano termohydraulicznie, numerycznie, z wykorzystaniem metody analizy wstecz ziemną budowlę piętrzącą z istniejącą już strefą erozyjną. Było to modelowanie zapory ziemnej QA-01 w Kanadzie [47]. Zamodelowano tam warstwę o zwiększonej przepuszczalności w rdzeniu szczelnym zapory jako strefę erozji wewnętrznej. Modelowanie to jest także pierwszym, znanym nam, modelowaniem numerycznym termohydraulicznym istniejącej ziemnej budowli piętrzącej. W kolejnych latach, w kilku publikacjach, opisano teoretyczny wpływ wystąpienia hipotetycznej strefy erozji o zwiększonej przepuszczalności, w istniejących lub w wirtu-

zones or the determination of their geometric parameters using the "back analysis" method. As evidenced by the experience of the co-author of this article, Dr. Radzicki, the underlying cause of this situation may lie in the fact that numerical modelling requires significant expertise in thermo-hydraulic processes. Moreover, it is far more complex and time-consuming compared to modelling the hydraulic field alone. Nevertheless, as we will demonstrate using the example of the Chańcza Dam in the following subsection, this approach enables a highly accurate characterization of the hydrogeological system. It allows us to identify the pathways of intense seepage zones and potential erosion zones within the dam body or its foundation. This includes determining their precise location, geometry, and hydraulic conductivity values. Additionally, it facilitates the accurate detection of leakage locations in impermeable elements. Such insights are particularly crucial since erosion processes are relatively common in earth damming structures that have been in operation for several decades. For example, in all three large earth dams modelled in recent years by Dr. Radzicki, two of which are located in Poland and one in Ukraine, each over fifty years old, significant erosion zones were identified using this method.

To apply the described method to the analysis of damming structures, two-dimensional cross-sectional numerical modelling is typically employed. The boundary conditions for the model are established using measurements of upstream and downstream water levels, water temperatures, and, often, the temperature of the downstream slope. For model calibration, measurements generally include vertical temperature profiles and the position of the water table, obtained from piezometers. Once baseline modelling is completed, the simulated temperature values and water table positions are compared to measurements taken from the actual structure. Discrepancies often arise, particularly in the distribution of isotherms within the temperature field. This indicates that, assuming the boundary conditions have been correctly defined and modelling errors are absent, adjustments to the thermal and/or hydraulic material parameters in the model are necessary. The objective is to ensure that, in subsequent iterations, the simulated temperature values and saturation curve positions align closely with the measured parameters. As previously noted, heat transport is highly sensitive to local variations in seepage field parameters. Consequently, accurately replicating the real temperature field requires precise calibration of the hydrogeological model, including the identification of leakages and, critically, potential erosion zones. Periodic numerical modelling of the same dam cross-section enables the observation of temporal variations within the hydrogeological system. This includes tracking the evolution of erosion geometry and monitoring changes in the values of hydraulic conductivity parameter.

Results of Modelling the Cross-Section of the Chańcza Earth Dam

The Chańcza Dam is located on the Czarna Staszowska River, approximately 4 km northeast of Szydłów in the Świętokrzyskie Voivodeship, Poland. This earthfill dam has a total length of 412

alnych budowlałch piętrzących, na rozkład pola temperatury z zastosowaniem termohydraulicznego modelowania numerycznego, ale już bez przypadków z istniejącą rzeczywistą strefą erozji i poszukiwaniem jej parametrów, w tym geometrii, metodą „analizy wstecz”. Jak to wynika z doświadczenia współautora tego artykułu dr. Radzickiego, przyczyną takiej sytuacji może być fakt, że jest to modelowanie numeryczne wymagające bardzo dużego doświadczenia w modelowaniu termohydraulicznym i jest o wiele bardziej żmudne i czasochłonne od modelowania wyłącznie pola hydraulicznego. Na przykładzie zapory Chańcza pokażemy, jak taka praca pozwala bardzo dokładnie określać układ hydrogeologiczny, przebieg stref nasilonej filtracji i potencjalne strefy erozyjne w korpusie i/lub podłożu budowli, ich lokalizację, geometrię i wartości współczynnika filtracji, a także dokładnie identyfikować lokalizację nieszczelności w elementach szczelnych. Jest to o tyle istotne, że procesy erozyjne występują dość często w ziemnych budowlałch piętrzących mających kilkadziesiąt lat i więcej, np. w przypadku trzech modelowanych w ostatnich latach przed dr. Radzickiego dużych zapór ziemnych, w tym dwóch zlokalizowanych w Polsce i jednej na Ukrainie, z których każda miała ponad pięćdziesiąt lat, zidentyfikowano tą metodą istotne strefy erozyjne.

Do zastosowania opisywanej metody w analizie budowli piętrzących używa się zazwyczaj modelowania numerycznego dwuwymiarowego, przekrojowego. Do zdefiniowania warunków brzegowych modelu wykorzystuje się pomiary położenia wody dolnej i górnej oraz temperatury wody, jak również temperatury skarpy odpowietrznej. Z kolei pomiary wykonywane w celu kalibracji modelu są to zazwyczaj pomiary pionowych profili temperatury oraz położenia zwierciadła wody wykonywane w piezometrach. Po wykonaniu modelowania bazowego porównuje się wartości temperatury oraz położenia zwierciadła wody pomiędzy modelem a pomiarami wykonanymi na rzeczywistym obiekcie. Zazwyczaj różnią się one od siebie, szczególnie rozkładem izoterm pola temperatury. Oznacza to, że o ile zostały prawidłowo zdefiniowane warunki brzegowe i nie ma błędów modelowych, to w modelu należy następnie tak zmienić wartości parametrów materiałowych termicznych lub/oraz hydraulicznych, aby w kolejnym modelowaniu wartości temperatury oraz położenia krzywej nasycenia w modelu były jak najbliższe wartościom parametrów pomierzonych w rzeczywistości. W związku z tym, że transport ciepła jest bardzo „czuły” na lokalne zmiany warunków filtracyjnych, poprawne odwzorowanie rzeczywistego pola temperatury jest jednoznaczne z bardzo dokładną kalibracją modelu hydrogeologicznego, w tym lokalizacją nieszczelności, a przede wszystkim potencjalnych stref erozyjnych. Okresowe modelowanie numeryczne tego samego przekroju budowli piętrzącej pozwala na obserwację zmienności układu hydrogeologicznego w czasie, w tym np. rozwoju geometrii procesu erozyjnego i wartości jego współczynnika filtracji.

Wyniki modelowania przekroju zapory ziemnej Chańcza

Zapora Chańcza zlokalizowana jest na rzece Czarna Staszowska ok. 4 km na północny wschód od m. Szydłów w województwie świętokrzyskim. Jest to zapora ziemna o długości 412 m

meters and a maximum height of 13.8 meters, featuring a concrete block of the spillway and bottom outlets. Initially, the dam's impermeable barrier consisted of a reinforced concrete face on the waterside slope, supplemented by a clay sealing layer extending 50 meters along the reservoir bed at the dam's foundation. Due to numerous and intensified seepage anomalies, an additional cutoff wall was constructed from the dam crest through its body, extending into the alluvial and loosened rock layers, reaching the low-permeability bedrock. A statistical analysis conducted in 2021 on water level fluctuations in piezometers at the Chańcza Dam identified two piezometric cross-sections, B-B and 2-2, within the right-bank dam body, as being particularly affected by severe and progressively worsening seepage processes. These processes were likely driven by long-term mechanisms of suffosion and internal erosion. Statistical analysis of measurement data provided valuable insights into the potential locations and dynamics of these problematic zones within the dam's structure. However, this approach could not determine the exact geometry of these zones or the specific hydraulic and thermal properties of the soil. To obtain more detailed information, in 2022, sensors were installed in piezometers located in cross-sections B-B and 2-2 to measure vertical temperature profiles and pressure. Additionally, thermal boundary conditions at the structure were recorded, including external temperatures on the waterside and landside, as well as the positions of the upper and lower water tables. These data were used to develop and calibrate thermo-hydraulic numerical models for the two cross-sections, employing finite element analysis combined with back-analysis methods. The modelling accounted for transient thermal and hydraulic boundary conditions. The calibration process relied heavily on the accurate determination of thermal soil parameters. Below, selected modelling results for cross-section 2-2 are presented, as this section exhibited the most pronounced seepage and erosion activities.

In Figure 12, the temperature field within the model of this cross-section is presented, along with superimposed measure-

i maksymalnej wysokości 13,8 m z betonową sekcją spustowo-przelewową. Pierwotnie element szczelny zapory stanowił żelbetonowy ekran szczelny na skarpie odwodnej połączony z glinowym ekranem długości 50 m położonym na dnie zbiornika przy stopie zapory. Z powodu zaobserwowania licznych i nasilonych anomalii filtracyjnych wykonano dodatkowo przesłone szczelną z korony zapory, przez jej korpus, przecinającą również warstwy aluwialne i rozluźnionych skał, aż do warstw skalnych o małej wodochłonności. Wyniki wykonanej w 2021 r. analizy statystycznej zmienności zwierciadła wody w piezometrach zapory Chańcza wskazały dwa przekroje piezometryczne B-B oraz 2-2 w korpusie zapory prawobrzeżnej, jako te o znacznie nasilonych i narastających procesach filtracyjnych, prawdopodobnie powiązanych także z wolnozmiennymi, wieloletnimi sufozyjnymi procesami erozji-wewnętrznej. Modelowanie statystyczne danych pomiarowych pozwala uzyskać bardzo istotne informacje o obszarach lokalizacji potencjalnych stref problemowych w zaporzach ziemnej i dynamice ich rozwoju w wieloletniu, ale nie pozwala określić ich geometrii w przekroju i wartości parametrów ośrodka wodno-gruntowego. W celu pozyskania takich dokładniejszych informacji, w 2022 r. w piezometrach zlokalizowanych w przekrojach B-B oraz 2-2 zainstalowano czujniki do pomiarów temperatury oraz ciśnienia profili pionowych. Rejestrowano także termiczne warunki brzegowe na obiekcie, temperaturę zewnętrzną od strony odpowietrznej oraz odwodnej oraz położenie zwierciadła wody górnej oraz dolnej. Następnie, metodą elementów skończonych z wykorzystaniem metody „analizy wstecz” wykonano kalibrację modeli numerycznych termohydraulicznych dla tych dwóch przekrojów. Modelowanie wykonano w przypadku termicznych i hydraulicznych nieustalonych warunków brzegowych. Do poprawnej kalibracji kluczowy był także właściwy dobór parametrów termicznych gruntów. Omówimy wybrane wyniki modelowania przekroju 2-2, w którym zidentyfikowano najbardziej nasilone procesy filtracyjno-erozyjne.

Na rysunku 12 przedstawiono pole temperatury w modelu tego przekroju, jak również nałożone na niego wartości pomie-

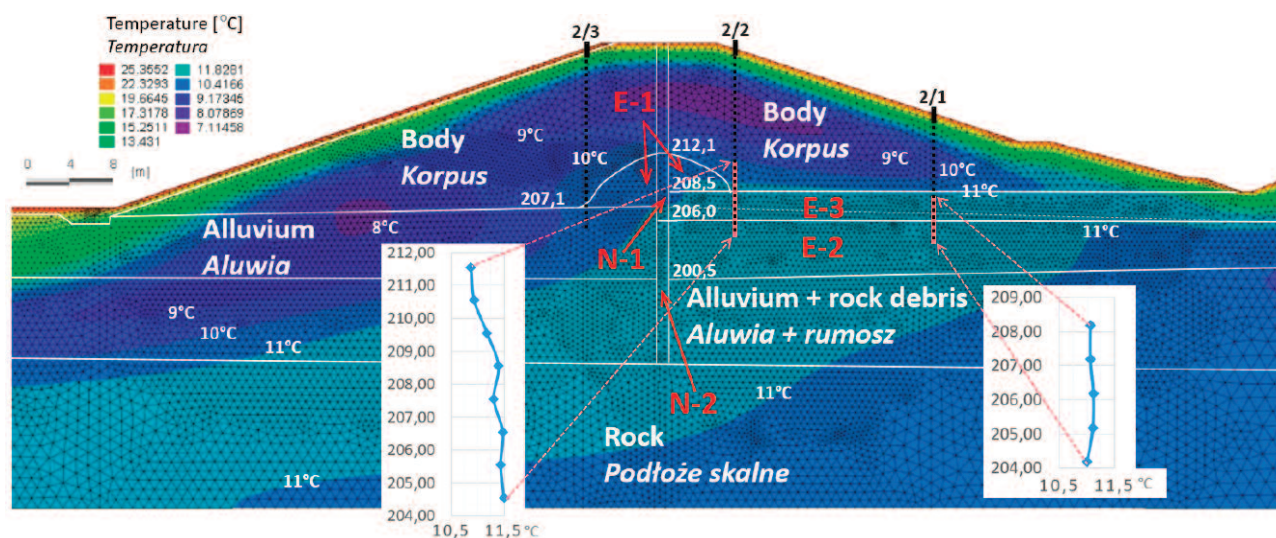


Fig. 12. The temperature field in the modelled cross-section compared to the vertical temperature profile values measured in piezometers at the same moment in time on 2022-07-02

Rys. 12. Pole temperatury w modelowanym przekroju w porównaniu z wartościami pionowych profili temperatury zmierzonych w piezometrach w tej samej chwili czasowej 02.07.2022 r.

ments of temperature recorded in piezometers at the same time point. The temperature distribution exhibits a multi-seasonal character. The cooler zone, characterized by dark blue and violet colours, represents temperatures below 10°C originating from the past winter season. Above and below this cooler zone, warmer regions are observed. The first, upper warmer zone reflects the current summer season at the time of result visualization. This zone gradually penetrates from the embankment slopes into the interior of the structure, primarily through the process of heat conduction. The second warmer zone, which also exhibits higher temperatures, has entered the subsoil through the reservoir bed during the previous warm season. This penetration occurred both via conduction and, more significantly, advection, facilitated by water flow in the more permeable upper layer of the subsoil. This zone extends from the lower area on the downstream side through the subsoil across the entire length of the dam to its downstream toe. The measured vertical temperature profiles obtained from piezometers 2/2 and 2/1 align with the modelled temperature distribution, including the transition between the lower zone of higher temperatures and the upper zone of lower temperatures from the winter season. Figure 14 illustrates the calibrated model saturation curve and the actual positions of piezometric water levels at the same time point. The differences between the modelled saturation curve and the measured piezometric levels are as follows: 2 cm at piezometer 2/3, 4 cm at piezometer 2/2, and 16 cm at piezometer 2/1.

The modelling of this complex hydrogeological system (Figure 13) required prolonged and painstaking adjustments to the geometry and parameters of individual zones with varying hydraulic conductivity parameter. The final calibrated system is characterized first by a slight reduction in the hydraulic conductivity ($k = 1 \times 10^{-7}$ m/s) in a section of the diaphragm (zone N-2) compared to the expected value ($k = 1 \times 10^{-8}$ m/s). This reduction is likely due to the diaphragm being constructed under hydraulic load without emptying the reservoir. However, a very important conclusion is that the diaphragm retains its functionality, with no local leakages present.

rzonyj temperatury w piezometrach tej samej chwili czasowej. Charakteryzuje je wielosezonowy rozkład temperatury. Ciemnoniebieskim i fioletowym kolorem odznaczono strefę chłodniejszą o temperaturze 10°C, pochodzącej z minionego sezonu zimowego. Pod nią oraz nad nią znajdują się strefy cieplejsze. Pierwsza z nich, górna strefa temperatury, aktualnego sezonu letniego w momencie wizualizacji wyników, nachodzi wolniej ze skarp obiektu w jego głąb głównie w procesie przewodzenia ciepła. Druga strefa, również wyższej temperatury, wniknęła w podłoże przez dno zbiornika jeszcze w poprzednim ciepłym sezonie, w sposób kondukcyjno-adwekcyjny, zwłaszcza z przepływem wody mającym miejsce w bardziej przepuszczalnej górnej warstwie podłoża. Strefa ta rozciąga się od dolnego obszaru po stronie odwodnej w podłożu przez całą długość zapory, aż do jej stopy odpowietrznej. Wartości pomiarów pionowych profili temperatury wykonywane w piezometrach 2/2 oraz 2/1 pokrywają się z rozkładem modelowym temperatury i układem przejścia niżej położonej strefy wyższych temperatur w strefę wyżej położoną niższych temperatur sezonu zimowego. Rysunek 14 prezentuje położenie skalibrowanej modelowej krzywej nasycenia oraz rzeczywistych wartości położenia zwierciadeł piezometrycznych w tej samej chwili czasowej. Różnica położenia krzywej nasycenia w modelu w stosunku do wysokości zwierciadła wody wynosi: 2 cm w piezometrze 2/3, 4 cm w piezometrze 2/2 oraz 16 cm w piezometrze 2/1.

Odwzorowanie modelowe dość skomplikowanego układu wartości współczynnika filtracji (rysunek 13) wymagało długotrwałego i żmudnego modyfikowania geometrii i parametrów poszczególnych stref o różnym współczynniku filtracji. Ostateczny, skalibrowany układ charakteryzuje niewielkie zmniejszenie wartości współczynnika filtracji ($k = 1 \times 10^{-7}$ m/s) na fragmencie przesłony (strefa N-2) w stosunku do wartości oczekiwanych ($k = 1 \times 10^{-8}$ m/s). Wynika to prawdopodobnie z wykonania przesłony pod obciążeniem hydraulicznym bez opróżnienia zbiornika. Bardzo istotnym wnioskiem jest jednak to, że przesłona zachowuje swoją funkcjonalność i nie ma

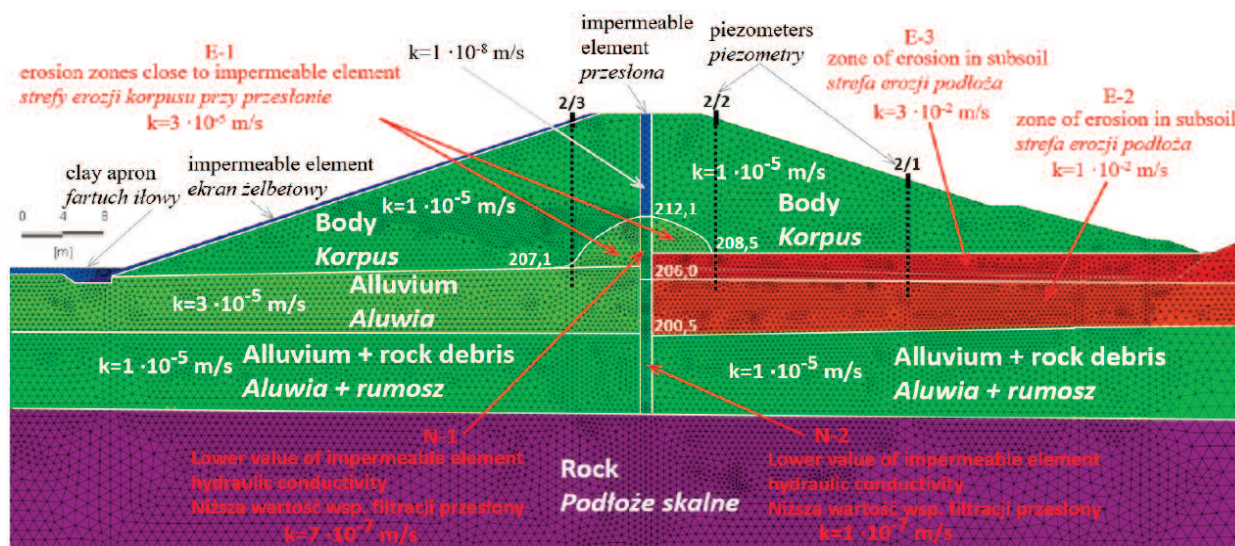


Fig. 13. Distribution of the final, calibrated set of hydraulic conductivity values in the modelled cross-section with interpretation of processes
 Rys. 13. Rozkład skalibrowanego układu wartości współczynnika filtracji w modelowanym przekroju z interpretacją procesów

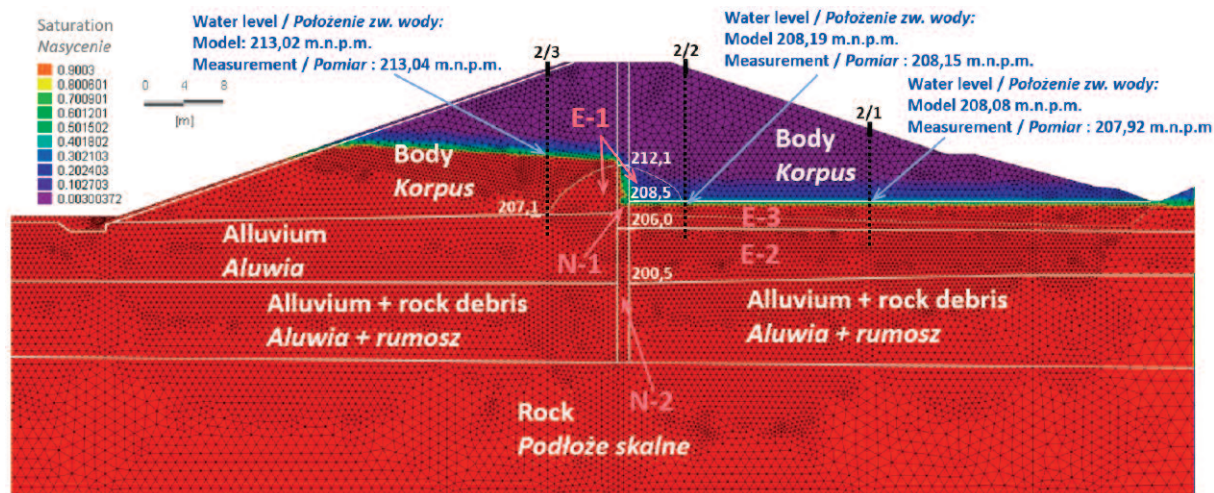


Fig. 14. The position of the modelled saturation line compared to the position of the water levels in piezometers at the same time on July 2, 2022
 Rys. 14. Położenie zamodelowanej krzywej nasycenia w porównaniu z położeniem zwierciadła wody w piezometrach w tej samej chwili czasowej 20.07.2022 r.

Secondly, an extensive zone with significantly reduced hydraulic conductivity was identified on the downstream side of the dam, encompassing the upper layer of the alluvial substrate and part of the embankment at the interface with the substrate. This zone is likely the result of prolonged, multi-year suffosion processes, which led to the leaching of finer particles from this area, consistent with findings from the statistical analysis of piezometric data. The accuracy of the analysis using thermo-hydraulic numerical modelling is emphasized by the fact that this zone divides into two sub-zones: the lower E-2 and the upper E-3, both exhibiting slightly higher hydraulic conductivity parameter values. Without distinguishing the hydraulic conductivity values in these zones, or without significantly different thicknesses of these zones, it would have been impossible to calibrate the thermal field in the model with actual temperature measurements. Identifying this zone was also crucial for drawing conclusions about the state of the structure. Thirdly, a local zone (E-1) with a slight decrease in the hydraulic conductivity values was detected in the lower, central part of the dam body around the impermeable element, likely caused by minor erosional processes. Again, determining this zone was vital for the proper calibration of the thermal field in the model. The arrangement and pattern of zones E-1, E-2, and E-3 indicate their likely erosional origin, related to the leaching and movement of soil particles towards the lower water level. In practice, it is highly unlikely that such detailed reproduction, or even detection of these zones, could be achieved solely through the use of a hydraulic model. However, the inclusion of the thermal field as an additional indicator allowed for a clear, step-by-step method to reliably and accurately identify their location, geometry, and hydraulic conductivity values.

The presented study demonstrates, for the first time in the literature, the significant potential of thermo-hydraulic numerical modelling in providing very detailed insights into the distribution of hydraulic conductivity values across cross-sections of earth damming structure. This includes the precise identification of potential leakage zones, areas of intensified

w niej lokalnej nieszczelności. Ponadto, zidentyfikowano rozległą strefę istotnie zmniejszonych wartości współczynnika filtracji po stronie odpowietrznej zapory, obejmującą górną warstwę podłoża aluwialnego i fragmentu korpusu na styku z podłożem. Prawdopodobnie jest ona efektem długotrwałych, wieloletnich procesów sufozyjnych, skutkujących wypłukaniem drobnych cząstek z tej strefy, co jest spójne z wnioskami z analizy statystycznej danych piezometrycznych. Dokładność analizy z zastosowaniem numerycznego modelowania termohydraulicznego podkreśla fakt, że strefa ta dzieli się na dwie podstrefy – dolną E-2 i górną E-3 o nieco większym współczynniku filtracji. Bez rozróżnienia współczynnika filtracji w tych strefach, lub przy istotnie innej ich grubości, nie było możliwości kalibracji pola termicznego z modelu z pomiarami rzeczywistej temperatury. Identyfikacja tej strefy miała bardzo istotny wpływ na wnioski o stanie obiektu. Wykryto również lokalną strefę (E-1) niewielkiego zmniejszenia wartości współczynnika filtracji w dolnej, centralnej części korpusu zapory wokół elementu szczelnego spowodowaną prawdopodobnie procesami erozyjnymi o niedużym nasileniu. W tym przypadku jej wyznaczenie było istotne do prawidłowej kalibracji pola termicznego w modelu. Układ i przebieg stref E-1, E-2, E-3 świadczy o prawdopodobnie erozyjnej ich genezie, związanej z wypłukiwaniem i przemieszczaniem ziaren gruntu w kierunku wody dolnej. W praktyce, nieprawdopodobne jest tak dokładne odwzorowanie, a nawet tylko wykrycie tych wymienionych stref wyłącznie z zastosowaniem modelu hydraulicznego. Natomiast zastosowanie, jako dodatkowego wskaźnika pola termicznego, pozwoliło w jednoznaczny sposób, metodą kolejnych kroków, na wiarygodną i dokładną identyfikację ich lokalizacji, geometrii i wartości współczynnika filtracji.

Prezentowany przykład po raz pierwszy pokazuje, jak duży potencjał ma termohydrauliczne modelowanie numeryczne w aspekcie uzyskania szczegółowej informacji o rozkładzie wartości współczynnika filtracji w przekroju ziemnej budowli piętrzącej, w tym identyfikacji potencjalnych

seepage, and, most importantly, potential erosion zones. Beyond the described case, the thermo-hydraulic numerical modelling method has also been applied in recent years to analyze some cross-sections of the Kozłowa Góra earth dam in Poland and one of the largest earth dams in Ukraine. In both applications, model calibration allowed for the precise identification of zones with intensified seepage, leakages, and erosion. Notably, in each case, the absence of an additional indicator as a thermal field made proper hydrogeological model calibration impossible.

Conclusions

One of the highly significant and currently recommended methods for studying and monitoring seepage processes, including leakage, and internal erosion processes in earth-fill hydraulic structures and their foundations, is the **thermal method**. This approach often involves the use of linear temperature sensors installed within the body and/or foundation along the structure. Among these, thermal fiber-optic cable sensors are particularly suited for installation during the construction of new hydraulic structures or during the reconstruction of sealing elements and drainage systems in existing facilities. As presented in this study, the first reference system for fiber-optic leakage monitoring in Poland, was installed in a permanent hydraulic structure in 2021 during the construction of the dry reservoir dam in Roztoki. However, installing such sensors on existing structures using trenching or cable plowing methods poses numerous limitations and may even present risks to the structural integrity and safety of the facility. Therefore, in the last decade, the passive-active **Multi Points Thermal Sensor – MPointS** technology has been developed in Poland, enabling the widespread application of the linear monitoring method on existing earth damming structures. The primary advantage of this method is the creation of a quasi-continuous monitoring line through the rapid yet safe installation of a series of individual sensors from the surface, positioned at small, regular intervals from one another. This article details the first reference systems in Poland, installed in 2014 on the Kozłowa Góra dam and in 2017 in the Vistula River levee in Wawrzeńczyce near Kraków. They were based on MPointS sensors and, in each case, they enabled precise localization and monitoring of zones with intensified seepage, including leakage areas, while also allowing on-site determination of seepage velocity.

Another significant advancement discussed in this article, related to the advancement of methods for analyzing seepage and erosion processes in Poland, is the development of cross-sectional thermo-hydraulic modelling of earth damming structures. Using the Chańcza dam as a case study, the application of this modelling approach demonstrated that incorporating temperature fields as an additional indicator allows for precise and reliable calibration of numerical hydrogeological models. This is particularly evident in the accurate determination of the distribution of values of hydraulic conductivity parameter within the cross-section of the structure and its foundation. Additionally, the approach

allows for the identification of zones with intensified seepage, potential leakage, and erosion zones, and, most importantly, potential erosion zones. Beyond the described case, the thermo-hydraulic numerical modelling method has also been applied in recent years to analyze some cross-sections of the Kozłowa Góra earth dam in Poland and one of the largest earth dams in Ukraine. In both applications, model calibration allowed for the precise identification of zones with intensified seepage, leakages, and erosion. Notably, in each case, the absence of an additional indicator as a thermal field made proper hydrogeological model calibration impossible.

Wnioski

Jedną z bardzo istotnych i rekomendowanych obecnie metod badania i monitoringu procesów filtracyjnych, w tym detekcji przecieków oraz procesów erozji wewnętrznej w ziemnych budowlach piętrzących i ich podłożu, jest **metoda termiczna**, w tym z zastosowaniem liniowych czujników temperatury, instalowanych w korpusie i/lub podłożu wzdłuż budowli. Jeden z ich rodzajów, **termiczne, kablowe czujniki światłowodowe** są dedykowane przede wszystkim do instalacji w trakcie budowy nowych budowli piętrzących lub podczas przebudowy elementów szczelnych lub systemów drenaży istniejących budowli. Pierwszy w Polsce referencyjny system takiego monitoringu światłowodowego przecieków, opisany w artykule, zainstalowano w 2021 r. podczas budowy zapory suchego zbiornika w Roztokach. Instalacja tych czujników za pomocą rowu lub pługu kablowego na istniejących budowlach ma wiele ograniczeń, a może stanowić nawet zagrożenie dla bezpieczeństwa budowli. Z tego powodu, w ostatniej dekadzie rozwinięto w Polsce **technologię MPointS**, umożliwiającą upowszechnienie stosowania metody liniowego monitoringu na istniejących ziemnych budowlach piętrzących. Zasadniczą zaletą tej metody jest uzyskanie linii quasi-ciągłego monitoringu przez szybką, ale bezpieczną dla budowli instalację serii pojedynczych czujników z powierzchni w korpusie lub podłożu w niewielkiej odległości od siebie. W artykule opisano pierwsze, referencyjne systemy w Polsce, zainstalowane w 2014 r. w zaporze Kozłowa Góra oraz w 2017 r. w wale przeciwpowodziowym rzeki Wisły w m. Wawrzeńczyce k. Krakowa. Każdorazowo pozwoliły one na dokładne wyznaczenie lokalizacji i monitoring stref nasilonej filtracji, w tym przecieków, ale szczególnie na określenie in situ wartości prędkości filtracji.

Kolejnym, przedstawionym w artykule osiągnięciem dotyczącym rozwoju metod analizy procesów filtracyjnych i erozyjnych w Polsce jest rozwinięcie metody przekrojowego modelowania numerycznego termohydraulicznego ziemnych budowli piętrzących. Na przykładzie aplikacji tej metody na zaporze Chańcza wykazano, że wykorzystanie pola temperatury, jako dodatkowego wskaźnika, umożliwia dokładną i wiarygodną kalibrację modelu hydrogeologicznego, a przede wszystkim rozkładu wartości współczynnika filtracji w przekroju obiektu i jego podłożu. W tym zakresie po-

facilitates the identification of leakage zones, areas of decreased impermeability, and potential erosion-prone regions.

The described methods represent a new standard in the early detection and accurate identification of seepage and erosion processes in earth damming structures and their foundations. These techniques provide valuable tools for a comprehensive and modern methodology for analyzing and mitigating such processes.

Received: 26.06.2024

Revised: 22.11. 2024

Published: 20.12.2024

zwala też na dokładną lokalizację nieszczelności lub stref obniżenia szczelności elementów szczelnych oraz lokalizację potencjalnych stref erozji.

Opisane metody wprowadzają nową jakość we wczesnej detekcji i dokładności rozpoznania procesów filtracyjno-erozyjnych w ziemnych budowlach piętrzących i ich podłożu. Stanowią istotne narzędzia w kompleksowej i nowoczesnej metodyce badań tych procesów.

Artykuł wpłynął do redakcji: 26.06.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 22.11. 2024 r.

Opublikowano: 20.12.2024 r.

Literature

- [1] CIRIA. The International Levee Handbook. CIRIA. 2013. 1350 p. https://www.ciria.org/ciria/Resources/Free_publications/I_L_H/ILH_resources.aspx, accessed 2024-06-09.
- [2] Dmitruk Z, Sieński M, Wiatkowski M. Zbiorniki zaporowe – aktualne zagadnienia ich funkcjonowania i oceny stanu bezpieczeństwa. Gospodarka Wodna. 2022; <https://doi.org/10.15199/22.2022.10.1>.
- [3] Foster M, Fell R, Spannagle M. The statistics of embankment dam failures and accidents. Can. Geotech. J. 2000; <https://doi.org/10.1139/cgj-37-5-1000>.
- [4] ICOLD. Internal Erosion Of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundation. Bulletin no. 164. Paris: CRC Press. 2017. 288 p.
- [5] Kledyński Z, Lejman W, Mioduszewski W. Analiza uszkodzeń wałów przeciwpowodziowych w okresie letnich wzbrań 2010 roku. Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie. 2012; 2: 64-69.
- [6] Duminda P, Smakhtin V, Williams S, North T, Curry A. Ageing Water Storage Infrastructure: An Emerging Global Risk. United Nations University – Institute for Water Environment and Health. Report. 2021. 29 p. <https://www.preventionweb.net/publication/ageing-water-storage-infrastructure-emerging-global-risk>, accessed 2024-06-09.
- [7] ASCE. Report card for America's infrastructure. 2021. 168 p. https://infrastructurereportcard.org/wp-content/uploads/2020/12/National_IRC_2021-report.pdf, accessed 2024-06-09.
- [8] ASDSO. The cost of rehabilitating our nation's dams – A methodology, Estimate & proposed funding mechanisms. 2022. 49 p. <https://damsafety-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/files/Cost%20of%20Rehab%20Report-2022%20FINAL.pdf>, accessed 2024-06-09.
- [9] www.capital.fr/entreprises-marches/exclusif-capital-fr-edf-la-liste-region-par-region-des-200-barrages-a-risques-189650, accessed 2024-04-16.
- [10] Radzicki K, Sieński M, Gołębiowski T, Zelaya-Wziątek D, Dmitruk Z, Stan budowli piętrzących w Polsce – zagadnienia problemowe i wyzwania – część I. Inżynier Budownictwa. 2024; 6: 66-72. <https://e-wydanie.inzynierbudownictwa.pl/publikacja/893/e-wydanie/4184,3-czerwiec-2024/4457,czerwiec-2024/136452,stan-budowli-pietrzacych-w-polsce-cz.-i.-zagadnienia-problemowe-i-wyzwania.html>.
- [11] Radzicki K, Tourment R, Zaleski J. Omówienie wybranych, nowoczesnych metod modernizacji wałów przeciwpowodziowych. Gospodarka Wodna. 2023; <https://doi.org/10.15199/22.2023.9.11>.
- [12] Radzicki K, Tourment R, Zaleski J. The application of certain modern methods for upgrading levees. In: Bezpieczeństwo obiektów hydrotechnicznych, Warszawa: IMGW–PIB. 2023. pp. 135 – 148; <https://www.imgw.pl/badania-nauka/publikacje-ksiazkowe/bezpieczenstwo-obiektow-hydrotechnicznych>.
- [13] OFWAT. Cost Adjustment Claim: Reservoir dam maintenance. Report PR24. 2023. 83 p. https://www.ofwat.gov.uk/wp-content/uploads/2023/06/UUW_CAC_001-Reservoirs-Dam-Maintenance-Cost-Adjustment-Claim_Redacted.pdf, accessed 2024-06-09.
- [14] USACE. Summary of Costs Associated with Levee-related Activities. 2023. 12 p. https://mmc.sec.usace.army.mil/NLSP_website/NLSP_LeveeCostBrochure_FINAL_NOV2023.pdf, accessed 2024-06-09.
- [15] Baron SA. Cost Trends and Estimates for Dam Rehabilitation in the Commonwealth of Virginia, PhD thesis, Blacksburg, Virginia. 2020. 46 p. <https://vtechworks.lib.vt.edu/server/api/core/bitstreams/84f17a22-3f1f-459a-9a9d-ddd4eb5b394b/content>, accessed 2024-06-09.
- [16] Fry JJ. How to prevent embankments from internal erosion failure? In Proc.: Int. Symposium on Dams for a changing world. Kyoto: Int. Commission on Large Dams. 2012. pp. 102-108.
- [17] Radzicki K, Gołębiowski T, Cwiklik M, Stoliński M. A new levee control system based on geotechnical and geophysical surveys including active thermal sensing: a case study from Poland. Engineering Geology. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106316>.
- [18] Radzicki K. The concept of quasi-3d monitoring of seepage and erosion processes and deformations in dams and dikes, considering in particular linear measurement sensors. Technical Transactions. Environment Engineering. 2015; 2-Ś: 129-139.
- [19] Radzicki K, Stoliński M. Pilotażowe w Polsce zastosowanie metody termicznej analizy procesów filtracyjnych w tym monitoringu przecieków na zaporze ziemnej Kozłowa Góra. Bezpieczeństwo obiektów hydrotechnicznych, Warszawa: IMGW–PIB. 2023. pp. 121-133. <https://www.imgw.pl/badania-nauka/publikacje-ksiazkowe/bezpieczenstwo-obiektow-hydrotechnicznych>.
- [20] Bear J. Dynamics of fluids in porous media. New York: Elsevier. 1972.
- [21] Johansson S. Localization and quantification of water leakage in ageing embankment dams by regular temperature measurements. In Proc.: 17th Congress on Large Dams. Vienna: Int. Commission on Large Dams. 1991. pp. 999-1005.
- [22] Guidoux C. Developpement et validation d'un systeme de detection et de localisation par fibres optiques de zones de fuite dans les digues enterre. PhD report, Joseph Fourier University. 2007. 207 p.
- [23] Radzicki K and Bonelli S. A possibility to identify piping erosion in earth hydraulic works using thermal monitoring. In Proc.: 8th European Club Dam Symposium. Innsbruck: Int. Commission on Large Dams. 2006. pp. 22-25.
- [24] Radzicki K and S Bonelli Monitoring of the suffosion process development using thermal analysis performed with IRFTA model. In Proc.: 6th Int. Conference on Scour and Erosion. Paris: Société Hydrotechniques de France. 2012. pp. 593–600.
- [25] Aufleger M, Conrad M, Perzlmaier S, Porras P. Improving a FO tool for monitoring leakage. HRW.2005; 9:18-23.
- [26] Fry JJ. Détection de fuite sur les digues par acquisition de profils de température en forage ou le long d'une fibre optique. Sciences Eaux & Territoires. 2005; special no: 111-118. <https://revue-set.fr/article/view/6130>, accessed 2024-06-09.
- [27] Kappelmeyer O. The Use of Near Surface Temperature Measurements for Discovering Anomalies due to Causes at Depths. Geophysical Prospecting. 1957; <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1957.tb01431.x>.
- [28] Dornstädter J. Detection of internal erosion in embankment dams. In Proc.: 19th Int. Committee on Large Dams Congress. Paris: Int. Commission on Large Dams. 1997. pp. 87-10.
- [29] Aufleger M, Sthrobl T, Dornstädter J. Fibre Optical Temperature Measurement in Dam Monitoring – Four Years of Experience. In Proc.: 20th

Int. Committee on Large Dams Congress. Paris: Int. Commission on Large Dams. 2000. pp. 4-22.

- [30] Johansson S, Farhadiroushan M, Parker T. Application of fibre-optics systems in embankment dams for temperature, strain and pressure measurements – Some comparisons and experiences. 20th Int. Committee on Large Dams Congress. Paris: Int. Commission on Large Dams. 2000. pp. 1125–1147.
- [31] Artieres O, Bonelli S, Fabre JP, Guidoux C, Radzicki K, Royet P, Vedrenne C. Active and Passive Defences against Internal Erosion in Assessment of the Risk Internal Erosion of Water Retaining Structures: Dams, Dykes and Levees. In: Intermediate Report of the European Working Group of ICOLD. Oberaudorf: Meissner Druck GmbH. 2007. pp. 235-244.
- [32] Radzicki K and Bonelli S. Physical and parametric monitoring of leakages in earth dams using analysis of fibre optic distributed temperature measurements with IRFTA model. In Proc.: 24th Congress on Large Dams. Kyoto: Int. Commission on Large Dams. 2012. pp. 93-112.
- [33] Bersan S, Koelewijn AR, Simonini P. Application of distributed temperature sensors in piping-prone dikes. In Proc.: 9th Symposium on Field Measurements in Geomechanics. Perth: PM Dight. 2015; https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1508_32_Bersan, accessed 2024-06-09.
- [34] Beck YL, Courivaud J-R, Fry JJ, Guidoux C, Cassard A, Miceli J. Retour d'expérience de la surveillance d'ouvrages hydrauliques en terre de long linéaire par capteur à fibre optique. In Proc.: 25th Int. Committee on Large Dams Congress. Stavanger: Int. Commission on Large Dams. 2015. pp. 161-183.
- [35] Dornstädter J and Heinemann, B. Temperature as tracer for in-situ detection of internal erosion. In Proc.: 6th Int. Conference on Scour and Erosion. Paris: Société Hydrotechniques de France. 2012. pp. 1369-1375.
- [36] Johansson S, Sjödal P, Mondanos M, Stork A. Distributed fibre optic sensing in Swedish dams and tailing storage facilities, *Hydropower & Dams*, 2023; 2: 45-49. <https://www.hydropower-dams.com/articles/distributed-fibre-optic-sensing-in-swedish-dams-and-tailing-storage-facilities/>, accessed 2024-06-09.
- [37] Schetano L. A Review of Distributed Fibre Optic Sensors for Geo-Hydrological Applications. *Appl. Sci.* 2017; <https://doi.org/10.3390/app7090896>.
- [38] Barrias A, Casas J, Villalba S. Review of Civil Engineering Applications with Distributed Optical Fiber Sensors, In Proc.: European Workshop on Structural Health Monitoring. Bilbao, 2016. p. 10.
- [39] Radzicki K. Innowacyjne, instrumentalne systemy pomiarowe quasi 3D monitoringu procesów filtracyjno-erozyjnych oraz odkształceń w zaporach i wałach. *Materiały ceramiczne*. 2015; 1: 81-87.
- [40] Radzicki K, Siudy A, Stoliński M. 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, In Proc.: 25th International Congress on Large Dams. Stavanger: Int. Commission on Large Dams. 2015. pp. 85-101.
- [41] Radzicki K, Stoliński M. Detekcja strefy nasilonego przepływu wody w podłożu holenderskiego wału morskiego metodą termo-aktywną. Monitoring i bezpieczeństwo budowy hydrotechnicznych. Warszawa: IMGW–PIB. 2019. pp. 205-214.
- [42] Tyler SW, Selker JS, Hausner MB, Hatch CE, Torgersen T, Thodal CE, Schladow SG. Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods. *Water Resources Research*, 2009; 45. 11 pp.
- [43] Dietrich CR, Newsam GN. Sufficient conditions for identifying transmissivity in a confined aquifer. *Inverse Probl.* 1990; 6:21–28.
- [44] Jing H, Duan SC, Yang SQ. 2007. Application of seepage back analysis to engineering design. *Chin. J. Rock Mech. Eng.* 26, pp. 4503–4509.
- [45] Zhou CB, Liu W, Feng Chen Y, Hu R, Wei K. Inverse modeling of leakage through a rockfill dam foundation during its construction stage using transient flow model. *Eng. Geol.* 2015; <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.01.008>.
- [46] Johansson S. Upgrading seepage monitoring using temperature – experience from Seitevare dam. Q. 95 – R. 18. In Proc.: 24th Large Dams Congress, Kyoto: Int. Commission on Large Dams. 2012. pp.261-280.
- [47] Konrad JM, Alicescu V, Shen M. Thermal analysis of an earth dam considering seepage related heat transport, In Proc. 53rd Canadian Geotechnical Conference. Montréal. 2000. 7 p.