

Zastosowanie testowych czujników pomiaru temperatury w quasi-przestrzennych (3D) sieciach pomiarowych w hydrotechnicznych budowlach ziemnych – wyniki wstępne

Aleksandra Borecka¹, Klaudia Sekuła¹, Daniel Kessler², Patryk Majerski²



A. Borecka



K. Sekuła



D. Kessler



P. Majerski

Application of testing temperature sensors for quasi-dimensional (3D) measurement systems used in measuring hydrotechnical earthworks – preliminary results. Prz. Geol., 65: 748–755.

Abstract. This paper presents the test point temperature sensors, designed for the ISMOP project. The point temperature sensors allow for full realization of spatial measurement by using a distributed measurement based on MESH type topology. The designed solutions described the selection and design of all elements of the sensors. It is also described how to install them at the existing

levee. Applied construction and method of selection of the location of the point temperature sensors allow monitoring of levees in the quasi-spatial (3D) system, what is an alternative to termomonitoring performed by means of optical fibers.

Keywords: testing temperature sensor, levee (dike), leakage, thermal monitoring, ISMOP, monitoring quasi-continuous (spatial)

Kwestie prawne ochrony przed powodzią reguluje ustawa Prawo Wodne (Ustawa, 2001), zgodnie z którą obwałowania rzek są w naszym kraju jedną z form ochrony terenów przed nimi. Ich zadaniem jest znaczne ograniczenie zasięgu zalania terenów nadrzecznych przez wody wezbranej rzeki, a nie jak błędnie myślą niektórzy jego wyeliminowanie. Podobnie jak inne budowle hydrotechniczne wały przeciwpowodziowe muszą spełniać szereg wymagań (Rozporządzenie, 2007). Między innymi powinny być tak zaprojektowane, żeby bezpiecznie przepuszczały przepływ wezbraniowy z zachowaniem odpowiedniego wzniesienia korony ponad poziom wód występujących przy tych przepływach (Rozporządzenie, 2007, art. 63). Szacuje się, że budowa wałów przeciwpowodziowych zmniejszyła powierzchnię zalewanych obszarów o ok. 25% (Mioduszewski, 2012; Riegert i in., 2012). Obwałowania w górnej części zlewni zmniejszają bowiem jej naturalną retencję powodziową, przyczyniając się do zwiększenia fali powodziowej w dolnej części zlewni. Z tego powodu, możliwość wykonania obwałowania musi być koordynowana w ramach całej zlewni, zgodnie z planami ochrony przeciwpowodziowej (Borecka, 2016; Filaber i in., 2016).

Dotychczas obowiązująca praktyka oceny stanu technicznego obwałowań i ich przydatności do użytkowania bazuje na cyklicznych, corocznych inspekcjach wałów. W głównej mierze jest ona oparta na ocenie geometrii wału, odnajdywaniu śladów potencjalnych miejsc wycieków, spękań, uszkodzeń skarp i urządzeń towarzyszących, bytności zwierząt, braku roślinności lub jej nadmiernej obecności (drzewa, krzaki). Może być również uzupełniona o dokładniejszą kontrolę (wiercenia, sondowania, obliczenia stateczności, badania laboratoryjne i coraz częściej badania geofizyczne), przeprowadzaną co najmniej raz na

5 lat, najczęściej na wskazanych odcinkach wałów (Borys, Mosiej, 2008; Borys, 2013; Sieński, Śliwiński, 2015; Borecka, 2016). Okresowe kontrole są często niewystarczające do wiarygodnej oceny stanu obwałowania przeciwpowodziowego, co skutkuje rosnącymi stratami po powodziach, spowodowanych uszkodzeniami lub przerwaniem obwałowań. Dla prawidłowej oceny stanu i zmian, jakim podlegają budowle piętrzące, optymalne jest uzyskiwanie danych w sposób regularny i w formacie pozwalającym na porównanie wyników oraz analizę trendów w wymiarze długofalowym. W przypadku przeglądów okresowych i wizji lokalnych jest to niemożliwe. Mechanizmy ewentualnych awarii wałów nie są znane z wyprzedzeniem, a zatem trudno jest je przewidzieć. Oględziny czy klasyczne badania geotechniczne i geofizyczne nie gwarantują wykrycia uszkodzeń wystarczająco wcześnie. Pomocne w rozwiązaniu powyższych problemów może być zastosowanie na szeroką skalę zautomatyzowanego systemu monitorowania – LHM (DHM) (*levee/dike health monitoring* – tzw. monitoring wałów przeciwpowodziowych). Jego podstawą są urządzenia zamontowane wewnątrz lub w bezpośrednim sąsiedztwie obwałowań. LHM (DHM) monitoruje stan techniczny konstrukcji wału oraz podłoża za pomocą złożonego systemu kontrolno-pomiarowego (czujniki, człony wykonawcze, układy transmisji danych i jednostki obliczeniowe) w celu detekcji, lokalizacji, identyfikacji i przewidywania rozwoju deformacji i uszkodzeń. Polega on na ciągłym pomiarze różnych wielkości fizycznych (np. przemieszczeń, temperatury, ciśnienia). Umożliwiają one określenie innych, pośrednich cech (odkształceń, naprężeń, ugięć, pełzania, promieni krzywizny, rozkładów pola przemieszczeń, odkształceń i naprężeń), które następnie odnosi się do wartości krytycznych (Borecka, 2016). Możliwość porównywania danych z kolejnych okresów badań pozwa-

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; aborecka@agh.edu.pl, klaudia.sekula@agh.edu.pl.

² Neosentio Sp. z o.o., ul Podole 60, 30-394 Kraków; dk@neosentio.pl, pm@neosentio.pl.



Ryc. 1. Lokalizacja eksperymentalnego wału przeciwpowodziowego w Czernichowie (<http://tvn24.pl>)

Fig. 1. Localization of experimental levee (dike) in Czernichów (<http://tvn24.pl>)

ła na stałą kontrolę stanu zabezpieczeń przeciwpowodziowych.

Z uwagi na specyfikę konstrukcji wałów przeciwpowodziowych, a w szczególności warunki działania elementów sieci pomiarowej i komunikacyjnej, opracowane testowe konstrukcje czujników pomiarowych muszą spełniać określone cele i aspekty. Według nich jest oceniana efektywność oraz przydatność konkretnych konstrukcji i proponowanych rozwiązań (Stanisz i in., 2014; Borecka i in., 2015; 2016b; Sekuła i in., 2017). Oceny tej powinno się dokonywać na podstawie kryteriów takich jak: dokładność i pewność pomiaru, minimalizacja kosztów budowy urządzeń (ekonomiczność rozwiązań), ich implementacji w wałach przeciwpowodziowych, wytrzymałości i stabilności, niskiej energochłonności z uwagi na autonomiczny charakter pracy (efektywność energetyczna) czy metody instalacji (Myszka i in., 2016), przy jednoczesnym uwzględnieniu optymalizacji ilości zastosowanych instrumentów pomiarowych i ich quasi-przestrzennego rozmieszczenia.

Celem pracy jest przedstawienie możliwości zastosowania testowych czujników pomiaru temperatury w quasi-przestrzennych sieciach pomiarowych. Mimo że sieci nie są w pełni dostosowane do pełnej rejestracji zmian temperatury, to umożliwiają wstępną ocenę sieci pomiarowej. Opisane czujniki zostały skonstruowane na potrzeby wykonania doświadczalnej sieci kontrolno-pomiarowej zlokalizowanej w eksperymentalnym wale przeciwpowodziowym, zbudowanym w Czernichowie w ramach projektu ISMOP (PBS1/B9/18/2013) (ryc. 1).

WSTĘPNE ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE DLA QUASI-PRZESTRZENNICH SIĘCI POMIAROWYCH

Europejskie doświadczenia wskazują na wykorzystanie wielu nowych rozwiązań technicznych w zakresie monitoringu obwałowań przeciwpowodziowych. Można je podzielić na dwie grupy. Te o podejściu lokalnym, dotyczące stanu wałów (Instytut IRSTEA, IJkdijk, DredgDikes, ISMOP), oraz o podejściu globalnym, które obejmują zagadnienia gospodarki wodnej i bezpieczeństwa przeciwpowodziowego (Imprints, WeSenseIt, UrbanFlood) (Stanisz i in., 2014, 2015).

Pomiar temperatury gruntu w wałach przeciwpowodziowych pozwala ustalić lokalizację i wielkość zwiększonej, anomalnej filtracji wody w porach. Obecnie w tym celu są stosowane najbardziej rozwinięte technologie: czujniki rezystancyjne RTD (najczęściej rezystancyjne czujniki platynowe PT), termistory (oparte na zmianie rezystancji w funkcji), czujniki scalone z wyjściem cyfrowym lub analogowym oraz światłowodowe kable sensoryczne.

Z uwagi na specyfikę tych budowli hydrotechnicznych, a zwłaszcza ich długość, istotne jest zapewnienie pomiaru o charakterze ciągłym lub prawie ciągłym w kontekście przestrzennym i czasowym w wielu punktach obwałowania, celem poznania zachowań wału i próbie oceny jego wytrzymałości na dodatkowe obciążenie w trakcie przejścia fali powodziowej.

Punktowe pomiary temperatury (1D) schodzą obecnie na dalszy plan w świetle zdobywającej coraz większą popularność techniki światłowodowej. Dotyczy to szczególnie ziemnych budowli piętrzących. Ciągły pomiar rozkładu temperatury wzdłuż zabudowanego kabla sensorycznego pozwala na detekcję przecieków oraz erozji wewnętrznej, przy zachowaniu wysokiej dokładności w określeniu miejsca, czasu oraz temperatury.

Biorąc jednak pod uwagę możliwości rozmieszczenia i zabudowy w korpusie wału, technika światłowodowa nie pozwala na realizację w pełni przestrzennego pomiaru, na co możemy sobie pozwolić w systemie punktowym, rozmieszczając odpowiednio punkty pomiarowe wzdłuż profili lub po długości wału, uzyskując tym samym efekt liniowy (2D), a przy właściwym ich zagęszczeniu nawet quasi-przestrzenny (3D). W doborze odpowiedniej techniki pomiarowej nieodzowny jest również aspekt ekonomiczny i rozwiązania technologiczne, które wynikają ze sposobu zabudowy instrumentów pomiarowych (Vries i in., 2010; Radzicki, 2011; Borecka i in., 2015, 2016a). W artykule przedstawiono rozwiązanie stanowiące alternatywę dla szeroko stosowanej w budowach hydrotechnicznych, techniki światłowodowej. Zaprezentowana quasi-przestrzenna sieć pomiarowa umożliwi pomiar rozkładu temperatury w całym korpusie wału przeciwpowodziowego.

Zaproponowana w projekcie ISMOP konstrukcja wielopunktowych czujników temperatury, poza oczywistą odpornością na panujące w gruncie warunki środowiskowe, umożliwi mało inwazyjną ich instalację w już istniejących wałach przeciwpowodziowych. Konieczność ich rozkopania lub przewiercania w dłuższej perspektywie mogłaby prowadzić do osłabienia konstrukcji obwałowania. Wielopunktowe czujniki temperatury umożliwiają również realizację pomiarów w profilach liniowych (pionowych lub skośnych), a przy odpowiednim ich rozmieszczeniu również w wymiarze quasi-przestrzennym.

DOBÓR ODPOWIEDNIH ROZWIĄZAŃ TECHNOLOGICZNYCH DLA TESTOWYCH CZUJNIKÓW POMIARU TEMPERATURY

W projekcie ISMOP została uwzględniona zarówno sieć referencyjna, jak i eksperymentalna (Sekuła i in., 2017). Referencyjna sieć kontrolno-pomiarowa została oparta o konkretne, stosowane wcześniej rozwiązania technologiczne, które stanowiły punkt odniesienia do wypracowania zaleceń w zakresie nowych, innowacyjnych konstrukcji urządzeń pomiarowych. Te zalecenia zostały wykorzystane w eksperymentalnej sieci kontrolno-pomiarowej, pozwalającej na uzyskanie wyników na podstawie alternatywnych rozwiązań technologicznych oraz rozproszonego pomiaru wg topologii typu MESH, czyli kratowej – quasi-przestrzenny (3D). Zbudowana eksperymentalna sieć kontrolno-pomiarowa pozwoliła również na opracowanie rozwiązań możliwych do zastosowania w istniejących

Tab. 1. Przyjęte minimalne parametry techniczne dla czujników temperatury
Table 1. Acceptable minimum of specifications for temperature sensors

Parametr <i>Parameter</i>	Parametry techniczne <i>Specifications</i>	Opis <i>Description</i>
Zakres pomiarowy <i>Measurement range</i>	od -30°C do $+50^{\circ}\text{C}$ from -30°C to $+50^{\circ}\text{C}$	wymagana minimalna i maksymalna temperatura pracy i mierzonych parametrów <i>required minimal and maximal operating temperature and sensed temperature</i>
Zakres dla wymaganego poziomu dokładności pomiaru <i>The range for the required level of accuracy</i>	od -5°C do $+25^{\circ}\text{C}$ from -5°C to $+25^{\circ}\text{C}$	wymagany przedział pracy czujnika, dla którego pomiary mieszczą się w granicach dopuszczalnej dokładności (całościowej) <i>required sensor's operating temperature range with acceptable level of accuracy</i>
Rozdzielczość <i>Resolution</i>	$\leq 0,1^{\circ}\text{C}$	maksymalna rozdzielczość pomiaru <i>maximal measurement resolution</i>
Dokładność pomiaru (łączny błąd pomiaru) <i>Accuracy (total measurement error)</i>	typ / type $0,3^{\circ}\text{C}$ max /max $0,5^{\circ}\text{C}$	typowa i maksymalna wielkość błędów w wartościach bezwzględnych obejmująca: dokładność, nieliniowość, powtarzalność, dryft <i>typical and maximal amount of error in absolute terms, including: accuracy, linearity, repeatability, drift</i>
Energochłonność (pomiar / czuwanie) <i>Energy-consuming (measurement / standby)</i>	1,5 mA / $1\mu\text{A}$	dopuszczalne zapotrzebowanie energetyczne <i>maximal power consumption</i>
Napięcie <i>Voltage</i>	3,0–5,5 V max	maksymalne stosowane napięcie <i>maximal voltage</i>
Protokół <i>Protocol</i>	RS, I2C, SPI, 1-wire, SMBus, inne RS, I2C, SPI, 1-wire, SMBus, <i>other</i>	interfejs komunikacji czujnika z węzłem pomiarowym <i>communication protocols</i>
Sygnal wyjściowy <i>Output</i>	cyfrowy <i>digital</i>	tryb pracy <i>operating mode</i>
Ochrona przeciwprzepięciowa <i>Surge protection</i>	poziom 2: napięcie probiercze 4kV level 2: test voltage (proof voltage) 4kV	zastosowanie mechanizmów ochrony zgodnych PN-EN 61000 <i>surge resiliency level in accordance to PN-EN 61000 Norm</i>
Drgania i przyspieszenie <i>Vibration and acceleration</i>	2 kHz, 20g	odporność na udarową instalację w korpusie wału <i>resistance to acceleration during installation in an embankment with the use of hammers drills</i>
Rozmiar i forma <i>Size and shape</i>	do montażu PCB, W \times S max: 5mm \times 5mm <i>possibility of installation on PCB,</i> H \times W max: 5mm \times 5mm	możliwość zamontowania wzdłuż przewodu komunikacyjno-zasilającego <i>dimensions allowing sensor installation along a communication cable without protruding elements</i>

obwałowaniach przeciwpowodziowych. Ze względu na konieczność zapewnienia pomiarów o odpowiednio wysokiej rozdzielczości, przy maksymalnie kilkumetrowej odległości pomiędzy czujnikami, oraz zachowaniu minimalnego wydatku energetycznego w zaprojektowanej eksperymentalnej sieci kontrolno-pomiarowej skupiono się na punktowych czujnikach temperatury, rozmieszczonych w sposób pozwalający na stworzenie quasi-przestrzennej sieci pomiarowej.

W celu doboru najlepszych rozwiązań technologicznych ustalono minimalne parametry techniczne dla czujników temperatury oraz uzupełniających komponentów konstrukcyjnych (tab. 1).

Szczegółowy przegląd dostępnych rozwiązań technologicznych pozwolił na wybór trzech producentów (tab. 2).

W trakcie dalszych analiz, biorąc pod uwagę dostępność elementów pomiarowych, koszt nabycia oraz koszty związane z aplikacją w czujnikach pomiarowych, zdecydowano się zastosować czujniki firmy Dallas Semiconductor model DS18B20, które cechują się dostateczną czułością oraz dokładnością pomiarów. Celem uzyskania lepszych parametrów pracy sieci, w stosunku do każdego czujnika przeprowadzono procedurę określenia indywidualnych parametrów początkowych. Zbudowano specjalistyczne stanowisko do kalibracji oraz opracowano procedurę na bazie zaprojektowanego przez firmę Neo-Sentio oprogramowania „DS18B20 Identifier” (ryc. 2).

Podczas pomiarów zostały odczytane oraz zapisane w bazie danych numery identyfikacyjne czujników DS18B20 oraz ich wartości początkowe, zdefiniowane jako odchylenie bezwzględne wskazań każdego z nich w stosunku do wskazań skalibrowanego czujnika referencyjnego (Ecom Instruments, Typ: Ex-Pt720) (<http://ecom-ex.com>). Pomiar był dokonywany w temperaturze 10–12°C, czyli środka przedziału typowych temperatur pracy czujników w wale (Bukowska-Belniak i in., 2016). Dla każdej serii czujników trwał on minimum 30 minut, pomimo że typowy czas osiągnięcia przez czujnik DS18B20 temperatury referencyjnej 11°C z temperatury pokojowej 19–21°C nie przekraczał 5 minut.

Odrzucono czujniki działające wadliwie (np. odczyt temperatury wskazywał wartość 850°C lub brak danych) oraz te, dla których różnica wartości temperatury odczytu względem temperatury odniesienia wyniosła więcej niż $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$. Dodatkowo wartość indywidualnego odchylenia dla każdego czujnika została zapisana do jego metadanych w systemie analitycznym.

DOBÓR LOKALIZACJI CZUJNIKÓW TEMPERATURY W WALE EKSPERYMENTALNYM

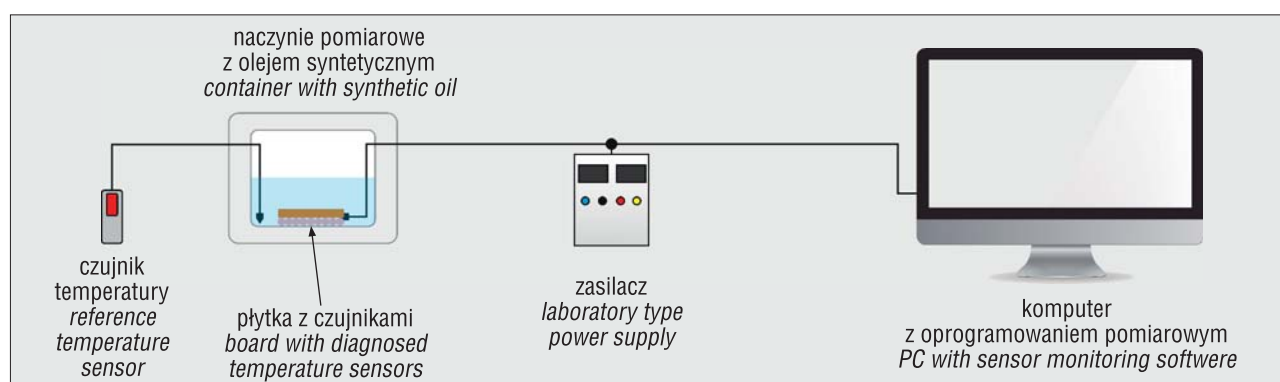
Sieć czujników powinna dostarczać dane pomiarowe z precyzyjnie zlokalizowanych obszarów wału. Ich szcze-

Tab. 2. Wybrane parametry modeli spełniających przyjęte wartości brzegowe dla poszczególnych kryteriów
Table 2. Selected parameters of models that meet accepted boundary values for each criterion

Producent Producer	Model Model	Rozdzielczość Resolution	Zakres pomiarowy °C Measurement range °C	Napięcie Voltage	Energochłonność (pomiar/czuwanie) Energy-consuming (measured /standby)	Sygnal wyjściowy (protokół) Output (protocol)	Dokładność pomiaru ¹ Accuracy Typ / max	Orientacyjna cena Approximate price	Dostępność ² Accessibility
Analog Devices	ADT7420	16 bit – 0,0078°C	-20°C ÷ +105°C	2,7–3,6V	210µA/ 2 µA	cyfrowe digital (SPI/I2C)	± 0,05°C/ ± 0,40°C	€4,60	niska low
Dallas Semiconductor	DS18B20	12 bit – 0,0625°C	-10°C ÷ +85°C	3,0–5,5V	1,5mA/ 1 µA	cyfrowe digital (1wire)	± 0,5°C/ ± 0,5°C	€1,00	wysoka high
Measurements Specialists	TSYS02D	0,01°C	-50°C ÷ +50°C	1,5–3,6V	420µA/ 1,4 µA	cyfrowe digital (I2C)	± 0,2°C/ ± 0,2°C	€2,00	brak lack of inf

¹ W zakresie będącym przedmiotem analiz, tj. od -5°C do 30°C / In the range of expected measured values: from -5°C to +30°C

² Na etapie projektowania. Obecnie dostępność w większości przypadków uległa znacznej poprawie, co może mieć wpływ na dalsze wnioski projektowe / During the project phase. Now a days accessibility is much better in most cases, what may lead to further research



Ryc. 2. Schemat instalacji identyfikacji indywidualnych wartości offsetu czujników temperatury DS18B20
Fig. 2. Installation diagram identify the individual value of the offset temperature sensors DS18B20

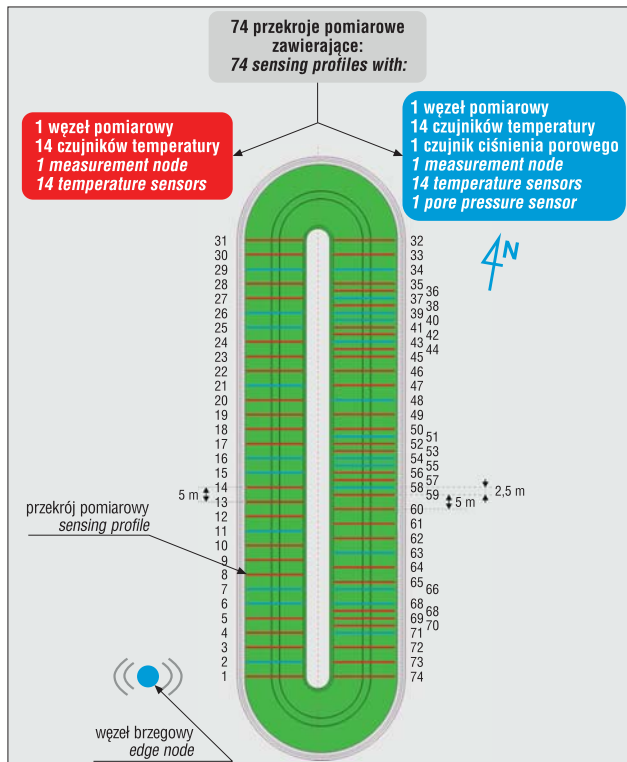
gółową lokalizację w wale eksperymentalnym opracowano przy uwzględnieniu kształtu krzywej filtracji, określonej na podstawie modelowań numerycznych (Krawiec i in., 2016) doboru gęstości pomiarów, z uwagi na zastosowaną siatkę obliczeniową. Optymalizacji rozmieszczenia dokonano z uwzględnieniem technicznych i ekonomicznych aspektów montażu czujników w wale oraz konieczności ominięcia okablowania i czujników referencyjnej sieci pomiarowej.

Czujniki w wale umieszczono w 74 przekrojach poprzecznych. W każdym z nich zamontowano 14 czujników temperatury na określonej głębokości w korpusie wału, w 6 profilach pomiarowych o precyzyjnie określonej lokalizacji. W profilach umieszczono od 1 do 4 czujników, przy czym odległości pomiędzy nimi w pionie, gdzie znajdował się więcej niż jeden czujnik wystandaryzowano na 1 m. Dodatkowo na powierzchni skarpy umieszczono 12 czujników temperatury w celu monitorowania zmian temperatury powierzchni gruntu. Umożliwiają one analizę

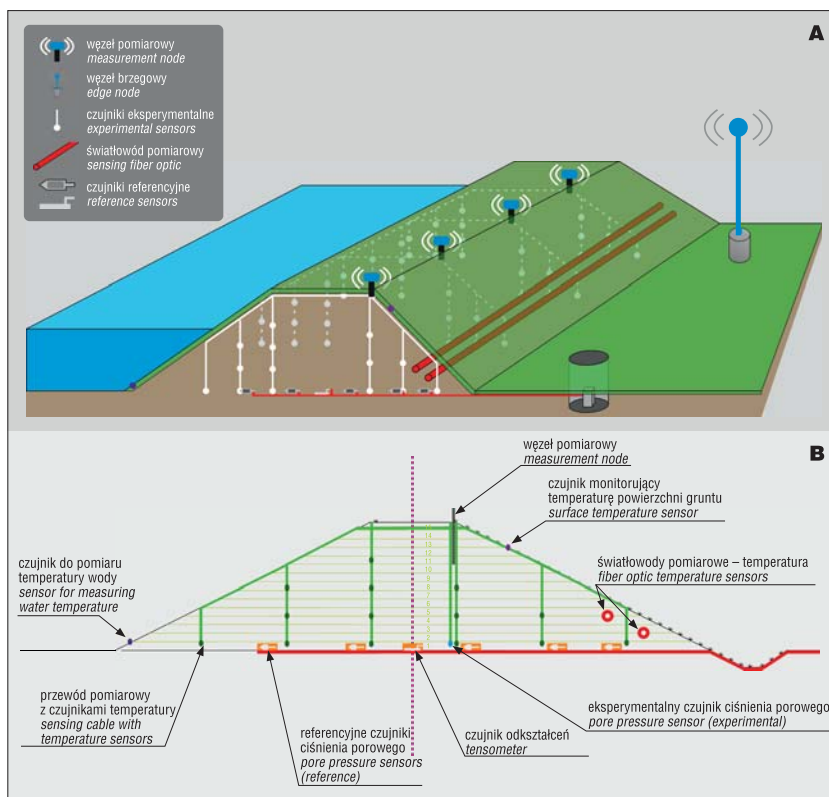
powierzchniowego tła termicznego wynikającą z nasłonecznienia, wpływu czynników atmosferycznych, a także różnorodności materiału użytego do budowy wału. Dwa dodatkowe czujniki umieszczono również na powierzchni skarpy odwodnej przy dnie zbiornika, celem pomiaru temperatury wody przesiąkającej przez korpus wału eksperymentalnego.

Odległości pomiędzy przekrojami ustalono na 2,5 m oraz 5,0 m i wynikały one z dotychczasowych obserwacji zasięgu obserwowanych zmian temperatury gruntu w trakcie wystąpienia przebiecia hydraulicznego za pomocą referencyjnej sieci pomiarowej (Vries i in., 2010). Odległości pomiędzy profilami są różne w zależności od fragmentu wału eksperymentalnego, w jakim zostały zlokalizowane. Większe zagęszczenie przekrojów pomiarowych zrealizowano w segmentach o wyższych parametrach filtracyjnych.

Schematyczne rozłożenie przekrojów i pionów pomiarowych oraz umiejscowienie czujników wewnątrz wału przedstawiono na rycinie 3 i 4.



Ryc. 3. Lokalizacja przekrojów pomiarowych na eksperymentalnym wale przeciwpowodziowym (Sekula i in., 2017, zmienione)
Fig. 3. The location of the cross section measurement on experimental levee (dike) (Sekula et al., 2017, modified)



Ryc. 4. Ogólny schemat lokalizacji czujników eksperymentalnej oraz referencyjnej sieci pomiarowej umieszczonej w eksperymentalnym wale przeciwpowodziowym (A); lokalizacja czujników w przekroju (B) (Sekula i in., 2017, zmienione)
Fig. 4. General diagram location of sensors of experimental and reference measurement & control networks placed in the experimental levee (dike) (A); location of sensors on the cross-section of experimental levee (dike) (B) (Sekula et al., 2017, modified)

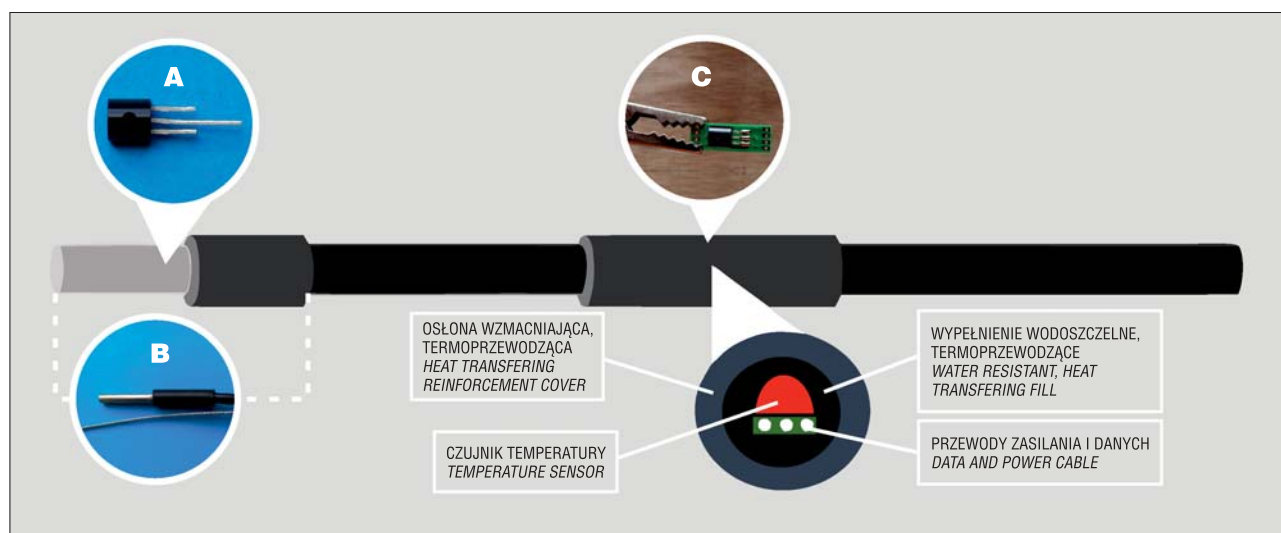
KONSTRUKCJA LINIOWYCH CZUJNIKÓW TEMPERATURY

Podczas prac projektowych przyjęto rozmieszczenie czujników temperatury wewnątrz przewodów pomiarowych w regularnych odległościach (co 1 m), o konstrukcji modularnej, pozwalającej na późniejszą „masową” produkcję odcinków prefabrykowanych do szybkiego montażu w trakcie prac terenowych. Zastosowanie takiego rozwiązania konstrukcyjnego wymagało właściwego doboru okablowania zasilająco-komunikacyjnego, opracowania sposobu instalacji czujników końcowych i pośrednich, w tym doboru materiałów uszczelniających i zabezpieczających oraz doboru złączy (pośrednich i końcowych).

Z uwagi na sposób instalacji czujników w wale – zastosowano „bezpśredni” montaż kabla pomiarowego metodą udarową lub po uprzednim wykonaniu otworu sondą udarową (max średnica otworu 40 mm) – wybrano okablowanie wyposażone dodatkowo w linkę nośną XzTKMXpwn 2 × 2 × 0,5 (<http://bitner.com.pl/>). Oprócz funkcji zasilania i komunikacji spełnia ono również wymóg elementu konstrukcyjnego i nośnego, przenosząc obciążenia i zmniejszając ryzyko przerwania ciągłości przewodu. Okablowanie to jest powszechnie stosowane w transmisji telefonicznej i służy zarówno do podwieszania, jak i do układania bezpośrednio w gruncie. Cechuje go duża odporność mechaniczna oraz wypełnienie żelem hydrofobowym. Stalowa linka nośna trwale złączona z izolacją kabla została również wykorzystana jako element montażowy. Likwidacja otworów wykonanych na potrzeby instalacji czujników odbyła się z użyciem obsypki gruntowo-bentonitowej (wzdłuż kabla) oraz dodatkowo, przypowierzchniowo umieszczanego, brykietu bentonitowego.

Jedną z przesłanek wyboru czujników cyfrowych była możliwość umieszczenia ich na jednej magistrali komunikacyjnej szeregowej i tym samym ograniczenie liczby niezbędnych do wykorzystania przewodów (ryc. 5). Wyzwaniem konstrukcyjnym był montaż zarówno czujnika końcowego, jak i czujników pośrednich w taki sposób, żeby przewód spełniał kryteria szczelności i odporności mechanicznej także w warunkach przewidzianej metody instalacji – tj. wbijania.

Wypełnienie wodoszczelne (ryc. 5) musiało posiadać ściśle określone właściwości: hydrofobowe, wypełniające, odporność chemiczną na agresywne substancje znajdujące się w gruncie i odporność mechaniczną po zaschnięciu przy zachowaniu elastyczności. Materiał stanowiący to wypełnienie musiał być również izolatorem elektrycznym oraz słabym izolatorem termicznym, żeby nie wpływać na opóźnienie reakcji czujnika na zmiany temperatury otoczenia. Ponadto z uwagi na stosowane dodatkowe osłony mechaniczne z izolacji termokurczliwej z klejem – materiał ten powinien zachować swoje właściwości także po obróbce termicznej (krótkotrwałym podgrzaniu do 150°C).



Ryc. 5. A – czujnik DS18B20 przygotowany do montażu jako czujnik krańcowy; B – widok końcowy zamontowanego czujnika krańcowego w osłonie stalowej z uszczelnieniem; widoczna odsłonięta linka stalowa, na której wykonywana jest pętla do mocowania do grotu stosowanego jako prowadnica przy wciskaniu kabla do gruntu; C – czujnik DS18B20 zamontowany na dedykowanej płytce PCB jako czujnik pośredni

Fig. 5. A – DS18B20 sensor chip prepared for installation as a tip sensor; B – final view of a tip sensor secured by a stainless steel case with sealing; the visible exposed steel wire is used to attach the sensing cable to a cone guiding it when driven into the ground; C – DS18B20 sensor chip installed on a dedicated PCB for implementation within a sensing cable



Ryc. 6. Montaż testowych czujników temperatury
Fig. 6. Installation of testing temperature sensor

Kable pomiarowe wykonane w kilku wariantach uszczelnień chemicznych i mechanicznych podlegały testom odpornościowym na: zginanie, wibracje, długotrwałe przebywanie w wodzie i solance, w tym na podwyższone ciśnienie wody, oraz na przemarzanie. W trakcie i po testach podlegały one weryfikacji w zakresie poprawności wskazań czujników końcowych i pośrednich. W wyniku badań opracowano technologię produkcji partii eksperymentalnych (testowych) kabli spełniających wymagania maksymalnego odchylenia $0,2^{\circ}\text{C}$ wskazań czujników w stosunku do wskazań referencyjnych, przy uwzględnieniu odchyleń indywidualnych, zainstalowanych czujników.

Na potrzeby instalacji sieci pomiarowej w wale w Czernichowie wykonano partię kabli pomiarowych o długości 1,0–5,5 m. Dodatkowo wykonano niezbędną ilość wystandaryzowanych kabli łącznikowych pozwalających na łączenie poszczególnych kabli pomiarowych (profilu) w ramach przekroju. Część z kabli łącznikowych została wyposażona w czujniki temperatury na potrzeby wspomnianych pomiarów temperatury powierzchni.

Istotnym elementem rozwiązania jest zastosowanie technologii połączeń opartych o rozdzielacze i złącza stan-

dardu M8, które pozwalają na szybkie łączenie fragmentów sieci pomiarowej w segmenty (w ramach przekroju). Dodatkowo wystandaryzowane złącza umożliwiają sprawną realizację diagnostyki poszczególnych kabli i podsegmentów z wykorzystaniem opracowanego oprogramowania na urządzeniach przenośnych.

INSTALACJA CZUJNIKÓW

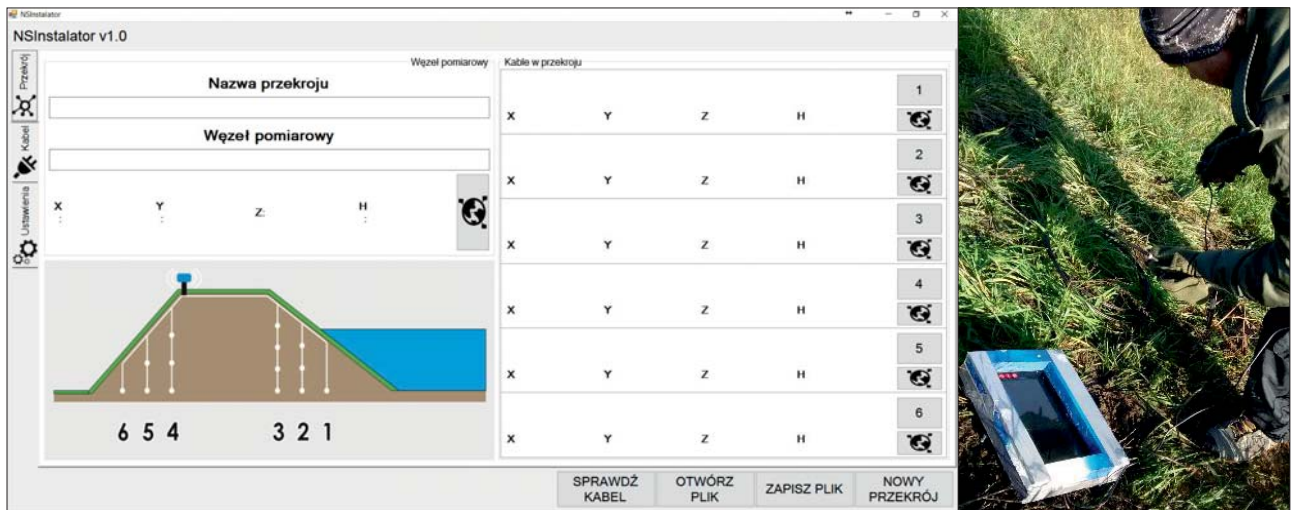
Instalację testowych czujników temperatury przeprowadzono na podstawie procedur wypracowanych w wyniku wcześniejszych testów terenowych, stosowano następujące oraz założenia:

- rezygnację ze stosowania ciężkiego sprzętu budowlanego i wiertniczego na wale;
- minimalizację ingerencji w konstrukcję istniejącego obwałowania;
- minimalizację nakładu pracy (czasu) i realizację prac równoległych w kilku niezależnych zespołach;
- możliwość wykorzystania prefabrykatów,
- dopuszczalne wykorzystanie narzędzi testowych sprawdzających poprawność działania sieci pomiarowej w trakcie i bezpośrednio po instalacji.

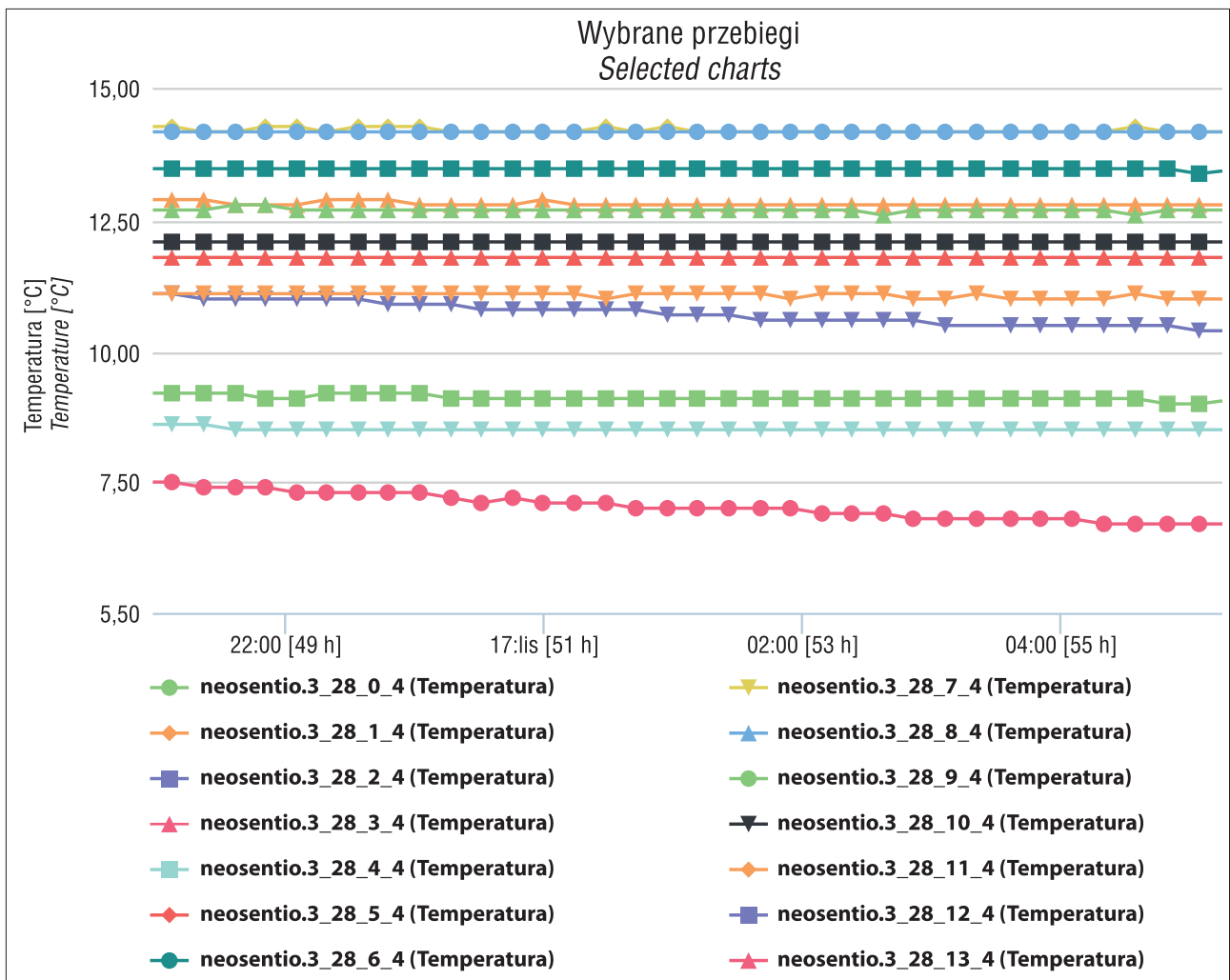
W zależności od głębokości instalacji (płytkie oraz głębokie) zastosowano dwie metody wprowadzania czujników (kabli pomiarowych):

- instalacje płytkie (do 2 m b.) – kabel pomiarowy został wprowadzany w grunt metoda udarową z wykorzystaniem żerdzi modułowych i grota traconego. Kształt grota umożliwił zamocowanie linki nośnej kabla pomiarowego oraz osłaniał czujnik końcowy przed uszkodzeniami mechanicznymi w trakcie instalacji (ryc. 6);
- instalacje głębsze (>2 m b.) – wykonywane metodą udarową bezpośrednio z powierzchni terenu jak w metodzie pierwszej lub z dna wcześniej przygotowanego otworu (o max średnicy 40 mm).

Instalacja czujników była poprzedzona wyznaczeniem punktów geodezyjnych zgodnie z projektem instalacyj-



Ryc. 7. Zrzut ekranu aplikacji identyfikacyjnej i testującej pracę czujników temperatury w terenie
 Fig. 7. Screenshot of identification application and testing work of temperature sensors in the field



Ryc. 8. Przykładowy wykres wygenerowany przez automatyczny system rejestrujący dane z jednego profilu pomiarowego
 Fig. 8. Example plot generated by the automatic system recording data from one sensing profile

nym. Oznakowanie kabli tagami RFID oraz opracowanym przez NeoSentio oprogramowaniem identyfikacyjne umożliwiło systematyczne przypisywanie współrzędnych każdemu testowemu czujnikowi temperatury (współrzędne XY otworu wg wskazań tabeli punktów geodezyjnych, rzędna Z – czuj-

ników wg głębokości instalacji i standardowej ich odległości na kablu pomiarowym; ryc. 7).

Odczyty z testowej sieci kontrolno-pomiarowej są rejestrowane przez automatyczny system zbierający dane. Przykład wygenerowanego w ten sposób wykresu dla

odczytów z przykładowego przekroju pomiarowego przedstawiono na rycinie 8.

PODSUMOWANIE

Wczesna detekcja i precyzyjne wyznaczenie miejsca przecieku oraz dynamiki rozwoju procesu destrukcyjnego są kluczowe dla minimalizacji ryzyka awarii lub jej zakresu, przez podjęcie wczesnych i optymalnych decyzji skutkujących przeprowadzeniem skutecznych działań zapobiegawczych lub remontowych wałów przeciwpowodziowych przy jednoczesnej minimalizacji ich kosztów. Rozwiązania takie dają w dużej mierze termomonitoring wykorzystywany do wykrywania przecieków, przebić i rozpoznawania na wczesnym etapie miejsc rozwoju procesów filtracyjno-erozyjnych. Przedstawione w artykule rozwiązanie stanowi alternatywę dla coraz częściej stosowanej techniki światłowodowej, umożliwiając nie tylko liniowy (2D), ale co najistotniejsze quasi-przestrzenny (3D) pomiar rozkładu temperatury w czasie w korpusie wału, a w dalszej perspektywie możliwość wykorzystania również w otoczeniu wałów. Możliwość porównywania danych z kolejnych okresów badań pozwala na stałą kontrolę stanu zabezpieczeń przeciwpowodziowych. Zaproponowana konstrukcja jest odporna na panujące w gruncie warunki środowiskowe oraz, co bardzo ważne, umożliwia mało inwazyjną instalację w już istniejących wałach przeciwpowodziowych.

Sprawne zarządzanie oraz wykorzystanie innowacyjnych rozwiązań w zakresie monitorowania ziemnych budowli hydrotechnicznych wpływa na efektywność działań organów władzy i administracji na wszystkich jej szczeblach, a także na kompetencje innych podmiotów życia społecznego i gospodarczego odpowiedzialnych za zarządzanie kryzysowe w trakcie powodzi.

Praca została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu PBS1/B9/18/2013 (umowa nr 19.19.140.86430). Autorzy pragną podziękować recenzentom – prof. P. Popielskiemu oraz dr. A. Gruchotowi – za cenne uwagi i korekty.

LITERATURA

BORECKA A. 2016 – Monitoring wałów przeciwpowodziowych w systemie bezpieczeństwa powodziowego. *Geoinż.*, 57: 60–64.
BORECKA A., KORZEC K., PTASZEK M., STANISZ J., KUREK M., ORTYL Ł., KURAS P., KOCIERZ R., OWERKO T. 2016a – Raport końcowy z prac wykonanych w ramach podzadania 2.5. Montaż sieci pomiarowej na wale eksperymentalnym, testy transmisji, niezawodności. Raport techniczny. AGH.
BORECKA A., KURAS P., STANISZ J., ORTYL Ł., KOCIERZ R., OWERKO T. 2015 – Raport z prac wykonanych w ramach podzadania

2.4. Dobór rozmieszczenia, typów sond i czujników w wale eksperymentalnym i badanym wale istniejącym. Raport techniczny, AGH.
BORECKA A., STANISZ J., KORZEC K., LEŚNIAK A. 2016b – Smart levee in Poland. [W:] 3rd European conference on Flood risk management. Lyon: 258.
BORYS M., MOSIEJ K. 2008 – Oceny Stanu Technicznego Obwałowań Przeciwpowodziowych. Wyd. Instytutu Melioracji i Użytków Zielonych, Falenty.
BORYS M. 2013 – Wytyczne wykonywania kontroli corocznych stanu technicznego i doraźnych kontroli bezpiecznego użytkowania wałów przeciwpowodziowych. Materiały Instruktażowe 137 (21). Wydawnictwo ITP, Falenty.
BUKOWSKA-BELNIAK B., DWORNIK M., LEŚNIAK A. 2016 – Analysis of annual temperature distribution inside the experimental embankment. [W:] CGW Workshop'16 proceedings. CYFRONET AGH.
FILABER J., KOSOWSKI B., BORECKA A. 2016 – Ochrona przeciwpowodziowa w systemie zarządzania kryzysowego. Wyd. nauk. Texter. <http://bitner.com.pl/> - specyfikacja techniczna kabla telekomunikacyjnego parowego z linką nośną XzTKMXPwn – stan na 25.01.2017
<http://ecom-ex.com/> – specyfikacja techniczna czujnika referencyjnego Ex-Pt720 – stan na 23.01.2017
<http://tvn24.pl/> – stan na 30.09.2015
KRAWIEC K., BUKOWSKA-BELNIAK B., LEŚNIAK A., KESSLER D. 2016 – Analysis of the filtration processes in soil embankment based on numerical modeling and temperature measurement. [W:] FLOODrisk 2016 book of abstract.
MIODUSZEWSKI W. 2012 – Zjawiska ekstremalne w przyrodzie – susze i powodzie. [W:] Współczesne Problemy Kształotowania i Ochrony Środowiska. Monografie, 3: 57–74.
MYSZKA R., KESSLER D., KESSLER A. 2016 – Raport wewnętrzny – oceny wpływu instalacji czujników pomiarowych metoda sond wbijanych na przebieg procesu filtracji wody przez korpus ziemnej budowli wraz z budowa polowego stanowiska badawczego. Raport techniczny, Neosentio Sp. z o.o.
PN-EN 61000 – Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC).
RADZICKI K. 2011 – Zastosowanie termomonitoringu do detekcji przecieków oraz erozji wewnętrznej w ziemnych budowlach piętzących. Monografie IMiGW, s. 88–98.
RIEGERT D., ŚLOSORZ Z., RADWAN K., RAKOWSKA J., PORYCKA B., ABGAROWICZ I., SUCHORAB P. 2012 – Doraźne metody stosowane podczas powodzi ze szczególnym uwzględnieniem rękawów przeciwpowodziowych. Monografie CNBOP-BIP, s. 45.
ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie. Dz.U. z 2007 r. Nr 86 poz. 579.
SEKUŁA K., BORECKA A., KESSLER D., MAJERSKI P. (w druku) – Smart levee in Poland. Full-scale monitoring experimental study of levees by different methods. Computer Science – w druku.
SIEŃSKI E., ŚLIWIŃSKI P. 2015 – Wytyczne wykonania badań, pomiarów, ocen stanu technicznego i stanu bezpieczeństwa budowli piętzących wodę. IMiGW-PIB. Ośrodek Technicznej Kontroli Zapór. Warszawa – Katowice.
STANISZ J., BORECKA A., LEŚNIAK A., ZIELIŃSKI K. 2014 – Wybrane systemy monitorujące obwałowania przeciwpowodziowe. *Prz. Geol.*, 62: 699–703.
STANISZ J., KORZEC K., BORECKA A., 2015 – ISMOP Project (IT System of Levee Monitoring as an example of integrated monitoring of levee. *Geology, Geophysics & Environment*, 41 (1): 137–139.
USTAWA Prawo wodne z dnia 18 lipca 2001 r. Dz.U. z 2001 r. Nr 115 poz. 1229.
VRIES G., KOELEWIJN A.R., HOPMAN B. 2010 – IJkdijk Full Scale Underseepage Erosion (Piping) Test: Evaluation of Innovative Sensor Technology.