

## Analiza możliwości detekcji niekontrolowanego dopływu wód gruntowych do głębokiego wykopu

Adam Kasprzak<sup>1</sup>, Paweł Popielski<sup>1</sup>, Krzysztof Radzicki<sup>2</sup>



A. Kasprzak



P. Popielski



K. Radzicki

**Analysis of the possibility of detection of uncontrolled groundwater inflow into a deep excavation.** Prz. Geol., 65: 459–466.

*A b s t r a c t.* The paper shows a comprehensive analysis of uncontrolled groundwater flow into a deep excavation. The scheme of works performed to construct the diaphragm walls as well as typical causes of leakage are discussed. The possible ways of locating the lining leakage before executing the foundation with use of water-level change measurements and the thermal monitoring method are presented. In the presented calculations, the analysis of the transient heat flow and filtration coupled process was used. Numerical calculations in the case of leakage occurrence in the lining or in the foundation bottom as well as comparative calculations

for the construction without the leakage were conducted. The temperature changes occurring in the diaphragm wall constructed in the ground as a result of hydration process were calculated. Then, the heat spreading as a result of water flow through the leaky parts of the construction was analyzed. The article ends with the conclusions and suggestion of the following work direction.

**Keywords:** deep excavations, leakages in the lining and the ground, thermal monitoring, geotechnics, numerical analysis, transient heat flow and filtration coupled process

## GeSym 2016

Coraz gęstsza zabudowa centrów miast i niewielka powierzchnia dostępnych działek budowlanych powoduje, że w nowo wznoszonych budynkach kondygnacje techniczne oraz parkingi lokalizuje się pod ziemią. Skutkiem tego jest coraz głębsze posadowienie budynków, na ogół wiele metrów poniżej zwierciadła wód gruntowych. Głębokie posadowienia przeważnie są wykonywane w osłonie ścian szczelinowych, które pełnią funkcje obudowy wykopu oraz stanowią elementy konstrukcyjne projektowanego budynku. Zastosowanie szczelnej obudowy wykopu ma ograniczyć zasięg odwodnienia do jego obrysu i zredukować oddziaływanie obiektu na sąsiednie budowle i budynki (Nazarewicz & Popielski, 2010).

Wprowadzenie pionowych przesłon do gruntu może skutkować podpiętrzeniem wód gruntowych i zmianą kierunku ich przepływu. Realizowanie głębokiego wykopu wiąże się często z koniecznością prowadzenia odwodnienia. Na skutek odpompowywania wody powstaje różnica ciśnień po obu stronach ściany, co wywołuje ruch wody do wykopu. Dopływ ten można ograniczyć przez wydłużenie drogi filtracji (za pomocą ścian szczelinowych lub ścianek szczelnych), doprowadzenie ścian i ścianek do stropu warstw słabo przepuszczalnych lub przez wykonanie przesłony poziomej w obrysie ścian szczelinowych poniżej rzędnej spągu płyty fundamentowej.

Rozpoczęcie głębień wykopu w przypadku nieszczelnej obudowy, mającej chronić wykop przed napływem

wody gruntowej, prowadzi do niekontrolowanego dopływu wody do wnętrza wykopu, a następnie do zjawisk sufozyjnych lub erozyjnych w otaczającym gruncie. Skutkiem tego jest powstanie przebicia hydraulicznego oraz zapadnięcia gruntu, co powoduje awarię lub nawet katastrofę budowlaną wznoszonego obiektu czy też obiektów z nim sąsiadujących (Popielski, 2012). Z tego względu bardzo ważne jest opracowanie metod pomiarowych i technik ich interpretacji oraz wykorzystanie modelowni numerycznego w celu skutecznej detekcji nieszczelności obudowy wykopu.

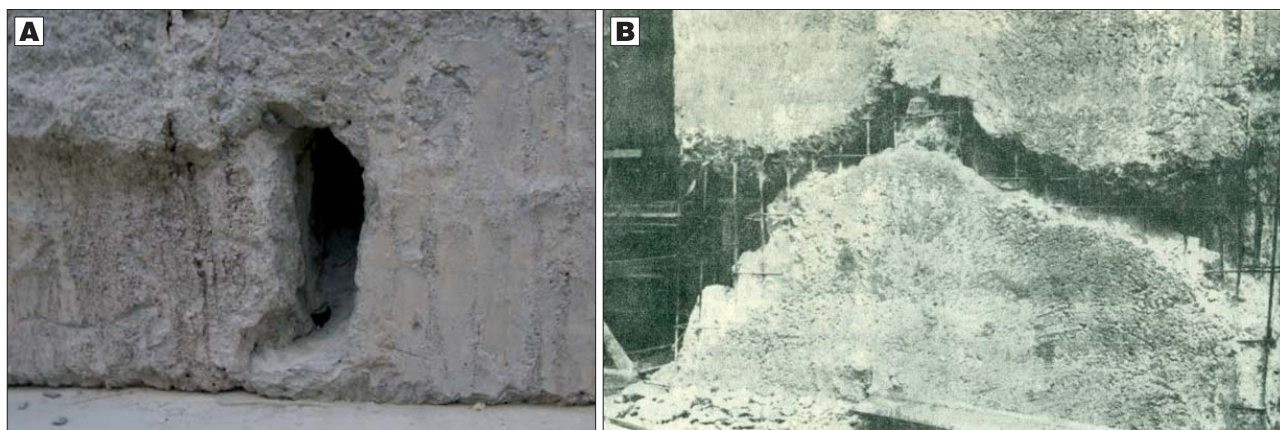
### PRZYCZYNY NIEKONTROLOWANEGO DOPŁYWU WODY DO WYKOPU I METODY JEGO DETEKCJI

Niekontrolowany dopływ wody do wykopu może wystąpić na skutek błędów przy wykonaniu ścian szczelinowych (utrata ciągłości ściany), niezagłębienia ściany w warstwę nieprzepuszczalną lub z powodu niewłaściwego rozpoznania podłoża (cienkie warstwy gruntów sypkich występujące w gruntach nieprzepuszczalnych) (Popielski, 2012).

Ściany szczelinowe są wykonywane przeważnie z betonu klasy C20/25. Ze względu na sposób wykonania można je podzielić na monolityczne (betonowane na miejscu), prefabrykowane (z płyt i pionowych słupów lub samych płyt) i mieszane. Sekcje ścian monolitycznych wykonuje się w sposób naprzemienny, co pozwala na odpowiednie uformowanie połączeń między nimi. Sekcje ścian szczelinowych mają szerokość od ok. 0,6 do 1,6 m i długość do 5 m. Zazwyczaj wymiary pojedynczej sekcji odpowiadają wymiarom urządzenia zastosowanego przy jej głębieńiu. Wykonywanie

<sup>1</sup> Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa; adam.kasprzak@is.pw.edu.pl, pawel.popielski@is.pw.edu.pl.

<sup>2</sup> Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków; krzysztof.radzicki@iigw.pl.



**Ryc. 1.** Przykłady nieszczelności i nieciągłości ścian szczelinowych (A – fot. P. Popielski; B – Grzegorzewicz, 1975)  
**Fig. 1.** Examples of leakages and discontinuities in the diaphragm walls (A – Photo by P. Popielski; B – Grzegorzewicz, 1975)

jednej sekcji ściany obejmuje prace przygotowawcze, głębienie szczeliny pod osłoną cieczy stabilizującej, oczyszczenie dna oraz elementów styków, wstawienie zbrojenia i betonowanie sekcji metodą kontraktor.

Najczęściej do rozpoznania podłoża stosuje się odwierty, stanowiące punktowe rozpoznanie terenu. Takie rozpoznanie powoduje brak znajomości przestrzennego układu stropu warstw nieprzepuszczalnych oraz ich miąższości. Na skutek tego może dojść do przebicia przez ścianę cienkiej warstwy nieprzepuszczalnej lub nieodcięcie wszystkich okien filtracyjnych i opływanie ściany szczelnej przez filtrującą wodę oraz przez nieciągłość warstwy szczelnej znajdującej się w podłożu. Dlatego duże znaczenia ma wykorzystanie metod geofizycznych w badaniu wstępnym przed badaniami geotechnicznymi, pozwalające odpowiednio je zaplanować (Mieszkowski i in., 2014; Pacanowski i in., 2014; Kowalczyk i in., 2015).

Dodatkowo zdarzają się nieszczelności wywołane błędami wykonawczymi ścian szczelinowych. Otwór w ścianie może powstać na skutek obrywu gruntu do wnętrza szczeliny, niewłaściwego uformowania styków sekcji przez dobór nieodpowiednich elementów rozdzielczych, podciągnięcie rury kontraktor ponad zawieszinę bentonitową oraz dostanie się zanieczyszczeń do szczeliny (ryc. 1).

Nieszczelność w obudowie wykopu, naturalnej warstwie szczelnej gruntu lub poziomej przesłonie wykonanej w obrysie wykopu można wykryć, realizując badania w trakcie odwadniania strefy wewnątrz obrysu zaplanowanego wykopu, jeszcze przed jego głębieniem. Ocenę szczelności można wykonać poprzez obserwacje zwierciadła wody za pomocą zainstalowanych w podłożu piezometrów i studni lub pomiaru temperatury (metoda termomonitoringu) przy użyciu sond umożliwiających pomiary temperatury (Dornstädter & Huppert, 1998). Metoda termomonitoringu opiera się na zależnościach pomiędzy przepływem ciepła i wody oraz na charakterystycznych zaburzeniach pola termicznego gruntu generowanego przez procesy filtracyjne (Radzicki, 2009). Metodę termomonitoringu można podzielić na dwa rodzaje. Pierwsza z nich to metoda aktywna, w której wprowadza się w grunt sondy zintegrowane z grzałkami i bada się dystrybucję wygenerowanego ciepła. Drugą jest metoda pasywna, która polega na pomiarze naturalnej temperatury ośrodka gruntowego, umożliwia ona detekcję stref wychłodzenia gruntu ograniczonego ciepłem hydratacji obudowy wykopu przez przeciek. Obie

metody, opis prowadzenia pomiarów oraz aparaturę przedstawiono w publikacjach Radzickiego (Radzicki, 2011; Radzicki i in., 2015).

## OBLICZENIA NUMERYCZNE ODWODNIENIA WYKOPU Z ANALIZĄ SZCZELNOŚCI OBUDOWY

### Obliczenia filtracji

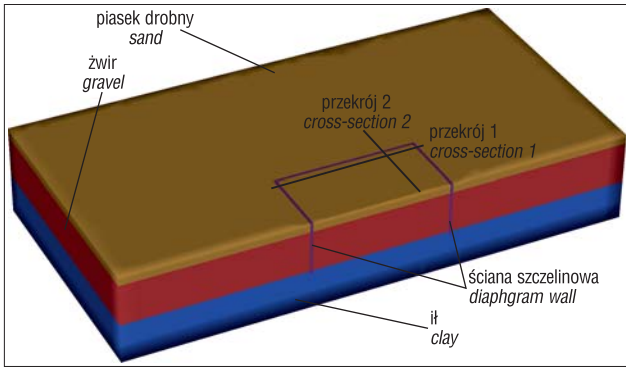
Obliczenia numeryczne, na podstawie których oceniono skuteczność poszczególnych metod detekcji przecieków, przeprowadzono w programie Feflow 7.0. Schemat wykorzystany do obliczeń przedstawiono na rycinie 2. Przenalizowano przestrzenny układ trzech warstw gruntu i obudowy wykopu. W programie wykonano „połówkowy” model wykopu o wymiarach  $39,2 \times 20,4$  m w osłonie ścian szczelinowych zagłębionych w warstwie nieprzepuszczalnej (ryc. 2). Parametry materiałowe wykorzystane w analizie filtracji przedstawiono w tabeli 1.

Do obliczeń przyjęto poziom wody gruntowej 1 m poniżej poziomu terenu oraz poziom wody w obrysie wykopu 10 m poniżej poziomu terenu. Wykonano modelowanie dwóch przypadków nieszczelności w rejonie obrysu wykopu (ryc. 3):

I – nieszczelność ściany szczelinowej stanowiącej obudowę wykopu,

II – nieszczelność podłoża pod ścianą szczelinową.

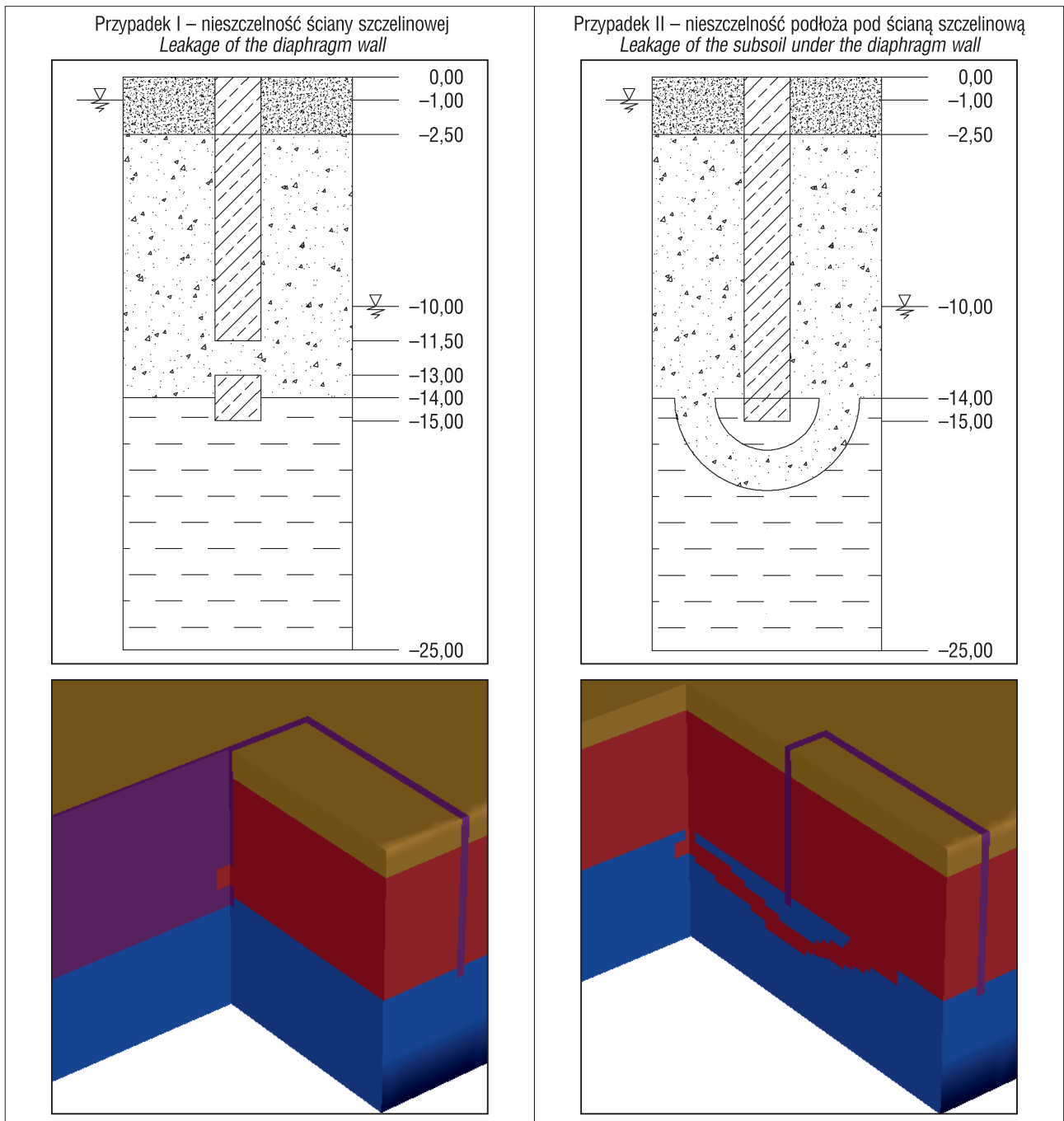
Do obliczeń filtracji zadano warunki brzegowe I rodzaju (potencjał hydrauliczny) na powierzchniach pionowych na zewnętrznych krawędziach modelu (z wyjątkiem płaszczyzny symetrii) oraz warunki brzegowe IV rodzaju (warunek studni) w miejscu lokalizacji studni. Miejsca przyłożenia warunków brzegowych zaprezentowano na rycinie 4. W analizowanym przypadku obliczenia filtracji (odwodnienia wykopu) należy prowadzić w dwóch etapach dla dwóch różnych warunków brzegowych. W pierwszym etapie trzeba wymusić przepływ przez zadanie tylko warunków brzegowych pierwszego rodzaju (należy go przyłożyć na krawędziach modelu i na założonej rzędnej odwodnienia poniżej dna wykopu) i obliczyć wartość wydatku (przepływu) przez model. W drugim etapie warunki brzegowe pierwszego rodzaju w wykopie zamienia się na warunek czwartego rodzaju (studnie), a wcześniej obliczony wydatek dzieli przez liczbę wykonanych mode-



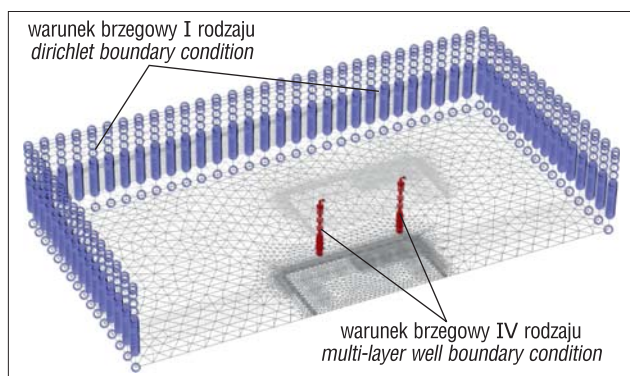
Ryc. 2. Schemat przyjęty do analizy  
Fig. 2. The scheme used in the analysis

Tab. 1. Parametry materiałowe wykorzystane w analizie filtracji  
Table 1. The material parameters used in the filtration analysis

Warstwa / Layer	1	2	3	4
Materiał / Material	piaski / sands	żwiry / gravels	ił / clays	beton / concrete
Kxx	1	10	0,00001	0,000001
Kyy	1	10	0,00001	0,000001
Kzz	1	10	0,00001	0,000001
Porowatość dla strefy nienasyconej / Unsaturated flow porosity	0,37	0,32	0,46	0,00



Ryc. 3. Schematy nieszczelności wykorzystane w analizie numerycznej  
Fig. 3. The leakages schemes used in numerical analysis



Ryc. 4. Warunki brzegowe do analizy filtracji w drugim etapie obliczeń

Fig. 4. The boundary conditions used in filtration analysis in the second stage of the calculations

lowanych studni ustawionych w określonej lokalizacji. Na rycinie 4 przedstawiono schemat warunków brzegowych w drugim etapie obliczeń. W przypadku stosowania od razu warunku wydatku studni można, z powodu zadania za wysokiego wydatku, uzyskać nierealne wartości ciśnień i prędkości przepływów.

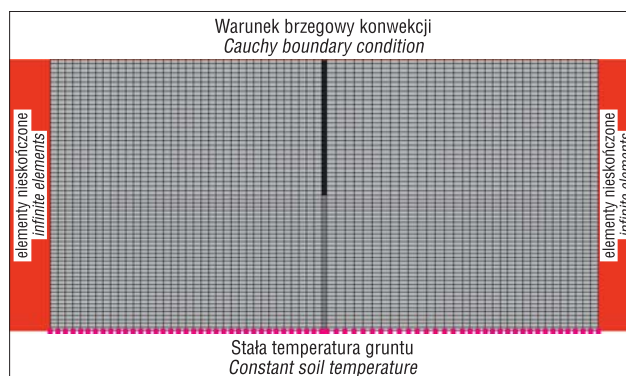
### Analiza termiki

Do obliczeń termiki wykorzystano sprzężony przepływ ciepła z wodą (Curry, 1974). Do modelu przedstawionego powyżej zostały wprowadzone termiczne warunki brzegowe pierwszego rodzaju. Na górnej powierzchni modelu (powierzchni terenu) zastosowano warunek brzegowy trzeciego rodzaju – wymianę na drodze konwekcji. Parametry materiałowe wykorzystane w analizie termiki przedstawiono w tabeli 2.

Temperaturę ściany szczelinowej ustalono na podstawie wyznaczenia ciepła hydratacji, a następnie stygnięcia konstrukcji. W programie do obliczeń numerycznych Z-Soil 14.12 wygenerowano dwuwymiarowy model, w którym policzono zmianę temperatury w czasie dla ściany wyko-

Tab. 2. Parametry materiałowe wykorzystane w analizie termiki  
Table 2. Material parameter used in the thermal analysis

Warstwa / Layer		1	2	3	4
materiał / material		piaski sands	żwiry gravels	iłły clays	żelbet concrete
porowatość porosity	–	0,37	0,32	0,46	0,0
objętościowa pojemność cieplna wody volumetric heat capacity of fluid	MJ/m <sup>3</sup> /k	4,2			
objętościowa pojemność cieplna ciał stałych volumetric heat capacity of solids		1,8	1,8	2,4	2,5
przewodność cieplna wody thermal conductivity of fluid	J/m/s/K	0,65			
przewodność cieplna ciał stałych thermal conductivity of solids		0,9	0,6	0,8	1,6



Ryc. 5. Schemat modelu do analizy termiki w trakcie procesu wykonania ściany szczelinowej w gruncie

Fig. 5. The scheme of the model used in thermal analysis during the process of executing the diaphragm wall in the ground

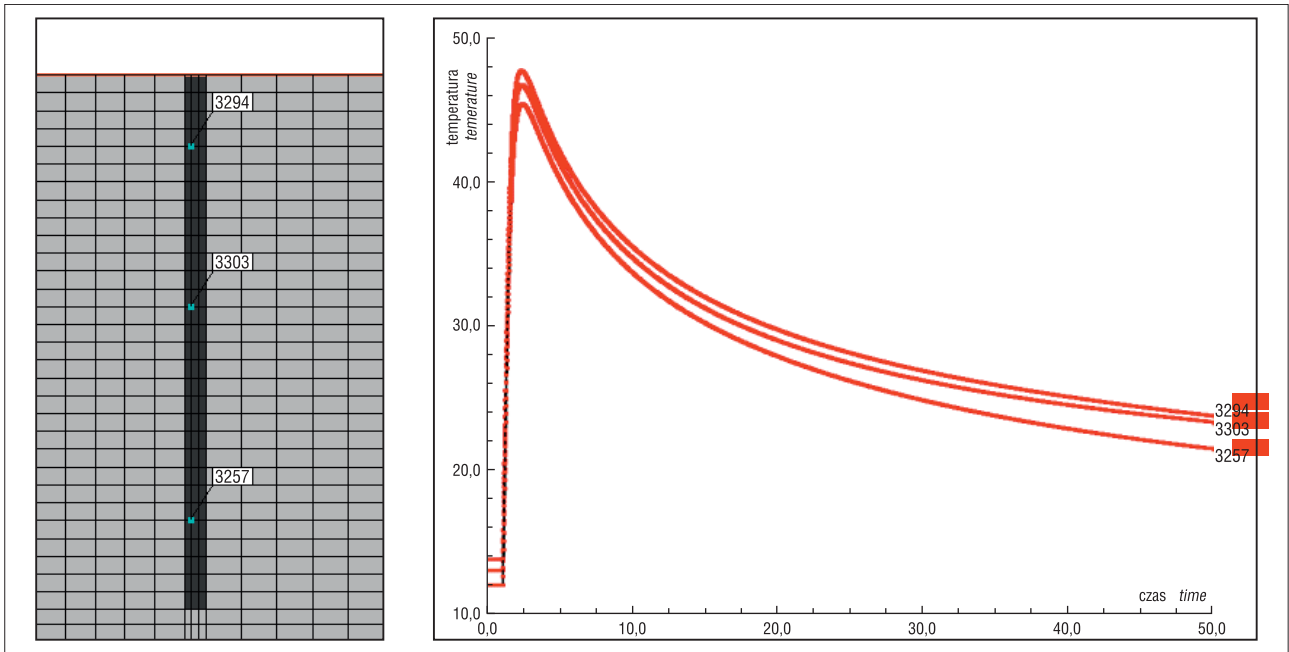
nanej z betonu klasy C20/25. Na rycinie 5 przedstawiono schemat modelu do analizy termiki w trakcie procesu wykonania ściany szczelinowej w gruncie.

Na dolnej krawędzi modelu przyjęto stałą temperaturę gruntu (9°C), a na powierzchni terenu ustalono wymianę ciepła na drodze konwekcji z temperaturą powietrza. Po lewej i prawej stronie wprowadzono elementy nieskończone, żeby nie zaburzać rozkładu temperatury przez wpływ warunków brzegowych. Zmiany temperatury w czasie dla wybranych węzłów modelu (ściany szczelinowej) przedstawiono na rycinie 6. Na początku procesu wiązania temperatura w ścianie wynosiła od 45 do 48°, następnie w ciągu 50 dni spadła do 25–28°. Wyniki obliczeń wprowadzono do programu FEFLOW w trakcie analizy sprzężonego procesu filtracji i nieustalonego przepływu ciepła. Oprócz dwóch wariantów przedstawionych wcześniej (ryc. 3), obliczano również rozprzestrzenianie się ciepła przy braku nieszczelności (bez przepływu wody przez obudowę lub dno wykopu).

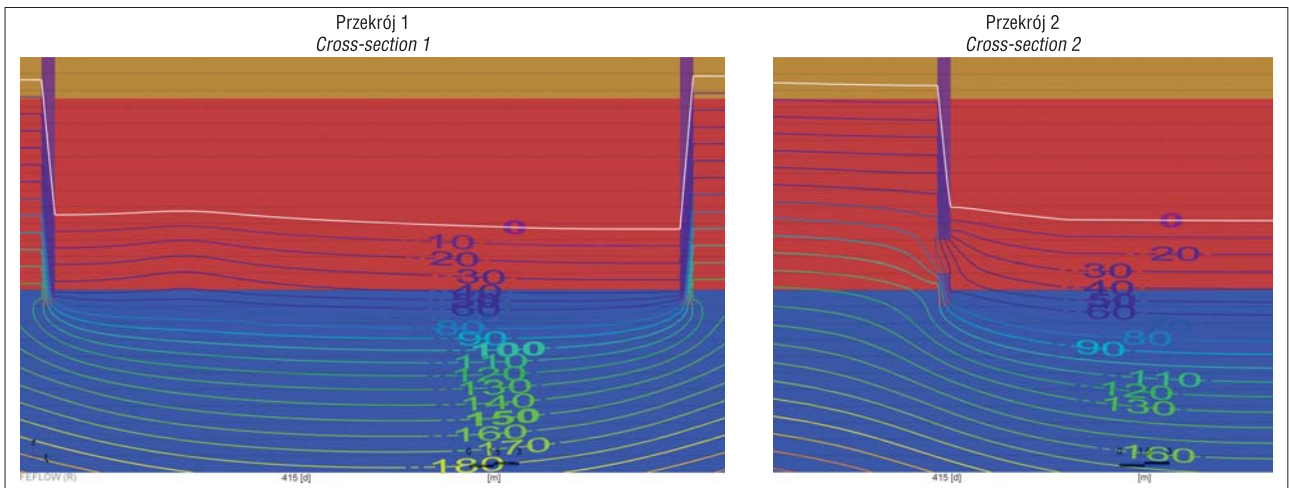
### ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW OBLICZEŃ

W wyniku analizy filtracji uzyskano w modelu rozkład ciśnienia wody i prędkości przepływu. Wyniki w postaci izolacji ciśnień przedstawiono na rycinie 7 dla przypadku I i na rycinie 8 dla przypadku II. Izolinia 0 (zaznaczona na rysunku na biało) oznacza swobodne zwierciadło wody. W przypadku I objętość filtrującej wody wynosi 53 m<sup>3</sup>/d, a w przypadku II 16,3 m<sup>3</sup>/d.

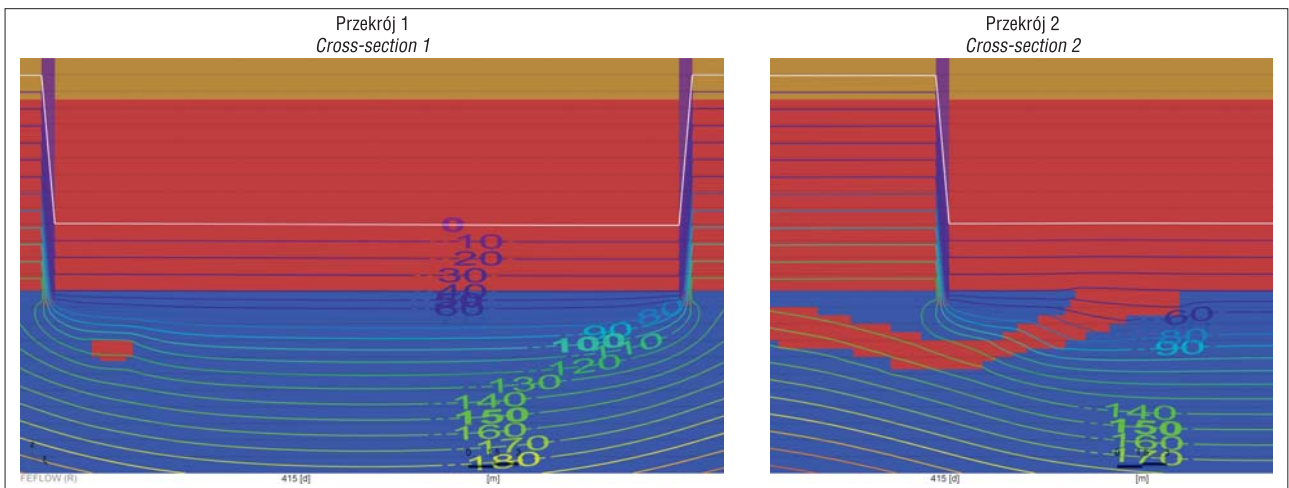
W analizowanym przypadku nieszczelności ściany szczelinowej można, jak widać, zlokalizować przeciek na długości ściany, obserwując poziom zwierciadła wody w zainstalowanych piezometrach. Nie ma natomiast możliwości określenia lokalizacji przecieku w pionie. Natomiast jeśli podoba optywa ścianę przez okno filtracyjne (wariant II), poziom zwierciadła wody podnosi się równomiernie w obrębie obudowy planowanego wykopu i detekcja jest niemożliwa. Celem zdefiniowania globalnych wniosków dotyczących możliwości detekcji przecieku badaniami poziomów piezometrycznych, należy przeprowadzić dodatkowe obliczenia z modelowaniem różnych wydatków przecieku, wielkości nieszczelności oraz współczynnika filtracji gruntu. Dodatkowy problem, który pojawia się przy stosowaniu tej metody, to rozstaw piezometrów. To zagadnienie



**Ryc. 6.** Rozkład zmiany temperatury w wybranych węzłach ściany szczelinowej  
**Fig. 6.** The temperature change distribution in selected nodes of the diaphragm wall



**Ryc. 7.** Wariant I. Rozkład ciśnienia wody w modelu  
**Fig. 7.** Variant I. The water pressure distribution in the model

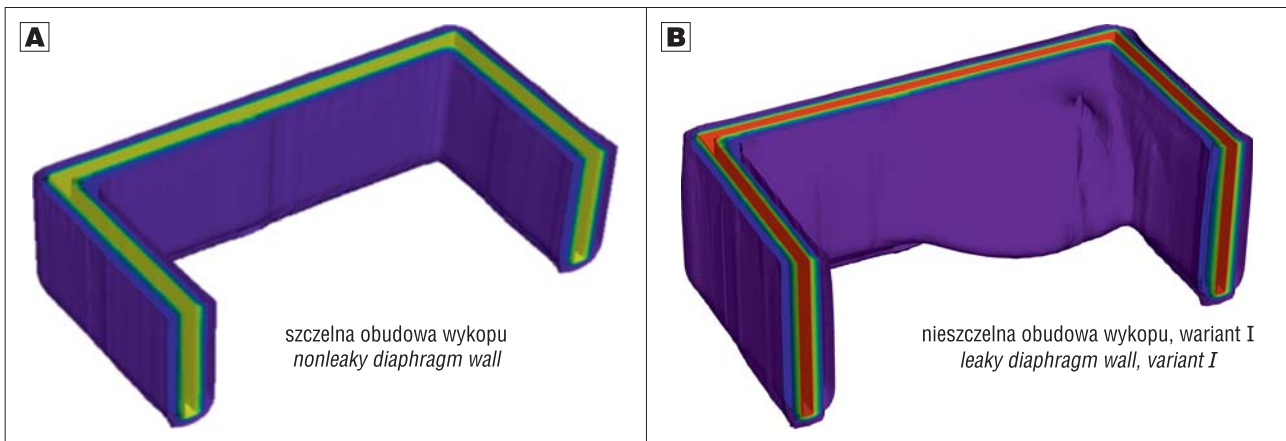


**Ryc. 8.** Wariant II. Rozkład ciśnienia wody w modelu  
**Fig. 8.** Variant II. The water pressure distribution in the model

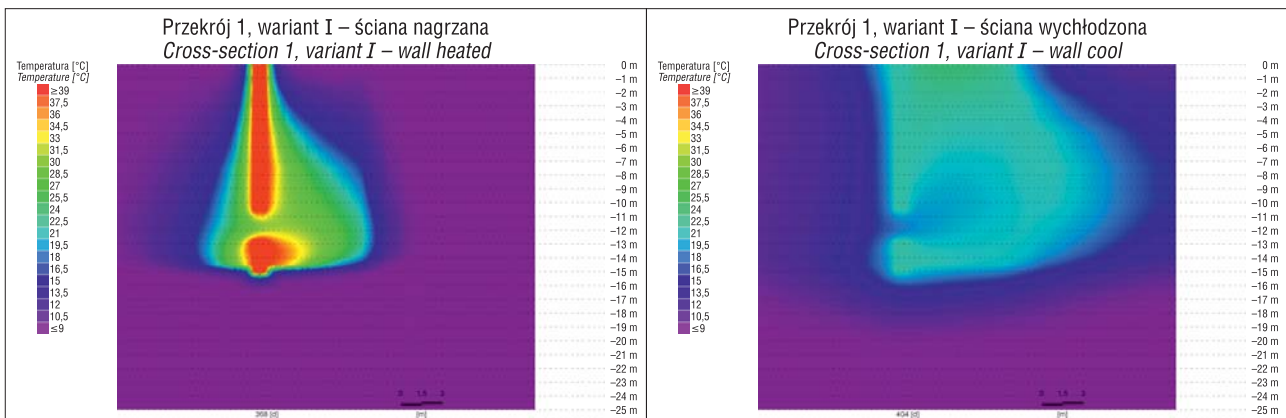
również wymaga dodatkowych analiz wielokryterialnych. Może się zdarzyć, że ze względu na rozstaw urządzeń nie ma możliwości ustalenia miejsca przecieku ani nawet wykrycia.

Na rycinach 9 do 11 przedstawiono wybrane rozkłady temperatury będące wynikiem przeprowadzonych symulacji numerycznych. W modelu, w którym nie było przecieku, wzrost temperatury w gruncie na długości ściany szczelinowej jest taki sam w każdym kierunku i wynika z jednokowych warunków termicznych i procesu wyłącznie przewodzenia ciepła (ryc. 9A). W przypadku wyników wariantu

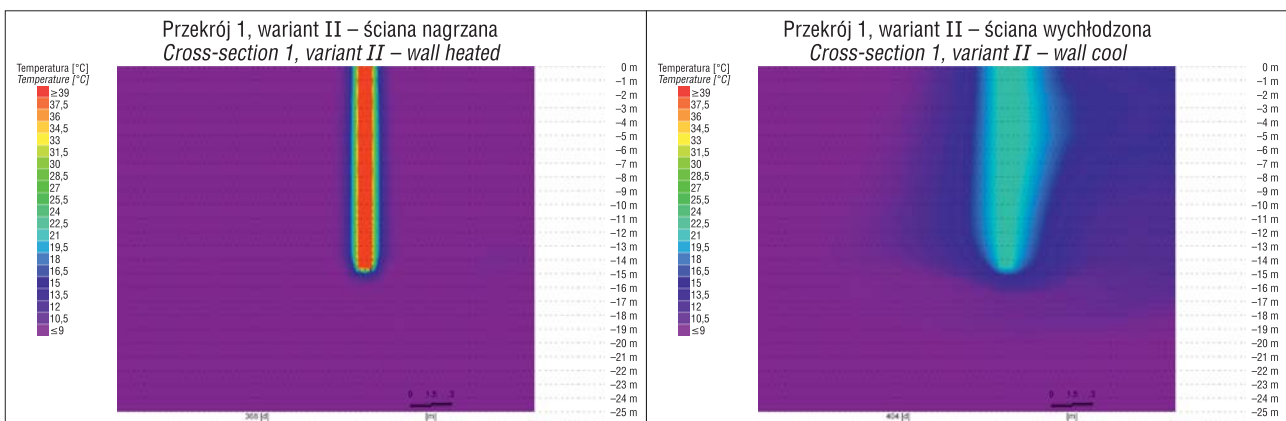
z przeciekiem zasięg rozprzestrzeniania temperatur jest większy i zlokalizowany w rejonie przecieku (ryc. 9B). Zasięg oddziaływania termicznego ściany szczelinowej na rozkład temperatury gruntu wynosi ok. 2–4 m. W analizowanym przypadku I (ryc. 10) nieszczelności ściany szczelinowej widać, że woda przepływając przez otwór, ulega ogrzaniu. Dzieje się tak wówczas, gdy w ścianie zachodzi proces hydratacji, a proces filtracji przebiega relatywnie powoli. W takich przypadkach jest możliwa lokalizacja przecieku przez poszukiwanie maksymalnej temperatury.



Ryc. 9. Przestrzenny rozkład temperatury w rejonie ściany szczelinowej  
 Fig. 9. The spatial distribution of temperature near the diaphragm wall



Ryc. 10. Rozkład temperatury w wybranym czasach obliczeń dla wariantu I  
 Fig. 10. The temperature distribution for selected time steps in variant I

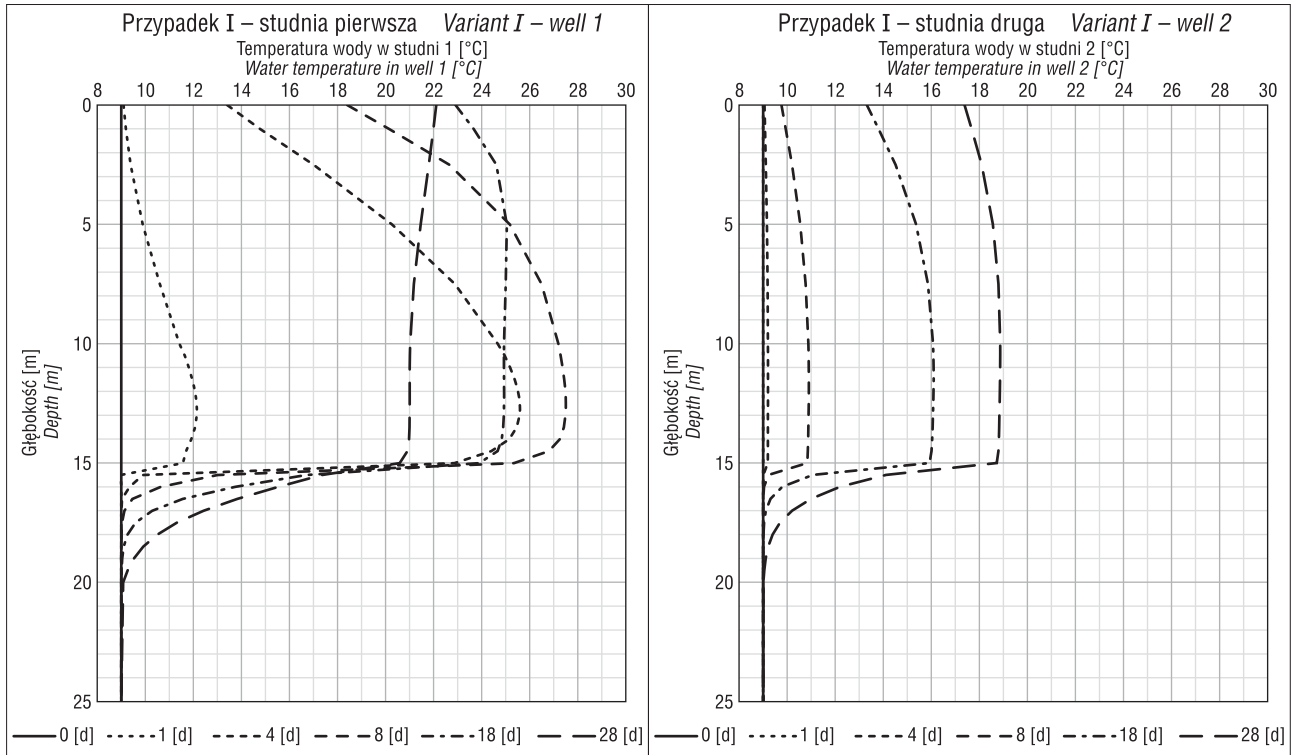


Ryc. 11. Rozkład temperatury w wybranych czasach obliczeń dla wariantu II  
 Fig. 11. The temperature distribution for selected time steps in variant II

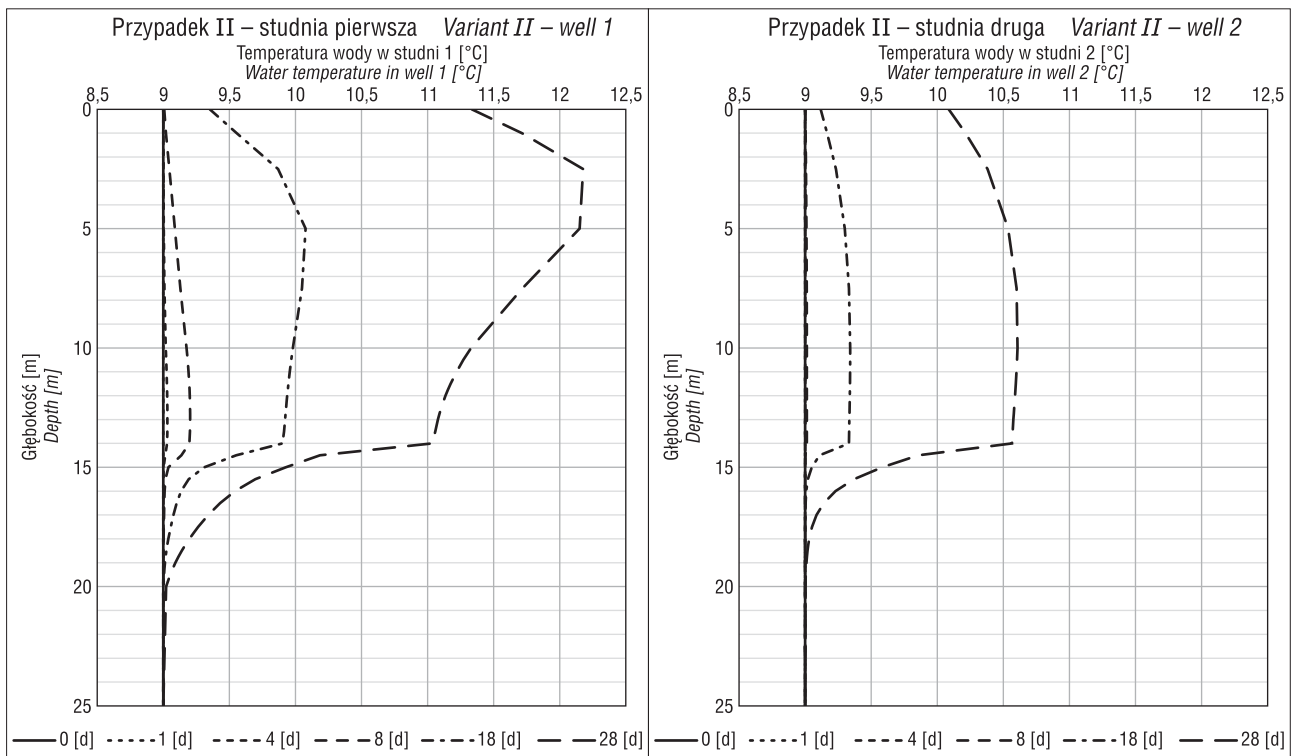
Przy intensywnym przecieku lub w sytuacji gdy przeciek nie jest intensywny, ale następuje stygnięcie ściany szczelinowej, do nagrzanego gruntu w wykopie wpływa zimna woda. Wtedy miejsce nieszczelności można wykryć, kierując się zmniejszającymi się temperaturami w stosunku do podgrzanego gruntu przez ciepło wydzielane z wykona-

nej ściany szczelinowej przed rozpoczęciem odwodnienia. Do detekcji tego typu przecieków można zastosować termomonitoring pasywny.

W przypadku II wykrycie przecieku jest możliwe po dłuższym czasie pomiarów niż w poprzednim przypadku, gdyż na skutek przepływu i ruchu wody w „wykopie” ciepło



Ryc. 12. Zmiany temperatury wraz z głębokością studni w czasie  
Fig. 12. The temperature changes in time depending on well's depth



Ryc. 13. Zmiany temperatury wraz z głębokością studni w czasie  
Fig. 13. The temperature changes in time depending on well's depth

zaczyna być transportowane na większą odległość od ścian. Woda nie ogrzewa się, przepływając przez szczelinę, a wydatek przecieku jest o wiele mniejszy niż w przypadku I.

Na wykresach (ryc. 12 i 13) przedstawiono pionowe rozkłady temperatury w studniach w wybranych chwilach czasowych dla obu analizowanych przypadków. Widać na nich, że w przypadku I nieszczelność powoduje po znacznie krótszym czasie pompowania znaczące zaburzenia temperatury umożliwiające detekcję przecieku. Dokonując pomiaru temperatury na różnych wysokościach, można zlokalizować rzędną na jakiej powstał przeciek (ryc. 12). Widać wyraźnie, że najwyższe temperatury występują na głębokości ok. 12–13 m i są generowane przez nieszczelności ściany zlokalizowane na tej głębokości. Można zauważyć, że zmiany temperatury występują zarówno w studni nr 1, która jest zlokalizowana znacznie bliżej miejsca przecieku, jak i w studni nr 2, gdzie z racji oddalenia następuje tylko podwyższenie temperatury.

Do opisu przedstawionego zjawiska niezbędne jest uwzględnienie przestrzennych zależności położenia punktu pomiarowego (np. w studni) oraz lokalizacji nieszczelności.

### **PIERWSZA INSTALACJA W POLSCE TERMOMONITORINGU OBUDOWY GŁĘBOKICH WYKOPÓW**

We wrześniu 2016 r. przy współpracy Korporacji Budowlanej Doraco i firmy Neostrain oraz Zakładu Budownictwa Wodnego i Hydrauliki Politechniki Warszawskiej zostały przeprowadzone pierwsze w Polsce pomiary szczelności ścian szczelinowych z wykorzystaniem termomonitoringu za pomocą metody pasywnej. Poligon badawczy obejmował obiekt zlokalizowany w centrum Warszawy posadowiony w skomplikowanych warunkach wodno-gruntowych. W projekcie budynku było przewidziane kilka poziomów kondygnacji podziemnych. W trakcie instalacji wykonano pomiary temperatury ściany szczelinowej (we wnętrzu rury inklinometrycznej) oraz pomiary temperatury gruntu wewnątrz obrysu ścian szczelinowych w trakcie prac odwodnieniowych, przed rozpoczęciem głębenia wykopu. Po wykonaniu wykopu zostały potwierdzone wyniki uzyskane na podstawie interpretacji wykonanych pomiarów. Zgromadzone dane pozwolą na przeprowadzenie dalszych analiz w celu doskonalenia metod pomiarowych i technik ich interpretacji, umożliwiających skuteczną detekcję nieszczelności obudowy wykopu.

### **PODSUMOWANIE**

Metoda termomonitoringu stanowi skuteczne narzędzie w detekcji nieszczelności obudów wykopów wykonywanych w technologii ścian szczelinowych. Pozwala w o wiele szybszy i dokładniejszy sposób wykryć nieszczelność niż zwykły pomiar zwierciadła wody w piezometrach.

Obliczenia numeryczne mogą stanowić uzupełnienie pomiarów w terenie, żeby lepiej określić skalę przecieku i jego możliwy wpływ na stan gruntów w okolicy wykopu. Umożliwiają sprawdzenie, czy w gruntach nie zostały przekroczone dopuszczalne gradienty i czy nie wystąpiły zjawiska erozyjne w gruncie.

Autorzy planują przeprowadzić dalsze badania nad zakresem stosowania poszczególnych metod i ustaleniem toku postępowania, w celu ich optymalizacji przy detekcji przecieków w trakcie budowy głęboko posadowionych obiektów budowlanych.

Autorzy dziękują prof. Annie Siemińskiej-Lewandowskiej oraz anonimowemu Recenzentowi za cenne do przygotowania artykułu uwagi. Zaprezentowane wyniki badań uzyskano w ramach prac statutowych Zakładu Budownictwa Wodnego i Hydrauliki, Wydziału Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechniki Warszawskiej.

### **LITERATURA**

- CURRY D.M. 1994 – Two-Dimensional analysis of heat and mass transfer in porous media using the strongly implicate procedur. National Aeronautics and Space Administration, Waschington D.C.
- DORNSTÄDTER J. & HUPPERT F. 1998 – Thermische Leckortung an Trogbaugruben mit tiefliegenden Sohlen. Vorträge der Baugrundtagung 1998 in Stuttgart, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.: 179–187.
- GRZEGORZEWICZ K. 1975 – Technika wykonywania ścian szczelinowych, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa.
- KOWALCZYK S., ZAWRZYKRAJ P. & MIESZKOWSKI R. 2015 – Application of electrical resistivity tomography in assessing complex soil conditions. Geol. Quart., 59 (2): 367–372. Doi: 10.7306/gq.1172.
- MIESZKOWSKI R., KOWALCZYK S., BARAŃSKI M. & SZCZEPAŃSKI T. 2014 – Zastosowanie metod geofizycznych do rozpoznania powierzchni stropowej gruntów słabo przepuszczalnych oraz wyznaczenia stref rozluźnienia w korpusie zapory ziemnej. Zesz. Nauk. IGSMiE PAN, 86: 167–180.
- NAZAREWICZ M. & POPIELSKI P. 2010 – Analiza oddziaływania czasowego odwodnienia w trakcie realizacji głębokich wykopów fundamentowych na budynki sąsiednie. Czas. Tech., ser.: Środowisko, 107 (1-Ś) (14): 1–18.
- PACANOWSKI G., CZARNIAK P., BĄKOWSKA A., MIESZKOWSKI R. & WELC F. 2014 – The role of geophysical ERT method to evaluate the leakproofness of diaphragm wall of deep foundation trenches on the example of the construction of retail and office complex in Lublin, Poland. Stud. Quatern., 31 (2): 91–99.
- POPIELSKI P. 2012 – Oddziaływanie głębokich posadowień na otoczenie w środowisku zurbanizowanym. Politechnika Warszawska, Pr. Nauk. Inż. Środ., 61.
- RADZICKI K. 2009 – Analyse retard des mesures de températures dans les digues avec application à la détection de fuites. Praca doktorska, AgroParisTech, Paryż.
- RADZICKI K. 2011 – Bezpieczeństwo zapór – nowe wyzwania, Zastosowanie termomonitoringu do detekcji przecieków oraz erozji wewnętrznej w ziemnych budowlach piętrzących. IMGW, Warszawa: 230–239.
- RADZICKI K., SIUDY A. & STOLIŃSKI M. 2015 – An innovative 3D system for thermal monitoring of seepage and erosion processes and an example of its use for upgrading the monitoring system at the Kozłowa Góra dam in Poland. Q. 99 – R. 7, 25<sup>th</sup> International Congress on Large Dams, Stavanger: 85–101.

Praca wpłynęła do redakcji 11.05.2016 r.  
Akceptowano do druku 31.01.2017 r.