

dr hab. inż. Paweł Popielski, prof. PW^{1*)}

ORCID: 0000-0002-5425-5821

mgr inż. Tomasz Majewski²⁾

ORCID: 0000-0003-0444-8753

mgr inż. Bartosz Bednarz¹⁾

ORCID: 0000-0002-3791-5234

dr hab. inż. Maciej Niedostatkiwicz, prof. PG³⁾

ORCID: 0000-0002-6451-6220

Deformacje filtracyjne i ich oddziaływanie na osiadania podłoża na przykładzie zabytkowego obiektu sakralnego

Seepage deformation and its impact on the settlement of a historic sacred building subsoil

DOI: 10.15199/33.2022.10.

Streszczenie. W artykule omówiono studium przypadku, wykorzystując dane dotyczące pęknięć i deformacji w zabytkowym budynku oraz przecieków wody w jego podłożu. Przedstawiono charakterystykę deformacji filtracyjnych gruntu z uwagi na rodzaj gruntu i przyczynę. Na podstawie danych z monitoringu poziomu wody gruntowej w okolicach obiektu przeanalizowano przecieki i wyznaczono strefy, w których przekroczone zostało kryterium inicjacji procesu deformacji filtracyjnych. W dalszej części przedstawiono koncepcje rozwiązań projektowych w zakresie zabezpieczenia budynku z uwagi na deformacje filtracyjne gruntu

Słowa kluczowe: podłoże obiektu; filtracja w gruncie; deformacje filtracyjne w gruncie; osiadanie budynku.

Abstract. This paper presents a case study using data on cracks and deformation in a historic building and water seepage in its subsoil. The first part of the paper presents the characteristics of soil filtration deformation with respect to soil type and causal factor. Based on the data from the monitoring of the ground water level in the vicinity of the building, seepage was analyzed and the zones in which the criterion for the initiation of filtration deformation process was exceeded were determined. In the next part, concepts of design solutions for protecting the building due to soil filtration deformations are presented.

Keywords: building subsoil; filtration in the ground; soil deformation due to seepage; soil filtration deformation, settlement of building.

Woda filtrująca przez grunt, podłoże obiektu lub elementy konstrukcyjne obiektów budowlanych wykonane z gruntu oddziałuje na szkielet gruntowy i może powodować zmiany ułożenia poszczególnych ziaren względem siebie, czyli zmiany struktury gruntu. Deformacje fazy stałej gruntu (szkieletu gruntowego) spowodowane działaniem sił filtracji nazywane są **deformacjami filtracyjnymi**. Zjawiska takie nie występują wyłącznie w obiektach hydrotechnicznych, ale także w podłożu innych obiektów w miastach i obszarach zurbanizowanych [1 – 3]. Dotyczą również podłoża obiektów zabytkowych, gdzie zazwyczaj w sposób bardzo istotny wpływają na stan elementów ich

konstrukcji [4]. Prawidłowa ocena stanu technicznego obiektów budowlanych jest zagadnieniem wymagającym doświadczenia zawodowego [5 – 6], przy czym ocena stanu technicznego obiektów zabytkowych należy do jednych z trudniejszych zagadnień w praktyce inżynierskiej [7 – 11]. Wynika to bezpośrednio ze specyfiki obiektów, do realizacji których zastosowano często niestosowane obecnie techniki.

Charakterystyka deformacji filtracyjnych gruntu

Mechaniczne działanie sił filtracji na szkielet gruntowy może powodować jego deformacje. **Deformacje fazy stałej gruntu** spowodowane działaniem sił filtracji nazywane są **deformacjami filtracyjnymi** lub **filtracyjnymi odkształceniami miejscowymi** [12]. Deformacje filtracyjne obejmują na ogół niewielkie masy gruntu (przemieszczenia ziaren, cząstek lub bryłek) oraz powodują zmianę stanu gruntu i jego budowy wewnętrznej, a w efekcie jego parametrów.

Deformacje filtracyjne odnoszące się do gruntów niespoistych, występujące w wyniku przemieszczenia pojedynczych ziaren i cząstek gruntu niezależnie od siebie, pod wpływem działania siły filtracji, można nazwać **mikrodeformacjami**.

Powstawanie deformacji filtracyjnych i ich rozwój są na ogół bardzo złożone i zależą od wielu czynników. W związku z tym deformacje filtracyjne w czystej postaci można zaobserwować bardzo rzadko [13]. Deformacje filtracyjne mogą mieć różne przyczyny, przy czym w literaturze przedmiotu nierzadko nazywa się nimi ich czynnik sprawczy, jedno określenie dotyczy różnych procesów lub zjawisk albo ten sam proces lub zjawisko nazywane są w różny sposób [13]. Do najczęściej używanych określeń należą: wyparcie [13], kurzawka [13], przebicie hydrauliczne [14–16], sufozja [13–14], erozja [13–14] oraz kolmatacja [14–15]. Trzy ostatnie z uwagi na charakter zjawiska opisywane są przymiotnikami: wewnętrzna, zewnętrzna lub kontaktowa. Na rysun-

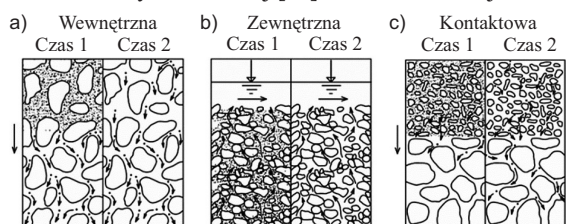
¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska

²⁾ Politechnika Gdańska, Szkoła Doktorska Wdrożeniowa, Pracownia Projektowo-Inżynierska Tomasz Majewski

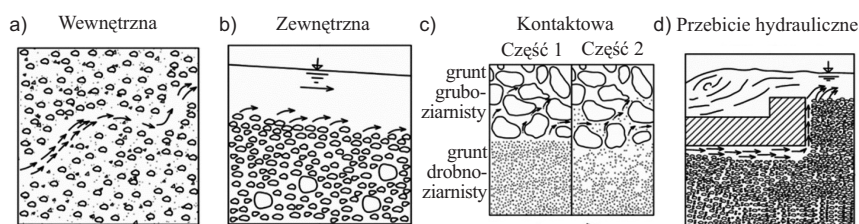
³⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii i Środowiska

^{*} Adres do korespondencji: pawel.popielski@pw.edu.pl

ku 1a przedstawiono sufozję wewnętrzną, na rysunku 1b sufozję zewnętrzną, a na rysunku 1c sufozję kontaktową. W przypadku erozji rozróżniamy erozję wewnętrzną (rysunek 2a), zewnętrzną (rysunek 2b) oraz kontaktową (rysunek 2c). Na rysunku 2d przedstawiono najgroźniejsze zjawisko – przebicie hydrauliczne [14, 15]. Zjawiska wywołane mechanicznym działaniem wody na szkielet gruntowy mogą doprowadzić do nadmiernego osiadania, a w konsekwencji awarii, a nawet katastrofy budowlanej [15].



Rys. 1: Rodzaje sufozji: a) wewnętrzna; b) zewnętrzna; c) kontaktowa [17]
Fig. 1.



Rys. 2: Rodzaje erozji: a) wewnętrzna; b) zewnętrzna; c) kontaktowa; d) przebicie hydrauliczne [17]
Fig. 2.

Grunt różnoziarnisty jest gruntem sufozyjnym, tj. z jego objętości, w danych warunkach filtracji, mogą być wynoszone oddzielne cząstki i ziarna. Pojęcie sufozyjności gruntu jest względne, ponieważ zależy od warunków obciążenia i gradientów filtracji. Przy stosunkowo niewielkich obciążeniach pionowych na grunt i stosunkowo dużych gradientach hydraulicznych, zjawisko to może wystąpić (grunt sufozyjny), a przy stosunkowo dużych obciążeniach i niewielkich gradientach hydraulicznych – może nie wystąpić, tak jak w przypadku gruntu niesufozyjnego. Idealnym gruntem niesufozyjnym jest grunt różnoziarnisty, zbudowany z cząstek (ziaren) o jednakowych rozmiarach (wskaźnik różnoziarnistości uziarnienia ($C_u = 1,0$)).

Warunki wystąpienia deformacji filtracyjnych opisywane są często wartością gradientu krytycznego lub warto-

ścią prędkości krytycznej, tj. kryterium hydraulicznym (warunek wystarczający) w odniesieniu do jednostki objętości gruntu, w której dane zjawisko jest obserwowane przy danym gradiencie lub prędkości [16, 18, 19].

Deformacje filtracyjne gruntu w obszarze Bazyliki pw. Świętego Mikołaja

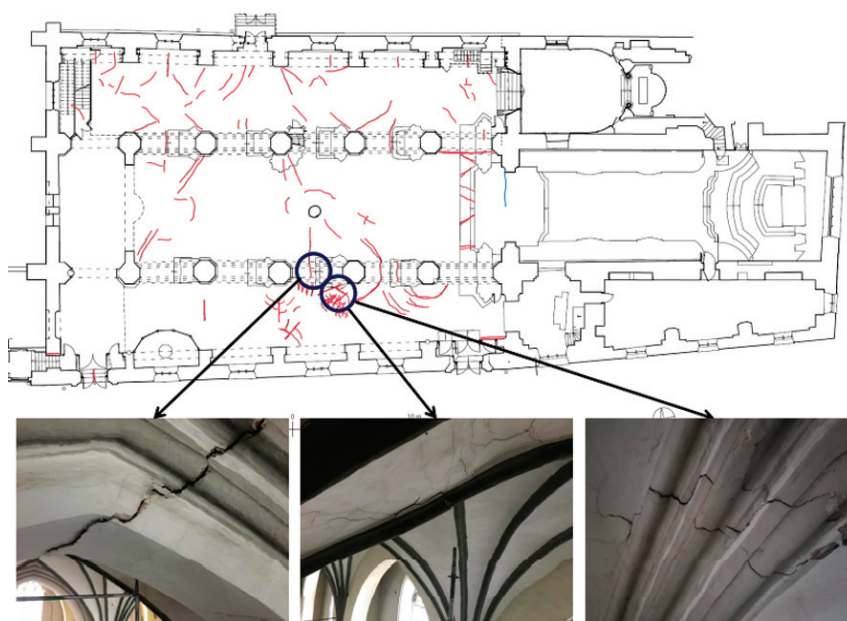
Do jesieni 2018 r. budynek Bazyliki pw. Świętego Mikołaja w Gdańsku znajdował się w zadowalającym stanie technicznym. Prowadzono w nim sukcesywne prace remontowo-konserwatorskie. Główne elementy konstrukcyjne budynku Bazyliki nie wykazywały śladów uszkodzeń świadczących o istotnym przekroczeniu warunków *Stanu Granicznego Nośności (SGN) (Ultimate Limit*

State, (ULS)) oraz *Stanu Granicznego Użytkowości (Serviceability Limit State, (SLS))*. Pod koniec października 2018 r. zaobserwowano uszkodzenia sklepień nad południową nawą boczną. Na rysunku 3 pokazano koncentrację uszkodzeń w rejonach filarów nawy południowej oraz pęknięcia elementów murowych. W artykule skoncentrowano się na opisie migracji wody przez podłoże gruntowe, ale nie przeanalizowano szczegółowej morfologii uszkodzeń.

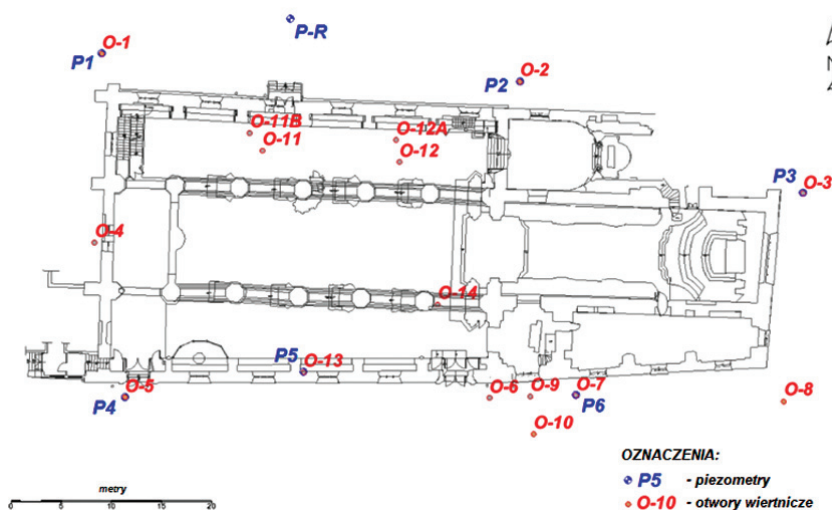
W trakcie diagnostyki w budynku Bazyliki i na terenie do niego przyległym, wykonano także szczegółowe badania gruntowe i zamontowano piezometry do obserwacji stanów wody w podłożu. Lokalizację miejsc odwiertów badawczych i wykonanych piezometrów przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Piezometry zlokalizowano wokół świątyni. Cykliczne obserwacje prowadzono od lipca 2019 r. do końca maja 2020 r.

Pod Bazyliką i w jej bezpośrednim otoczeniu, do głębokości ok. 4 ÷ 5 m od poziomu terenu występują nasypy niekontrolowane oraz grunty słabonśne w postaci namulów gliniastych i piasków próchnicznych o niskim stopniu zagęszczenia. Poniżej tych warstw znajdują się żwiry oraz piaski średnie i pospółka, od średniozagęszczonych do zagęszczonych.

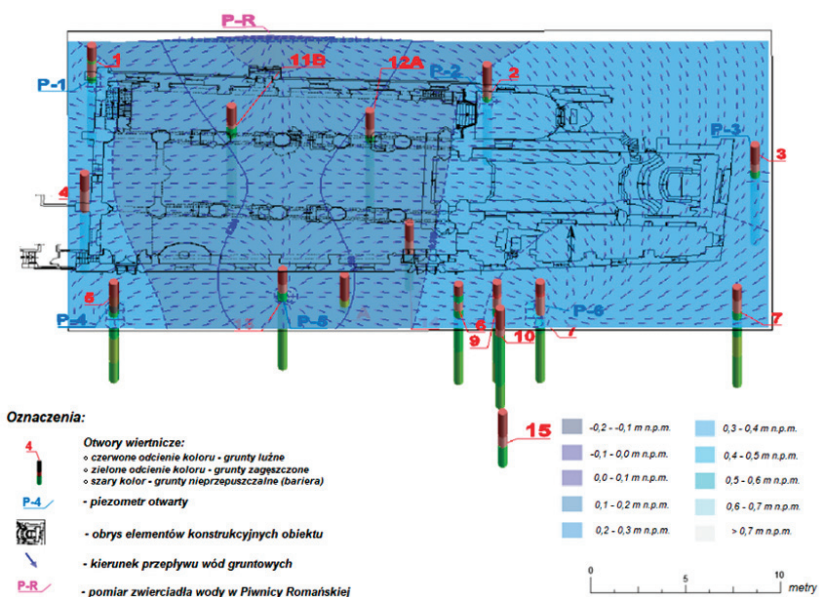
Na rysunku 6 przedstawiono mapy poziomów zwierciadła wody gruntowej



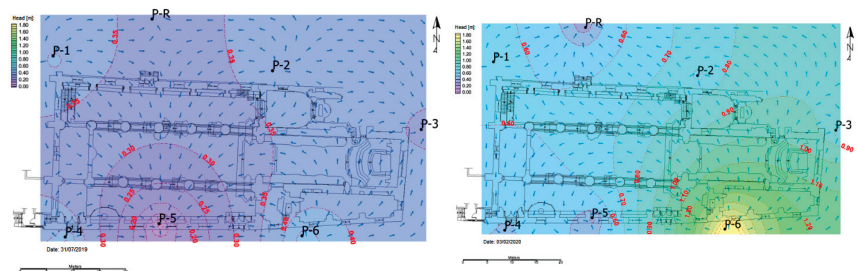
Rys. 3: Uproszczona inwentaryzacja uszkodzeń sklepień nawy południowej Bazyliki
Fig. 3



Rys. 4. Lokalizacja odwiertów do badań podłoża i piezometrów do obserwacji poziomu wody gruntowej
Fig. 4.



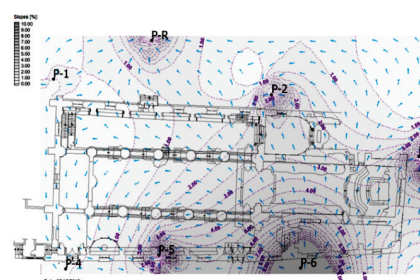
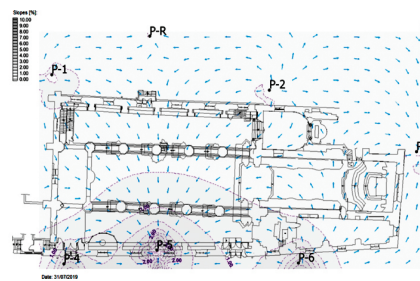
Rys. 5. Mapa poziomów zwierciadła wody gruntowej z zaznaczonymi profilami gruntów w miejscu odwiertów i piezometrów wraz z kierunkami filtracji z lipca 2019 r. na tle rzutu budynku Bazyliki w poziomie przyziemia
Fig. 5.



Rys. 6. Mapa poziomów zwierciadła wody gruntowej z kierunkami filtracji na tle rzutu budynku Bazyliki w poziomie przyziemia z: a) lipiec 2019 r. (uśrednione); b) luty 2020 r. (uśrednione)
Fig. 6.

wyrażonych w postaci izolinii rzędnych zwierciadła wody (m n.p.m.) wraz z kierunkami filtracji (niebieskie strzałki) dla przykładowych dni pomiarowych. Wyniki obrazują, w jaki sposób zmienia się poziomy wody i kierunki filtracji w podłożu Bazyliki.

Na rysunku 7 zaprezentowano mapy gradientów hydraulicznych – spadku zwierciadła wody gruntowej z kierunkami filtracji w kilku przykładowych dniach pomiarowych. Analizę kierunku filtracji wykonano z zastosowaniem oprogramowania komercyjnego Aquaveo GMS bazującego na metodzie różnic skończonych z użyciem modelu MODFLOW [20]. Grunt w obszarze Bazyliki zamodelowany został przez zastosowanie elementów o odpowiednich parametrach współczynnika filtracji gruntu, przyjętych na podstawie rodzajów gruntu z wykonanych wcześniej badań terenowych. Elementy modelujące podłoże gruntowe miały wymiar 2x2m. Poziomy zwierciadła wody w modelu zostały obliczone na podstawie wartości z punktowych pomiarów piezometrycznych, przyjmowanych w modelu jak warunki brzegowe I rodzaju.



Rys. 7. Mapa lokalnych spadków zwierciadła wody gruntowej z kierunkami filtracji na tle rzutu budynku Bazyliki w poziomie przyziemia z: a) lipiec 2019 r. (uśrednione); b) luty 2020 r. (uśrednione)
Fig. 7.

Analiza pomiarów filtracyjnych gruntu

Wyniki badań przedstawione na rysunkach 6 i 7 wskazują, że w podłożu pod i wokół budynku Bazyliki występuje zjawisko deformacji filtracyjnych wywołanych przepływającą wodą gruntową. Zakres tego zjawiska można określić jako sufozję i scharakteryzować przez wartość gradientu hydraulicznego lub prędkości filtracji powodującej mechaniczne wypłukiwanie drobnych cząstek gruntu przez wodę opadową oraz podziemną, która infiltrowuje przez ośrodek gruntowy, doprowadzając ostatecznie do załamania szkieletu gruntowego i powstawania osiadań. Wyniki przeprowadzonych pomiarów pokazały, że w okresie obserwacji wartości gradientów wynosiły $5,3 \div 8,3\%$ i na analizowanych odcinkach w podłożu obiektu przekroczony został uśredniony gradient hydrauliczny w przypadku poszczególnych rodzajów gruntu, jakie występują pod obiektem. Może to wywoływać zjawisko sufozji.

Uzyskane wizualizacje kierunku przepływu wody wskazują, że w obszarze budynku Bazyliki występują również zmiany kierunku przepływu wody. Ich intensywność na tak niewielkim obszarze jest znaczna i nienaturalna, a sama wielkość zmian kierunku przepływu jest istotna z punktu zachodzenia niekorzystnych zjawisk filtracyjnych w podłożu.

Szczegółowa analiza przypadku deformacji podłoża gruntowego wokół budynku Bazyliki pozwala na sformułowanie tezy, że przyczyną zniszczenia podłoża gruntowego jest istotnie zbliżona do sytuacji przedstawionej w [4]. Wówczas również występowały okresowe intensywne przepływy spowodowane działaniem wód opadowych powodujących deformacje filtracyjne i zmiany parametrów gruntowych.

Koncepcje rozwiązań projektowych w zakresie zabezpieczenia budynku Bazyliki

W praktyce jedynym skutecznym sposobem zabezpieczenia budynku przed rozwojem deformacji filtracyjnych gruntu jest pełna stabilizacja poziomu wody w podłożu gruntowym. Sytuacja ta jest możliwa w wyniku wpro-

wadzenia drenażu (najczęściej zewnętrznego) oraz odprowadzenia wody opadowej do sprawnego systemu kanalizacji deszczowej. Niezbędna jest również stała kontrola stopnia nawodnienia ośrodka gruntowego, w tym monitorowanie szczelności kanalizacji deszczowej.

W przypadku budynku Bazyliki istnieje jedynie częściowa możliwość ograniczenia deformacji filtracyjnych gruntu. Wokół bryły głównej Bazyliki znajduje się zinwentaryzowany drenaż, który poprzez studnie pośrednie odprowadza wodę do kanalizacji deszczowej. Jak wykazały odkrytki, wokół budynku istnieją również liczne niezainwentaryzowane drejny, pochodzące z różnych okresów, wykonane na różnych poziomach posadowienia, z których część jest drożna i umożliwia nieuporządkowaną transmisję wody. Woda ta, w sposób niekontrolowany pod konstrukcją Bazyliki, powodując zaburzenie pracy drenaży zainwentaryzowanych i powodowanie lokalnych deformacji filtracyjnych przez przekroczenie gradientów krytycznych w poszczególnych warstwach gruntowych.

W celu uporządkowania gospodarki wodnej należałoby zidentyfikować, a następnie zlikwidować wszystkie te drejny, które nie odprowadzają wody w sposób kontrolowany.

Zwierciadło wody gruntowej waha się od 14 do nawet 274 cm jako różnica poziomów wody pomiędzy sąsiadującymi piezometrami w badanym okresie, co potwierdzają prowadzone odczyty w piezometrach.

Prowadzone na przestrzeni czasu pomiary wskazują, że nie występuje bezpośredni związek pomiędzy realizacją robót budowlanych w bezpośrednim i pośrednim sąsiedztwie budynku Bazyliki a poziomem wód gruntowych. Dotyczy to w szczególności prac związanych z kubaturowymi inwestycjami prowadzonymi w Centrum Gdańska, związanymi m.in. z realizacją robót fundamentowych obejmujących zagadnienia głębokiego fundamentowania. Poziom wody w piezometrach wzrasta ewidentnie w przypadku intensywnych opadów atmosferycznych oraz w okresie wiosennym, czyli podczas podwyższonego poziomu wody w pobliskim Kanale Motławy. Woda opadowa spływająca z po-

łaci dachowych odprowadzana jest przez system przykanalików do kanalizacji deszczowej, a teren wokół bryły głównej Bazyliki jest utwardzony i wyprofilowany ze spadkiem w kierunku „na zewnątrz” od budynku.

Wnioski

Występujące cykliczne zmiany gradientów hydraulicznych w podłożu pod budynkiem Bazyliki pw. Św. Mikołaja w Gdańsku mogły w przeszłości zainicjować powstanie deformacji filtracyjnych. Znajduje to odzwierciedlenie w postaci osiadania elementów obiektu, w szczególności posadзки w obszarze bryły głównej oraz gruntu pod ceglanyimi słupami. W konsekwencji wystąpiły uszkodzenia rozpartych na nich sklepień ceramicznych. Spowodowane było to głównie brakiem stabilizacji poziomu wody w podłożu gruntowym. Sposobem przeciwdziałania dalszych uszkodzeń obiektu jest zabezpieczenie go przed występowaniem deformacji filtracyjnych w podłożu, szczególnie przez ustabilizowanie poziomów zwierciadła wody gruntowej. Należałoby zidentyfikować i zlikwidować wszelkie instalacje drenażowe, które nie odprowadzają wody w sposób kontrolowany, a następnie monitorować poziom wód gruntowych w celu identyfikowania innych potencjalnych niekorzystnych zjawisk filtracyjnych.

Literatura

- [1] Adamowicz H, Popielski P. Analysis of changes in groundwater and soil conditions in a highly urbanized area due to deep building foundations. *Technical Transactions, Environmental Engineering*. 2015; 2-Ś: 3 – 20.
- [2] Howard K, Israfilov R. Current problems of hydrogeology in urban areas, urban agglomerates and industrial centers. *Kluwer Academic Publishers*. 2002.
- [3] Marsalek J, Jimenez-Cisneros BE, Malmquist PA, Karamouz M, Goldenfum J, Chocat B. *Urban water cycle processes and interactions*. Unesco/IHP, Geneva, 2006.
- [4] Slusarek J, Łupieżowicz M. Analysis of damage to structures as a result of soil suffusion. *Engineering Failure Analysis* Volume 120, February 2021, 105058, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105058>.
- [5] Halicka A. Ocena istniejących konstrukcji budowlanych według normy ISO 13822-2010. *V Ogólnopolska Konferencja Problemy techniczno-prawne utrzymania obiektów budowlanych*. Warszawa, 2019.
- [6] Substyk M.: *Utrzymanie i kontrola okresowa obiektów budowlanych*. Wydawnictwo ODDK, Warszawa, 2012.

[7] Bartnik G, Bukowski M. Analiza przyczyny spekań Kościoła parafialnego Św. Rocha w Jarzawie. XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane-2007, Szczecin-Międzyzdroje, 207-212, 2007.

[8] Błaszczyński T, Oleksiejuk H, Firlei E, Błaszczyński M. Wielostopniowy monitoring i zabezpieczenie budynków pod ochroną konserwatorską przed awarią lub katastrofą. XXV Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane-2011, 395-402, Szczecin-Międzyzdroje, 2011.

[9] Janowski Z, Hojdys Ł, Krajewski P. Analiza oraz naprawa i rekonstrukcja sklepień w obiektach historycznych. XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane-2007, Szczecin-Międzyzdroje, 251-260, 2007.

[10] Matysek P, Witkowski M. Badania wytrzymałości i odkształcalności XIX-wiecznych murów ceglanych. XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane-2013, Szczecin-Międzyzdroje, 183-190, 2013.

[11] Wałach D, Jaskowska-Lemańska J, Dybeł P. Analiza przyczyn powstania uszkodzeń kościoła pod wezwaniem Podwyższenia Krzyża Świętego w Podlegórzcu. XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane-2009, 239-248, Szczecin – Międzyzdroje, 2009.

[12] Dąbska A, Popielski P. (2019) Deformacje filtracyjne gruntów – klasyfikacja, Gospodarka Wodna. 2019; 8. Warszawa.

[13] Riha J, Alhasan Z, Petrula L, Popielski P, Dąbska A, Fry JJ, Solski SV, Perevoshchikova NA, Landstorfer F. Harmonisation of Terminology and Definitions on Soil Deformation Due to Seepage. In Internal Erosion in Earth-dams. Dikes and Levees pod redakcją Bonelli Stephane, Jommi Cristina, Sterpi Donatella; 2018: Springer: Berlin, Germany, 2018; pp. 347–366, doi: 10.1007/978-3-319-99423-9_31; ISBN 3319994239.

[14] Dąbska A. Odporność filtracyjna piasków. 2021. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.

[15] International Commission on Large Dams „International erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations. Bulletin 164. Volume 1: Internal erosion processes and engineering assessment” CIGB ICOLD, 2015.

[16] Richards KS, Reddy KR. Critical appraisal of piping phenomena in earth dams. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2007; 66 (4): 381 – 402.

[17] Busch KF, Luckner L, Tiemer K. Geohydraulik. 3. Edition. 1993. Gebrüder Borntraeger, Berlin.

[18] Jantzer I, Knutsson S., (2010). Critical gradients for tailing dam design. Proceedings of the First International Seminar on the Reduction of Risk in the Management of Tailing and Mine Waste. Eds. E. Fourie & R. Jewell. 2010; Perth, Australia, Nedlands, Western Australia: Australian Centre for Geomechanics, 23 – 32.

[19] Bligh WG. Dams, barrages and weirs on porous foundations. Eng. News Record. 1910; 64 (26): 708 – 710.

[20] Harbaugh AW. MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model – the Ground-Water Flow Process: U. S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16. 2005.

Przyjęto do druku: 22.09.2022 r.