

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 osiadanie podłoża na przykładzie zabytkowego obiektu sakralnego

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

DOI: 10.15199/33.2022.10.08

Streszczenie. W artykule omówiono przyczyny pęknięć i deformacji w zabytkowym budynku oraz przecieków wody w jego podłożu. Przedstawiono charakterystykę deformacji filtracyjnych gruntu, uwzględniając ich przyczynę i rodzaj gruntu. 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 dotyczące 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 budynku lub elementy konstrukcyjne 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 występują nie tylko w obiektach hydrotechnicznych, ale także w podłożu innych obiektów w miastach i na obszarach zurbanizowanych [1 – 3]. Dotyczą również podłoża obiektów zabytkowych, gdzie zazwyczaj w sposób bardzo istotny wpływają na stan elementów konstrukcji [4].

Prawidłowa ocena stanu technicznego obiektów budowlanych jest zagadnieniem wymagającym doświadczenia zawodowego [5 – 6], przy czym w przypadku 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

Działanie sił filtracji na szkielet gruntowy może powodować jego deformacje. **Deformacje fazy stałej gruntu**, w wyniku działania 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 parametrów. Deformacje filtracyjne odnoszące się do gruntów niespoistych, występujące w wyniku prze-

mieszczenia pojedynczych ziaren i cząstek gruntu niezależnie od siebie, pod wpływem działania sił filtracji, można nazwać **mikrodeformacjami**.

Powstawanie deformacji filtracyjnych i ich rozwój są na ogół bardzo złożone i zależą od wielu czynników. W związku z tym w czystej postaci takie zjawisko można zaobserwować bardzo rzadko [13]. Deformacje filtracyjne mogą mieć różne przyczyny, przy czym w literaturze przedmiotu często nazywa się nimi ich czynnik sprawczy, a więc 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]; przebiecie 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 rysunku 1a przedstawiono sufozję wewnętrzną, na rysunku 1b sufozję zewnętrzną, a na rysunku 1c sufozję kontaktową. Podobnie w przypadku

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

²⁾ Politechnika Gdańska, Szkoła Doktorska Wdrożeniowa

³⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

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

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].

Grunt różnoziarnisty jest sufozyjny, tj. z jego objętości, w danych warunkach

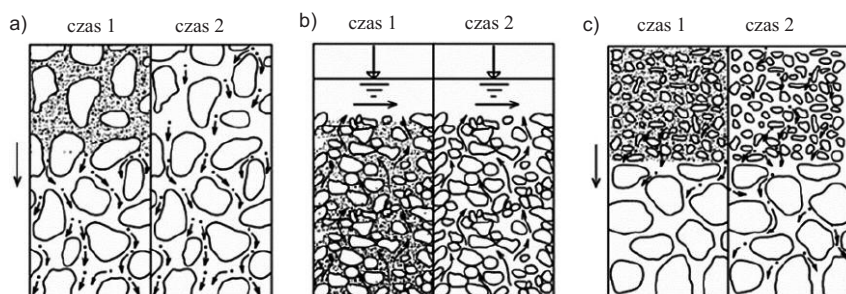
nym (warunek wystarczający) w odniesieniu do jednostki objętości gruntu, w której dane zjawisko jest obserwowane przy danym gradiencie lub prędkości [16, 18, 19].

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

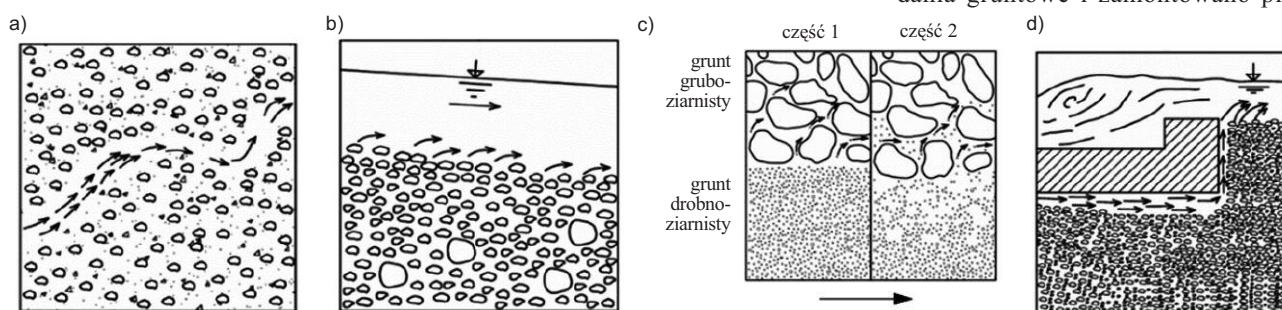
technicznym. Prowadzono w nim sukcesywne prace remontowo-konserwatorskie. Główne elementy konstrukcyjne budynku Bazyliki nie wykazywały uszkodzeń świadczących o istotnym przekroczeniu warunków *Stanu Granicznego Nośności (SGN)*, *Ultimate Limit State (ULS)* oraz *Stanu Granicznego Użyteczności (Serviceability 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, natomiast nie przeanalizowano szczegółowej morfologii uszkodzeń.

W trakcie diagnostyki w budynku Bazyliki i na terenie do niego przyległym, wykonano szczegółowe badania gruntowe i zamontowano pie-



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

Fig. 1. Types of suffusion: a) internal, b) external, c) contact [17]

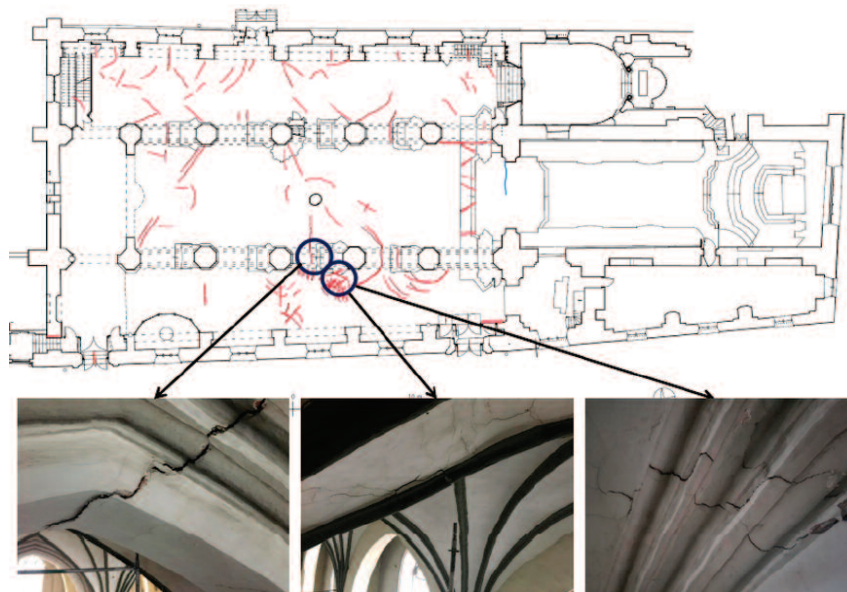


Rys. 2. Rodzaje erozji: a) wewnętrzna; b) zewnętrzna; c) kontaktowa; d) przebicie hydrauliczne [17]

Fig. 2. Types of erosion: a) internal; b) external; c) contact; d) hydraulic piping [17]

filtracji, mogą być wyodrębnione oddzielne cząstki i ziarna. Pojęcie sufozyjności gruntu jest względne, ponieważ zależy od warunków obciążenia i gradientów filtracji. Zjawisko to może wystąpić przy niewielkich obciążeniach pionowych działających na grunt i stosunkowo dużych gradientach hydraulicznych (grunt sufozyjny), natomiast przy dużych obciążeniach i niewielkich gradientach hydraulicznych – nie występuje, tak jak w przypadku gruntu niesufozyjnego. Typowym 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 prędkości krytycznej, tj. kryterium hydraulicz-



Rys. 3. Uproszczona inwentaryzacja uszkodzeń sklepień nawy południowej Bazyliki

Fig. 3. Simplified stock-taking of Basilica southern aisle damage

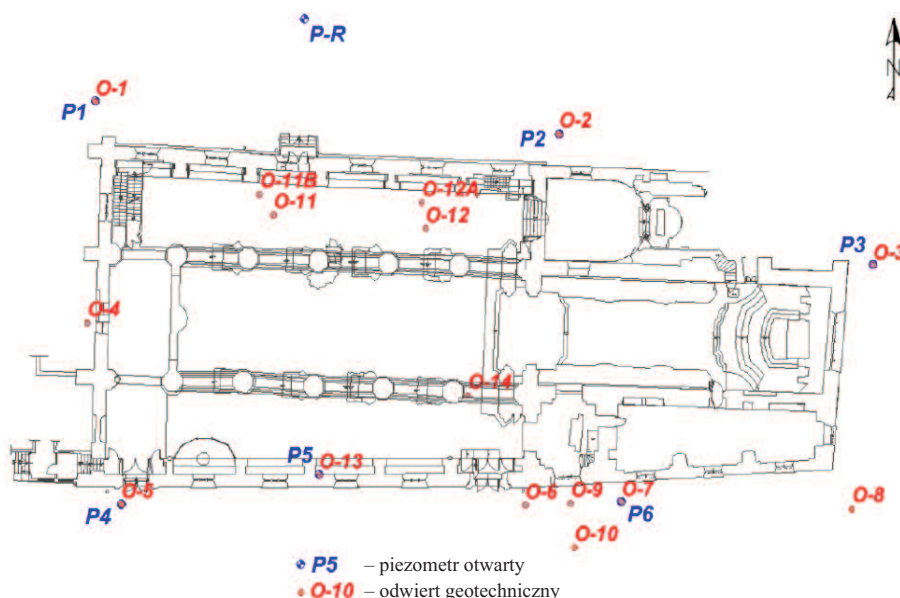
zometry do obserwacji stanu wody w podłożu. Lokalizację miejsc odwiertów badawczych i piezometrów zlokalizowanych wokół świątyni przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Cykliczne obserwacje prowadzono od lipca 2019 r. do końca maja 2020 r.

Pod Bazyliką i w jej bezpośrednim otoczeniu, do głębokości $4 \div 5$ m od poziomu terenu, występują nasypy niekontrolowane oraz grunty słabonośne w postaci namulów gliniastych i piasków próchniczych o niskim stopniu zagęszczenia. Poniżej tych warstw znaj-

dują się żwiry oraz piaski średnie i pospółka, od średniozagęszczonych do zagęszczonych.

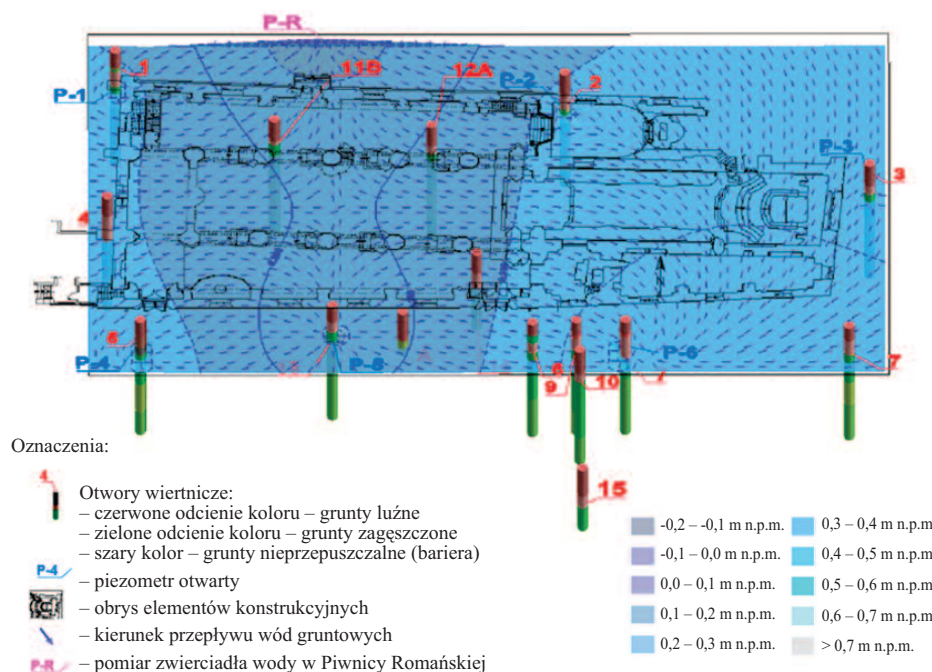
Na rysunku 6 przedstawiono mapę poziomów zwierciadła wody gruntowej wyrażonych w postaci izolinii rzędnych zwierciadła wody (m n.p.m.) wraz z kierunkami filtracji (niebieskie strzałki) w przypadku przykładowych dni pomiarowych. Wyniki obrazują, w jaki sposób zmienia się poziom wody i kierunki filtracji w podłożu Bazyliki.

Na rysunku 7 zaprezentowano mapę gradientów hydraulicznych – spadku zwierciadła wody gruntowej wraz z kierunkiem filtracji w kilku przykładowych dniach pomiarowych. Analizę kierunku filtracji wykonano z zastosowaniem oprogramowania Aquaveo GMS bazującego na metodzie różnic skończonych, z użyciem modelu MODFLOW [20]. Grunt w obszarze Bazyliki zamodelowano za pomocą elementów o odpowiednich parametrach współczynnika filtracji, przyjętych na podstawie rodzajów gruntu z wykonanych wcześniej badań terenowych. Elementy modelujące podłoże gruntove miały wymiar 2×2 m. Poziomy zwierciadła wody w modelu zostały obliczone na podstawie wartości z punktowych pomiarów piezometrycznych, przyjmowanych w modelu jako warunki brzegowe I rodzaju.



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

Fig. 4. Location of subsoil test boreholes and groundwater level observation piezometers

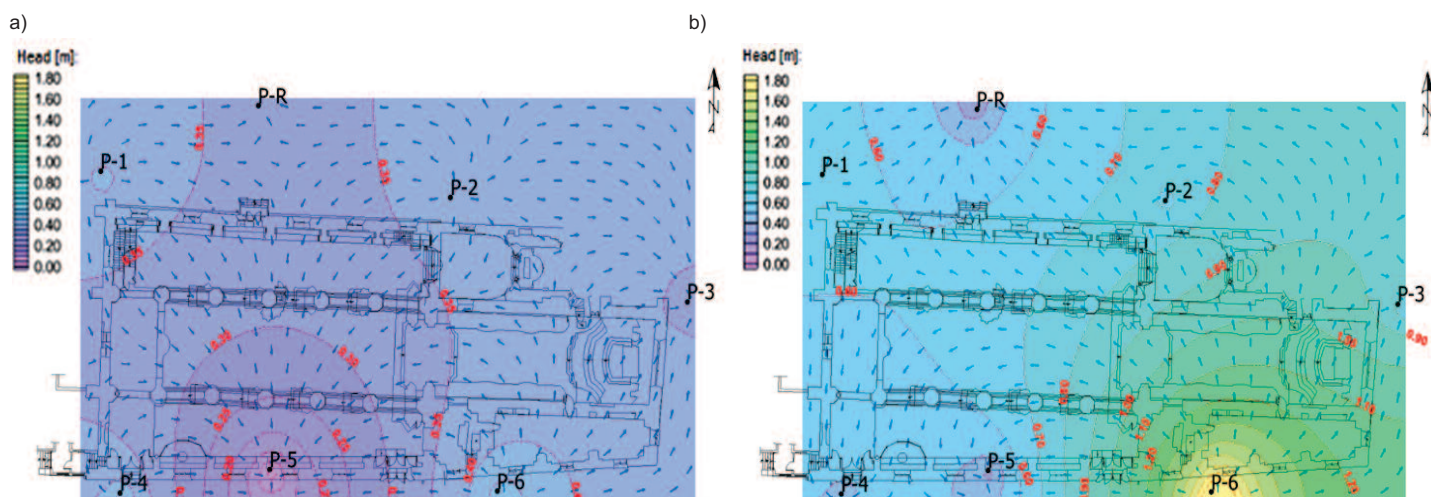


Rys. 5. Mapa poziomów zwierciadła wody gruntowej z zaznaczonymi profilami gruntów w miejscu odwiertów i piezometrów wraz z kierunkami filtracji z 31.07.2019 r. na tle rzutu budynku Bazyliki w poziomie przyziemia

Fig. 5. Groundwater table level map with marked soil profiles at the borehole and piezometer location, with seepage directions for 31.07.2019, against the background of the Basilica basement level plan

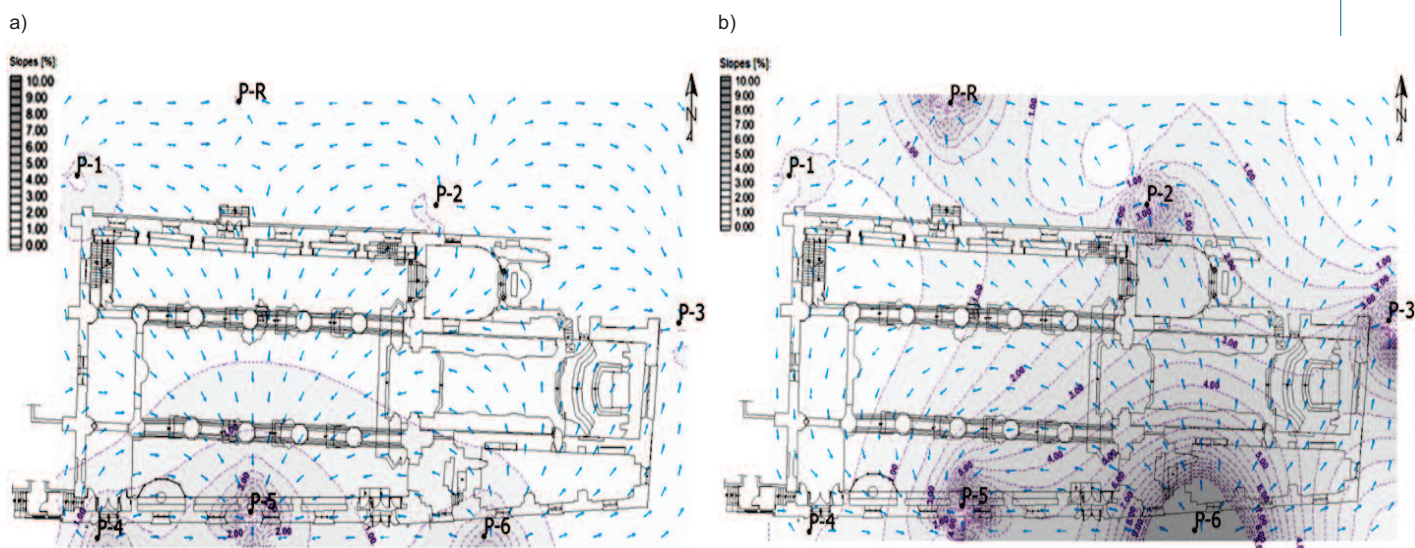
Analiza pomiarów filtracyjnych gruntu

Wyniki badań przedstawione na rysunkach 6 i 7 wskazują, że w podłożu pod i wokół budynku Bazyliki występuje zjawisko deformacji filtracyjnych wywołanych przepływającą wodą gruntoową. Zakres tego zjawiska można określić jako sufozję i opisać wartością gradientu hydraulicznego lub prędkości filtracji powodującej mechaniczne wypłukiwanie drobnych cząstek gruntu przez wodę opadową oraz podziemną, która infiltruje przez ośrodek gruntoowy, doprowadza-



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. Groundwater table level map with seepage directions, against the background of the Basilica basement level plan for: a) July 2019 (averaged); b) February 2020 (averaged)



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. Map of local groundwater table declines with seepage directions, against the background of the Basilica basement level plan for a) July 2019 (averaged); b) December 2019 (averaged)

jąc ostatecznie do załamania szkiele-
tu gruntowego i powstawania osia-
dań. Wyniki przeprowadzonych po-
miarów pokazały, że w okresie obser-
wacji wartość gradientów wynosiła
 $5,3 \div 8,3\%$ i na analizowanych odcin-
kach w podłożu obiektu przekroczony
został uśredniony gradient hydraulicz-
ny w przypadku poszczególnych rodza-
jów gruntu, jakie występują pod obiek-
tem. Może to wywoływać zjawisko su-
fozji.

Uzyskane wizualizacje kierunku
przepływu wody wskazują, że w ob-
szarze budynku Bazyliki występują

również zmiany kierunku przepływu
wody. Ich intensywność na tak niewiel-
kim obszarze jest znaczna i nienatural-
na, a wielkość zmian kierunku przepły-
wu istotna z powodu zachodzenia
niekorzystnych zjawisk filtracyjnych
w podłożu.

Szczegółowa analiza przypadku de-
formacji podłoża gruntowego wokół
budynek Bazyliki pozwala na sformu-
łowanie tezy, że przyczyna zniszcze-
nia podłoża gruntowego jest zbliżona
do sytuacji przedstawionej w [4].
Wówczas również występowały okre-
sowe intensywne przepływy spowodo-

wane działaniem wód opadowych po-
wodujących deformacje filtracyjne
i zmiany parametrów gruntowych.

Koncepcje rozwiązań projektowych zabezpieczenia budynku Bazyliki

W praktyce **jedynym skutecznym
sposobem zabezpieczenia budynku
przed rozwojem deformacji filtracyj-
nych gruntu jest stabilizacja poziomu
wody w podłożu gruntowym.** Jest to
możliwe w wyniku wprowadzenia
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 zainwentaryzowany drenaż, który przez studnie pośrednie odprowadza wodę do kanalizacji deszczowej. Jak wykazały odkrytki, wokół budynku znajdują się również liczne niezainwentaryzowane dreny, pochodzące z różnych okresów, wykonane na różnych poziomach posadowienia, z których część jest drożna i umożliwia nieuporządkowaną transmisję wody. Woda ta zaburza w sposób niekontrolowany pracę drenów inwentaryzowanych i powoduje lokalne deformacje filtracyjne pod konstrukcją Bazyliki, przez przekroczenie gradientów krytycznych w poszczególnych warstwach gruntowych.

W celu uporządkowania gospodarki wodnej należałoby zidentyfikować, a następnie zlikwidować wszystkie dreny, 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 potwierdza ją odczyty w piezometrach.

Prowadzone pomiary wskazują, że nie występuje bezpośredni związek pomiędzy realizacją robót budowlanych w bezpośrednim i pośrednim sąsiedztwie budynku Bazyliki a poziomem wód gruntowych. Dotyczy to przede wszystkim prac związanych z inwestycjami kubaturowymi prowadzonymi w centrum Gdańska, obejmujących m.in. realizację 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 połaci 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, przede wszystkim posadzki w obszarze bryły głównej oraz gruntu pod ceglаныmi słupami. W konsekwencji wystąpiły uszkodzenia rozpartych na nich sklepień ceramicznych. Było to spowodowane głównie brakiem stabilizacji poziomu wody w podłożu gruntowym. Sposobem przeciwdziałania dalszym uszkodzeniom 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 ustalenia 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, Lupieżowicz 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 spękania Kościoła parafialnego Św. Rocha w Ja-

zgarzewie. 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, Hojdyś 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] Matyszek 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, Petruła 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.