

Tomasz Abel, Ph.D. Eng.^{1*)}

ORCID: 0000-0003-0020-1614

Beata Nienartowicz, Ph.D. Eng.²⁾

ORCID: 0000-0002-3759-0812

Sylwester Stankiewicz, M.Sc.³⁾

Porosity testing of the structure surface layer

Badanie porowatości powierzchniowej warstwy konstrukcji obiektu budowlanego

DOI: 10.15199/33.2025.05.13

Abstract: Civil structures operating in humid and wet environments, in particular water and sewage infrastructures that are in contact with aggressive chemical compounds, are particularly vulnerable to a wide range of damages. Maintaining the proper technical condition of this group of structures requires protecting them against the ingress of water along with the chemical compounds dissolved in the water, hence porosity is the key parameter of the surface protective layer.

Keywords: structural repair; porosity, durability; watertightness.

Streszczenie: Obiekty budowlane pracujące w środowiskach wilgotnych i mokrych, a przede wszystkim obiekty infrastruktury wodno-kanalizacyjnej mające kontakt z agresywnymi związkami chemicznymi, są szczególnie narażone na wiele uszkodzeń. Utrzymanie prawidłowego stanu technicznego tej grupy budowli wymaga zabezpieczenia ich przed wnikaniem wody wraz z rozpuszczonymi w niej związkami chemicznymi. Kluczowym parametrem powierzchniowej warstwy ochronnej jest jej porowatość.

Słowa kluczowe: naprawa konstrukcji; porowatość; trwałość; wodoszczelność.

Civil industrial structures as well as water and sewage systems made of concrete and reinforced concrete are exposed to the corrosive effects of the environment in which they operate, which can lead to their damage or even failure. The key parameters determining the resistance of a structure to aggressive factors are a set of interrelated features that characterize the material in terms of its tightness. These features are porosity and its derivatives, i.e.:

- *watertightness* – a feature of a material that means resistance to water penetration into its structure, the right level of watertightness can be achieved through the correct selection of concrete components or repair mortar;

- *absorbability* – The ability of a material to absorb and retain water in its structure, mainly in capillary and open pores. Therefore, the porosity of the surface layer of the structure is a key parameter affecting the durability of the structure and its resistance to various operating factors. The knowledge of the porosity and its proper control are important not only during the construction phase, but also during the long-term operation of the built structure. The direct impact of porosity on the durability of the structure concerns the following extremely important aspects [1]:

- *corrosion resistance* – the surface layer of the structure (often of the same thickness as the reinforced steel cover) in case of high porosity allows aggressive compounds to penetrate deep into the structure, which affects the corrosion of the structural reinforcement. Water and aggressive substances penetrate the structure of the material easier and quicker. An example is sulfate corrosion, where sulfate ions react with cement, leading to cracking of the concrete and damage to the reinforcement. Corrosion processes, in the case of very high chemical

Obiekty budowlane infrastruktury przemysłowej oraz wodno-kanalizacyjnej wykonane z betonu oraz betonu zbrojonego narażone są na korozyjne oddziaływanie środowiska, w jakim pracują, co może prowadzić do ich uszkodzenia, a nawet awarii. Kluczowymi parametrami decydującymi o odporności obiektu na działanie czynników agresywnych jest zbiór wzajemnie ze sobą powiązanych cech, charakteryzujących materiał pod względem jego szczelności. Są nimi porowatość oraz jej pochodne, tj.:

- *wodoszczelność* – oznaczająca odporność na przenikanie wody w jego strukturę; odpowiedni poziom wodoszczelności możliwy jest do osiągnięcia przez dobór składników betonu lub zaprawy naprawczej;

- *nasiąkliwość* – zdolność materiału do wchłaniania i zatrzymywania wody, głównie w porach kapilarnych i otwartych. Wynika z tego, że porowatość powierzchniowej warstwy konstrukcji, to kluczowy parametr wpływający na trwałość obiektu i jego odporność na różnorodne czynniki eksploatacyjne. Wiedza na temat wielkości porowatości oraz jej właściwa kontrola są istotne nie tylko podczas budowy obiektu, ale także w okresie jego wieloletniej eksploatacji. Bezpośredni wpływ porowatości na trwałość konstrukcji dotyczy takich aspektów jak [1]:

- *odporność na korozję* – w przypadku dużej porowatości warstwa powierzchniowa konstrukcji (często o grubości takiej jak otulina stali zbrojeniowej) umożliwia wnikanie w głąb konstrukcji związków agresywnych, co wpływa na korozję zbrojenia konstrukcyjnego. Przykładem jest korozja siarczanowa, gdzie jony siarczanowe reagują z cementem, prowadząc do pęknięcia betonu i uszkodzenia zbrojenia. Procesy korozyjne mogą być zjawiskami bardzo szybko postępującymi, prowadzącymi w krótkim czasie eksploatacji obiektu do jego znacznej degradacji (fotografia 1);

- *mrozoodporność* – obiekt zabezpieczony materiałem ochronnym (wierzchnia warstwa betonu lub zaprawa naprawcza) o małej porowatości ma dużą odporność na cykliczne

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

²⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska

³⁾ Immerbau sp. z o.o.

*) Correspondence address: tomasz.abel@pwr.edu.pl

aggressiveness of the environment, can be a very quickly progressing phenomena, leading to its significant degradation in a short period of operation of the structure (see Fig. 1);

- *frost resistance* – an object protected with a protective material (top layer of concrete or repair mortar) with low porosity has better resistance to cyclic freezing and thawing process. The water present in the pores changes its volume whenever water changes its state, which causes cracks and damage to the continuity of the material structure. The multiple cycles of freezing water accumulated in the structure of the material contributes to the constantly progressive degradation of the near-surface layers of the structure (see Fig. 2);



Photo 1. Concrete corrosion

Fot. 1. Korozja betonu

- *Water tightness and absorbability* – Porosity has an impact on the ability of the material to absorb water. A structure with lower porosity has better water tightness, which is particularly important in structures exposed to water, such as underground technical structures which constitute elements of the water and sewage network, or industrial networks. Building structures such as tanks, sedimentation tanks, separators, chambers are a special group that require high parameters of water tightness and minimization of water absorption (see photo 3),

- *resistance to chemical reactions* – high porosity increases the possibility of chemicals penetrating the material structure by, which can lead to undesirable reactions such as carbonation or reactions with sulfates. A structure made of a low-porosity material or protected with a surface layer guaranteeing high water tightness is more resistant to this type of destructive processes. The parameter of resistance to chemical reactions is particularly important for water and sewage infrastructure as well as industrial structures operating in particularly chemically aggressive environments and plays an important role in extending the failure-free service life of the structure (see Fig. 4).

The synergy of the occurrence of the above-mentioned features, whose direct and decisive indicator is porosity, is responsible for the durability of the structure. Therefore, in the case of repairs of concrete structures, the materials used for repair coatings should have the lowest possible porosity. When expecting the structure to operate for a long-term and in failure-free manner, it is crucial to consider the occurrence of primary and secondary porosity [2, 3]. The guarantee of low primary

zamrażanie i rozmrażanie. Woda obecna w porach w chwili zmiany stanu skupienia zmienia również swoją objętość, co powoduje powstawanie pęknięć i uszkodzeń ciągłości struktury materiału. Wielokrotność cykli zamrażania wody nagromadzonej w strukturze materiału przyczynia się do stale postępującej degradacji przypowierzchniowych warstw konstrukcji (fotografia 2);

- *wodoszczelność i nasiąkliwość* – porowatość wpływa na zdolność materiału do absorpcji wody. Struktura o małej porowatości ma dużą wodoszczelność, co jest szczególnie istotne w konstrukcjach narażonych na działanie wody, takich jak podziemne obiekty techniczne, będące elementami sieci wodno-



Photo 2. Frost-caused damage

Fot. 2. Uszkodzenia mrozowe

-kanalizacyjnej lub sieci przemysłowych. Konstrukcje budowlane, takie jak zbiorniki, osadniki, separatory, komory są szczególnie grupą obiektów wymagających dużej wodoszczelności i minimalnej nasiąkliwości (fotografia 3);

- *odporność na reakcje chemiczne* – duża porowatość zwiększa swobodę penetracji struktury materiału przez substancje chemiczne, co może prowadzić do reakcji niepożądanych, takich jak karbonatyzacja czy reakcje z siarczanami. Obiekt budowlany wykonany z materiału o małej porowatości lub zabezpieczony powierzchnią warstwą gwarantującą uzyskanie dużej wodoszczelności, jest odporny na tego typu procesy destrukcyjne. Odporność na zachodzące reakcje chemiczne jest szczególnie istotna w przypadku obiektów infrastruktury wodno-kanalizacyjnej oraz przemysłowej, pracujących w agresywnych chemicznie środowiskach i odgrywa istotną rolę w wydłużeniu bezawaryjnego czasu użytkowania budowli (fotografia 4).

Synergia występowania wymienionych cech, których bezpośrednim wskaźnikiem decydującym o ich wartości jest porowatość, odpowiada za trwałość konstrukcji, dlatego też materiały stosowane do wykonywania powłok naprawczych powinny charakteryzować się jak najmniejszą porowatością.

W odniesieniu do wieloletniej, bezawaryjnej eksploatacji obiektu należy zwrócić uwagę na fakt występowania porowatości pierwotnej oraz wtórnej [2, 3]. Zagwarantowanie przez warstwę naprawczą małej porowatości pierwotnej stanowi podstawę do zapewnienia wymaganej trwałości wykonanej naprawy oraz właściwego stanu technicznego naprawianego



Photo 3. Water leakage – leakage of the material structure
Fot. 3. Przecieki wody – nieszczelność struktury materiału

porosity by the repair layer is the basis for ensuring the required durability of the repair and the proper technical condition of the repaired structure. On the other hand, secondary porosity (occurring during the period of the use of the structure) should not tend to increase the number of pores in the mortar layer used in the course of renovation works in the structure.

Porosity testing using the GWT method

All construction works, including renovation works, must be completed with a successfully conducted acceptance of the completed scope of works. Acceptance of construction work is a set of formal and technical activities confirming the performance of an obligation in accordance with the contract, design documentation, standards and applicable requirements regarding the fulfilment of technical conditions for the performance of specific groups of construction works [4]. The inspection of a completed construction project often requires technical tests to determine the performance of the construction materials used. When it is required to determine the resistance of the repair layer of a structure to the penetration of water and the chemical compounds it contains, it is necessary to determine the porosity of the repair material. This test should be carried out on the structure at the point of application of the repair material.

One of the available research methods, based on the use of portable equipment, is the GWT Method [5]. This method allows a quick non-destructive evaluation to be carried out directly on the object. In addition to the use of GWT equipment to perform control acceptance tests, this method is also used in the course of diagnostics of existing water, sewage and industrial infrastructure during expert work aimed at determining the actual technical condition of the structure. The need to estimate the water tightness of the near-surface layer of the structure is also the basis for the use of GWT equipment.

The GWT apparatus allows the measurement of water penetration (as a test medium) into the surface to be tested (repair mortar or concrete) as a result of applying fixed pressure. The idea behind the method is to load the tested surface of the material to be tested with water pressure of a certain value, over a fixed time interval. The sealed pressure chamber is fixed to the surface with two anchored clamps, or with a mounting plate (pressure ring). The chamber at the contact point with the tested surface is equipped with a gasket which, in order to ensure the



Photo 4. Surface chemical damage
Fot. 4. Powierzchniowe uszkodzenia chemiczne

obiekty. Z kolei porowatość wtórna (pojawiająca się w okresie użytkowania obiektu) nie powinna charakteryzować się tendencją do zwiększania liczby porów w warstwie zaprawy, zastosowanej w toku prac remontowych w obiekcie.

Badania porowatości z wykorzystaniem metody GWT

Wszelkie roboty budowlane, w tym prace remontowe, muszą być zakończone pozytywnym ich odbiorem. Oznacza to zespół czynności formalnych oraz technicznych potwierdzających wykonanie zobowiązania zgodnie z umową, dokumentacją projektową, normami oraz obowiązującymi wymaganiami dotyczącymi spełnienia warunków technicznych wykonania określonych grup robót budowlanych [4].

Realizacja czynności kontrolnych, zamierzenia budowlanego wiąże się często z koniecznością przeprowadzenia badań technicznych, umożliwiających ustalenie parametrów zastosowanych wyrobów budowlanych. W przypadku konieczności określenia odporności warstwy naprawczej konstrukcji na penetrację wody i zawartych w niej związków chemicznych, niezbędne jest ustalenie porowatości materiału naprawczego. Badanie to powinno zostać wykonane na obiekcie w miejscu aplikacji materiału użytego do wykonania remontu. Jedną z dostępnych metod badawczych, z zastosowaniem przenośnej aparatury, jest metoda GWT [5], która umożliwia szybkie przeprowadzenie nieniszczącej oceny bezpośrednio na obiekcie. Poza zastosowaniem aparatury GWT do wykonywania kontrolnych badań odbiorowych, metoda ta znajduje zastosowanie również w toku diagnostyki istniejących obiektów infrastruktury wodno-kanalizacyjnej i przemysłowej w trakcie prowadzenia prac eksperckich, mających na celu ustalenie rzeczywistego stanu technicznego konstrukcji. Potrzeba szacunkowego określenia wodoszczelności przypowierzchniowej warstwy konstrukcji również stanowi podstawę do wykorzystania aparatury GWT.

Aparatura GWT umożliwia pomiar przenikania wody (jako medium próbnego) do testowanej powierzchni (zaprawa naprawcza lub beton), w wyniku działania ustalonego ciśnienia. Ideą metody jest obciążenie badanej powierzchni materiału ciśnieniem wody o określonej wartości, działającym w ustalonym przedziale czasowym. Szczelna komora ciśnieniowa jest mocowana do powierzchni za pomocą dwóch zakotwiczonych zacisków lub płyty montażowej (pierścienia dociskowego). Komora

required tightness, can be attached to the surface with a suitable sealant (it can be e.g. roofing silicone or other commonly available sealant). The pressure chamber is filled with water and allows it to come into contact with the surface of the test element within the time required by the test instructions, i.e. from 10 minutes to several hours, depending on the purpose of the test [5]. The diagram of the equipment is shown in Photo 5.

Determining the required pressure, once the filling valve is closed, is done by tightening the upper cap to the pressure chamber, which acts as a piston, allowing the desired water pressure to be obtained. Its value is controlled by a dial pressure gauge mounted on the side wall. During the test, under the influence of the pressure generated, water penetrates into the test material, and the test pressure is maintained by means of a micrometer, which is part of the pressure chamber. The movement of the micrometer piston compensates for the volume of water penetrating into the material. The piston motion as a function of time is recorded, and the piston motion speed in $\mu\text{m/s}$ is used to characterize the tested surface in terms of porosity and water permeability. Ongoing micrometer adjustment allows the water pressure to be maintained at 1 bar (100 kPa) during the test. On-site testing typically takes 10 minutes, but longer time and higher pressures (up to 500 kPa) may be required when testing materials with low permeability values. The GWT equipment can be used for both, vertical and horizontal planes. For this purpose, it is equipped with two different sets for filling the pressure chamber with water. The loss of water in the pressure chamber is measured [5].

As a criterion for the assessment of the porosity of the material, carried out directly on the object using the GWT method, the value of the amount of liquid entering the structure of the material during the test should be used. This value is determined by formula (1) based on Darcy's Law, which determines the flow of a liquid through a porous medium. The obtained values allow to determine the estimated value of porosity, which makes it possible to predict the durability of the repair.

$$C_{pc} = \frac{q}{(b \cdot (P - L))} \quad (1)$$

liquid flow

$$q = \frac{B \cdot (g_1 - g_2)}{(A \cdot t)} = \frac{78,6 \cdot (g_1 - g_2)}{3018 \cdot t} = \frac{0,026 \cdot (g_1 - g_2)}{t} \quad (2)$$

where:

C_{pl} – mortar watertightness coefficient (depending on the porosity value);
 b – percentage content of cement and other components in the mortar (assumption of aggregate impermeability);
 P – pressure level at which the test was performed;
 L – height of the water column acting on the mortar surface (15 mm);
 A – mortar surface on which water pressure acts, value equal to 3018 mm² (diameter 62 mm);

na styku z badaną powierzchnią wyposażona jest w uszczelkę, która w celu zapewnienia wymaganej szczelności może być mocowana do powierzchni za pomocą odpowiedniego uszczelnacza (np. silikonu dekarckiego lub innego powszechnie dostępnego środka uszczelniającego). Komora ciśnieniowa jest wypełniona wodą i umożliwia jej kontakt z powierzchnią testowanego elementu w czasie wymaganym instrukcją wykonania badania, tj. od 10 min do kilku godzin, w zależności od celu testu [5]. Schemat aparatury pokazano na fotografii 5.

Ustalenie wymaganego ciśnienia, po zamknięciu zaworu napełniającego, odbywa się przez dokręcanie do komory ciśnieniowej górnej nasady, która działając jak tłok umożliwia uzyskanie

żądanego ciśnienia wody. Jego wartość kontrolowana jest przez manometr zegarowy, zamontowany na bocznej ścianie. Podczas badania, pod wpływem wytworzonego ciśnienia, woda przenika do badanego materiału, a ciśnienie próbne jest utrzymywane za pomocą mikrometru, będącego elementem komory ciśnieniowej. Ruch tłoka mikrometru kompensuje objętość wody przenikającej do materiału. Rejestracji podlega ruch tłoka w funkcji czasu, a prędkość ruchu tłoka [$\mu\text{m/s}$] wykorzystuje się do scharakteryzowania porowatości i wodoprzepuszczalności badanej powierzchni. W trakcie

badania bieżąca regulacja mikrometru umożliwia utrzymanie ciśnienia wody na poziomie 1 bara (100 kPa). Badania przeprowadzane na placu budowy trwają zwykle 10 min, ale może być wymagany dłuższy czas i większe ciśnienie (do 500 kPa), w przypadku badania materiałów o małej przepuszczalności. Aparatura GWT może być stosowana zarówno do płaszczyzn pionowych, jak i poziomych. W tym celu wyposażona jest w dwa różne zestawy do napełniania komory ciśnieniowej wodą. Pomiarowi podlega ubytek wody znajdującej się w komorze [5].

Jako kryterium oceny porowatości materiału, dokonywanej bezpośrednio na obiekcie za pomocą metody GWT, należy przyjąć ilość cieczy dostającej się do struktury materiału podczas badania. Wartość tę określa wzór (1) bazujący na prawie Darcy'ego, określającego przepływ cieczy przez ośrodek porowaty. Uzyskane wartości pozwalają ustalić szacunkową wartość porowatości, co umożliwia przewidywanie trwałości naprawy:

$$C_{pc} = \frac{q}{(b \cdot (P - L))} \quad (1)$$

przepływ cieczy

$$q = \frac{B \cdot (g_1 - g_2)}{(A \cdot t)} = \frac{78,6 \cdot (g_1 - g_2)}{3018 \cdot t} = \frac{0,026 \cdot (g_1 - g_2)}{t} \quad (2)$$

gdzie:

C_{pl} – współczynnik wodoszczelności zaprawy (zależny od wielkości porowatości);
 b – procentowa zawartość cementu i innych składników w zaprawie (założenie nieprzepuszczalności kruszywa);
 P – poziom ciśnienia, przy którym przeprowadzono test;



Photo 5. GWT equipment during mortar sample testing
Fot. 5. Aparatura GWT w trakcie badania próbki zaprawy

B – the surface of the pin of the micrometric screw pressed into the GWT chamber, the value is equal to 78.6 mm with the pin diameter of 10 mm;
 g_1 – reading from a micrometric screw at the beginning of the test in [mm];
 g_2 – reading from a micrometric screw at the end of the test in [mm];
 t – duration of the study, expressed in [s].

In the course of many years of research [6, 7], it has been determined that the depth of water ingress is a linear function of time [6], where the time is measured from the moment the GWT chamber is filled with water. Therefore, the following function can be applied to the obtained test results:

$$h(t) = a + s\sqrt{t} \quad (3)$$

where:

$h(t)$ – depth of water penetration into the structure of the material [mm]
 a – measured value of the depth of penetration of the specimen [mm],
 s – sorbtion index [mm/t^{0.5}]

This relationship allows to estimate the predicted in-depth penetration of the material structure.

The GWT equipment, thanks to additional mounting elements, can also be used as laboratory equipment to determine the degree of water penetration of core samples taken from the structural elements of the object. Thanks to the use of GWT equipment and the results obtained during the research, it is possible to calculate the depth of water penetration as a function of time, using the formula for the flow of liquid – q (formula no. 2 indicated above).

Of note, in addition to the typical application of the GWT apparatus, i.e. testing concrete and other cement-based mineral materials, the equipment in question can be used to test the tightness of brick walls in the case of diagnosing the problem of their dampness as a result of rainfall. Tests carried out on this type of building partitions can make it possible to demonstrate higher than permissible permeability of bricks and enable the correct selection of technology for removing irregularities, e.g. by hydrophobization of the walls with appropriate agents.

The GWT test can be an alternative to laboratory tests, which involve the assessment of the concrete (or coating layers) resistance to the flow of water under pressure [8, 9]. The basic laboratory tests are the test of water permeability under pressure, performed on the basis of the guidelines contained in the PN-EN 206+A2 standard [10] and the test of the depth of penetration of water under pressure, performed based on the PN-EN 12390-8 standard [11]. The test of water permeability under pressure requires the collection of core samples with a diameter of 100 mm and a length of 150 mm, which, under laboratory conditions, are subjected to a gradual increase in water pressure every 24 hours by 0.2 MPa, until permeation occurs or until the maximum pressure value is reached. The basic scope of application of the test is to determine the degree of water tightness of concrete. In the course of the test, the pressure in MPa is determined that concrete (or other mineral material) can withstand without water permeation. The test takes several days and is completed if 3 out of 6 samples have a leak. Pressurized water penetration depth testing involves subjecting the sample to 0.5 MPa water for 72 hours. After this time, the sample is broken up and the depth into which the water has penetrated the concrete is measured. The condition required for

L – wysokość słupa wody działającego na powierzchnię zaprawy (15 mm);
 A – powierzchnia zaprawy, na którą działa ciśnienie wody; wartość 3018 mm² (średnica 62 mm);
 B – powierzchnia sworznia śruby mikrometrycznej wciskanego do komory GWT; wartość 78,6 mm przy średnicy sworznia 10 mm;
 g_1 – odczyt ze śruby mikrometrycznej na początku badania [mm];
 g_2 – odczyt ze śruby mikrometrycznej na końcu badania [mm];
 t – czas trwania badania [s].

Podczas wieloletnich badań [6, 7] ustalono, że głębokość wnikania wody jest liniową funkcją czasu [6], gdzie czas mierzony jest od momentu, gdy komora GWT została wypełniona wodą. Z tego powodu do uzyskiwanych wyników badań można odnieść następującą funkcję:

$$h(t) = a + s\sqrt{t} \quad (3)$$

gdzie:

$h(t)$ – głębokość wnikania wody w strukturę materiału [mm];
 a – zmierzona wartość głębokości penetracji próbki [mm];
 s – wskaźnik sorpcyjności [mm/t^{0.5}];

Zależność (3) pozwala na oszacowanie przewidywanej, wgłębnej penetracji struktury materiału. Aparatura GWT, dzięki dodatkowym elementom montażowym, może być wykorzystywana również jako sprzęt laboratoryjny, do określenia stopnia penetracji wody próbek rdzeniowych pobranych z elementów konstrukcyjnych obiektu. Zastosowanie aparatury GWT oraz wyników uzyskanych podczas prowadzonych badań umożliwia obliczenie głębokości penetracji wody jako funkcji czasu, przy użyciu wzoru (2), na przepływ cieczy q .

Należy podkreślić, że oprócz typowego zastosowania aparatury GWT, tj. badania betonu oraz innych mineralnych materiałów na bazie cementów, można ją wykorzystywać do testowania szczelności ścian murowanych z cegły w przypadku diagnozowania problemu ich zawilgacania, będącego skutkiem opadów deszczu. Badania przeprowadzone na tego typu przegrodach budowlanych mogą wykazać większą przepuszczalność cegieł niż dopuszczalna oraz umożliwić poprawny dobór technologii usunięcia nieprawidłowości, np. przez hydrofobizację ścian odpowiednimi środkami. Badanie GWT może być alternatywą dla badań laboratoryjnych, polegających na ocenie zdolności betonu (lub warstw powłokowych) do opierania się przepływowi wody pod ciśnieniem [8, 9]. Podstawowymi badaniami laboratoryjnymi są **badanie przepuszczalności wody pod ciśnieniem**, wykonywane wg normy PN-EN 206+A2 [10] oraz **badanie głębokości penetracji wody pod ciśnieniem**, wykonywane wg normy PN-EN 12390-8 [11]. Badanie przepuszczalności wody pod ciśnieniem wymaga pobrania próbek rdzeniowych o średnicy 100 mm i długości 150 mm, które w warunkach laboratoryjnych są poddawane stopniowemu wzrostowi ciśnienia wody, co 24 h o 0,2 MPa, aż do wystąpienia przesiąkania lub do osiągnięcia maksymalnej wartości ciśnienia. Podstawowy zakres zastosowania badania służy do ustalenia stopnia wodoszczelności betonu. W przebiegu badania wyznacza się wartość ciśnienia [MPa], które beton (lub inny materiał mineralny) jest w stanie wytrzymać bez przesiąkania wody. Badanie trwa kilka dni i jest zakończone, jeśli w trzech z sześciu próbek wystąpi przeciek. Badanie głębokości penetracji wody pod ciśnieniem polega na poddaniu próbki działaniu wody pod ciśnieniem 0,5 MPa przez 72 h. Po tym czasie próbkę rozbija się i mierzy głębokość, na

the material to be considered watertight is a penetration depth of less than 50 mm [11].

The tests described above are standard procedures in construction and road laboratories. Their use allows for the assessment of the quality and durability of structural elements. The limitations of these methods are the need to perform them in laboratory conditions on samples taken from the structure and the time of their execution. These elements limit the possibilities of quick determination of the surface tightness of the structure, performed on the construction site in the course of the commissioning activities. Laboratory tests can be used to control the quality of GWT tests. The results obtained on the construction site can be compared with those calculated in laboratory conditions, based on the methods described above.

Comparative Porosity Studies of Mineral Repair Mortars

The need to carry out commissioning activities based on the possible tests of mortar parameters carried out in-situ, requires the determination of the parameters of the repair material applied to the structure. Due to the fact that objects repaired with mineral mortars can operate in various, often variable environmental conditions, in order to gain the most comprehensive knowledge about possible differences in porosity values, reference samples were prepared for testing, conditioned in three different environments, i.e. weather and rainwater load, treated tap water load, demineralized water load. A group of mineral mortars widely used for repairs and renovations of water, sewage and industrial infrastructure facilities were tested. In addition, in order to determine the difference in porosity and related durability, a series of tests were carried out on concrete samples not covered with a layer of mineral mortar (see Fig. 5). The tested samples were fragments of concrete structures operated in changing weather conditions and subjected to cyclical processes of freezing (winter) and damping (precipitation) and drying, as well as impact of temperature (heating in summer).

A series of comparative tests for the concrete sample showed that the tested structure is characterized by good water tightness, exceeding the water tightness requirements for W8 class concrete, for which the assumed limit value is hydrostatic pressure of 0.8 MPa. The results obtained for the concrete sample are presented in Table 1.

The tests were carried out for four mortars used for repairs and extension of the durability of concrete and reinforced concrete elements of industrial and water and sewage infrastructure. All tested mortars are intended for structural repairs. They have very high resistance to abrasion, carbonation and chlorides. They are also characterized by high frost resistance. The basic properties of the tested samples are as follows:

- mortar no. 1 is a repair and protective mortar based on metallurgical cement, tailings and basalt aggregates with the addition of artificial and zirconia fibers,
- mortar no. 2 is a repair mortar based on sulphate-resistant cement and quartz and basalt aggregate with the addition of artificial and zirconia fibres,

jaką woda wniknęła do betonu. Warunkiem wymaganym do uznania materiału za wodoszczelny jest głębokość penetracji mniejsza niż 50 mm [11].

Opisane badania są standardowymi procedurami w laboratoriach budowlanych i drogowych. Ich zastosowanie pozwala na ocenę jakości i trwałości elementów konstrukcyjnych. Ograniczeniami tych metod jest konieczność wykonania ich w warunkach laboratoryjnych na pobranych z konstrukcji próbkach oraz czas ich realizacji. Elementy te ograniczają możliwość szybkiego ustalenia szczelności powierzchniowej konstrukcji podczas czynności odbiorowych na budowie. Badania laboratoryjne mogą być wykorzystywane do kontroli jakości badań GWT. Otrzymane na budowie wyniki można porównać z obliczonymi w warunkach laboratoryjnych z zastosowaniem opisanej metody.

Porównawcze badania porowatości mineralnych zapraw naprawczych

Konieczność przeprowadzania czynności odbiorowych na podstawie badań parametrów zaprawy realizowanych in situ wymaga ustalenia parametrów materiału naprawczego naniesionego na konstrukcję. W związku z tym, że obiekty naprawiane zaprawami mineralnymi mogą pracować w różnych, często zmiennych warunkach środowiskowych, w celu zdobycia jak najszerszej wiedzy na temat możliwych różnic wartości porowatości, do badań przygotowano próbki referencyjne, kondycjonowane w trzech środowiskach, tj.: obciążenie warunkami atmosferycznymi i wodą deszczową; obciążenie uzdatnioną wodą wodociągową oraz obciążenie wodą zdemineralizowaną. Badaniom poddano grupę zapraw mineralnych powszechnie stosowanych do wykonywania napraw i remontów obiektów infrastruktury wodno-kanalizacyjnej i przemysłowej. Ponadto w celu ustalenia różnicy wartości porowatości oraz związanej z tym trwałości przeprowadzono serię badań na próbkach betonowych niepokrytych warstwą zaprawy mineralnej. Przebadane próbki stanowiły fragmenty konstrukcji betonowych eksploatowanych w zmiennych warunkach atmosferycznych i poddawanych cyklicznym procesom przemarzania (okres zimowy), zawilgacania (opady atmosferyczne) i osuszania, jak również wpływem temperatury (nagrzewanie w okresie letnim).

Wykonana seria badań porównawczych próbki betonowej wykazała, że charakteryzuje się ona dobrą wodoszczelnością, przewyższającą wymagania stawiane betonom klasy W8, w przypadku której przyjętą wartością graniczną jest ciśnienie hydrostatyczne o wartości 0,8 MPa. Uzyskane wyniki zamieszczono w tabeli 1.

Badania dotyczyły czterech zapraw stosowanych do naprawy oraz przedłużenie trwałości elementów betonowych i żelbetonowych infrastruktury przemysłowej oraz wodno-kanalizacyjnej. Wszystkie badane zaprawy przeznaczone są do napraw konstrukcyjnych. Wykazują bardzo dużą odporność na ścieranie, karbonatyzację oraz działanie chlorków, a także mrozoodporność. Charakterystyka badanych próbek jest następująca:

- zaprawa nr 1 – zaprawa naprawcza i ochronna na bazie cementu hutniczego oraz kruszyw kwarcowych i bazaltowych z dodatkiem włókien sztucznych oraz cyrkonowych;

- mortar no. 3 is a repair mortar based on Portland cement and polymer-modified quartz aggregate,

- mortar no. 4 is a repair mortar based on Portland cement and quartz aggregate with the addition of microsilica.

The application of this group of materials, after proper preparation of the substrate, can be done manually or by mechanical spraying. Below are the results obtained during the examination of mortar no. 1 (photo 6), and in tables (Tables 2, 3 and 4).

The values obtained for all mortars are presented in Table 5, in which the value of liquid flow in the material and the water tightness coefficients obtained in the course of the tests were listed. The tests of the mortars were carried out for samples conditioned for a period of 6 months, in various environmental conditions, i.e. bathing in tap water, bathing in demineralized water and changing weather conditions. In the case of each of the repair mortars used, a very high value of surface watertightness was obtained, which proves low porosity, which translates directly into the durability of the structure.

Table 1. Test results for conducting the concrete sample C25/30
Tabela 1. Wyniki pomiarów próbki betonu C25/30

Micrometer screw reading		Duration of the study [s]	Liquid flow [$\times 10^{-3}$ mm/s]		Water tightness factor
at the start of the study	at the end of the study		Single measurement	Average measurement	
23.45	13.27	600	0.441875	0.456923	0.0316
22.50	11.85		0.462276		
20.35	9.60		0.466617		

Table 2. Measurement results for a sample from a tap water bath
Tabela 2. Wyniki pomiarów próbki z kąpeli w wodzie wodociągowej

Micrometer screw reading		Duration of the study [s]	Liquid flow [$\times 10^{-3}$ mm/s]		Water tightness factor
at the start of the study	at the end of the study		Single measurement	Average measurement	
16.15	16.10	600	0.0022	0.0014	0.0000
21.25	21.25		0.0000		
20.50	20.45		0.0022		

The obtained results indicate:

- significant increase in water tightness – at least 7 times, and in most of the tested cases several dozen times (increase in water tightness = reduction in the number of open pores),

- in two cases, full tightness of the mortar

- zaprawa nr 2 – zaprawa naprawcza na bazie cementu siarczanoodpornego oraz kruszywa kwarcowego i bazaltowego z dodatkiem włókien sztucznych oraz cyrkonowych;

- zaprawa nr 3 – zaprawa naprawcza na bazie cementu portlandzkiego oraz kruszywa kwarcowego modyfikowana polimerami;

- zaprawa nr 4 – zaprawa naprawcza na bazie cementu portlandzkiego oraz kruszywa kwarcowego z dodatkiem mikrokrzemionki.

Aplikacja tej grupy materiałów, po uprzednim prawidłowym przygotowaniu podłoża, może odbywać się ręcznie lub metodą natrysku mechanicznego. W tabelach 2, 3 i 4 zamieszczono wyniki uzyskane podczas badania zaprawy nr 1. Wartości uzyskane w przypadku wszystkich zapraw przedstawia tabela 5, w której dokonano zestawienia wartości przepływu cieczy w materiale oraz współczynników wodoszczelności. Badania dotyczyły próbek kondycjonowanych przez 6 miesięcy, w różnych warunkach środowiskowych, takich jak kąpiel w wodzie wodociągowej, kąpiel w wodzie zdemineralizowanej oraz zmienne warunki atmo-

Table 3. Measurement results for a sample from a demineralized water bath
Tabela 3. Wyniki pomiarów próbki z kąpeli w wodzie zdemineralizowanej

Micrometer screw reading		Duration of the study [s]	Liquid flow [$\times 10^{-3}$ mm/s]		Water tightness factor
at the start of the study	at the end of the study		Single measurement	Average measurement	
23.70	23.43	600	0.0117	0.0119	0.0003
20.90	20.65		0.0109		
20.10	19.80		0.0130		

Table 4. Measurement results for a sample exposed to variable atmospheric conditions
Tabela 4. Wyniki pomiarów próbki pozostającej w zmiennych warunkach atmosferycznych

Micrometer screw reading		Duration of the study [s]	Liquid flow [$\times 10^{-3}$ mm/s]		Water tightness factor
at the start of the study	at the end of the study		Single measurement	Average measurement	
20.27	20.15	600	0.0052	0.0049	0.0001
21.35	21.25		0.0043		
18.62	18.50		0.0052		

Table 5. Summary of results for the tested mortars

Tabela 5. Zestawienie wyników badanych zapraw

Conditioning parameters	Mortar no. 1		Mortar no. 2		Mortar no. 3		Mortar no. 4	
	Liquid flow [$\times 10^{-3}$ mm/s]	Water tightness factor	Liquid flow [$\times 10^{-3}$ mm/s]	Water tightness factor	Liquid flow [$\times 10^{-3}$ mm/s]	Water tightness factor	Liquid flow [$\times 10^{-3}$ mm/s]	Water tightness factor
Tap water	0,0014	0,0000	0,0000	0,0000	0,0534	0,0016	0,0243	0,0007
Demineralized water	0,0119	0,0003	0,0890	0,0028	0,0000	0,0000	0,0933	0,0027
Weather conditions	0,0049	0,0001	0,1244	0,0039	0,1378	0,0041	0,0093	0,0003

sferyczne. W przypadku każdej z wykorzystanych zapraw naprawczych uzyskano bardzo dużą wartość wodoszczelności powierzchni, co świadczy o małej porowatości, przekładającej się w sposób bezpośredni na trwałość obiektu.

Uzyskane wyniki wskazują na:

was achieved – no possibility of water penetration into the material structure,

- the value of water tightness depends on the environment in which the material works (repair mortar) – this issue requires further comparative research,

- the tested repair mortars with different chemical composition and different cement content behave differently depending on their conditioning environment, i.e.:

- tap water – water rich in chemical compounds – in particular calcium and magnesium ions and may contain various types of microbiological, chemical, mechanical or contamination from the treatment or distribution process.

- demineralized water – an environment deprived of almost all mineral compounds that may be important for the course of processes damaging the structure of the material subjected to constant contact with such an environment.

- weather conditions – the action of many variable external factors such as rainfall, temperature changes, sunlight, changes in humidity.

- from the point of view of the durability of the structure, it is fully justified to perform repairs of the structure with the use of mineral repair mortars – a significant increase in resistance to penetration of water and the chemical compounds contained in it has been observed.

The conducted tests give different results, for the same material under different conditioning conditions. This can lead to obvious misleading assessments, limiting their practical application in different environmental conditions. It should be noted, however, that regardless of the environment of conditioning the sample, the obtained values are very favourable and confirm very high parameters of water tightness and low porosity, which is the most important from the point of view of the durability of the object in the expected period of its use.

Summary

The durability of a civil structure is its most important feature, right after its mechanical properties (determined at the design stage). Porosity and water permeability are features on which the durability of the mineral surface (concretes and repair mortars) subjected to the influence of liquid and gaseous media from the environment directly depends. Diagnostics carried out using the GWT method, due to the ease and speed of its performance and effectiveness confirmed by these tests, can be an element of the technical assessment of the facility and acceptance activities in the case of reconstruction of surface layers of the structure.

The GWT test is one of the possible non-destructive tests for the assessment of the durability of the structure of concrete and mortars based on water absorption. Being able to perform measurements on site is very valuable, as the permeability of the material structure is highly dependent not only on the geometry, average diameter and continuity of the pores, but also on the size, shape and concentration of the hydration gel particles inside the pores. The pore mesh can change during mortar application due to the method of application and setting conditions (primary porosity), or over time due to late chemical re-

- znaczny wzrost wodoszczelności (co najmniej siedmiokrotny), a w większości przebadanych przypadków kilkudziesięciokrotny (wzrost wodoszczelności = zmniejszenie ilości porów otwartych);

- w dwóch przypadkach uzyskano pełną szczelność zaprawy, tzn. brak możliwości wnikania wody w strukturę materiału;

- wartość wodoszczelności zależy od środowiska, w jakim pracuje materiał (zaprawa naprawcza) – zagadnienie to wymaga prowadzenia dalszych badań porównawczych;

- przebadane zaprawy naprawcze o różnym składzie chemicznym oraz innej zawartości cementów zachowują się inaczej w zależności środowiska ich kondycjonowania, tj.:

- woda wodociągowa bogata w związki chemiczne, przede wszystkim jony wapnia i magnezu oraz mogąca zawierać różnego rodzaju zanieczyszczenia mikrobiologiczne, chemiczne, mechaniczne lub pochodzące z procesu uzdatniania lub dystrybucji;

- woda zdemineralizowana, czyli pozbawiona niemal wszystkich związków mineralnych mogących mieć wpływ na przebieg procesów uszkadzających strukturę materiału poddanego stałemu kontaktowi z takim środowiskiem;

- warunki atmosferyczne, a więc działanie wielu zmiennych czynników zewnętrznych, takich jak opady deszczu, zmiana temperatury, nasłonecznienie, zmiana wilgotności.

- z punktu widzenia trwałości konstrukcji w pełni zasadne jest wykonywanie napraw konstrukcji z zastosowaniem mineralnych zapraw naprawczych – stwierdzono znaczne zwiększenie odporności na penetrację wody i zawartych w niej związków chemicznych.

Przeprowadzone badania dały różne wyniki w przypadku tego samego materiału, w różnych warunkach kondycjonowania. Może to prowadzić do mylących ocen, ograniczających ich praktyczne zastosowanie w różnych warunkach środowiskowych. Wskazać jednak należy, że niezależnie od środowiska kondycjonowania próbki, uzyskane wartości są bardzo korzystne i potwierdzają bardzo dużą wodoszczelność oraz małą porowatość, co jest najistotniejsze z punktu widzenia trwałości obiektu w przewidywanym okresie jego użytkowania.

Podsumowanie

Trwałość obiektu budowlanego to najważniejsza cecha konstrukcji, zaraz po jej właściwościach mechanicznych (ustalanych na etapie projektowania). Porowatość i wodoprzepuszczalność są cechami, od których bezpośrednio zależy trwałość betonu oraz zaprawy naprawczej poddanej oddziaływaniu mediów ciekłych i gazowych pochodzących ze środowiska. Diagnostyka przeprowadzona metodą GWT, ze względu na łatwość i szybkość jej wykonania oraz potwierdzoną badaniami skuteczność, może być elementem oceny technicznej obiektu oraz jego odbioru w przypadku rekonstrukcji powierzchniowych warstw konstrukcji.

Badanie GWT jest jednym z możliwych nieniszczących testów dotyczących oceny trwałości struktury betonów oraz zapraw na podstawie absorpcji wody. Możliwość wykonania pomiarów na budowie jest bardzo cenna, ponieważ przepuszczalność struktury materiału w dużym stopniu zależy nie tylko od geometrii, średniej średnicy i ciągłości porów, ale także od wielkości, kształtu i stężenia cząstek żelu hydratacyjnego wewnątrz porów. Siatka

actions or environmental conditions (secondary porosity). The pore structure can reduce or expand its continuity, which will have a direct impact on the material's resistance to the penetration of water and the chemicals it contains.

Technical specifications for the conditions of work often require that repair layers meet high criteria in terms of water penetration. With the use of GWT equipment, it is possible to establish a correlation between the average water flux measured in a short time and the depth of water penetration measured on laboratory samples tested on the basis of standard guidelines [10, 11].

Tests carried out with the use of GWT equipment are characterized by simplicity of execution and the possibility of performing them on the construction site, in the place where the repair material was applied. Performing the tests that are the subject of the article before the repair of the facility, i.e. on the existing structure, allows you to expand your knowledge about the water tightness and porosity of concrete, which can be an important element of designing the scope of renovation works. The knowledge gained in the course of diagnostic works such as concrete class tests, corrosion extent tests, sclerometric measurements and other diagnostic tests regarding strength parameters (e.g. pull-off and pull-out tests) supplemented with GWT tests provides a complete picture of the technical condition of the structure, which allows for the correct selection of the scope, technology and materials necessary to perform repair work. The GWT testing, performed as a control test in the course of determining the technical condition of the facility is an important element of diagnostic work.

The scope of the tests described in this article confirms the need to continue them in order to determine the changes in the tested parameters during the operation of the repaired structure under specific environmental conditions. Such knowledge will allow to determine the tendencies of the tested materials as to their maintenance of the required parameters in terms of resistance to the penetration of water and aggressive chemical compounds contained in it.

porów może się zmieniać podczas aplikacji zaprawy ze względu na sposób nanoszenia oraz warunki wiązania (porowatość pierwotna) lub z czasem ze względu na późne reakcje chemiczne czy warunki otoczenia (porowatość wtórna). Struktura porów może się zmniejszać lub rozbudowywać swoją ciągłość, co będzie miało bezpośredni wpływ na odporność materiału na penetrację wody i zawartych w niej związków chemicznych.

Specyfikacje techniczne dotyczące warunków wykonania robót wymagają często, aby warstwy naprawcze spełniały rygorystyczne kryteria dotyczące penetracji wody. Stosując aparaturę GWT, można ustalić korelację między średnim strumieniem wody mierzonym w krótkim czasie a głębokością penetracji wody mierzoną na próbkach laboratoryjnych, badanych wg wytycznych norm [10, 11].

Badania z zastosowaniem aparatury GWT charakteryzują się prostotą oraz możliwością ich wykonania na placu budowy, w miejscu gdzie została zrealizowana aplikacja materiału naprawczego. Wykonanie testów będących przedmiotem artykułu przed naprawą obiektu, tj. na konstrukcji istniejącej, umożliwia poszerzenie wiedzy o wodoszczelności i porowatości betonu, co może być istotnym elementem projektowania zakresu prac remontowych. Wiedza pozyskana w toku prac diagnostycznych, takich jak badania klasy betonu, badania zasięgu korozji, pomiary sklerometryczne oraz inne testy diagnostyczne dotyczące parametrów wytrzymałościowych (np. próby pull-off oraz pull-out), uzupełniona o badania GWT daje pełny obraz stanu technicznego konstrukcji. Umożliwia to prawidłowy dobór zakresu, technologii oraz materiałów niezbędnych do wykonania prac remontowych. Badanie GWT wykonane jako kontrolne, podczas ustalania stanu technicznego obiektu, stanowi ważny element prac diagnostycznych.

Opisany w artykule zakres wykonanych badań potwierdza konieczność ich kontynuacji, w celu ustalenia zmian badanych parametrów w czasie eksploatacji naprawionego obiektu w określonych warunkach środowiskowych. Wiedza taka pozwoli na ustalenie tendencji badanych materiałów, dotyczących utrzymywania przez nie wymaganej odporności na penetrację wody i znajdujących się w niej agresywnych związków chemicznych.

Photos: T. Abel

Fotografie: T. Abel

*Received: 30.12.2024
Revised: 25.02.2025
Published: 22.05.2025*

*Artykuł wpłynął do redakcji: 30.12.2024 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 25.02.2025 r.
Opublikowano: 22.05.2025 r.*

Literature:

- [1] Czarnecki L, Emmons PH. Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych, Wydawnictwo „Polski Cement”, 2003.
- [2] Babińska J. Badania porowatości w ocenie mrozoodporności betonów napowietrzanych, Prace Instytutu Techniki Budowlanej, vol.4, 2011.
- [3] Śliwiński J. Podstawowe właściwości betonu i jego trwałość, Cement Wapno Beton, 2009, 5:245–254.
- [4] Ustawa z 23 kwietnia 1964 r. – Kodeks cywilny (tekst jedn. Dz.U. z 2020 r. poz. 1740 ze zm.).
- [5] GWT- 4000 Instruction and Maintance Manual, Germann Instruments A/S, 2012.
- [6] Mohammadi B, Nokken M. Influence of moisture content on water absorption in concrete, 3rd Specialty Conference on Material Engineering & Applied Mechanics, 2013.
- [7] Moczko A, Moczko M. GWT – New Testing System for „in-situ” Measurements of Concrete Water Permeability, Procedia Engineering, 2016, 153:483–489
- [8] Golda A, Kaszuba S. Nasiąkliwość betonu – wymagania a metody badawcze, Cement Wapno Beton, 2009; 6:308–313.
- [9] Valenta O. The permeability and durability of concrete in aggressive conditions”. Proceedings of 10th International Congress on Large Dams, Montreal. 1970.
- [10] PN-EN 206+A2:2021-08, Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność, PKN, 2021.
- [11] PN-EN 12390-8:2019-08, Badania betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem, PKN, 2021.