



WOJCIECH KUBISSA<sup>1)</sup>  
WIOLETTA DOBACZEWSKA<sup>2)</sup>

## DIAGNOSTICS OF AIR PERMEABILITY OF CONCRETE IN ABUTMENTS OF THE VIADUCT IN PŁOCK

### DIAGNOSTYKA PRZEPUSZCZALNOŚCI POWIETRZA PRZEZ BETON W PRZYCZÓŁKACH WIADUKTU W PŁOCKU

**STRESZCZENIE.** Trwałość żelbetowych konstrukcji inżynierskich jest związana z odpornością otuliny zbrojenia na wnikanie agresywnych mediów ciekłych i gazów. Zgodnie z zaleceniami Eurokodu, grubość warstwy otuliny powinna być dostosowana do agresywności środowiska. Podejmuje się próby wykorzystania pomiarów przepuszczalności powietrza przez beton do oceny szczelności betonu w warstwie otuliny, aby wykryć ewentualne niedoskonałości wykonawcze. W artykule zaprezentowano wyniki badania przepuszczalności powietrza metodą Torrenta wykonane na przyczółkach drogowego obiektu inżynierskiego zbudowanego w Płocku. Przyczółki wykonano z betonu napowietrzonego klasy wytrzymałości C35/45, zaprojektowanego do klasy ekspozycji XC4, XD3, XF2. Kontrolę przepuszczalności powietrza przez beton przeprowadzono zgodnie ze szwajcarską normą SIA 262/1 w celu weryfikacji jakości wbudowanego betonu. Pomiar przepuszczalności powietrza wykonano również na formowanych próbkach kontrolnych w celach porównawczych. Wykazano przydatność metody, pozwalającej w sposób nieniszczący zweryfikować jednorodność otuliny w konstrukcji żelbetowej.

**SŁOWA KLUCZOWE:** diagnostyka, drogowy obiekt inżynierski, technologia betonu, trwałość, przepuszczalność powietrza, metoda Torrenta.

**ABSTRACT.** The durability of reinforced concrete engineering structures is related to the resistance of the reinforcement cover to the penetration of aggressive liquid and gaseous media. According to Eurocode recommendations, the cover thickness should be adapted to the aggressiveness of the environment. Attempts are being made to use measurements of air permeability of concrete to assess the concrete integrity in the cover layer in order to detect possible imperfections in workmanship. The paper presents the results of air permeability test using the Torrent method carried out on the abutments of the road viaduct built in Płock. The abutments were made of air-entrained concrete of strength class C35/45, designed for exposure classes XC4, XD3, XF2. The air permeability test was carried out in accordance with Swiss standard SIA 262/1 to verify the quality of concrete in the structure. Air permeability measurements were also made on moulded control specimens for comparison. The usefulness of the method allowing for non-destructive verification of the cover layer uniformity in reinforced concrete structures was demonstrated.

**KEYWORDS:** air permeability, concrete technology, diagnostics, durability, road engineering structure, Torrent method.

DOI: 10.7409/rabdim.021.010

<sup>1)</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, ul. Łukasiewicza 17, 09-400 Płock; wojciech.kubissa@pw.edu.pl (✉)

<sup>2)</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii; wiola.godlewska@interia.eu

## 1. WPROWADZENIE

Beton stosowany do budowy żelbetowych, drogowych obiektów inżynierskich jest narażony na działanie szkodliwych substancji znajdujących się w powietrzu atmosferycznym, w wodzie mającej kontakt z powierzchnią betonu, a także na działanie zmiennej temperatury powietrza, wywołującej zamrażanie i rozmrażanie wody w betonie w sezonie zimowym. W zależności od warunków środowiskowych i klasy ekspozycji, przy projektowaniu składu betonu stosuje się ograniczenie receptury zgodne z PN-EN 206 [1]. Inne wymagania dotyczące składników betonu przeznaczonego na drogowe obiekty mostowe zestawiono w Katalogu [2] rekomendowanym do stosowania przez Ministra Infrastruktury w roku 2020. Istotnymi właściwościami technicznymi betonu stosowanego do budowy obiektów inżynierskich są – poza wytrzymałością – m.in. mrozoodporność oraz określana różnymi metodami szczelność. Baroghel-Bouny [3] zaproponowała zestaw wskaźników trwałości betonu związanych z matematycznymi modelami degradacji konstrukcji: porowatość otwarta dla penetracji wody, współczynnik dyfuzji jonów chlorkowych, współczynnik przepuszczalności gazu i wody przez beton, zawartość portlandytu w stwardniałym zaczynie cementowym. Wskaźniki te mają związek z ochroną zbrojenia stalowego przed korozją.

Zgodnie z wymaganiami normowymi w klasach ekspozycji XF2-XF4, jako beton mrozoodporny stosuje się beton napowietrzony. Wprowadzenie do mieszanki betonowej domieszki składników powierzchniowo czynnych powoduje stabilizację drobnych pęcherzyków powietrza. Równomierne rozłożenie pęcherzyków wpływa na zmniejszenie naprężeń w betonie powstających na skutek procesu zamrażania – odmrażania wody w porach betonu. Beton napowietrzony we właściwy sposób, może być poddany znacznej liczbie cykli zamrażania - odmrażania bez istotnej zmiany swoich właściwości mechanicznych [4-7]. Rozwój wiedzy w dziedzinie technologii betonu pozwala na stosowanie zabiegów technologicznych, domieszek i dodatków do betonu, które ograniczają powstawanie rys i pęknięć w konstrukcjach masywnych [8-11]. Wpływa to pozytywnie na trwałość betonu, czyli wydłuża czas utrzymania właściwości użytkowych całej konstrukcji [12-15].

Jedną z przyczyn przedwczesnych uszkodzeń konstrukcji żelbetowych jest utrata właściwości ochronnych otuliny betonowej względem zbrojenia. Do uszkodzenia betonowej otuliny chroniącej zbrojenie dochodzi najczęściej na skutek wnikania szkodliwych substancji, występujących w powietrzu atmosferycznym oraz w wodzie mającej kontakt z powierzchnią betonu m.in.: dwutlenku węgla oraz chlorków [12, 16-18]. Jednoczesne działanie cyklicznego zamrażania – odmrażania i chlor-

## 1. INTRODUCTION

Concrete used in the construction of reinforced concrete road engineering structures is exposed to the effects of harmful substances in the air, in water in contact with the concrete surface, as well as to variable air temperatures that cause water in the concrete to freeze and thaw during the winter season. Depending on the environmental conditions and the exposure class, a limitation of the composition according to EN 206 [1] is used in the design of the concrete composition. Other requirements for concrete components for road bridge structures are summarized in the Catalogue [2] recommended for use by the Minister of Infrastructure in 2020. Apart from strength, the most important technical properties of concrete used for construction of engineering structures include frost resistance and tightness as determined by various methods. Baroghel-Bouny [3] proposed a set of concrete durability indices related to mathematical models of structural degradation: open porosity for water penetration, chloride ion diffusion coefficient, gas and water permeability coefficient of concrete, portlandite content in hardened cement paste. These indicators have to do with the protection of steel reinforcement against corrosion.

According to the standard requirements in exposure classes XF2-XF4, air-entrained concrete is used as frost-resistant concrete. The introduction of surfactant admixtures into the concrete mix results in the stabilization of fine air bubbles. Uniform distribution of voids reduces stress in the concrete resulting from the process of freezing – thawing of water in concrete pores. Properly air-entrained concrete can be subjected to a significant number of freeze – thaw cycles without significant change in its mechanical properties [4-7]. The development of knowledge in the field of concrete technology allows the use of technological treatments, admixtures and additives for concrete, which reduce the formation of cracks and fractures in massive structures [8-11]. This has a positive effect on the durability of concrete, that is, it increases the time to maintain the performance of the entire structure [12-15].

One of the causes of premature failure of reinforced concrete structures is the loss of protective properties of the concrete cover in relation to the reinforcement. Damage to the concrete cover protecting the reinforcement is most frequently caused by penetration of harmful substances present in the air and water which comes into contact with the concrete surface, e.g.: carbon dioxide and chlorides [12, 16-18]. The simultaneous action of freeze – thaw cycles and the impact of chloride cause major structural hazards, and the effects are difficult to predict

ków powoduje duże zagrożenia konstrukcji, a efekty są trudne do precyzyjnego prognozowania [19, 20]. W artykule [13], autorzy zwracają uwagę na słabe strony metod, stosowanych obecnie w większości krajów, mających zapewnić właściwą trwałość konstrukcji betonowych. Jednocześnie wskazują na badanie przepuszczalności powietrza jako jedną z metod umożliwiających ocenę jakości i właściwości użytkowych betonu. Postulują również wdrożenie wymagań podobnych do tych zawartych w pracy [21] w innych krajach. Na przydatność metod badania przepuszczalności gazu w diagnostyce konstrukcji zwrócono także uwagę w [22]. Przepuszczalność powietrza jest witalnym składnikiem systemu projektowania konstrukcji betonowych na trwałość, a spełnienie wymagań stawianych w [3, 23] pozwala prognozować trwałość konstrukcji nawet 100 lat. Recepturowe założenia PN-EN 206 uważa się za właściwe do 50 lat użytkowania konstrukcji. Kryteria oceny jakości betonu dotyczą zwykle konkretnej metody badania przepuszczalności. Porównywanie wyników uzyskanych różnymi metodami jest pomimo podawania przez autorów zależności empirycznych nieuzasadnione. W pracy [24] wykazano, że zależność między wynikami metody Torrenta i RILEM-Cembureau nie jest uniwersalna.

Metoda pomiaru przepuszczalności powietrza Torrenta, użyta w opisywanych w artykule badaniach jest uważana za użyteczną do oceny trwałości konstrukcji żelbetowych w różnych warunkach eksploatacji [25]. Została ona wykorzystana w praktyce do oceny jakości betonu m.in. w takich inwestycjach jak Port of Miami Tunnel (jeden z największych projektów budowlanych realizowanych w Stanach Zjednoczonych) [26] lub przeprawa mostowo-tunelowa Hongkong – Zhuhai – Makau [27]. W badaniach laboratoryjnych [28] wykorzystano metodykę wyznaczania przepuszczalności powietrza do oceny efektywności aktywnych dodatków mineralnych. Współczynnik przepuszczalności powietrza według Torrenta przez beton referencyjny i beton z dodatkami mieścił się w granicach od  $0,02 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  do  $0,27 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ . Wskutek zastąpienia części cementu popiołem lotnym wapiennym w betonie przy współczynniku efektywności popiołu  $k = 0,7$  stwierdzono tendencję zmniejszania się  $kT$ , a przy  $k = 1,0$  zaobserwowano tendencję niewielkiego wzrostu lub stabilizacji  $kT$ .

Określenie przepuszczalności powietrza przez beton za pomocą aparatu Torrenta i wykorzystanie wyników do oceny betonu w konstrukcji opisano w szwajcarskiej normie SIA 262/1 [29]. Określono między innymi sposób przygotowania betonowego podłoża do badania, metodykę wykonania badania, sposób raportowania otrzymanych wyników oraz sposób oceny betonu na ich podstawie. Zgodnie z normą SIA 262/1 w każdym punkcie pomiarowym przed badaniem przepuszczalności powietrza należy określić jego wilgotność. Pomimo

accurately [19, 20]. In the article [13], the authors draw attention to the weaknesses of methods, currently used in most countries, to ensure the proper durability of concrete structures. At the same time, they point to air permeability testing as one of the methods to evaluate the quality and performance of concrete. They also advocate the implementation of requirements similar to those in the paper [21] in other countries. The usefulness of gas permeability testing methods in structure diagnostics was also pointed out in [22]. Air permeability is a vital component of the design system of concrete structures for durability, and meeting the requirements set forth in [3, 23] makes it possible to predict the durability of structures for up to 100 years. The composition-related assumptions of PN-EN 206 are considered appropriate up to 50 years of the use of the structure. Criteria for evaluating the quality of concrete usually relate to a specific permeability test method. Comparison of results obtained by different methods is unjustified despite the empirical dependencies given by the authors. In [24], it was shown that the relationship between the results of the Torrent and RILEM-Cembureau methods is not universal.

The Torrent air permeability measurement method used in the study described in this paper is considered useful for assessing the durability of reinforced concrete structures under various service conditions [25]. It has been used in practice to assess the quality of concrete in such projects as Port of Miami Tunnel (one of the largest construction projects carried out in the United States) [26] or the bridge and tunnel crossing Hong Kong – Zhuhai – Macau [27]. In laboratory studies [28], the methodology for determining air permeability was used to evaluate the effectiveness of active mineral additives. The air permeability coefficient according to Torrent of reference concrete and concrete with additives ranged from  $0.02 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  to  $0.27 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ . As a result of replacing part of the cement with lime fly ash in the concrete at the ash efficiency factor  $k = 0.7$ , a tendency of decreasing  $kT$  was observed, and at  $k = 1.0$  a tendency of slight increase or stabilization of  $kT$  was observed.

The determination of air permeability of concrete using the Torrent apparatus and the use of the results to evaluate concrete in a structure is described in the Swiss standard SIA 262/1 [29]. The method of preparing the concrete substrate for the test, the method of performing the test, the method of reporting the results obtained and the method of evaluating the concrete on their basis have been specified, among other things. According to the SIA 262/1 standard, the moisture content of the air must be determined at each

rozwoju nowoczesnych urządzeń umożliwiających pomiar wilgotności brakuje jednoznacznych informacji określających na jakiej głębokości od powierzchni należy ją mierzyć [30-32]. Przy badaniu przepuszczalności powietrza aparatem Autoclam zaleca się pomiar na głębokości 40 mm od badanej powierzchni. Przedstawiane są informacje na temat braku konieczności korygowania wyników badania przepuszczalności o wpływ wilgoci w przypadku, gdy mierzona wilgotność względna na powierzchni badanego betonu jest niższa od 65 %. Przy takiej wartości większość wilgoci z kapilar jest usunięta i nie ma znacznego wpływu na wynik pomiaru przepuszczalności powietrza [31]. Brak jest jednoznacznej zależności umożliwiającej przeliczenie wyniku badania aparatem Torrenta  $kT$  w zależności od wilgotności betonu. Norma SIA 262/1 pozwala na pomiar, jeśli wilgotność mierzona aparatem Tramex jest niższa niż 5,5%. Wartość 5,5% jako granicę umożliwiającą badania przepuszczalności powietrza potwierdza także Torrent [33]. Wartość ta odpowiada stopniowi nasycenia 0,75 do 0,90.

W niniejszym artykule autorzy zaprezentowali wyniki badania przepuszczalności powietrza wykonanego na przy-czołkach obiektu inżynierskiego zrealizowanego w Płocku. Zaprezentowano na przykładzie zasady badania i oceny obiektów inżynierskich wg normy szwajcarskiej SIA 262/1. Określono jednorodność wyników oraz porównano je z wynikami uzyskanymi przy badaniach innych obiektów zaprojektowanych do użytkowania w podobnych warunkach oraz z wynikami uzyskanymi na próbkach z tego samego betonu jednak pielęgnowanych w inny sposób niż konstrukcja.

## 2. MIEJSCE WYKONANIA BADANIA

Badania przepuszczalności powietrza wykonano na żelbetowych podporach drogowego obiektu inżynierskiego wybudowanego przez Miejski Zarząd Dróg nad linią kolejową nr 33 Kutno - Brodnica w ciągu ulicy Kilińskiego w Płocku, zrealizowanego w ramach zadania inwestycyjnego pt. Rozbiórka istniejącego i budowa nowego wiaduktu nad linią kolejową nr 33 w ciągu ul. Kilińskiego w Płocku w ramach projektu „Rozwój zrównoważonej mobilności miejskiej na terenie Miasta Płocka – etap II”. Inwestycja składała się z dwóch etapów: etap I – wybudowanie nowego obiektu, etap II – rozbiórka istniejącego obiektu inżynierskiego. Obiekt został zaprojektowany w formie ramy jednonawowej o węzłach monolitycznych. Ustrój nośny wiaduktu stanowi konstrukcja zespolona płytowo-belkowa składająca się z dźwigarów HEB800 wykonanych ze stali S460HISTAR wraz ze współpracującą płytą pomostową. Płytę pomostową zaprojektowano w postaci płyt filigran z betonu C40/45 zbrojonych stalą A-IIIIN, wykończonych nadbetonem C35/45 o grubości 22 cm. Zespolenie konstrukcji stalowej z płytą pomostową wykonano za pomocą łączników sworzniowych. Podpory

measurement point before testing the air permeability. Despite the development of modern devices enabling moisture measurement, there is no unambiguous information specifying at what depth from the surface it should be measured [30-32]. When testing air permeability with the Autoclam apparatus, it is recommended to measure at a depth of 40 mm from the surface to be tested. Information is provided on no necessity to adjust the permeability test results for the effect of moisture when the measured relative humidity at the surface of the tested concrete is less than 65 %. At this value, most of the moisture is removed from the capillaries and does not significantly affect the result of the air permeability measurement [31]. There is no unambiguous relationship enabling recalculation of Torrent  $kT$  test result depending on concrete moisture. Standard SIA 262/1 allows the measurement, if the moisture measured by Tramex apparatus is lower than 5.5%. The value of 5.5% as the limit for air permeability testing is also confirmed by Torrent [33]. This value corresponds to a degree of saturation of 0.75 to 0.90.

In this paper the authors present the results of air permeability test carried out on the abutments of an engineering structure built in Płock. The principles of testing and assessment of engineering structures according to the Swiss Standard SIA 262/1 are presented as an example. The homogeneity of the results was determined and they were compared with results obtained from tests on other structures designed for use in similar conditions and with results obtained from specimens made of the same concrete but treated in a different way than the structure.

## 2. PLACE OF TESTING

The air permeability tests were performed on reinforced concrete supports of road engineering structure built by the Municipal Road Authority over the railway line no. 33 Kutno - Brodnica in the line of Kilińskiego street in Płock, executed within the framework of the investment task entitled: Demolition of the existing and construction of the new viaduct over the railway line no. 33 in the line of Kilińskiego street in Płock within the project “Development of sustainable urban mobility in the City of Płock – stage II”. The investment project consisted of two stages: stage I – construction of a new structure, stage II – demolition of the existing engineering structure. The building was designed as a single-nave frame with monolithic nodes. The superstructure of the viaduct is a composite plate-and-beam structure consisting of HEB800 girders made of S460HISTAR steel along with the associated bridge deck. The bridge deck was designed in the form of filigran slabs made of C40/45 concrete, reinforced with

wiaduktu zaprojektowano w formie przyczółków żelbetowych z betonu C35/45 w klasie ekspozycji XC4, XD3, XF2, ze skrzydłami wiszącymi, posadowione na palach CFA  $\phi 800$  o długości 11 m. Etap pierwszy inwestycji, budowę nowego obiektu, rozpoczęto 15 kwietnia 2020 r. 2 lipca 2020 r. zabetonowano przyczółek od strony ul. Norbertańskiej. Betonowanie przyczółka od strony południowej wykonano 31 lipca 2020 r. Budowę wiaduktu zakończono 9 grudnia 2020 r. Etap drugi, rozbiórkę istniejącego obiektu, rozpoczęto w połowie stycznia 2021 r. Na Rys. 1-3 przedstawiono budowany wiadukt, ustrój nośny z dwuteowników HEB800, oraz rozbiórkę istniejącego obiektu inżynierskiego.



Fig. 1. New road engineering structure over the railway line in Płock

Rys. 1. Nowy drogowy obiekt inżynierski nad linią kolejową w Płocku

Do wykonania betonu użyto cementu CEM I 42,5N-SR3 NA z cementowni Warta, kruszywa granitowego frakcji 2/8 oraz 8/16 mm z kopalni Siedlimowice oraz piasku frakcji 0/2 mm. Zastosowano domieszki – uplastyczniającą w ilości 1,0% m.c. i napowietrzającą w ilości 0,2% m.c. Współczynnik  $w/c$  wyniósł 0,4. Założono konsystencję mieszanki betonowej S3, zawartość powietrza w mieszance 4,0% i klasę wytrzymałości C35/45. Recepturę mieszanki przedstawiono w Tabl. 1.

Table 1. Concrete mix design [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Tablica 1. Receptura mieszanki betonowej [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Ingredient / Składnik	Contents / Zawartość [kg]
Cement CEM I 42.5N	390
Sand / Piasek 0/2 mm	659
Granite / Granit 2/8 mm	549
Granite / Granit 8/16 mm	604
Water / Woda	152
Plasticizing admixture Domieszka upłynniająca	3.90 (1.0% m.c.)
Air-entraining admixture Domieszka napowietrzająca	0.78 (0.2% m.c.)

A-IIIIN steel, finished with C35/45 concrete topping, 22 cm thick. The steel structure is combined with the bridge deck by means of pin connectors. The viaduct supports have been designed in the form of C35/45 reinforced concrete abutments in exposure class XC4, XD3, XF2, with hanging wings, founded on 11 m long CFA  $\phi 800$  piles. Phase one of the investment project, construction of the new structure, commenced on April 15, 2020. On July 2, 2020 the abutment facing Norbertańska street was concreted. Concreting of the abutment on the south side was completed on July 31, 2020. Construction of the viaduct was completed on December 9, 2020. Phase two, demolition of the existing structure, commenced in mid-January 2021. Figs. 1-3 show the viaduct under construction, the superstructure made of HEB800 I-beams, and the demolition of the existing civil engineering structure.



Fig. 2. Superstructure of the viaduct made of HEB800 I-beams (source: J. Czerwiński)

Rys. 2. Ustrój nośny wiaduktu z dwuteowników HEB800 (źródło: J. Czerwiński)



Fig. 3. Demolition of the existing engineering structure (source: J. Czerwiński).

Rys. 3. Rozbiórka istniejącego obiektu inżynierskiego (źródło: J. Czerwiński)

Wykonawca obiektu inżynierskiego wykonał kontrolne badanie wytrzymałości betonu na ściskanie po 28 dniach od betonowania na próbkach sześciennych o krawędzi 150 mm. Wytrzymałość na ściskanie próbek z przyczółków wyniosła od 44,1 MPa do 49,2 MPa, a wartości średnie wyniosły 47,3 MPa w przypadku przyczółka od strony południowej i 47,8 MPa w przypadku przyczółka od strony ul. Norbertańskiej. Zawartość powietrza w mieszance kontrolowanej na budowie przy rozładunku samochodów wynosiła od 3,4% do 5,5%. Opad stożka przy badaniu konsystencji mieszanki wyniósł od 100 do 170 mm.

### 3. BADANIE PRZEPUSZCZALNOŚCI POWIETRZA PRZEZ BETON

Badanie przepuszczalności powietrza zostało przeprowadzone, zgodnie z normą SIA 262/1, metodą Torrenta przy użyciu urządzenia produkowanego przez Proceq. Przed badaniem przepuszczalności, zgodnie z wytycznymi normy SIA 262/1, określono przy użyciu miernika Tramex CMEX II zawartość wilgoci  $RH$  w każdym punkcie pomiarowym. Wykonano po cztery pomiary  $RH$  obracając za każdym razem aparat pomiarowy o 90 stopni. W celu zbadania przepuszczalności metodą Torrenta, poprzez przyłożenie podciśnienia bliskiego próżni, wywołano przepływ powietrza przez beton w kierunku powierzchni badanego elementu. Badanie przepuszczalności powietrza zostało wykonane w miejscach, w których powierzchnia betonu była wystarczająco płaska i gładka, co umożliwiło prawidłowe przysianie sondy aparatu. Biorąc pod uwagę znaczny wpływ sposobu przygotowania badanej powierzchni na wynik badania przepuszczalności powietrza [34] zdecydowano się na badanie betonu w stanie naturalnym bez szlifowania powierzchni. Badanie przepuszczalności wykonano:

- na przyczółku od strony ul. Norbertańskiej po około 80 dniach od betonowania (badanie I),
- na przyczółku od strony południowej po około 50 dniach od betonowania (badanie II),
- na przyczółku od strony południowej po ok. 80 dniach od betonowania, pomiędzy badaniami przyczółek został wpiaskowany (badanie III),
- na próbkach betonowych o krawędzi 150 mm w laboratorium po około 80 dniach od betonowania (badanie IV),
- na próbkach betonowych o krawędzi 150 mm w laboratorium po około 170 dniach od betonowania (badanie V).

Układ elektroniczny aparatu Torrenta zapisywał przebieg wyrównywania się ciśnienia i automatycznie podawał wartość współczynnika przepuszczalności  $kT$  oraz grubość warstwy betonu biorącego udział w pomiarze  $L$ . Każdy pomiar trwał 720 sekund lub krócej w przypadku betonu o niższej przepuszczalności, w którym nastąpiła zmiana ciśnienia o więcej

For the concrete preparation, CEM I 42.5N-SR3 NA cement from the Warta cement plant, granite aggregate fractions 2/8 and 8/16 mm from the Siedlimowice mine and sand fraction 0/2 mm were used. Plasticizing admixture used was in the amount of 1.0% m.c. and air-entraining admixture in the amount of 0.2% m.c. The  $w/c$  ratio was 0.4. The consistency of concrete mix was assumed to be S3, air content in the mix 4.0% and strength class C35/45. The mix composition is presented in Table 1.

The contractor of the civil engineering structure performed a control test of the concrete compressive strength 28 days after concreting on cubic specimens with 150 mm edge. The compressive strength of the abutment specimens ranged from 44.1 MPa to 49.2 MPa, and the average values were 47.3 MPa for the abutment on the south side and 47.8 MPa for the abutment facing Norbertańska street. The air content of the site-controlled mix at car unloading ranged from 3.4% to 5.5%. The slump at the mix consistency test ranged from 100 to 170 mm.

### 3. TEST OF AIR PERMEABILITY OF CONCRETE

The air permeability test was carried out, according to the SIA 262/1 standard, using the Torrent method with an instrument manufactured by Proceq. Prior to permeability testing, the moisture content  $RH$  at each measurement point was determined using a Tramex CMEX II meter in accordance with the guidelines of SIA 262/1. Four  $RH$  measurements were taken, rotating the measuring apparatus by 90 degrees each time. To test the permeability using the Torrent method, air flow through the concrete was induced towards the surface of the test piece by applying negative pressure close to vacuum. The air permeability test was performed at locations where the concrete surface was sufficiently flat and smooth to allow proper suction of the device probe. Considering the significant influence of the method of preparation of the tested surface on the result of the air permeability test [34], it was decided to test the concrete in its natural state without grinding the surface. The permeability test was performed:

- on the abutment facing Norbertańska street – approximately 80 days after concreting (test I),
- on the abutment on the south side – approximately 50 days after concreting (test II),
- at the abutment on the south side – approximately 80 days after concreting, the abutment was sandblasted between tests (test III),
- on 150 mm edge concrete specimens in the laboratory approximately 80 days after concreting (test IV),

niż 25 mbar. Schemat badania przedstawiono na Rys. 4. Stanowisko badawcze przedstawiono na Rys. 5.

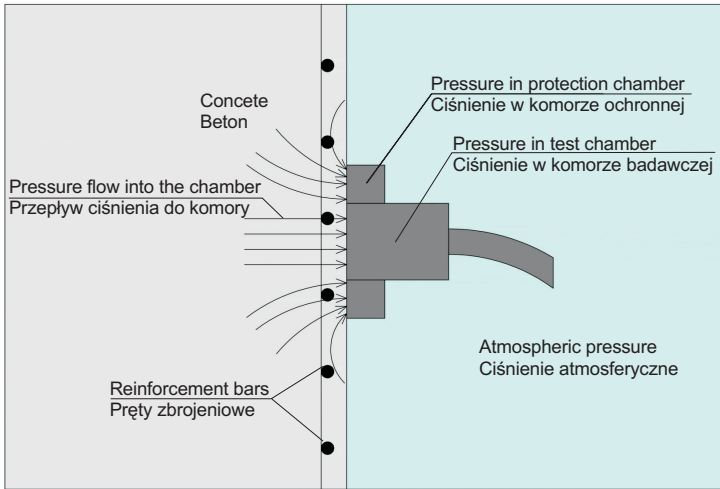


Fig. 4. Air permeability test scheme

Rys. 4. Schemat badania przepuszczalności powietrza

W normie SIA 262/1 określono maksymalne wartości współczynnika przepuszczalności powietrza. Maksymalna wartość współczynnika  $kT$  różni się w zależności od klasy ekspozycji betonu na działanie czynników zewnętrznych. W Tabl. 2 zestawiono maksymalne wartości współczynników. Szwajcarska norma określa również warunki weryfikacji otrzymanych wyników pomiarów uzyskanych w pojedynczym obszarze badawczym. Otrzymane wyniki przepuszczalności powietrza należy uznać za prawidłowe, jeżeli spośród sześciu pomiarów przepuszczalności powietrza na danym obszarze badanym tylko jeden pomiar przekracza wartość maksymalną. Jeżeli dwa pomiary przekroczą wartość maksymalną, należy wykonać sześć nowych pomiarów, z których tylko jeden pomiar może przekroczyć wartość maksymalną współczynnika  $kT$ , w innym przypadku należy podjąć działania naprawcze.

#### 4. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Badania przepuszczalności powietrza wykonano po około 80 dniach od betonowania w 22 punktach pomiarowych na przyczółku od ul. Norbertańskiej oraz po około 50 dniach w 21 punktach pomiarowych na przyczółku od strony południowej. Wyniki badania zestawiono w Tabl. 3. Punkty pomiarowe wybierano używając szablonu pozwalającego znaleźć miejsce bez lokalnych uszkodzeń powierzchni betonu, umożliwiające prawidłowe mocowanie sondy i pomiar. W punktach pomiarowych badana powierzchnia była płaska, gładka, pozbawiona większych uszkodzeń i nierówności. Badanie wykonano na powierzchni w stanie naturalnym. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na przyczółkach przedstawiono na Rys. 6 i 7.

- on 150 mm edge concrete specimens in the laboratory approximately 170 days after concreting (test V).

The electronics of the Torrent apparatus recorded the course of the pressure equalization and automatically provided the value of the permeability coefficient  $kT$  and the thickness of the concrete layer involved in the measurement  $L$ . Each measurement lasted 720 seconds or less for lower permeability concrete with a pressure change of more than 25 mbar. The test scheme is shown in Fig. 4. The test stand is shown in Fig. 5.

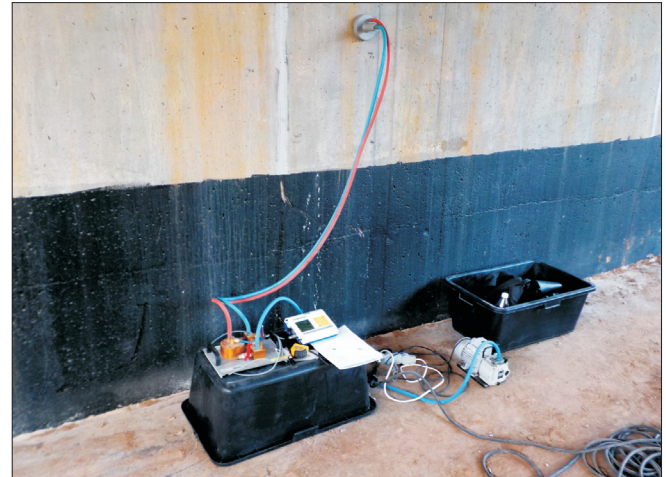


Fig. 5. Measurement stand

Rys. 5. Stanowisko pomiarowe

The SIA 262/1 standard specifies maximum values for the air permeability coefficient. The maximum value of  $kT$  coefficient varies depending on the exposure class of the concrete. Table 2 summarizes the maximum values of the coefficients. The Swiss standard also defines conditions for verification of measurement results obtained in a single test area. The air permeability results obtained shall be considered valid if out of six air permeability measurements in a given test area only one measurement exceeds the maximum value. If two measurements exceed the maximum value, six new measurements shall be taken, of which only one measurement may exceed the maximum value of  $kT$  coefficient, otherwise corrective action shall be taken.

#### 4. TEST RESULTS AND DISCUSSION

Air permeability tests were carried out about 80 days after concreting in 22 measurement points on the abutment facing Norbertańska street and after about 50 days at 21 measurement points on the abutment on the south side. Test results are included in Table 3. Measurement points were selected using a template allowing to find a place without

Table 2. Maximum values of the air permeability coefficient  $kT$ Tablica 2. Wartości maksymalne współczynnika przepuszczalności powietrza  $kT$ 

Description of the environment by Opis środowiska według PN-EN 206 [1]	Exposure class designation Oznaczenie klasy ekspozycji	Maximum value of air permeability coefficient Max wartość współczynnika przepuszczalności powietrza $kT [10^{-16} \text{ m}^2]$
Corrosion due to carbonatization / Korozja spowodowana karbonatyzacją		
Dry or permanently wet / Suche lub stale mokre	XC1	–
Wet, occasionally dry / Mokre, sporadycznie suche	XC2	–
Moderately moist / Umiarkowanie wilgotne	XC3	–
Cyclically wet and dry / Cyklicznie mokre i suche	XC4	2.0
Corrosion caused by chlorides not originating from seawater / Korozja spowodowana chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej		
Moderately moist / Umiarkowanie wilgotne	XD1	2.0
Cyclically wet and dry / Cyklicznie mokre i suche	XD3	0.5
Aggressive freezing/thawing without/with de-icing agents / Agresywne oddziaływanie zamarzania/rozmrażania bez/z środkami odładzającymi		
Moderate water saturation Umiarkowane nasycenie wodą	XF1	2.0
Moderate water saturation without de-icing agents Umiarkowane nasycenie wodą bez środków odładzających	XF2	2.0
Strong water saturation without de-icing agents Silne nasycenie wodą bez środków odładzających	XF3	0.5
Strong water saturation with de-icing agents or sea water Silne nasycenie wodą z środkami odładzającymi lub wodą morską	XF4	0.5

local damage to the concrete surface, allowing proper probe attachment and measurement. At the measurement points, the tested surface was flat, smooth and free of major damage and irregularities. The test was performed on the surface in its natural state. The locations of the measurement points at the abutments are shown in Figs. 6 and 7.

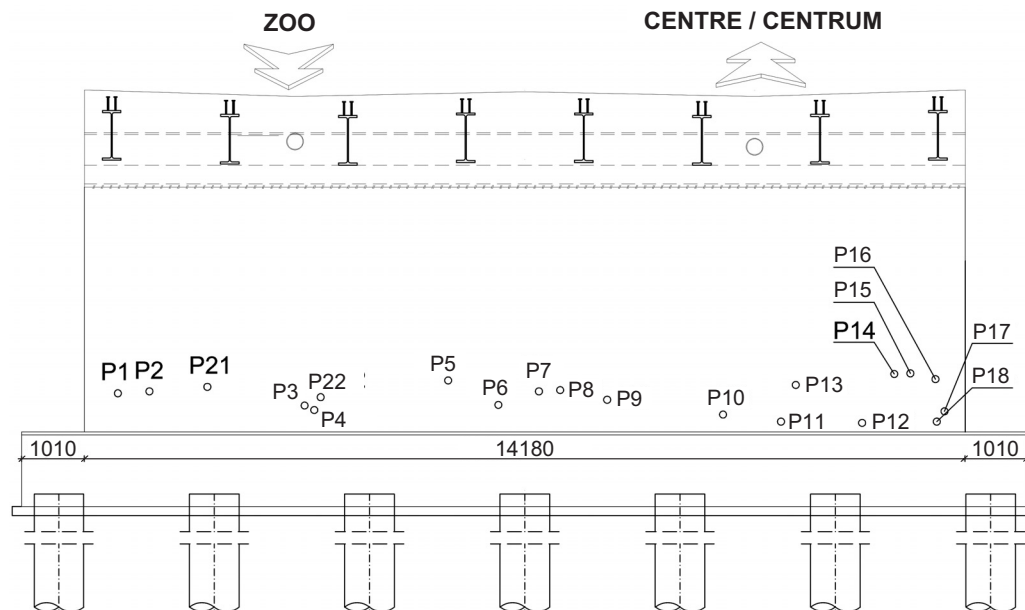


Fig. 6. Diagram of the measurement points arrangement on the abutment facing Norbertańska street  
Rys. 6. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na przyczółku od strony ul. Norbertańskiej



Table 3. Results of testing the air permeability of aerated concrete abutments

Tablica 3. Wyniki badania przepuszczalności powietrza przez napowietrzony beton przyczółków

Measurement point no. Nr punktu pomiarowego	Test I / Badanie I			Test II / Badanie II			Test III / Badanie III		
	<i>RH</i> [%]	<i>kT</i> [m <sup>2</sup> · 10 <sup>-16</sup> ]	<i>L</i> [mm]	<i>RH</i> [%]	<i>kT</i> [m <sup>2</sup> · 10 <sup>-16</sup> ]	<i>L</i> [mm]	<i>RH</i> [%]	<i>kT</i> [m <sup>2</sup> · 10 <sup>-16</sup> ]	<i>L</i> [mm]
1	4.48	0.049	15.1	4.80	0.023	10.4	4.80	0.531	46.9
2	4.93	0.010	6.9	4.75	0.017	8.9	4.83	0.433	44.3
3	4.85	6.203	84.4	4.68	0.012	7.3	4.65	0.650	49.6
4	4.75	0.051	15.3	4.35	0.469	45.5	4.48	0.600	48.8
5	4.63	0.027	11.1	4.88	0.009	6.4	4.78	0.472	46.3
6	4.65	0.015	8.2	4.65	0.088	20.1	4.75	0.337	39.1
7	4.73	0.026	10.9	4.60	0.002	3.1	4.63	0.515	46.3
8	4.73	0.032	12.2	4.88	0.023	10.4	4.78	0.116	22.9
9	4.63	0.015	8.2	4.78	0.081	19.3	4.78	0.268	34.8
10	4.85	0.002	2.8	4.98	0.017	8.8	5.08	0.487	47.0
11	4.65	0.007	5.8	4.88	0.037	13.1	4.88	0.596	47.6
12	4.68	0.001	1.9	4.85	0.098	21.3	4.85	0.925	52.5
13	4.68	0.014	8.0	4.75	0.104	21.9	4.45	1.110	54.2
14	4.33	0.528	47.2	4.73	0.018	9.1	4.73	0.467	45.2
15	4.43	0.012	7.3	4.83	0.022	10.0	4.30	0.886	51.7
16	4.40	0.067	17.5	4.48	0.003	4.0	5.00	0.916	50.9
17	4.50	0.026	10.9	4.80	0.003	4.0	4.60	0.546	47.6
18	4.40	0.034	12.4	4.68	0.040	13.5	4.55	0.631	47.6
19	4.68	0.042	14	4.95	0.010	6.6	4.93	0.035	12.6
20	4.83	0.011	7.1	4.33	1.946	61.1	4.78	0.670	50.3
21	4.83	0.001	1.8	4.83	0.021	9.8	4.78	0.782	50.0
22	4.65	0.017	8.9	–	–	–	–	–	–
<i>kT<sub>gm</sub></i>	–	0.022	–	–	0.028	–	–	0.475	–
<i>SDlogkT</i>	–	0.001	–	–	0.706	–	–	0.335	–

## Explanation / Objasnienia:

Test I – permeability test on the abutment facing Norbertańska street in Plock, approximately 80 days after concreting

Badanie I – badanie przepuszczalności na przyczółku od strony ul. Norbertańskiej w Płocku po około 80 dniach od betonowania

Test II – permeability test on the abutment on the south side, approximately 50 days after concreting

Badanie II – badanie przepuszczalności na przyczółku od strony południowej po około 50 dniach od betonowania

Test III – permeability test on abutment on the south side, approximately 80 days after concreting, the abutment was sandblasted between tests

Badanie III – badanie przepuszczalności na przyczółku od strony południowej po około 80 dniach od betonowania, pomiędzy badaniami przyczółek został wypiaskowany

*RH* – concrete moisture at a given measurement point, determined with Tramex CMEX II apparatus / wilgotność betonu w danym punkcie pomiarowym, określona aparatem Tramex CMEX II

*kT* – air permeability coefficient determined by Torrent apparatus / współczynnik przepuszczalności powietrza określony aparatem Torrenta

*L* – theoretical depth of vacuum penetration during Torrent test / teoretyczna głębokość penetracji próżni w czasie badania aparatem Torrenta

*kT<sub>gm</sub>* – geometric mean of the *kT* measurement results / średnia geometryczna wyników pomiarów *kT*

*SDlogkT* – standard deviation of logarithms of measurement results *kT* / odchylenie standardowe logarytmów wyników pomiarów *kT*

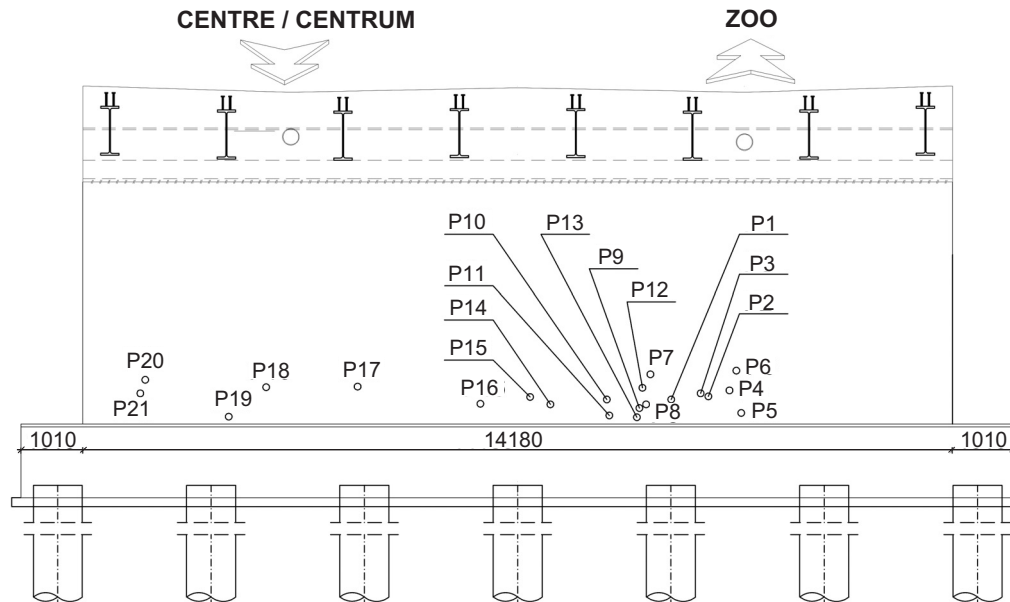


Fig. 7. Scheme of the location of measurement points on the abutment from the south  
Rys. 7. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na przyczółku od strony południowej

Spośród dwudziestu dwóch pomiarów wykonanych na pierwszym obszarze badawczym, dwa wyniki pomiaru przekroczyły wartość maksymalną, zaś na obszarze drugim – tylko jeden. Wzrost wartości współczynnika  $kT$ , jednocześnie wzrost grubości warstwy betonu biorącej w badaniu, można zaobserwować w punktach pomiarowych nr 3 i 14 przyczółka od strony ul. Norbertańskiej (pierwszy badany obszar) oraz w punktach nr 4 i 20 przyczółka od strony południowej (drugi badany obszar). W punktach nr 4, 14 i 20 powierzchnia jest mniej równa, zapewne również bardziej porowata w warstwie przy deskowaniu. Niższy wynik  $RH$  świadczy o szybszym wysychaniu betonu w tych miejscach. W punkcie nr 3 można zaobserwować pewną niejednorodność betonu. Beton w punktach pomiarowych umiejscowionych powyżej i poniżej punktu nr 3 jest znacznie bardziej szczelny. Na Rys. 8 i 9 przedstawiono punkty pomiarowe, w których uzyskano wyższe wartości  $kT$ . Weryfikując warunki oraz wymagane wartości maksymalne przepuszczalności podane w normie SIA 262/1, należy stwierdzić, iż oba obszary badawcze charakteryzują się właściwą szczelnością w projektowanych klasach ekspozycji. W Tabl. 3 zestawiono również wyniki badania przepuszczalności wykonane na przyczółku od strony południowej po 90 dniach od betonowania i wypiaszkowaniu powierzchni. Na wypiaszkowanej powierzchni przepuszczalność powietrza jest większa niż przepuszczalność badana na powierzchni w stanie naturalnym. Spośród dwudziestu jeden pomiarów, w trzynastu punktach pomiarowych wyniki przepuszczalności nie spełniają wymagań postawionych w szwajcarskiej normie w przypadku klasy ekspozycji XD3. Modyfikacja powierzchni wpłynęła na

Of the twenty-two measurements taken in the first test area, two measurement results exceeded the maximum value, while only one exceeded the maximum value in the second test area. An increase in the value of  $kT$  coefficient, and at the same time an increase in the thickness of the concrete layer taking part in the test, may be observed in measurement points nos. 3 and 14 of the abutment facing Norbertańska street (first test area) and at points nos. 4 and 20 of the abutment on the south side (second test area). At points nos. 4, 14 and 20 the surface is less even, probably also more porous in the layer near the formwork. A lower  $RH$  score indicates faster drying of the concrete in these areas. Some heterogeneity in the concrete can be observed at point no. 3. The concrete at the measurement points located above and below point no. 3 is much tighter. Figs. 8 and 9 show the measurement points where higher  $kT$  values were obtained. By verifying the conditions and required maximum permeability values given in SIA 262/1, it should be concluded that both test areas have adequate permeability in the design exposure classes. Table 3 also summarizes the permeability test results performed on the south side abutment 90 days after concreting and surface sandblasting. On the sandblasted surface, the air permeability is greater than the permeability tested on the surface in its natural state. Of the twenty one measurements, at thirteen measurement points the permeability results do not meet the requirements set in the Swiss standard for exposure class XD3. The surface modification reduced the surface tightness of the surface layer of the abutment concrete. Interpreting

zmniejszenie szczelności powierzchniowej warstwy betonu przyczółka. Interpretując wyniki według kryteriów zgodności przedstawionych w [21] na podstawie sześciu dowolnych kolejnych wyników  $kT$  uzyskanych w badaniach I - III, przy założonej wartości granicznej  $kTs = 0,5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  w przypadku klasy ekspozycji XD3 otrzymano następujące rezultaty: W badaniach I i II niezależnie od wyboru punktów pomiarowych spełnione jest kryterium 1, czyli maksymalnie jeden wynik  $kT$  z sześciu przekracza wartość graniczną  $kTs$ . W badaniu 3 po piaskowaniu powierzchni tylko w przypadku wyboru wyników z punktów 5-10 spełnione jest kryterium 1. W pozostałych przypadkach nie jest spełnione kryterium 1 ani kryterium 2.

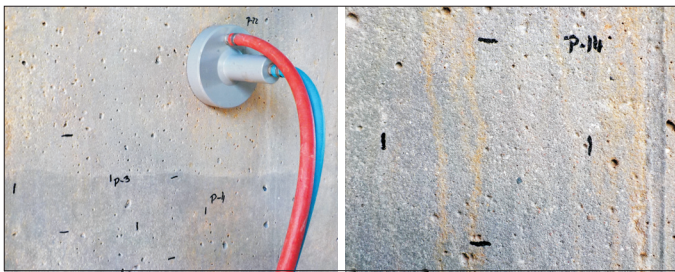


Fig. 8. View of concrete surface at measurement points nos. 3 and 14

Rys. 8. Widok powierzchni betonu w punktach pomiarowych nr 3 i 14

Średnia geometryczna pomiarów  $kT$  wykonanych na przyczółku od strony południowej wyniosła  $0,028 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ , na przyczółku od ul. Norbertańskiej  $0,022 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ . Porównując otrzymane wyniki z wartościami zmierzonymi na prefabrykowanych elementach mostowo-tunelowej przeprawy Hongkong – Zhuhai – Makau [27], które wyniosły  $0,116 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  (po 28 dniach od betonowania) i  $0,069 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  (po 56 dniach od betonowania) można stwierdzić, iż wyniki otrzymane na przyczółkach wiaduktu w Płocku pozwalają prognozować wysoką trwałość konstrukcji. Potwierdza to również porównanie z wynikami badania przepuszczalności powietrza wykonanymi, w ramach projektu ASTRA, na obiekcie mostowym [21], których średnia geometryczna wahała się od  $0,10 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  do  $0,25 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ . Średni wynik pomiarów przepuszczalności wykonanych na żelbetowych elementach Port of Miami Tunnel po 120 dniach od betonowania [26] wyniósł  $0,057 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ . Konstrukcję zaprojektowano na 150 lat użytkowania, a stosunek wodno-spoiwowy  $w/b$  wynosił 0,32. Pomimo znacznie niższego  $w/b$  w porównaniu do wartości 0,40 betonu stosowanego w badanych przyczółkach wiaduktu, uzyskany wynik  $kT$  jest prawie dwukrotnie wyższy. Wpływ na taką różnicę wyników może mieć zastosowanie w Port of Miami Tunnel spoiwa złożonego z mieszanki

the results according to the compatibility criteria presented in [21] on the basis of any six consecutive  $kT$  results obtained in tests I - III, with an assumed limit value of  $kTs = 0,5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  for exposure class XD3, the following results were obtained: In tests I and II, irrespective of the choice of measurement points, criterion 1 is fulfilled, i.e. a maximum of one  $kT$  result out of six exceeds the limit value of  $kTs$ . In test III, after surface sandblasting, only in case of the selection of results from points 5-10, criterion 1 is met. In other cases, neither criterion 1 nor criterion 2 is met.



Fig. 9. View of concrete surface at measurement points nos. 4 and 20

Rys. 9. Widok powierzchni betonu w punktach pomiarowych nr 4 i 20

The geometric mean of the  $kT$  measurements taken at the abutment on the south side was  $0,028 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ , at the abutment facing Norbertańska street  $0,022 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ . Comparing the obtained results with the values measured on the precast elements of the bridge and tunnel crossing Hong Kong – Zhuhai – Macau [27], which amounted to  $0,116 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  (28 days after concreting) and  $0,069 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  (56 days after concreting), it can be stated that the results obtained on the abutments of the viaduct in Płock allow predicting high durability of the structure. This is also confirmed by comparison with the results of the air permeability test performed, within the ASTRA project, on the bridge structure [21], whose geometric mean ranged from  $0,10 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  to  $0,25 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ . The average permeability measurement taken on the reinforced concrete elements of the Port of Miami Tunnel 120 days after concreting [26] was  $0,057 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ . The structure was designed for a 150-year service life, and the water/binder ratio was 0.32. Despite the much lower  $w/b$  compared to the value of 0.40 of the concrete used in the tested abutments of the viaduct, the obtained  $kT$  result is almost twice as high. This difference in results may be influenced by the use in the Port of Miami Tunnel of a binder composed of a mix of Portland cement type II according to ASTM C150 [35], blast furnace slag, and silica fly ash at

cementu portlandzkiego typu II wg ASTM C150 [35], żuźla wielkopieczowego oraz popiołu lotnego krzemionkowego, odpowiednio w ilościach  $188 \text{ kg/m}^3$ ,  $236 \text{ kg/m}^3$  i  $47 \text{ kg/m}^3$ . Na podstawie wyników  $kT$  wiaduktu określono w sposób podany w [26] bazujący na modelu Parrotta prognozowaną po 150 latach głębokość karbonatacji. Wykorzystano wzór:

$$d = A \cdot kT^g \cdot t^n \cdot c^f, \quad (1)$$

gdzie:

- $d$  – głębokość karbonatacji w [mm],
- $t$  – zakładany czas eksploatacji konstrukcji w [latach],
- $c$  – zawartość CaO w zhydratyzowanym zaczynie cementowym w [ $\text{kg/m}^3$ ],
- $A$  – stała o wartości 64, ustaloną na podstawie zależności empirycznych,
- $n$  – spodziewana szybkość postępu karbonatacji wyrażona w funkcji średniej wilgotności względnej powietrza otaczającego konstrukcję  $r$  następującym wzorem:

$$n = 0,02536 + 0,01785 \cdot r - 0,0001623 \cdot r^2. \quad (2)$$

Maksymalna wartość  $n = 0,52$  odpowiada wilgotności względnej wynoszącej 55%. Pozostałe wykładniki są ustalone na podstawie zależności empirycznych jako  $g = 0,4$  i  $f = 0,5$ . Przy maksymalnej uzyskanej przy badaniu konstrukcji wiaduktu średniej wartości  $kT = 0,475 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ , założonej wartości  $c = 250 \text{ kg/m}^3$  i średniej wilgotności powietrza w czasie eksploatacji konstrukcji 55%, otrzymano wartość  $d = 41 \text{ mm}$  po 150 latach eksploatacji. Jest to wartość niższa od wykonanej grubości otuliny zbrojenia w badanych elementach wiaduktu.

Badanie przepuszczalności powietrza wykonano również na ściankach bocznych próbek sześciennych o krawędzi 150 mm otrzymanych od Wykonawcy obiektu inżynierskiego. Badanie wykonano w laboratorium w dniu otrzymania próbek tj. po 80 dniach od betonowania oraz powtórzono po kolejnych 90 dniach dojrzewania próbek w warunkach laboratoryjnych. Przed badaniem przepuszczalności określono wilgotność. Przepuszczalność powietrza po 80 dniach od betonowania wahała się od  $0,001 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  do  $0,013 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ , natomiast grubość warstwy betonu biorącego udział w badaniu wynosiła od 1,6 mm do 7,7 mm. Badane próbki charakteryzowały się większą szczelnością niż badana powierzchnia betonowych przyczółków wiaduktu. Na otrzymane wyniki mogła mieć wpływ inna niż w przypadku betonu w konstrukcji pielęgnacja próbek betonowych. Dojrzewanie próbek sześciennych w warunkach laboratoryjnych przez okres 90 dni wpłynęło na wzrost szczelności pomimo nieznacznego obniżenia się  $RH$ . Przepuszczalność powietrza wahała się od  $0,001 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$

$188 \text{ kg/m}^3$ ,  $236 \text{ kg/m}^3$  and  $47 \text{ kg/m}^3$ , respectively. Based on  $kT$  measurements on the viaduct, the carbonation depth predicted after 150 years was determined as given in [26] based on the Parrott model. The formula used was:

$$d = A \cdot kT^g \cdot t^n \cdot c^f, \quad (1)$$

where:

- $d$  – the depth of carbonation in [mm],
- $t$  – the assumed service life of the structure in [years],
- $c$  – the CaO content of the hydrated cement slurry in [ $\text{kg/m}^3$ ],
- $A$  – a constant of value 64, determined from empirical dependencies,
- $n$  – the expected rate of carbonatization progress expressed as a function of the average relative humidity of the air surrounding the structure  $r$  by the following formula:

$$n = 0.02536 + 0.01785 \cdot r - 0.0001623 \cdot r^2. \quad (2)$$

The maximum value of  $n = 0.52$  corresponds to a relative humidity of 55%. The other exponents are determined from empirical dependencies as  $g = 0.4$  and  $f = 0.5$ . At the maximum value of  $kT = 0.475 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ , the assumed value of  $c = 250 \text{ kg/m}^3$  and the average air humidity during the operation of the structure of 55%, the value of  $d = 41 \text{ mm}$  after 150 years of operation was obtained. This value is lower than the thickness of the executed reinforcement cover in the examined elements of the viaduct.

Air permeability testing was also performed on the side walls of 150 mm edge cubic specimens obtained from the Contractor of the engineering structure. The test was performed in the laboratory on the day the specimens were received, i.e. 80 days after concreting, and repeated after another 90 days of maturation of specimens in laboratory conditions. Moisture content was determined prior to permeability testing. The air permeability 80 days after concreting ranged from  $0.001 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  to  $0.013 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ , while the thickness of the concrete layer involved in the test ranged from 1.6 mm to 7.7 mm. The tested specimens had higher tightness than the tested surface of the concrete abutments of the viaduct. The results may have been influenced by the different curing of the concrete specimens compared to the concrete in the structure. Maturation of cubic specimens under laboratory conditions for 90 days resulted in an increase in tightness despite a slight decrease in  $RH$ . The air permeability ranged from  $0.001 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  to  $0.005 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ , while the thickness of the concrete

do  $0,005 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ , natomiast grubość warstwy betonu biorącego udział w badaniu wynosiła od 1,9 mm do 5,0 mm. Wyniki badania zamieszczono w Tabl. 4. Otrzymane wyniki można porównać z wynikami przedstawionymi w artykule [28], którego autorzy wykonali pomiary na próbkach dojrzewających w podobnych warunkach laboratoryjnych. Większość z przedstawionych wyników  $kT$  jest niższa od wartości  $0,1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ . Porównując otrzymane na próbkach wyniki z wartościami przedstawionymi w [36] można stwierdzić, że w podobnym betonie, którego  $RH$  było niższe, przepuszczalność powietrza jest o rząd wielkości wyższa. W opisanych w artykule próbkach z napowietrzonego betonu o  $w/c = 0,4$  po 130 dniach przechowywania w laboratorium  $RH$  mierzona aparatem Tramex wyniosła od 4,18% do 4,43%, a  $kT$  była od  $0,024 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  do  $0,070 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ .

layer involved in the test ranged from 1.9 mm to 5.0 mm. Test results are presented in Table 4. The results obtained can be compared with the results presented in the article [28], whose authors performed measurements on specimens maturing in similar laboratory conditions. Most of the  $kT$  results presented are below the  $0.1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  value. By comparing the results obtained on the specimens with the values presented in [36], it can be concluded that the air permeability is an order of magnitude higher in similar concrete whose  $RH$  was lower. In the specimens of aerated concrete with  $w/c = 0.4$  after 130 days of storage in the laboratory,  $RH$  measured by Tramex was from 4.18% to 4.43% and  $kT$  from  $0.024 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  to  $0.070 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ .

Table 4. Results of the permeability test carried out on 150 mm edge specimens in the laboratory  
Tablica 4. Wyniki badania przepuszczalności wykonanego na próbkach o krawędzi 150 mm w laboratorium

Measurement point no. Nr punktu pomiarowego	Test IV / Badanie IV			Test V / Badanie V		
	$RH$ [%]	$kT$ [ $\text{m}^2 \cdot 10^{-16}$ ]	$L$ [mm]	$RH$ [%]	$kT$ [ $\text{m}^2 \cdot 10^{-16}$ ]	$L$ [mm]
1	4.88	0.013	7.7	4.58	0.005	5.0
2	5.05	0.012	7.4	4.78	0.001	2.0
3	4.88	0.004	4.3	4.63	0.001	1.9
4	5.35	0.001	1.6	4.88	0.001	2.2
5	5.08	0.012	7.3	4.70	0.001	2.3
6	5.68	0.001	2.5	4.80	0.001	2.1
7	4.90	0.004	4.1	4.60	0.001	2.0
8	5.28	0.009	6.4	4.80	0.002	3.2
$kT_{gm}$	–	0.005	–	–	0.001	–
$SD \log kT$	–	0.466	–	–	0.255	–

Test IV – permeability test performed on 150 mm edge specimens in the laboratory, approximately 80 days after concreting / badanie przepuszczalności wykonane na próbkach o krawędzi 150 mm w laboratorium po około 80 dniach od betonowania

Test V – permeability test performed on 150 mm edge specimens in the laboratory, approximately 170 days after concreting / badanie przepuszczalności wykonane na próbkach o krawędzi 150 mm w laboratorium po około 170 dniach od betonowania

Explanation of symbols given in Table 3 / objaśnienia symboli zostały podane w Tabl. 3.

W podsumowaniu można stwierdzić, że potwierdzono przydatność metody oceny jakości otuliny w elementach wiaduktu drogowego na podstawie wyniku badania przepuszczalności powietrza. Prawidłowe badanie wymaga płaskiej powierzchni, bez większych uszkodzeń, co wyklucza możliwość oceny miejsc uszkodzonych, zarysowanych i nierównych, które pomimo prawidłowego wykonania konstrukcji mogą występować. Może to prowadzić do pozytywnej oceny szczelności betonu, pomimo tego, że w miejscach uszkodzonych może dojść w przyszłości do bardziej intensywnego wnikania szkodliwych substancji. Wykazano, że zabiegi takie jak piaskowanie powierzchni czy uszczelnianie zarysowań prowadzą do dużej zmiany przepuszczalności. W celu

In conclusion, it can be said that the usefulness of the method for evaluating the quality of the cover in road viaduct components based on the result of the air permeability test was confirmed. Correct testing requires a flat surface without any major damage, which excludes the possibility of assessing damaged, scratched and uneven areas that may occur despite the correct construction. This may lead to a positive assessment of the concrete's tightness, even though more intensive penetration of harmful substances may occur in the damaged areas in the future. Treatments such as surface sandblasting and scratch sealing have been shown to lead to a large change in permeability. In order to assess the potential durability of the

oceny potencjalnej trwałości obiektu badanie należy przeprowadzać w takim stanie, w jakim będzie eksploatowana powierzchnia betonu.

## 5. WNIOSKI

Przedstawione w artykule wyniki badań pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Wyniki przepuszczalności powietrza otrzymane na obu przyczółkach w stanie naturalnym, bez przygotowania powierzchni pozwalają na pozytywną ocenę betonu w projektowanej klasie ekspozycji.
2. Wypiaskowanie powierzchni badawczej zmniejszyło szczelność betonu, a wyniki otrzymane z pomiaru współczynnika przepuszczalności przekroczyły wartości graniczne ustalone w normie SIA 262/1 w projektowanej klasie ekspozycji.
3. Największą szczelnością charakteryzowały się próbki badane w laboratorium w szczególności po około 90 dniach dojrzewania w warunkach laboratoryjnych.
4. Ocena betonu wyłącznie na podstawie wyników uzyskanych na próbkach wykonanych i pielęgnowanych w laboratorium może prowadzić do zbyt optymistycznych wniosków w porównaniu do oceny betonu w konstrukcji wykonanego i pielęgnowanego na budowie.
5. Na podstawie porównania wyników badań przepuszczalności powietrza otrzymanych na przyczółkach wiaduktu drogowego w Płocku z wynikami badań uzyskanymi na innych obiektach masywnych, można stwierdzić, że otulina betonowa ma prawidłową szczelność, zapewniającą odporność na oddziaływanie agresywnego środowiska.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] PN-EN 206:2016 Beton - Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [2] Kaleta D., Macheta D., Michalak E., Reizer E., Siwowski T., Wysocki A.: Katalog typowych konstrukcji drogowych obiektów mostowych i przepustów. Część 2: Podstawowe wiadomości o drogowych obiektach mostowych, Warszawa, 2020
- [3] Baroghel-Bouny V.: Durability indicators: relevant tools for performance-based evaluation and multi-level prediction of RC durability. Proceedings of international RILEM workshop on performance based evaluation and indicators for concrete durability, Madrid, 2006, 19-21
- [4] Dąbrowski M., Gibas K., Brandt A.M., Glinicki M.A.: Wpływ kruszyw specjalnych na porowatość i przepuszczalność betonów osłonowych. Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, **33**, 63, 2016, 97-106
- [5] Marks M., Józwiak-Niedźwiedzka D., Glinicki M.A., Olek J., Marks M.: Assessment of scaling durability of concrete with CFBC ash by automatic classification rules. Journal of Materials in Civil Engineering, **24**, 7, 2012, 860-867
- [6] Reiterman P., Keppert M.: Effect of various de-icers containing chloride ions on scaling resistance and chloride penetration depth of highway concrete. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **19**, 1, 2020, 51-64, DOI: 10.7409/rabdim.020.003
- [7] Glinicki M.A.: Methods of qualitative and quantitative assessment of concrete air entrainment. Cement Wapno Beton, **19**, 6, 2014, 359-369
- [8] Kubissa W., Glinicki M.A.: Influence of internal relative humidity and mix design of radiation shielding concrete on air permeability index. Construction and Building Materials, **147**, 2017, 352-361, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.177
- [9] Kubissa W., Glinicki M.A., Dąbrowski M.: Permeability testing of radiation shielding concrete manufactured at industrial scale. Materials and Structures, **51**, 4, 2018, 1-15
- [10] Staquet S., Delsaute B., Fairbairn E.M.R., Torrent R., Knoppik A., Ukrainczyk N., Koenders E.A.B.: Mixture proportioning for crack avoidance. RILEM State-of-the-Art Reports, 2019, 115-151

object, the test shall be carried out in the condition in which the concrete surface will be used.

## 5. CONCLUSIONS

The research results presented in the article allow us to formulate the following conclusions:

1. The air permeability results obtained on both abutments in the natural state, without surface preparation, allow a positive evaluation of the concrete in the designed exposure class.
2. The sandblasting of the test surface reduced the concrete tightness and the results obtained from the permeability coefficient measurement exceeded the limits set by SIA 262/1 in the design exposure class.
3. The specimens tested in the laboratory were characterized by the highest tightness, especially after about 90 days of maturation in laboratory conditions.
4. Evaluating concrete solely on the basis of results obtained on specimens prepared and cured in the laboratory may lead to overly optimistic conclusions compared to evaluating concrete in a structure made and cured on site.
5. On the basis of the comparison of the results of air permeability tests obtained on the abutments of the road viaduct in Płock with the results of tests obtained on other massive objects, it may be stated that the concrete cover has proper air-tightness, ensuring resistance to the influence of an aggressive environment.

- [11] Bourchy A., Barnes L., Bessette L., Chalencon F., Joron A., Torrenti J.M.: Optimization of concrete mix design to account for strength and hydration heat in massive concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, **103**, 2019, 233-241
- [12] Glinicki M.A., Józwiak-Niedźwiedzka D., Gibas K., Dąbrowski M.: Influence of blended cements with calcareous fly ash on chloride ion migration and carbonation resistance of concrete for durable structures. *Materials*, **9**, 1, 2016, 1-15
- [13] Beushausen H., Torrent R., Alexander M.G.: Performance-based approaches for concrete durability: State of the art and future research needs. *Cement and Concrete Research*, **119**, 2019, 11-20
- [14] Ayub T., Shafiq N., Khan S., Nuruddin M.: Durability of Concrete with Different Mineral Admixtures: A Review. *International Journal of Civil, Architectural, Structural and Construction Engineering*, **7**, 8, 2013, 273-284
- [15] Plank J., Sakai E., Miao C.W., Yu C., Hong J.X.: Chemical admixtures - Chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability. *Cement and Concrete Research*, **78**, 2015, 81-99
- [16] Czarnecki L., Woyciechowski P.: Concrete carbonation as a limited process and its relevance to concrete cover thickness. *ACI Materials Journal*, **109**, 3, 2012, 275-282
- [17] Cao Y., Gehlen C., Angst U., Wang L., Wang Z.: Critical chloride content in reinforced concrete - An updated review considering Chinese experience. *Cement and Concrete Research*, **117**, 2019, 58-68
- [18] Wittmann F.H., Zhao T., Jiang F., Wan X.: Influence of Combined Actions on Durability and Service Life of Reinforced Concrete Structures Exposed to Aggressive Environment. *Restoration of Buildings and Monuments*, **18**, 2 2012, 105-112
- [19] Kessler S., Thiel C., Grosse C.U., Gehlen C.: Effect of freeze-thaw damage on chloride ingress into concrete. *Materials and Structures*, **50**, 2, 2017, 1-13
- [20] Thiel C., Lomakovych V., Gehlen C.: Freeze-Thaw Deicing salt Attack on Concrete: Towards Engineering Modelling. XV International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC), Barcelona, 2020
- [21] Jacobs F., Leemann A., Teruzzi T., Torrent R.J., Denarié E.: Specification and site control of the permeability of the cover concrete?: The Swiss approach. *Materials and Corrosion*, **63**, 12, 2012, 1127-1133
- [22] Boumaaza M.; Huet B., Pham G., Turcry P., Ait-Mokhtar A., Gehlen C.: A new test method to determine the gaseous oxygen diffusion coefficient of cement pastes as a function of hydration duration, microstructure, and relative humidity. *Materials and Structures*, **51**, 2, 2018, 1-17
- [23] Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton: application de l'approche performantielle. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 2010
- [24] Tracz T., Śliwiński J.: Przepuszczalność betonu określana przy przepływie gazu metodą laboratoryjną i polową - porównanie wyników i ich korelacja. Materiały konferencji „Dni Betonu - tradycja i nowoczesność”, Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2012, 949-958
- [25] Nguyen M.H., Nakarai K., Kubori Y., Nishio S.: Validation of simple nondestructive method for evaluation of cover concrete quality. *Construction and Building Materials*, **201**, 2019, 430-438
- [26] Torrent R.J., Armaghani J., Taibi Y.: Evaluation of port of Miami tunnel segments. *Concrete International*, **35**, 5 2013, 39-46
- [27] Li K., Zhang D., Li Q., Fan Z.: Durability for concrete structures in marine environments of HZM project: Design, assessment and beyond. *Cement and Concrete Research*, **115**, 2019, 545-558
- [28] Gibas K., Glinicki M.A., Nowowiejski G.: Evaluation of impermeability of concrete containing calcareous fly ash in respect to environmental media. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **12**, 2, 2013, 159-171, DOI: 10.7409/rabdim.013.012
- [29] SIA 262/1 Swiss Standard, Concrete Structures-Supplementary Specifications, Annex E: Air-Permeability on the Structure, 2013
- [30] Basheer P.A.M., Nolan E.A.: Near-surface moisture gradients and in situ permeation tests. *Construction and Building Materials*, **15**, 2-3, 2001, 105-114
- [31] Yang K., Basheer P.A.M., Magee B., Bai Y.: Investigation of moisture condition and Autoclave sensitivity on air permeability measurements for both normal concrete and high performance concrete. *Construction and Building Materials*, **48**, 2013, 306-314
- [32] Yang K., Basheer P.A.M., Bai Y., Magee B.J., Long A.E.: Development of a new in situ test method to measure the air permeability of high performance concretes. *NDT and E International*, **64**, 2014, 30-40
- [33] Torrent R., Bueno V., Moro F., Jornet A.: Suitability of impedance surface moisture meter to complement air-permeability tests. RILEM International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures, Rovinj, 2019, 1-8
- [34] Tracz T., Śliwiński J.: The effect of concrete surface polishing on permeability evaluated with Torrent's method. XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna „Awaria Budowlane”, Szczecin-Międzydroje, 2013, 873-880
- [35] ASTM C150 Standard specification for Portland cements. ASTM International, 2020
- [36] Kubissa W., Jaskulski R., Grzelak M.: Torrent air permeability and sorptivity of concrete made with the use of air entraining agent and citric acid as setting retardant. *Construction and Building Materials*, **268**, 2021, 1-15