

dr inż. Jarosław Szulc^{1*)}

ORCID: 0000-0002-4498-8829

mgr inż. Krzysztof Sztuka¹⁾

ORCID: 0000-0001-7400-9516

mgr inż. Szymon Spodzieja²⁾

ORCID: 0000-0001-5049-8837

mgr inż. Michał Kucharski³⁾

ORCID: 0000-0002-1632-008X

DOI: 10.15199/33.2025.12.03

Abstract: Industrial floors installed in warehouses requires adherence to rigorous technological requirements at all stages of the construction process. Poor quality of project implementation often leads to floor damage. Defining the specific causes of the defects requires a series of diagnostic and computational procedures. The results form the basis for any potential financial claims arising from the need for repair work.

Keywords: industrial flooring; technology; damage; diagnostics; load-bearing capacity.

The subject building, completed in 2020 (photograph 1), is a single-storey warehouse hall constructed with a reinforced concrete frame structure, measuring 12.45 m in height from ground level to the ridge and featuring an interior clear height of 10.00 m. The building's footprint area is 41,983 m², while its usable floor area is 39,163 m²; the structural grid layout is 12.00 × 22.50 m.

The design documentation specified the construction of a so-called jointless floor slab in the hall, with expansion joints arranged in panels with maximum dimensions of 37.5 m and a maximum aspect ratio of 1.04. A slab thickness of 17 cm was assumed, using C25/30 grade concrete with a superplasticizer admixture of 4.15 kg/m³ (1.34% of the cement mass). The mix was designed with dispersed reinforcement consisting of steel fibers at a dosage of 15 kg/m³. Dispersed steel fibers provide an effective method for reducing cracking and improving floor load-bearing capacity [5, 7, 8]. In the zones directly adjacent to the columns, additional reinforcement was applied using mesh and ribbed steel bars. In the strength calculations for the slab, a secondary modulus of subgrade reaction of over 120 MPa was assumed, as well as a ratio of the secondary to the primary deformation modulus of less than 2.5.

According to the design, the floor slab was finished using the Dry Shake Topping (DST) technology, with a surface-hardening compound of abrasion class A6 (as determined by the Boehme disc test), to achieve a finished floor abrasion class of AR1 (as verified by the BCA test). To ensure optimal conditions for cement hydration in the concrete, i.e., proper concrete curing, the application of an additional curing compound was specified at a dosage of 0.1 dm³/m². The floor

Causes of industrial floor damage in a warehouse

Przyczyny uszkodzeń posadzki przemysłowej w hali magazynowej

Streszczenie: Posadzki przemysłowe wbudowywane w halach magazynowych stanowią element wymagający przestrzegania rygorystycznych wymagań technologicznych na wszystkich etapach procesu budowlanego. Niedostateczna jakość realizacji inwestycji stanowi często przyczynę uszkodzenia posadzek. Jednoznaczne określenie szczegółowych przyczyn nieprawidłowości wymaga przeprowadzenia wielu prac diagnostycznych i obliczeniowych. Wyniki stanowią podstawę do ewentualnych roszczeń finansowych wynikających z konieczności wykonania prac naprawczych.

Słowa kluczowe: posadzka przemysłowa; technologia; uszkodzenia; diagnostyka; nośność.

Przedmiotowy obiekt, zrealizowany w 2020 r. (fotografia 1), to jednokondygnacyjna hala magazynowa wykonana w konstrukcji szkieletowej żelbetowej, o wysokości 12,45 m od poziomu terenu do górnej krawędzi attyki i wysokości użytkowej w świetle 10,00 m. Powierzchnia zabudowy budynku wynosi 41 983 m², natomiast powierzchnia użytkowa 39 163 m², układ osi obiektu to 12,00 × 22,50 m.

Dokumentacja projektowa przewidywała wykonanie w hali posadzki tzw. bezspoinowej, przy rozmieszczeniu dylatacji w polach o maksymalnych wymiarach 37,5 m i stosunku boków pól dylatowanych maksymalnie 1,04. Założono grubość posadzki 17 cm oraz beton klasy C25/30 z domieszką superplastifikatora w ilości 4,15 kg/m³ (1,34% masy cementu). Zaprojektowano mieszankę ze zbrojeniem rozproszonym z włókien stalowych w ilości 15 kg/m³. Stalowe włókna rozproszone stanowią efektywną metodę ograniczenia zarysowań i poprawy nośności posadzki [5, 7, 8]. W strefach bezpośrednio przy słupach zastosowano dozbrojenie siatkami i prętami ze stali żebrowanej. W obliczeniach wytrzymałości posadzki przyjęto wtórny moduł odkształcenia podbudowy stabilizowanej powyżej 120 MPa oraz stosunek wtórnego do pierwotnego modułu odkształcenia mniejszy niż 2,5.

Zgodnie z projektem posadzka miała zostać wykończona w technologii suchych posypek DST (Dry Shake Topping), preparatem utwardzającym powierzchniowo o klasie ścieralności A6 (wg metody badania na tarczy Boehmego), do uzyskania klasy ścieralności posadzki wykończonej AR1 (test BCA). W celu zapewnienia optymalnych warunków hydratacji cementu w betonie, czyli tzw. pielęgnacji betonu, przewidziano dodatkowo zastosowanie preparatu powłokowego w ilości 0,1 dm³/m². Projekt posadzki przewidywał prowadzenie wielu zabiegów pielęgnacyjnych powierzchni betonu, m.in. przez pokrycie wilgotnej posadzki folią bezpośrednio po jej zatarciu (na okres 7–14 dni),

¹⁾ Instytut Techniki Budowlanej

²⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

³⁾ Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Katedra Inżynierii Budowlanej

^{*)} Address for correspondence: j.szulc@itb.pl

design also required multiple concrete-curing procedures, including covering the moist slab with foil immediately after trowelling (for a period of 7–14 days).

Floor construction process

The concreting of the floor slab took place during the spring and summer periods, specifically in May and June 2020. The working sections of the floor covered areas ranging from 1,886 to 2,945 m². The floor area was divided into 17 working sections (Figure 1). To verify the design assumptions, control geotechnical and material tests were carried out during the construction of the floor in the hall. Reports on the subbase deformation modulus confirmed that it met the requirements adopted in the floor strength calculations.

Control tests of the physicochemical properties of the floor concrete showed the following parameter values:

- air content in the concrete mix: 2.8÷3.7%;
- consistency of the concrete mix: 120÷150 mm (class S3);
- temperature of the concrete mix: 15.5÷18.9°C (air temperature: 8.5÷17.8°C);
- compressive strength (partial tests): 33.6÷35.0 MPa (class C25/30);
- steel fiber content in the concrete mix: 14.6÷17.3 kg/m³ (average measured values: 14.9–15.8 kg/m³).

Results of the Inventory of floor damage and defects

The inspection covered the entire floor area of the facility. During the inventory, the following types of floor damage were identified:

- surface cracks forming a crack pattern;
- structural cracks with varied courses on the surface;
- damage in expansion joints between floor panels;
- surface delamination of the hardening layer;
- variations in color or surface roughness;
- deep damage to the floor surface;
- surface contamination.



Photo. 1. Location of the facility (the hall is marked in red)

Fot. 1. Lokalizacja obiektu (kolorem czerwonym oznaczono przedmiotową halę)

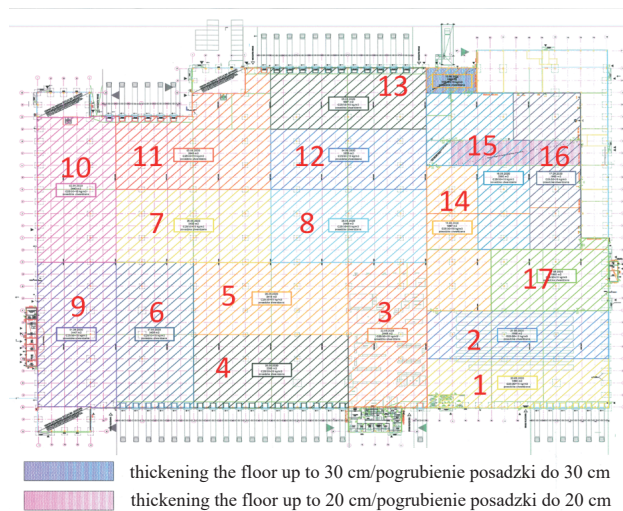


Fig. 1. The process of pouring concrete for the floor and dividing the area into work sections

Rys. 1. Przebieg betonowania posadzki i podział na działy robocze

Przebieg wykonywania posadzki

Betonowanie płyty posadzkowej odbywało się w okresie wiosenno-letnim, tj. w maju i czerwcu 2020 r. Działy robocze posadzki miały powierzchnię 1886 – 2945 m². Obszar posadzki podzielono na 17 działów roboczych (rysunek 1). W celu weryfikacji założeń projektowych, w czasie wykonywania posadzki w przedmiotowej hali, prowadzone były kontrolne badania geotechniczne i materiałowe. Raporty z badań modułów odkształcenia podbudowy potwierdziły, że spełniała ona wymagania przyjęte w obliczeniach wytrzymałościowych posadzki.

Kontrolne badania właściwości fizykochemicznych betonu posadzki wykazały następujące wartości parametrów:

- zawartość powietrza w mieszance betonowej: 2,8÷3,7%;
- konsystencja mieszanki betonowej: 120÷150 mm (klasa S3);
- temperatura mieszanki betonowej: 15,5÷18,9°C (temperatura powietrza: 8,5÷17,8 °C);
- wytrzymałość na ściskanie (badania cząstkowe): 33,6÷35,0 MPa (klasa C25/30);

• zawartość włókien stalowych w mieszance betonowej: 14,6÷17,3 kg/m³ (średnie z pomiarów 14,9÷15,8 kg/m³).

Uzyskiwane na bieżąco wyniki badań in situ pozwoliły na ciągłą realizację prac budowlanych przy wykonywaniu posadzki.

Wyniki inwentaryzacji uszkodzeń i nieprawidłowości posadzki

Ogłędziny posadzki obejmowały obszar całego obiektu. Podczas inwentaryzacji zidentyfikowano następujące uszkodzenia posadzki:

- rysy powierzchniowe w postaci siatki zarysowań;
- rysy strukturalne o zróżnicowanym przebiegu na powierzchni;
- uszkodzenia dylatacji pól posadzkowych;
- odspojenia powierzchniowe warstwy utwardzającej;
- zróżnicowanie kolorystyki lub szorstkości powierzchni;
- uszkodzenia wgłębne powierzchni posadzki;
- zanieczyszczenia powierzchni posadzki.

Surface cracks forming a crack pattern (photograph 2a) were found over a significant portion of the areas accessible for inspection. These cracks—more precisely microcracks, usually not exceeding 0.1 – 0.2 mm in width – occurred only in the near-surface layer, forming irregular “cells” dozen to several dozen centimeters across. In the literature, this type of crack is referred to as *crazing* and is considered essentially unavoidable in concrete floors hardened with dry-shake DST toppings [4, 7]. Such damage does not pose a technical problem as long as it is not accompanied by delamination of the hardening layer [6], which was not observed during on-site inspections.

Structural cracks with varied courses on the surface occurred with different intensities in all panels. The width of these cracks was typically 0.2–0.4 mm, occasionally reaching up to 0.8 mm at the surface. Cracks of larger width often showed edge spalling (photograph 2b).

On the surfaces of panels where the intensity of cracking was significantly higher, cracks tended to merge into an irregular network. Some of the cracks had been repaired once or multiple times. Despite repairs, it was found that cracks sometimes propagated further or reappeared in the areas filled with repair material. Structural cracks induced in critical areas of the floor (corners, anchorage points, etc.) were also identified. In isolated cases, vertical displacement was observed at the crack. However, these concerned areas were subjected to particularly intensive use and therefore were not considered in further analysis (photograph 3).

During the inspection, isolated edge damage was found in the form of local spalling of the concrete slab, usually no more than a few centimeters in size. In addition, localized surface indentations were noted, likely caused by the heavy use of the floor – primarily through the dragging or dropping of objects.

Floor contamination (photograph 4) was found only in areas used by lifts and transport carts, as well as in locations where substances related to the technological operations of the production line were stored.

Rysy powierzchniowe w postaci siatki zarysowań (fotografia 2a) stwierdzono na znacznej części powierzchni dostępnej do oględzin. Rysy te, a dokładniej mikrorysy nieprzekraczające zazwyczaj szerokości rozwarcia $0,1 \pm 0,2$ mm, występowały wyłącznie w warstwie przypowierzchniowej, łącząc się w nieregularne „oczka” o wymiarach kilkanaście-kilkadziesiąt cm. Rysy tego typu w literaturze tematu noszą nazwę «crazing» i uznawane są za zjawisko w zasadzie nieuniknione w technologii posadzek betonowych utwardzanych preparatami sypkimi DST [4, 7]. Uszkodzenia takie nie stanowią problemu z technicznego punktu widzenia, o ile nie towarzyszą im odspojenia warstwy utwardzającej [6], których nie stwierdzono podczas wizji lokalnych.

Rysy strukturalne o zróżnicowanym przebiegu na powierzchni występowały z różną intensywnością na wszystkich polach dylatowanych. Szerokość tych rys wynosiła zazwyczaj 0,2 – 0,4 mm, incydentalnie dochodząc nawet do 0,8 mm przy powierzchni. Rysy o większej szerokości często wykazywały wykruszenia na krawędziach (fotografia 2b).

Na powierzchni pól dylatowanych, gdzie intensywność występowania rys była wyraźnie większa, dochodziło do ich łączenia się w układ nieregularnej siatki. Niektóre z rys były naprawiane, jedno- lub kilkakrotnie. Pomimo napraw stwierdzono, że rysy niekiedy ulegają propagacji lub też odnawiają się w miejscu wypeł-

nienia materiałem naprawczym. Stwierdzono występowanie rys strukturalnych indukowanych w niewłaściwych miejscach posadzki (naroża, miejsca kotwienia itp.). Incydentalnie stwierdzono przemieszczenie pionowe w miejscu zarysowania. Dotyczyło to jednak obszaru o szczególnie intensywnym sposobie użytkowania i dlatego nie było uwzględniane w dalszych rozważaniach (fotografia 3).

Podczas oględzin stwierdzono incydentalne **uszkodzenia krawędzi**, mające postać lokalnych wykruszeń betonu płyty posadzkowej i zazwyczaj nieprzekraczające wymiarów kilku centymetrów. Ponadto dostrzeżono lokalne występowanie **uszkodzeń wgłębnych** powierzchni posadzki związanych prawdopodobnie ze znaczną intensywnością użytkowania posadzki, tj. przede wszystkim z przesuwaniem przedmiotów lub ich upuszczaniem.

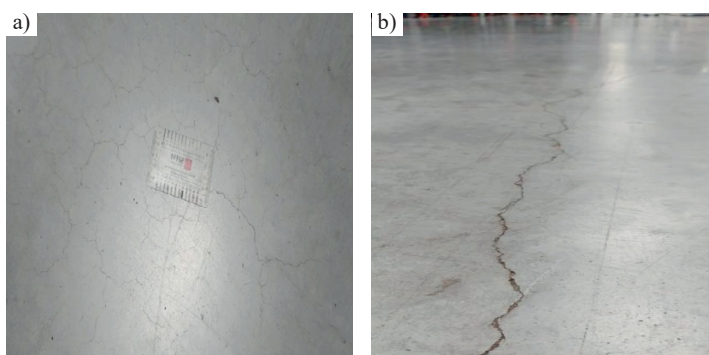


Photo 2. Examples of surface cracks known as crazing (a) and structural cracks with visible edge spalling (b)

Fot. 2. Przykłady rys powierzchniowych tzw. crazing (a) oraz strukturalnych z widocznymi wykruszeniami krawędzi (b)



Photo 3. An example of vertical displacement showing floor cracks around technological equipment

Fot. 3. Przykład przemieszczeń pionowych – spękania posadzki w otoczeniu urządzeń technologicznych

The expansion joints of the floor were also inspected during the inventory. It was found that the width of the expansion joints was generally 10÷20 mm, although joints of approximately 25 mm were identified in some places. **Damage in the elastomeric joint filler** indicates significant joint movement associated with deformation of the concrete floor slabs.

Laboratory Tests and In-Situ Measurements

The laboratory tests and in-situ measurements included primarily:

- macroscopic observations of concrete core samples, including identification of the floor layer arrangement and measurement of crack depth;
- compressive strength testing of concrete from Ø100 mm core samples;
- determination of the steel-fiber content in concrete from Ø100 mm and Ø150 mm core samples;
- subgrade dynamic modulus testing using a lightweight dynamic plate.

Core samples were taken at locations 1, 2, and 3 (Figure 2). At each location, the following were extracted: three Ø100 mm core samples (from areas without cracks) and one Ø150 mm core sample (drilled through a crack in the slab). The site of the Ø150 mm core was then enlarged to Ø320 mm to enable dynamic plate testing.

Based on observations and measurements of the core samples taken from the three locations, it was determined that the thickness of the floor slab ranged from 16 to 18 cm, and the thickness of the hardening layer was 2 to 4 mm. Two layers of slip sheet foil were also found on top of the subbase. The crack depth in the Ø150 mm cores exceeded half the core height, and in one case (a 160 mm-high core from location 2), the crack traversed the entire cross-section. A clear difference in the color of the cement matrix was also observed: darker areas appeared in the lower zone of the cores, contrasting with the normal color of the upper zone typical of floor concrete made with Portland cement (photograph 5).

Cylindrical test specimens for determining compressive strength were prepared from the extracted core samples by diamond-saw trimming and surface grinding or capping, ensuring compliance with the standard requirements [1]. Compressive strength testing was conducted according

Zanieczyszczenie posadzki (fotografia 4) stwierdzono wyłącznie w miejscach obsługi podnośników oraz wózków transportowych, a także w miejscu składowania substancji związanych z realizacją czynności technologicznych linii produkcyjnej. Podczas inwentaryzacji dokonano również oględzin szczelin dylatacyjnych posadzki obiektu. Stwierdzono, że szerokość szczelin dylatacyjnych wynosiła zazwyczaj 10÷20 mm, ale miejscami zidentyfikowano dylatacje o szerokości ok. 25 mm. **Uszkodzenia wypełnienia dylatacji** masą plastyczną wskazują na wyraźną pracę dylatacji, związaną z odkształceniami betonowych płyt posadzki.

Badania laboratoryjne i pomiary in situ

Badania laboratoryjne i pomiary in situ obejmowały przede wszystkim:

- obserwacje makroskopowe odwiertów betonu, w tym określenie układu warstw posadzkowych, pomiar zasięgu rysy;
- badanie wytrzymałości betonu na ściskanie na pobranych odwiertach rdzeniowych Ø100;
- oznaczanie zawartości włókien stalowych w betonie na pobranych odwiertach rdzeniowych Ø100 oraz Ø150;
- badanie modułu dynamicznego podłoża płytą dynamiczną.

Odwierty rdzeniowe wykonano w lokalizacjach 1, 2, 3 (rysunek 2), w każdej z nich pobrano: 3 szt. odwiertów rdzeniowych o średnicy 100 (miejscie płyty bez rysy); 1 szt. odwiertów rdzeniowych o średnicy 150 (odwiert przez rysę w płycie). Miejsce wykonanego odwiertu o średnicy 150 powiększono następnie do średnicy 320 w celu umożliwienia badania płytą dynamiczną.

Na podstawie obserwacji oraz pomiarów odwiertów rdzeniowych pobranych w kolejnych lokalizacjach stwierdzono, że grubość płyty posadzkowej wynosiła 16÷18 cm, a grubość warstwy utwardzającej 2÷4 mm. Stwierdzono również obecność dwóch warstw folii poślizgowej na warstwie podbudowy. Zasięg rysy w miejscu odwiertów Ø150 przekraczał połowę wysokości odwiertu, a w jednym przypadku (odwiert o wysokości 160 mm, lokalizacja 2) rysa przechodziła przez cały przekrój. Stwierdzono natomiast wyraźne zróżnicowanie barwy matrycy cementowej – w dolnej strefie odwiertów występowały obszary o wyraźnie ciemniejszej barwie, odcinającej się kolorystycznie od górnej strefy w kolorze typowym dla betonu posadzkowego na cemencie portlandzkim (fotografia 5).



Photo 4. Examples of contamination on floor surfaces
Fot. 4. Przykłady zanieczyszczenia powierzchni posadzki



Fig. 2. Location of sampling sites
Rys. 2. Lokalizacja miejsc pobrania próbek

to the guidelines provided in [2]. In accordance with PN-EN 13791:2019–12, the test results were converted to an equivalent strength corresponding to a core with a height-to-diameter ratio of 2:1 (currently the reference core geometry). The obtained results show only minor variability attributable to the nature of the concrete and correlate fully with the control tests performed during the floor's construction. Thus, no concerns arise regarding the compressive strength of the installed concrete.

The steel-fiber content in hardened concrete was determined using the Ø100 mm cores that had undergone compressive testing, as well as additional Ø150 mm cores. The determination was made in accordance with standard [3] on four samples taken from each location. The average fiber content in the tested cores was 15.2 kg/m³, which meets the design requirements. However, concerns arise regarding the fiber content found in core sample No. 2/3 from location 2, which was only 9.9 kg/m³. The average fiber content at that location was also the lowest of all, amounting to 13.2 kg/m³. The fibers retrieved from the concrete were steel fibers with single-hooked ends, 60 mm in length and 0.6 mm in diameter.

Subgrade testing (photograph 6) was carried out using a lightweight dynamic plate in accordance with ZTVE-StB 94. After drilling through the floor slab, measurements were taken at the three previously indicated locations. The measuring device provides the soil elasticity modulus, E_{vd} [MPa], based on the settlement amplitude. The secondary modulus E_2 [MPa] and compaction index I_s [–] were adopted in accordance with IBDiM guidelines. The obtained measurement results are presented in the table.



Photo 6. Example of soil testing using a light dynamic plate
Fot 6. Przykład badania podłoża za pomocą lekkiej płyty dynamicznej

Verification Analysis of Floor Load-Bearing Capacity

The verification analysis of the floor's load-bearing capacity, including the contribution of steel fibers, was carried out using the Meyerhof–Losberg theory. The following input data were adopted for the calculations:



Photo 5. Example view of drill cut samples from the floor, crack extending over entire floor slab cross-section (location 2), evident colour variation visible on cross-section

Fot. 5. Przykładowy widok odwiertów pobranych z posadzki, zasięg rysy obejmujący cały przekrój płyty posadzkowej (lokalizacja 2), widoczne wyraźne zróżnicowanie barwy na przekroju

Z odwiertów rdzeniowych, pobranych z przedmiotowej posadzki, przygotowano cylindryczne próbki badawcze do oznaczenia wytrzymałości betonu na ściskanie przez przycinanie piłą diamentową i wyszlifowanie lub nadlewanie w płaszczyźnie obciążenia, w sposób zapewniający spełnienie wymagań normy [1]. Badanie wytrzymałości na ściskanie betonu przeprowadzono wg wytycznych zawartych w [2]. Zgodnie z normą

PN-EN 13791:2019-12 wyniki badań przeliczono na wytrzymałość równoważną odwiertowi o proporcjach 2:1 (obecnie podstawowy wymiar rdzenia). Uzyskane wyniki charakteryzują się nieznaczną zmiennością wynikającą ze specyfiki materiału, jakim jest beton, i w pełni korelują z wynikami badań kontrolnych wykonywanych podczas układania posadzki. Nie budzą więc zastrzeżeń dotyczących wartości wytrzymałości na ściskanie wbudowanego betonu posadzkowego.

Oznaczenie zawartości stalowego zbrojenia rozproszonego w stwardniałym betonie wykonano, wykorzystując odwierty Ø100 poddane badaniu wytrzymałości na ściskanie oraz dodatkowe odwierty Ø150. Oznaczenia dokonano wg normy [3] na czterech próbkach pobranych odpowiednio z każdej lokalizacji. Średnia zawartość włókien w betonie badanych odwiertów rdzeniowych wyniosła 15,2 kg/m³, co jest zgodne z założeniami projektowymi. Zastrzeżenia budzi jednak zawartość włókien stwierdzona w odwiercie oznaczonym nr 2/3 w lokalizacji 2, która wynosiła jedynie 9,9 kg/m³. Średnia zawartość zbrojenia rozproszonego w tej lokalizacji również jest najniższa ze wszystkich lokalizacji i wynosi 13,2 kg/m³. Włókna zainwentaryzowane w betonie to włókna stalowe zakończone pojedynczymi haczykami, o długości 60 mm i grubości 0,6 mm.

Badania podłoża (fotografia 6) wykonano za pomocą lekkiej płyty dynamicznej, wg metody ZTVE-StB 94. Po przewierceniu posadzki przeprowadzono pomiary w trzech kolejnych wskazanych wcześniej lokalizacjach. Urządzenie pomiarowe wykorzystane w badaniu wskazuje moduł sprężystości gruntu E_{vd} [MPa] na podstawie amplitudy osiadania. Moduł wtórny E_2 [MPa] oraz wskaźnik zagęszczenia I_s [–] przyjęto wg opracowania IBDiM. Uzyskane wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli.

Kontrolna analiza nośności posadzki

Kontrolną analizę nośności posadzki, z uwzględnieniem włókien stalowych, przeprowadzono wg teorii Meyerhofa–Losberga. Do obliczeń przyjęto następujące dane wejściowe:

- grubość posadzki: 17 cm;
- klasa betonu – C25/30p;
- częściowe współczynniki bezpieczeństwa: wg PN-EN 1990;
- obciążenia: skupione – 25 kN (wymiary stopki: 15×15 cm); koło pojazdu – 35 kN (ciśnienie kontaktowe: 4 MPa); liniowe – 25 kN/m; powierzchniowe (równomierne) – 50 kN/m²;

Results of dynamic ground module testing using a dynamic plate Wyniki badań modułu dynamicznego podłoża płytą dynamiczną

Lokalizacja/ Localisation	Elasticity Modulus/ Określony moduł sprężystości	Subsidence amplitude/ Amplituda osiadania			Average amplitude/ Średnia wartość amplitudy	Calculated secondary modulus/ Obliczony moduł wtórny	Calculated density index/ Obliczony wskaźnik zagęszczenia
	E_{vd} [MPa]	s [mm]			s [mm]	E_2 [MPa]	I_s [-]
1	127.8	0.182	0.171	0.176	0.176	227.9	1.10
2	150.0	0.155	0.149	0.150	0.150	265.6	1.13
3	125.0	0.105	0.178	0.176	0.153	223.1	1.09

- floor slab thickness: 17 cm;
- concrete class: C25/30;
- partial safety factors: according to PN-EN 1990;
- loads: – concentrated load: 25 kN (baseplate dimensions: 15 × 15 cm); – vehicle wheel load: 35 kN (contact pressure: 4 MPa); – line load: 25 kN/m; – uniformly distributed load: 50 kN/m²;
- subgrade reaction modulus: 89 MN/m³;
- dispersed reinforcement: dosage 15 kg/m³ (fibers 60 mm long, 0.62 mm in diameter);
- allowable bending moment: – mid-panel and edge: 18.48 kNm; – corner: 11.46 kNm.

As a result of the floor load-bearing calculations, the following utilization ratios of the slab were obtained for all loading scenarios:

- uniformly distributed load – 53.09%;
- line load – 84.64%;
- single concentrated load on the slab: – mid-panel: 18.48%; – edge: 49.20%; – corner: 172.40%;
- load from two concentrated forces (spaced 1.0 m apart) on the slab: – mid-panel and edge: 22.40%; – corner: 36.12%;
- vehicle wheel load: – mid-panel: 27.43%; – edge: 74.19%; – corner: 264.52%.

The analyses performed (using the Meyerhof-Losberg theory) demonstrated that the floor slab satisfies load-bearing capacity requirements for all possible loading scenarios. Exceedance of stresses occurred only locally in slab corners. However, due to the very limited number of such cases, it was concluded that the observed cracking is not related to insufficient load-bearing capacity.

Analysis of the Causes of Floor Cracking

The correctness of the selected floor geometry and the technical parameters of both the floor concrete and the subgrade were demonstrated through calculations at the design stage. However, it should be emphasized that cost optimization at this stage – although economically justified for obvious reasons – always has consequences in terms of an increased general sensitivity of the constructed element to variations in material parameters or execution conditions.

In the analyzed project, a low dosage of steel fibers for dispersed reinforcement was adopted, amounting to 15 kg/m³ of concrete, and the thickness of the concrete floor slab was

- moduł reakcji podłoża: 89 MN/m³;
- zbrojenie rozproszone: dozowanie: 15 kg/m³ (włókna długości 60 mm i średnicy 0,62 mm);
- dopuszczalny moment zginający: w środku i na krawędzi – 18,48 kNm, w narożu – 11,46 kNm.

W efekcie przeprowadzonych obliczeń nośności posadzki, w przypadku wszystkich wariantów obciążenia, uzyskano następujące wyłączenie elementu:

- obciążenie równomierne – 53,09%;
- obciążenie liniowe – 84,64%;
- pojedyncze obciążenie skupione płyty: w środku – 18,48%; na krawędzi – 49,20%; w narożu – 172,40%;
- obciążenie od dwóch sił skupionych (w odstępnie 1,0 m) płyty: w środku i na krawędzi – 22,40%; w narożu – 36,12%;
- obciążenie kołem pojazdu: w środku – 27,43%; na krawędzi – 74,19%; w narożu – 264,52%.

Przeprowadzone analizy (wg teorii Meyerhofs-Losberga) wykazały spełnienie warunków nośności posadzki w przypadku wszystkich możliwych wariantów obciążenia. Lokalnie stwierdzono jedynie przekroczenie naprężeń w narożach płyty. Ze względu jednak na znikomą ich liczbę stwierdzono, że występujące zarysowania posadzki nie są związane z brakiem spełnienia tego warunku.

Analiza przyczyn powstania zarysowań posadzki

Poprawność doboru geometrii posadzki i parametrów technicznych betonu posadzki oraz podłoża wykazana została obliczeniowo na etapie projektu. Należy jednak podkreślić, że optymalizacja kosztowa na tym etapie, jakkolwiek z oczywistych względów uzasadniona ekonomicznie, zawsze ma swoje konsekwencje w szeroko rozumianej zwiększonej „wrażliwości” realizowanego elementu na zmienność parametrów materiałowych lub warunków wykonawczych. W analizowanym projekcie przyjęto małe dozowanie włókien stalowych zbrojenia rozproszonego, wynoszące 15 kg/m³ betonu oraz grubość płyty betonowej posadzki wynoszącą 170 mm. Oznacza to, że odchyłki od tych wartości, wynikające np. z niedokładności wykonawczej przygotowania podłoża, wykonania płyty, dozowania oraz jednorodności rozmieszczenia włókien w betonie, mogą powodować występowanie lokalnych niejednorodności i koncentracji naprężeń w płycie posadzkowej, sprzyjających powstawaniu zarysowań i spękań.

170 mm. This means that deviations from these values – resulting, for example, from inaccuracies in subgrade preparation, slab execution, fiber dosing, and the uniformity of fiber distribution in the concrete – may lead to local non-uniformities and stress concentrations within the slab, promoting the formation of cracks and fractures.

It should also be emphasized that the execution of a so-called jointless floor carries the risk of shrinkage-induced cracking – the larger the expansion-joint panels, the more susceptible the slab becomes to such phenomena. The analyzed floor panels have dimensions with correctly adopted aspect ratios, yet their overall size is relatively large. For jointless floors, reference [13] recommends a maximum expansion joint spacing of 35 m when steel fibers or traditional reinforcement are used.

The mix design of the installed concrete meets the main design assumptions, except for the water–cement ratio. The design required a ratio not greater than 0.52, while the working mix provides a value of 0.53. From an engineering perspective, this difference is negligible and does not significantly influence the occurrence of observed slab cracking.

Material testing (both the control tests performed during construction in the provided scope and the independent tests) regarding compressive strength and steel-fiber content confirms compliance with design assumptions. It should be noted, however, that for measurement location No. 2, one core sample showed a very low fiber content of 9.9 kg/m³. This location also displayed the lowest average fiber content of 13.2 kg/m³, and the corresponding core showed a crack penetrating the entire slab thickness.

Control tests of the subgrade (within the geotechnical scope) confirmed its suitability for the construction of the slab, and the independent tests did not provide grounds to question the subgrade parameters adopted in the design. Control tests of the installed concrete mix (in the provided scope) confirmed compliance with the design assumptions regarding consistency (slump values met class S3; measurements were 120÷150 mm).

The concrete placement records indicate that the concrete mix temperature ranged from 15.5°C to 18.9°C, while the air temperatures recorded in the control tests during concreting ranged from 8.5°C to 17.8°C. Available measurement data from IMGW-PIB show that in southern Poland (where the analyzed building was constructed), maximum air temperatures in May/June could reach 25–30°C (Figure 3). The comparison of data suggests that during the execution of the concrete floors in the hall, the freshly placed surface may have been exposed to intensive water evaporation due to temperature or ventilation. This raises doubts regarding the sufficiency of the curing techniques applied to the young concrete.

Based on the available information, it was estimated that the cracks observed in the hall floor developed early in the structure's life – before the building was put into service. Subsequent repair attempts showed that crack development continued over time in all areas of the facility, regardless of usage intensity. Therefore, operational (in-service) causes of cracking can be considered marginal.

Należy również podkreślić, że wykonanie posadzki tzw. bezspoinowej niesie ryzyko zarysowań indukowanych skurczowo – im większe pola dylatowane, tym bardziej płyta posadzkowa narażona jest na takie zjawisko. Analizowane pola posadzki mają wymiary o prawidłowo przyjętych proporcjach boków, ale wymiary tych pól są relatywnie duże. W przypadku posadzek bezspoinowych w opracowaniu [13] zaleca się przyjęcie 35 m jako maksymalnego rozstawu dylatacji w przypadku zastosowania zbrojenia włóknami stalowymi lub zbrojeniem tradycyjnym.

Receptura wbudowanego betonu spełnia główne założenia projektowe z zastrzeżeniem co do wartości współczynnika w/c. Projekt zakładał wartość tego współczynnika nie większą niż 0,52, podczas gdy receptura robocza podaje wartość 0,53. Różnica ta jest z inżynierskiego punktu widzenia pomijalna i nie ma decydującego wpływu na obecność stwierdzonych zarysowań płyty posadzkowej.

Badania materiałowe (zarówno badania kontrolne podczas realizacji w przekazanym zakresie, jak i badania własne), w zakresie wytrzymałości na ściskanie betonu oraz zawartości włókien zbrojenia rozproszonego w betonie, potwierdzają spełnienie założeń projektowych. Podkreślić jednak należy, że w przypadku lokalizacji pomiarowej nr 2 wyniki oznaczenia zawartości włókien na pojedynczym odwiercie wykazały bardzo małą zawartość włókien wynoszącą 9,9 kg/m³. W tej lokalizacji stwierdzono również najmniejszą pojedynczą wartość średnią zawartości włókien wynoszącą 13,2 kg/m³, a na odwiercie zarysowanie przechodzące przez całą grubość płyty posadzkowej.

Badania kontrolne podłoża (zakres geotechniczny) potwierdziły jego przydatność do wykonania płyty posadzkowej, a badania własne nie dały podstaw do kwestionowania przyjętych w projekcie parametrów podłoża. Badania kontrolne (przekazany zakres) wbudowanej mieszanki betonowej spełniają założenia projektowe dotyczące jej konsystencji (opad stożka spełniał założenia klasy S3; wyniki pomiarów wynosiły 120÷150 mm).

W dokumentacji kontrolnej z betonowania podano, że temperatura mieszanki betonowej zawierała się w przedziale 15,5÷18,9°C, a zarejestrowana w badaniach kontrolnych temperatura powietrza w czasie betonowania w przedziale 8,5÷17,8°C. Dostępne dane pomiarowe IMGW-PIB pokazują, że na południu Polski (gdzie został wybudowany przedmiotowy obiekt), temperatura maksymalna powietrza w okresie maj/czerwiec mogła osiągać wartość 25÷30°C (rysunek 3). Zestawienie danych pozwala domniemywać, że podczas realizacji posadzek betonowych w przedmiotowej hali powierzchnia nowo ułożonej posadzki mogła być narażona na intensywne parowanie wody z powierzchni związane z temperaturą lub przewietrzaniem. Pozwala to sformułować wątpliwość w zakresie zastosowanych technik pielęgnacji młodego betonu.

Na podstawie istniejących informacji oszacowano, że występujące w przedmiotowej hali zarysowania posadzki powstały w początkowym czasie życia obiektu – poprzedzającym oddanie obiektu do eksploatacji. W wyniku przeprowadzanych kolejnych napraw stwierdzono, że rozwój rys postępował w czasie na wszystkich obszarach obiektu, niezależnie od intensywności użytkowania. Wobec tego przyczyny eksploatacyjne zarysowań można uznać za marginalne.

Summary

Based on the diagnostic and analytical procedures performed, the technical condition of the floor can be considered satisfactory. The documented damage and cracking vary in character and origin. Surface cracks forming a network pattern (referred to as *crazing*) are a natural feature of floors hardened using DST technology and do not constitute a technical problem.

Structural cracks occur throughout almost the entire surface of the analyzed facility. Some of them propagated despite previous repair attempts. These cracks are shrinkage-related, as indicated by their irregular pattern, early formation, and progressive development over time. Concrete shrinkage, a primary cause of cracking in industrial floors, is widely described in the literature [7, 9]. At location 2, where the lowest steel-fiber content (9.9 kg/m^3) was recorded, cracks extending through the entire slab thickness were identified, which may indicate a local loss of the dispersed-reinforcement function [7].

During concreting, air temperatures were locally recorded at up to 30°C [11]. Under such conditions, rapid evaporation of water from the concrete surface can lead to shrinkage stresses and microcracking, especially if curing was insufficient or terminated too early [9, 10]. The use of a jointless floor with large dilatation panels (up to 37.5 m) may increase the risk of shrinkage cracking, as confirmed by studies such as [6, 8, 11]. Design standards and guidelines often recommend limiting the dimensions of such panels to 30–36 m [8]. Load-bearing analyses performed using the Meyerhof–Losberg theory confirm compliance with strength requirements in most loading

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych czynności diagnostycznych i analitycznych stan techniczny posadzki można uznać za dostateczny. Zinventaryzowane uszkodzenia i zarysowania mają różnicowany charakter i genezę. Rysy powierzchniowe w postaci siatki (tzw. *crazing*) są naturalną cechą posadzek utwardzanych w technologii DST i nie stanowią problemu w sensie technicznym.

Zarysowania o charakterze strukturalnym występują w zasadzie na całej powierzchni analizowanego obiektu. Niektóre z nich ulegały propagacji pomimo uprzednio prowadzonych napraw. Rysy te mają charakter skurczowy, na co wskazuje ich nieregularny przebieg, wczesny czas powstania oraz rozwój postępujący w czasie. Skurcz betonu, jako przyczyna zarysowań w posadzkach przemysłowych, został obszernie opisany w literaturze [7, 9]. W lokalizacji 2, gdzie oznaczono najmniejszą ilość włókien stalowych ($9,9 \text{ kg/m}^3$), stwierdzono rysy przechodzące przez cały przekrój płyty, co może wskazywać na lokalną utratę funkcji zbrojenia rozproszonego [7].

W czasie betonowania posadzki odnotowano temperaturę powietrza dochodzącą lokalnie do 30°C [11]. W takich warunkach szybkie parowanie wody z powierzchni betonu może powodować powstawanie naprężeń skurczowych i mikrorys, szczególnie jeśli pielęgnacja była niewystarczająca lub zakończona zbyt wcześnie [9, 10]. Zastosowanie posadzki tzw. bezspoinowej, z dużymi polami dylatacyjnymi (do 37,5 m) może zwiększać ryzyko powstawania rys skurczowych, co potwierdzają badania m.in. [6, 8, 11]. Standardy i zalecenia projektowe często rekomendują ograniczenie długości boków takich pól do

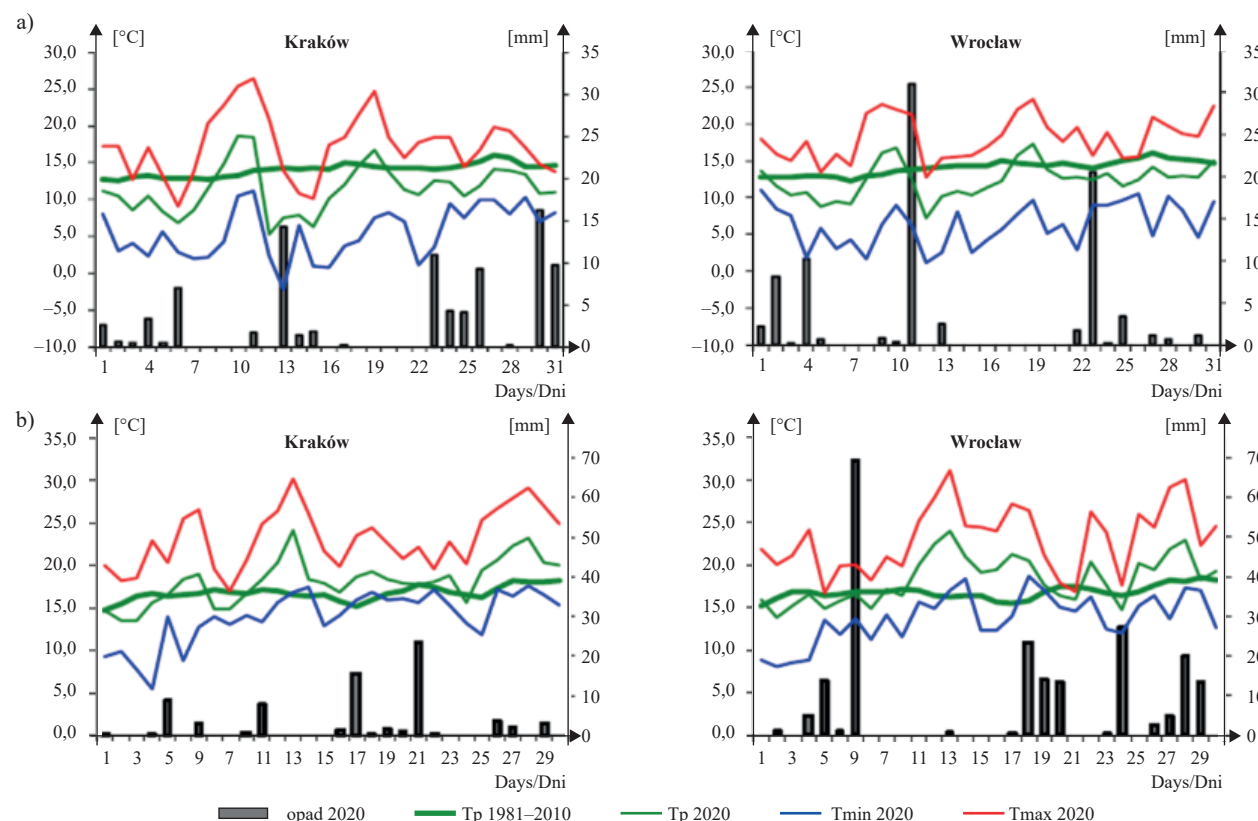


Fig. 3. Average daily and extremal air temperatures and daily precipitation totals in May (a) and June (b) 2020 r. (data from the IMGW)
 Rys. 3. Średnia dobowa i ekstremalna temperatura powietrza oraz dobowa suma opadu atmosferycznego w maju (a) i czerwcu (b) 2020 (dane IMGW)

scenarios, except for corners, where local stress exceedances were recorded [7, 8].

The scope of the conducted testing and calculations enabled the identification of the causes of the observed defects. However, it should be noted that supplementing the diagnostics with equivalent flexural-tensile strength tests (performed on beam specimens cut from the floor, $15 \times 15 \times 70$ cm) could significantly strengthen the conclusions, providing additional technical justification [14].

The technical causes of shrinkage cracking are complex. However, in the analyzed case, they may be attributed to:

- economical design assumptions involving a relatively low dosage of steel fibers;
- adoption of large expansion-joint panel dimensions (i.e., a jointless floor);
- potentially insufficient curing conditions (e.g., curing applied for too short a duration under relatively high temperatures conducive to intense evaporation).

The cracks present on the floor surface, with widths of up to 0.3–0.4 mm, are primarily an aesthetic issue and do not require mandatory repair, provided that their edges do not spall. Cracks of larger width, or those showing edge spalling, require repair using standard methods (stitching of cracks is not recommended in floor slabs, as this technique carries the risk that, during further slab movement, a new crack may form near the repaired one).

30–36 m [8]. Analizy nośności wykonane wg teorii Meyerhofa-Losberga potwierdzają spełnienie warunków wytrzymałościowych w większości przypadków obciążenia, z wyjątkiem naroży, gdzie lokalnie odnotowano przekroczenie wytrzymałości [7, 8].

Zakres przeprowadzonych czynności badawczych i obliczeniowych umożliwił wskazanie przyczyn występujących defektów posadzki; zwraca się jednak uwagę, że uzupełnienie diagnostyki o badania wytrzymałości równoważnej (przeprowadzone na wyciętych z posadzki próbkach belkowych o wymiarach $15 \times 15 \times 70$ cm) mogłoby, w znacznym stopniu, wzmocnić wnioski, nadając im dodatkowe merytoryczne uzasadnienie [14].

Techniczne przyczyny powstania rys skurczowych są złożone. Można jednak uznać, że w analizowanym przypadku składają się na nie:

- oszczędne założenia projektowe dotyczące relatywnie małego dozowania włókien stalowych;
- przyjęcie znacznych wymiarów pól dylatacyjnych posadzki (tzw. posadzka bezspoinowa);
- możliwe niedostateczne warunki pielęgnacji (np. zbyt krótkie prowadzenie pielęgnacji w warunkach relatywnie wysokiej temperatury sprzyjającej intensywnemu parowaniu);

Występujące na powierzchni posadzki zarysowania o szerokości do 0,3÷0,4 mm stanowią mankament natury estetycznej i nie wymagają bezwzględnej naprawy, o ile ich krawędzie nie ulegają wykruszeniu. Rysy o większej szerokości lub wykazujące wykruszenia wymagają napraw, wg typowych technologii (nie rekomenduje się wykonania zszywania rys na posadzce ze względu na to, że taki sposób naprawy niesie ryzyko, podczas dalszej pracy płyty posadzki, wystąpienia rysy w bliskim otoczeniu rysy naprawianej).

Received: 21.07.2025

Revised: 28.08.2025

Published: 23.12.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 21.07.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 28.08.2025 r.

Opublikowano: 23.12.2025 r.

Literature

- [1] PN-EN 12390-1:2021, „Badania betonu. Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek i form”, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2021.
- [2] PN-EN 13791:2019-12, „Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych”, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2019.
- [3] PN-EN 14721+A1:2007, „Metoda badania betonu zbrojonego włóknem stalowym. Pomiary zawartości zbrojenia w świeżym i stwardniałym betonie”, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2007.
- [4] Mindess S. Concrete Materials: Properties, Specifications, and Testing, 3rd ed., Amsterdam: Elsevier, 2016.
- [5] Neville AM, Brooks JJ. Concrete Technology, 2nd ed., London: Pearson, 2017.
- [6] Kleine-Berkenbusch J, Schmidt M. Industrial Concrete Floors, Berlin: Ernst & Sohn, 2018.
- [7] Tiberti G, Minelli F, Plizzari GA. „Cracking behavior of industrial concrete floors reinforced with steel and macro-synthetic fibers”, Construction and Building Materials, vol. 157, pp. 1082–1090, Dec. 2017, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.154.
- [8] Ferrara L, Bamonte P. „On the use of SFRC for industrial slabs on grade: Structural design and field applications”, Engineering Structures, vol. 150, pp. 813–824, Oct. 2017, DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.07.067.

- [9] Kermani A, Mahmoodzadeh S. „Early-age behavior of fibre reinforced concrete and influence of curing methods”, Cement and Concrete Research, vol. 122, pp. 82–94, Jul. 2019, DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.04.014.
- [10] Choi WC, Min KH. „Effects of shrinkage-reducing admixtures and steel fibers on early-age cracking of concrete slabs”, Materials, vol. 13, no. 12, p. 2881, 2020, DOI: 10.3390/ma13122881.
- [11] Kottari N, Loizos A, Gkyrtis K. „Experimental investigation of industrial concrete floor slabs reinforced with fibers – Early age cracking and long-term performance”, Construction and Building Materials, vol. 234, p. 117379, Feb. 2020, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117379.
- [12] Hajduk P. Projektowanie i ocena techniczna betonowych podłóg przemysłowych, wydanie 2, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2018.
- [13] Technical Report 34, CONCRETE INDUSTRIAL GROUND FLOORS, A guide to design and construction, fourth edition, The Concrete Society.
- [14] Jasiczak J, Zieliński K. Projektowane i rzeczywiste cechy mechaniczne betonowej posadzki przemysłowej zbrojonej włóknami stalowymi. Materiały Budowlane 9/2017; DOI: 10.15199/33.2017.09.06.