

Paweł Grabowski, M.Sc., Eng. <sup>1\*)</sup>

ORCID: 0009-0007-9399-1294

Mariusz Wesołowski, PhD, DSc<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0002-5545-8831

Krzysztof Blacha, PhD<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-4599-4294

# The influence of temperature on the assessment of the load-bearing capacity of concrete airport pavements

## *Wpływ temperatury na ocenę nośności betonowych nawierzchni lotniskowych*

DOI: 10.15199/33.2024.11.12

**Abstract.** The aim of the work was to determine the influence of temperature on the airfield pavement's elastic deflections and therefore the load-bearing capacity results. The article presents the research carried out on the cement concrete test section and the obtained data presenting the impact of the discussed phenomenon on measurements. The article summarizes the research conducted on the influence of temperature changes on the obtained load-bearing capacity results, presents general conclusions and proposals for further work on the topic.

**Keywords:** airfield pavement; load-bearing capacity; climate conditions; temperature.

**Streszczenie.** Celem badań było określenie wpływu temperatury na uzyskiwane wyniki pomiarów ugięć sprężystych nawierzchni betonowych, a w efekcie ich nośności. W artykule przedstawiono badania realizowane na testowym odcinku wykonanym z betonu cementowego oraz uzyskane dane, ilustrujące wpływ omawianego zjawiska na pomiary. Dokonano podsumowania przeprowadzonych badań w zakresie wpływu zmian temperatury na uzyskane wyniki nośności, przedstawiono ogólne wnioski oraz propozycje dalszych prac w podjętym temacie.

**Słowa kluczowe:** nawierzchnia lotniskowa; nośność; warunki klimatyczne; temperatura.

One of the most important elements of ensuring the safety of air operations is to guarantee the required load-bearing capacity of airport pavements. The load-bearing capacity of the pavement is defined as the ability of the structural system of the pavement, together with the underlying subgrade and substructure layers, to carry a specific load without the risk of damage [1].

The load-bearing capacity of a pavement structure is a complex parameter influenced by many factors, inter alia:

- cross-section of the pavement structure, thickness of its individual layers;
- the material from which the individual layers of the pavement structure are made, in particular their physical and mechanical properties;
- the expected number of flight operations (repetitive pavement loading);
- load-bearing capacity and deformability of the subgrade, resulting from the arrangement of layers and their compaction and moisture;
- atmospheric conditions before and during the load capacity test (temperature).

Until now, in accordance with the regulations of international aviation organizations, such as the European Aviation Safety Authority (EASA) [2], the International Civil Aviation Organization (ICAO) [3], and the Federal Aviation Administration (FAA) [4], the load capacity of airfield

Jednym z najważniejszych elementów zapewnienia bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych jest zagwarantowanie wymaganej nośności nawierzchni lotniskowych. Nośność nawierzchni definiowana jest jako zdolność układu konstrukcyjnego nawierzchni, wraz z zalegającym pod nim podłożem gruntowym i warstwami podbudowy, do przenoszenia określonego obciążenia bez ryzyka jej uszkodzenia [1].

Nośność konstrukcji nawierzchni jest złożonym parametrem, na który wpływ ma wiele czynników, m.in.:

- przekrój konstrukcji nawierzchni, grubości jej poszczególnych warstw;
- materiał, z jakiego wykonano poszczególne warstwy konstrukcji nawierzchni, w szczególności ich właściwości fizyko-mechaniczne;
- przewidywana liczba operacji lotniczych (powtarzalne obciążenie nawierzchni);
- nośność i odkształcalność podłoża gruntowego, wynikające z układu warstw oraz ich zagęszczenia i wilgotności;
- warunki atmosferyczne przed i podczas badania nośności (temperatura).

Dotychczas, zgodnie z przepisami międzynarodowych organizacji lotniczych, takich jak European Aviation Safety Authority (EASA) [2], International Civil Aviation Organization (ICAO) [3] i Federal Aviation Administration (FAA) [4] nośność nawierzchni lotniskowych oceniana była wg metody ACN-PCN (Aircraft Classification Number – Pavement Classification Number). Po 28 listopada 2024 r. nastąpi zmiana w sposobie oceny nośności nawierzchni i w życie wejdzie me-

<sup>1)</sup> Air Force Institute of Technology, Airfield Pavement Division

<sup>2)</sup> Military Institute of Armoured and Automotive Technology

<sup>\*</sup>) Correspondence address: pawel.grabowski@itwl.pl

pavements has been assessed according to the ACN-PCN (Aircraft Classification Number – Pavement Classification Number) method. After November 28, 2024, the method for assessing the load-bearing capacity of pavements will transition to the ACR-PCR (Aircraft Classification Rating – Pavement Classification Rating) method [2 ÷ 5].

In Poland, the load-bearing capacity tests of airfield pavements with the ACN-PCN method are carried out in accordance with the methodology described in the Defence Standard NO-17-A500:2016 [1].

In the ACN-PCN method, the load-bearing capacity of the PCN pavement is determined by a group of symbols describing the individual parameters of the structure and informing about its determination method, which includes [1]:

- dimensionless classification number of the pavement;
- type of airfield pavement (structure);
- the bearing capacity category of the subgrade;
- the permissible value of the pressure in aircraft tires;
- the evaluation method applied.

The ACN classification number indicates the relative impact of an aircraft on the airfield pavement for a determined standard subgrade load capacity. It is assumed that an aircraft can operate safely on a given pavement when  $ACN \leq PCN$ . The regulations allow for occasional flight operations of aircraft with  $ACN > PCN$ , adopting appropriate criteria for permissible overloads [3].

In the case of calculating the load-bearing capacity of rigid (elastic) pavements made in cement concrete technology, the calculations are based on the Westergaard model, i.e. a slab with finite dimensions in the plan, placed on an inertial Winkler substrate [6]. The formulas derived by Westergaard describe the state of maximum stresses in the slab in the case of three characteristic load schemes, i.e. in the middle of the slab, its edge and in the corner. For example, for the loads in the center of the plate and the case of the circular shape of the contact surface with the pavement, the formula takes the form:

$$\sigma_r = 0,275 \frac{P}{h^2} (1+\nu) \left[ \log \left( \frac{Eh^3}{kb^4} \right) - 0,436 \right] \quad (1)$$

where:

P – slab load [N];  
 h – slab thickness [m];  
 ν – Poisson's ratio [-];  
 E – modulus of elasticity of the concrete slab [N/m<sup>2</sup>];  
 k – modulus of subgrade reaction [N/m<sup>3</sup>];  
 a – radius of the contact circle between the tire and the pavement [m];  
 b – equivalent radius, taking into account the load distribution in the lower part of the slab [m];  
 $b = \sqrt{(1,6a^2 + h^2)} - 0,675h$ , when  $a < 1,724h$ ,  
 $b = a$ , when  $a > 1,724h$ .

The load capacity of an airfield pavement can also be determined in the case of a predetermined PCN index. In such a case, the result of the load capacity is the number of permissible flight operations, determined for a specific number of load repetitions N, which is calculated depending on the adopted calculation model of the evaluated structure of the airfield pavement. In the case of rigid pavements made of cement concrete, the formula resulting from the criterion of permissible stresses is used:

to the ACR-PCR (Aircraft Classification Rating – Pavement Classification Rating) [2 ÷ 5].

W Polsce badania nośności nawierzchni lotniskowych metodą ACN-PCN wykonywane są zgodnie z metodyką opisaną w Normie Obronnej NO-17-A500:2016 [1]. W metodzie ACN-PCN nośność nawierzchni PCN określona jest przez grupę symboli opisującą poszczególne parametry konstrukcji oraz informującą o metodzie wyznaczania, w której skład wchodzi [1]:

- bezwymiarowa liczba klasyfikacyjna nawierzchni;
- rodzaj nawierzchni lotniskowej (konstrukcji);
- kategoria nośności podłoża gruntowego;
- dopuszczalna wartość ciśnienia w oponach statku powietrznego;
- zastosowana metoda oceny.

Z kolei liczba klasyfikacyjna samolotu ACN określa względne oddziaływanie statku powietrznego na nawierzchnię lotniskową w przypadku ustalonej standardowej nośności podłoża gruntowego. Przyjmuje się, że w sposób bezpieczny na danej nawierzchni może operować statek powietrzny, gdy  $ACN \leq PCN$ . Przepisy dopuszczają sporadyczne operacje lotnicze statków powietrznych o  $ACN > PCN$ , przyjmując stosowne kryteria dopuszczalnych przeciążeń [3].

W przypadku obliczania nośności nawierzchni sztywnych (sprężystych), wykonanych w technologii betonu cementowego obliczenia bazują na modelu Westergaarda, tzn. płyty o skończonych wymiarach w planie, położonej na bezinercyjnym podłożu typu Winklera [6]. Wyprowadzone przez Westergaarda wzory opisują stan naprężeń maksymalnych w płycie w przypadku trzech charakterystycznych schematów obciążeń, tj.: na środku płyty, jej krawędzi oraz w narożniku. Przykładowo, dla obciążeń w środku płyty i przypadku kołowego kształtu powierzchni styku z nawierzchnią, wzór przyjmuje postać:

$$\sigma_r = 0,275 \frac{P}{h^2} (1+\nu) \left[ \log \left( \frac{Eh^3}{kb^4} \right) - 0,436 \right] \quad (1)$$

gdzie:

P – obciążenie płyty [N];  
 h – grubość płyty [m];  
 ν – liczba Poissona [-];  
 E – moduł sprężystości płyty betonowej [N/m<sup>2</sup>];  
 k – współczynnik reakcji podłoża [N/m<sup>3</sup>];  
 a – promień koła styku opony z nawierzchnią [m];  
 b – promień równoważny, uwzględniający rozkład obciążeń w dolnej części płyty [m];  
 $b = \sqrt{(1,6a^2 + h^2)} - 0,675h$ , gdy  $a < 1,724h$ ,  
 $b = a$ , gdy  $a > 1,724h$ .

Nośność nawierzchni lotniskowej oznaczyć można także w przypadku z góry założonego wskaźnika PCN. Wówczas wynikiem nośności jest liczba dopuszczalnych operacji lotniczych, wyznaczona dla określonej liczby powtórzeń obciążenia N, którą oblicza się w zależności od przyjętego modelu obliczeniowego ocenianej konstrukcji nawierzchni lotniskowej.

W przypadku nawierzchni sztywnych, wykonanych z betonu cementowego, korzysta się ze wzoru wynikającego z kryterium dopuszczalnych naprężeń:

$$N = \left[ \frac{R_{zg}}{\sigma} \cdot \left( \frac{E_c}{30000} \right)^{1,3} \right]^{(1/0,233)} \cdot 10^4 \quad (2)$$

where:

$R_{zg}$  – flexural strength of concrete during bending [N/m<sup>2</sup>];  
 $\sigma$  – flexural stresses during bending determined in the lower part of the concrete slab [N/m<sup>2</sup>];  
 $E_c$  – modulus of elasticity of concrete [N/m<sup>2</sup>]

A preliminary analysis of the ACN-PCN method allows us to conclude that it primarily takes into account the factors affecting the load-bearing capacity of the structure resulting from the pavement structure itself and its physico-mechanical parameters. The influence of climatic conditions during measurements is not taken into account. However, as experiments show [7], these conditions can have a significant impact on the obtained research results. This was analysed during the study of flexible pavements made of asphalt concrete [8 ÷ 11]. In case of rigid surfaces, the influence of climatic changes on stresses in the concrete slab was determined. [12 ÷ 14]. The numerical method was utilized by analysing the influence of temperature gradient changes in the concrete slab along with the influence of movement on the stresses occurring in the joined road slabs [15].

The article aims to present the preliminary research results regarding the impact of temperature changes on load-capacity measurements, carried out at the Air Force Institute of Technology (ITWL).

### Methods for measuring the load-capacity of rigid airfield pavements

In accordance with the assumptions of NO-17-A500:2016 [1], the parameters necessary to calculate the load-bearing capacity of airfield pavements are obtained on the basis of the identification of the pavement structure and the measurement of deflection performed with an HWD (Heavy Weight Deflectometer) airport deflectometer.

The deflection of the pavement is measured using geophones (one in the axis of the loading plate, the other eight on the rail). The obtained results form the so-called deflection bowl. The deflection values in the entire bowl are described by the function expressed by formula:

$$U_i = f(h, E, v) \quad (3)$$

where:

$U_i$  – value of deflection of the tested surface at point  $i$  [ $\mu\text{m}$ ];  
 $f$  – functional dependence of component factors;  
 $h$  – thickness of individual structural layers of the pavement [m];  
 $E$  – modulus of elasticity of individual structural layers of the pavement and the subgrade [N/m<sup>2</sup>];  
 $v$  – Poisson's ratio of individual structural layers and the subgrade.

An example of a recorded deflection waveform over time, measured on one of the aerodrome objects, is shown in Figure 1. The

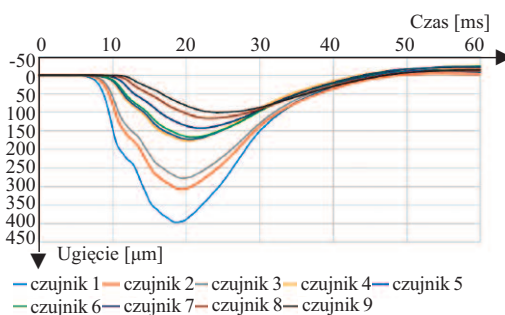


Fig. 1. Change of deflection over time Fig.: own work  
 Rys. 1. Zmiana ugięcia w czasie Rys.: opracowanie własne

$$N = \left[ \frac{R_{zg}}{\sigma} \cdot \left( \frac{E_c}{30000} \right)^{1,3} \right]^{(1/0,233)} \cdot 10^4 \quad (2)$$

gdzie:

$R_{zg}$  – wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu [N/m<sup>2</sup>];  
 $\sigma$  – naprężenia rozciągające przy zginaniu wyznaczone w dolnej części płyty betonowej [N/m<sup>2</sup>];  
 $E_c$  – moduł sprężystości betonu [N/m<sup>2</sup>].

Wstępna analiza metody ACN-PCN pozwala stwierdzić, że uwzględnia ona przede wszystkim czynniki wpływające na nośność konstrukcji wynikające z samej konstrukcji nawierzchni oraz jej parametrów fizykomechanicznych. Praktycznie nie jest brany pod uwagę wpływ warunków klimatycznych panujących podczas pomiarów. Tymczasem, jak wskazują doświadczenia [7], warunki te mogą mieć niebagatelny wpływ na uzyskiwane wyniki badań. Analizowano to podczas badania nawierzchni podatnych, wykonanych z betonu asfaltowego [8 ÷ 11]. W przypadku nawierzchni sztywnych określano przede wszystkim wpływ zmian klimatycznych na naprężenia w płycie betonowej [12 ÷ 14]. Metodą numeryczną analizowano także wpływ zmian gradientu temperatury w płycie betonowej wraz z wpływem ruchu na naprężenia występujące w łączonych płytach drogowych [15].

Celem artykułu jest przedstawienie wstępnych wyników badań dotyczących wpływu zmian temperatury na wyniki pomiarów nośności nawierzchni, realizowanych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych (ITWL).

### Metody pomiaru nośności sprężystych nawierzchni lotniskowych

Zgodnie z założeniami NO-17-A500:2016 [1] parametry niezbędne do obliczenia nośności nawierzchni lotniskowych uzyskiwane są na podstawie identyfikacji konstrukcji nawierzchni oraz pomiaru ugięcia wykonywanego ugięciomierzem lotniskowym typu HWD (Heavy Weight Deflectometer).

Ugięcie nawierzchni mierzone jest za pomocą geofonów (jeden w osi płyty obciążającej, pozostałe osiem na listwie). Uzyskane wyniki tworzą tzw. czaszę ugięcia. Wartości ugięcia w całej czaszy opisuje się za pomocą funkcji wyrażonej wzorem:

$$U_i = f(h, E, v) \quad (3)$$

gdzie:

$U_i$  – wartość ugięcia badanej nawierzchni w punkcie  $i$  [ $\mu\text{m}$ ];  
 $f$  – zależność funkcyjna czynników składowych;  
 $h$  – grubość poszczególnych warstw konstrukcyjnych nawierzchni [m];  
 $E$  – moduł sprężystości poszczególnych warstw konstrukcyjnych nawierzchni i podłoża [N/m<sup>2</sup>];  
 $v$  – współczynnik Poissona poszczególnych warstw konstrukcyjnych i podłoża.

Przykład zarejestrowanego przebiegu ugięcia w czasie, zmierzonego na jednym z obiektów lotniskowych, przedstawiono na rysunku 1. O rozkła-

distribution of deflection is determined by the parameters of individual layers of structural surfaces and the subgrade.

The modulus of elasticity of the materials of individual layers of the structure is determined on the basis of the recorded values of pavement deflection by means of an iterative comparison of the measured deflection and theoretical deflection so that the function  $F$  has a minimum value, according to the following relation:

$$F = \sum_{j=1}^k (w_j - u_j)^2 \quad (4)$$

where:

- $F$  – the function of approximating the actual and theoretical values;
- $w_j$  – calculated pavement deflection at a distance  $r$  from the center of the loading plate [ $\mu\text{m}$ ];
- $u_j$  – measured pavement deflections at a distance  $r$  from the center of the loading plate [ $\mu\text{m}$ ];
- $k$  – number of geophones, usually 9.

The modulus of elasticity (Young's modulus) of concrete  $E$  is an indicator of its longitudinal deformability and is expressed as the ratio of stress to the corresponding strain [16]:

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (5)$$

where:

- $\sigma$  – stress;
- $\varepsilon$  – deformation.

Due to the fact that in the case of concrete, the  $\sigma - \varepsilon$  relationship is not linearly proportional, specific values of  $\sigma$  were adopted in order to determine the modulus of elasticity  $E$ . Therefore, the following modules are distinguished:

- initial module  $E_0$ ;
- normative module  $E_b = E$ ;
- instantaneous module  $E_c$ ;
- dynamic module  $E_{dyn}$ .

The differences consist in adopting stress values for which the modulus of elasticity  $E$  is determined (Figure 2) [17]. Other parameters of the individual layers of the structure required for calculations, such as their thickness, flexural strength during bending, necessary for further analysis of the load-bearing capacity, are most often determined based on boreholes. In special circumstances, especially in the case of new pavements, where the structural layout and the physico-mechanical parameters of the materials used during construction are known, verified design data are used for further analysis. The parameters of the subgrade are usually determined based on HWD measurements. In order to determine the load-bearing category of the subgrade, the following are used:

- values of  $E$ -modules;
- correlation between  $E$  and the California Bearing Ratio CBR;
- the relationship between CBR value and the subgrade modulus of subgrade reaction ( $k$ -value).

Subgrade parameters can also be measured during geotechnical field surveys. Based on the above-mentioned

dzie ugięcia decydują parametry poszczególnych warstw nawierzchni konstrukcyjnych oraz podłoża gruntowego.

Moduły sprężystości materiałów poszczególnych warstw konstrukcji wyznacza się na podstawie zarejestrowanych wartości ugięcia nawierzchni za pomocą iteracyjnego porównywania zmierzonego ugięcia oraz ugięcia teoretycznego tak, aby funkcja  $F$  miała wartość minimalną, zgodnie z zależnością:

$$F = \sum_{j=1}^k (w_j - u_j)^2 \quad (4)$$

gdzie:

- $F$  – funkcja przybliżenia wartości rzeczywistej i teoretycznej;
- $w_j$  – obliczone ugięcie nawierzchni w odległości  $r$  od środka płyty obciążającej [ $\mu\text{m}$ ];
- $u_j$  – zmierzone ugięcia nawierzchni w odległości  $r$  od środka płyty obciążającej [ $\mu\text{m}$ ];
- $k$  – liczba geofonów, najczęściej 9.

Moduł sprężystości (moduł Younga) betonu  $E$  jest wskaźnikiem jego odkształcalności podłużnej i wyraża się stosunkiem naprężenia do odpowiadającego mu odkształcenia [16]:

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (5)$$

gdzie:

- $\sigma$  – naprężenie;
- $\varepsilon$  – odkształcenie.

W związku z tym, że w przypadku betonu zależność  $\sigma - \varepsilon$  nie jest liniowo proporcjonalna, przyjęto określone wartości  $\sigma$  w celu wyznaczenia modułu sprężystości  $E$ . W związku z tym, rozróżnia się m.in.:

- moduł początkowy  $E_0$ ;
- moduł normowy  $E_b = E$ ;
- moduł chwilowy  $E_c$ ;
- moduł dynamiczny  $E_{dyn}$ .

Różnice polegają na przyjęciu wartości naprężeń, dla których ustala się moduł sprężystości  $E$  (rysunek 2) [17]. Wymagane do obliczeń inne parametry poszczególnych warstw konstrukcji, takie jak ich grubość, wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, niezbędne do dalszej analizy nośności najczęściej określa się na podstawie odwiertów. W szczególnych przypadkach, przede wszystkim w sytuacji nowych nawierzchni, których układ konstrukcyjny oraz parametry fizykomechaniczne materiałów użytych w trakcie budowy są znane, do dalszej analizy przyjmuje się zweryfikowane dane projektowe. Parametry podłoża gruntowego wyznacza się najczęściej na podstawie pomiarów urządzeniem HWD.

W celu określenia kategorii nośności podłoża gruntowego wykorzystuje się:

- wartości modułów  $E$ ;
- zależności korelacyjne pomiędzy  $E$  a kalifornijskim wskaźnikiem nośności CBR;
- zależność między wskaźnikami CBR a współczynnikiem reakcji podłoża  $k$ .

Parametry podłoża gruntowego mogą być wyznaczone również za pomocą pólowych badań geotechnicznych. Na podstawie wymienionych badań opracowy-

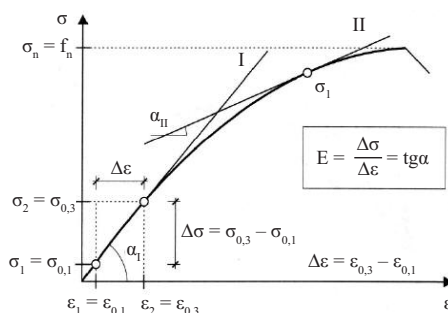


Fig. 2. Interpretation of the modulus of elasticity of concrete  $E$  [17]

Rys. 2. Interpretacja modułu sprężystości betonu  $E$  [17]



tests, a calculation model of the evaluated structure is created, which is used for further analyses.

The results of the load-bearing capacity can be presented in the form of elastic deflections, moduli of deformation, equivalent modules, PCN index or the permissible number of flight operations for the adopted computational aircraft. Depending on the distance of the geophones from the center, pavement deformation modules can be determined using the following formulas:

$$E_0(0) = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot q \cdot a}{u(0)} \quad (6)$$

$$E_0(r) = \frac{(1 - \nu^2) \cdot q \cdot a^2}{r \cdot u(r)} \quad (7)$$

where:

- $E_0(0)$  – modulus of deformation of the pavement under the load plate [N/m<sup>2</sup>];
- $E_0(r)$  – modulus of deformation of the pavement at a distance r from the centre of the loading plate [N/m<sup>2</sup>];
- a – plate radius [m];
- $\nu$  – Poisson’s ratio [-];
- u – deflection at the tested point (0 – under the loading plate) [m];
- q – stress under the loading plate [N/m<sup>2</sup>].

In order to estimate the surface module  $E_z$  the structure of the tested airport pavement, the following relation is used:

$$E_z = \frac{2 \cdot q \cdot a}{u(0)} \quad (8)$$

### Factors influencing load-bearing parameters

The practice of measurements shows a significant impact of the measured parameters on the results of the calculations of the load-bearing capacity of airfield pavements [16]. Table 1 shows an example of the calculated number of permissible flight operations on a single-ply rigid pavement, depending on the change in individual parameters, in the case of

wany jest model obliczeniowy ocenianej konstrukcji, który wykorzystywany jest do dalszych analiz.

Wyniki nośności można przedstawić w postaci ugięć sprężystych, modułów odkształcenia, modułów zastępczych, wskaźnika PCN lub dopuszczalnej liczby operacji lotniczych dla przyjętego samolotu obliczeniowego. Moduły odkształcenia nawierzchni, w zależności od odległości geofonów od środka płyty obciążającej, wyznacza się z następujących wzorów:

$$E_0(0) = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot q \cdot a}{u(0)} \quad (6)$$

$$E_0(r) = \frac{(1 - \nu^2) \cdot q \cdot a^2}{r \cdot u(r)} \quad (7)$$

gdzie:

- $E_0(0)$  – moduł odkształcenia nawierzchni pod płytą obciążającą [N/m<sup>2</sup>];
- $E_0(r)$  – moduł odkształcenia nawierzchni w odległości r od środka płyty obciążającej [N/m<sup>2</sup>];
- a – promień płyty [m];
- $\nu$  – liczba Poissona [-];
- u – ugięcie w badanym punkcie (0 – pod płytą obciążającą) [m];
- q – naprężenie pod płytą obciążającą [N/m<sup>2</sup>].

W celu szacunkowego określenia modułu zastępczego  $E_z$  konstrukcji badanej nawierzchni lotniskowej, korzysta się z zależności:

$$E_z = \frac{2 \cdot q \cdot a}{u(0)} \quad (8)$$

### Czynniki wpływające na wyniki pomiarów nośności

Praktyka realizacji pomiarów wskazuje na znaczny wpływ mierzonych parametrów na wyniki obliczeń nośności nawierzchni lotniskowych [16]. W tabeli 1 przedstawiono przykładową obliczoną liczbę dopuszczalnych operacji lotniczych na jednowarstwowej nawierzchni sztywnej, w zależności od zmiany poszczególnych parametrów, w przypadku ACN = 52 (klasa statku powietrznego typu Boeing B737-900). Jako

Table 1. Change in the number of passes depending on the adopted parameters

Tabela 1. Zmiana liczby operacji lotniczych w zależności od przyjętych parametrów

Subgrade categories/ Kategorie gruntu	Slab thickness h [cm]/ Grubość płyty h [cm]	$R_{zg} = 5,2 \text{ MN/m}^2$			$R_{zg} = 5,5 \text{ MN/m}^2$			$R_{zg} = 5,7 \text{ MN/m}^2$		
		Measured modulus of elasticity of concrete [MN/m <sup>2</sup> ]/Zmierzony moduł sprężystości betonu [MN/m <sup>2</sup> ]								
		30.000	32.000	35.000	30.000	32.000	35.000	30.000	32.000	35.000
A (k = 120)	20	27.000	37.000	57.000	34.000	47.000	73.000	39.000	54.000	85.000
	22	49.000	67.000	105.000	62.000	86.000	134.000	73.000	100.000	156.000
	24	86.000	119.000	186.000	109.000	151.000	237.000	128.000	176.000	276.000
B (k = 90)	20	22.000	30.000	48.000	28.000	39.000	61.000	33.000	45.000	71.000
	22	41.000	56.000	89.000	52.000	72.000	113.000	61.000	84.000	131.000
	24	72.000	100.000	157.000	92.000	127.000	200.000	107.000	148.000	233.000
C (k = 50)	20	15.000	21.000	34.000	20.000	27.000	43.000	23.000	32.000	50.000
	22	29.000	40.000	63.000	37.000	51.000	80.000	43.000	60.000	94.000
	24	52.000	72.000	114.000	66.000	94.000	145.000	77.000	107.000	169.000
D (k = 25)	20	11.000	15.000	23.000	13.000	18.000	29.000	16.000	22.000	34.000
	22	20.000	28.000	44.000	25.000	35.000	56.000	30.000	41.000	65.000
	24	36.000	50.000	80.000	46.000	64.000	101.000	54.000	75.000	118.000

ACN = 52 (aircraft class type Boeing B737-900). The following were assumed as variables: concrete flexural strength  $R_{zg}$ ; the thickness of the concrete slab  $h$  and the category of bearing capacity of the subgrade, depending on the subgrade  $k$ -value.

While the physico-mechanical parameters of structural materials can be described as unchanged in a short period of time, experience shows that the parameters of the subgrade can change in a short period of time, even at intervals of hours. As an example, one can give the relationship between subgrade soil parameters and the calculated number of allowable airfield operations, in the case of the simplest pavement structure – a cement concrete slab laid on subgrade.

The following construction parameters were adopted for the theoretical analysis:

- flexural strength of cement concrete at bending:  $R_{zg} = 5.5 \text{ MN/m}^2$ ;
- concrete slab thickness:  $h = 0.3 \text{ m}$ ;
- modulus of elasticity of cement concrete:  $EBC = 30,000 \text{ MN/m}^2$ ;
- computational aircraft with  $ACN = 52$ .

zmiennie przyjęto: wytrzymałość betonu na zginanie  $R_{zg}$ ; grubość płyty lotniskowej  $h$  oraz kategorię nośności podłoża gruntowego, zależną od współczynnika reakcji podłoża  $k$ .

O ile parametry fizykomechaniczne materiałów konstrukcyjnych można określić jako niezmiennie w krótkim czasie, to doświadczenie wskazuje, że parametry podłoża gruntowego mogą ulegać zmianom w krótkim okresie, nawet w odstępach godzin. Jako przykład można podać zależność pomiędzy parametrami podłoża gruntowego a obliczoną liczbą dopuszczalnych operacji lotniczych, w przypadku najprostszego układu konstrukcyjnego nawierzchni – płyty z betonu cementowego ułożonej na podłożu gruntowym. Do analizy teoretycznej przyjęto następujące parametry konstrukcji:

- wytrzymałość betonu cementowego na rozciąganie przy zginaniu:  $R_{zg} = 5,5 \text{ MN/m}^2$ ;
- grubość płyty betonowej:  $h = 0,3 \text{ m}$ ;
- moduł sprężystości betonu cementowego:  $EBC = 30.000 \text{ MN/m}^2$ ;
- samolot obliczeniowy o liczbie  $ACN = 52$ .

Wyniki nośności w zależności od kategorii podłoża gruntowego (współczynnika reakcji podłoża) zamieszczono w tabeli 2

**Table 2. Number of passes for individual soil categories**

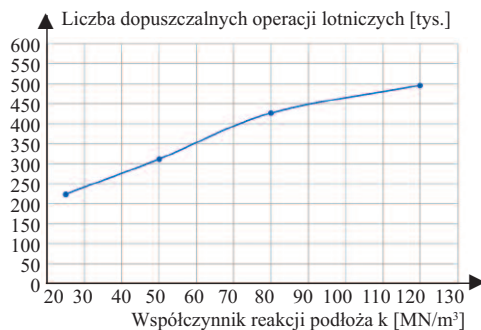
*Tabela 2. Liczba operacji lotniczych w przypadku poszczególnych kategorii podłoża gruntowego*

Subgrade category in the case of a rigid surface [k]/ Kategoria gruntu w przypadku nawierzchni sztywnej [k]	Subgrade category A [> 120 MN/m <sup>3</sup> ]/ Kategoria gruntu A [> 120 MN/m <sup>3</sup> ]	Subgrade category B [60 – 120 MN/m <sup>3</sup> ]/ Kategoria gruntu B [60 – 120 MN/m <sup>3</sup> ]	Subgrade category C [25 – 60 MN/m <sup>3</sup> ]/ Kategoria gruntu C [25 – 60 MN/m <sup>3</sup> ]	Subgrade category D [< 25 MN/m <sup>3</sup> ]/ Kategoria gruntu D [< 25 MN/m <sup>3</sup> ]
Adopted [k]/Przyjęte [k]	120 MN/m <sup>3</sup>	90 MN/m <sup>3</sup>	50 MN/m <sup>3</sup>	25 MN/m <sup>3</sup>
Permissible number of flight operations/ Dopuszczalna liczba operacji lotniczych	495 000	426 000	311 000	224 000

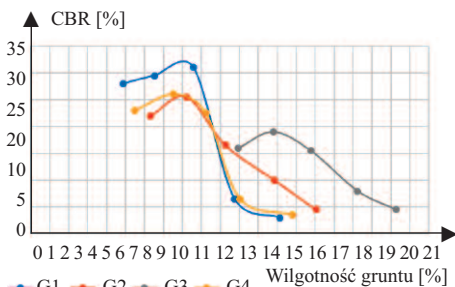
The results of the load-bearing capacity depending on the subgrade category ( $k$ -value) are presented in Table 2 and Figure 3. How the load-bearing parameters of the subgrade change in real conditions can be illustrated by the results of tests carried out on one of the facilities. The CBR laboratory test was carried out on soil samples (identified as fine and clayey sands) taken in the boreholes marked as: G1, G2, G3 and G4. The obtained dependence of the average CBR value (CBR 5.0 mm and CBR 2.5 mm) on soil moisture is shown in Figure 4.

A similar diagram will be obtained after converting the CBR value into the modulus of subgrade reaction  $k$  [18], when the results of individual samples oscillate between the subgrade parameters of category B (above 60 MN/m<sup>3</sup>) and D (below 25 MN/m<sup>3</sup>).

Taking into account the limit values of the subgrade specified in Table 1, it was found that a change in soil moisture of 3 – 4% may cause a



**Fig. 3. Dependence of the number of passes on the module of subgrade reaction  $k$**   
*Rys. 3. Zależność liczby operacji lotniczych od współczynnika reakcji podłoża  $k$*



**Fig. 4. An example of the dependence of the soil CBR value on its humidity**  
*Rys. 4. Przykładowa zależność wskaźnika CBR gruntu od jego wilgotności*

oraz na rysunku 3. To, jak w warunkach rzeczywistych ulegają zmianie parametry nośności podłoża gruntowego, mogą zobrazować wyniki badań przeprowadzonych na jednym z obiektów. Badaniu laboratoryjnemu CBR poddano próbki gruntu (zidentyfikowane jako piaski drobne i gliniaste) pobrane w otworach oznaczonych jako: G1, G2, G3 i G4. Uzyskane zależności średniego kalifornijskiego wskaźnika nośności CBR (CBR 5,0 mm oraz CBR 2,5 mm) od wilgotności gruntu przedstawiono na rysunku 4.

Podobny wykres zostanie uzyskany po przeliczeniu wskaźnika CBR na współczynnik reakcji podłoża  $k$  [18], gdy wyniki poszczególnych próbek oscylują pomiędzy parametrami podłoża o kategorii B (powyżej 60 MN/m<sup>3</sup>) i D (poniżej 25 MN/m<sup>3</sup>).

Uwzględniając wartości graniczne podłoża określone w tabeli 1, stwierdzono, że zmiana wilgotności gruntu rzędu 3 – 4% może powodować gwałtowny spadek jego nośności, a w efekcie również nośności konstrukcji nawierzchni lotniskowej.

sharp decrease in its load-bearing capacity and, as a result, also in the load-bearing capacity of the airfield pavement structure.

Another factor whose impact on the load-bearing capacity was observed during the load-bearing capacity tests of concrete pavements is the ambient temperature [7]. The phenomenon of thermal stress formation resulting from climatic conditions or the impact of hot exhaust gases from aircraft engines in the concrete surface is described in [6] and should be taken into account at the design stage of the structure. While the thermal influence of exhaust gases can be ignored while performing the load-bearing tests, the influence of climatic conditions (especially sunlight) on the measurement of elastic deflections has not yet been taken into account in the design. Especially on days with a large amplitude of temperature changes, the uneven heating of individual layers of the concrete slab and its resulting deformation has a great impact on the measurement results (Figure 5).



**Fig. 5. Scheme of deformation of a concrete slab depending on the temperature distribution inside it**

*Rys. 5. Schemat odkształcenia płyty betonowej w zależności od rozkładu temperatury w jej wnętrzu*

*Fig.: own study*

*Rys.: opracowanie własne*

Kolejnym czynnikiem, którego wpływ na nośność zaobserwowano w czasie realizowanych badań nośności nawierzchni betonowych, jest temperatura otoczenia [7]. Zjawisko powstawania naprężeń termicznych, wynikających z warunków klimatycznych lub oddziaływania gorących gazów wylotowych z silników statków powietrznych, w nawierzchni betonowej zostało opisane w [6] i powinno być uwzględniane na etapie projektowania konstrukcji. O ile wpływ oddziaływania termicznego gazów wylotowych może zostać pominięty podczas

wykonywania badań nośności, to w projektowaniu dotychczas nie uwzględnia się wpływu warunków klimatycznych (szczególnie promieni słonecznych) na pomiar ugięć sprężystych. Szczególnie w przypadku dni o dużej amplitudzie zmian temperatury, nierównomierne nagrzewanie się poszczególnych warstw płyty betonowej, i powstająca w jego wyniku jej deformacja, ma duży wpływ na wyniki pomiarów (rysunek 5).

### Field research program and analysis of measurement results

Field tests are aimed to assess the general impact of climatic conditions on the load-bearing capacity of the surface made of cement concrete carried out with a HWD airport deflector:

- diameter of the loading plate: 450 mm;
- tension range under the loading plate: 1.00 – 1.25 MN/m<sup>2</sup>.

According to the research plan, the first stage of the work focused on assessing the impact of short-term factors (primarily the impact of changes in air and surface temperature) on the obtained measurement results. The measurements were carried out on the experimental section, at five measurement points (Table 3), three times a day, at different times of the year (April

### Program badań terenowych i analiza wyników pomiarów

Badania terenowe mające na celu ogólną ocenę wpływu warunków klimatycznych na nośność nawierzchni wykonanej z betonu cementowego realizowano za pomocą ugięciomierza lotniskowego typu HWD:

- średnica płyty obciążającej: 450 mm;
- zakres naprężeń pod płytą obciążającą: 1,00 – 1,25 MN/m<sup>2</sup>.

Zgodnie z planem badań, w pierwszym etapie prac dokonano oceny wpływu czynników krótkoterminowych (przede wszystkim wpływu zmian temperatury powietrza oraz nawierzchni) na uzyskiwane wyniki pomiarów. Pomiar realizowane były na odcinku doświadczalnym w pięciu punktach pomiarowych (tabela 3),

**Table 3. Results of slab load-bearing capacity tests and their changes during the measurement day**

*Tabela 3. Wyniki badań nośności płyty oraz ich zmian w ciągu dnia pomiarowego*

Measurement day/ Dzień pomiarowy	Measurement No./ Nr pomiaru	$E_{sr}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$\Delta E$ [%]	$T_{pp}$ [°C]	$\Delta T_{pp}$ [°C]	$T_{sp}$ [°C]	$T_{pp} - T_{sp}$ [°C]	$T_{pow}$ [°C]	$\Delta T_{pow}$ [°C]
17. kwietnia	1	739,3	–	20,7	–	12,5	6,1	13,4	–
	2	688,2	-6,9	24,6	3,9	15,1	9,2	20,6	7,2
	3	615,0	-16,8	30,2	9,5	19,5	10,7	24,3	10,9
27. kwietnia	1	683,1	–	22,2	–	13,6	8,6	19,4	-
	2	631,8	-7,5	27,4	5,2	15,8	11,6	23,8	4,4
	3	615,1	-10,0	32,7	10,5	22,3	10,4	26,2	6,8
16. lipca	1	745,6	–	26,3	–	23,7	2,6	24,7	-
	2	692,1	-7,2	35,3	9,0	24,6	10,7	30,7	6,0
	3	616,0	-17,4	38,7	12,4	26,1	12,6	31,2	6,5
15. października	1	751,9	–	13,6	–	10,8	2,8	15,0	-
	2	729,4	-3,0	14,7	1,1	11,6	3,1	14,9	-0,1
	3	727,0	-3,3	15,4	1,8	13,1	2,3	15,2	0,2
29. października	1	697,5	–	9,8	–	5,7	4,1	6,8	–
	2	688,7	-1,3	10,7	0,9	6,5	4,2	8,2	1,4
	3	685,3	-1,8	10,6	0,8	7,2	3,4	9,3	2,5

– October). During the research, the temperature of the air and the pavement were measured, both on its surface and in the middle of the thickness of the concrete slab.

The surface of the experimental section was made of one layer of cement concrete, laid on the subgrade, with the following parameters:

- concrete class – B25 according to the old nomenclature, currently C;
- average thickness of the concrete slab – approx. 20 cm;
- average modulus of elasticity (based on HWD measurements) – approx. 25,000 MN/m<sup>2</sup>.

The analysis of the measurement results included the values of equivalent modules calculated on the basis of the measured values of elastic deflections according to formula (8) and the results of temperature measurements. Figure 6 shows the change in the value of the average surrogate modulus, in relation to the temperature value, during two selected measurement days.

The measurements were carried out in the following hours:

- 1 – early morning hours;
- 2 – later morning hours (before midday);
- 3 – afternoon.

Based on the obtained measurement results, an analysis was conducted to examine the relationship between the measured temperature values, their daily variations, and the percentage change in the surface modulus.

The results are shown in Figures 7 to 11. The correlation coefficients and R-squared coefficients of determination were calculated, and the findings are summarized in Table 4.

**Conclusions**

The impact of temperature changes on the load-bearing capacity of concrete

trzy razy dziennie, w różnych porach roku (kwiecień – październik). Podczas badań mierzono temperaturę powietrza oraz nawierzchni, zarówno na jej powierzchni, jak i w środku grubości płyty betonowej.

Nawierzchnia odcinka doświadczalnego wykonana została z jednej warstwy betonu cementowego, ułożonej na podłożu gruntowym, o następujących parametrach:

- klasa betonu – B25 wg starej nomenklatury, obecnie C;
- średnia grubość płyty betonowej – ok. 20 cm;
- średni moduł sprężystości (na podstawie pomiarów HWD) – ok. 25 000 MN/m<sup>2</sup>.

Do analizy wyników pomiarów przyjęto wartości modułów zastępczych obliczone na podstawie zmierzonych wartości ugięć sprężystych zgodnie ze wzorem (8) oraz wyniki pomiarów temperatur. Na rysunku 6 przedstawiono zmianę wartości średniego modułu zastępczego nawierzchni, w odniesieniu do wartości temperatury, podczas dwóch wybranych dni pomiarowych.

Pomiary wykonywano w godzinach:

- 1 – porannych;
- 2 – przedpołudniowych;
- 3 – popołudniowych.

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów przeprowadzono analizę wpływu zmierzonych wartości temperatury oraz ich zmian w ciągu dnia na procentową wartość zmiany zastępczego modułu odkształcenia nawierzchni.

Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach 7 ÷ 11. Wyznaczono współczynniki korelacji oraz współczynniki determinacji R-kwadrat. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.

**Wnioski**

Wpływ zmiany temperatury na badanie nośności betonowych nawierzchni lotni-

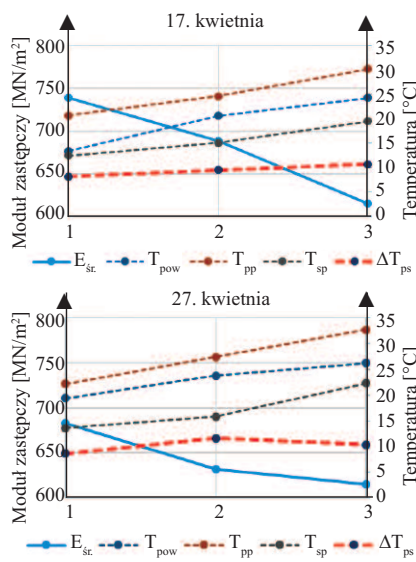


Fig. 6. Changing surface modules during the day  
 Rys. 6. Zmiana modułów zastępczych w trakcie dnia

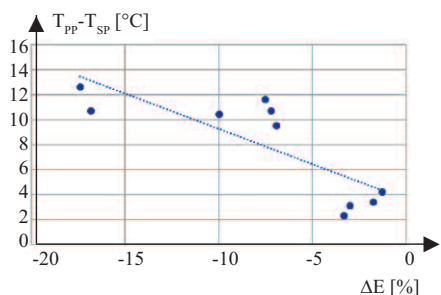


Fig. 7. Relationship between the percentage change in the surface module and the temperature difference on the surface of the plate and inside it

Rys. 7. Zależność pomiędzy procentową zmianą modułu zastępczego a różnicą temperatury na powierzchni płyty i w jej wnętrzu

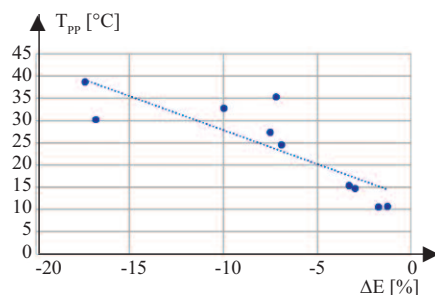


Fig. 8. Relationship between the percentage change in the surface module and the plate surface temperature

Rys. 8. Zależność pomiędzy procentową zmianą modułu zastępczego a temperaturą powierzchni płyty

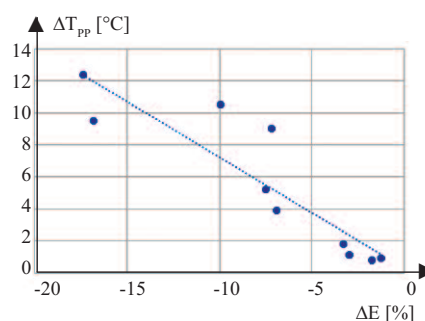


Fig. 9. Relationship between the percentage change in the surface module and the change in the plate surface temperature

Rys. 9. Zależność pomiędzy procentową zmianą modułu zastępczego a zmianą temperatury powierzchni płyty



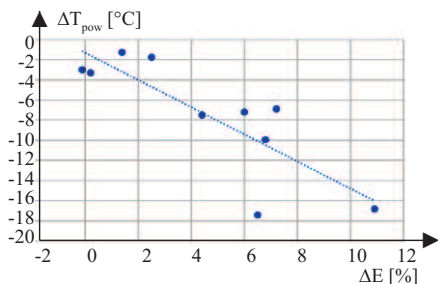
airfield pavements is well known but often overlooked in practice. While the standard [1] recommends conducting load-bearing capacity tests in spring or autumn, measurements are typically performed based on customer requirements, often as quickly as possible. Consequently, the influence of climatic conditions, particularly short-term variations, may be considered in the calculations depending on the contractor's experience. However, due to the lack of appropriate regulations, this impact is usually ignored

The research initiated at the Air Force Institute of Technology aims to thoroughly determine the impact of key climatic factors on load capacity test results. It also seeks to establish correlation coefficients that can be used to apply appropriate corrections when measurements cannot be conducted under the 'least favorable' conditions, ensuring the safety and reliability of the results.

The presented research results focus on the influence of short-term factors on the load-bearing capacity of concrete pavements. Initial analyses confirm the validity of the adopted assumptions. For example, measurements taken on the morning of July 16 yielded the surface modulus of 745 MN/m<sup>2</sup>, whereas measurements conducted a few hours later resulted in a value of only 616 MN/m<sup>2</sup> – a difference of over 17%.

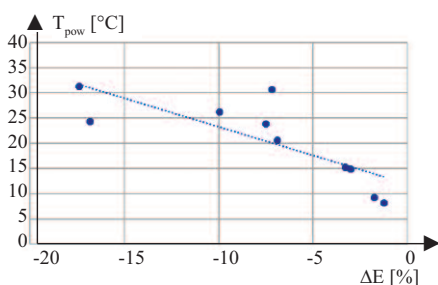
This change is even more evident when the results are converted into the PCN index (assuming the tested experimental section represents an airfield surface). The calculated PCN index, based on  $R_{zg} = 5.0 \text{ MN/m}^2$  and the C-130E Hercules aircraft, is provided in Table 5.

It can be concluded that the timing of measurements significantly impacts the



**Fig. 10. Relationship between the percentage change in the surface module and the change in air temperature**

Rys. 10. Zależność pomiędzy procentową zmianą modułu zastępczego a zmianą temperatury powietrza



**Fig. 11. Relationship between the percentage change in the surface module and the air temperature**

Rys. 11. Zależność pomiędzy procentową zmianą modułu zastępczego a temperaturą powietrza

**Table 4. Obtained relationships between test results**

Tabela 4. Uzyskane zależności pomiędzy wynikami badań

Determined relationship/ Wyznaczona zależność	Correlation coefficient/ Współczynnik korelacji	Coefficient of determination R <sup>2</sup> / Współczynnik determinacji R <sup>2</sup>
ΔE [%] oraz T <sub>pp</sub> -T <sub>sp</sub> [°C]	-0,8086	0,6539
ΔE [%] oraz T <sub>pp</sub> [°C]	-0,8416	0,7083
ΔE [%] oraz ΔT <sub>pp</sub> [°C]	-0,8971	0,8048
ΔE [%] oraz ΔT <sub>pow</sub> [°C]	-0,8273	0,6844
ΔE [%] oraz T <sub>pow</sub> [°C]	-0,7932	0,6292

skowych jest faktem ogólnie znanym, ale w praktyce pomijam. Co prawda norma [1] zaleca wykonywanie badań nośności w okresie wiosennym lub jesiennym, natomiast pomiary wykonywane są zazwyczaj w terminie uzależnionym od zamawiającego, który często potrzebuje ich w jak najkrótszym czasie. Powoduje to, że w zależności od doświadczenia wykonawcy pomiarów, wpływ warunków klimatycznych (szczególnie tych krótkoterminowych) może być uwzględniany w obliczeniach, ale zazwyczaj, z powodów braku stosownych uregulowań, jest pomijany.

Zapoczątkowane w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych prace mają na celu szczegółowe określenie wpływu podstawowych czynników klimatycznych na uzyskiwane wyniki badań nośności oraz wyznaczenie współczynników korelacyjnych umożliwiających, w przypadku braku możliwości prowadzenia pomiarów w „najmniej sprzyjających” warunkach, zastosowanie stosownych poprawek, uwzględniających bezpieczeństwo uzyskiwanych wyników. Uwzględniając przedstawione wyniki badań, w których analizie poddano jedynie wpływ samych, krótkoterminowych czynników na nośność betonowych nawierzchni, pierwsze analizy potwierdzają przyjęte założenia. Pomiary wykonane „16 lipca” w godzinach porannych pozwoliły uzyskać moduł zastępczy dla nawierzchni równy 745 MN/m<sup>2</sup>, a pomiary wykonane kilka godzin później – zaledwie 616 MN/m<sup>2</sup>. Różnica wyniosła ponad 17%. Jeszcze lepiej ilustruje tę zmianę przeliczenie uzyskanych wyników na wskaźnik PCN (zakładając, że badany odcinek doświadczalny stanowiłby nawierzchnię lotniskową). Obliczony wskaźnik PCN przy  $R_{zg} = 5,0 \text{ MN/m}^2$  oraz samolocie typu C-130E Hercules przedstawiono w tabeli 5.

**Table 5. Calculated PCN index – “16. July”**

Tabela 5. Obliczony wskaźnik PCN – „16 lipca”

Measurement on July 16/ Pomiar 16 lipca	E [MN/m <sup>2</sup> ]	Medium modules of construction layers [MN/m <sup>2</sup> ]/ Średnie moduły warstw konstrukcji [MN/m <sup>2</sup> ]	Number of flight operations for the C-130E Hercules (ACN = 35)/ Liczba operacji lotniczych w przypadku C-130E Hercules (ACN = 35)	PCN for 10,000 operations/ PCN w przypadku 10 000 operacji
Morning/Rano	745,6	E <sub>BC</sub> = 24 000 MN/m <sup>2</sup> E <sub>gruntu</sub> = 70 MN/m <sup>2</sup>	16 000	41
Afternoon/Popołudnie	616,0	E <sub>BC</sub> = 18 000 MN/m <sup>2</sup> E <sub>gruntu</sub> = 70 MN/m <sup>2</sup>	4 000	26

results and poses serious implications both for the safety of air operations (when results are overstated) and from an economic perspective (when measurements are conducted under extremely unfavorable conditions). The analysis identified certain correlations between the measured temperature values and the determined modulus values. These findings will serve as a foundation for further research in this area.

The primary objective of the next phase will be to establish coefficients that account for as many variables as possible that may influence the results. Future research will continue to refine short-term (daily) correlation coefficients and subsequently focus on determining seasonal coefficients. These will help account for the influence of soil and water condition changes on the load-bearing capacity of airfield pavements.

Received: 06.06.2024

Revised: 18.07.2024

Published: 25.11.2024

Można wnioskować, że termin realizacji pomiarów może mieć niebagatelny wpływ na uzyskane wyniki i stanowić poważny czynnik zarówno pod względem bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych (przy uzyskaniu „zawyżonych” wyników), jak i z ekonomicznego punktu widzenia (przy pomiarach wykonywanych w skrajnie niekorzystnych warunkach). Podczas analizy uzyskano pewne zależności korelacyjne pomiędzy zmierzonymi wartościami temperatury a wyznaczonymi wartościami modułów. Stanowią one będą podstawę do dalszych prac w tym zakresie.

Celem analiz będzie wyznaczenie współczynników uwzględniających jak największą liczbę zmiennych mogących mieć wpływ na uzyskiwane wyniki. Przedmiotowe badania będą kontynuowane zarówno w celu uściślenia korelacyjnych współczynników krótkoterminowych (dobowych), jak i (w dalszej kolejności) wyznaczenia współczynników sezonowych, pozwalających uwzględnić ich wpływ (zmian warunków grunto-wodnych) na nośność nawierzchni lotniskowych.

Artykuł wpłynął do redakcji: 06.06.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 18.07.2024 r.

Opublikowano: 25.11.2024 r.

## Literature

- [1] NO-17-A500: 2016 Nawierzchnie lotniskowe i drogowe. Badanie nośności. WCNJiK, 2016.
- [2] Łatwo Dostępne Przepisy dla Lotnisk (Rozporządzenie UE 139/2014), Europejska Agencja Bezpieczeństwa Lotniczego (EASA), 2023.
- [3] Załącznik 14 ICAO do Konwencji o Międzynarodowym Lotnictwie Cywilnym, Lotniska Tom I – Projektowanie i eksploatacja lotnisk, Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO), 2018 (wydanie 8).
- [4] Advisory Circular no: 150/5335-5C, U. S. Department of Transportation, FAA, 2014.
- [5] Advisory Circular no: 150/5335-5D, U. S. Department of Transportation, FAA, 2022.
- [6] Nita P, Linek M, Wesołowski M. Betonowe i specjalne nawierzchnie lotniskowe. Teoria i wymiarowanie konstrukcyjne, Wydawnictwo ITWL, Warszawa, 2021.
- [7] Wesołowski M, Grabowski P: Wpływ warunków klimatycznych na nośność betonowych nawierzchni lotniskowych, [w]. Drogi Lądowe Powietrzne Wodne. 2009; 5.
- [8] Zheng Y, Zhang P, Liu H: Correlation between pavement temperature and deflection basin form factors of asphalt pavement. Int. J. Pavement Eng. 2019; <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1356172>.
- [9] Vaitkus A, Žalimienė L, Židanavičiūtė J, Žilionienė D: Influence of Temperature and Moisture Content on Pavement Bearing Capacity with Improved Subgrade. Materials. 2019; <https://doi.org/10.3390/ma12233826>.
- [10] Revelli V, Huang Ch, Marath A, Swarna S T, Goli A, Mehta Y: Influence of Climatic Factors on the Pavement Performance in MEPDG, Airfield and Highway Pavements. 2023; <https://doi.org/10.1061/9780784484890.008>.
- [11] Revelli V, Huang Ch, Marath A, Swarna S T, Goli A, Mehta Y: Impact of Climate Data Sources on Pavement Mechanistic-Empirical Design Pavement Distress Predictions, Airfield and Highway Pavements. 2023; <https://doi.org/10.1061/9780784484890.016>.
- [12] Chai G, van Staden R, Guan H, Loo Y-Ch: Impact Of Climate Related Changes In Temperature On Concrete Pavement: A Finite Element Study, 25th ARRB Conference – Shaping the future: Linking policy, research and outcomes, Perth, Australia 2012.
- [13] Shafiee M, Maadani O, Shirkhani H: Evaluation of Climate Impacts on Joined Plain Concrete Pavement Structures, 2019 TAC-ITS Canada Joint Conference & Exhibition, September 22 – 25, 2019, Halifax, NS, Canada.
- [14] Szydło A, Mackiewicz P. Influence of temperature on fatigue life or reinforced pavement by whitetopping. IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. 2018; <https://doi.org/10.1088/1757-899X/356/1/012015>.
- [15] Mahfuda A, Siswosukarto S, Suhendro B. The Influence of Temperature Variations on Rigid Pavement Concrete Slabs, Journal of the Civil Engineering Forum. 2023; <https://doi.org/10.22146/jcef.5744>.
- [16] Wesołowski M, Blacha K, Iwanowski P: Analysis of Load Bearing Capacity of Cement Concrete Airfield Pavement's Construction in Relation to its Changes of Physico-Mechanical Parameters. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2019; <https://doi.org/10.1088/1757-899X/603/5/052055>.
- [17] Jamroz Z. Beton i jego technologie, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008.
- [18] Defence Estates. Ministry of Defence: Design & Maintenance Guide 27. A Guide to Airfield Pavement Design and Evaluation, 3rd edition, United Kingdom 2011.