



RYSZARD CHMIELEWSKI<sup>1)</sup>  
MARIUSZ WESOŁOWSKI<sup>2)</sup>  
DAMIAN WALISZEWSKI<sup>3)</sup>

## REVIEW OF SUBGRADE BEARING CAPACITY TESTS FOR AIRFIELD PAVEMENTS

## PRZEGLĄD BADAŃ NOŚNOŚCI PODŁOŻA GRUNTOWEGO POD NAWIERZCHNIE LOTNISKOWE

**STRESZCZENIE.** W artykule poruszono zagadnienia dotyczące oceny nośności podłoża gruntowego pod nawierzchnie lotniskowe oraz metod oceny naturalnych nawierzchni lotniskowych. Przedstawiono zestaw dostępnych metod badawczych pozwalających na określenie parametrów geotechnicznych podłoża gruntowego pod nawierzchnie lotniskowe. Wskazano obecnie stosowane wymagania dotyczące nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych oraz podłoża gruntowego pod sztuczne nawierzchnie lotniskowe. Szerszej analizie poddano badania Kalifornijskiego Wskaźnika Nośności (*CBR*). Na podstawie przeprowadzonych badań własnych stwierdzono, że w przypadku badań *CBR* dla gruntów wątpliwych (piaszczysto-pyłastych) krzywa wykresu zależności siły od penetracji odbiega od krzywych, jakie uzyskuje się dla innych gruntów. Zaproponowano metodykę właściwej interpretacji wyników tego badania. W pracy dokonano również sprawdzenia wpływu wielkości obciążenia działającego na próbkę na uzyskiwaną wartość wskaźnika *CBR*.

**SŁOWA KLUCZOWE:** grunty wątpliwe, laboratoryjne badania *CBR*, lotniska wojskowe, nawierzchnia lotniskowa, nośność podłoża gruntowego.

**ABSTRACT.** The article presents issues pertaining to assessment of subgrade bearing capacity for airfield pavements and methods of assessment of natural (turf) airfield surfaces. The presented set of available test methods enables determination of geotechnical parameters of airfield subgrades. Current requirements for bearing capacity of natural airfield pavements and subgrades for artificial airfield pavements are given. California Bearing Ratio (*CBR*) tests are analyzed in greater detail. Based on the performed own research, it was observed that in the case of soils of uncertain nature (sandy/silty) the force-penetration curve differed from the curves obtained for other soils. Methodology for proper interpretation of the results of such test was proposed. The work also includes verification of the relationship between the value of external load acting on the sample and the obtained *CBR* value.

**KEYWORDS:** airfield pavement, laboratory *CBR* test, military airfields, subgrade bearing capacity, uncertain soils.

DOI: 10.7409/rabdim.022.007

<sup>1)</sup> Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa; ryszard.chmielewski@wat.edu.pl (✉)

<sup>2)</sup> Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Lotniskowy, ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa; mariusz.wesolowski@itwl.pl

<sup>3)</sup> Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa; damian.waliszewski@wat.edu.pl

## 1. WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój linii lotniczych i wzrost zainteresowania podróżami lotniczymi generuje potrzebę rozwijania infrastruktury lotniskowej poprzez budowę nowych obiektów lub rozbudowę już istniejących. Podobna tendencja rozwoju sieci lotniskowej jest zauważalna w obszarze lotnictwa wojskowego, szczególnie w dobie zmian technologicznych zachodzących obecnie w Siłach Powietrznych Rzeczypospolitej Polskiej.

Specyficzny charakter budowli lotniskowych (duża powierzchnia zajętości) sprawia, że zmienność warunków gruntowo-wodnych na ich obszarze jest zjawiskiem bardzo powszechnym. Zróżnicowanie parametrów geotechnicznych na analizowanym obszarze może powodować konieczność zastosowania różnorodnych rozwiązań projektowych [1]. Zadaniem projektanta nawierzchni jest zastosowanie takich rozwiązań inżynierskich, aby realizacja inwestycji na danym terenie zapewniała bezpieczeństwo użytkowania oraz była racjonalna ekonomicznie [2]. Aby właściwie rozwiązać ewentualne problemy związane z nośnością podłoża gruntowego należy przede wszystkim właściwie określić jego parametry [3-5]. Nieznajomość zasad mechaniki gruntów oraz oceny parametrów geotechnicznych może skutkować przewymiarowaniem konstrukcji nawierzchni, co wiąże się z niepotrzebnym wydatkiem finansowym. Z drugiej strony istnieje niebezpieczeństwo przyjęcia zawyżonych parametrów geotechnicznych, co powoduje niepożądane zmniejszenie zapasów bezpieczeństwa w stanie granicznym nośności oraz użyteczności [6, 7].

## 2. NOŚNOŚĆ NAWIERZCHNI LOTNISKOWYCH W UJĘCIU HISTORYCZNYM

Początkowo wszystkie operacje lotnicze odbywały się na naturalnych nawierzchniach lotniskowych, ponieważ oddziaływania od statków powietrznych nie były znaczne. Jednak dalszy rozwój lotnictwa, skutkujący wykorzystaniem coraz cięższych samolotów, uniemożliwił dalsze korzystanie z naturalnych nawierzchni lotniskowych. Już w latach dwudziestych XX wieku w USA zaczęto stosować pierwsze nawierzchnie sztuczne w postaci pojedynczych płyt postojowych [8]. Wybuch II wojny światowej spowodował dynamiczny rozwój techniki lotniczej, przez co zapotrzebowanie na wzmocnione nawierzchnie lotniskowe znacznie wzrosło.

Z rozwojem nawierzchni lotniskowych wiązała się konieczność oceny ich nośności. Na początku były to badania naturalnych lub darniowych nawierzchni lotniskowych. Szczególnym obszarem, w którym tego typu badania były stosowane,

## 1. INTRODUCTION

The dynamic growth of the airline industry and the increasing demand for air travel generate the need for development of infrastructure through construction of new structures and extension of the existing ones. Similar trend in development of airfield network is observable in military aviation, particularly in connection with the ongoing technological upgrades in the Polish Air Force.

Due to the unique nature of airfield structures (their considerable area), variability of hydrogeological conditions over their area is very common. Changes of geotechnical parameters over the analyzed area may cause the need for application of variable design solutions [1]. The task of the designer is to apply adequate engineering solutions to make the construction and service of the project on the given area both safe and economically feasible [2]. In order to solve potential problems with subgrade bearing capacity, it is crucial to properly determine the geotechnical parameters [3-5]. Lack of knowledge of the principles of soil mechanics and geotechnical assessment may result in overdesign of the pavement structure, leading to unnecessary expenses. On the other hand, there is also the risk of erroneously assuming overly high geotechnical parameters, which results in undesirable reduction in safety margins both in the ultimate and the serviceability limit states [6, 7].

## 2. BEARING CAPACITY OF AIRFIELD PAVEMENTS IN HISTORICAL PERSPECTIVE

Originally, all aircraft operations were performed on natural (turf) airfield surfaces, as loads from aircraft acting on the surface were insignificant. However, further development of aviation, resulting in production of heavier aircraft, rendered usage of natural airfield surfaces impossible. The first artificial pavements, consisting of individual parking stands, were introduced in the USA as early as in the 1920s [8]. The outbreak of World War II brought about dynamic development of aviation technology, increasing the demand for airfields with improved pavements.

The advances in pavement technology made it necessary to assess the bearing capacity of airfield pavements. Tests were originally performed on natural turf airfield surfaces. Bearing capacity tests proved particularly important for military airfields, which had to maintain the operational potential of aircraft during military operations. The best examples of application of subgrade testing include the

były lotniska wojskowe. Musiały one zapewniać zdolności operacyjne dla statków powietrznych w czasie prowadzenia działań bojowych. Najlepszym przykładem zastosowania badań podłoża były działania operacyjne wykonywane przez USA na pacyficznym teatrze działań w czasie II wojny światowej. Wtedy to pierwszy raz zastosowano działania taktyczne zwane „żabimi skokami” [9], polegające na stopniowym zajmowaniu małych wysp na Pacyfiku i tworzeniu na nich tymczasowych lotnisk operacyjnych na potrzeby dalszych zajęć terenu. Do oceny nośności podłoża gruntowego pod te nawierzchnie stosowano badania Kalifornijskiego Wskaźnika Nośności *CBR*. Badanie to opracowane zostało przez Korpus Inżynierijny Armii Stanów Zjednoczonych.

Lata powojenne to czas stopniowego rozwoju metod projektowania i wykonywania lotniskowych nawierzchni sztucznych. Wraz z rozwojem wcześniej wspomnianych elementów nastąpił rozwój metod badawczych pozwalających na coraz dokładniejsze określenie parametrów podłoża gruntowego.

### **3. WSPÓŁCZESNE WYMAGI DOTYCZĄCE BADAŃ NOŚNOŚCI PODŁOŻA POD NAWIERZCHNIE LOTNISKOWE**

#### **3.1. UWAGI OGÓLNE**

Przez pojęcie nośności nawierzchni (sztucznej lub naturalnej) rozumiemy jej zdolność do przenoszenia oddziaływań od statków powietrznych w bezpieczny sposób. Nośność nie jest stała w czasie eksploatacji i jest zależna od wielu czynników, takich jak materiał budujący nawierzchnię, jakość wykonania prac budowlanych, warunki atmosferyczne, zmienność i charakter oddziaływań oraz sposób utrzymania nawierzchni [10]. Określenie dopuszczalnego obciążenia od statków powietrznych zapewnia ponadto pewien poziom bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych.

Nośność nawierzchni lotniskowej zależy od wielu czynników, przy czym w tym artykule skupiono się wyłącznie na aspekcie zależności nośności nawierzchni od parametrów podłoża gruntowego. W przypadku nawierzchni naturalnych bądź darniowych ich nośność jest bezpośrednio związana z podłożem gruntowym i dzięki temu jest łatwa do zinterpretowania. W odniesieniu do nawierzchni sztucznych wpływ stanu podłoża gruntowego jest czasami traktowany zbyt ogólnie i bez zastosowania głębszej analizy. Zjawisko to jest szczególnie widoczne przy próbie standaryzacji rozwiązań projektowych dotyczących nawierzchni.

Zapewnienie wystarczającej nośności nawierzchni w czasie jej zakładanego okresu eksploatacji jest przedmiotem wielu prac

American operations in the Pacific theater of World War II. It was then that the strategy known as “leapfrogging” was used for the first time [9], consisting in successive capturing of small Pacific islands and creating temporary operational airfields to support further progress. Bearing capacity of subgrades for these airfields was assessed using the California Bearing Ratio (*CBR*) test, developed by the U.S. Army Corps of Engineers.

In the post-war years, methods of design and construction of airfield pavements saw continuous improvement, which occasioned further development of test methods for determination of subgrade parameters.

### **3. CURRENT REQUIREMENTS CONCERNING BEARING CAPACITY OF SUBGRADES FOR AIRFIELD PAVEMENTS**

#### **3.1. GENERAL REMARKS**

The term “bearing capacity” refers to the potential of an artificial or natural pavement to bear loads from aircraft in a safe manner. Bearing capacity is not constant during service of the structure and depends on many factors, including materials used in the pavement, quality of the performed construction works, weather conditions, variability and nature of loads and methods of maintenance [10]. Determination of allowable loading from aircraft also ensures a certain level of safety of aircraft operations.

While bearing capacity of airfield pavements is related to various factors, the focus of this article is the aspect of dependence of the pavement bearing capacity on subgrade parameters. In the case of natural (turf) pavements, their bearing capacity is directly related to subgrade parameters and, therefore, easy to interpret. In the case of artificial pavements, the influence of subgrade characteristics is sometimes treated in an overly general manner and without a more detailed analysis. This attitude may be particularly noticeable in attempts at standardization of pavement design solutions.

Providing sufficient bearing capacity of pavement throughout its assumed service life has been the subject of numerous research and experimental works. As described in [11], bearing capacity of natural airfield pavements is very often insufficient, directly affecting the safety of aircraft operations. There are many known methods of subgrade stabilization and improvement, which are applicable also to natural airfield pavements [12, 13]. Requirements pertaining to bearing capacity of natural airfield pavements

badawczych i doświadczalnych. Jak opisano w [11], bardzo często nośność naturalnych nawierzchni lotniskowych jest niedostateczna, co bezpośrednio wpływa na bezpieczeństwo wykonywania operacji lotniczych. Istnieje wiele metod wzmocnienia oraz ulepszenia podłoża gruntowego, a tym samym naturalnych nawierzchni lotniskowych [12, 13]. Wymagania dotyczące parametru nośności dla naturalnych nawierzchni lotniskowych opisano w [14-16]. Omawiając wymagania dotyczące nośności podłoża gruntowego, należy wskazać różnice pomiędzy wymaganymi kryteriami dla podłoża naturalnych nawierzchni darniowych oraz nawierzchni sztucznych [12, 15]. W związku z różnym charakterem pracy podłoża w zależności od rodzaju nawierzchni, należy stosować odmienne wymogi dotyczące określania minimalnych, bezpiecznych wartości parametrów geotechnicznych.

### **3.2. BADANIA NOŚNOŚCI PODŁOŻA GRUNTOWEGO NATURALNYCH NAWIERZCHNI LOTNISKOWYCH**

Jeśli chodzi o nawierzchnie naturalne to wymagania techniczne odnoszą bezpośrednio do nośności ich podłoża gruntowego. Obciążenia od statków powietrznych przekazywane są bezpośrednio na grunt, bez warstw rozkładających obciążenie na większą powierzchnię. Brak warstw nawierzchniowych powoduje również zwiększoną podatność na niekorzystne warunki atmosferyczne, ponieważ podłoże gruntowe nie jest chronione np. przed rozmyciem w czasie nawalnych opadów. W przypadku oddziaływania mrozu podłoże gruntowe jest bezpośrednio narażone na jego destrukcyjny wpływ i powstawanie wysadzin.

Obecnie w celu zapewnienia wymaganego poziomu bezpieczeństwa operacji lotniczych wykorzystuje się pewien zestaw wymagań, jakie nawierzchnia musi spełniać. Jednym z podstawowych parametrów jest wskaźnik *CBR* określany w warunkach terenowych „in situ”. Badanie polega na zagłębieniu normatywnego trzpienia w grunt, przy jednoczesnym pomiarze siły koniecznej do jego zagłębienia na odpowiednią głębokość [11, 17, 18]. Do badania wykorzystuje się zestaw urządzeń identyczny jak w przypadku badań laboratoryjnych, ale przystosowany do działania w warunkach polowych. Standardowy trzpień jest zamontowany w przenośnej ramie, którą należy zamontować i ustabilizować w miejscu planowanego badania. Rama musi zostać oparta o element stanowiący „przeciwwagę” dla wciskanego trzpienia, najczęściej w tym celu wykorzystuje się pojazdy budowy takie jak wywrotki bądź ładowarki. Przebieg badania oraz opracowanie wyników jest analogiczne jak w przypadku badań laboratoryjnych.

Pomierzona siła jest następnie porównywana z siłą standardową, a stosunek uzyskanych wartości jest wyrażany procen-

were described in [14-16]. In all analyses of requirements concerning subgrade bearing capacity, it is necessary to make a distinction between criteria for subgrades in natural turf pavements and artificial pavements [12, 15]. Due to different roles of subgrade in different pavement types, the required minimum safe values of geotechnical parameters should vary depending on the type of the pavement.

### **3.2. TESTING OF SUBGRADE BEARING CAPACITY FOR NATURAL AIRFIELD PAVEMENTS**

Requirements for natural (turf) airfield pavements are based directly on subgrade bearing capacity. Loads from the aircraft are transferred directly onto the soil, without additional layers to distribute the loads over a greater area. Lack of structural layers also results in greater susceptibility to adverse weather conditions, since the subgrade is not protected from such factors, e.g. from washing out during heavy rainfalls. In the case of frost, subgrade is directly exposed to its destructive action and occurrence of frost heave.

Currently, in order to ensure the required level of safety of aircraft operations, a certain set of requirements is applied to airfield pavements. One of the basic parameters is the *CBR* value determined in situ. The test consists in driving a standard plunger into the soil, with continuous measurement of the force needed to penetrate to the given depth [11, 17, 18]. The test is performed with a set of devices identical to those used in laboratory *CBR* tests, but adapted to field use. Standard plunger is mounted on a movable frame, which should be assembled and stabilized in the location of the planned test. The frame must be locked in place against an element that will provide “reaction” to the driving force (most often heavy vehicles are used, e.g. dumper trucks or loaders). The course of the test and analysis of the results are the same as in the case of a laboratory *CBR* test.

The measured force is subsequently compared to the standard values, and the proportion of the measured force to the standard force is expressed in percent. According to the ICAO recommendations [16] concerning safety in the case of aircraft leaving the runway, the minimum value of the parameter is between 15% and 20% at the depth of 15 cm below surface. The minimum *CBR* value guarantees protection of aircraft against possible damage resulting from landing gear sinking into the subgrade. In the case of a turf surface serving as pavement for continuous light civil operations (General Aviation category), it may be assumed that *CBR* greater than 15% is a value that provides

towo. Zgodnie z wytycznymi ICAO [16] dotyczącymi zapewnienia zabezpieczenia ewentualnego wyjechania statku powietrznego poza obszar drogi startowej, minimalna wartość parametru wynosi od 15% do 20% na głębokości do 15 cm od powierzchni terenu. Minimalna wartość parametru *CBR* gwarantuje zabezpieczenie samolotów przed możliwymi uszkodzeniami spowodowanymi zagłębieniem się podwozia w podłoże gruntowe. Mając do czynienia z nawierzchnią darniową stanowiącą nawierzchnię wykorzystywaną na potrzeby stałego ruchu lotniczego o niewielkich obciążeniach (typu General Aviation) można założyć, że  $CBR > 15\%$  jest wartością zapewniającą bezpieczeństwo wykonywania operacji lotniczych. Połowe badania *CBR* pozwalają również na określenie parametrów podłoża gruntowego na potrzeby budowy nawierzchni sztucznych.

Kolejnym sposobem określania nośności darniowej nawierzchni lotniskowej jest badanie sondą udarową Babkova-Smirnowa (tzw. sonda igłowa) [6]. Urządzenie to składa się z pręta o kołowym przekroju z elementem w formie rękojeści oraz obciążnika o określonej masie, który spadając na ogranicznik generuje dynamiczną siłę wciskającą pręt w podłoże gruntowe. Opad obciążnika jest swobodny i nie jest niczym wspomagany.

Badanie polega na wbiciu sondy za pośrednictwem wspomnianego obciążnika zagłębiającego pręt wraz z jednoczesnym pomiarem liczby uderzeń koniecznych do zagłębienia końcówki na głębokość 10 cm i 30 cm. Na podstawie nomogramów zawartych w [8] określa się nośność warstwy darniowej na 10 cm i 30 cm, a następnie oblicza się średnią z obu wyników. Nomogramy w przejrzysty sposób umożliwiają przeliczenie liczby uderzeń na nośność gruntu. Wychodząc od liczby uderzeń do przecięcia się z krzywą właściwą dla danego typu gruntu, odczytujemy nośność gruntu wyrażoną w megapaskalach [MPa]. Zgodnie z zaleceniami zawartymi w [8] nośność nawierzchni dla stałej eksploatacji powinna wynosić min. 1,0 MPa. W przypadku incydentalnego wykorzystania nawierzchni (np. w czasie wykołowania samolotu poza drogę startową na gruntowe pobocze) nośność określona za pomocą przedmiotowej sondy nie może być mniejsza niż 0,8 MPa. Przedmiotowe badanie jest przeprowadzane w bardzo szybki i prosty sposób bez konieczności stosowania zaawansowanego sprzętu, jednak w związku z lokalnym charakterem pomiaru wyniki badań mogą być zaburzone poprzez występowanie specyficznych warunków, takich jak zwiększona gęstość darniny lub obecność kamieni w podłożu.

Badanie sondą dynamiczną stożkową SDS (ang. *Dynamic Cone Penetrometer*, DCP) pozwala na przeprowadzenie połowych badań podłoża w celu określenia wartości wskaźnika nośności *CBR*. Badanie to polega na określeniu zagłębienia

sufficient safety. Field *CBR* tests also enable determination of subgrade parameters for design and construction of artificial pavements.

Another method of determination of bearing capacity of turf airfield pavements is sounding the ground with the Babkov-Smirnov dynamic penetrometer (also called “needle penetrometer”) [6]. This device consists of a circular rod with handle and a hammer, which is repeatedly dropped to generate the dynamic force that drives the rod into the ground. The hammer falls freely and its downward movement is not assisted in any manner.

The test consists in driving the rod into the subgrade using the aforementioned hammer and counting the number of blows needed to push the tip of the rod to the depth of 10 cm and 30 cm. Based on nomographs found in [8], bearing capacity of turf at 10 cm and 30 cm is determined and then used to calculate the mean of the two values. The nomographs are plotted clearly and enable determination of subgrade bearing capacity based on the number of impacts in the test. Bearing capacity (in MPa) is obtained from the curve corresponding to the given type of soil. According to the recommendations given in [8], bearing capacity of pavement in continuous service should equal at least 1.0 MPa. If the given surface is used on an incidental basis (e.g. when the aircraft leaves the runway and enters an unimproved shoulder), bearing capacity determined using this penetrometer should be no less than 0.8 MPa. While the described test does not require any advanced equipment and may be performed very quickly and easily, the local character of measurement makes it prone to variability due to occurrence of specific local conditions, such as greater thickness of turf or stones found in the ground.

Testing with Dynamic Cone Penetrometer (DCP) enables performance of field investigations in order to determine *CBR*. The test consists in measurement of penetration of the device into the soil (in mm) per blow of hammer falling freely from a predetermined height [14, 19]. The DCP methodology is described in [20]. Depending on the cohesion of the tested soil, *CBR* is calculated from one of the following relationships:

- cohesive soils in plastic (soft and medium stiff) state (at  $CBR < 10\%$ ):

$$CBR = \frac{1}{(0.017019 \cdot DCP)^2}, \quad (1)$$

- cohesive soils in plastic (stiff) state:

$$CBR = \frac{1}{(0.072923 \cdot DCP)^2}, \quad (2)$$

stożka sondy w milimetrach, przypadającego na jedno uderzenie obciążnika spadającego z określonej wysokości [14, 19]. Metodyka badań sondą stożkową SDS (DCP) została opisana w [20]. W zależności od spoistości badanego gruntu, *CBR* określany jest na podstawie jednej z następujących zależności:

- grunty spoiste miękkoplastyczne i plastyczne (przy *CBR* < 10%):

$$CBR = \frac{1}{(0,017019 \cdot DCP)^2}, \quad (1)$$

- grunty spoiste twardoplastyczne:

$$CBR = \frac{1}{(0,072923 \cdot DCP)^2}, \quad (2)$$

- pozostałe grunty spoiste (oraz niespoiste):

$$CBR = \frac{292}{DCP^{1,12}}, \quad (3)$$

gdzie:

*CBR* – kalifornijski wskaźnik nośności [%],

*DCP* – zagłębienie stożka sondy przypadające na jedno uderzenie [mm].

Minimalna wartość *CBR* na podstawie tego badania dla danej nawierzchni powinna wynosić 15% do głębokości 15 cm oraz 8% dla głębokości od 15 cm do 85 cm poniżej poziomu terenu [14]. Takie wartości *CBR* gwarantują również zabezpieczenie przed uszkodzeniem statku powietrznego w razie awaryjnego opuszczenia drogi startowej.

Na potrzeby określenia stanu gruntów spoistych tworzących naturalną nawierzchnię lotniskową wykorzystuje się badanie sondą krzyżakową (obrotową) FVT (ang. *Field Vane Test*) [21]. Zgodnie z [14] wymaga się, aby naturalna nawierzchnia lotniskowa charakteryzowała się stopniem plastyczności  $I_L < 0,25$  (stan twardoplastyczny), co odpowiada maksymalnej wytrzymałości na ścianie bez odplywu w zakresie od 80 kPa do 160 kPa. Badanie sondą krzyżakową można połączyć z badaniem sondą DPL poprzez montaż końcówki krzyżakowej na standardowy zestaw sondy dynamicznej. W przypadku określenia nośności według badania sondą DPL wymaga się, aby naturalne nawierzchnie lotniskowe składające się z gruntów niespoistych charakteryzowały się stopniem zagęszczenia  $I_D$  wynoszącym od 0,68 do 1,00 (grunt w stanie zagęszczonym).

### 3.3. BADANIA NOŚNOŚCI PODŁOŻA GRUNTOWEGO POD SZTUCZNE NAWIERZCHNIE LOTNISKOWE

Badania określające nośność podłoża gruntowego są również nieodzowne w czasie projektowania nawierzchni sztucznych [22]. Właściwe zaprojektowanie układu warstw konstrukcyj-

- other cohesive and non-cohesive soils:

$$CBR = \frac{292}{DCP^{1,12}}, \quad (3)$$

where:

*CBR* – California Bearing Ratio [%],

*DCP* – penetration of cone tip per blow [mm].

The minimum *CBR* value based on this test for the given pavement type equals 15% for depths of up to 15 cm and 8% for depths between 15 cm and 85 cm below the surface [14]. Such *CBR* values also guarantee protection against aircraft damage in the case aircraft leaves the runway.

For the purpose of determination of state of cohesive soils forming natural airfield pavements, subgrades are also tested using the shear (rotary vane) Field Vane Test (FVT) [21]. According to [14], natural airfield pavement is required to have liquidity index  $I_L < 0.25$  (stiff plastic state), which corresponds to maximum undrained shear strength in the range of 80 kPa to 160 kPa. Shear vane tests may be combined with light dynamic penetrometer (DPL) tests through mounting of the vane on the standard rod of the dynamic penetrometer set. When bearing capacity is determined using the light dynamic penetrometer, natural airfield pavements consisting of non-cohesive soils are required to have relative density  $I_D$  in the range of 0.68 to 1.00 (dense and very dense soil).

### 3.3. TESTING OF SUBGRADE BEARING CAPACITY FOR ARTIFICIAL AIRFIELD PAVEMENTS

Tests of subgrade bearing capacity are also essential in the design of artificial pavements [22]. Adequate design of the system of structural layers through selection of their thickness and material characteristics is inextricably linked to geotechnical parameters of soils found in the subgrade. It is impossible to correctly design a pavement without data on the state of the soil, which may be only obtained through specialized tests.

As in the case of natural airfield pavements, determination of the *CBR* value of subgrade is one of the basic tests. There are many standards and guidelines giving the required subgrade *CBR* values to ensure proper performance of an artificial pavement. This article focuses on requirements concerning the minimum bearing capacity parameters of the subgrade measured before the structural layers of the pavement are constructed, as these parameters primarily influence the performance of the designed pavement. According to [14, 17], it is recommended that subgrade for airfield pavement should have *CBR* > 10%.

nych poprzez dobranie ich grubości oraz cech materiałowych jest bezpośrednio połączone z parametrami geotechnicznymi gruntu występującego w podłożu gruntowym. Nie jest możliwe poprawne zaprojektowanie nawierzchni bez danych o stanie gruntu, których zgromadzenie wymaga wykonania specjalistycznych badań.

Podobnie jak w przypadku określania nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych, określenie wskaźnika *CBR* dla podłoża gruntowego pod nawierzchnie sztuczne jest badaniem podstawowym. Istnieje wiele norm i wytycznych określających wymagane wartości parametrów *CBR* podłoża gruntowego, zapewniające właściwą pracę nawierzchni sztucznej. W artykule skupiono się na wymaganiach dotyczących minimalnych parametrów nośności podłoża przed wykonaniem warstw konstrukcyjnych nawierzchni, ponieważ one decydują o poprawnej pracy nawierzchni. Zgodnie z [14, 17] zaleca się, aby podłoże gruntowe pod nawierzchnię charakteryzowało się wartością *CBR* > 10%.

Jednym z badań pozwalających na określenie wymaganych parametrów nośności podłoża gruntowego jest badanie VSS, które polega na oznaczaniu modułu odkształcenia podłoża poprzez obciążenie płytą sztywną. Oznaczenie modułu odkształcenia podłoża jest realizowane poprzez statyczne, stopniowe obciążanie podłoża gruntowego płytą stalową o średnicy 300 mm przy ciągłym pomiarze osiadań. Na podstawie stosunku przyrostu obciążenia jednostkowego do przyrostu odkształcenia badanej warstwy zgodnie z [23] określa się pierwotny oraz wtórny moduł odkształcenia. Na podstawie wyznaczonych modułów odkształcenia można również określić wskaźnik odkształcenia, wskazujący na stan zagęszczenia podłoża. Zgodnie z normą [23] wymaga się, aby dla autostrad i dróg ekspresowych (czyli obiektów o porównywalnych obciążeniach do lotnisk), w przypadku nasypów i wykopów, podłoże gruntowe charakteryzowało się wtórnym modułem odkształcenia  $E_2$  wynoszącym 120 MPa oraz minimalnym wskaźnikiem odkształcenia  $I_0 = 2,2$  (dla żwirów, piasków i pospółek),  $I_0 = 2,0$  (dla pyłów, glin,) lub  $I_0 = 3,0$  (dla glin piaszczystych i piasków gliniastych).

Kontrolę zagęszczenia gruntu rodzimego stanowiącego podłoże gruntowe pod nawierzchnię na większych głębokościach można wykonać za pomocą sondowania dynamicznego sondą lekką (DPL), średnią (DPM), ciężką (DPH) lub bardzo ciężką (DPSH). Poszczególne rodzaje typów sond są klasyfikowane na podstawie masy obciążnika.

## 4. METODYKA BADAŃ

### 4.1. UWAGI OGÓLNE

Zmienność rodzajów oraz stanu gruntów stanowiących podłoże gruntowe dla konstrukcji inżynierskich powoduje, że

One of the tests that enable determination of the required subgrade bearing capacity parameters is the VSS test, which consists in determination of subgrade deformation modulus through loading with a rigid plate. The subgrade is subjected to static, gradually increasing loading with a steel plate of 300 mm in diameter, and its displacement is continuously measured. Based on the proportion between the increase in load and the increase in deformation of the tested layer, the primary deformation modulus (from initial loading) and secondary deformation modulus (from repeated loading) are determined according to [23]. Based on the proportion between the obtained values of the two moduli, deformation index may also be calculated to express the state of compaction of the subgrade. According to the standard [23], for motorways and expressways (i.e. structures with loads comparable to airfields) it is required that subgrade in cuts and embankments should have secondary modulus  $E_2$  of 120 MPa and minimum deformation index of  $I_0 = 2.2$  (for gravel, sand and sandy gravel),  $I_0 = 2.0$  (for silt, clay) or  $I_0 = 3.0$  (for sandy clay and clayey sand).

Density of subgrade at greater depths may be controlled through sounding with dynamic penetrometers: light (DPL), medium (DPM), heavy (DPH) or super heavy (DPSH). The penetrometer classification is based on the weight of the hammer.

## 4. RESEARCH METHODOLOGY

### 4.1. GENERAL REMARKS

Variability of types and states of soils that constitute subgrades for engineering structures require engineers to be prepared for effective work in a wide range of conditions. When the subgrade consists of soils whose parameters have been precisely determined and performance under load and changing weather conditions has been well described, the situation is not particularly problematic. Issues become more challenging when the particle size distribution of the given soil does not directly correspond to a single soil category, but suggests classification into more possible categories. Such uncertain soils include sandy/silty soils, which were the subject of research performed at the Faculty of Civil Engineering and Geodesy of the Military University of Technology [24-27].

### 4.2. TEST SAMPLES

The research focused on *CBR* values of sandy/silty soils with fines content (silt fraction  $f_\pi$  plus clay fraction  $f_i$ ) ranging from 5.8% to 24.8%. Despite high content of sand fractions, such soils may change their geotechnical

inżynierowie muszą być przygotowani do działania w bardzo zróżnicowanych warunkach. Obecność w podłożu gruntów, dla których parametry zostały dokładnie określone, a ich zachowanie pod obciążeniem i przy zmiennych warunkach klimatycznych również zostały bardzo dobrze opisane, nie stanowi szczególnego problemu. Inaczej wygląda sprawa z gruntami, które w związku ze swoim składem granulometrycznym nie są przyporządkowane do jednej kategorii, a są na ich pograniczu. Tego typu gruntami są grunty piaszczysto-pyłaste, które były przedmiotem badań przeprowadzonych na Wydziale Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej [24-27].

## 4.2. PRÓBKİ DO BADAŃ

Przedmiotem badań wartości *CBR* były grunty pylasto-piaszczyste o zawartości frakcji drobnych (pyłastych i ilastych) od 5,8% do 24,8%. Takie grunty mimo znacznej zawartości frakcji piaszczystych mogą zmieniać w pewnych warunkach swoje parametry geotechniczne. Są również wrażliwe na działanie wody i niskiej temperatury. Na Rys. 1 przedstawiono przykładową krzywą uziarnienia dla próbki gruntu nr 4.1 i 4.2.

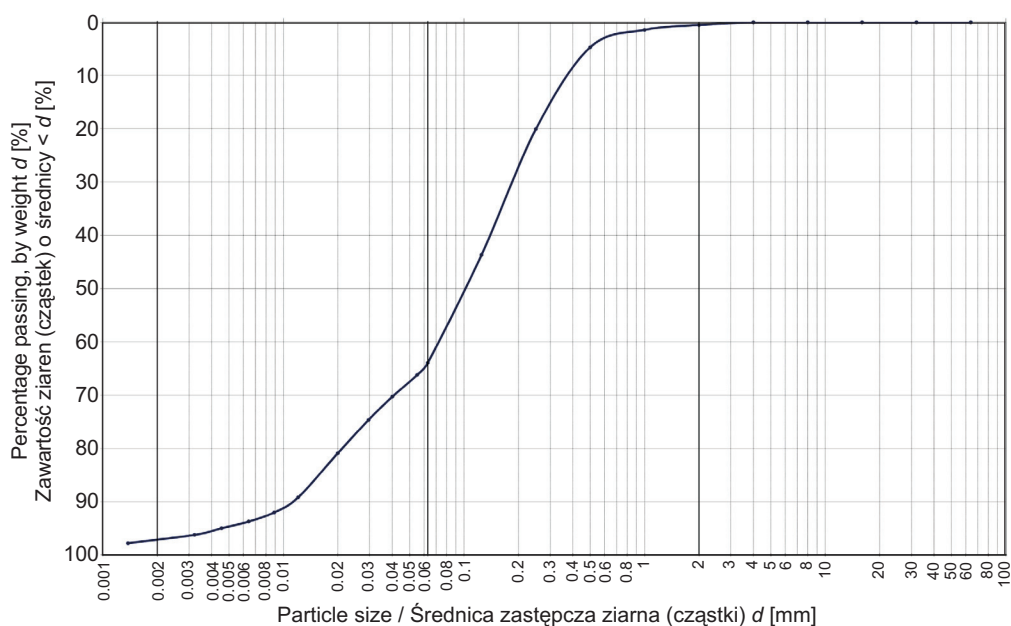
Badania polegały na odpowiednim przygotowaniu próbki gruntu, zagęszczeniu jej przy odpowiedniej wilgotności w cylindrze, przeprowadzeniu nasycania wodą wraz z pomiarem ewentualnego pęcznienia liniowego, a następnie wykonaniu próby penetracji trzpieniem [28].

Próbki były nasycane wodą przez 4 doby w naczyniu zapewniającym ciągle zanurzenie całej próbki w wodzie o stałej temperaturze. Nasycanie było prowadzone w stałej wilgotności powietrza, w pomieszczeniu laboratoryjnym chronionym przed nasłonecznieniem. Podczas nasycania próbki obciążone były stalowymi elementami pierścieniowymi, zapewniającymi nacisk wynoszący 7 MPa.

## 4.3. METODA BADAŃ

Metodyka badania wartości *CBR* została opracowana w USA przez Kalifornijski Departament Transportu w latach 30-tych XX wieku w odpowiedzi na zapotrzebowanie na badanie pozwalające określić nośność podłoża gruntowego oraz podbudów z kruszyw w budownictwie drogowym [17]. Badania *CBR* można wykonywać jako podstawowe badania laborato-

parameters under certain conditions. They are also susceptible to water and low-temperature action. Fig. 1 presents an example particle size distribution curve – for soil samples 4.1 and 4.2.



Rys. 1. An example particle size distribution curve – for samples 4.1 and 4.2

Rys. 1. Przykładowa krzywa uziarnienia dla próbki oznaczonej nr 4.1 i 4.2

The tests consisted in preparation of soil sample, compaction of sample in a cylinder at appropriate moisture content, measurement of possible linear swell of water-saturated sample and performance of penetration with *CBR* plunger [28].

Samples were being saturated with water for 4 days in a container that provided continuous submersion of the entire sample at a constant temperature. Saturation conditioning was performed in a laboratory room which was protected from sunlight and ensured constant air humidity. During saturation samples were weighted with steel rings that provided pressure of 7 MPa.

## 4.3. TEST METHOD

*CBR* test method was developed in the 1920s in the USA by the California Department of Transportation to address the need for a test that would enable determination of bearing capacity of subgrades and aggregate bases in road construction [17]. *CBR* tests may be conducted both as in situ tests and as basic laboratory tests on soil samples taken from the analyzed locations.

In order to prepare the samples appropriately, the optimum moisture content according to the standard Proctor



ryjne na próbkach gruntu pobranego z analizowanych miejsc oraz jako badania polowe „in situ”.

W celu właściwego przygotowania próbek do badań, w pierwszej kolejności wyznaczono wilgotność optymalną gruntów standardową metodą Proctora. Przed zasadniczym badaniem *CBR* dla wszystkich badanych gruntów na podstawie normy [29] określone zostały podstawowe cechy fizyczne, takie jak: zawartość frakcji pylastych i ilastych ( $f_{\pi} + f_i$ ), wilgotność optymalna i maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego. W Tabl. 1 zestawiono oznaczone parametry dla wszystkich próbek gruntów na podstawie badań podstawowych.

Sample number Numer próbki	Content of silt and clay fractions Zawartość frakcji pylastych i ilastych [%]	Optimum moisture content Wilgotność optymalna [%]	Maximum dry density Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego [kN/m <sup>3</sup> ]
1.1, 1.2	5.8	9.8	1.94
2.1, 2.2	6.9	10.4	1.84
3.1, 3.2	7.3	12.0	1.79
4.1, 4.2	8.6	9.9	1.86
5.1, 5.2	8.8	8.9	1.89
6.1, 6.2	9.7	8.6	1.96
7.1, 7.2	11.7	8.4	1.92
8.1, 8.2	14.3	7.7	1.93
9.1, 9.2	17.5	8.5	1.92
10.1, 10.2	18.2	5.6	1.89
11.1, 11.2	24.8	9.9	1.84

## 5. WYNIKI BADAŃ

Po wykonaniu badań podstawowych zgodnie z [23] wykonano zasadnicze badania *CBR* dla 22 próbek gruntów. W trakcie analizy otrzymanych danych (Rys. 2) stwierdzono, że podczas badań dochodzi do zjawiska zmiany kształtu wykresu siły rejestrowanej w trakcie zagłębiania trzpienia *CBR*, przyjmującej zgoła odmienny przebieg od kształtu znanych z literatury krzywych standardowych dla tego typu badań (Rys. 3) [30]. Zmiany te zostały zarejestrowane we wszystkich przypadkach. Ponadto zauważono, że istnieje pewien przedział penetracji, w którym dochodzi do omawianego zjawiska.

Metodyka badań *CBR* jasno wskazuje, jak należy przeprowadzić określenie badanego parametru – tj. po odczytaniu z wykresu siły, jaka jest potrzebna do wciśnięcia tłoka w grunt przy penetracji wynoszącej 2,5 mm i 5,0 mm (przy czym do określenia parametru przyjmujemy większą z odczytanych wartości, bez względu na głębokość) porównać należy ją z siłą standardową. Wykonane badania ujawniły, że zjawisko „wybrzuszenia” wykresu obejmuje obie referencyjne głębokości do odczytu siły.

method was determined first. Basic physical properties, such as content of silt and clay fractions ( $f_{\pi} + f_i$ ), optimum moisture content and maximum dry density, were determined for all the tested soils according to the standard [29] before the principal *CBR* test. Table 1 presents parameters obtained from the basic tests for all soil samples.

Table 1. Comparison of physical properties of the tested soil samples  
Tablica 1. Zestawienie cech fizycznych badanych próbek

## 5. TEST RESULTS

Upon completion of the basic tests according to [23], principal *CBR* tests were conducted on 22 soil samples. During the analysis of the obtained data (Fig. 2), it was observed that the shape of the plot of force vs. penetration registered during driving of the *CBR* plunger into the samples was markedly different from the standard plots given in the literature for this type of tests (Fig. 3) [30]. Such differences were registered for all the tested samples. Moreover, it was noted that this phenomenon occurred in a certain range of penetration.

*CBR* test methodology includes clear directions regarding determination of the tested parameter – loading force for penetrations of 2.5 mm and 5.0 mm should be read from the plot (greater of the two force values is adopted for further calculations, regardless of the penetration depth) and then compared to the standard force. In the performed research, the effect of upward “bulging” of the plot occurred over both reference penetration values.

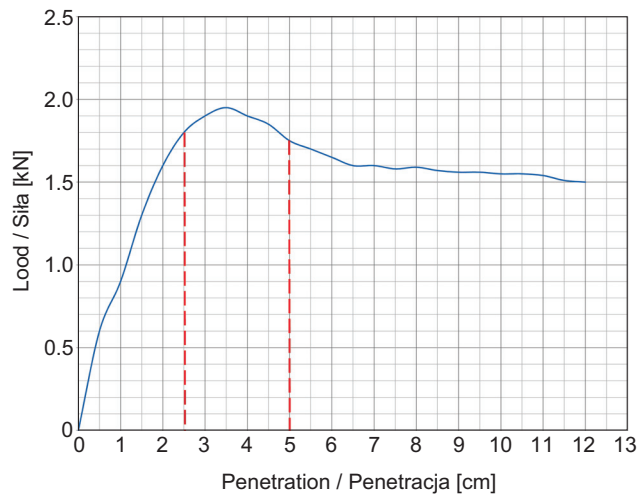


Fig. 2. An example plot of loading force vs. penetration (sample no. 4.1) with reference readout lines

Rys. 2. Przykładowy wykres zmiany siły w trakcie penetracji dla próbki nr 4.1 z naniesionymi referencyjnymi punktami odczytu

Porównując krzywe z badań oraz dostępne krzywe standardowe zauważono, że różnice odczytu siły mogą być znaczne i sięgać nawet 10%. W celu określenia wartości różnicy odczytów dokonano próby określenia kształtu krzywej korygującej dla próbki nr 4.1 za pomocą aproksymacji krzywej, którą przybliżono wielomianem czwartego stopnia. Wielomian ten określono dla krzywej standardowej, którą w kolejnych krokach dopasowano do przebiegu wyników pomiarów. Przykładowy wielomian dla próbki nr 4.1 ma postać:

$$y = -0,0005x^4 + 0,0168x^3 - 0,1897x^2 + 0,9153x, \quad (4)$$

gdzie:

$y$  – wartość siły [kN];

$x$  – zagłębienie trzpienia [mm].

Dopasowanie krzywej korygującej wykonano w arkuszu kalkulacyjnym MS Excel, przyjmując za warunki brzegowe kąt nachylenia oraz końcowy zakres krzywej z badania. Założono, że kąt nachylenia w początkowej fazie musi być zbieżny (lub zbliżony) do wartości kąta z badania. Dodatkowo na podstawie krzywych standardowych założono, że istnieje odcinek, na którym krzywa zmienia swój charakter z rosnącego na stały przy wartości zagłębienia trzpienia wynoszącej ok. 10 mm. Uwzględniając te zależności, dla każdej próbki oddzielnie wyznaczono matematycznie wielomian określający krzywą korygującą.

Na Rys. 4 przedstawiono przykładowy skorygowany wykres krzywej zmian siły podczas penetracji uzyskany dla próbki nr 4.1, gdzie linia koloru niebieskiego to bazowy wykres pomiaru, zaś linia koloru zielonego to wykres z uwzględnieniem przyjętego wielomianu.

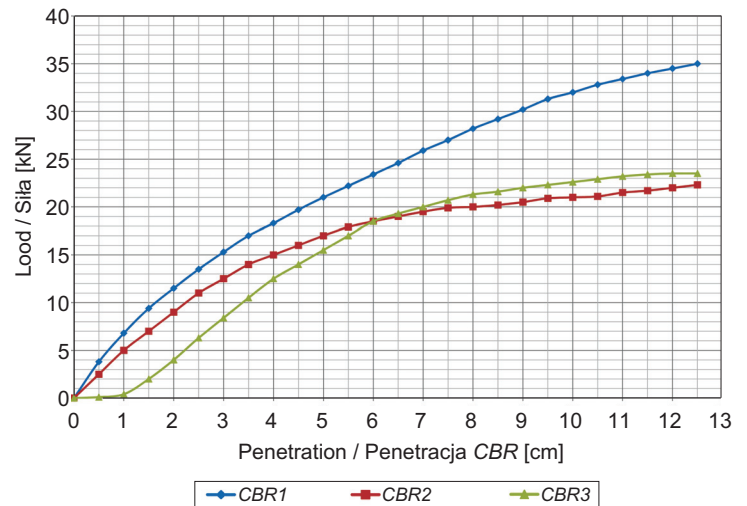


Fig. 3. Standard curves for CBR tests [2]

Rys. 3. Krzywe standardowe w badaniach CBR [2]

Upon comparison of the obtained plots with available standard curves it was noted that relative differences in readings of the loading force may be significant, reaching even 10%. In order to determine the difference in loading force readouts, an attempt was made to describe the shape of a corrected curve for sample 4.1. The curve was approximated using a fourth-degree polynomial. The character of the polynomial was identified based on the standard curve and then fitted to the plots from the test. For example, the polynomial obtained for sample 4.1 has the following form:

$$y = -0.0005x^4 + 0.0168x^3 - 0.1897x^2 + 0.9153x, \quad (4)$$

where:

$y$  – loading force [kN],

$x$  – plunger penetration [mm].

The corrected curve was fitted in the MS Excel spreadsheet, with the slope of the curve and the end values of the curve adopted as boundary conditions. It was assumed that the slope of the curve in the initial phase of penetration must be identical (or similar) to the slope observed in the test. Moreover, based on the standard curves, it was assumed that around penetration of 10 mm there is a section of the plot in which the curve changes its character from increasing to constant. Taking these patterns into account, a polynomial describing the corrected curve was calculated separately for each sample.

Fig. 4 presents the corrected curve of force vs. penetration obtained for sample 4.1; the blue line represents the base plot from the measurement and the green line represents the curve corrected using the adopted polynomial.

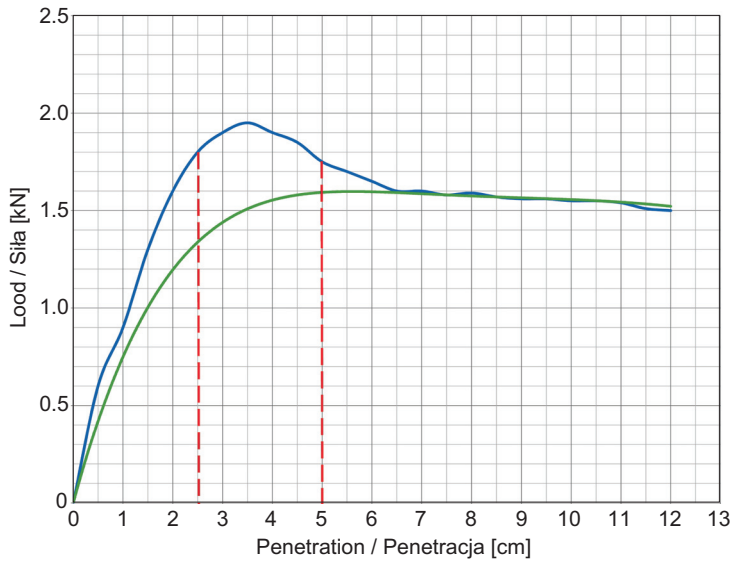


Fig. 4. An example plot of loading force vs. penetration (sample no. 4.1) with reference readout lines

Rys. 4. Przykładowy wykres zmiany siły w trakcie penetracji dla próbki nr 4.1 z naniesionymi referencyjnymi punktami odczytu

Po wykonaniu badań dla wszystkich 22 próbek, przeprowadzono analizę przebiegu krzywych siły zarejestrowanej podczas penetracji oraz wykreślono krzywe korygujące dla każdej z próbek. W Tabl. 2 zestawiono dane dotyczące uzyskanych parametrów, tj. wartości bazowej  $CBR_{base}$  uzyskanej z badań, skorygowanej wartości  $CBR_{corr}$  na podstawie krzywej korygującej oraz wynikowe różnice.

W związku z tym, że zbadano wiele próbek i uzyskano znaczną ilość wyników badań podstawowych oraz badań penetracji  $CBR$ , dokonano również analizy innych zależności. Zaliczyć do nich należy przede wszystkim zjawisko wzrostu parametru  $CBR$  ze wzrostem zawartości frakcji pylistych i łastrych, co przedstawiono na Rys. 5.

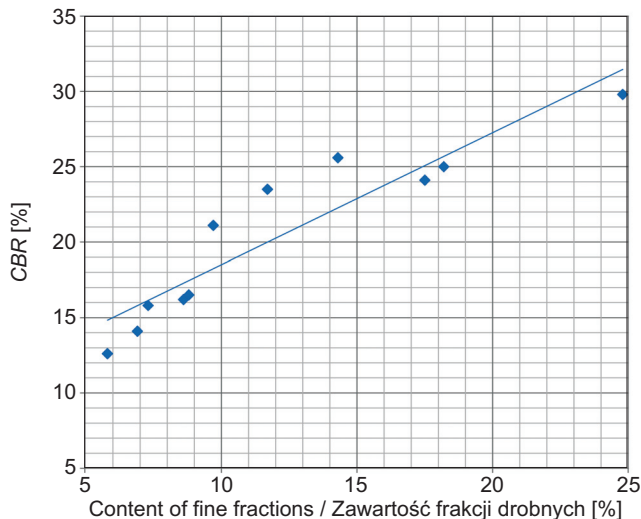


Fig. 5. Relationship between  $CBR$  [%] and  $(f_{\pi} + f_l)$  [%]  
Rys. 5. Zależność  $CBR$  [%] od  $(f_{\pi} + f_l)$  [%]

After the tests had been performed for all the 22 samples, the force-penetration curve was analyzed and a corrected curve was determined for each sample. Table 2 presents a comparison of the obtained parameters, i.e.: the base value  $CBR_{base}$  obtained from the test, the corrected value  $CBR_{corr}$  obtained from the fitted curve and the resulting difference in values.

The significant number of samples and values obtained from basic tests and  $CBR$  tests enabled analysis of other relationships as well. The analysis encompassed primarily the observed effect: an increase in the  $CBR$  parameter with an increase in the content of fine fractions (silt and clay), as shown in Fig. 5.

Table 2. Comparison of differences in  $CBR$  values  
Tablica 2. Zestawienie różnic w wartości parametru  $CBR$

Sample no. Nr próbki	$CBR_{base}$ [%] base plot wykres podstawowy	$CBR_{base}$ [%] corrected plot wykres skorygowany	Difference Różnica $\Delta CBR$ [%]
1.1	12.6	7.6	5.0
1.2	12.3	7.0	5.3
2.1	14.1	6.0	8.1
2.2	13.8	6.2	7.6
3.1	15.8	6.6	9.2
3.2	15.3	8.0	7.3
4.1	16.2	6.2	10.0
4.2	16.7	8.6	8.1
5.1	16.5	7.2	9.3
5.2	16.0	3.5	12.5
6.1	21.1	11.1	10.0
6.2	20.0	7.5	12.5
7.1	23.5	10.0	13.5
7.2	22.8	10.8	12.0
8.1	25.6	13.6	12.0
8.2	25.0	15.4	9.6
9.1	24.1	16.3	7.8
9.2	24.6	15.8	8.8
10.1	25.0	15.8	9.2
10.2	24.5	14.0	10.5
11.1	29.8	24.8	5.0
11.2	32.0	26.0	6.0

Należy zwrócić uwagę, że zaobserwowane zjawisko stoi w sprzeczności z dotychczasową wiedzą na temat badań *CBR*, gdzie wzrost zawartości frakcji pylastych powodował zmniejszanie wartości wskaźnika. Fakt ten może być powiązany ze specyficzną strukturą badanych gruntów piaszczysto-pylastych będących na pograniczu gruntów spoistych i niespoistych. Jednym z powodów może być to, że zwiększona zawartość frakcji drobnych ogranicza migrację wody w głąb próbki, tym samym utrzymując korzystniejszą spoistość gruntu. Mniejsza ilość frakcji drobnych ułatwia penetrację próbki, a tym samym zmianę stanu gruntu oraz spadek parametrów geotechnicznych. Autorom nie udało się odnaleźć podobnych analiz wyników badań tego typu gruntów. W związku z tym założono, że specyficzny skład granulometryczny przedmiotowych gruntów i ich zachowanie pod przyłożonym obciążeniem odbiega od przyjętej wiedzy obejmującej szeroki i ogólny przegląd badań *CBR*.

Kolejnym aspektem poddanym analizie był możliwy wpływ stałego obciążenia zewnętrznego na wyniki badań *CBR*. W celu uwzględnienia tego zjawiska przeprowadzono dla próbek piasków pylastych szereg badań *CBR*, w których w czasie zasadniczej penetracji na górną powierzchnię próbki przykładano zróżnicowane obciążenie. Zgodnie z metodyką badania z [23] w czasie badania na próbkę należy przyłożyć takie obciążenie, jakie będzie realizowane w czasie pracy podłoża gruntowego pod obciążeniem stałym i eksploatacyjnym. Norma wskazuje, że wspomniane obciążenie nie powinno być mniejsze niż 7 kPa, co odpowiada sumarycznej masie obciążników wynoszącej 4,5 kg. W związku z tym, że wartość obciążeń stałych od konstrukcji nawierzchni może być jednak znacznie większa, postanowiono przeanalizować możliwy wpływ obciążenia zewnętrznego na wartość parametru *CBR*, tym bardziej, że brak jest jasno określonych danych dotyczących wpływu większego (lub mniejszego) obciążenia na ten parametr geotechniczny.

Na podstawie typowych konstrukcji nawierzchni z [31] w zależności od kategorii ruchu (od KR1 do KR7) określono stałe obciążenia pochodzące od warstw konstrukcyjnych. Obliczenia wskazały, że dla kategorii KR1 należy zastosować sumaryczne obciążenie wynoszące 8,9 kg (obciążenie jednostkowe 5,7 kPa), a dla kategorii KR7 należy zastosować obciążenie równe 16,5 kg (co daje obciążenie jednostkowe równe 10,5 kPa). Za pomocą dostępnych obciążników zasymulowano poszczególne obciążenia i dla takich wartości wykonano badania penetracji. Badaniu poddano 21 próbek o zmiennej łącznej zawartości frakcji pylastych i ilastych, wynoszącej od 10% do 40%.

Wykonane badania pokazały, że różnice w wartości parametru *CBR* dla obciążenia stałego od nawierzchni dla kategorii od

It is noteworthy that the observed tendency contradicts the state-of-the-art knowledge about *CBR* tests – usually an increase in silt fraction content results in a decrease in *CBR* value. This fact may be related to the characteristic structure of the tested sandy/silty soils, placing them on the borderline between cohesive and non-cohesive soils. Causes of the observed effect may include the fact that greater content of fine fractions reduces water infiltration into the sample, therefore maintaining more advantageous value of soil cohesion. Lower content of fines facilitates penetration of water into the sample, which may lead to a change in the state of the soil and a reduction in geotechnical parameters. Reviewing the available literature, the authors did not note any similar analyses pertaining to soils of this type. Therefore, it was assumed that the characteristic particle size distribution of the analyzed soils and their specific performance under load differ from the currently known general trends observed in the *CBR* test.

The analyzed aspects also included the possible influence of continuous external loading on the obtained *CBR* values. In order to take this effect into account, a series of *CBR* tests was performed on a set of silty sand samples; during the penetration, the upper surface of samples was subjected to varying additional load. According to the test methodology [23], the load used during the test should reflect real permanent and temporary loads that the subgrade will be subjected to during service. The standard states that the load used should be at least 7 kPa, which corresponds to a total mass of the weights equal to 4.5 kg. Since the permanent load from the pavement structure may significantly exceed the mentioned value, it was decided that the possible influence of external loading on the obtained *CBR* values will also be analyzed, especially taking into account the fact that there is no available data on the effect of greater (or lesser) load on this geotechnical parameter.

Based on typical pavement structures from [31], permanent loading from the structural layers of the pavement were calculated for each traffic category (from the lowest KR1 to the highest KR7). The calculations have shown that load from the pavement designed for traffic category KR1 are equal to weight of 8.9 kg in the test (pressure of 5.7 kPa), while load for traffic category KR7 is equal to weight of 16.5 kg in the test (pressure of 10.5 kPa). Adequate loads were simulated using the available weights and then the *CBR* penetration tests were performed. A total of 21 samples with varying content of fine fractions (ranging from 10% to 40%) were tested.

The tests have shown that differences in *CBR* obtained for permanent load from KR1 and KR7 pavements were

KR1 do KR7 nie są znaczące i wyniosły 1,6 % [25, 26]. Jak widać z powyższej analizy, zróżnicowanie obciążenia zewnętrznego w zakresie wartości od 5,7 kPa do 10,5 kPa ma nieznaczny wpływ na wartości wskaźnika *CBR*. Głównym wnioskiem płynącym z przeprowadzonych badań jest stwierdzenie, że normowy zapis dotyczący konieczności obciążenia próbki w czasie jej penetracji obciążeniem o jednostkowej wartości 7 kPa jest wystarczający dla klasycznych nawierzchni drogowych w przypadku piasków pylastych. Należy mieć jednak na względzie fakt, że badania przeprowadzono dla standardowych układów nawierzchni drogowych i lotniskowych. Dla układów niestandardowych o znacznie większej grubości należy wykonać badania weryfikacyjne, które określą ewentualny wpływ obciążenia na parametr *CBR*.

## 6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W artykule przedstawiono przegląd stosowanych obecnie metod określania nośności nawierzchni lotniskowych (naturalnych oraz sztucznych). Odniesiono się do historycznych początków metod badawczych wywodzących się z lotnictwa wojskowego.

Przedstawiono i krótko scharakteryzowano każdą z metod badawczych, jej metodologię, szczególne wymagania oraz możliwe zastosowania. Zaprezentowano również ogólne zasady określania poszczególnych parametrów. Dla każdej z metod przedstawiono wymogi dotyczące minimalnych wartości parametrów zapewniających bezpieczną eksploatację nawierzchni lotniskowych. Zestawienie przedmiotowych parametrów eksploatacyjnych stanowi swoisty zbiór wymagań dla nawierzchni.

Jedną z powszechnie stosowanych metod określania parametrów podłoża są badania *CBR*. Na podstawie przeprowadzonych badań własnych określono, że grunty piaszczysto-pylaste posiadają ciekawą charakterystykę dotyczącą kształtu krzywej obciążenie-penetracja. Zauważono, że w pewnym zakresie penetracji krzywa z badań nie pokrywa się z krzywymi standardowymi dostępnymi w literaturze jako wykresy przykładowe i wzorcowe. Ma to swoje konsekwencje w postaci możliwych błędów przy interpretacji wyników badań i przyjmowania zawyżonych parametrów geotechnicznych do obliczeń nawierzchni. W celu eliminacji możliwych błędów w określaniu parametrów geotechnicznych zaproponowano autorską metodę korekty krzywej z badań w celu określenia poprawnych wartości *CBR*. Wykorzystując otrzymane wyniki, dostępne krzywe standardowe oraz możliwości obliczeniowe, zaproponowano sposób weryfikacji otrzymanych wyników. Różnice pomiędzy wynikami *CBR* uzyskanymi bezpośrednio a wynikami *CBR* uzyskanymi na podstawie krzywych poddanych korekcie sięgały nawet 13,5 punktów procentowych. Jest to na

insignificant and equaled only 1.6% [25, 26]. As shown by the above analysis, variations of external load in the range from 5.7 kPa do 10.5 kPa does not have a significant effect on the values of *CBR* parameter. The main conclusion from the performed tests is that the provisions of the standard requiring loading of the sample with pressure of 7 kPa are sufficient for typical road structures in the case of silty sands. However, it should be noted that the tests were conducted on typical structures of road and airfield pavements. For non-standard structural systems of considerably greater thickness, additional verification tests should be performed to evaluate the possible influence of the permanent load on the obtained *CBR* values.

## 6. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The article presented a review of current methods of determination of subgrade bearing capacity for airfield pavements (natural and artificial). Historical provenance of the research methods, originating from military aviation, was also described.

Each test method was introduced and characterized briefly, with its methodology, specific requirements and possible applications. General principles of determination of individual parameters were described as well. Requirements concerning minimum values of parameters, ensuring safe service of airfield pavements, were provided for each method. The given performance parameters comprise a characteristic set of requirements for a pavement.

*CBR* test belongs to popular methods of determination of subgrade bearing capacity. Based on the performed own research, it was observed that sandy/silty soils show an interesting property in the shape of the force-penetration curve. It was noted that in a certain range of penetration the plots from the performed tests differed from the standard curves given in the literature as examples and models. This may lead to potential errors in interpretation of the results and assumption of overestimated geotechnical parameters for design calculations. In order to eliminate possible errors in determination of geotechnical parameters, the authors proposed a new method for correction of the curve obtained from the *CBR* test. Using the obtained results, available standard curves and calculative potential, a method for verification of results was proposed. Differences between *CBR* values determined directly from the test and *CBR* values obtained after curve corrections reached 13.5 percentage points. Since the difference is considerable, the obtained results should always be verified in the case of *CBR* tests performed on sandy/silty soils.

tyle duża wartość, że w przypadku badań *CBR* dla gruntów piaszczysto-pyłastych należy zawsze przeprowadzać sprawdzenie otrzymanych wyników.

Drugim ważnym aspektem poruszonym w kontekście badań nośności podłoża była analiza możliwego wpływu ciężaru warstw konstrukcyjnych na wartość parametru *CBR*. Wątpliwości związane z tym zagadaniem były spowodowane zbyt ubogim zapisem normowym wskazującym na pewną dowolność w stosowaniu obciążenia zewnętrznego w czasie penetracji próbki. Przeprowadzane badania wykazały, że w przypadku klasycznych układów konstrukcyjnych nawierzchni drogowych i lotniskowych, zależność parametru *CBR* od obciążenia zewnętrznego jest znikoma. W przypadku niestandardowych rozwiązań (o nietypowym układzie i nieprzeciętnie wysokiej grubości warstw konstrukcyjnych) należy jednak przeprowadzić badania sprawdzające i weryfikujące możliwe zmiany parametrów.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Graczyk M.: Nośność konstrukcji nawierzchni wielowarstwowych w krajowych warunkach klimatycznych. *Studia i Materiały*, **63**, IBDiM, Warszawa, 2010
- [2] Nita P.: *Betonowe nawierzchnie lotniskowe. Teoria i wymiarowanie konstrukcyjne*. Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa, 2005
- [3] Graczyk M., Kraszewski C., Szymankiewicz Cz., Zofka A.: Bezpieczeństwo użytkowania infrastruktury lotniskowej – Posadowienie nawierzchni lotniskowej na słabonośnym podłożu – minimalizacja osiadań, zwiększenie nośności. *Logistyka*, **4**, 2015, 3462-3470
- [4] Pisarczyk S.: *Mechanika gruntów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2010
- [5] PN-EN 1997-2 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego
- [6] Nita P.: *Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2008
- [7] PN-EN 1997-1 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne
- [8] Marszałek J.: *Budowa lotnisk. Cz. II. Obliczanie nawierzchni*. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 1984
- [9] Lipiński J.: *Druga wojna światowa na morzu*. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk, 1976
- [10] Wesółowski M., Grabowski P.: Wpływ warunków klimatycznych na nośność betonowych nawierzchni lotniskowych. *Drogi: lądowe, powietrzne, wodne*, **5**, 2009, 54-61
- [11] Wesółowski M., Blacha K., Iwanowski P., Pietruszewski P.: Rola i funkcja naturalnych nawierzchni lotniskowych w systemie zapewnienia bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych. *Przegląd Komunikacyjny*, **12**, 2018, 6-10
- [12] Wesółowski M., Kowalewska A.: The impact of a geogrid system on load-bearing capacity of natural airfield pavements. *Archives of Civil Engineering*, **66**, **2**, 2020, 45-61, DOI: 10.24425/ace.2020.131795
- [13] Wesółowski M., Włodarski P., Iwanowski P., Kowalewska A.: Analysis and assessment of the usefulness of recycled plastic materials for the production of airfield geocell. *Materials*, **14**, **13**, 2021, 3557, DOI: 10.3390/ma14133557
- [14] NO-17-A503:2017 Nawierzchnie lotniskowe. Naturalne nawierzchnie lotniskowe. *Badania nośności*
- [15] International Civil Aviation Organization: Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation. *Aerodromes. Volume 1: Aerodrome Design and Operations*, 7<sup>th</sup> ed., Montreal, 2016
- [16] International Civil Aviation Organization: Doc 9157 *Aerodrome Design Manual. Part 1 – Runways*
- [17] Wilun Z.: *Zarys geotechniki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2007
- [18] ASTM D1883-07 Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils
- [19] Webster S.L., Grau R.H., Williams T.P.: *Instruction Report GL-92-3, Description and Application of Dual Mass Dynamic Cone Penetrometer*. U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, 1992
- [20] ASTM D6951/D6951M-09(2015) Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications
- [21] PN-B-04452:2002 *Geotechnika. Badania polowe*
- [22] NO-17-A204:2015 *Lotniskowe nawierzchnie betonowe. Wymagania i metody badań nawierzchni z betonu cementowego*
- [23] PN-S-02205:1998 *Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania*
- [24] Chmielewski R., Bąk A.: The influence of Fine Fractions Content in Non-Cohesive Soils on Their Compactibility and the CBR Value. *Journal of Civil Engineering and Management*, **25**, **4**, 2019, 353-361, DOI: 10.3846/jcem.2019.9687

- [25] *Chmielewski R., Waliszewski D.*: Wpływ ciężaru warstw konstrukcyjnych nawierzchni na wartość wskaźnika nośności CBR. *Acta Scientiarum Polonorum Architectura*, **15**, 2, 2016, 45-54
- [26] *Chmielewski R., Waliszewski D.*: Zależność Kalifornijskiego Wskaźnika Nośności CBR od układu warstw konstrukcyjnych nawierzchni drogowych. *Materiały Budowlane*, **7**, 2017, 66-67, DOI: 10.15199/33.2017.07.21
- [27] *Marszałek J., Chmielewski R., Waliszewski D.*: The influence of CBR parameters of low-frost-susceptible soils on the process of airport pavement design. *Biuletyn WAT*; **67**, 3: 2018, 155-164, DOI: 10.5604/01.3001.0012.6611
- [28] PN-EN 13286-47:2007 Mieszanki związane i niezwiązane spoiwem hydraulicznym. Część 47: Metoda badania kalifornijskiego wskaźnika nośności, natychmiastowego wskaźnika nośności i pęcznienia liniowego
- [29] PN-B-04481:1988 Grunty budowlane. Badania próbek gruntów
- [30] *Chmielewski R., Kruszka L.*: Mechanika gruntów. Właściwości statyczne i dynamiczne. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2002
- [31] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Wrocław, 2014