

Mariusz WESOŁOWSKI, Paweł PIETRUSZEWSKI, Agata KOWALEWSKA
Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych)

CELLULAR GEOSYNTHETICS IN THE ASPECT OF APPLICATION IN AIRFIELD CONSTRUCTION

Geosyntetyki komórkowe pod kątem zastosowania w budownictwie lotniskowym

Abstract: *The natural airport pavement is formed by an adequate preparation of the ground. It should be adapted or constructed in such a way as to minimize the risk to aircraft in the event of an airplane running off the runway. Research indicates that a significant part of natural airport surfaces in Poland do not meet the requirements for load capacity and require reinforcement. The article presents methodology for reinforcing soils, describes the methods of testing the capacity of natural airport pavements and presents the results of research on the natural airport pavement, in reference to the construction with a cellular geosynthetic (geocell).*

Keywords: cellular geosynthetics, soil reinforcement, load capacity, natural airfield pavements

Streszczenie: *Naturalna nawierzchnia lotniskowa utworzona jest przez odpowiednie przygotowanie gruntu. Powinna być przystosowana lub zbudowana w taki sposób, aby zmniejszyć do minimum zagrożenie dla samolotów, w przypadku, gdy samolot zjechałby z drogi startowej. Badania wskazują, że znaczna część naturalnych nawierzchni lotniskowych w Polsce nie spełnia wymagań odnośnie do nośności i wymaga wzmocnienia. W artykule podano metody wzmocnienia gruntów, opisano metody badań nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych oraz przedstawiono wyniki badań naturalnej nawierzchni lotniskowej, w konstrukcji której zastosowano geosyntetyk komórkowy (geokratę).*

Słowa kluczowe: geosyntetyki komórkowe, wzmocnianie podłoża gruntowego, nośność, naturalne nawierzchnie lotniskowe

1. Introduction

An airfield pavement is a pavement intended for movement, parking and maintenance of aircraft. Airfield facilities contain functional elements with a rigid or natural pavement. Natural airfield pavement is formed through appropriate ground preparation. It is the basic pavement in lower-class airfield, while in the case of higher-class airfields, it is located within the runway shoulders and the runway end safety areas (RESA). A runway shoulder should be prepared in a manner, so that in the event of an aircraft running-off a runway, it is able to transfer the aircraft weight without damaging its structure and that it is able to transfer the weight of ground vehicles, which can move along the shoulders [2]. The runway end safety area is aimed at mitigating the risk of aircraft damage, which landed too early or crossed the runway end [13].

The load bearing capacity of airfield pavements is the main factor determining the ability to conduct flight operations. Studies show that a significant part of natural airfield pavements in Poland does not meet the requirements in terms of pavement load bearing capacity. The article describes methods for measuring the load bearing of natural airfield pavements and indicates the possibilities to reinforce the subsoil in the event of insufficient natural load capacity of an airfield pavement. The article discusses a subsoil reinforcement method using a cellular geosynthetic, presents a short characteristic of the studied cellular geosynthetics and the results of conducted tests.

2. Natural airfield pavements

Natural airfield pavements are dirt or sod pavements. Sod pavements are an improved dirt pavement type, because thanks to their properties, they decrease ground moisture, thus increasing their strength. Fig. 1 shows a relationship between the soil moisture and its strength for a dirt and grass (sod) pavement. Covering a sod pavement with soil with well-developed grassy vegetation and a well-developed root system, in contrast to a dirt pavement, results in increasing its strength. A sod pavement, thanks to proper management, as well as technical and agrotechnical treatments, exhibits increased load bearing capacity, relative to dirt airfield pavement, which enables the execution of flight operations. Sod airfield pavements are dominant in the area of sports airfields, with less air traffic, hence, exposure to lower loads [5].

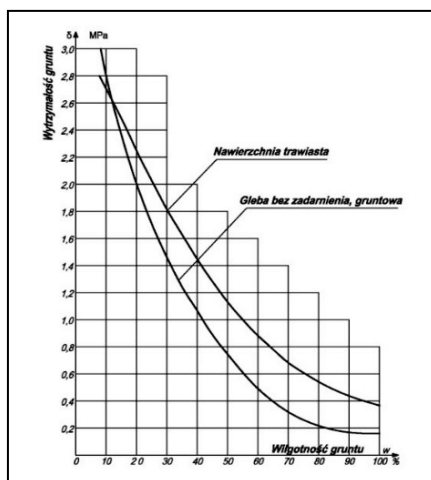


Fig. 1. Relationship between capacity σ of dirt and sod pavements, and moisture [5]

On higher-class airfield, sod pavements have a secondary, supporting role, associated with securing emergency take-offs and landings, periodic maintenance in training conditions and in the event of aircraft running-off of the artificial pavements [10].

The sod layer thickness is usually from 10 cm to 18 cm. It is believed that the load on the main strut of an aircraft should not exceed 100.00 kN on this pavement type [5, 10]. A sod pavement provides a possibility to multiply three to fivefold the wheel pressure, compared to a dirt pavement without sod [5].

3. Load bearing capacity of natural airfield pavements

The load bearing capacity of a natural airfield pavement is expressed by the California bearing ratio (CBR). This is the ability of a pavement to take over and transfer the load from aircraft, without a risk of damaging them. In other words, this is the resistance of the strongly developed root system and the soil particles contained within, to the loads from an aircraft, which is stationary or moving. Airfield pavement loads differ from the loads on roads. The main difference is the size of the area, which has to receive these loads. In the case of airfield pavements, the contact area is small. It should be noted that aircraft-related pavement static loads cause greater pavement deformations than short-term dynamic loads of the same value.

The load bearing capacity criteria of sod pavements should be associated with the type of the reference aircraft, to be operated on a given airfield [5].

The tests regarding the load bearing capacity of natural airfield pavements shall involve all airfield functional elements with a natural pavement. Distribution of individual airfield functional elements is shown in fig. 2.

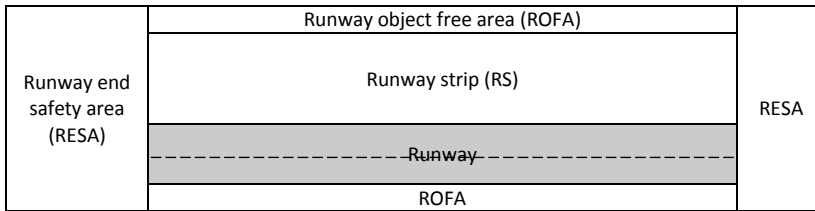


Fig. 2. Arrangement diagram of AFEs subject to load capacity evaluation [6]

Airfield pavement load bearing capacity tests are conducted at a depth of up to 0.85 m below ground level. They are conducted for three separated layers: the depth down to 0.15 m, from 0.15 m to 0.50 m and from 0.50 m to 0.85 m.

In order to determine the CBR of natural airfield pavements, the test should be conducted with a DCP probe, which shall be in accordance with the requirements of standard ASTM D6951M-01 [1]. These tests involve measuring the probe tip penetration per one impact of a weight falling from a specified height.

The California bearing ratio (CBR) is calculated separately for each separated layer, according to the formula [1, 6]:

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

where:

DCP – probe cone penetration per one impact, [mm].

The minimum CBR value for a tested AFE should be 15% for the first layer to a depth of 0.15 m and 8% for the second and third layers, from 0.15 m to 0.85 m below ground level [6].

4. Subsoil reinforcement methods

The selection of a terrain for a sod pavement airfield should take into account the requirements, which are applicable for artificial pavements [5], while the soil type and properties are additional requirements. According to the requirements set out in [8], a sod take-off pavement is constructed on a ground with such strength, so that the vertical deformation of a pavement during an aircraft wheel passage with the largest dimensions, weight and unit pressure on the tested pavement of approx. 0.6 MPa is no more than 2 cm. According to [8], a sod pavement for ground traffic, other than a take-off pavement, should be compacted, so that the aircraft traffic does not result in a rut deeper than 5 cm.

Subsoils are modified in order to increase the load bearing capacity, reduce settling, decrease water permeability, increase resistance to dynamic loads. The following technologies are used for ground reinforcement [9, 7]: replacing low-strength soils with

qualified aggregate banks; reinforcing the subsoil through improving its properties without admixtures of other materials in the form of aggregates or binders; reinforcing the subsoil using admixtures, e.g., the surface or internal stabilization method, or the forming of columns or pile-like elements; reinforcing the subsoil with geosynthetics; mixed methods involving the application of several reinforcing activities.

Subsoil reinforcement through admixtures covers a group of technologies widely applied in reinforcing heterogeneous low-strength subsoils. Surface improvement of the subsoil with hydraulic binders, usually cement or chemical agents, is also used. Geopolymers have been used for years in order to improve the load bearing capacity of the subsoil. There are examples of the application of polymer fibres to improve natural airfield pavements, fig. 3, 4. Geosynthetics, most commonly geogrids and geotextiles are currently used to reinforce a low-strength subsoil.



Fig. 3. Mixture of sand, native soil and polymer fibres [12]

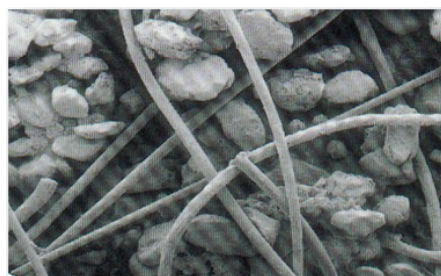


Fig. 4. Mixture of sand, native soil and polymer fibres – structure [12]

It is recommended for the selected soil reinforcement method to ensure settlement decline by more than 50% [9].

5. Cellular geosynthetics

Cellular geosynthetics are regular cellular structures (honeycomb structures) made of plastic, usually HDPE. Due to the improvement of the properties of materials enclosed and confined within the cells, the systems are used in various load-bearing construction, e.g. erosion protections of slopes and embankments, and pavements of roads and yards for heavy traffic. They were used for the first time by the US Army for quick reinforcement of sandy soil [11], with the method utilizing aluminium elements (fig. 5). The most known geogrids are of the GEOWEB system and are comprised of elastic polyethylene strips (HDPE). The strips forming sections are joined by welds, so that in a deployed position they remind a honeycomb [3] (fig. 6).

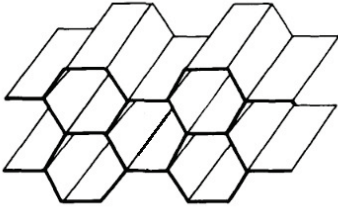


Fig. 5. Hexagonal structure [11]

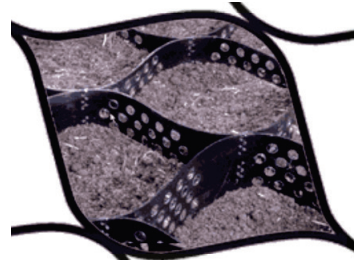


Fig. 6. GEOWEB cellular confinement system [3]

The selection of an appropriate geosynthetic should take into account the factors impacting its durability, resistance to external factors and its intended function [4]. A geosynthetic material will properly fulfil its task when the associated material requirements are defined properly. The materials used in order to reinforce a subsoil shall have defined parameters, such as: tensile strength, elongation under maximum load, CBR static puncture resistance, dynamic puncture, durability.

Various coefficients can be used to evaluate the correct selection of a geosynthetic, in terms of performing a particular function. When the task of a geosynthetic is to reinforce the subsoil, the following factors can be taken into account: the load capacity ratio (LCR, formula 2) or the bearing capacity ration (BCR, formula 3) [4].

$$LCR = \frac{q_r}{q} \quad (2)$$

$$BCR = \frac{q_{u(R)}}{q_u} \quad (3)$$

where:

- q_r - load to be applied to a pavement structure surface in order to induce a specific deformation of a geosynthetic-reinforced ground;
- q - load to be applied to a pavement structure surface in order to induce the same specific deformation of a ground not reinforced with a geosynthetic;
- $q_{u(R)}$ - load capacity of a subsoil reinforced with a geosynthetic;
- q_u - load capacity of a subsoil not reinforced with a geosynthetic.

6. Geogrid-reinforced grass (sod) pavement tests

A geogrid previously used for reinforcing parking pavements (fig. 7) was used on one of the flying club airfield in order to reinforce a grass pavement.

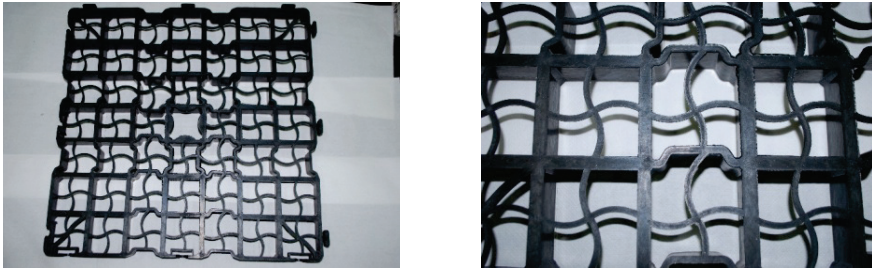


Fig. 7. Geogrid used to reinforce natural airfield pavements

A 49-mesh geogrid has the dimensions of 50x50 cm, wall height of 4 cm, and their thickness: 3-4 mm. The biologically active area of the a/m geogrid is 85%, hence, the material amounts to 15%. The tensile strength declared by the manufacturer is (66.7 ± 10) kN/m, and elongation under maximum load: $(11 \pm 5)\%$, whereas the permissible axle pressure: 200 kN. Durability at $\text{pH} > 4$ and at $\text{pH} < 9$ was determined at over 12 years.

The following structural arrangement was designed for the tested natural pavement of a flying club airfield runway:

- filling the geogrid with humus and sowing airfield grass,
- geogrid with PEHD 500x500x40 mm,
- sand bed for 2 cm geogrid arrangement,
- the upper crushed stone bedding layer of hard breakstone for mechanical stabilization 0/31.5 (melaphyre, gabbro, granite, etc.), 10 cm thick and compacted,
- the bottom crushed stone bedding layer of hard crushed magma rocks, e.g. melaphyre, gabbro, granite, 0/63 mm, 15 cm thick,
- 10cm thick sand bed,
- aligned and levelled subsoil,
- runway shoulder with a grass non-reinforced 2x7 m pavement,
- subsoil shoulder drop of 3%.

The tested area covered a natural non-reinforced pavement and a pavement with a complete reinforcement technology, together with a sodded geogrid.

The tests were conducted on a landing field runway. The subsoil of a non-reinforced natural pavement was surveyed to a depth of 2.0 m during the tests. The subsoil surveying involved also sounding with a DPL light-weight dynamic probe and sounding with a DCP dynamic probe. DPL sounding enabled to determine the compaction of non-cohesive layers, while DCP sounding was used to determine the CBR California bearing ratio of the studied subsoil.

The lithological profile of the subsoil is shown in table 1. Groundwater table was drilled at a depth of 1.30m bgl, and it stabilized at a depth of 1.0 m bgl after 1 hour. The pavement subsoil at a depth from 0.8 to 1.7 m bgl was classified in the G4 load bearing capacity group (largely swelling grounds).

Table 1

Lithological profile of the natural airfield pavement

Depth [m]	Soil type	Macroscopic description (colour, moisture)
0.0 - 0.3	Humus	black, little moist
0.3 - 0.8	Fine sand with stone admixture	grey-yellow, moist
0.8 - 1.3	Loamy sand	dark grey, wet
1.3 - 1.7	Loamy sand with sandy loam interbedding	dark grey, hydrated
1.7 - 2.0	Medium sand	dark grey, hydrated

The CBR California bearing ratio was tested on a non-reinforced natural airfield pavement. The results obtained during the measurement are shown on the CBR graph fig. 9. Results (average values) were around a level of: CBR (to 0.15 m) = 5.7% (required min. 15 %), CBR (from 0.15 to 0.85 m) = 5.7% (required min. 8 %), therefore the tested natural airfield pavement did not satisfy the load bearing capacity requirements.

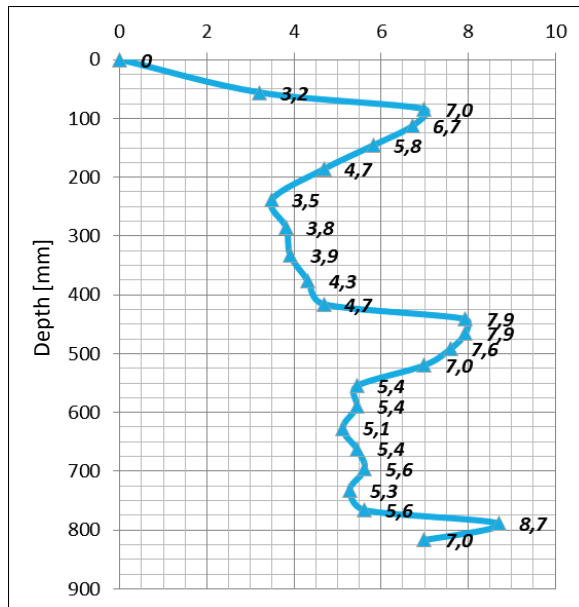


Fig. 9. CBR graph

A natural airfield pavement reinforced with a geogrid system was tested with the use of a static VSS plate (fig. 10) and with a HWD airfield deflectometer (fig. 11) in order to determine the load bearing capacity.

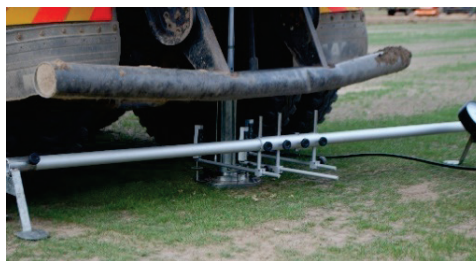


Fig. 10. VSS test



Fig. 11. HWD deflectometer test

The field tests covering the reinforced natural airfield pavement involved load bearing capacity tests using a static VSS plate in two points and tests with the use of a HWD airfield deflectometer near these points. The tests with the use of a VSS plate involves measuring ground settling under the plate, under constant loading, with the use of a counterweight and is used to determine deformation and strength features of the subsoil. This test characterizes subsoil zone properties to a depth of approximately 30-50 cm.

The results of load bearing capacity measurements obtained during VSS plate testing are shown in table 2.

Table 2

Load bearing capacity values of a reinforced natural pavement obtained through static VSS plate tests

Point no.	Primary deformation module E1 [MPa]	Secondary deformation module E2 [MPa]	Deformation index I0 [-]
1	47	83	1.8
2	43	80	1.9

Powell's formula was used to determine the modulus of elasticity for a non-reinforced natural airfield pavement, for which a California bearing ration (CBR) was determined [5]:

$$E = 17,6 \times CBR^{0,64} \tag{4}$$

where:

E - modulus of elasticity, [MPa];

CBR - California bearing ratio, [%].

The modulus of deformation value for a non-reinforced pavement calculated from formula 4 is 64 MPa, while the average value obtained from VSS measurements (table 2) is ca. 82 MPa. The load bearing capacity of a natural airfield pavement increased by about 20%, which was undoubtedly impacted not only by the use of a geogrid, but also a mechanically stabilized aggregate bedding layer (bottom bedding of 0/63 crushed stone and the upper bedding, comprised of 0/31.5 mm crushed stone).

The field tests, in locations of VSS measurements, involved conducting a load bearing capacity measurement of an already improved AFE fragment, using an airfield deflectometer of the HWD type (fig. 11). The obtained results were used as a base to estimate the moduli of deformation for the entire structure (table 4).

Table 3

Value of the moduli of deformation estimated based on elastic deflection measurements using a HWD

Point no.	Pavement type	E [MPa]
1	Natural reinforced	134
2		121

The results obtained during the measurements of pavement elastic deflections (HWD) are higher compared to the moduli of deformation obtained during VSS tests. This can arise from the fact that the VSS test determines a zone to ca. 0.5 m into the tested medium, whereas the tests with a HWD airfield deflectometer have a greater range.

7. Conclusions

The article discusses the concept of natural airfield pavements dominating in the field of sports airfields, but also present on the runway strip of airfield with a higher technical class. The most important feature of a pavement is its load bearing capacity, which is defined as the ability of a pavement to take over and transfer a specific aircraft load. The selection of a terrain for a natural pavement airfield involves all requirements and stipulations applicable to artificial pavements, and additionally in the case of sod pavements, the type of soil is a very important factor, sometimes determining the selection of a terrain. The use of subsoil reinforcement in the case of dirt and sod pavements in order to increase their load bearing capacities is directly associated with ensuring the safety of flight operations. The article describes natural pavement subsoil reinforcement with the use of geogrids, which are cellular geosynthetics.

The results of conducted preliminary tests confirm that it is possible to improve the load bearing capacity of natural pavements, which is the cumulative effect of using a geogrid, but also the application of bedding layers consisting of mechanically stabilized aggregate.

8. References

1. ASTM D6951/D6951M-09 Standard test method for use of the dynamic cone penetrometer in shallow pavement applications.
2. Doc 9157 AN/901 Aerodrome Design Manual Part 1 Runways. ICAO, 2006.
3. Komórkowy system ograniczający GEOWEB [GEOWEB cellular confinement system], <http://www.geoweb.pl>.
4. Łach K.: Przegląd i systematyka geosyntetyków [Review and systematics of geosynthetics]. Magazyn Autostrady, nr 3/2017, Katowice 2017.
5. Nita P.: Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych [Construction and maintenance of airfield pavements]. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.
6. NO-17-A503:2017 Nawierzchnie lotniskowe. Naturalne nawierzchnie lotniskowe. Badania nośności [NO-17-A503:2017 Airfield pavements. Natural airfield pavements Load bearing capacity tests].
7. Pisarczyk S.: Geoinżynieria. Metody modyfikacji podłoża gruntowego [Geoengineering. Subsoil modification methods], Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
8. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 07.06.2018 w sprawie wymagań technicznych i eksploatacyjnych dla lotnisk użytku wyłącznego oraz sposobu i trybu przeprowadzania kontroli sprawdzającej (Dz. U. z 2018 r. poz.1208) [Regulation of the Minister of Infrastructure of 7.06.2018 on the technical and operational requirements for private use airfields and the manner and procedure of inspections (Dz. U. 2018 item 1208)].
9. Szruba M.: Metody wzmocnienia podłoża gruntowego w budownictwie drogowym [Methods for reinforcing the subsoil in road construction]. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, Nr 4(79)/2018, Kraków 2018.
10. Vademecum służby lotniskowej, cz. I. Ministerstwo Obrony Narodowej, Dowództwo Wojsk Lotniczych [Airfield services handbook. I. Ministry of National Defence, Air Force Command], Poznań 1974.
11. Webster S.L.: Investigation of beach sand trafficability enhancement using sand-grid confinement and membrane reinforcement concepts. Report 1 Sand Test Sections 1 and 2. DTIC Document, 1979.
12. www.fibresand.com
13. Załącznik 14 ICAO do Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym, Lotniska, tom I, Projektowanie i eksploatacja lotnisk, wyd. 7, 2016. [Annex 14 ICAO to the Convention on International Civil Aviation, Airfields Volume I - Engineering and operation of airfields, seventh edition, 2016].

GEOSYNTETYKI KOMÓRKOWE POD KĄTEM ZASTOSOWANIA W BUDOWNICTWIE LOTNISKOWYM

1. Wstęp

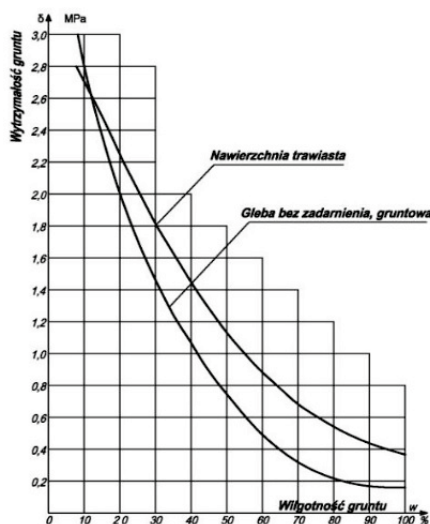
Nawierzchnia lotniskowa to nawierzchnia przeznaczona do ruchu, postoju i obsługi statków powietrznych. Na obiektach lotniskowych występują elementy funkcjonalne o nawierzchni sztywnej oraz naturalnej. Naturalna nawierzchnia lotniskowa utworzona jest przez odpowiednie przygotowanie gruntu. Na lotniskach o niższej klasie jest nawierzchnią podstawową, natomiast na lotniskach o klasach wyższych występuje m.in. w obrębie poboczy drogi startowej, a także w strefie bezpieczeństwa końca drogi startowej (RESA, CzPB). Pobocze drogi startowej powinno być tak przygotowane, aby w razie zjechania statku powietrznego z drogi startowej, mogło przenieść ciężar statku powietrznego bez doprowadzenia do uszkodzenia jego konstrukcji oraz aby mogło przenieść ciężar pojazdów naziemnych, mogących poruszać się po poboczach [2]. Strefa bezpieczeństwa końca drogi startowej ma na celu zmniejszenie ryzyka uszkodzenia samolotu, który przyziemił zbyt krótko lub przekroczył koniec drogi startowej [13].

Nośność naturalnych nawierzchni lotniskowych stanowi główny czynnik decydujący o możliwości wykonywania operacji lotniczych. Badania wykazują, że znaczna część naturalnych nawierzchni lotniskowych w Polsce nie spełnia wymagań dotyczących nośności nawierzchni naturalnych. W artykule opisano metody pomiarów nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych oraz wskazano możliwości wzmocnienia podłoża gruntowego w przypadku niedostatecznej nośności naturalnej nawierzchni lotniskowej. W artykule opisano metodę wzmocnienia podłoża gruntowego za pomocą geokraty, przedstawiono krótką charakterystykę badanych geosyntetyków komórkowych, a także wyniki przeprowadzonych badań.

2. Naturalne nawierzchnie lotniskowe

Naturalne nawierzchnie lotniskowe to nawierzchnie gruntowe oraz darniowe. Nawierzchnie darniowe są ulepszonym rodzajem nawierzchni gruntowych, ponieważ dzięki swoim właściwościom zmniejszają zawilgocenie gruntu przez co zwiększają ich wytrzymałość. Na rys. 1 przedstawiono zależność pomiędzy wilgotnością gruntu a jego

wytrzymałością dla nawierzchni gruntowej oraz trawiastej (darniowej). Na wzrost wytrzymałości nawierzchni darniowej, w odróżnieniu do gruntowej, wpływa jej pokrycie glebą o rozwiniętej roślinności trawiastej z silnie rozwiniętym systemem korzeniowym. Nawierzchnia darniowa dzięki odpowiedniemu zagospodarowaniu, poddawaniu zabiegom technicznym i agrotechnicznym posiada zwiększoną nośność, w porównaniu do gruntowych nawierzchni lotniskowych, pozwalającą na wykonywanie operacji lotniczych. Lotniskowe nawierzchnie darniowe dominują na lotniskach sportowych, na których odbywa się mniejszy ruch lotniczy i jednocześnie są narażone na mniejsze obciążenia [5].



Rys. 1. Zależność pomiędzy wytrzymałością σ nawierzchni gruntowej, darniowej a wilgotnością [5]

Na lotniskach wyższych klas nawierzchnie darniowe spełniają rolę pomocniczą związaną z zabezpieczeniem awaryjnych startów i lądowań, okresowej eksploatacji w warunkach ćwiczebnych oraz w przypadku wykołowań statków powietrznych z nawierzchni sztucznych [10].

Grubość warstwy darniowej zazwyczaj wynosi od 10 cm do 18 cm. Uważa się, że obciążenie na goleń główną samolotu nie powinno dla tej nawierzchni przekraczać 100,00 kN [5, 10]. Nawierzchnia darniowa daje możliwość zwielokrotnienia około 3-5 razy nacisków kół w porównaniu z nawierzchnią gruntową bez darni [5].

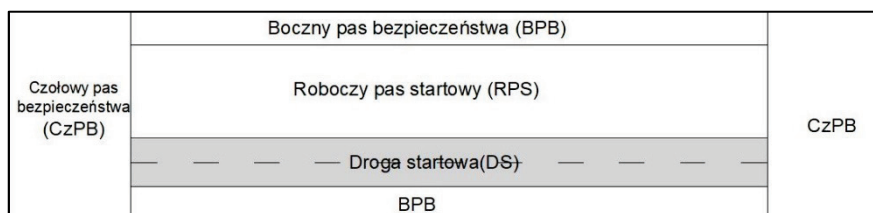
3. Nośność naturalnych nawierzchni lotniskowych

Nośność naturalnej nawierzchni lotniskowej wyrażana jest kalifornijskim wskaźnikiem nośności CBR. Jest to zdolność nawierzchni do przejścia i przenoszenia

określonego obciążenia od statków powietrznych, bez ryzyka jego uszkodzenia. Inaczej, jest to opór, jaki stawia silnie rozbudowany system korzeniowy oraz zawarte w nim cząstki gruntu obciążeniom, pochodzącym od ciężaru samolotu będącego w stanie spoczynku bądź ruchu. Obciążenia nawierzchni lotniskowych różnią się od obciążeń występujących na drogach. Główna różnica polega na wielkości powierzchni, która te obciążenia musi przyjąć. W przypadku nawierzchni lotniskowych powierzchnia kontaktowa jest niewielka. Należy zaznaczyć, iż obciążenia statyczne nawierzchni pochodzące od samolotów powodują większe odkształcenia nawierzchni niż krótkotrwałe obciążenia dynamiczne o tej samej wartości.

Kryteria nośności nawierzchni darniowych należy wiązać z rodzajem samolotu obliczeniowego, który będzie eksploatowany na danym lotnisku [5].

Badania nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych należy wykonywać na wszystkich elementach funkcjonalnych lotniska, które posiadają nawierzchnię naturalną. Schemat rozmieszczenia poszczególnych elementów funkcjonalnych lotniska przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia EFL podlegających ocenie nośności [6]

Badania nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych wykonuje się do głębokości 0,85 m poniżej powierzchni terenu. Wykonuje się je dla trzech wydzielonych warstw: do głębokości 0,15 m, od głębokości 0,15 m do 0,50 m oraz od głębokości 0,50 m do 0,85 m.

W celu określenia wskaźnika CBR naturalnych nawierzchni lotniskowych należy wykonać badania sondą DCP, która powinna być zgodna z wymaganiami normy ASTM D6951M-09 [1]. Badania te, polegają na pomiarze zagłębienia końcówki sondy na jedno uderzenie obciążnika spadającego z określonej wysokości.

Kalifornijski wskaźnik nośności CBR oblicza się oddzielnie dla każdej wydzielonej warstwy, zgodnie ze wzorem [1, 6]:

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

gdzie:

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

Minimalna wartość CBR dla badanego EFL powinna wynosić 15% dla pierwszej warstwy do głębokości 0,15 m oraz 8% dla warstwy powstałej z połączenia warstwy drugiej i trzeciej, czyli od głębokości 0,15 m do głębokości 0,85 m poniżej powierzchni terenu [6].

4. Metody wzmocnienia podłoża gruntowego

Przy wyborze terenu dla lotniska o nawierzchni darniowej należy kierować się takimi wymaganiami, które obowiązują dla nawierzchni sztucznych [5], przy czym dodatkowymi wymaganiami są rodzaj i właściwości gleby. Według wymagań zawartych w [8] nawierzchnię darniową pola wlotów zakłada się na gruncie o takiej wytrzymałości, aby odkształcenie pionowe nawierzchni podczas przejazdu koła statku powietrznego o największych wymiarach, największym ciężarze oraz ciśnieniu jednostkowym na badaną powierzchnię około 0,6 MPa wynosiło nie więcej niż 2 cm. Zgodnie z [8] nawierzchnia darniowa pola ruchu naziemnego, inna niż nawierzchnia pola wlotów, powinna być tak zagęszczona, aby w czasie ruchów statków powietrznych powstała koleina nie była głębsza niż 5 cm.

Podłoże gruntowe modyfikuje się w celu zwiększenia nośności, redukcji osiadań, zmniejszenia wodoprzepuszczalności, zwiększenia odporności na obciążenia dynamiczne. Do wzmocnienia gruntu stosowane są następujące technologie [7, 9]: wymiana gruntów słabonośnych na nasyp z kwalifikowanego kruszywa; wzmocnienie podłoża przez poprawienie jego właściwości bez stosowania domieszek innych materiałów w postaci kruszyw czy spoiw; wzmocnienie podłoża przy zastosowaniu domieszek, np. metodą powierzchniową lub wgłębnej stabilizacji czy też formowania kolumn bądź elementów palopodobnych; wzmocnienie podłoża przy użyciu geosyntytyków; metody mieszane, polegające na stosowaniu kilku różnych zabiegów wzmocniających.

Wzmocnienie podłoża przy zastosowaniu domieszek obejmuje grupę technologii szeroko stosowanych przy wzmocnianiu niejednorodnych podłoży słabonośnych. Stosowane jest także powierzchniowe ulepszanie podłoża gruntowego spoiwami hydraulicznymi, zwykle cementem lub środkami chemicznymi. Do poprawy nośności podłoża gruntowego od lat z powodzeniem znajdują zastosowanie geopolimery. Istnieją przykłady stosowania włókien polimerowych do ulepszania naturalnych nawierzchni lotniskowych, rys. 3 i rys. 4. Obecnie do wzmocnienia słabonośnego podłoża gruntowego stosowane są geosyntytyki, najpowszechniej geosiatki i geotkaniny.



Rys. 3. Mieszanka piasku, gleby rodzimej oraz włókien polimerowych [12]

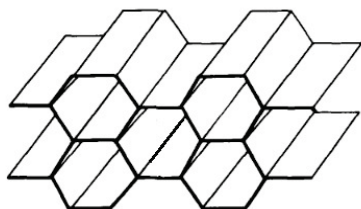


Rys. 4. Mieszanka piasku, gleby rodzimej oraz włókien polimerowych – struktura [12]

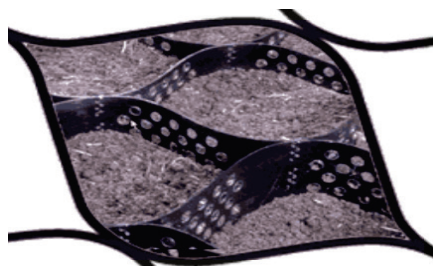
Zaleca się, aby wybrana metoda wzmocnienia gruntu zapewniła zmniejszenie osiadania o więcej niż 50% [9].

5. Geosyntetyki komórkowe

Geosyntetyki komórkowe są to regularne struktury komórkowe (struktury plastra miodu), wykonane z tworzywa sztucznego, zazwyczaj z HDPE. Ze względu na ulepszenie właściwości materiałów zamkniętych i ograniczonych wewnątrz komórek, systemy są stosowane w różnorodnych konstrukcjach do przenoszenia obciążeń np. w ochronie skarp i zboczy przed erozją, w nawierzchniach dróg oraz placów przeznaczonych dla ruchu ciężkiego. Po raz pierwszy zostały użyte przez armię amerykańską do szybkiego wzmocnienia gruntu piaszczystego [11], gdzie zastosowano elementy aluminiowe (rys. 5). Najbardziej znane są geokraty systemu GEOWEB, składające się z elastycznych taśm polietylenowych (HDPE). Taśmy tworzące sekcje są połączone zgrzewami w taki sposób, że w pozycji rozłożonej zbliżone są do plastra miodu [3] (rys. 6).



Rys. 5. Struktura sześciokątna [11]



Rys. 6. Komórkowy system ograniczający GEOWEB [3]

W doborze odpowiedniego rodzaju geosyntetyku należy brać pod uwagę czynniki wynikające z jego trwałości, odporności na czynniki zewnętrzne oraz funkcję, jaką ma pełnić [4]. Geosyntetyk będzie prawidłowo spełniał swoje zadanie, gdy zostaną dla niego właściwie określone wymagania materiałowe. Materiały użytkowane w celu wzmocnienia podłoża gruntowego powinny mieć zdefiniowane takie parametry jak: wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie przy maksymalnym obciążeniu, odporność na przebicie statyczne CBR, przebicie dynamiczne, trwałość.

Do oceny prawidłowości doboru geosyntetyku oraz do pełnienia określonej funkcji można posługiwać się różnymi współczynnikami. Gdy geosyntetyk ma za zadanie wzmacniać podłoże gruntowe można wziąć pod uwagę np. współczynnik wzmocnienia LCR (Load Capacity Ratio, wzór 2) lub współczynnik nośności BCR (Bearing Capacity Ratio, wzór 3) [4].

$$LCR = \frac{q_r}{q} \quad (2)$$

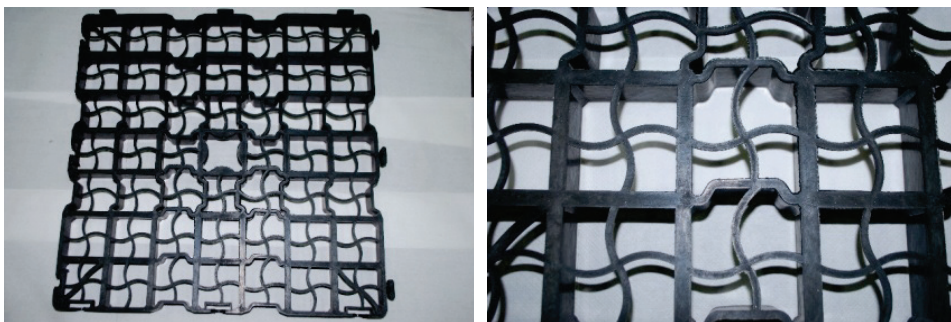
$$BCR = \frac{q_{u(R)}}{q_u} \quad (3)$$

gdzie:

- q_r - obciążenie, które należy przyłożyć do powierzchni konstrukcji nawierzchni, by wywołać określoną wielkość odkształcenia podłoża wzmocnionego geosyntytykiem;
- q - obciążenie, które należy przyłożyć do powierzchni konstrukcji nawierzchni, by wywołać tę samą wielkość odkształcenia podłoża niewzmocnionego geosyntytykiem;
- $q_{u(R)}$ - nośność podłoża wzmocnionego geosyntytykiem;
- q_u - nośność podłoża niewzmocnionego geosyntytykiem.

6. Badania nawierzchni trawiastej (darniowej) wzmocnionej geokrata

Geokrata, stosowaną dotychczas do wzmocniania nawierzchni parkingowych (rys. 7) wykorzystano na jednym z lotnisk aeroklubowych w celu wzmocnienia nawierzchni trawiastej.



Rys. 7. Wygląd geokraty użytej do wzmocnienia naturalnych nawierzchni lotniskowych

Geokrata o 49 oczkach ma wymiary 50x50 cm, wysokość ścianek wynosi 4 cm, a ich grubość: 3–4 mm. Powierzchnia biologicznie czynna ww. geokraty wynosi 85% a tym samym tworzywo stanowi 15%. Deklarowana przez producenta wytrzymałość na rozciąganie wynosi $(66,7 \pm 10)$ kN/m, wydłużenie przy maksymalnym obciążeniu $(11 \pm 5)\%$, natomiast dopuszczalny nacisk na oś 200 kN. Trwałość w warunkach $pH > 4$ oraz $pH < 9$ przewidziano na co najmniej 12 lat.

Dla badanej naturalnej nawierzchni drogi startowej lotniska aeroklubowego zaprojektowano następujący układ konstrukcyjny:

- wypełnienie geokraty humusem z obsianiem trawą lotniskową,
- geokrata z PEHD 500x500x40 mm,
- podsypka z piasku pod ułożenie geokraty 2 cm,

- górna warstwa podbudowy tłuczniowej z tłucznia twardego do stabilizacji mechanicznej 0/31,5 (melafir, gabro, granit itp.), grubości 10 cm z zagęszczeniem,
- dolna warstwa podbudowy tłuczniowej z tłucznia twardego ze skał magmowych np. melafir, gabro, granit, 0/63 mm, grubość warstwy 15 cm,
- podsypka piaskowa o grubości 10 cm,
- wyprofilowane i wyrównane podłoże,
- pobocze drogi startowej o nawierzchni trawiastej nieumocnionej 2x7 m,
- spadek pobocza gruntowego 3%.

Teren objęty badaniami obejmował nawierzchnię naturalną bez wzmocnienia oraz nawierzchnię z kompletną technologią wzmocnienia, łącznie z zadarnioną geokratą.

Badania przeprowadzono na drodze startowej lądowiska. Podczas badań rozpoznano podłoże gruntowe do głębokości 2,0 m dla nawierzchni naturalnej bez wzmocnienia. W ramach rozpoznania podłoża gruntowego wykonano także sondowanie lekką sondą dynamiczną DPL oraz sondowanie sondą dynamiczną stożkową DCP. Sondowanie sondą DPL pozwoliło na określenie zagęszczenia warstw niespoistych, natomiast dzięki sondowaniu sondą DCP określono kalifornijski wskaźnik nośności CBR badanego podłoża.

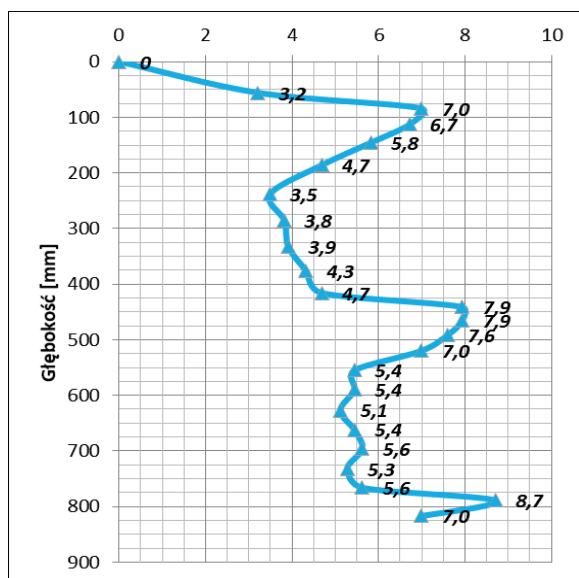
Profil litologiczny podłoża przedstawiono w tabeli 1. Zwierciadło wody gruntowej nawiercono na głębokości 1,30 m p.p.t., po 1 godzinie ustabilizowało się na głębokości 1,0 m p.p.t. Podłoże gruntowe nawierzchni na głębokości od 0,8 do 1,7 m p.p.t. zakwalifikowano do grupy nośności G4 (grunty bardzo wysadzinowe).

Tabela 1

Profil litologiczny naturalnej nawierzchni lotniskowej

Głębokość [m]	Rodzaj gruntu	Opis makroskopowy (kolor, wilgotność)
0,0 - 0,3	Humus	czarny, mało wilgotny
0,3 - 0,8	Piasek drobny z domieszką kamieni	szarozółty, wilgotny
0,8 - 1,3	Piasek gliniasty	ciemnoszary mokry
1,3 - 1,7	Piasek gliniasty przewarstwiony gliną piaszczystą	ciemnoszary, nawodniony
1,7 - 2,0	Piasek średni	ciemnoszary, nawodniony

Badanie kalifornijskiego wskaźnika nośności CBR przeprowadzono na naturalnej nawierzchni lotniskowej bez wzmocnienia. Otrzymane podczas pomiarów wyniki przedstawiono na wykresie wskaźnika nośności CBR (rys. 9). Wyniki (wartości średnie) ukształtowały się na poziomie: CBR (do 0,15 m) = 5,7% (wymagane min. 15 %), CBR (od 0,15 do 0,85 m) = 5,7% (wymagane min. 8 %), zatem badana naturalna nawierzchnia lotniskowa nie spełniła wymagań nośności.



Rys. 9. Wykres wskaźnika nośności CBR

Na naturalnej nawierzchni lotniskowej wzmocnionej systemem geokrat wykonano badanie nośności przy pomocy płyty statycznej VSS (rys. 10) oraz badania nośności przy użyciu ugięciomierza lotniskowego HWD (rys. 11).



Rys. 10. Badanie VSS



Rys. 11. Badanie ugięciomierzem HWD

Na wzmocnionej naturalnej nawierzchni lotniskowej, w ramach badań polowych, wykonano badania nośności za pomocą płyty statycznej VSS w dwóch punktach oraz badania za pomocą ugięciomierza lotniskowego HWD w pobliżu tych punktów. Badanie przy pomocy płyty VSS polega na pomiarze osiadania gruntu pod płytą, przy jego stopniowym obciążaniu, przy pomocy przeciwwagi i służy do określenia cech odkształceniowych i wytrzymałościowych podłoża. Badanie to charakteryzuje właściwości strefy podłoża do głębokości około 30-50 cm.

Wyniki pomiarów nośności nawierzchni otrzymane podczas badań płytą VSS przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Wyniki nośności wzmocnionej nawierzchni naturalnej otrzymane podczas badania płytą statyczną VSS

Nr punktu	Pierwotny moduł odkształcenia E_1 [MPa]	Wtórny moduł odkształcenia E_2 [MPa]	Wskaźnik odkształcenia I_0 [-]
1	47	83	1,8
2	43	80	1,9

Aby określić moduł odkształcenia dla niewzmocnionej naturalnej nawierzchni lotniskowej, dla której wyznaczono kalifornijski wskaźnik nośności CBR, posłużono się wzorem Powella [5]:

$$E = 17,6 \times CBR^{0,64} \quad (4)$$

gdzie:

E - moduł sprężystości, [MPa];

CBR - kalifornijski wskaźnik nośności, [%].

Obliczona ze wzoru (4) wartość modułu odkształcenia dla nawierzchni niewzmocnionej wynosi 64 MPa, natomiast uzyskana wartość średnia z pomiarów z wykorzystaniem płyty VSS (tabela 2) wynosi ok. 82 MPa. Nośność wzmocnionej naturalnej nawierzchni lotniskowej wzrosła o około 20%, na co wpływ miało z pewnością nie tylko zastosowanie geokraty, ale również warstwy podbudowy z kruszywa stabilizowanego mechanicznie (podbudowa dolna z tłuczni o uziarnieniu 0/63 oraz podbudowa górna z tłuczni o uziarnieniu 0/31,5 mm).

W trakcie badań poligonowych, w miejscach przeprowadzenia pomiarów płytą VSS, wykonano również pomiar nośności już ulepszanego odcinka EFL za pomocą ugięciomierza lotniskowego typu HWD (rys. 11). Na podstawie uzyskanych wyników oszacowano moduły odkształcenia dla całej konstrukcji (tabela 4).

Tabela 3

Wartości modułów odkształcenia oszacowanych na podstawie badań ugięć sprężystych ugięciomierzem lotniskowym HWD

Nr punktu	Rodzaj nawierzchni	E [MPa]
1	Naturalna wzmocniona	134
2		121

Wyniki uzyskane podczas pomiarów ugięć sprężystych nawierzchni (HWD) są większe w porównaniu do modułów odkształcenia uzyskanych podczas badań płytą VSS. Może to wynikać z faktu, że badanie płytą VSS charakteryzuje strefę do około 0,5 m w głąb badanego ośrodka, natomiast badanie ugięciomierzem lotniskowym HWD ma większy zasięg.

7. Podsumowanie

W artykule omówiono pojęcie naturalnych nawierzchni lotniskowych, dominujące na lotniskach sportowych, ale również występujące w pasie drogi startowej na lotniskach o wyższych klasach technicznych. Najważniejszą cechą nawierzchni jest jej nośność, która jest charakteryzowana, jako zdolność nawierzchni do przejęcia i przeniesienia określonego obciążenia od statku powietrznego. Przy wyborze terenu na lotnisko o nawierzchni naturalnej brane są pod uwagę wszystkie wymagania i ustalenia, jakie obowiązują dla nawierzchni sztucznych, ponadto w przypadku nawierzchni darniowych bardzo ważnym czynnikiem, nieraz decydującym o wyborze terenu jest rodzaj występującej gleby. Stosowanie wzmocnienia podłoża nawierzchni darniowych i gruntowych w celu uzyskania zwiększenia ich nośności wiąże się bezpośrednio z zapewnieniem bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych. W artykule opisano wzmocnienie podłoża naturalnych nawierzchni za pomocą geosyntetyków komórkowych, jakimi są geokraty.

Wyniki przeprowadzonych badań wstępnych potwierdzają, że istnieje możliwość poprawy nośności nawierzchni naturalnych, co stanowi sumaryczny efekt wynikający z zastosowania geokraty, ale również z ułożenia warstw podbudowy z kruszywa stabilizowanego mechanicznie.

8. Literatura

1. ASTM D6951/D6951M-09 Standard test method for use of the dynamic cone penetrometer in shallow pavement applications.
2. Doc 9157 AN/901 Aerodrome Design Manual Part 1 Runways. ICAO, 2006.
3. Komórkowy system ograniczający GEOWEB, <http://www.geoweb.pl>.
4. Łach K.: Przegląd i systematyka geosyntetyków. Magazyn Autostrady, nr 3/2017, Katowice 2017.
5. Nita P.: Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.
6. NO-17-A503:2017 Nawierzchnie lotniskowe. Naturalne nawierzchnie lotniskowe. Badania nośności. Ministerstwo Obrony Narodowej, 2017.
7. Pisarczyk S.: Geoinżynieria. Metody modyfikacji podłoża gruntowego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.

8. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 07.06.2018 w sprawie wymagań technicznych i eksploatacyjnych dla lotnisk użytku wyłącznego oraz sposobu i trybu przeprowadzania kontroli sprawdzającej. Dz. U. z 2018 r. poz.1208.
9. Szruba M.: Metody wzmocnienia podłoża gruntowego w budownictwie drogowym, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, Nr 4(79)/2018, Kraków 2018.
10. Vademecum służby lotniskowej, cz. I. Ministerstwo Obrony Narodowej, Dowództwo Wojsk Lotniczych, Poznań 1974.
11. Webster S.L.: Investigation of beach sand traficability enhancement using sand-grid confinement and membrane reinforcement concepts. Report 1 Sand Test Sections 1 and 2. DTIC Document, 1979.
12. www.fibresand.com
13. Załącznik 14 ICAO do Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym, Lotniska, tom I, Projektowanie i eksploatacja lotnisk, wyd. 7, 2016.