

# Metody wglębnej modyfikacji gruntu słabonośnego do posadowienia nowych i zapasowych lotniczych dróg startowych

## Methods of deep modification of low-bearing soil for the foundation of new and spare air runways



**Eligiusz Mieloszyk**

Prof. Dr hab. inż.

Politechnika Gdańska, Wydział  
Inżynierii Lądowej i Środowiska

[eligiusz.mieloszyk@pg.edu.pl](mailto:eligiusz.mieloszyk@pg.edu.pl)



**Anita Milewska**

Dr, prof. uczelni

Politechnika Gdańska, Wydział  
Inżynierii Lądowej i Środowiska

[anita.milewska@pg.edu.pl](mailto:anita.milewska@pg.edu.pl)



**Mariusz Wyroślak**

Dr inż.

Politechnika Gdańska, Wydział  
Inżynierii Lądowej i Środowiska

[mariusz.wyroslak@pg.edu.pl](mailto:mariusz.wyroslak@pg.edu.pl)

**Streszczenie:** Po analizie oddziaływań statków powietrznych na nawierzchnię lotniska (miejsca postojowe, pasy startowe, drogi startowe) uznano za celowe rozważenie problemu wglębnego ulepszenia lub wzmocnienia podłoża gruntowego. Dotyczy to szczególnie gruntu słabonośnego. Przedstawiono szybką i skuteczną metodę wzmocnienia podłoża gruntowego przeznaczonego do budowy obiektów inżynierskich wykorzystywanych do wykonywania cywilnych lub wojskowych operacji lotniczych. Pozwala ona wykorzystywać do wspomnianych celów nieużytki, tereny podmokłe, bagna itp. tworząc w ten sposób rozproszoną sieć lądowisk zwiększając bezpieczeństwo kraju oraz zdynamizować dostępność do transportu lotniczego dużych grup społecznych.

**Słowa kluczowe:** Drogi startowe; Obciążenie drogi startowej; Wzmocnianie podłoża; Środki strzałowe

**Abstract:** After analyzing the impact of aircraft on the airport pavement (parking spaces, runways, startways), it was considered advisable to consider the problem of deep improvement or strengthening of its subsoil. This is especially true for low-bearing soil. The paper presents a quick and effective method of strengthening the subsoil intended for the construction of engineering structures used for civil or military air operations. It allows the use of wastelands, wetlands, swamps, etc. for the above-mentioned purposes, thus creating a dispersed network of landing sites increasing the security of the country and increasing the availability of air transport for large society groups.

**Keywords:** Runways; Runways load; Ground reinforcement; Blasting agents

### Wstęp

Z lotniskami cywilnymi i wojskowymi (małymi i dużymi) powiązana jest ich specyficzna infrastruktura. Powoduje to, że należy przygotować podłoże gruntowe do nowych wymagań geotechnicznych. Dotyczy to szczególnie lokalizacji budowli (drogi startowe, hangary, drogi dojazdowe) w miejscach, które są „trudne” pod względem geologiczno – inżynierskim. Wymusza to poszukiwanie nowych technologii i metod [17], a także zmiany sposobu myślenia wśród inżynierów, inwestorów, czy dowódców. Wszyscy oni muszą sprostać interdyscyplinarnemu wyzwaniu, którym jest w tym przypadku wzmocnienie słabonośnego podłoża gruntowego. Dodatkową trudnością

przy rozwiązywaniu tego problemu często jest konieczność skrócenia czasu realizacji (np. szczególnie w warunkach bojowych), koszty realizacji inwestycji itp.

Przedstawione w artykule analizy skupiają się głównie na tzw. małych lotniskach ich drogach startowych posadowionych na właściwie przygotowanym (ewentualnie ulepszonym lub wzmocnionym) słabonośnym podłożu gruntowym. Podłoże właściwie przygotowane decyduje o niezawodności całej konstrukcji, a dalej decyduje o bezpieczeństwie startów statków powietrznych i ich lądowań.

Jednak wszystkie rozważania tu przeprowadzone odnoszą się doskonale także do pasów startowych dużych lotnisk cywilnych, czy wojsko-

wych, a także ich infrastruktury.

Używane tu określenia: małe lotniska, drogi startowe itp. mają podkreślić, że nie muszą one w pełni spełniać wszystkich warunków dotyczących dużych lotnisk komunikacyjnych. Odnosi się to np. do pasów startowych, których parametry, jak długość, szerokość, stopień oświetlenia, oznakowanie itp., odbiegają od standardów portów lotniczych. Ma to istotne znaczenie szczególnie w warunkach bojowych, gdy trudno te wszystkie warunki spełnić.

Niewłaściwie zaprojektowane, przygotowane i wykonane podłoże gruntowe dla drogi startowej jest przyczyną niepożądanego zachowania się w trakcie eksploatacji nawierzchni drogi startowej. W skrajnym przypadku może doprowadzić

do uszkodzenia nawierzchni drogi startowej łącznie z utratą stateczności podłoża gruntowego. Może doprowadzić do uszkodzenia statku powietrznego i ewentualnie katastrofy lotniczej, w której są poszkodowani pasażerowie lub członkowie załogi.

Podstawą jest podłoże gruntowe i jego odwodnienie, bowiem one decydują o niezawodności oraz trwałości (w sensie probabilistycznym) całej konstrukcji.

Z różnych względów warto celowo lokalizować małe lotniska (drogi startowe) na gruntach słabonośnych (podmokłych, torfowych) – trudno dostępnych dla ciężkiego sprzętu wojskowego (czołgi, wozy pancerne) lub ze względu na inne wymogi (np. ograniczenia terenowe, lokalizacyjne, potrzeby lokalne). Np. w przypadku pożaru w kwietniu 2020 r. w Biebrzańskim Parku Narodowym spłonęło ponad pięć tysięcy trzysta hektarów parku. W trakcie gaszenia pożaru z wykorzystaniem sprzętu lotniczego pojawiły się duże problemy z brakiem lądowisk w tej trudnej gruntowo okolicy. Zmniejszyło to zdecydowanie efektywność powietrznej akcji gaśniczej.

W warunkach kryzysowych lub bojowych podstawowym czynnikiem decydującym o powodzeniu jest czas oraz lokalizacja przedsięwzięcia. Lokalizacje nie powinny ograniczać warunki dotyczące podłoża gruntowego. Czasochłonność procesu wzmacniania podłoża gruntowego jest bardzo ważna.

Należy też pamiętać, że części (fragmenty) lotniska to elementy, które mogą być zniszczone w wyniku wystąpienia niespodziewanych sytuacji losowych (awaria, katastrofa, klęska żywiołowa), jak również celowo w wyniku działań militarnych. Stanowią one główny i dogodny cel ze względu na duże rozmiary i ograniczone możliwości skutecznego maskowania oraz duże znaczenie operacyjne. Ich odbudowa w tych różnych sytuacjach kryzysowych powinna umożliwić odtworzenie gotowości eksploatacyjnej zniszczonych

elementów funkcjonalnych lotniska w możliwie najkrótszym czasie. Tu z pomocą przychodzi metoda środków strzałowych zwana też metodą mikrowybuchów – szybka, skuteczna, innowacyjna i tania.

Metoda ta pozwala także szybko tworzyć i odtwarzać lotniska dodatkowe i zapasowe. Ich tworzenie może być szybkie. Np. wojska saperские obyte z materiałami wybuchowymi we współpracy z wojskami inżynieryjnymi dysponującymi wiedzą z zakresu inżynierii lądowej mogą skutecznie te zadania wykonać z wykorzystaniem metody środków strzałowych.

Na dobrze przygowowane, ulepszone lub wzmocnione podłoże gruntowe można układać każdą nawierzchnię lotniskową (tradycyjną – asfaltową, betonową – np. płyty betonowe, trawiastą wzmocnioną – np. z wykorzystaniem specjalnych mat [2]).

Wspomniane obiekty cywilne lub wojskowe mogą być zlokalizowane także na gruntach uznawanych za trudne z punktu widzenia ich przydatności dla szeroko rozumianej działalności transportowej i komunikacyjnej. Do takich zaliczamy tereny bagienne, grunty organiczne, grunty nasypowe, odpady przemysłowe, wysypiska śmieci. Wybór miejsc lokalizacji może też być wskazany, jako korzystny, ze względów taktycznych. Np. lokalizacja lądowisk na gruncie nadmorskim może być z powodzeniem wykorzystana do poprawy bezpieczeństwa żeglugi na morzu.

Z taktycznego punktu widzenia dobrym rozwiązaniem jest też tworzenie rozproszonej sieci lotnisk na terenach trudno dostępnych. W takiej sytuacji, przy walce z czasem, pomocne są metody wzmacniania podłoża gruntowego. Jednak z punktu widzenia ograniczonego czasu potrzebnego do przygotowania podłoża gruntowego pod projektowane obiekty lotniskowe należy uwzględnić ważną i skuteczną z tego punktu widzenia metodę wykorzystującą materiały wybuchowe do

wzmocnienia podłoża gruntowego pod wspomniane obiekty lotniska i drogi dojazdowe, w tym drogi kolejowe lub bocznicę kolejowe.

## Siły działające na statek powietrzny w czasie startu, lotu i lądowania

Oddziaływania staku powietrznego np. na drogi startowe są złożone ze względu na duże obciążenia oraz oddziaływania dynamiczne.

Start statku powietrznego składa się z fazy rozbiegu, która kończy się w chwili uzyskania prędkości pozwalającej na oderwanie się od nawierzchni [5]. Procedura startu jest zakończona przy osiągnięciu wysokości 10,7 m lub 15 m.

Maksymalne obciążenie statyczne działające na nawierzchnię lotniskową i podłoże gruntowe występuje na początku fazy rozbiegu, czyli na początku startu. W czasie startu wraz ze wzrostem prędkości wzrasta siła nośna statku powietrznego  $P_n$  przez co zmniejsza się obciążenie nawierzchni i podłoża gruntowego. Układ sił działających na statek powietrzny w czasie startu przedstawiono na rysunku 1.

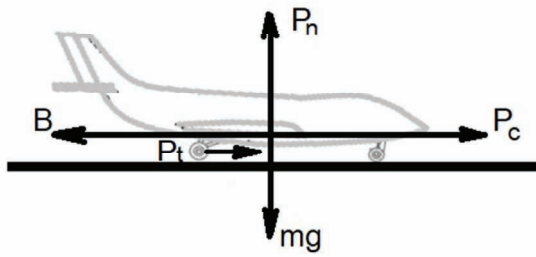
Na rysunku 1 przyjęto następujące oznaczenia:

- $P_c$  - siła ciągu statku powietrznego,
- $P_n$  - siła nośna statku powietrznego,
- $B$  - siła bezwładności,
- $P_t$  - siła oporu toczenia koła,
- $m$  - masa startowa statku powietrznego.

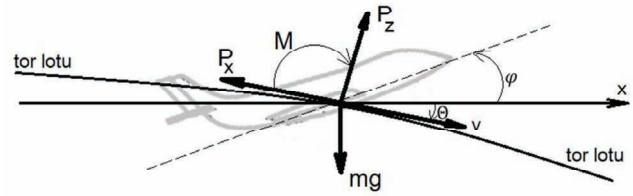
Po starcie następuje etap lotu zasadniczego, którego przebieg szczególnie w końcowej fazie ma wpływ na lądowanie.

Traktujemy statek powietrzny jako ciało sztywne, symetryczne względem płaszczyzny pionowej (prostopadłej do podwozia). Jego ruch związany jest z przemieszczaniem się jego środka ciężkości we wspomnianej płaszczyźnie i z obrotu dookoła osi poziomej, prostopadłej do płaszczyzny symetrii. Przy tych założeniach wektorowe równanie ruchu ma postać:

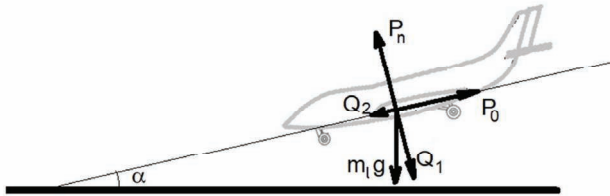




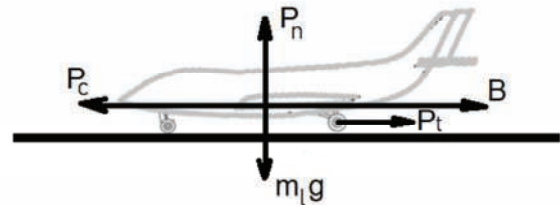
1. Schemat układu sił działających na statek powietrzny w czasie startu



2. Schemat sił działających na statek powietrzny w czasie lotu



3. Schemat rozkładu sił podczas schodzenia do lądowania



4. Schemat rozkładu sił podczas dobiegu

$$S\ddot{x} = \ddot{u} \quad (1)$$

gdzie:  $\ddot{x} = \begin{bmatrix} v \\ \theta \\ S\varphi \end{bmatrix} \quad (2)$

$$\ddot{u} = \begin{bmatrix} -\frac{P_x}{m} + g\sin\theta \\ -\frac{P_z}{mv} + \frac{g}{v}\cos\theta \\ -\frac{l}{M} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$S \stackrel{\text{def}}{=} \frac{d}{dt} \quad (4)$$

Przyjęte wybrane oznaczenia zostały także przedstawione na rysunku 2.

Uwaga. Równanie (1) jest szczególnym przypadkiem uogólnionego układu dynamicznego [7].

$$S\ddot{x} = \vec{f}(\ddot{x}, \ddot{u}). \quad (5)$$

W związku z tym, układ dynamiczny (1) może być analizowany metodami przedstawionymi w [7].

Uwaga. We wzorze (5) operacja  $S$  nie musi być zdefiniowana wzorem (4). Może to być dowolna operacja spełniająca warunki określone w [7].

Po locie zasadniczym, a dokładniej po końcowej jego części następuje lądowanie statku powietrznego.

Lądowanie to składa się z dwóch faz: końcowego schodzenia i dobiegu [5]. Układ sił występujących podczas lądowania przedstawiono na rysunku 3 [1].

Na rysunku 3 przyjęto oznaczenia jak na rysunku 1 oraz dodatkowo oznaczono:

$P_0$  - siła oporu aerodynamicznego,

$Q_1$  - składowa pionowa,

$Q_2$  - składowa pozioma, (siła działająca bezpośrednio na nawierzchnię i podłoże gruntowe),

$m_1$  - masa statku powietrznego przy lądowaniu,

$\alpha$  - kąt podejścia do lądowania.

Końcowe schodzenie rozpoczyna się na wysokości 15 m lub 10,7 m i

polega na zbliżeniu się kół statku powietrznego do nawierzchni.

Z rysunku 3 widać, że:

$$Q_2 = m_1 g \sin\alpha \quad (6)$$

Faza końcowego schodzenia kończy się wyrównaniem lotu i dotknięciem kół do nawierzchni. Jest to tzw. przyziemienie. Po nim następuje faza dobiegu. W czasie tej fazy statek powietrzny zmniejsza swoją prędkość od prędkości przyziemienia do prędkości równej zero, czyli do zatrzymania się. Zmniejszanie prędkości odbywa się w sposób jednostajny.

Przy oznaczeniach jak na rysunku 1 siły działające na statek powietrzny w czasie dobiegu przedstawiono na rysunku 4.

Oprócz lądowań typowych (standardowych) zdarzają się również lądowania nietypowe (niestandardowe). W czasie tych ostatnich lądowań przyspieszenia pionowe są znaczne i mogą osiągnąć wartość nawet kilku  $g$ . Wynika to także z analizy układu dynamicznego (1). Okazuje się, że przy pewnych kątach  $\alpha$  schodzenie odbywa się oscylacyjnie wokół prostej o współczynniku kierunkowym  $\tan\alpha$ .

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe obciążenia drogi startowej w czasie lądowania [10], [13].

Z przeprowadzonych analiz wynika, że podłoże gruntowe musi być projektowane na przedstawione

We wzorach (2), (3), (4) zostały przyjęte następujące oznaczenia:

$t$  - czas,

$g$  - przyspieszenie ziemskie,

$(-P_x)$  - składowa wypadkowej siły aerodynamicznej w kierunku ruchu,

$P_z$  - składowa normalna do kierunku ruchu wypadkowej siły aerodynamicznej,

$M$  - moment składowych wypadkowej siły aerodynamicznej względem środka ciężkości,

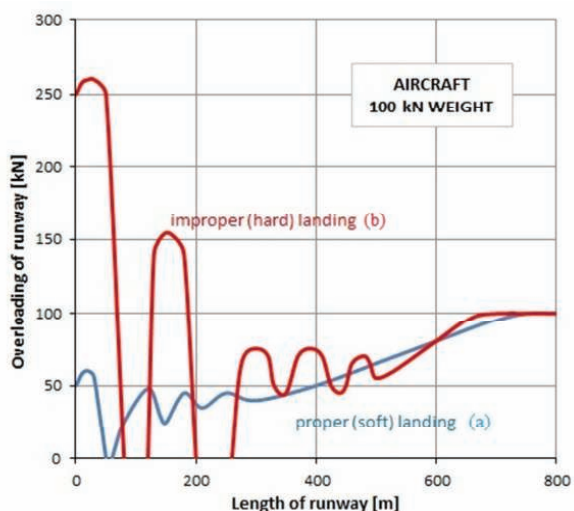
$m$  - masa statku powietrznego,

$l$  - moment bezwładności statku powietrznego względem osi przechodzącej przez środek ciężkości i prostopadłej do płaszczyzny symetrii,

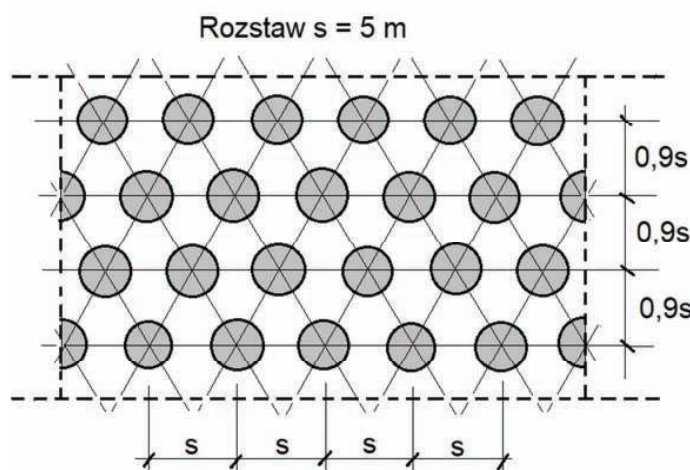
$v$  - prędkość środka ciężkości,

$\theta$  - kąt nachylenia do osi  $x$  toru przemieszczania się środka ciężkości, traktowany jako dodatni, gdy skierowany jest w dół,

$\varphi$  - kąt między osią  $x$  i osią statku powietrznego, traktowany jako dodatni, gdy skierowany jest do góry.



5. Obciążenie drogi startowej w czasie lądowania: a) lądowanie typowe, b) lądowanie nietypowe [10]



6. Przykładowe rozmieszczenie punktów uderzeń przy realizacji inwestycji budowlanej

wcześniej obciążenia z uwzględnieniem oddziaływań dynamicznych. Są to także oddziaływania dynamiczne generowane przez nierówności nawierzchni. Przyczyną powstawania takich nierówności w trakcie bieżącej eksploatacji może być sama nawierzchnia lub niewłaściwie przygotowane podłoże gruntowe, które szczególnie, gdy jest słabonośne lub zróżnicowane pod względem parametrów geotechnicznych, powinno być ulepszone lub wzmocnione.

## Wzmocnianie podłoża gruntowego

Grunty organiczne (np. torfy), poddane obciążeniu, charakteryzują się dużą ścisłością. W trakcie konsolidacji następują zmiany parametrów wewnętrznych [6], [14]. Grunty pochodzenia organicznego charakteryzują się niską początkową wytrzymałością, dużą odkształcalnością oraz dużym zróżnicowaniem właściwości w zależności od rodzaju i zawartości składników w części mineralnej i organicznej. Z tego wynika, iż tego rodzaju grunty nie mogą być bezpośrednio wykorzystane, jako podłoże do posadowienia na nim obiektów inżynierskich koniecznych do wykonywania operacji lotniczych cywilnych lub wojskowych. Ogólnie można stwierdzić, że grunty słabonośne bez ich modyfikacji nie mogą być wykorzystane do realizacji wspo-

mnianych wcześniej przedsięwzięć.

Modyfikacja podłoża gruntowego w celu polepszenia jego właściwości geotechnicznych może być realizowana na wiele sposobów. Parametry geotechniczne podłoża gruntowego można zmieniać lub przyspieszać jego konsolidację poprzez wzmocnianie lub ulepszanie gruntu różnymi metodami w takim stopniu, aby one odpowiadały wymaganiom stawianym posadowieniu obiektów inżynierskich przeznaczonych do realizacji cywilnych i wojskowych operacji lotniczych, pasów startowych, inżynierskich obiektów towarzyszących i różnego rodzaju dróg dojazdowych.

Z punktu widzenia przedstawionych w artykule problemów można wyróżnić dwa kierunki działań w celu poprawy jakości podłoża gruntowego: metody ulepszania gruntu i metody wzmocniania gruntu pod obiektami inżynierskimi związane z realizacją operacji lotniczych.

Pierwsze z nich, to metody, w których grunt jest modyfikowany poprzez zastosowanie różnego rodzaju iniekcji lub domieszek, w celu uzyskania podłoża bardziej zagęszczonego lub zwartego. Modyfikacja ta polega na wzmocnieniu kontaktów między ziarnami gruntu, co jednocześnie zmniejsza jego porowatość tworząc grunt przydatny do przyjmowania dużych obciążeń dynamicznych od lądujących statków powietrznych.

Drugie z nich, to metody polegające na wprowadzaniu do gruntu elementu konstrukcyjnego w celu zwiększenia jego wytrzymałości mechanicznej lub mechaniczne naruszenie struktury wewnętrznej gruntu i poprawienie parametrów wytrzymałościowych gruntu.

Do metod wzmocniania lub ulepszenia podłoża gruntowego można zaliczyć: iniekcje cementowe, wibroflotację, iniekcje chemiczne, wymiany dynamiczne, konsolidacje dynamiczne, głębokie zagęszczanie dynamiczne, metody wibrowymiany, drenaż pionowy, kolumny kamienne, mieszanie gruntów z dodatkami, głębokie mieszanie gruntów, zbrojenie gruntów, przeciążanie statyczne, itp.

Do tego należy jeszcze dodać metodę wykorzystującą materiały wybuchowe – środki strzałowe. Metodę istotną z punktu widzenia rozważanej tu tematyki, która ma pewne cechy wspólne co do zasady/idei jak wymiana dynamiczna, czy konsolidacja dynamiczna.

Metoda wymiany dynamicznej jest połączeniem metod stosowanych do zagęszczania gruntu, a szczególnie metod udarowych z metodą wymiany gruntów, której koncepcja polega na zwiększeniu nośności gruntu przez wykonanie w nim kolumn kamiennych, żwirowych lub piaszczystych. Najlepsze efekty uzyskuje się przy wzmocnianiu gruntów organicznych, nawodnionych gruntów





7. Dynamiczne zagęszczanie gruntu, autostrada A2 odcinek Koło-Dąbie (fot. własna)

spoistych oraz gruntów antropogenicznych. Technologia ta polega na dynamicznym formowaniu nośnych kolumn żwirowych lub kolumn wykonanych z kruszywa (np. kruszony beton konstrukcyjny, żużel wielkopiecowy, tłuźcher kamienny) za pomocą ubijaków (najczęściej o masie od 8 do 15 Mg) zrzucanych grawitacyjnie najczęściej z wysokości od 15 do 30 m. Ubijanie powoduje powstawanie nadciśnienia wody w porach gruntu, które dyssypuje powodując odpływ wody filtrującej do kolumny pełniącej funkcję drenażową. Szczegółowe dobranie odpowiedniego rodzaju metody możliwe jest po dokładnej ocenie parametrów ulepszanego gruntu, a także głębokości zalegania i uwarstwienia słabonośnego podłoża. W procesie wzmacniania gruntu istotne znaczenie ma rozmieszczenie punktów uderzeń (rysunek 6) oraz dobór innych parametrów technologicznych, w tym częstotliwości zrzutów. Po takiej operacji podłoże gruntowe jest przygotowane do realizacji na nim np. dróg startowych.

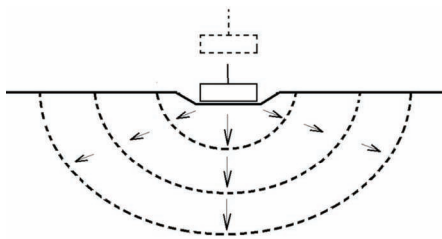
Do wykonania konsolidacji dynamicznej gruntu wykorzystywany jest podobny sprzęt budowlany, jak w przypadku wymiany dynamicznej. Technologia ta polega na wielokrotnym zrzucaniu (na ogół z wysokości od 10 do 40 m) ciężkiego ubijaka (na ogół o masie od 10 do 50 Mg) z częstotliwością około 1 do 3 uderzenia

na minutę – zdjęcie 7.

W wyniku tej operacji w podłożu gruntowym powstaje bryła wzmocnionego gruntu. Opadający grawitacyjnie ubijak (rysunek 8) powoduje wytwarzanie nadciśnienia wody w porach gruntu oraz powstawanie fal objętościowych: porzecznej i podłużnej oraz fal powierzchniowych.

Rozchodzenie się fal sprężystych polega na wzbudzeniu cząstek ośrodka coraz bardziej odległych od źródła fal. Najważniejszą jednak cechą odróżniającą fale sprężyste [8] od dowolnego innego uporządkowanego ruchu cząstek ośrodka jest to, że w przypadku małych zaburzeń rozchodzenie się fal sprężystych nie jest związane z przenoszeniem substancji. W przypadku bardzo krótkich czasów trwania i dużych amplitud tworzą się fale uderzeniowe [11].

Po serii uderzeń generujących wspomniane fale, ciśnienie wody w porach gruntu zwiększa się do poziomu odpowiadającemu stanowi upłynnienia gruntu. Kolejna faza



8. Dynamiczne zagęszczanie. Rozchodzenie się drgań (fal) w gruncie

powoduje dyssypację nadciśnienia wody oraz zagęszczenie gruntu – powstaje ściślejszy kontakt pomiędzy ziarnami.

Po zakończeniu procesu ubijania – konsolidacji dynamicznej następuje wyrównanie powierzchni i przystępuje się do zagęszczania na kolejnych ewentualnych lokalizacjach. Po zakończeniu procesu na wyrównanej powierzchni gruntu może zostać posadowiona droga startowa, rozłożone mobilne pokrycie lotniskowe wykorzystywane do budowy podstawowych elementów lotnisk lub lądowisk.

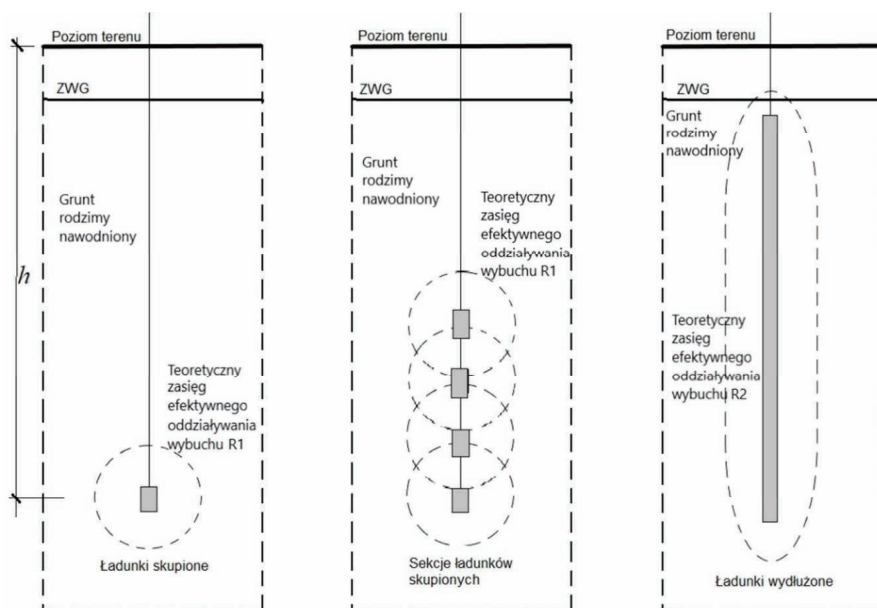
### Metoda wzmacnianie podłoża gruntowego z wykorzystaniem środków strzałowych

W tej technologii dąży się do poprawienia parametrów fizycznych i mechanicznych podłoża gruntowego poprzez zagęszczenie gruntów ziarnistych lub poprzez utworzenie pionowych piaszkowych pali drenażowych (ulepszanie) w gruntach spoistych w wyniku wykorzystania materiałów wybuchowych umieszczonych w/ lub na gruncie naturalnym lub nasypie, który ma być zagęszczony, czy też skonsolidowany.

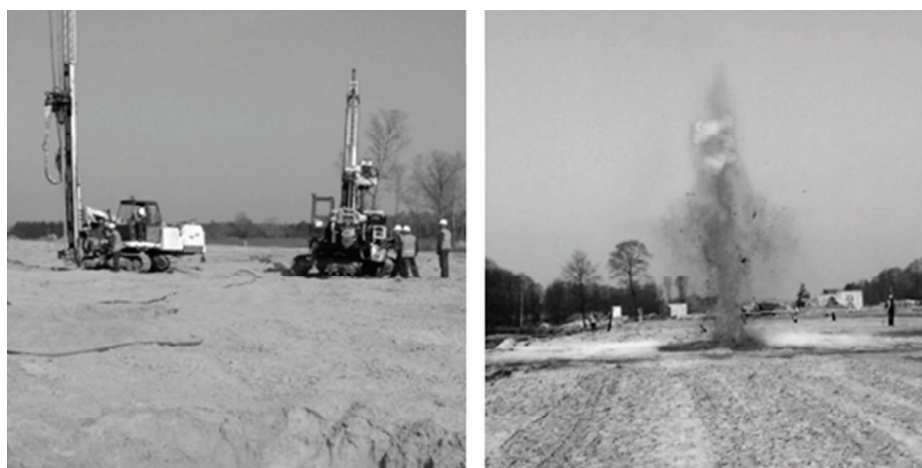
Proces wybuchu i detonacji [15] rozprzestrzenia się za pomocą wspomnianej już wcześniej silnej fali uderzeniowej.

Do zalet tej metody przy wzmacnianiu podłoża gruntowego z przeznaczeniem do celów lotniczych należy zaliczyć:

- krótki czas realizacji zagęszczania lub ulepszania, szczególnie istotny w przypadkach wyższej konieczności,
- uzyskanie zagęszczenia warstw podłoża do dużej głębokości np. do 40 m,
- skuteczność przy istnieniu w gruncie dużych pojedynczych głazów lub kamieni,
- wysoka skuteczność w przypadku obszarów narażonych na działanie obciążeń dynamicznych np. przy lądowaniu samolotów.



9. Wybuchy ukryte z przykładowym rozmieszczeniem ładunków



10. Metoda wzmacniania podłoża za pomocą środków strzałowych, autostrada A2 odcinek Koło-Dąbie [9]

Podstawową cechą tej metody jest wykorzystanie wysokiej energii wygenerowanej w momencie eksplozji materiału wybuchowego. Detonacja materiału wybuchowego możliwa jest tylko przy zastosowaniu impulsu elektrycznego o wysokim napięciu, dla bezpieczeństwa nie stosuje się materiałów wrażliwych na detonację pod wpływem działania ognia [12]. Wymóg ten nie musi obowiązywać przypadku wykonywania robót minerskich przez wojsko.

W procesie zagęszczania gruntu ziarnistego podczas wybuchu można wyróżnić zasadnicze fazy. Na wstępie rozpręża się strefa gazów powybuchowych a fale uderzeniowe, rozchodzą się w ośrodku gruntowo-wodnym z prędkością ok. 3000 m/s. Ciśnienie fali detonacyjnej wynosi

około 1400 MPa. Proces ten wywołuje zmianę struktury szkieletu gruntowego, którego ziarna lub cząstki doznają powolnego lub szybkiego przegrupowania na skutek dużych odkształceń ścinających w gruncie, następnie następuje upłynnienie gruntu i dyssypacja ciśnienia wody w porach. Detonacja ładunku powoduje nagły wzrost ciśnienia wody w porach gruntu, co niszczy istniejącą niestabilną jego strukturę zmieniając ją w przydatną do posadowienia na niej obiektów lub elementów lotniska.

Wywołane przegrupowanie w środowisku gruntowym pociąga za sobą zwiększenie zagęszczenia gruntu. Zależy ono od rodzaju gruntu i jego przepuszczalności, położenia (umieszczenia) materiału wybuchowego, jak i objętości gruntu przeznaczonego do zagęszczania.

Do przeprowadzenia operacji wzmacniania gruntu, materiały wybuchowe mogą być umieszczone na powierzchni wzmacnianego gruntu albo na ustalonej głębokości. W ostatnim przypadku wykorzystywane są ładunki skupione lub wydłużone.

W dotychczasowych realizacjach, przypadku stosowania ładunków skupionych, ich masa nie przekraczała 10 000 g, natomiast ładunki wydłużone przeważnie mają masę jednostkową około 2000 g/m.

Doświadczenia polskie pozwoliły wypracować powyższe zalecenia empiryczne dla metody wzmacniania gruntu za pomocą środków strzałowych. W literaturze [4] znajdziemy również inne parametry projektowe.

Teoretyczny zasięg efektywnego oddziaływania wybuchu w przypadku ładunku skupionego lub sekwencji ładunków skupionych wynosi:

$$R1 = k \cdot \sqrt[3]{Q_1} \quad (7)$$

gdzie  $Q_1$  jest to empirycznie ustalona masa ładunku wybuchowego (kg) założonego na głębokości  $h$ :

$$Q_1 = 0,055 \cdot h^3 \quad (8)$$

Parametr  $k$  jest współczynnikiem doświadczalnym:  $k=2,5 \div 3,0$ . Teoretyczny zasięg efektywnego oddziaływania wybuchu w przypadku ładunku wydłużonego:

$$R2 = 0,71 \cdot k \cdot \sqrt[3]{Q_2} \quad (9)$$

gdzie  $Q_2$  jest to przyjęta masa ładunku wybuchowego (kg/m). Podane wcześniej wielkości zilustrowano na rysunku 9.

Nie zawsze pojedyncze zastosowanie materiałów wybuchowych daje oczekiwane efekty dotyczące wzmocnienia gruntu przeznaczonego pod budowę pasów startowych, dróg startowych, dróg dojazdowych do nich itp. Wtedy trzeba stosować serie wybuchów [3], w tym sekwencyjne odpalanie ładunków w róż-

nych punktach na wzmacnianej powierzchni (por. rysunek 6).

Pasy startowe/drogi startowe to liniowe inżynierskie obiekty budowlane, podobnie jak drogi różnego typu, czy linie kolejowe itp. mogą być więc realizowane z wykorzystaniem doświadczeń przy wzmacnianiu gruntów pod realizację dróg, kolei itp. – zdjęciu 7 i zdjęciu 10.

### Zastosowanie do budowy rozproszonej sieci „małych” lotnisk, dróg startowych

W Polsce, oprócz lotnisk w okolicach dużych miast, tzw. lotnisk regionalnych, wskazane jest tworzenie małych lotnisk z dostępem publicznym (w tym o ograniczonej certyfikacji) albo na bazie istniejących 28 lotnisk wpisanych do Rejestru Lotnisk Cywilnych na rok 2018. Lotniska takie mogą obsługiwać samoloty o masie startowej do 10 Mg.

Wszystkie te lotniska mogłyby pełnić funkcję uzupełniającą i obsługiwać pasażerów planujących dostać się do dużego lotniska komunikacyjnego z miejsc oddalonych o co najmniej 3 godziny podróży innym środkiem transportu. W warunkach Polski warto też uwzględnić planowaną budowę CPK.

Wspomniane lotniska mogłyby być wykorzystywane np. przez Wojska Obrony Terytorialnej, jako pasy startowe dla dronów taktycznych. Jednak niezależnie powinny być lokalizowane takie lotniska, czy lądowiska celowo na gruntach słabonośnych przeznaczone wyłącznie do celów wojskowych lub z możliwością szybkiego przystosowania do takich celów.

Przy modernizacji istniejących pasów startowych, dróg startowych, czy budowie nowych należy stosować metody innowacyjne bazujące na zielonej geotechnice - rezygnując z betonu i asfaltu. Wykorzystując pod budowę grunty trudne, często nieprzydatne do innych celów i niewykorzystywane – bagna, torfowiska itp. W tych przypadkach do ich

wzmocnienia można wykorzystać z dobrym skutkiem materiały wybuchowe. Mogą być one lokalizowane w pasie nadmorskim i w związku z tym dodatkowo być wykorzystywane do zwiększenia bezpieczeństwa żeglugi na morzu. Warto tu dodać, że wiele gruntów znajdujących się w pasie nadmorskim to grunty słabonośne, więc przystosować je do wspomnianego przeznaczenia można stosując metody wykorzystujące materiały wybuchowe.

Do realizacji powyższej koncepcji można wykorzystywać wspomniane już samoloty o max masie startowej wynoszącej 10 Mg. Są to na ogół samoloty dziewiętnastomiejscowe plus dwóch członków załogi. Ich max prędkość wynosi około 500 km/h, zasięg maksymalny to około 1300 km.

Jest to rozwiązanie konkurencyjne w odniesieniu do innych środków transportu, w tym nawet do kolei dużych prędkości, które wprowadza możliwość tworzenia rozproszonej sieci „małych” lotnisk, bez ograniczeń w odniesieniu do ich konkretnej lokalizacji, w tym lokalizacji na gruntach słabonośnych. Tu z pomocą przychodzi metoda wzmacniania gruntu z wykorzystaniem materiałów wybuchowych. Takie lotniska mogą być tworzone i likwidowane w zależności od potrzeb. Koszt takiej operacji jest niewielki i ze względu na stosowaną technologię obojętny dla środowiska.

Trzeba dodać, że takie lotniska, czy drogi startowe mogą być tworzone także w warunkach bojowych z przeznaczeniem np. dla samolotów bezzałogowych. Przykładowo masa użyteczna samolotu bezzałogowego RQ – 4 Global Hawk wynosi około 10 Mg.

Z powodu braku ograniczeń lokalizacyjnych rozproszony system może zostać dobrze zaprojektowany również z uwzględnieniem architektury i topologii dostosowanej do każdego warunków, w tym warunków kryzysowych.

„Małe” lotniska i małe samoloty są bardziej elastyczną formą transpor-

tu lotniczego niż transport lotniczy z wykorzystaniem lotnisk tradycyjnych. Taka sieć transportowa może być uzupełnieniem komunikacyjnym dla cywilnych portów lotniczych i lotnisk wojskowych. W ten sposób można zaoferować pasażerom wygodne i szybkie dotarcie do wybranych miejsc, w tym do węzłowych, międzynarodowych portów lotniczych. Jest to wsparcie działalności związanej z przemysłem czasu wolnego (z ang. leisure industry). Rozwiązania te mogą być także wykorzystane do przewozu towarów oraz być wykorzystywane do celów szeroko rozumianego transportu medycznego (przewóz pacjentów, przewóz narządów, przewóz materiałów medycznych itp.).

Są to systemy stosowane w wielu krajach. Podobny funkcjonuje poprawnie w USA i Europie znany pod nazwą European Personal Air Transportation System (EPATS). Jest to system lotniczego transportu publicznego, z którego ma korzystać ogół społeczeństwa.

Przy planowaniu takiej sieci lotnisk, czy lądowisk należy pamiętać o tym co napisano w [16]:

*„Szybko wzrasta liczba samolotów pasażerskich i transportowych. W 2018 r. eksploatowano na świecie około 26 tys. samolotów, w 2038 r. ma latać około 51 tys. samolotów. Należy przy tym wziąć pod uwagę to, że samolot pasażerski podczas lotu z Europy do Ameryki Północnej spala tyle paliwa co samochód osobowy w ciągu kilkudziesięciu lat. Przed pandemią spalanie paliw w silnikach samolotów miało 5 – procentowy udział w całkowitej emisji CO2 na świecie. Średnio dziennie jednocześnie w powietrzu było 9 tys. samolotów. W 2018 r. podróż samolotem odbyło 11% mieszkańców Ziemi, z tego 4% za granicę”.*

### Podsumowanie

Sposób startu i lądowania statku powietrznego ma istotny wpływ na jego oddziaływanie na nawierzchnię oraz podłoże gruntowe.



Metoda wzmacniania podłoża gruntowego wykorzystująca materiały wybuchowe do budowy obiektów inżynierskich przeznaczonych do wykonywania cywilnych lub wojskowych operacji lotniczych jest metodą innowacyjną i skuteczną.

Jest metodą łatwą w realizacji szczególnie przy wykorzystaniu wojsk saperskich i inżynierskich.

Cechuje ją krótki czas realizacji konsolidacji gruntu. Możliwość lokalizacji na gruncie słabonośnym i w terenie trudno dostępnym jest też zaletą omawianej metody wzmacniania podłoża gruntowego. Podana lokalizacja może być wykorzystana do tworzenia systemów antydozypowych. Opisywana metoda zagęszczania podłoża jest atrakcyjna ekonomicznie.

Tereny trudne, jak bagna, nieużytki itp., mogą być wykorzystane przez lotnictwo cywilne i wojskowe. W ostatnim przypadku ich lokalizacja może być dodatkową zaletą, korzystną, także z punktu widzenia wojskowego.

„Małe lotniska” są drogą do rozwiązywania wielu problemów komunikacyjno – transportowych w każdych warunkach.

Pozytywną cechą jest możliwość ich rozpraszania, a to pozwala na zwiększenie dostępności dużych grup społeczeństwa do transportu lotniczego, zwiększa bezpieczeństwo i niezawodność całego systemu w każdych warunkach. Jest on elastyczny, niezawodny jako całość i skalowalny (cecha umożliwiająca zachowanie podobnej wydajności systemu przy zwiększaniu skali systemu – np. zwiększana liczba powiązanych małych lotnisk nie zaburza, nie zakłóca jakości pracy systemu). Skraca się czas podróży.

To niekonwencjonalne i innowacyjne podejście do realizacji operacji lotniczych cywilnych i wojskowych powinno być pożądanym i możliwym kierunkiem rozwoju systemu lotnictwa cywilnego i wojskowego w Polsce, w którym opisana metoda wzmacniania podłoża powinna być

też wykorzystana do budowy w terenach trudnych infrastruktury uzupełniającej system poprzez budowę dróg dojazdowych, bocznic kolejowych (MPS), magazynów, hangarów, obiektów zaplecza technicznego. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] Araszkiwicz W. Budowa lotnisk. PWN, Warszawa 1975.
- [2] Blacha K., Wesołowski M. Mobilne pokrycie kompozytowe ELP – 1 Krater do odbudowy elementów funkcjonalnych lotniska w sytuacjach kryzysowych. Bezpieczeństwo i ekologia 6/2016, pp. 74 – 84.
- [3] Dembicki E. Zagęszczanie gruntów metodą mikorwybuchów. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018.
- [4] Ivanov P. L. Uplotnenie nesvyazanykh gruntov vzryvami. (Compaction of noncohesive soils by explosions). Izdat'el'stvo Literatury Po Stroitel'stvu. Leningrad 1967.
- [5] Marszałek J. Budowa lotnisk. Część I. Projektowanie geometryczne. Skrypt WAT, Warszawa 1980.
- [6] Meyer Z. Kozłowski T. Osiadanie gruntu organicznego o właściwościach sprężysto- plastycznych. XV Seminarium Naukowe z cyklu Regionalne Problemy Ochrony Środowiska w Ujściu Odry. Szczecin -Tuczno, 6-7 lipca 2007.
- [7] Mieloszyk E. Nielklasyczny rachunek operatorów w zastosowaniu do uogólnionych układów dynamicznych. Wydawnictwo IMP PAN, Gdańsk 2008.
- [8] Mieloszyk E., Milewska A., Grulkowski S. Elastic waves in railroad bed and its surroundings analyzed with non-classical operational methods. Proceedings of the Conference CETRA 2018. 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure. 17-19 May 2018, Zadar Croatia, pp. 1195-1201.
- [9] Mieloszyk E., Milewska A., Wyroślak M. Increasing the country's security and public transport ac-

cessibility by creating a network of small airports. War Studies University Scientific Quarterly no. 4 (113), 2018, pp.49 – 60.

- [10] Mieloszyk E., Wyroślak M. Airstrip Ground Improvement Works by Blasting Charge Technique and Dredged-Ash Material Mixture. 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 471 042016.
- [11] Mieloszyk E., Milewska A., Wyroślak, M. Blast Charge Technique as a Method of Soil Improving to Locate the New Supporting Runways. 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 603 052025.
- [12] Sikora Z., Wyroślak M. Dynamic soil improvement by hybrid technologies. XVI ECSMGE, Edynburg 2015, pp. 1469-1474.
- [13] Szydło A. Statyczna identyfikacja parametrów modeli nawierzchni lotniskowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1995.
- [14] Wiłun Z.: Zarys Geotechniki, WKiŁ, Warszawa 1987.
- [15] Włodarczyk E. Podstawy fizyki wybuchu. Redakcja Wydawnictw WAT, Warszawa 2012. ISBN 978-83-62954-30-8.
- [16] Witkiewicz Z., Wardencki W., Świercz A. Czy Ziemia przetrwa inwazję człowieka. Bogucki Wydawnictwo Naukowe. Poznań 2021.
- [17] Zadroga B. Methodology of determination of geotechnical parameters for non – cohesive soils based on dynamic and static penetration test. Materials 4th International Workshop: Soil parameters from in situ and laboratory tests. Wyd. Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Poznań 2010, pp. 543 – 551.

