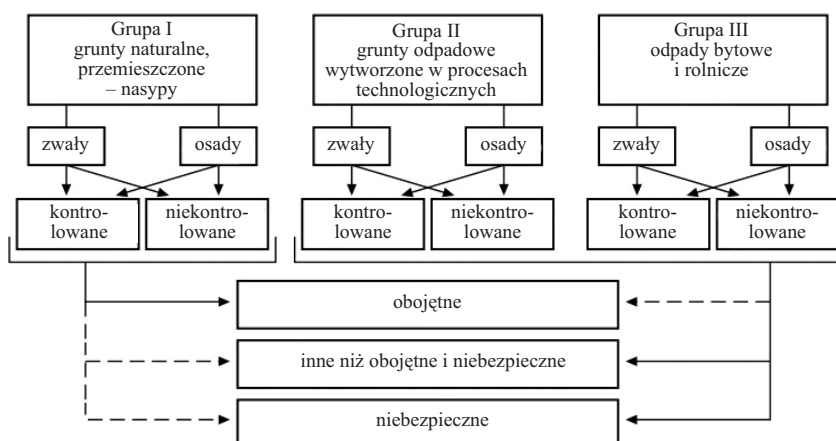


mgr inż. Maciej Król¹⁾

Nasypy niebudowlane – wyzwanie dla geotechnika

Skutkiem transformacji przemysłowej i energetycznej (trwającej w zasadzie od 1989 r.) jest powstawanie wielkopowierzchniowych obszarów terenów poprzemysłowych. Zgodnie z [1] *tereny poprzemysłowe definiuje się jako zdegradowane, nieużytkowane lub nie w pełni wykorzystane tereny przeznaczone pierwotnie pod działalność gospodarczą, która została zakończona*. Najczęściej są to obszary w atrakcyjnych inwestycyjnie lokalizacjach, co doskonale tłumaczy duże zainteresowanie tymi terenami. Istnieje wiele udanych rewitalizacji obszarów poprzemysłowych, które stają się wizytówkami miast i są bardzo dobrze oceniane za rozwiązania architektoniczne i urbanistyczne [2]. Niejednokrotnie nadal są zmodernizowanymi zakładami i halami magazynowymi. Warto jednak pamiętać, że proces rewitalizacji wiąże się nie tylko z odnowieniem istniejących obiektów i nadaniem nowych układów funkcjonalnych, ale również z koniecznością ulepszenia i remediacji podłoża. W artykule przedstawiono sposoby wzmocnienia nasypów niebudowlanych, które zwykle są nieodłączną częścią terenów poprzemysłowych.

Nasypy niebudowlane, zwane również niekontrolowanymi lub antropogenicznymi (ang. *anthropogenic soils, man made soils*) (rysunek 1) stanowią wyzwanie w procesach budowlanych, ponieważ nie umożliwiają bezpośredniego posadowienia obiektów, charakteryzując się dużą niejednorodnością cech wytrzymałościowych i odkształceniowych oraz zawartością dużych przeszkód (stare fundamenty, glazy) i gruntów organicznych lub odpadów. Podłoże zbudowane z takich gruntów wymaga specjalnych zabiegów umożliwiających posadowienie obiektów budowlanych. Bardzo często nasypy antropogeniczne na terenach przemysłowych wy-



Rys. 1. Podział gruntów antropogenicznych [3]

magają remediacji ze względu na duże zanieczyszczenie substancjami szkodliwymi. Zagadnienie to nie jest jednak przedmiotem artykułu.

Najczęściej stosowanymi metodami geoinżynierskimi są:

- wymiana gruntów.
- techniki głębokiego fundamentowania.
- wzmocnienie podłoża.

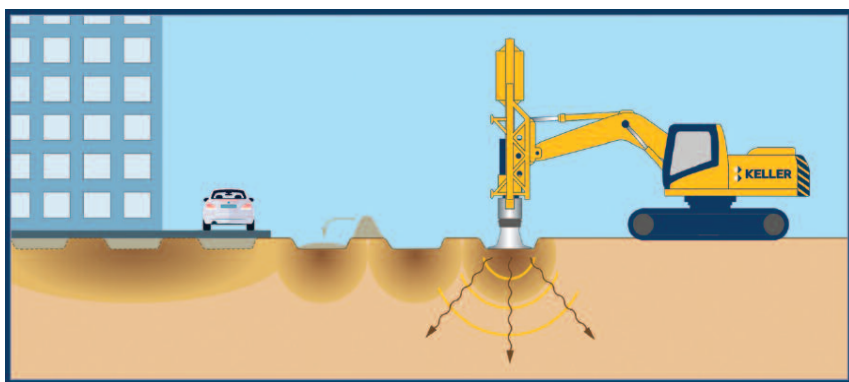
Wymiana gruntu jest często nieefektywna ekonomicznie oraz technicznie, szczególnie w przypadku zalegania nasypów do dużych głębokości. Technologie głębokiego fundamentowania są niezastąpione w przypadku dużych obciążeń i wymagań dotyczących osiadania, ale często nieopłacalne w przypadku lekkich obiektów budowlanych i wzmocniania dużych powierzchni. Rozwiązaniem pośrednim, korzystnym z perspektywy zarówno ekonomicznej, jak i technicznej, jest **wzmocnienie gruntu za pomocą technologii „lekkich”, takich jak: zagęszczanie dynamiczne, wibrowymiana czy technologia wgłębnego mieszania gruntu** [4].

Najprostszą metodą wzmocnienia słabego podłoża jest jego zagęszczenie, poprawiające parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe. **Technologia impulsowego zagęszczenia gruntu (IC)** polega na ulepszeniu podłoża gruntowego w wyniku impulsowych uderzeń

młota o wadze ok. 9 ton. Efektywność oraz zasięg zagęszczania zależą od rodzaju gruntu i wysokości zwierciadła wody gruntowej w stosunku do powierzchni roboczej. W korzystnych warunkach grunto-wodnych zasięg zagęszczenia wynosi ok. 6,0 m, licząc od rzędnej prowadzenia prac. W czasie ubijania impulsowego doprowadza się do zmniejszenia porowatości gruntu, a tym samym zwiększenia zagęszczenia (rysunek 2).

W gruntach nawodnionych efektywność ubijania uzależniona jest od dyssipacji silnych przyrostów ciśnienia porowego, jakie towarzyszą ubijaniu, co wymaga odpowiedniego dozowania i rozkładu energii na wzmocnianej powierzchni. Młot uderza z częstotliwością 40 – 60 razy na minutę w ułożoną na podłożu gruntowym specjalną stopę, przekazującą energię w głąb podłoża gruntowego, powodując jego zagęszczenie. Energia uderzenia wynosi 85 – 180 kNm w zależności od masy młota oraz wysokości jego zrzutu. W wyniku zagęszczania w podłożu gruntowym powstają kratery, które w zależności od przyjętego rozwiązania projektowego należy wyrównać lub uzupełnić materiałem. Zagęszczanie wykonuje się w siatce punktów podstawowych oraz znajdujących się między nimi punktów uzupełniających (w razie

¹⁾ Keller Polska sp. z o.o.; maciej.król@keller.com



Rys. 2. Schemat realizacji zagęszczania impulsowego

potrzeby). Siatka punktów wzmocnienia jest zazwyczaj ułożona zgodnie z metodą „sweep nad track”, tj. dookoła stojącej maszyny obracającej jedynie ramieniem z zamontowanym młotem. Rozstaw punktów zagęszczania zależy od wymaganej głębokości wzmocnienia podłoża gruntowego, od rodzaju i stanu podłoża oraz obciążeń i geometrii konstrukcji. Przed przystąpieniem do robót należy każdorazowo sprawdzić efektywność przyjętej siatki zagęszczania. Technologia ta jest niezwykle efektywna przy zagęszczaniu luźnych gruntów niespoistych czy wszelkiego rodzaju zagęszczalnych nasypów niebudowlanych (fotografia 1). Doskonale sprawdzi się również jako zagęszczenie wymiany gruntów, realizowanej poniżej zwierciadła wody gruntowej. Duża wydajność czyni tę metodę niezwykle użyteczną w przypadku wzmocnienia dużych powierzchni, np.

pod nasypy drogowe, posadzki, parkingi itp [4].

Jeśli podłoże zbudowane jest z gruntów, w przypadku których technologia zagęszczania impulsowego może być nieskuteczna lub gdy głębokość gruntów słabonośnych przekracza możliwości tej metody, alternatywnym sposobem wzmocnienia podłoża jest **technologia kolumn z kruszywa (KSS)**. Metoda ta poprawia parametry gruntów przez ich zagęszczenie i doziarnienie oraz usprawnienie procesu konsolidacji. Proces produkcyjny polega na wykonaniu kolumn z kruszywa za pomocą wibratora wglębnego w celu wzmocnienia podłoża w obrębie kolumny, zarówno w gruntach niespoistych, jak i spoistych.

Gruboziarniste kruszywo podaje się do górnego zasobnika wibratora ze służą wlotową. Wewnątrz wibratora kruszywo przesuwane jest za pomocą sprężonego

powietrza w kierunku otworu wylotowego przy ostrzu. Wibrator porusza się wzdłuż prowadnicy jednostki gaśnicowej Vibrocat, która może go dodatkowo dociskać. Kruszywo wypływające pod ostrzem wibratora, w fazie jego podciągania, jest następnie zagęszczane i rozpychane na boki przy powrocie i docisku wibratora. W wyniku posuwisto-zwrotnego trybu pracy wibratora formowane są kolumny z kruszywa, które współpracują z gruntem w przenoszeniu obciążenia.

Etapy procesu wibrowymiany (rysunek 3):

1) **przygotowanie:** wibrator słuzywy podczepiony do maszty jednostki gaśnicowej Vibrocat ustawiany jest w punkcie projektowanej kolumny, ładowarka napełnia pojemnik kruszywem;

2) **napelnianie:** pojemnik jest wciągany na maszt i opróżniany przez służę do zasobnika w ruchu. Po zamknięciu służy kruszywo przemieszcza się przy udziale sprężonego powietrza w kierunku ostrza wibratora;

3) **zagłębianie:** wibrator rozpycha i penetruje grunt do projektowanej głębokości, przy udziale sprężonego powietrza i docisku maszyny podstawowej;

4) **budowanie:** budowanie kolumny następuje ruchem posuwisto-zwrotnym; podciąganiu wibratora towarzyszy wypływ kruszywa w zwolnioną przestrzeń pod ostrzem, a zagłębianie powoduje rozpychanie i zagęszczanie kruszywa;

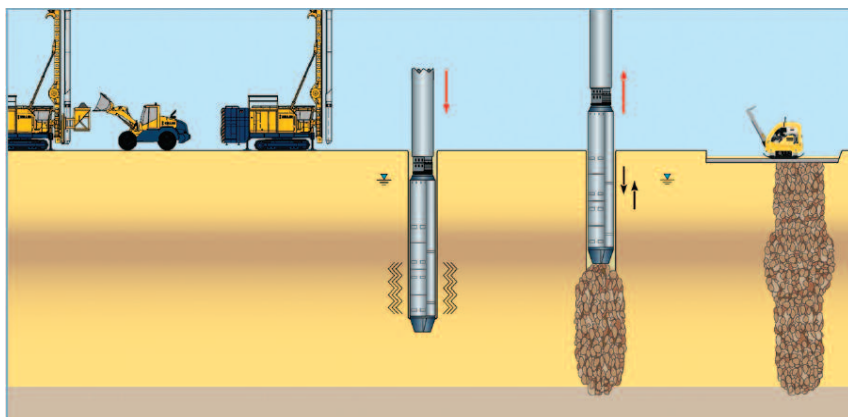
5) **zakończenie:** po wykonaniu kolumn należy dodatkowo zagęścić powierzchniowo dno wykopu i ewentualną podsypkę pod fundamentem lub warstwę wyrównawczą usypaną na powierzchni roboczej.

Urządzenia w tej technologii są wyposażone w system zbierania danych, takich jak natężenie prądu i prędkość penetracji/podnoszenia. Wszystkie dane są rejestrowane i wyświetlane na monitorze w kabinie operatora wraz z określonymi wartościami docelowymi. Monitorowanie pozwala operatorowi skorygować wszelkie odchylenia w czasie rzeczywistym podczas procesu wykonania kolumn żwirowych, aby utrzymać zagęszczenie zgodne ze specyfikacją projektu.



Fot. 1. Wykorzystanie technologii zagęszczania impulsowego w celu wzmocnienia podłoża pod nasyp drogowy

Fot.: GDDKiA



Rys. 3. Proces realizacji kolumn KSS

Metoda wzmocnienia podłoża kolumnami z kruszywa jest bardzo skuteczna w nasypach niebudowlanych. Doświadczenia z wielu realizacji infrastrukturalnych, przemysłowych czy mieszkaniowych potwierdzają dużą efektywność w poprawie nośności gruntu oraz redukcji osiadania [4 ÷ 6]. Ze względu na objętościowy charakter wzmocnienia podłoża, przy użyciu tej metody można elastycznie dostosowywać siatkę kolumn (brak konieczności wymiarowania konstrukcji na przebiecie sztywnym elementem, jak przy zastosowaniu kolumn betonowych) w przypadku natrafienia na przeszkody uniemożliwiające wykonanie w projektowanej lokalizacji. W przypadku, gdy w gruntach antropogenicznych występują liczne przeszkody w postaci rozkruszonych fundamentów lub drobnych elementów ceglanych, pomocniczo można zastosować podwierty w celu ułatwienia pogrążania wibratora (fotografia 2).

Wybór właściwej metody ulepszenia podłoża gruntowego należy poprzedzić badaniami gruntu. Ocena składu nasypów niebudowlanych jest niezwykle ważna, ponieważ determinuje rodzaj sposobu wzmocnienia. Najczęściej wykonywane są odwierty, sondowanie oraz badania geofizyczne. Właściwa ocena charakteru nasypów pozwala na prawidłowy dobór prac geotechnicznych. Nie wszystkie grunty antropogeniczne, ze względu na skład, są zagęszczalne za pomocą metod dynamicznych i wibracyjnych. Duża zawartość części organicznych lub frakcji pyłastej uniemożliwia skuteczną kompresję. Wstępną ocenę skuteczności

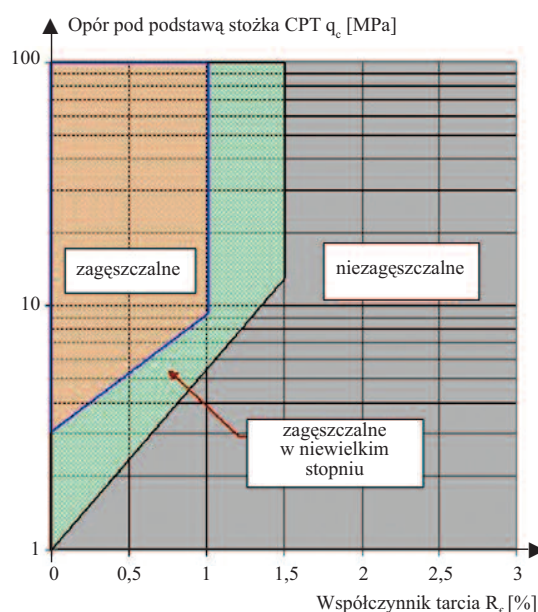


Fot. 2. Pałownica do wykonywania kolumn żwirowych oraz koparka do podwiertów

Fot. archiwum Keller Polska

zagęszczania można przeprowadzić na podstawie wyników odwiertów oraz analizy granulometrycznej. Badania tego rodzaju nie zawsze dają jednoznaczną odpowiedź na pytanie o skuteczność zagęszczania w przypadku wybranej metody. Pomocne mogą być również wykresy określające podatność gruntów na kompresję na podstawie wyników sondowań statycznych CPT (rysunek 4). Problemem dla tego sposobu interpretacji jest uzasadnienie niechęć przedsiębiorstw geologicznych do wykonywania sondowań w gruntach antropogenicznych ze względu na ryzyko uszkodzenia stożka.

Niezależnie od wstępnej oceny możliwości zagęszczania gruntu, na podstawie dokumentacji badań podłoża, zasadne jest wykonanie badań na modelach doświadczalnych (poletka próbne) lub projektowanie na bazie metody obserwacyjnej. Każde z tych podejść jest zgodne z zaleceniami Eurokodu 7 [8] dotyczącymi projektowania geotechnicznego. Nasypy niekontrolowane niemal z definicji są gruntami, w przypadku których nie ma metod projektowania. Pomocne mogą być doświadczenia z realizacji w podobnych warunkach lub (gdy tych brak) wymienio-



Rys. 4. Klasyfikacja zagęszczalności gruntów w zależności od oporów sondowań CPT [7]

ne wcześniej metody, szczególnie, w przypadku technologii zagęszczania impulsowego, wykonanie próbnego poletka (model doświadczalny w rzeczywistych warunkach gruntowych i skali), weryfikującego skuteczność metody. Świadomym podejściem projektowym w przypadku gruntów antropogenicznych wydaje się zastosowanie metody obserwacyjnej. Zgodnie z zapisem Eurokodu 7 (pkt. 2.7 (1)): *jeżeli prognozowanie zachowania podłoża gruntowego jest trudne, właściwe może być zastosowanie podejścia znanego jako „metoda obserwacyjna”, w którym rozwiązanie projektowe korygowane jest podczas budowy*”.

W przypadku, gdy wyniki badań (sondowania, odwierty) nasypów antropogenicznych, zalegających w podłożu, nie dają jednoznacznej odpowiedzi na pytanie o możliwość zastosowania technologii impulsowego zagęszczania, a jest ona zasadna z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia, projektowanie za pomocą metody obserwacyjnej może dać wymierne korzyści i pozwoli uniknąć ryzyka. Warto propagować ten sposób projektowania i uświadamiać inwestorów o zaletach tego podejścia.

Przykładowy scenariusz zastosowania metody obserwacyjnej z wykorzystaniem opisanych metod zagęszczania gruntów:

- wykonanie próbnego poletka w technologii IC w kilku miejscach na placu budowy;

- wykonanie sondowań kontrolnych weryfikujących skuteczność zagęszczania;

- w przypadku uzyskania pozytywnych wyników badań odbiorowych, kontynuacja prac za pomocą pierwotnej metody na pozostałym obszarze;

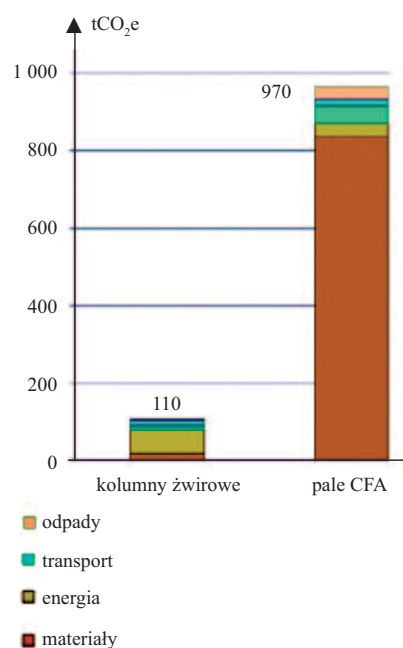
- w przypadku uzyskania wyników sondowań niezgodnych z założeniami projektowymi, próba ponownego zagęszczenia na poletkach próbnych (tzw. kolejne przejście);

- gdy powtórne sondowania dynamiczne na poletkach próbnych nie pozwalają na uzyskanie wartości określonych w projekcie, należy zmienić sposób wykonywania wzmocnienia podłoża;

- zmiana technologii na kolumny z kruszywa, których efektywność nie jest tak silnie zależna od podatności podłoża na zagęszczanie wibracyjne.

Przedstawione technologie charakteryzują się prostotą wykonania i bazują na nieskomplikowanych mechanizmach fizycznych. Jest to dowód na to, że czasami nie ma konieczności stosowania wyszukanych procesów technologicznych, żeby skutecznie wzmocnić podłoże gruntowe zbudowane z nasypów niebudowlanych. Należy podkreślić następujące zalety opisanych metod: **skuteczne łączenie kolumn z kruszywa z zagęszczaniem impulsowym; możliwość bezpośredniego prowadzenia kolejnych prac; brak ryzyka uszkodzenia elementów wzmocnienia; ciągłość procesu produkcyjnego wynikająca z niezależnienia od dostaw materiałów.**

Oprócz zalet technicznych tej technologii trzeba zwrócić uwagę na aspekt ekologiczny i ekonomiczny [9, 10]. Opisane technologie są niskoemisyjne w porównaniu np. z głębokim fundamentowaniem palowym. Kolumny KSS wykorzystują materiały pochodzenia naturalnego, co wpływa na znaczne zmniejszenie śladu węglowego podczas realizacji (rysunek 5).



Rys. 5. Porównanie emisji CO₂ w przypadku różnych technologii geotechnicznych na przykładzie realizacji KMP w Sosnowcu [9]

Wykorzystywanie lokalnie występujących kruszyw ogranicza znacznie koszty transportu. Ponadto coraz częściej do realizacji prac wykorzystuje się materiały z recyklingu, np. przekrusz betonowy [11]. Zastosowanie tych metod przy rewitalizacji terenów przemysłowych jest pewnego rodzaju „spłatą długu” względem środowiska, gdyż przez wiele dziesięcioleci tereny te były miejscem, gdzie zanieczyszczenie osiągało niejednokrotnie ponadnormatywne wartości. Obecnie powinniśmy (gdy tylko to możliwe) korzystać z niskoemisyjnych i zrównoważonych metod, nie tylko w geotechnice, ale w całym procesie budowlanym.

Literatura

[1] Program rządowy dla terenów przemysłowych przyjęty przez Radę Ministrów 27 kwietnia 2004 r. Ministerstwo Środowiska, Warszawa, 27 kwietnia 2004 r.

[2] Chudzik P, Khorshed M. Rewitalizacja terenów przemysłowych czyli sposób na regenerację i integrację tkanki miejskiej. Builder Polska, 08.2024, dostęp online: <https://builderpolska.pl/2024/08/12/rewitalizacja-terenow-poprzemyslowychczyli-sposob-na-regeneracj-integracj-tkanki-miejskiej/>.

[3] Drągowski A. Charakterystyka i klasyfikacja gruntów antropogenicznych. Przegląd Geologiczny. 2010; vol. 58, nr 9/2.

[4] Bell A, Kirsch K. Ground Improvement, 3rd Edition, Taylor & Francis, 2013.

[5] Król M, Sternalski M. Kolumny żwirowe – simply smart. Inżynieria Morska i Geotechnika. 2024; R. 45, nr 4, s. 168.

[6] Sternalski M, Król M. Kolumny żwirowe – technologia przyszłości. Przewodnik Projektanta. 2022; 4: 4 – 7.

[7] Massarsch K, Rainer & Fellenius Bengt. Deep Vibratory Compaction of Granular Soils. Ground Improvement Case Histories: Compaction, Grouting and Geosynthetics. 2005; doi: 10.1016/S1571-9960 (05) 80022-9.

[8] PN-EN 1997-1: 2008 Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne – Część 1: Zasady ogólne.

[9] Gaszewski A, Dziadoń Ł. Geotechnika w trosce o mniejszy ślad węglowy. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne. 2021; 2: 46 – 47.

[10] Gaszewski A. W poszukiwaniu niskoemisyjności pod ziemią. Inżynier Budownictwa. 2022; 9: 79 – 83.

[11] www.geoengineer.org/news/improving-weak-soils-with-columns-of-compacted-crushed-concrete (dostęp: 02.2023 r.).