

**Problematyka zagęszczania i stabilizacji
gruntów w budownictwie.
Technologie i ich skuteczność.
Zasady projektowania i wykonawstwa.**

(Materiały szkoleniowe)

Opracował : Piotr Jermolowicz
e-mail : p.jermolowicz@wp.pl
tel. 501 293 746
www.inzynieriasrodowiska.com.pl
f/InzynieriaSrodowiskaSzczecin

Opole, 23.03.2019 r.

Wstęp

Tematyka procesu zagęszczania gruntów i materiałów drogowych jest bardzo złożona, zależna od wielu czynników i wymagająca szczególnego potraktowania, zwłaszcza, że grunty to środowisko niejednorodne.

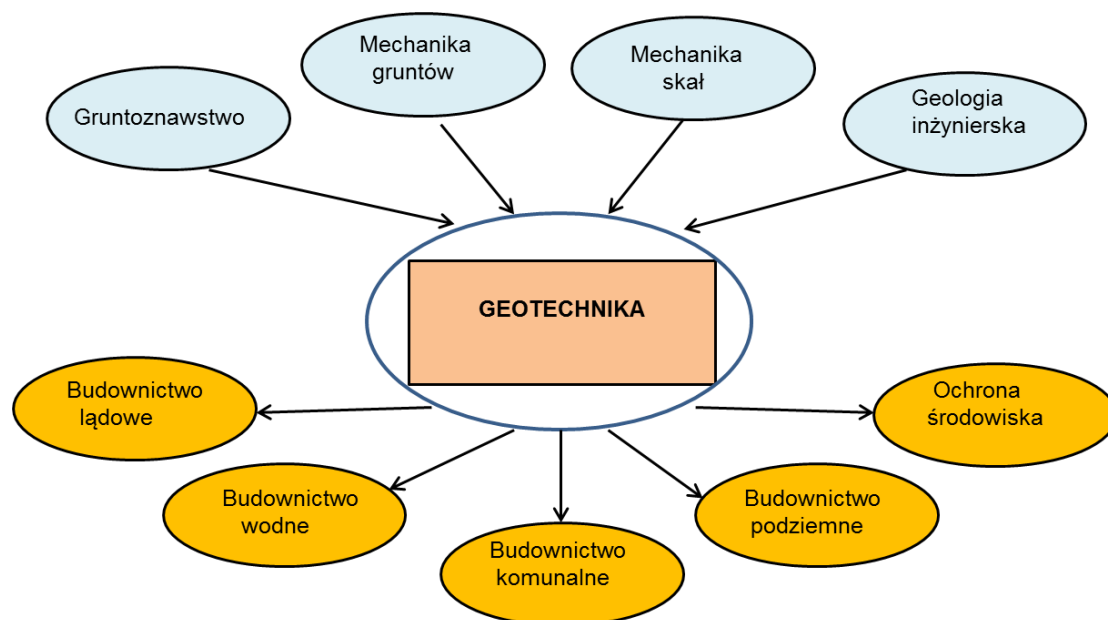
Badania laboratoryjne i polowe prowadzone na odcinkach doświadczalnych wykazały, że od dobrego zagęszczenia gruntów zależy ich nośność i stateczność, a w przypadku gruntów spoistych także większa odporność na działanie wody i mrozu.

Tym samym kolejny raz przekonujemy się, że bez geotechniki i znajomości poszczególnych związków i zależności oraz synergii jaka występuje na granicy wielu dziedzin budownictwa nie można skutecznie działać w zakresie zagęszczania.

Ze względu na to, że geotechnika jako dziedzina nauk ścisłych obejmuje bardzo szeroki zakres zagadnień teoretycznych i praktycznych związanych z badaniem gruntów budowlanych i poznaniem różnych ośrodków badawczych, to sam proces projektowania i wykonawstwa powinien być poparty doskonałym przygotowaniem rzeszy specjalistów z różnych branż co do znajomości związków zachodzących na granicy ośrodek gruntowy – budowla.

Dla prawidłowego rozwiązania każdego zadania geotechnicznego potrzebne jest spełnienie trzech warunków:

- ustalenie układu warstw gruntu i ich właściwych parametrów fizyko-mechanicznych,
- uwzględnienie wszystkich istotnych zjawisk towarzyszących i
- zastosowanie właściwej metody obliczeniowej.



Rys.1. Schemat związków geotechniki i innych dziedzin budownictwa.

W skład geotechniki jako nauki interdyscyplinarnej wchodzi: gruntoznawstwo, mechanika gruntów i fundamentowanie oraz geologia. Prawidłowy proces prac studialnych i projektowych opierać się powinien na analizach i badaniach poczynając od dobrego rozpoznania warunków gruntowo-wodnych podłoża i możliwości wykorzystywania gruntów z wykopów.

Wraz ze wzrostem kubatury wykonywanych robót ziemnych pojawiają się nowe problemy techniczne związane zarówno z projektowaniem, jak i osiągnięciem docelowych parametrów geotechnicznych gruntów. Rozwiązuje się w takich przypadkach szereg zagadnień związanych ze statecznością, odkształcalnością oraz doбором technologii prac gruntowych wraz z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych przedsięwzięć budowlanych.

Podstawową budowlą ziemną jest nasyp budowlany, który jest wykonany z określonego zagęszczonego materiału zasypowego. Nasypy spotykamy zarówno w budownictwie kubaturowym, jak i budownictwie drogowym. Zasadniczą kwestią w przypadku formowania nasypów jest:

- dobór odpowiedniego materiału zasypowego,
- zaprojektowanie parametrów mechanicznych, zapewniających bezpieczną pracę budowli ziemnej z uwagi na stateczność i odkształcalność,
- realizacja budowy zgodnie ze sztuką inżynierską,
- kontrola *in-situ* uzyskanych parametrów geotechnicznych w odniesieniu do wartości zaprojektowanych.

Technologia budowy wielowarstwowych nasypów budowlanych zakłada stosowanie podstawowych zasad technicznych:

- nasyp należy wykonywać metodą warstwową, gdzie grubość pojedynczej warstwy zasypowej powinna być dostosowana do sprzętu zagęszczającego, umożliwiającego uzyskanie odpowiednich parametrów,
- wbudowanie kolejnej warstwy zasypowej nasypu powinno nastąpić po uprzednim osiągnięciu projektowanych parametrów mechanicznych warstwy poprzedniej.

Z zasad tych wynika prawidłowość, że formowanie nasypów należy wykonywać warstwami. Każda kolejna warstwa nasypu może być formowana dopiero wtedy, gdy zostaną osiągnięte zaprojektowane parametry mechaniczne warstwy niższej (spągowej).

1. Dokumentacja geotechniczna i geologiczno-inżynierska.

Wszystkie ostatnio dokonane działania związane ze zmianami legislacyjnymi w zakresie geotechniki służą dokładniejszemu i rzetelnemu rozpoznaniu warunków panujących w podłożu.

Przenosi się to bezpośrednio na podniesienie bezpieczeństwa wznoszonych budowli.

Należy podkreślić, że Ustawa – Prawo budowlane w art. 34, ust 3, pkt 4 już wcześniej definiowała zawartość projektu budowlanego, wprowadzając pojęcie geotechnicznych

warunków posadowienia obiektów budowlanych jako integralnej części projektu architektoniczno-budowlanego.

Począwszy od 2011 r. regulacjom prawnym poddano praktycznie cały proces rozpoznania podłoża i przygotowania inwestycji na podstawie projektowania geotechnicznego wyznaczając odpowiednie grupy zawodowe odpowiedzialne za poszczególne fazy i etapy procesu inwestycyjnego.

Geotechniczna ocena warunków posadowienia stanowi integralną część projektu budowlanego, służącą do właściwego i bezpiecznego zaprojektowania obiektu na podstawie przeprowadzonego rozpoznania podłoża.

Jest ona ustalana na podstawie wszystkich dostępnych danych geologicznych i geotechnicznych, obejmując :

- określenie kategorii geotechnicznej budowli lub jej fragmentów,
- zestawienie informacji i danych liczbowych właściwości gruntów,
- zestawienie wartości charakterystycznych i obliczeniowych parametrów geotechnicznych gruntów w podłożu i w bezpośrednim otoczeniu obiektu.

Warunki posadowienia powinny zawierać zalecenia konstrukcyjne, dotyczące:

- wykonawstwa robót ziemnych i fundamentowych,
- prognozy współoddziaływania konstrukcji z podłożem,
- zachowania się podłoża w czasie budowy i eksploatacji,
- danych koniecznych do ochrony gruntów i wód gruntowych przed zanieczyszczeniem.

Ocena geotechnicznych warunków posadowienia może być zawarta w jednej z form opracowania:

- opinii geotechnicznej, gdy jest dostępne wystarczające rozpoznanie podłoża,
- opinii geotechnicznej z uzupełniającymi badaniami (bez robót geologicznych), jeżeli dostępne rozpoznanie podłoża nie jest wystarczające,
- projektu geotechniczno-konstrukcyjnego stanowiącego część projektu budowlanego.

Zgodnie z zapisami Rozporządzenia MTB i GM w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadowiania obiektów budowlanych z dn. 25 kwietnia 2012 r. (Dz. U z 2012 r. poz. 463), dla obiektów budowlanych wymagających wykonania robót geologicznych, zaliczonych do III kategorii geotechnicznej oraz w złożonych warunkach gruntowych do II kategorii geotechnicznej, poza dokumentacją geotechniczną należy wykonać dokumentację geologiczno-inżynierską, opracowaną według odrębnych przepisów.

Istotnym zadaniem jest określenie wartości parametrów geotechnicznych (charakterystycznych i obliczeniowych) wszystkich warstw podłoża (także „nienośnych”) z oceną potrzeby redukcji czy modyfikacji tych parametrów w dostosowaniu do konstrukcji i zachowania budowli. Dokumentacja może też zawierać zalecenia rozwiązań konstrukcyjnych lub projekt fundamentów, poparty odpowiednimi analizami obliczeniowymi, oraz prognozę współdziałania konstrukcji z podłożem i jej zachowania w czasie budowy i eksploatacji,

ewentualnie wskazówki dotyczące sposobu poprawy lub modyfikacji warunków podłoża oraz wytyczne rozwiązywania problemów geotechnicznych mogących pojawić się w trakcie robót. Zgodnie z § 3 ust 1 rozporządzeniem MTB i GM w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych z dn. 25 kwietnia 2012 r. zakres czynności przy ustalaniu geotechnicznych warunków posadawiania (w zależności od sytuacji projektowej) obejmuje:

- kwalifikację obiektu budowlanego do odpowiedniej kategorii geotechnicznej,
- projektowanie odwodnień budowlanych, barier lub ekranów uszczelniających,
- ocenę przydatności gruntów na potrzeby wykonywania budowli ziemnych,
- określenie nośności, przemieszczeń i ogólnej stateczności podłoża gruntowego,
- ocenę stateczności zboczy, skarp i wykopów i nasypów,
- ustalenie wzajemnych oddziaływań obiektu budowlanego i podłoża gruntowego, obiektu budowlanego i wód gruntowych, obiektu budowlanego i sąsiadujących z nim innych obiektów budowlanych na różnych etapach budowy i eksploatacji,
- wybór metody wzmacniania podłoża gruntowego i stabilizacji zboczy, skarp wykopów i nasypów,
- ocenę stopnia zanieczyszczenia podłoża gruntowego i dobór metody oczyszczenia gruntu.

Paragraf 3 ust. 3 rozporządzenia MTB i GM w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych z dn. 25 kwietnia 2012 r. określa formy przedstawienia geotechnicznych warunków posadowienia, wprowadzając pojęcia: opinii geotechnicznej, dokumentacji badań podłoża gruntowego i projektu geotechnicznego. Zarówno forma przedstawienia geotechnicznych warunków posadowienia, jak i zakres niezbędnych czynności dla ich określenia uzależnione są od kategorii geotechnicznej obiektu budowlanego (§ 3 ust. 2 i 4).

Pojęcie kategorii geotechnicznej jest kluczowe w przedmiotowym rozporządzeniu MTB i GM w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych z dn. 25 kwietnia 2012 r. Kategorię geotechniczną ustala się w zależności od stopnia skomplikowania warunków gruntowych, konstrukcji obiektu budowlanego, wartości technicznej i zabytkowej obiektu budowlanego oraz możliwości znaczącego oddziaływania obiektu na środowisko (§ 4 ust. 1). W § 4 ust. 2 określone zostały warunki gruntowe w zależności od stopnia ich skomplikowania (proste, złożone, skomplikowane), natomiast § 4 ust. 3 rozporządzenia MTB i GM w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych z dn. 25 kwietnia 2012 r. określa zasady zaliczania obiektów budowlanych do pierwszej, drugiej i trzeciej kategorii geotechnicznej, z uwzględnieniem stopnia skomplikowania warunków gruntowych i pozostałych kryteriów.

W zależności od przyjętej kategorii geotechnicznej rozporządzenie MTB i GM w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych z dn. 25 kwietnia 2012 r. określa zakres niezbędnych badań geotechnicznych (§ 6).

Wyniki badań geotechnicznych, zgodnie z uregulowaniami niniejszego rozporządzenia (§ 7), sporządza się w formie:

- opinii geotechnicznej (zdefiniowanej w § 8 rozporządzenia) dla wszystkich kategorii geotechnicznych;
- dokumentacji badań podłoża gruntowego (zdefiniowanej w § 9 zgodnej z PN-EN 1997-2: 2009) dla drugiej i trzeciej kategorii geotechnicznej;
- projektu geotechnicznego (zdefiniowanego w § 10) dla drugiej i trzeciej kategorii geotechnicznej.

Ponadto w § 7 ust.3 rozporządzenia MTB i GM w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych z dn. 25 kwietnia 2012 r. dla obiektów zaliczonych do drugiej kategorii geotechnicznej w złożonych warunkach gruntowych oraz obiektów zaliczonych do trzeciej kategorii geotechnicznej ustawodawca określił konieczność sporządzenia odrębnej dokumentacji geologiczno-inżynierskiej zgodnie z przepisami Ustawy – Prawo geologiczne i górnicze z 9.06.2011 r.

Ze względu na zapis w § 9 Rozporządzenia mówiący, iż badania i dokumentacja mają być zgodne z Eurokodem 7, to badania terenowe i pobieranie próbek gruntów do badań laboratoryjnych powinny odpowiadać odpowiednim klasom jakości, czyli od A1 do C5, w zależności od rozpatrywanego parametru fizyko-mechanicznego.

Problem odpowiedniego pobierania prób o przelocie ciągłym (rdzeniowy) dotyczy większości opracowań. Należy zwrócić szczególną uwagę na jakość robót geologicznych z uwagi na warunki glaciektoniczne panujące na rozpatrywanym terenie.

Chcąc ustrzec się od typowej praktyki geotechnicznej, gdzie nadal (nieprawnie) parametry gruntów są odczytywane z tablic lub są badane na próbkach dostarczanych w woreczkach z naruszoną strukturą i wilgotnością, należy tym bardziej podkreślać ten problem.

Przykładowo zaleca się przyjmowanie następujących głębokości badań:

- w przypadkach sprawdzenia stateczności podłoża - 5 m poniżej najgłębszych prawdopodobnych powierzchni poślizgu,
- przy głębokim posadowieniu obiektów - co najmniej 5 m poniżej przewidywanego zagłębienia podstaw pali, studni opuszczonych, ścianek szczelnych, ścian szczelinowych, innych,
- w innych przypadkach głębokość rozpoznania można określić podobnie jak dla II kategorii geotechnicznej.

W celu wyznaczenia metodą laboratoryjną parametrów fizyko-mechanicznych gruntów każdej wydzielonej warstwy geotechnicznej trzeba przewidzieć pobranie co najmniej sześciu próbek, z użyciem metody A -1 klasy jakości, umożliwiających wykonanie badań parametrów wytrzymałościowych oraz odkształceniowych warstwy (tablica 1).

Tab. 1. Klasy jakości próbek wymagane dla określenia właściwości gruntów [14]

Właściwość gruntu / Klasa jakości	1	2	3	4	5
Charakterystyki gruntu:					
Uziarnienie	*	*	*	*	
Wilgotność	*	*	*		
Gęstość, wskaźnik lub stopień zagęszczenia, przepuszczalność	*	*			
Ścisłość, wytrzymałość na ścinanie	*				
Właściwości, które mogą być określone:					
Następstwo warstw	*	*	*	*	*
Granice warstw – przybliżone	*	*	*	*	
Granice warstw – dokładne	*	*			
Granice Atterberga, gęstość właściwa, zawartość części organicznych	*	*	*	*	
Wilgotność	*	*	*		
Gęstość, wskaźnik zagęszczenia, porowatość, przepuszczalność	*	*			
Ścisłość, wytrzymałość na ścinanie	*				
Kategorie pobierania próbek gruntu zgodnie z EN ISO 22475-1	A				
				B	
					C

Objaśnienia do tablicy 1 :

1 – nienaruszone, 2 – naruszone, 3 – zagęszczone, 4 – przerobione, 5 – odtworzone.

Metoda A - próbki pobierane bez naruszania struktury gruntu z zachowaną wilgotnością i porowatością,

Metoda B - próbki z zachowaną wilgotnością i składem ziarnowym,

Metoda C - próbki umożliwiające jedynie określenie składu ziarnowego.

Należy dążyć by na próbkach z każdej wstępnie wydzielonej warstwy geotechnicznej wykonać minimum pięć badań trójosiowych lub/i konsolidometrycznych lub innych, przy czym metodyka badań powinna być dostosowana do zadania geotechnicznego. W przypadku warstw mogących mieć jedynie drugorzędny wpływ na wnioski dotyczące podłoża, zakres prac może być zmniejszony.

Jeśli warstwy wodonośne występują powyżej poziomu posadowienia (również pali, studni itp.), należy przewidzieć pobranie próbek wody z każdej warstwy w celu zbadania jej agresywności.

Należy również rozważyć potrzebę wykonania badań i pomiarów hydrogeologicznych, a szczególnie:

- pobrania próbek gruntów niespoistych w celu określenia ich współczynnika filtracji metodami empirycznymi lub laboratoryjnymi,
- obserwacji i pomiarów prędkości dopływu wody do otworu badawczego oraz polowych badań wodochłonności i nasiąkliwości warstw,
- próbnych pompowań w badawczych studniach depresyjnych,
- badań geofizycznych.

Przy wszystkich problemach nietypowych mogą być projektowane badania specjalne w celu rozwiązania konkretnego zadania.

W projekcie **robót** geologicznych należy przewidzieć obserwacje, badania i pomiary geotechniczne, jakie będą prowadzone w czasie budowy i podczas eksploatacji obiektu (np. pomiary osiadań, obserwacje procesów geodynamicznych, pomiary hydrogeologiczne itp.).

Przewidziane w projekcie badania laboratoryjne, w połączeniu z badaniami polowymi, powinny umożliwić empiryczne wyznaczenie parametrów wydzielonych warstw geotechnicznych. Zakres badań laboratoryjnych należy rozszerzyć o badania specjalne (np. rozmakanie, pęcznienie, skurcz, ciśnienie pęcznienia, oznaczanie wskaźnika osiadania zapadowego itp.), jeśli przewiduje się, że w warunkach pracy podłoża charakterystyki te będą miały znaczenie.

Wykonywanie badań

Badania należy wykonywać zgodnie z projektem. W przypadku stwierdzenia istotnych różnic budowy geologicznej w porównaniu z przewidywaną w projekcie prac, należy ich zakres na bieżąco uaktualniać. W razie konieczności powiększenia zakresu badań należy stosować zasadę stopniowego zwiększania szczegółowości rozpoznania podłoża gruntowego, a więc zagęszczać badania w miarę postępu prac. Należy rejestrować wszelkie niezgodności planu sytuacyjno-wysokościowego ze stanem rzeczywistym oraz zjawiska i fakty, które mogą mieć wpływ na bezpieczeństwo i trwałość projektowanej budowli. Badania laboratoryjne wykonuje się według projektu badań, zgodnie z normami. W przypadku badań nietypowych (specjalnych) należy wraz z wynikami podać szczegółowe dane dotyczące metodyki badań.

Następnie przeprowadzana jest ocena warunków geologiczno-inżynierskich (wraz z graficznym ich przedstawieniem na mapach i przekrojach) i wreszcie przedstawiane wnioski. Wśród nich także zalecenia dotyczące sposobu posadawiania obiektów, zakresu wymiany gruntów, zalegania gruntów nośnych dla fundamentów palowych, zakresu wzmocnienia podłoża, potrzeby nadzoru geotechnicznego prac ziemnych itp. „Instrukcja” w interesujący, syntetyczny sposób wskazuje na trzy niezbędne w każdej dokumentacji zawierającej wyniki badań „części merytoryczne”. Są to (z pewnymi skrótami):

- dane projektowe i wyniki badań podłoża,
- analiza i krytyczna ocena wyników badań oraz wskazanie niezbędnych badań uzupełniających,
- wnioski i zalecenia projektowe i weryfikacja kategorii geotechnicznej.

Warto zwrócić uwagę na ten środkowy punkt (pozostałe w wielu aspektach omówiono powyżej), gdyż wskazuje na bardzo ważny obowiązek geologa (czy geotechnika) – dokumentatora. Autorzy dokumentacji muszą zdawać sobie sprawę, że projektant często nie tylko wykorzystuje parametry wyprowadzone dotyczące wydzielonych warstw geotechnicznych, ale także wprowadza do swoich obliczeń parametry, które znajduje rozproszone w dokumentacji. Mogą to być na przykład wartości oporu na ścinanie pomierzone w terenie sondą obrotową (VT), laboratoryjne oznaczenia współczynnika filtracji, modułu edometrycznego itp. Właśnie z tego powodu w dokumentacji niezbędna jest

krytyczna ocena wyników badań i dopuszczenie (lub nie) danych wartości do stosowania w projektowaniu. Autor dokumentacji wykonywanej na etapie podstawowym ma nie tylko prawo, ale i obowiązek wskazania tych elementów rozpoznania, które zawierają największy element niepewności i powinny zostać uściślone lub sprawdzone. Realizując zapis § 8.2. Rozporządzenia MSWiA w opisanej wyżej sytuacji należy w „Programie badań geotechnicznych” wykorzystać zawarte w Dokumentacji geologiczno- inżynierskiej zapisy dotyczące niezbędnych badań uzupełniających. Ich realizacja pozwoli na uściślenie wniosków geotechnicznych i przeprowadzenie stosownych obliczeń. Jeśli zakres badań zrealizowany w Dokumentacji geologiczno-inżynierskiej jest wystarczający, a ich wyniki nie budzą wątpliwości - Dokumentacja geotechniczna będzie miała charakter Projektu geotechnicznego. Powyższe nie oznacza rezygnacji z badań geotechnicznych, które będą prowadzone po rozpoczęciu budowy w ramach nadzoru geotechnicznego.

2. Rozbieżności i błędy w rozpoznawaniu podłoża gruntowych.

Dlaczego poruszam ten problem ?

Za dużo jest praktyk w tym zakresie, których źródłem jest powszechność przyzwolenia i rozstrzygnięcia przetargów za najniższą cenę.

W programowaniu badań geotechnicznych powinno uwzględniać się zasady:

- bezpieczeństwo konstrukcji,
- bezpieczeństwo wykonania i
- ekonomikę.

Typowym zjawiskiem jest to, że inwestor zainteresowany jest głównie bezpieczeństwem ale za najniższą cenę badań geotechnicznych. Ta podstawowa sprzeczność prowadzi często do znacznego ograniczenia badań terenowych i laboratoryjnych, a w konsekwencji do przeszacowania spodziewanych osiadań fundamentów bezpośrednich lub niedoszacowania nośności pali.

Fakt ten wynika również ze słabej wiedzy projektantów, często i geotechników o prawidłowościach w doborze odpowiednich technik badań „in situ” i o różnicowaniu parametrów mechanicznych, które opisują właściwości podłoża gruntowego.

Zasadnicze mankamenty wielu dokumentacji geotechnicznych wynikają z błędów popełnianych już na etapie programowania badań oraz przy ich realizacji. Niewłaściwie zaprogramowane badania prowadzą do:

- ograniczenia do minimum zakresu prac terenowych, co skutkuje nadinterpretacją uzyskanych informacji i przeoczeniami geotechnicznymi,
- wykonywania dużej liczby płytkich otworów (np. pod fundamenty palowe),
- rozplanowania otworów na rzucie projektowanych podpór (pominięcie w badaniach terenu poza obrysem fundamentu miejsc ewentualnych podpór tymczasowych),
- pomijania w badaniach gruntów nienośnych, bez podania szczegółowego opisu i nieustalenia ich parametrów geotechnicznych.

Błędy w realizacji badań terenowych dotyczą:

- niewłaściwego sposobu wykonania otworów badawczych, wykonywania wierceń bez orurowania, co daje zafałszowany obraz stosunków wodnych i stanu gruntów (zwłaszcza spoistych),
- kurczowego trzymania się ustalonego umową zakresu robót, co często ogranicza możliwość precyzyjnego określenia zasięgu gruntów słabych (w planie i z głębokością),
- kończenia wierceń w gruntach nienośnych, co czyni badania nieprzydatnymi do projektowania, bądź prowadzi do znacznego przewymiarowania elementów posadowienia,
- kończenia wierceń na głębokościach, które pozwalają na obliczenie nośności pojedynczego pala, a nie pozwalają na obliczenie osiadań grup palowych.

Błędy powstałe na etapie badań laboratoryjnych i prac kameralnych wynikają z:

- wykonywania badań laboratoryjnych, które nie odpowiadają potrzebom norm,
- niewykonywania badań granicy skurczalności w gruntach w stanie półzwartym, co uniemożliwia właściwe projektowanie według normy,
- pomijania wyznaczania cech gruntów nienośnych (nasypów, namulów, torfów), co uniemożliwia projektowanie ich wzmacniania oraz obliczanie parć przy projektowaniu zabezpieczeń wykopów,
- niestosowania zaawansowanych metod badawczych,
- braku możliwości bezpośredniego wykorzystania wyników badań dylatometrycznych, presjometrycznych i badań sondą statyczną CPT (np. przy projektowaniu fundamentów palowych),
- unikania nowoczesnych metod badań podłoża na rzecz stosowania zależności korelacyjnych;
- niewłaściwego pobierania i ograniczania liczby próbek do badań laboratoryjnych.

Wyniki rozpoznania terenu są podstawą do obliczeń prowadzonych przez osobę, której doświadczenie związane z geologią czy geotechniką nie jest duże i nie ma ona podstaw do podważenia wiarygodności badań. Taki jest ekonomiczny aspekt problemu związanego z rozpoznaniem podłoża. Przesadą byłoby stwierdzenie, że oszczędności, które mogą wystąpić dzięki dobremu rozpoznaniu, są na poziomie kilku tysięcy procent. Jest to wręcz rzadkość. Niemniej jednak regułą jest oszczędność lub przynajmniej pozostawienie kosztów na podobnym poziomie przy jednocześnie bardziej racjonalnym projektowaniu. Dotyczy to zwłaszcza obiektów zaliczonych do wyższej niż pierwsza kategorii geotechnicznych lub posadowionych w złożonych lub skomplikowanych warunkach gruntowych.

Przy okazji warto dodać, że niejednokrotnie przeprowadzania rozpoznania podłoża podejmują się osoby, które bądź nie mają w danych warunkach wystarczających kwalifikacji, bądź też nie dysponują odpowiednim sprzętem. Zdarza się przekonywanie projektanta, że proponowane rozpoznanie będzie wystarczające do racjonalnego projektowania. Autor niejednokrotnie zetknął się z badaniami, w których bazą do określenia cech

wytrzymałościowych gruntu były tzw. parametry wiodące określone za pomocą waleczkowania na placu budowy. Przy tym próbki pobrane były z wierceń wykonanych bez użycia rur obsadowych. Oznacza to, że próbki te nie tylko mają naruszoną strukturę, ale często również wilgotność. Podobnie zdarza się, że osoba wykonująca badania gruntu dokumentuje występowanie gruntów oznaczonych symbolem C, chociaż w opracowaniu pisze, że są to gliny pochodzenia lodowcowego, a więc skonsolidowane lub częściowo prekonsolidowane. Odrębnym zagadnieniem jest to, że parametry wytrzymałościowe przepisane dokładnie z normy są przeznaczone do projektowania posadowień bezpośrednich. Oczywiście osoba posiadająca pewne doświadczenie jest zwykle w stanie określić rodzaj i wielkość koniecznego zabezpieczenia wykopu również z wykorzystaniem takich parametrów. Coraz częściej też firma wykonawcza we własnym zakresie zleca przeprowadzenie badań laboratoryjnych z wykorzystaniem aparatu trójosiowego. W świetle poczynionych uwag można spróbować powiedzieć coś o przyczynach takiego stanu rzeczy.

Pierwszym problemem jest sposób, w jaki praktykuje się w Polsce planowanie rozpoznania warunków gruntowych. Opracowanie programu rozpoznania podłoża leży po stronie projektanta. Zwykle dzieje się to we współpracy z geologiem. Projekt czy program jest później podstawą do sporządzenia dokumentacji geologiczno-inżynierskiej bądź geotechnicznej. I również projektant ponosi koszt wszelkich badań wykonywanych na potrzeby tej dokumentacji. Najczęściej stanowi to część kosztów projektowania i siłą rzeczy projektant jest zainteresowany, aby koszt ten był możliwie najniższy. Ten najniższy koszt rozpoznania warunków geologicznych związany jest niejednokrotnie z pewną ilością założeń upraszczających. Z oczywistych względów założenia te czynione są po stronie bezpiecznej (np. założenie, że glina jest nieskonsolidowana). Efektem jest przerzucenie kosztów na inwestora, ponieważ otrzymuje on konstrukcję przewymiarowaną.

Pojawiają się tutaj dwa pytania. **Po pierwsze**, kto lub co ponosi odpowiedzialność za tą sytuację? **I po drugie**, jak wyeliminować problem? Niesprawiedliwością byłoby stwierdzenie, że przyczyną jest wyłącznie sposób działania biur projektowych.

Kryterium wyboru projektanta jest bardzo często cena, a biura projektów, jako podmioty gospodarcze, zmuszone są dostosować się do realiów rynku. Zdaniem autora jednym z głównych problemów jest przyjęta w Polsce praktyka zlecania badań terenowych w ten sposób, że ich koszt jest częścią kosztów projektowania. Na to nakłada się nieświadomość inwestorów, którzy ze zrozumiałych względów starają się obniżyć koszty inwestycji, a w istocie z reguły je zawyżają. Są też inne czynniki, np. normowa metoda określania parametrów gruntu. W niektórych wypadkach (na szczęście rzadkich) dodatkowo problem stanowi nierzetelność geologów podających parametry gruntu.

Podsumowując dotychczasowe zapisy należy wyraźnie podkreślić, że koszty badań geologicznych powinien ponieść bezpośrednio inwestor, nie zaś wybrany w przetargu „projektant”.

Takie podejście jest ze wszech miar korzystne. Inwestor zyskuje najwięcej, ale i o to chodzi. Zakres rozpoznania geotechnicznego będzie zawsze zgodny z charakterem inwestycji, gdyż na linii Inwestor – Przedsiębiorstwo geologiczne będzie osiągnięty konsensus co do ilości robót terenowych i laboratoryjnych poparty doświadczeniem i odpowiedzialnością za opracowanie bez znamion wadliwości.

3. Warunki zagęszczalności gruntów.

Nowoczesne metody budowy korpusów ziemnych (nasypów drogowych, zapór ziemnych itp.) polegają na odpowiednim wbudowaniu gruntów i ich zagęszczeniu w celu maksymalnego wykorzystania wytrzymałości gruntów z zapewnieniem całkowitej stateczności wykonywanych budowli w najbardziej niekorzystnych warunkach ich pracy.

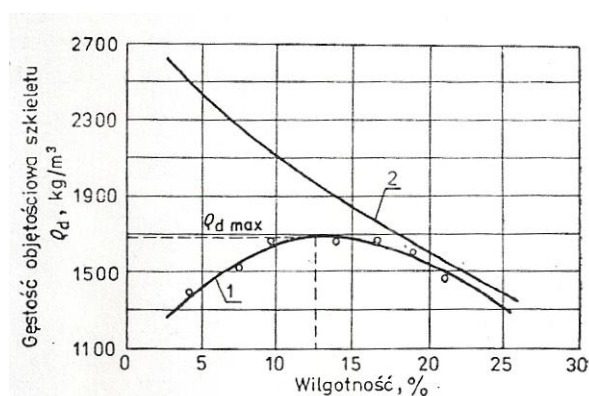
W przypadku nasypów drogowych chodzi nie tylko o zapewnienie stateczności korpusu, lecz i nośności gruntu pod nawierzchnią drogową lub kolejową.

W przypadku zapór ziemnych stateczność korpusu zapory i jego elementów decyduje o bezpieczeństwie obiektu w warunkach napełnienia zbiornika wodą i jego opróżniania.

Podczas mechanicznego zagęszczania gruntu, np. przy budowie nasypu lub makroniwelacji grunt ulega zagęszczeniu. Jakość (stopień) zagęszczenia mierzy się w stosunku do największego, możliwego do uzyskania. Maksymalne, teoretycznie możliwe zagęszczenie można by uzyskać przy całkowitym wyeliminowaniu porów, co jest jednak praktycznie niemożliwe.

W rzeczywistości znaczną część próbki stanowią pory. Wskutek tego gęstość właściwa ρ_s i objętościowa ρ różnią się znacznie. W celu zwiększenia zagęszczenia gruntu, a tym samym zmniejszenia jego porowatości, trzeba pokonać tarcie między cząstkami, a w gruntach spoistych także oddziaływanie wody zawartej w porach (ciśnienie kapilarne i siły międzycząstkowe)

Przy zagęszczeniu tego samego gruntu w jednakowy sposób i z jednakową energią uzyskuje się różne zagęszczenie, zależne od wilgotności gruntu. W przypadku gruntów spoistych i niektórych gruntów sypkich można znaleźć taką wilgotność, przy której uzyskuje się największe zagęszczenie. Wilgotność taką nazwano wilgotnością optymalną w_{opt} . Wpływ wilgotności na zagęszczenie wyrażone gęstością objętościową szkieletu gruntowego ρ_d przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Wpływ wilgotności na zagęszczenie gruntu [3]

1-krzywa zagęszczenia, 2- krzywa całkowitego nasycenia (teoretycznie maksymalne zagęszczenie)

Na wykresie Proctora przedstawiono rzeczywiste możliwe do zrealizowania zagęszczenie. Wykres ten różni się znacznie od wykresu maksymalnego, teoretycznego zagęszczenia, zwanego niekiedy krzywą całkowitego nasycenia, która odpowiada gruntowi nie zawierającemu powietrza w porach i mającemu stopień wilgotności $S_r = 1$.

Linie całkowitego nasycenia określa się wyrażeniem:

$$\rho_d = \frac{100 \rho_s \rho_w}{w \rho_s + 100 \rho_w}$$

w którym: ρ_d - maksymalna, teoretyczna gęstość szkieletu gruntu przy danej wilgotności,
 ρ_s - gęstość właściwa gruntu,
 ρ_w - gęstość właściwa wody,
 w - wilgotność.

Porównując obie krzywe z rys.2, można stwierdzić, że grunt o wilgotności większej od optymalnej można zagęścić do wartości bliskich teoretycznym, co oznacza, że wówczas w gruncie jest mało porów wypełnionych powietrzem. Jeżeli grunt zagęszczony ma wilgotność mniejszą od optymalnej, to różnica między uzyskiwanym zagęszczeniem ρ_d a wartością teoretyczną wynikającą z krzywej całkowitego nasycenia jest znacznie większa. W tym przypadku woda otacza cząstki gruntu tylko cienką błonką, która w gruntach spoistych znacznie zwiększa siły między cząstkami i utrudnia zagęszczenie.

3.1. Przydatność gruntów i ich rozmieszczenie w nasypach.

Przed wszystkim względy ekonomiczne wykonawców przemawiają za tym, by grunt uzyskany z wykopów był w całości wbudowany w jak najbliższe położone nasypowe partie korpusu drogi lub do makroniwelacji. Nie zapominając o ekonomicznej stronie budowy, należy jednak przede wszystkim zapewnić wysoką jakość nasypów, a to wyklucza jakąkolwiek przypadkowość przy ich formowaniu. Tak więc przed decyzją o wbudowaniu gruntu w nasyp należy: rozważyć, czy właściwości danego gruntu kwalifikują go do tego. Można przyjąć następujący podział.

Grunty grupy a) - nie nadające się do nasypów - to:

- iły o granicy płynności powyżej 65%,
- grunty niezagęszczalne, których zagęszczenie maksymalne jest mniejsze niż 1,6 g/cm³
- grunty organiczne.

Grunty grupy b) - mało przydatne grunty spoiste, o wilgotności naturalnej o tyle wyższej od w_{opt} , że bez osuszenia/ulepszenia nie zapewniają możliwości uzyskania wymaganego wskaźnika zagęszczenia I_s .

Grunty grupy c) - dobre - wszystkie grunty spoiste o wilgotności bliskiej w_{opt} ($0,9 w_{opt} \leq w_n \leq 1,1 w_{opt}$), które bez dodatkowych zabiegów można wbudować w nasyp, uzyskując wymagany wskaźnik zagęszczenia I_s ,

Grunty grupy d) - bardzo dobre - piaski, pospółki i żwiry; dają się łatwo zagęszczać i są mało wrażliwe na zawilgocenie.

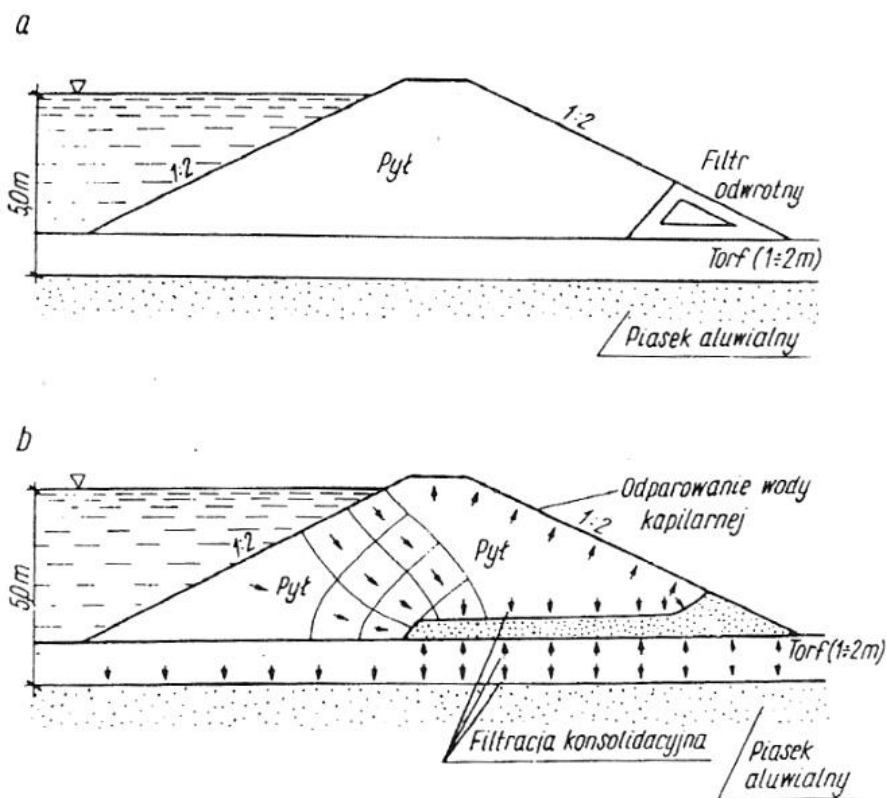
W naszych warunkach klimatycznych grunty spoiste, z wyjątkiem utworów zwałowych (glin morenowych), są najczęściej zbyt zawilgocone (utwory zastoiskowe) lub zalegają w takich warunkach (pod warstwami lub między warstwami nawodnionych piasków), że w czasie urabiania łatwo mogą ulec nadmiernemu zawilgoceniu. Szczególną uwagę należy zwrócić na stopień wilgotności pyłów, występujących w wykopach, gdzie przewiduje się pracę ciężkiego sprzętu (zgarniarek, ciężkich wywrotek). Zbyt zawilgocone pyły łatwo ulegają falowaniu; koła pojazdów zapadają się i podłoże staje się nieprzejezdne zarówno w wykopie, jak i na nasypie. Aby grunty urabiane nie uległy zawilgoceniu, należy rozważyć możliwość i celowość odpowiednio wcześniejszego wgłębnego (studnie depresyjne) lub powierzchniowego odwodnienia wykopu.

W niektórych przypadkach wcześniejsze odwodnienie wgłębne może spowodować dodatkową konsolidację i osuszenie przewilgoconych warstw, co polepszy ich stan w wykopie i zagęszczalność w nasypach. Należy więc już w czasie opracowania projektu przewidzieć sposoby wgłębnego i powierzchniowego odwodnienia terenu robót ziemnych.

W czasie projektowania robót ziemnych należy zwrócić uwagę na odpowiednie rozmieszczenie gruntów w korpusach ziemnych, uwzględniając następujące wytyczne:

- grunty grupy a) nie powinny być w ogóle używane i należy je przeznaczać na odkład, jeżeli nie zostaną zabezpieczone przed kontaktem z wodą lub ulepszone dodatkami wapna lub innymi stabilizatorami,
- grunty grupy b), nie spełniające warunków określonych w grupie c, mogą być wbudowane w niższą partię nasypów pod warunkiem, że zostaną przewarstwione bardziej przepuszczalnymi gruntami, co zapewni ich konsolidację we właściwym okresie przed rozpoczęciem eksploatacji budowli,
- grunty grupy c) mogą być wbudowane na dowolnym poziomie nasypu, lecz zaleca się użyć ich poniżej głębokości przemarzania,
- do głębokości przemarzania nasypu powinno się w zasadzie wbudowywać grunty sypkie niewysadzinowe ($< 3\%$ cząstek o średnicy $< 0,002$ mm), grunty wątpliwe zaś ($3 \div 10\%$ cząstek o średnicy $< 0,002$ mm i o kapilarności biernej poniżej 1,3 m) - tylko w korzystnych warunkach wodnych,
- bezpośrednio pod nawierzchnią (do głębokości $20 \div 50$ cm) grunt niewysadzinowy powinien ponadto mieć wskaźnik różnoziarnistości większy niż $5 \div 7$ oraz wskaźnik wodoprzepuszczalności powyżej 8 m/dobę,
- w warstwach nasypu nie powinny występować gniazda gruntów zasadniczo różnych od gruntów je otaczających, o czym należy pamiętać zwłaszcza przy zasypywaniu lokalnych wklęsłości terenu; nasyp powinien być sypany warstwami z gruntów jednorodnych, o grubości dostosowanej do sprawności maszyn zagęszczających,
- warstwy powinny być sypane równomiernie na całej szerokości korony nasypu, ze spadkiem poprzecznym daszkowym ok. 4%, starannie wyrównywane i natychmiast zagęszczane.

Jako przykład możliwości użycia gruntów grupy b do budowy nasypów może służyć rozwiązanie, zastosowane przy budowie kanału Łączany-Jaworzno (1964). Do budowy wałów użyto wtedy pyłów i glin pylastych z wykopów pod kanał. Grunty te były tak nawodnione, że po przywiezieniu na miejsce wbudowywania w nasyp wału tworzyły płynną masę.



Rys.3. Przekroje poprzeczne wału [13]
a- według projektu, b- według zaleceń Wiłuna

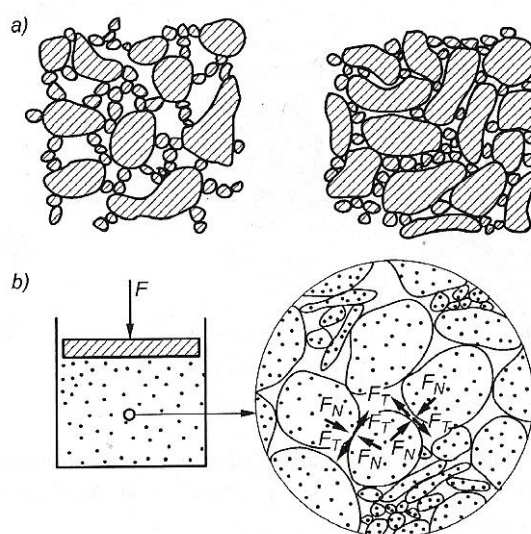
Zastosowano tam drenaż poziomy z piasku, sięgający od projektowanego drenażu do środka podstawy wału. Uzyskano w ten sposób ułatwiony odpływ wody z warstwy torfu pod wałem i z dolnej części wału, co przyspieszyło konsolidację tych gruntów i zwiększyło ich wytrzymałość na ścinanie; górna połowa wału osuszyła się wskutek odparowywania wody ze skarpy i korony nasypu.

Badania wytrzymałości na ścinanie za pomocą sondy krzyżakowej ITB-ZW wykazały 2 ÷ 3-krotnie większy opór ścinania w części odpowietrznej, niż w części odwodnej wału. Kanał po napełnieniu wodą pracował bez awarii. W tym przypadku grunt został zmuszony do zwiększenia swojej nośności. Wynika stąd możliwość polepszenia nośności i stateczności nasypów z gruntów zbyt wilgotnych przez stosowanie warstw drenujących z piasków lub pospółek, jeżeli nie ma możliwości użycia właściwych gruntów.

W czasie projektowania korpusów ziemnych należy zwrócić uwagę na zapewnienie stateczności skarp wykopów i nasypów. W przypadku gruntów nasypowych obliczenia stateczności przeprowadza się na podstawie właściwości fizyko-mechanicznych gruntów zagęszczanych.

3.2. Warunki zagęszczalności gruntów.

Pod działaniem obciążenia statycznego odkształcenie podłoża gruntowego rozpoczyna się od przemieszczenia (uszczelnienia) ziarn i cząstek gruntu (rys. 4) w momencie, gdy - po wyparciu i sprężeniu powietrza oraz po wyparciu wody z porów - ziarna i cząstki gruntu przejmują obciążenie. Z uwagi na chaotyczne rozmieszczenie ziarn i cząstek w masie gruntowej oraz na różnorodność ich wymiarów i właściwości - proces ten może być analizowany jedynie w ujęciu statystycznym. W wyniku przemieszczenia cząstek i ziarn gruntu zachodzi niszczenie słabszych cząstek ziarn, zatem proces ten jest nieodwracalny.



Rys.4. Proces zagęszczania przy oddziaływaniu statycznym: a) przemieszczenie ziarn gruntu (uszczelnianie), b) siły działające na ziarna w masie gruntowej. [9]

Naprężenia niszczące strukturę gruntu koncentrują się na powierzchni ziarn szkieletu. O wytrzymałości gruntu na ścinanie decyduje wartość naprężeń występujących w płaszczyźnie zniszczenia. Stąd wytrzymałość gruntu na ścinanie τ_f określana jest uogólnionym wzorem Coulomba:

$$\tau_f = c + \sigma \operatorname{tg} \varnothing$$

gdzie:

- c - spójność gruntu, [kPa],
- σ - naprężenie normalne, [kPa],
- $\varnothing$ - kąt tarcia wewnętrznego, $[\text{°}]$.

Ze względu na różne właściwości gruntów, stosuje się różne metody w celu uzyskania odpowiedniego ich zagęszczenia (maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego), w zależności od energii, sposobu jej przekazania, a także rodzaju gruntu i jego wilgotności. Uzyskanemu zagęszczeniu przy zadanej wilgotności odpowiadają parametry geotechniczne

zapewniające odpowiednią nośność i odkształcalność podłoża. Z tego powodu w praktyce budowlanej do zagęszczania podłoża stosuje się różne maszyny o odmiennym sposobie oddziaływania oraz różne techniki zagęszczania. Stosuje się maszyny: ugniatające (walce gładkie, okołkowane, ogumione), wibracyjne (walce, płyty) i ubijające (płyty wolnospadowe, ubijaki). Pierwszy typ maszyn stosuje się przeważnie do zagęszczania w nasypach gruntów spoistych, drugi przeważnie do zagęszczania gruntów niespoistych (sypkich) drobnoziarnistych i gruboziarnistych oraz gruntów kamienistych. Ostatnio walce wibracyjne ciężkie stosuje się też do zagęszczania gruntów spoistych. Stosowane w praktyce budowlanej sposoby zagęszczania można podzielić na grupy o różnym oddziaływaniu.

Tablica 1. Rodzaje oddziaływania i maszyny do zagęszczania [9]

Rodzaj oddziaływania	Maszyny do zagęszczania
Statyczne	walce gładkie, okołkowane, kołowe i ogumione; ciągnione i samojezdne; ciągniki gąsiennicowe i kołowe
Wibracyjne	płyty wibracyjne (samobieżne, ciągnione), walce wibracyjne (gładkie, okołkowane, na kołach ogumionych), wibratory wgłębne
Udarowe	ubijaki swobodne i spadające (grawitacyjne), ubijaki elektryczne i spalinowe, ubijaki pneumatyczne
Hydromechaniczne i wybuchowe	miotacze wodne, ładunki wybuchowe

4. Nasypy budowlane i makroniwelacja.

Nasypem nazywamy warstwę lub zaprojektowaną budowlę ziemną z materiału gruntowego, która powstała w wyniku działalności człowieka. Nasypy budowlane wykonywane są zarówno od powierzchni terenu, jak i we wcześniej wykonanych wykopach np. przy wymianie gruntów. Konstrukcja ziemna o zaprojektowanych parametrach mechanicznych stanowi „budowlę ziemną”.

Ze względu na techniczną funkcję nasypy budowlane dzielimy na:

- nasypy drogowe,
- nasypy kolejowe,
- nasypy zapór i wałów – budowle hydrotechniczne,
- nasypy pod konstrukcje kubaturowe np. poduszki kompensacyjne,
- nasypy jako wymiana gruntów.

Pod względem miejsca ich wykonania podział wygląda następująco:

- nasypy wykonywane w wykopach, gdzie poziom robót ziemnych będzie znajdować się poniżej poziomu pierwotnego terenu,
- nasypy wykonywane powyżej powierzchni pierwotnego terenu.

Z uwagi na sposób ich wykonania nasypy budowlane podzielić można na:

- nasypy ziemne – tradycyjnie wykonywane tylko z materiału zasypowego,
- nasypy wzmocnione – wykonywane jako konstrukcje kompozytowe np. nasypy zbrojone w podstawie lub w całym przekroju poprzecznym.

Nasypy budowlane muszą być wykonywane z uwzględnieniem trzech podstawowych warunków:

1. Zapewnienia stateczności nasypu.
2. Równomiernego osiadania nasypu i konstrukcji na nim wykonanej.
3. Spełnienia warunków nośności i odkształcalności podłoża gruntowego, na którym są wykonane.

Podstawowe zasady budowy nasypów:

- Nasyp należy wykonywać metodą warstwową, gdzie grubość pojedynczej warstwy powinna być dostosowana do sprzętu zagęszczającego.
- Wbudowanie kolejnej warstwy nasypu powinno nastąpić po uprzednim osiągnięciu projektowanych parametrów mechanicznych warstwy wykonanej.
- Grunty o różnych właściwościach należy wbudowywać w oddzielnych warstwach o jednakowej grubości na całej szerokości nasypu.
- Górną warstwę nasypu o miąższości minimum 0,5 m należy wykonać z gruntów niewysadzinowych o wskaźniku wodoprzepuszczalności $k_{10} \geq 6 \times 10^{-5}$ [m/s] i wskaźniku różnoziarnistości $C_u \geq 5$.
- Niezależnie od materiału zasypowego powinien on być wbudowywany przy jego wilgotności naturalnej w_n równej lub zbliżonej do wilgotności optymalnej w_{opt} .
- Minimalny wskaźnik różnoziarnistości gruntu powinien być nie mniejszy niż $C_u = 4$.
- Nie należy wykonywać robót ziemnych przy budowie nasypów w warunkach zimowych, a przede wszystkim wbudowywać gruntu zamarzniętego, zbrylonego.

W przypadku budowy nasypów z gruntów kamienistych lub gruboziarnistych, należy przestrzegać następujących zasad technicznych wykonywania tego typu budowli ziemnej:

1. Wykonywanie nasypów z wypełnieniem wolnych przestrzeni

- Grubość pojedynczej wbudowywanej warstwy nie powinna być większa od $h = 0,3$ m.
- Każdą rozłożoną warstwę należy przykryć warstwą żwiru, pospółki, piasku lub gruntu drobnoziarnistego, w celu wypełnienia wolnych przestrzeni w kruszywie gruboziarnistym.

2. Wykonywanie nasypów bez wypełnienia wolnych przestrzeni

- Warstwy nasypu wykonane według tej metody powinny być zbudowane z materiałów mrozoodpornych.
- Warstwy te należy oddzielić od podłoża gruntowego pod nasypem oraz od górnej strefy nasypu około 10 centymetrową warstwą żwiru, pospółki lub nieodsianego kruszywa łamanego, zawierającego od 25 do 50% ziaren mniejszych od 2 mm i spełniających warunki:

$$4d_{85} \geq D_{15} \geq 4d_{15}$$

gdzie:

d_{85} i d_{15} - średnica oczek sita, przez które przechodzi 85% i 15% gruntu podłoża lub gruntu górnej warstwy nasypu (mm),

D_{15} - średnica oczek sita, przez które przechodzi 15% materiału gruboziarnistego (mm).

Reasumując, geotechniczne problemy wykonawstwa robót ziemnych sprowadzić można do trzech głównych kryteriów:

- uzyskania wymaganego zagęszczenia gruntu,
- wykonania robót w jak najbardziej ekonomiczny sposób,
- zabezpieczenia zagęszczonych gruntów w nasypie przed pogorszeniem się ich właściwości.

4.1. Zagęszczanie zgodnie z PN-S-02205:1998.

4.1.1. Wymagania ogólne.

Grunt należy zagęszczać niezwłocznie po wbudowaniu. Wymaganą wilgotność zagęszczanego materiału, procedurę zagęszczania i grubość warstw należy określić doświadczalnie podczas próbnego zagęszczania stosowanym sprzętem. Warstwy gruntu należy zagęszczać pasami od krawędzi ku osi nasypu. Kolejną warstwę gruntu można układać po stwierdzeniu uzyskania wymaganych parametrów już ułożonej warstwy.

Uzyskanie przez grunty w budowlach ziemnych wymaganych cech nośności sprawdza się przez badania wskaźnika zagęszczenia oraz wtórnego modułu odkształcenia.

Oceny zagęszczenia dokonuje się na podstawie wskaźnika zagęszczenia I_s .

Alternatywnie zagęszczenie gruntu, zwłaszcza zawierającego kamienie, z wyjątkiem gruntów o wskaźniku plastyczności $I_p \geq 1,0$ i wilgotności znacznie mniejszej od optymalnej, można oceniać na podstawie wartości wskaźnika odkształcenia I_0 .

Dla gruntów nieulepszanych spoiwami, w nasypach i wykopach wymagane wskaźniki zagęszczenia I_s należy przyjmować w zależności od kategorii przewidywanego ruchu i od poziomu zalegania warstw wg rysunków 5 i 6.

Zagęszczenie gruntu na ocenianym odcinku uznaje się za zgodne z wymaganiami, jeżeli spełniony jest jeden z warunków:

- w przypadku liczby pomiarów wartości I_s mniejszej od 10 wszystkie wyniki są nie mniejsze od wartości wymaganej,
- w przypadku liczby pomiarów co najmniej 10 wartość średnia wskaźnika zagęszczenia I_s jest nie mniejsza od wartości wymaganej, a współczynnik zmienności z_s wskaźnika zagęszczenia I_s nie przekracza 2,5 %,
- w przypadku liczby pomiarów co najmniej 10, gdy współczynnik zmienności wskaźnika zagęszczenia z_s okaże się większy od 2,5 % wartość średnia wskaźnika zagęszczenia I_s jest większa od wymaganej co najmniej o 60% odchylenia standardowego s_s . Tyle norma!



Rys.5. Wartości wymagane w nasypach: wskaźnika zagęszczenia I_s , i wtórnego modułu odkształcenia E_2 [MPa]. [17]

Jako zastępcze kryterium oceny wymaganego zagęszczenia gruntów, dla których trudne jest pomierzenie wskaźnika odkształcenia przyjmuje się wartość wskaźnika odkształcenia I_0 wg załącznika B normy, równego stosunkowi modułów odkształcenia wtórnego E_2 do pierwotnego E_1 .

Wskaźnik odkształcenia I_0 nie powinien być większy niż:

- dla żwirów, pospółek, piasków
 - 2,2 przy wymaganej wartości $I_s = 1,0$
 - 2,5 przy wymaganej wartości $I_s < 1,0$,
- dla gruntów drobnopziarnistych o równomiernym uziarnieniu (pyłów, glin. glin pylastych, glin zwięzłych, ilów) - 2,0,
- dla gruntów różnypziarnistych (żwirów gliniastych, pospółek gliniastych, pyłów piaszczystych, piasków gliniastych, glin piaszczystych, glin piaszczystych zwięzłych) - 3,0,
- dla narzutów kamiennych, rumoszy - 4,0
- dla gruntów antropogenicznych - na podstawie badań poligonowych.

Dla gruntów ulepszanych spoiwami wymagane jest uzyskanie wskaźnika zagęszczenia $I_s = 1,0$ w warstwie ulepszanego podłoża nawierzchni oraz $I_s = 0,97$ w strefie obliczeniowej głębokości przemarzania. Jako zastępcze sprawdzenie można stosować pomiar wskaźnika odkształcenia którego wartość pomierzona bezpośrednio po zagęszczeniu, nie powinna być większa od 2,2. Na skarpach powierzchniowa warstwa gruntu grubości do 20 cm powinna mieć wskaźnik zagęszczenia $I_s = 0,95$.

Z zagęszczania gruntu na skarpach można zrezygnować pod warunkiem układania warstw nasypu z poszerzeniem o co najmniej 50 cm a następnie zebrania tego nadkładu.

Całościowej oceny cech nośności warstwy gruntu dokonuje się na podstawie pomiaru wtórnego modułu odkształcenia E_2 , za pomocą obciążenia statycznego płytą o średnicy min. 300 mm. Wymagane minimalne wartości wtórnego modułu odkształcenia E_2 , należy przyjmować wg rysunków 5 i 6.



Rys.6. Wartości wymagane w podłożu wykopów: wskaźnika zagęszczenia I_s , i wtórnego modułu odkształcenia E_2 [MPa]. [17]

4.1.2. Wilgotność zagęszczanego gruntu.

Wilgotność technologiczna gruntu w czasie jego zagęszczania powinna być dostosowana do metody zagęszczania i rodzaju stosowanego sprzętu. Decydującym kryterium jest możliwość zagęszczenia gruntu potrzebnego do uzyskania wymaganego poziomu nośności.

W przypadku zagęszczania walcami statycznymi wilgotność powinna być zbliżona do optymalnej, oznaczonej na podstawie próby normalnej metodą I i II wg PN-B-04481:1988 (PN-88/B-04481). Odchylenia od wilgotności optymalnej nie powinny przekraczać następujących wartości:

- w gruntach niespoistych $\pm 2 \%$,
- w gruntach mało i średnio spoistych $+0\% - 2\%$,
- w mieszaninach popiołowo-żuźłowych $+2\% - 4\%$.

W przypadku użycia sprzętu wibracyjnego zalecana jest wilgotność mniejsza od optymalnej, ustalona na podstawie wstępnych prób na poletku doświadczalnym.

Urządzeniami wibracyjnymi grunty niespoiste można zagęszczać także w stanie powietrzno-suchym lub gdy zalegają poniżej zwierciadła wody, o ile wstępne próby dadzą pozytywne wyniki.

Jeżeli wilgotność gruntu przeznaczonego do zagęszczania jest większa od wilgotności optymalnej o wartość większą od podanych odchyień, to grunt należy przesuszyć w sposób naturalny lub ulepszyć przez zastosowanie dodatku spoiw (wapno, cement).

Jeżeli zachodzi taka potrzeba, to zaleca się zwiększenie wilgotności gruntu przez zraszanie wodą.

4.1.3. Warunki specjalne zagęszczenia.

Jeżeli zgodnie z dokumentacją projektową nasypów nie buduje się warstwami, lecz grunt sypie się do wody, np. po wcześniejszym lub całkowitym usunięciu gruntu organicznego lub też gdy nasyp wg uzgodnionych warunków wykonywania ma osiadać przez dłuższy czas, należy jego górne warstwy zagęszczać intensywnie za pomocą walców wielokołowych, wibratorów lub ciężkich ubijaków (metodą konsolidacji dynamicznej). Jeżeli nie można osiągnąć w wymaganym czasie ostatecznego osiadania nasypu i jego zagęszczenia, na nasypie należy ułożyć prowizoryczną nawierzchnię, łatwą do przebudowy.

4.1.4. Sprawdzanie zagęszczenia i nośności gruntu.

Zagęszczenie gruntu należy ustalać na podstawie wskaźnika zagęszczenia I_s , obliczanego ze wzoru

$$I_s = \frac{\rho_d}{\rho_{ds}}$$

w którym:

ρ_d - gęstość objętościowa szkieletu gruntu w nasypie,

ρ_{ds} - maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntu zagęszczonego
wg PN-B-04481:1988

Alternatywnie zagęszczenie gruntu można ustalać na podstawie wskaźnika odkształcenia I_0 , równego stosunkowi modułów odkształcenia wtórnego E_2 do pierwotnego E_1 , które należy określać wg załącznika B normy. Badanie to jest zalecane zwłaszcza w przypadku tworzenia nasypu z mieszanin popiołowo-żużlowych lub gruntów kamienistych.

Częstotliwość badań wskaźnika zagęszczenia I_s każdej układanej warstwy powinna być następująca:

- dla podłoża ulepszanego nawierzchni - nie mniej niż jeden raz w trzech punktach na 1500 m² powierzchni,
- dla korpusu nasypu i warstwy odcinającej dolnej - nie mniej niż jeden raz w trzech punktach na 5 000 m² zagęszczanych warstw nasypu,
- dodatkowo w miejscach wskazanych przez nadzór budowy.

Zagęszczenie gruntu należy oceniać stosując metodę porównywania poszczególnych wyników badań z wymaganiami wg rysunku 5 i 6. W przypadku, gdy liczba pomiarów wynosi co najmniej 10, można stosować metodę statystyczną. W metodzie tej wartość średnia wskaźnika I_s stanowi miarę poziomu zagęszczenia, a współczynnik zmienności z_s - miarę jednorodności zagęszczenia.

Wartość średnią wskaźnika zagęszczenia oblicza się ze wzoru:

$$I_s = \frac{\sum_{i=1}^n I_{si}}{n}$$

w którym:

I_{si} - wyniki poszczególnych pomiarów,

n - liczba pomiarów.

Współczynnik zmienności oblicza się ze wzoru:

$$z_s = \frac{s_z}{I_s} 100$$

w którym:

s_s - odchylenie standardowe obliczane ze wzoru (wg Pogorzelskiego dla $n \leq 30$)

$$s_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_{si} - I_s)^2}{n - 1}}$$

Zagęszczenie gruntu i materiału można również badać za pomocą obciążenia płytą o średnicy min. 300 mm, oznaczając wskaźnik odkształcenia I_0 , równy stosunkowi modułów odkształcenia wtórnego E_2 do pierwotnego E_1 wg załącznika B normy, stosując częstotliwość badań wymaganą dla wskaźnika zagęszczenia.

Bieżącą kontrolę zagęszczenia można przeprowadzać również gęstościomierzami izotopowymi, wyskalowanymi w warunkach sprawdzanych robót.

Kontrolę ciągłą zagęszczenia warstw za pomocą aparatury pomiarowej zainstalowanej na maszynach zagęszczających należy prowadzić według indywidualnie ustalonego programu i zapisów SST.

Aparatura taka powinna być uprzednio wyskalowana na poletku doświadczalnym.

Nośność gruntu na podstawie pomiaru wtórnego modułu odkształcenia E_2 należy sprawdzić dla warstwy powierzchniowej podłoża nawierzchni, najwyższej warstwy robót ziemnych oraz ewentualnie głębszych warstw, jeżeli wymaga tego dokumentacja projektowa lub nadzór. Badania wtórnego modułu odkształcenia E_2 wykonuje się za pomocą obciążenia statycznego płytą o średnicy min. 300 mm, zgodnie z załącznikiem B normy.

Częstotliwość badań wtórnego modułu odkształcenia E_2 sprawdzanej warstwy powinna być nie mniejsza, niż jeden raz w trzech punktach na 2 000 m² powierzchni, a dodatkowo w miejscach wskazanych przez nadzór. Liczbę badań można zmniejszyć o połowę w przypadku wbudowywania jednorodnego materiału i zagęszczania go w sposób ciągły odcinkami długości ponad 100 m. Nośność warstwy jest wystarczająca, jeżeli wszystkie wartości wtórnego modułu odkształcenia E_2 spełniają wymagania wg rysunku 5 i 6.

Ponadto w czasie badania sprawdzić należy czy:

- a) wilgotność zagęszczanego gruntu odpowiada wymaganiom,
- b) grubość warstw zagęszczanych nie przekracza wartości określonych doświadczalnie,
- c) przy zagęszczaniu nasypów w warunkach specjalnych zachowano odpowiednie wymagania.

Wcześniej wykonane nasypy o nieudokumentowanym zagęszczeniu sprawdzać należy do głębokości 1 m od powierzchni robót ziemnych, wykonując wykop i określając wskaźnik zagęszczenia gruntu I_s lub moduł E_2 . Badanie zagęszczenia głębiej leżących warstw sprawdzać należy w przypadkach wątpliwych - za pomocą sondowania.

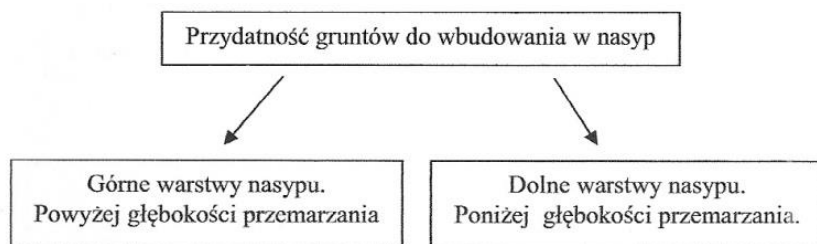
4.2. Właściwości mechaniczne nasypów.

Właściwości mechaniczne nasypów zależą przede wszystkim od rodzaju użytego materiału zasypowego. W zależności od dostępności, potrzeb i projektowanych parametrów mechanicznych, do budowli ziemnych można stosować rozmaite materiały naturalne lub antropogeniczne. Podstawowym parametrem ekonomicznym dotyczącym doboru rodzaju materiału zasypowego powinna być jego dostępność w miejscu lub sąsiedztwie wykonywanych robót. Należy przy tym pamiętać, że grunt początkowo niezdatny do bezpośredniego wbudowania w nasyp po jego modyfikacji może być stosowany bez ograniczeń. Kryterium technicznym doboru materiału jest osiągnięcie przez niego po zagęszczeniu odpowiednich parametrów wytrzymałości, odkształcalności, trwałości i przepuszczalności hydraulicznej.

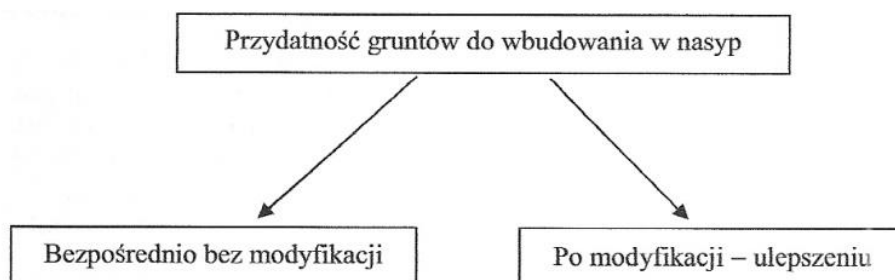
Materiał gruntowy z definicji jest to „grunt naturalny lub antropogeniczny o właściwościach pozwalających zastosować go bezpośrednio lub po uzdatnieniu do wykonania budowli ziemnej”, według PN-B-02481.

Z uwagi na właściwości fizyczne przydatność gruntów do wbudowania w nasyp można podzielić z uwagi na:

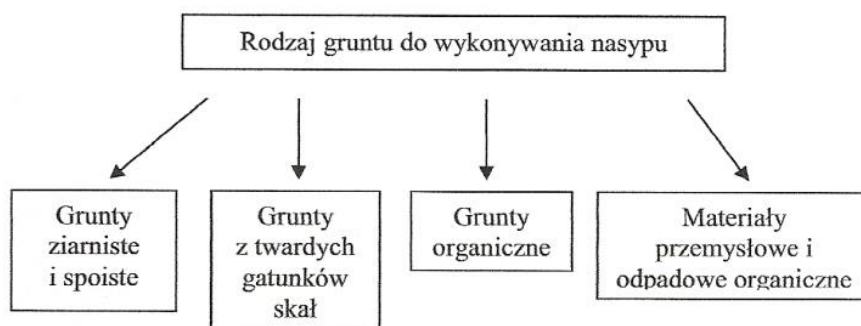
- Miejsca ich wbudowania



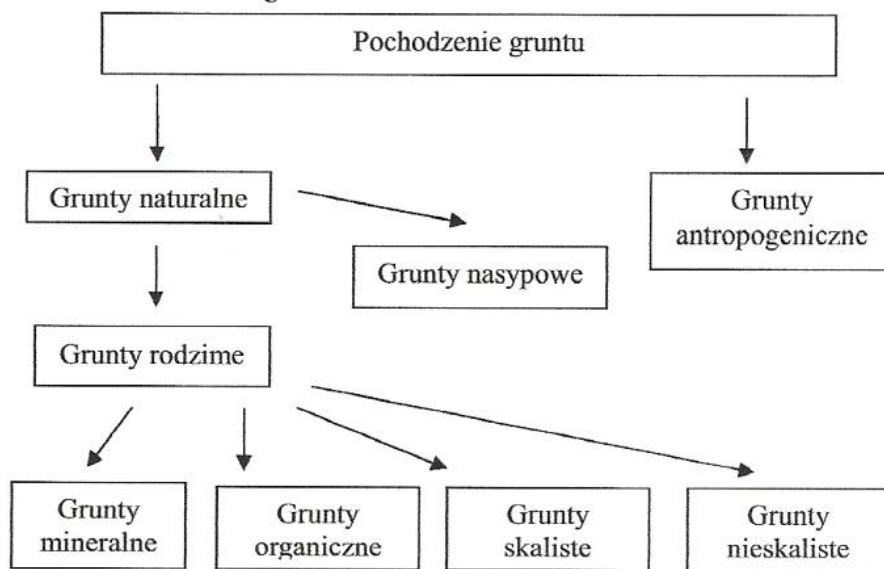
- Możliwość zastosowania



- Rodzaj gruntu



- Pochodzenie gruntu



Do wykonywania nasypów budowlanych, niezależnie od ich przeznaczenia, należy stosować materiały o możliwie jak najbardziej zróżnicowanym uziarnieniu. Przydatności materiału do wbudowania niezależnie od rodzaju gruntu określają dwa podstawowe parametry:

- wskaźnik różnoziarnistości gruntu $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$,
- wskaźnik krzywizny uziarnienia $C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}}$

Przy doborze materiału zasypowego należy kierować się podstawową zasadą opartą na tych dwóch parametrach. Za graniczną wartość liczbową, przy której grunt nadaje się do bezpośredniego wbudowania, należy przyjąć dla wskaźnika różnoziarnistości $C_u \geq 4$ oraz wskaźnika krzywizny uziarnienia $C_c > 1,0$. Wraz ze wzrostem tych parametrów wzrasta przydatność materiału do użycia w budowlach ziemnych.

Klasyfikacja gruntów oparta jest na zawartości frakcji dominującej w gruncie, czyli na składzie granulometrycznym, który wyznaczany jest w warunkach laboratoryjnych – rzetelna analiza sitowa.

Poniżej przedstawiono klasyfikację gruntów według polskiej normy i EC7 (tab. 2).

Tablica 2. Klasyfikacja gruntów z uwagi na zawartość poszczególnych frakcji [6]

PN-EN ISO 14688-1:2006				PN-86/B-02480			
GRUNTY	FRAKCJE	SYMBOL	WYMIAR CZĄSTEK [mm]		SYMBOL	FRAKCJE	GRUNTY
BARDZO GRUBOZIARNISTE	DUŻE GŁAZY	LBo	>630	----	----	----	KAMIENISTE
	GŁAZY	Bo	>200-630				
	KAMIENIE	Co	>63-200				
GRUBOZIARNISTE	ZWIR	GRUBY	CGr	>20-63	f_k	ŻWIROWA	GRUBO-ZIARNISTE
		ŚREDNI	MGr	>6,3-20			
		DROBNY	FGr	>2,0-6,3			
	PIASEK	GRUBY	CSa	>0,63-2,0	f_p	GRUBY	
		ŚREDNI	MSa	>0,2-0,63		ŚREDNI	
		DROBNY	FSa	>0,063-0,2		DROBNY	
DROBNOZIARNISTE	PYL	Si	>0,002-0,063	>0,002-0,05	f_{ti}	PYŁOWA	DROBNOZIARNISTE
	IŁ	Cl	≤0,002	≤0,002	f_l	IŁOWA	

Grunty gruboziarniste o frakcji z zakresu 0,063 do 63 mm, można podzielić ze względu na wskaźnik: różnoziarnistości C_u i krzywizny C_c . Przy czym należy pamiętać, że w przypadku braku jakiegoś wymiaru cząstek, grunt należy zaklasyfikować do źle uziarnionego (tab.3).

Tablica 3. Podział gruntów gruboziarnistych z uwagi na krzywą uziarnienia [6]

PODZIAŁ GRUNTÓW	CHARAKTERYSTYKI KRZYWEJ UZIARNIENIA	
	WSK. RÓŻNOZIARNISTOŚCI C_u	WSK. KRZYWIZNY UZIARNIENIA C_c
WIELOFRAKCYJNE	>15	1-3
KILKUFRAKCYJNE	6-15	<1
JEDNOFRAKCYJNE	< 6	<1
ŻŁE UZIARNIONE	0-3	<1

Z uwagi na stosowanie w budownictwie kruszyw o różnym uziarnieniu, właściwościach, a przede wszystkim właściwościach modyfikowanych na potrzeby danej budowli ziemnej należy przytoczyć podział kruszyw zgodny z normą PN-EN 12620.

Kruszywo - materiał ziarnisty stosowany w budownictwie. Zgodnie z zapisem normy PN-EN 12620 kruszywa dzielimy na naturalne, sztuczne lub z recyklingu.

Podział kruszyw:

- naturalne - pochodzenia mineralnego,
- o ciągłym uziarnieniu - kruszywo będące mieszanką kruszyw grubych i drobnych,
- sztuczne - pochodzenia mineralnego, uzyskane w wyniku procesu przemysłowego obejmującego termiczną lub inną modyfikację,
- z recyklingu - powstałe w wyniku przeróbki nieorganicznego materiału zastosowanego uprzednio w budownictwie (destrukty betonowy, ceglany, itp.).

5. Różnice zagęszczania gruntów mineralnych niespoistych i spoistych.

Tak jak zapisano wcześniej celem zagęszczania jest zmniejszenie objętości porów gruntu, a przez to zwiększenie nośności oraz zmniejszenie odkształcalności i wrażliwości na wpływy atmosferyczne.

Zagęszczenie mechaniczne przydatnych gruntów o odpowiedniej wilgotności wykonuje się warstwami. Grubość warstwy zależy od rodzaju gruntu. W przypadku gruntów spoistych wynosi zwykle 20-30 cm, w niespoistych 50 cm i więcej, maksymalnie do 1 -1,5 m.

Do zagęszczania stosuje się walce statyczne lub wibracyjne, gładkie, okołkowane (do gruntów spoistych), zagęszczarki udarowe i wibracyjne, płyty wibracyjne, ubijaki mechaniczne, ciężkie ubijaki udarowe itp. W tablicy poniżej zestawiono zalecane rodzaje urządzeń zagęszczających do różnych rodzajów gruntu.

Tablica 4 Zalecane rodzaje urządzeń zagęszczających do różnych rodzajów gruntów. [6]

Rodzaje urządzeń zagęszczających	Rodzaje gruntu					
	niespoiste: piaski, żwiry, pospółki		spoiste: pyły, gliny, ropy		gruboziarniste i kamieniste	
	grubość warstwy m	liczba przejść n***	grubość warstwy m	liczba przejść n***	grubość warstwy m	liczba przejść n***
Walce statyczne gładkie*	0,1 - 0,2	4 do 8	0,1 - 0,2	4 do 8	0,2 - 0,3	4 do 8
Walce statyczne okółkowane*	–	–	0,2 - 0,3	8 do 12	0,2 - 0,3	8 do 12
Walce statyczne ogumione*	0,2 - 0,5	6 do 8	0,2 - 0,4	6 do 10	–	–
Walce wibracyjne gładkie**	0,4 - 0,7	4 do 8	0,2 - 0,4	3 do 4	0,3 - 0,6	3 do 5
Walce wibracyjne okółkowane**	0,3 - 0,6	3 do 6	0,2 - 0,4	6 do 10	0,2 - 0,4	6 do 10
Zagęszczarki wibracyjne**	0,3 - 0,5	4 do 8	–	–	0,2 - 0,5	4 do 8
Ubijaki szybko uderzające	0,2 - 0,4	2 do 4	0,1 - 0,3	3 do 5	0,2 - 0,4	3 do 4
Mg zrzucane z wysokości od 1 do 10		4 do 10		3 do 6		3 do 6
Mg zrzucane z wysokości od 5 do 10 m	2 - 8	uderzeń w punkt	1 - 4	uderzeń w punkt	1 - 5	uderzeń w punkt
*) Walce statyczne są mało przydatne w gruntach kamienistych						
**) Wibracyjnie należy zagęszczać warstwy grubości ≥ 15 cm, cieńsze warstwy zagęszczać statycznie. Nie należy stosować do gruntów pylastych						
***) Wartości liczb przejść są orientacyjne, właściwe należy ustalić na polu próbnym						

Do żwirów, źle uziarnionych pospółek i piasków równoziarnistych zalecane są walce statyczne lub zagęszczarki udarowe. W przypadku tych gruntów urządzenia wibracyjne są ogólnie nieprzydatne. W gruntach spoistych liczba przejść urządzeń wibracyjnych powinna być jak najmniejsza (2 - 3). Po zagęszczeniu walcami wibracyjnymi (szczególnie gruntów ulepszanych spoiwem) do dogęszczania warstwy przypowierzchniowej zalecane są walce statyczne gładkie lub ogumione.

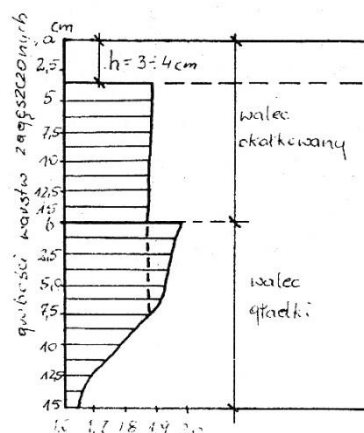
Wilgotność gruntu podczas zagęszczania powinna być dostosowana do jego rodzaju i do stosowanego sprzętu. Wilgotność optymalna tego samego gruntu zależy od użytych urządzeń zagęszczających: przykładowo jest większa dla walców ogumionych i ubijarek mechanicznych, mniejsza - dla walców okółkowanych i wibracyjnych. Skuteczność zagęszczania można zwiększyć dodając z wodą różnego rodzaju tzw. środki powierzchniowo czynne, zmniejszające napięcie powierzchniowe wody błonkowej otaczającej cząstki gruntu. Tak więc najważniejszym zagadnieniem przy zagęszczaniu jest ustalenie optymalnej wilgotności, ekonomicznej ilości pracy potrzebnej do zagęszczenia, określenie potrzebnego stopnia zagęszczenia, dokonanie właściwego wyboru maszyn do zagęszczania i ustalenie właściwej technologii zagęszczania wraz z kontrolą całego procesu.

5.1. Wybór metody zagęszczania i maszyn.

Wybór metody zagęszczania oraz wybór odpowiednich maszyn zależy od rodzaju gruntu i jego wilgotności, frontu robót i możliwości uzyskania odpowiedniego sprzętu oraz wymaganego wskaźnika zagęszczenia. Metody sztucznego zagęszczania mogą być podzielone na dwie grupy: metody o działaniu statycznym i metody dynamiczne. Metody dynamiczne mogą polegać zarówno na działaniu siły skoncentrowanej (uderzenia), jak i na wibracji przez przenoszenie do gruntu drgań o dużej częstotliwości.

Do grupy pierwszej należy zaliczyć wałowanie walcami doczepnymi lub samobieźnymi oraz ciągnikami gąsienicowymi. Gładkie walce statyczne są najbardziej efektywne do zagęszczania piasków i pospółek gliniastych. Przy zagęszczaniu tymi walcami grubość zagęszczanej warstwy nie powinna w zasadzie przekraczać 15 cm.

Do zagęszczania gruntów sypkich wystarczy 2-4 przejazdów walca, a do zagęszczania gruntów spoistych trzeba 3-5 przejazdów walca o ciężarze 8 T. Naciski jednostkowe tych walców na grunt kształtują się w granicach 100-300 kPa. Przy użyciu walców lżejszych (np. 5 tonowe) należy odpowiednio zwiększyć ilość przejazdów walca.



Rys.7. Porównawcze efekty zagęszczania walcami gładkimi i okółkowymi [15]

Do zagęszczania gruntów spoistych i o niewielkiej wilgotności stosowane są przyczepne/samobieżne walce okółkowane. Porównawcze efekty zagęszczania przy użyciu walców okółkowanych i gładkich podaje rys. 7. Z tego wynika, że w przypadku użycia walców gładkich zagęszczenie maleje ze wzrostem głębokości. Osiąga ono stopień równy zagęszczeniu, uzyskanemu przez walec okółkowany, na połowie grubości warstwy; głębiej jest jeszcze znacznie mniejsze.

W ostatnich latach szerokie zastosowanie znalazły walce wielokołowe na pneumatykach, ze skrzynią balastową. Walce ogumione mają najczęściej ciężar 30 - 50 t (ciągnione) i 16 - 20 t (samojezdne) i specjalnie nadają się do gruntów spoistych.

Podczas zagęszczania walcami ogumionymi należy pamiętać o następujących zasadach:

- powierzchnia styku opon z gruntem zależy od obciążenia na koło i ciśnienia wewnątrz opon, wzrost obciążenia na koło i wzrost ciśnienia w oponach daje większe efekty zagęszczenia i zmniejszenie wilgotności optymalnej;
- do zagęszczania gruntów spoistych najwłaściwsze obciążenie na koło powinno wynosić poniżej 5000 kG, a ciśnienie wewnątrz opony poniżej 300 kPa. Dla gruntów sypkich uzyskuje się lepsze wyniki podczas zagęszczania walcami z dużymi obciążeniami na koło i dużymi wewnętrznymi ciśnieniami. Przy ciśnieniu w oponie powyżej 800 kPa nie obserwuje się przyrostów efektów zagęszczenia;
- w celu osiągnięcia wskaźnika zagęszczenia 0,95 wystarczają na ogół 4 przejazdy walca;

- maksymalne grubości zagęszczanych warstw wynoszą dla walców lekkich 15-22 cm, a dla ciężkich 35 - 45 cm;
- wydajność walców rośnie ze wzrostem szybkości ich poruszania się i ze wzrostem ciężaru walca.

Ubijanie gruntu odbywa się przy użyciu ubijaków ręcznych lub mechanicznych oraz ubijaków płytowych. Ubijaków ręcznych używa się najczęściej w budownictwie miejskim i podziemnym (zagęszczanie gruntów w miejscu przepustów, studzienek itp.). Ten sposób zagęszczania stosuje się zarówno do gruntów sypkich, jak i spoistych. Doświadczenia pokazują, że przy takim sposobie uzyskuje się najlepsze efekty zagęszczania gruntu na głębokości 0,8 - 1,0 m. Zagęszczanie przez wibrowanie stosuje się do gruntów żwirowych i piaszczystych.

Najczęściej znajdują zastosowanie walce wibracyjne o ciężarze od kilkuset kilogramów do kilku ton. Działają one nie tylko ciężarem własnym, ale również za pomocą drgań wynoszących 1000 - 3600 na minutę. Wilgotności optymalne przy zagęszczaniu walcami wibracyjnymi są małe i wynoszą np. dla piasku około 6%. Walce te zagęszczają warstwy gruntu 30 - 50 cm. Ciężkie walce wibracyjne przyczepne nadają się do zagęszczania nie tylko gruntów sypkich, ale i mało spoistych, przy czym grubość warstw zagęszczanych wynosi 40 - 60 cm.

Przy niewielkich robotach ziemnych stosuje się często wibratory powierzchniowe. Wyniki zagęszczania przy użyciu tych maszyn zależą od ciężaru wibratora oraz wielkości jego podstawy. Doświadczalnie stwierdzono, że zagęszczanie przebiega właściwie, gdy grubość warstwy zagęszczanej nie przekracza szerokości podstawy wibratora.

W tabeli 4 podano zestawienie maszyn zagęszczających w zależności od warunków robót.

Tablica.4. Zestawienie maszyn stosowanych do zagęszczania gruntów [15]

Nazwa gruntu i materiału	Rozmiar robót		
	duży 2000 m ³	średni 500 - 2000 m ³	mały 500 m ³
Zwały, kamieniste, rumosze, zwietrzliny, żużle wielkopiecowe	ubijarki płytowe, wibratory płytowe, ubijarki mechaniczne, walce wibracyjne	Niektóre maszyny gąsienicowe do robót ziemnych i transportu	ubijarki ręczne
Żwiry i pospółki	jw. oraz walce ogumione	jw.	jw.
Żwiry i pospółki gliniaste	jw. oraz walce okołkowane	jw.	jw.
Piaski grube, średnie i drobnoziarniste	ubijarki płytowe, wibratory płytowe, ubijarki mechaniczne, walce ogumione	jw.	jw.
Piaski pyłaste i gliniaste, pyły, popioły lotne	jw. oraz walce okołkowane	jw.	jw.
Gliny i iły	jw.	jw.	jw.
Żużle z wyjątkiem wielkopiecowych	wibratory płytowe, walce wibracyjne, walce ogumione, walce gładkie	jw.	jw.

Oddziaływanie statyczne walca gładkiego sięga na ogół na niewielką głębokość. Maszyny o oddziaływaniu statycznym muszą mieć zatem dużą masę w celu uzyskania założonych efektów zagęszczania. Możliwe jest także zwiększanie głębokości zagęszczania przez odpowiedni dobór wymiarów walca, tj. jego średnicy i szerokości.

5.2. Walce statyczne.

Najbardziej rozpowszechnionym rodzajem maszyn zagęszczających stosowanych we wszystkich rodzajach budownictwa są walce statyczne. Ze względu na różne technologie procesu zagęszczania stosowane są różne konstrukcje walców statycznych. Walce statyczne można podzielić na grupy ze względu na wspólne charakterystyczne cechy lub sposób działania oraz sposób napędu.

Klasyfikację walców statycznych przedstawiono na rys. 8.

Niewielka głębokość zagęszczania, uzyskiwana przy użyciu walców statycznych, znacznie ogranicza zakres ich zastosowania. Walce statyczne gładkie w robotach drogowych są zwykle stosowane do prac końcowych, których głównym celem jest uzyskanie równej i gładkiej powierzchni przy niewielkiej głębokości zagęszczenia. Stosowane są też w robotach ogólnobudowlanych do zagęszczania podsypek pod fundamenty: piaskowych, żwirowych i tłuczniowych (wciskanie tłucznia w podłoże gruntów spoistych).

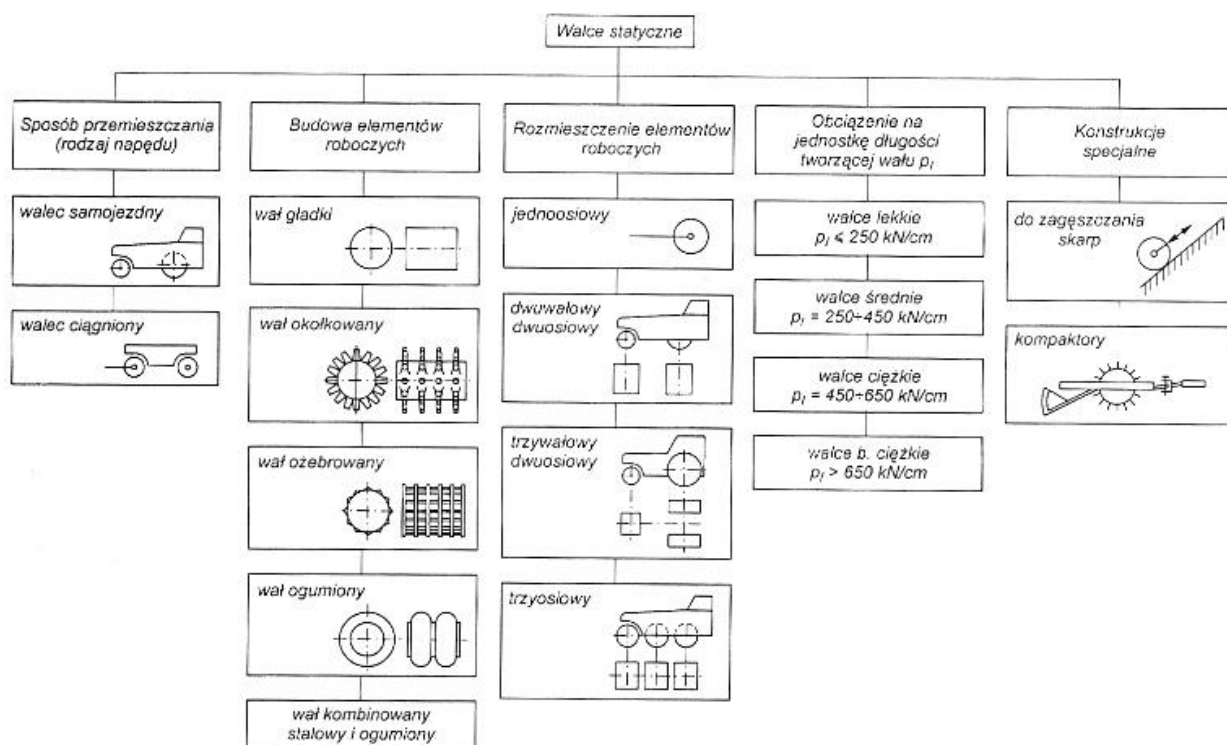
Walce statyczne stosuje się też do dogęszczania górnych warstw nasypów zagęszczanych sprzętem wibracyjnym oraz do zagęszczania warstw gruntów spoistych wbudowywanych w takie nasypy, jak np. rdzenie i ekrany zapór, warstwy uszczelniające składowisk odpadów (w tym przypadku najodpowiedniejsze są statyczne walce okołkowane lub walce ogumione). Do zagęszczania gruntów spoistych w nasypie w postaci brył najlepiej jest stosować walce okołkowane lub ożebrowane (kratowe).

Typ walca do zagęszczania podłoża i warstw w nasypach powinien być odpowiednio dobrany przez projektanta, zależnie od rodzaju robót oraz rodzaju i wilgotności gruntu. Grubość warstw zagęszczanych w nasypach, w zależności od rodzaju gruntu i maszyn zagęszczających, można orientacyjnie przyjąć wg tabl.5 lub dokładnie ustalić na podstawie próbnego zagęszczania na poletku badawczym, przygotowanym bezpośrednio na budowie.

Ugniatanie gruntu występuje każdorazowo wtedy, gdy każda część gruntu zagęszczanego przechodzi kilka cykli odkształcenia (co najmniej 2 cykle), przy czym każdy cykl obejmuje odkształcenia w co najmniej dwóch różnych kierunkach.

Tablica 5. Orientacyjne wartości grubości warstw zagęszczanych i liczba przejść maszyn o działaniu statycznym. [8]

Rodzaj sprzętu zagęszczającego	Rodzaj gruntu													
	zwały kamieniste		rumosze		żwiry i pospółki		płaski		rumosze gliniaste		żwiry i pospółki gliniaste		iły, gliny, piaski gliniaste	
	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>h</i>	<i>n</i>
Samobieżne walce statyczne gładkie	–	–	0,20–0,30	3–5	0,20–0,30	3–5	0,20–0,30	4–5	0,15–0,20	4–5	0,15–0,25	4–5	–	–
Samobieżne walce statyczne szerokokołkowe	–	–	–	–	–	–	–	–	0,25–0,30	4–6	0,25–0,30	4–6	0,30–0,40	4–6
Statyczne walce przyczepne okółkowane	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,15–0,2	7–9
Statyczne walce przyczepne ogumione	–	–	–	–	–	–	0,20–0,25	6–8	0,20–0,30	4–5	0,20–0,30	4–5	0,20–0,30	4–5
Spycharki gąsiennicowe	–	–	–	–	–	–	0,15–0,25	10–15	0,15–0,25	7–9	0,15–0,25	7–9	0,15–0,25	6–10
Zgarniarki ciężkie samobieżne	–	–	–	–	–	–	0,2–0,3	8–12	0,3–0,4	6–8	0,30–0,40	6–8	0,20–0,30	6–8



Rys.8. Klasyfikacja walców statycznych [8]

Do maszyn ugniatających grunt można zaliczyć walce ugniatające i walce ogumione o kołach tak zawieszonych, że mają możliwość wykonywania ruchu wahadłowego. Walce tych typów efektywniej zagęszczają grunty niż walce statyczne.

5.3 Walce wibracyjne

Dynamiczny (wibracyjny) sposób obciążenia podłoża gruntowego ma wiele zalet, a mianowicie:

- umożliwia znaczne zwiększenie wartości sił działających na podłoże, co wynika ze sposobu wymuszania;
- zmienia wartości kąta tarcia wewnętrznego (zmniejsza) w zagęszczanym podłożu, co ma istotny wpływ na skuteczność działania maszyny;
- pozwala na ewentualne wykorzystanie zjawisk rezonansu w układzie dynamicznym maszyna—podłoże;
- umożliwia uzyskanie dużych przyspieszeń drgań, co ma wpływ na przebieg procesu zagęszczania.

Wymienione i jeszcze inne czynniki mogą mieć różne znaczenie i wpływ na procesy dynamicznego zagęszczania.

Zagęszczanie gruntu metodą wibracyjną polega na przenoszeniu drgań mechanicznych wywołanych przez wibrator na masę gruntową. Wywołane drgania gruntu zmniejszają opór tarcia wewnętrznego między poszczególnymi ziarnami i cząstkami. Grunt zachowuje się wtedy jak ciecz. Ziarna i cząstki gruntu przezwyciężają opór tarcia wewnętrznego, ślizgają się po ziarnach sąsiednich oraz przesuwają pod działaniem siły ciężkości i nadawanego pędu do miejsc pustych w masie gruntowej i układają się szczelnie obok siebie. W rezultacie uzyskuje się grunt zagęszczony, w którym mniejsze ziarna i cząstki wypełniają pory między ziarnami większymi.

Wibracyjnym zagęszczaniem gruntów badacze zajmują się od dość dawna, jednak do tej pory nasza wiedza o czynnikach wpływających na to zjawisko jest bardzo niekompletna, a poglądy często sprzeczne. Najważniejsze czynniki mające zasadniczy wpływ na wibracyjne zagęszczenie gruntów to: skład granulometryczny i wskaźnik różnoziarnistości, kształt i stopień obtoczenia ziarn, wilgotność gruntu, amplituda drgań, częstotliwość drgań, przyspieszenie drgań, obciążenie statyczne, czas wibracji i energia zagęszczania.

W przypadku walców wibracyjnych następuje jednocześnie oddziaływanie statyczne i dynamiczne przetaczającego się walca na podłoże. Dzięki temu uzyskano znaczne zwiększenie efektywności zagęszczania podłoża.

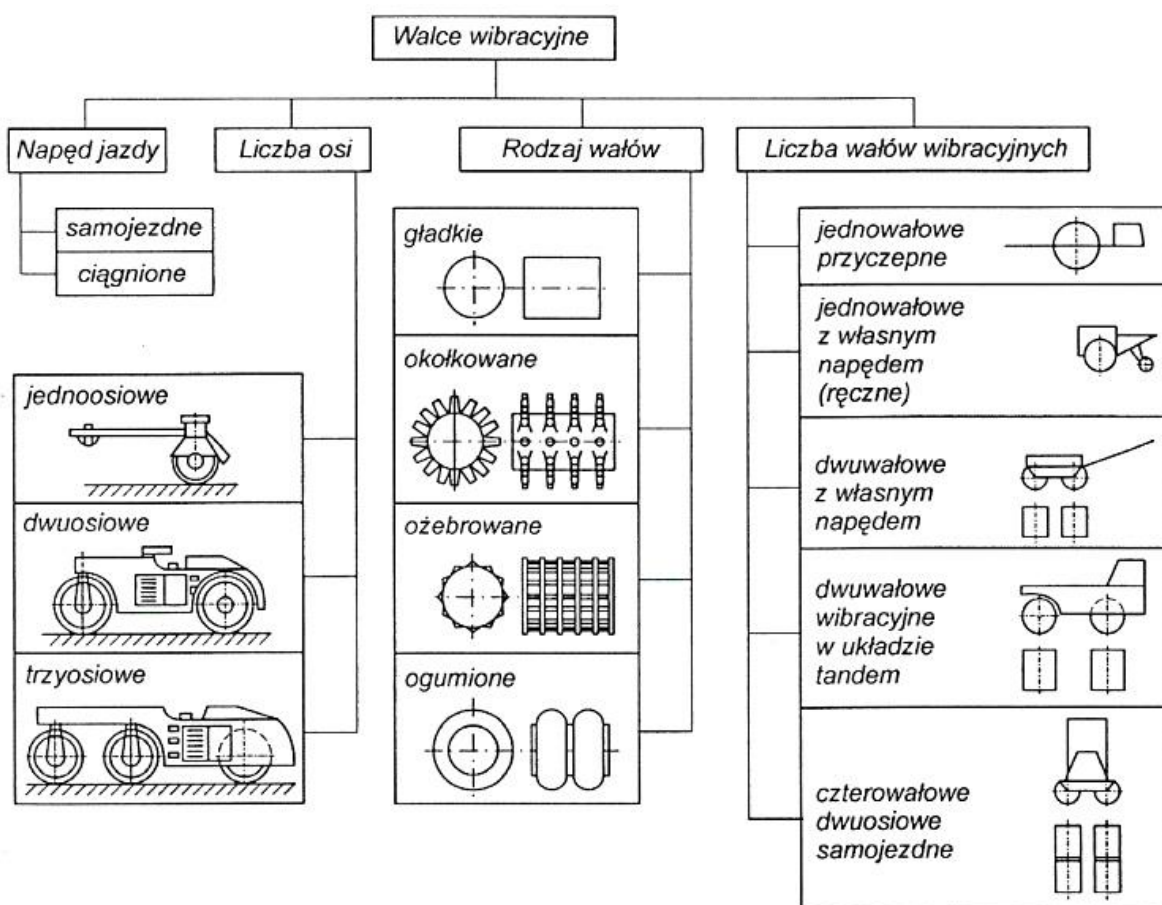
Elementem roboczym w walcach wibracyjnych jest wał toczący się po zagęszczanym podłożu, który dzięki układowi wymuszającemu porusza się ruchem drgającym, działając w sposób dynamiczny na zagęszczane podłoże.

Walce wibracyjne są nowym osiągnięciem w dziedzinie zagęszczania gruntów. Wydajność walców wibracyjnych przy zagęszczaniu gruntów jest kilkakrotnie większa od wydajności walców statycznych (przy podobnym ciężarze), dzięki większej prędkości wałowania oraz większych głębokości zagęszczania gruntu. Oddziaływanie ciężkich walców wibracyjnych w gruntach niespoistych sięga ok. 2,0 m. Na przykład, wibracyjny walec typu tandem (2 walce wibracyjne) zagęszcza grunt na głębokość 0,8 m przy trzech przejazdach, podczas gdy przy zastosowaniu podobnych walców statycznych wymaga to około 10 przejazdów.

Walce wibracyjne w porównaniu ze statycznymi są lżejsze, ich skuteczność działania jest większa, a zakres stosowania bardzo szeroki: od gruntów do wszelkiego rodzaju nawierzchni drogowych do narzutu kamiennego w zaporach wodnych.

Klasyfikację walców wibracyjnych w zależności od ich cech konstrukcyjno-eksploatacyjnych przedstawiono na rys. 9.

Walce wibracyjne najefektywniej zagęszczają grunty niespoiste. Stosuje się je też do zagęszczania narzutu kamienistego i rumoszy. Ostatnio używane są też do zagęszczania gruntów spoistych, przy czym szczególnie efektywne są walce wibracyjne szerokostopowe. Grubość warstw zagęszczanych w nasypach, w zależności od rodzaju gruntu i walca, można orientacyjnie przyjąć z tabl. 6. Należy zwrócić uwagę, że przy zagęszczeniu sprzętem wibracyjnym, górna część warstwy jest z reguły mniej zagęszczona niż dolna. Wymaga to dodatkowego zagęszczenia górnej części warstwy np. walcem statycznym.



Rys.9. Klasyfikacja walców wibracyjnych. [8]

5.4. Zagęszczarki płytowe (wibracyjne).

Zagęszczarki płytowe są maszynami, w których elementem roboczym jest metalowa płyta drgająca. Są stosowane do warstwowego zagęszczania gruntów niespoistych w poziomie i na stokach, przy układaniu przewodów kanalizacyjnych i wodociągowych, do zagęszczania zasypek gruntowych i podbudów piaskowych oraz tłuczniowych itp. Ze względu na małe

wymiary i niewielki ciężar łatwo nimi manewrować, a więc mogą być stosowane do zagęszczania miejsc trudno dostępnych.

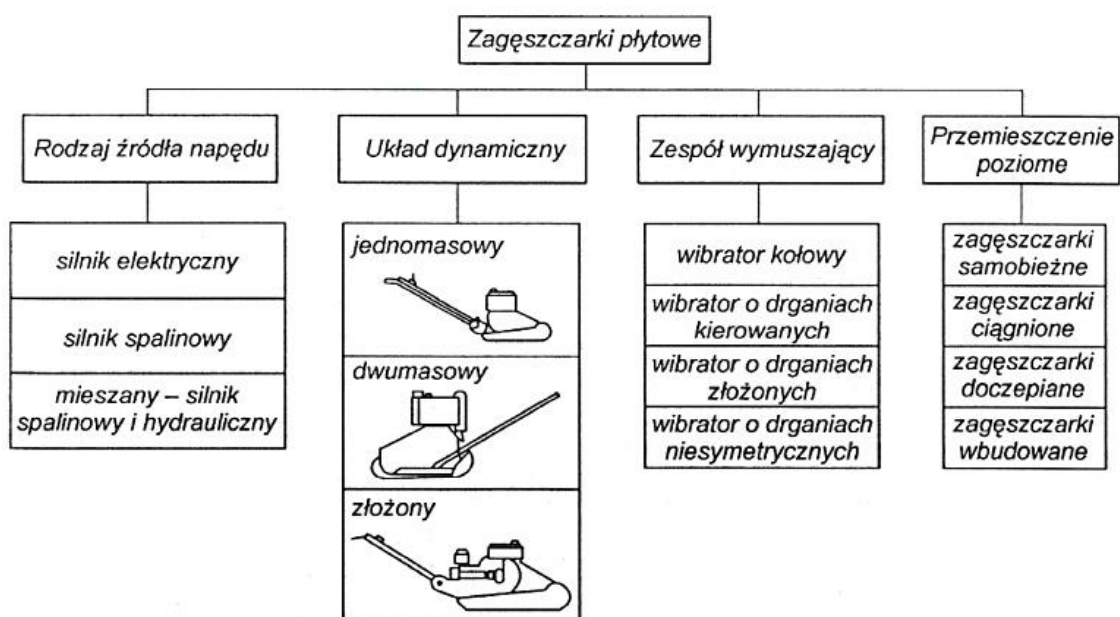
Tablica 6. Orientacyjne wartości grubości warstw zagęszczonych i liczba przejazdów sprzętu ubijającego i wibracyjnego [8]

Rodzaj sprzętu zagęszczającego	Rodzaj gruntu													
	zwały kamieniste		rumosze		żwir i pospółki		piaski		rumosze gliniaste		żwir i pospółki gliniaste		iły, gliny, piaski gliniaste	
	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>h</i>	<i>n</i>
Płyta ubijak na koparce	0,50–0,70	3–4	0,50	3–4	0,50	3	–	–	0,40	3–4	0,3	4–5	0,30–0,40	4–5
Ubijaki spalinowe	–	–	–	–	0,20–0,40	3–4	0,15–0,35	3–4	0,10–0,30	4–5	0,10–0,30	4–5	0,10–0,30	4–5
Zagęszczarki wibracyjne lekkie	–	–	–	–	–	–	0,2–0,50	3–5	–	–	–	–	0,2–0,3	6–8
Zagęszczarki wibracyjne kroczące	–	–	–	–	0,60–1,00	2–4	0,50–0,80	3–4	–	–	–	–	–	–
Walce wibracyjne samobieżne gładkie	–	–	–	–	0,20–0,50	2–4	0,15–0,30	3–5	–	–	–	–	–	–
Walce wibracyjne przyczepne gładkie	0,65–0,90	3–4	0,65–0,90	3–4	0,50–0,80	2–3	0,40–0,20	3–5	0,65–0,90	3–4	0,40–0,50	3	–	–
Przyczepne walce wibracyjne szerokokołkowe	–	–	–	–	–	–	0,40–0,60	3–5	0,30–0,40	4–6	0,30–0,45	4–6	0,35–0,40	4–6

h – grubość warstwy do zagęszczenia, m; *n* – liczba przejazdów sprzętu zagęszczającego po 1 śladzie; – – nie zaleca się stosować.

Konstrukcja zagęszczarek płytowych zależy od potrzeb eksploatacyjnych. Dzieli się je na grupy w zależności od:

- rodzaju zespołu napędowego,
- rodzaju układu dynamicznego maszyny,
- rodzaju zespołu wymuszającego maszyny,
- sposobu przemieszczania i sterowania maszyny.



Rys. 10. Klasyfikacja zagęszczarek płytowych. [8]

6. Badania zagęszczenia warstw nasypowych.

Prawidłowe wbudowanie materiału w nasyp ocenia się poprzez zagęszczenie gruntu, które opisane może być następującymi parametrami mechanicznymi:

- I_s - wskaźnikiem zagęszczenia,
- I_D - stopniem zagęszczenia,
- $E_{1,2}$ - modułami odkształcenia podłoża,
- E_{vd} - modułem dynamicznego odkształcenia podłoża.

Wbudowywany grunt w nasyp powinien być układany warstwami o miąższości dobranymi do projektowanego sprzętu zagęszczającego. Bardzo ważnym i istotnym parametrem przy formowaniu budowli ziemnej jest wilgotność naturalna używanego materiału. Wilgotność wbudowywanego gruntu powinna być zbliżona do jego wilgotności optymalnej tj., $w_n = w_{opt} \pm 2\%$. Istotnym elementem, przy warstwowej budowie nasypów, jest zgodna ze sztuką inżynierską, konieczność zagęszczenia każdej warstwy nasypu do uzyskania zaprojektowanego parametru mechanicznego.

6.1. Znaczenie wilgotności optymalnej.

Najważniejszym czynnikiem wpływającym na zagęszczenie gruntu jest jego wilgotność w czasie zagęszczania. Różnice w zachowaniu się gruntu w czasie jego zagęszczania zależą głównie od wytrzymałości gruntu związanej ściśle z jego wilgotnością.

Przy małej wilgotności grunty mają zwykle dużą wytrzymałość i są „sztywne”, a co za tym idzie - trudne do zagęszczania. Przy zwiększającej się wilgotności grunty tracą swą wytrzymałość i łatwiej można je ugniatać. Najbardziej celowe jest wbudowanie w korpus drogowy gruntów o wilgotności optymalnej lub zbliżonej do optymalnej, nie mniejszej jednak od 0,9 wilgotności optymalnej, wtedy bowiem zagęszczenie wykonuje się przy najmniejszym, zużyciu energii. Zagęszczanie gruntów przy wilgotności większej od optymalnej jest nieefektywne, a najczęściej wręcz niemożliwe.

Wilgotność optymalną wyznacza się laboratoryjnie lub praktycznie na budowie. Trzeba jednak pamiętać, że badania laboratoryjne stanowią tylko niewielkie przybliżenie warunków polowych i wyniki tych badań muszą być traktowane jako orientacyjne. Laboratoryjny sposób zagęszczania zwykle nie odpowiada zagęszczaniu na budowie (rzadko na budowie stosuje się ubijanie). Poza tym badania laboratoryjne są wykonywane na materiale drobnym (przechodzącym przez sito 7 mm) i trudno je zastosować np. do żwirów i pospółek. Dlatego decydujące znaczenie dla określenia wilgotności optymalnej mają badania i obserwacje w czasie zagęszczania na budowie. Jak wynika z przeprowadzonych badań wilgotność optymalna gliny zmienia się od 18% przy zagęszczaniu walcami ogumionymi do 12% - przy zagęszczaniu walcami okołkowanymi.

Na ogół dostosowuje się maszyny i liczbę ich przejazdów do wilgotności gruntu dowożonego na nasyp. Ważną rzeczą jest przy tym, aby zagęszczenie następowało od razu po ułożeniu gruntu, nie dopuszczając do jego wysychania.

Należy pamiętać, że grunty sypkie nie wymagają dokładnej kontroli wilgotności i zwiększenie energii nie ma wielkiego wpływu na zmiany stopnia zagęszczenia. Grunty

spoiste dają natomiast znaczny przyrost ciężaru objętościowego szkieletu gruntowego przy wzroście energii użytej, do zagęszczania, a zmiany wilgotności mają duży wpływ na zmiany potrzebnej energii. Stąd też wilgotność tych gruntów powinna być dokładnie kontrolowana w czasie zagęszczania.

Wilgotnością optymalną (w_{opt}) gruntu nazywamy taką wilgotność, przy której grunt daje się najbardziej zagęścić. Parametrem decydującym o jakości zagęszczenia gruntu jest w tym przypadku gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ρ_d .

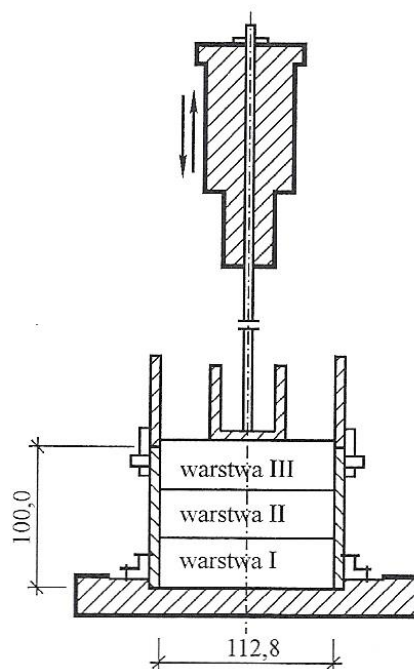
Zatem wilgotność optymalna to taka wilgotność, przy której gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ρ_d jest największa i zależy od uziarnienia gruntu. Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego posłużyć może do wyznaczenia innego bardzo ważnego parametru - wskaźnika zagęszczenia I_s , charakteryzującego jakość zagęszczenia gruntu w nasypie. Wskaźnik zagęszczenia I_s to stosunek gęstości objętościowej szkieletu gruntowego w nasypie ρ_d do maksymalnej wartości gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_{ds} , uzyskanej w warunkach laboratoryjnych.

Porównujemy tutaj zagęszczenie gruntu w nasypie do maksymalnego zagęszczenia tego samego gruntu, uzyskanego w warunkach laboratoryjnych. Wartość I_s zbliżona do jedności świadczy o dobrej jakości zagęszczenia nasypu.

Wilgotność optymalną w_{opt} i maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego ρ_{ds} , oznacza się w aparacie Proctora, polegających na ubijaniu kilku warstw gruntu w cylindrze określoną energią. Ważne jest, aby warunki zagęszczenia w aparacie Proctora odpowiadały warunkom zagęszczania nasypu w skali naturalnej. W tym celu należy wybrać najbardziej odpowiednią metodę zagęszczania gruntu w laboratorium. Wg normy PN-88/B-04481 przewiduje się cztery metody określania wilgotności optymalnej w_{opt} i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_{ds} . Warianty oznaczania tych parametrów przedstawia tabela 7.

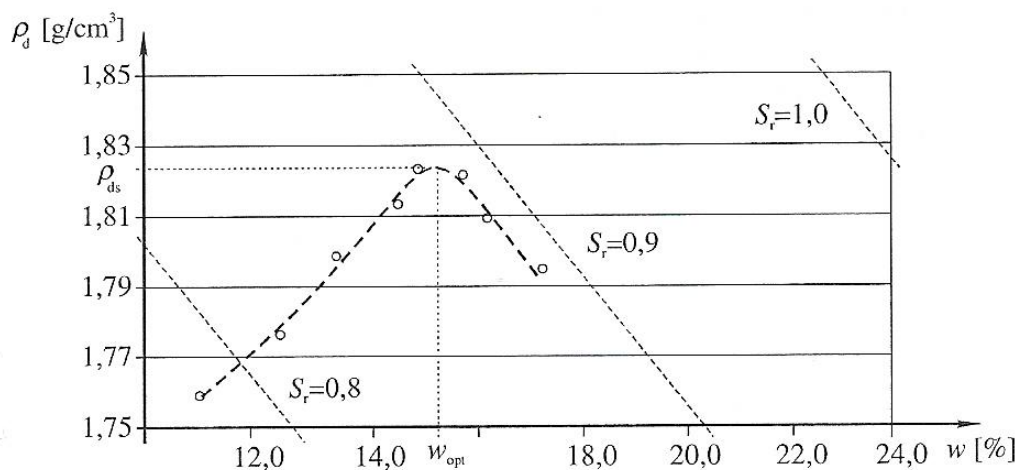
Tabela 7. Metody określania wilgotności optymalnej wg PN-88/B-04481

Metoda	Cylinder	Rodzaj ubijaka	Liczba warstw	Liczba uderzeń	Wysokość opuszczania ubijaka [cm]	Jednostkowa energia zagęszczania [J/cm^3]	Wymiar oczek sita do przesiewu [mm]
I	mały	lekki	3	25	32,0	0,59	6
II	duży	lekki	3	55	32,0	0,59	10
III	mały	ciężki	5	25	48,0	2,65	6
IV	duży	ciężki	5	55	48,0	2,65	10



Rys.11. Schemat aparatu Proctora

Badanie kończy się wykonaniem wykresu z krzywą zagęszczenia gruntu.

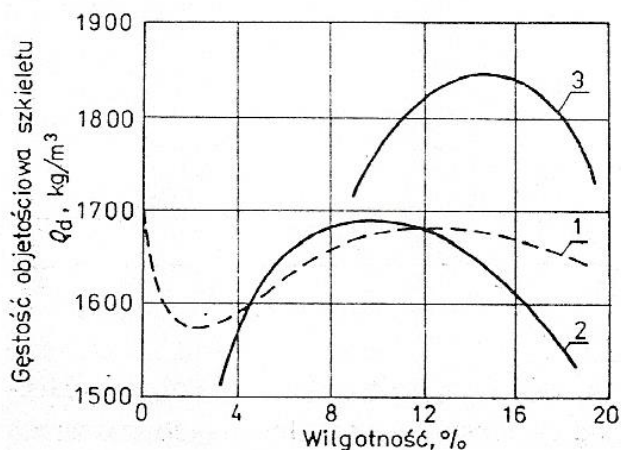


Rys. 12. Krzywa zagęszczalności gruntu

Do wyznaczania wilgotności optymalnej Proctor zaproponował próbę odtwarzającą technologiczny proces zagęszczania gruntu (na budowie). Próba Proctora polega na ubijaniu gruntu w znormalizowany sposób w pojemniku walcowym. Po zagęszczeniu kilku próbek tego samego gruntu o różnych wilgotnościach otrzymane wartości ρ_d nanosi się na wykres

(rys12), z którego odczytuje się wilgotność optymalną odpowiadającą maksymalnej gęstości szkieletu gruntowego $\rho_{\max}$. Wskaźnikiem uzyskanego zagęszczenia jest $I_s = \frac{\rho_d}{\rho_{d\max}}$, w którym ρ_d jest gęstością objętościową gruntu zagęszczonego.

W gruntach sypkich, (niespoistych) pozbawionych frakcji ilastej i pylastej pojęcie wilgotności optymalnej praktycznie nie występuje, a wpływ wilgotności na zagęszczenie jest mniej wyraźny (rys. 13). Maksymalne zagęszczenie gruntów tego rodzaju uzyskuje się przez wibrację, a nie przez ubijanie.



Rys.13. Krzywe zagęszczenia γ_d piasków: 1- średnich, 2- pylastych 3-glin. [3]

Zagęszczenie gruntów niespoistych, zarówno w stanie naturalnym, jak też sztucznie zagęszczonych, mierzy się stopniem zagęszczenia I_D , który jest miarą wzajemnego upakowania (ułożenia) ziaren w odniesieniu do stanu najbardziej luźnego i najbardziej zagęszczonego. Stopień zagęszczenia oblicza się wg wzorów:

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}},$$

$$I_D = \frac{\rho_{d\max}(\rho_d - \rho_{d\min})}{\rho_d(\rho_{d\max} - \rho_{d\min})},$$

w których:

$e, e_{\max}, e_{\min}$ – wskaźnik porowatości gruntu, odpowiednio w stanie naturalnym, najbardziej luźnym i najbardziej zagęszczonym,
 $\rho_d, \rho_{d\min}, \rho_{d\max}$ - gęstość szkieletu gruntowego w stanach jak wyżej.

Grunt jest luźny jeżeli $I_D \leq 0,33$, średnio zagęszczony, gdy $0,33 < I_D \leq 0,67$ i zagęszczony, jeśli $I_D > 0,67$ (wg PN/B-03020).

Tablica 8. Klasyfikacja zagęszczenia gruntów gruboziarnistych wg PN-EN ISO 14 688

STAN ZAGĘSZCZENIA	SYMBOL	STOPIEŃ ZAGĘSZCZENIA [%]
BARDZO LUŻNE	bln	0 - 15
LUŻNE	ln	15 - 35
ŚREDNIO ZAGĘSZCZONE	szg	35 - 65
ZAGĘSZCZONE	zg	65 - 85
BARDZO ZAGĘSZCZONE	bzg	85 - 100

W praktyce inżynierskiej metody badań zagęszczenia i zagęszczalności gruntu należy podzielić na:

- laboratoryjne - polegające na wyznaczeniu metodami ubijania maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_{ds} i wilgotności optymalnej w_{opt} gruntu,
- polowe - bezpośrednie i pośrednie metody wyznaczenia miar zagęszczenia gruntu w warunkach budowy - in situ.

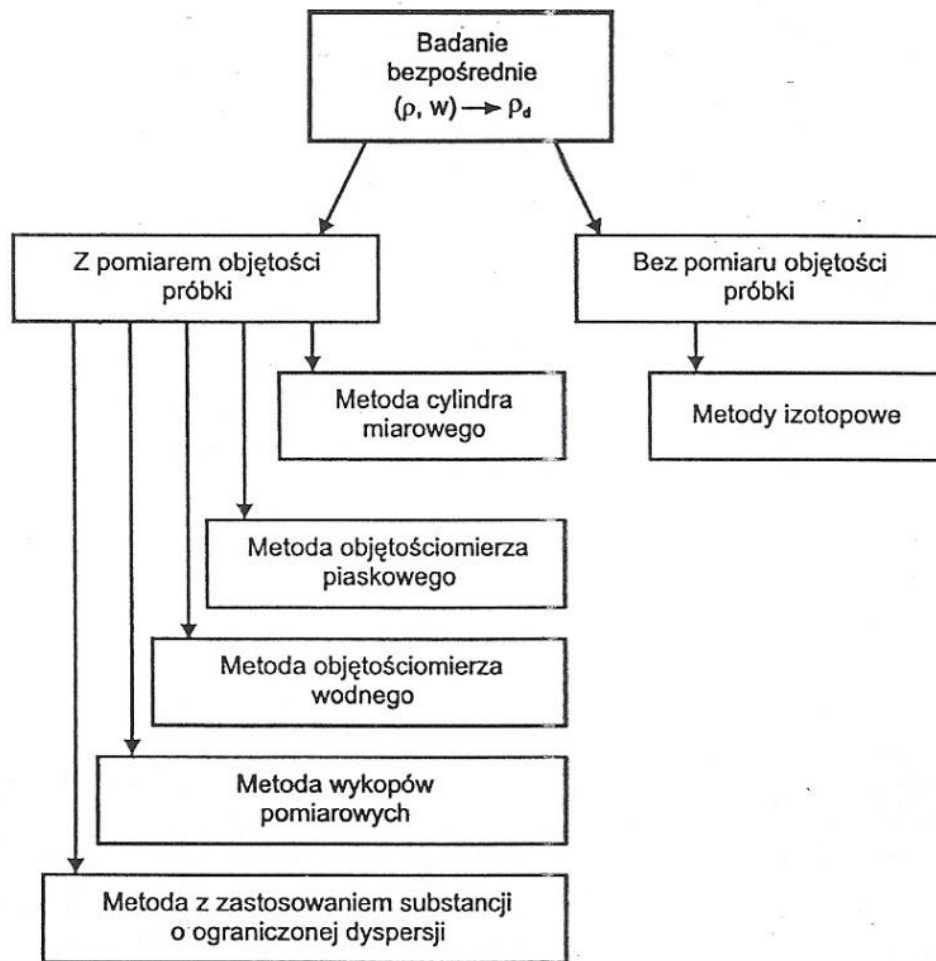
Miarami zagęszczenia gruntów używanymi w Polsce najczęściej są:

- stopień zagęszczenia I_D traktowany jako identyfikator stanu fizycznego niespoistych gruntów nienaruszonych,
- wskaźnik zagęszczenia I_s sztucznie zagęszczanych gruntów spoistych i niespoistych.

Stan gruntów naturalnych określa się na podstawie stopnia zagęszczenia I_d , który oznacza stosunek zagęszczenia istniejącego w warunkach naturalnych do największego możliwego zagęszczenia danego gruntu. Stopień zagęszczenia bada się, by ocenić stan gruntów niespoistych podłoża naturalnego (oraz czasami – nasypów).

Wyznaczenie miar zagęszczenia należy podzielić przede wszystkim na metody bezpośrednie i pośrednie.

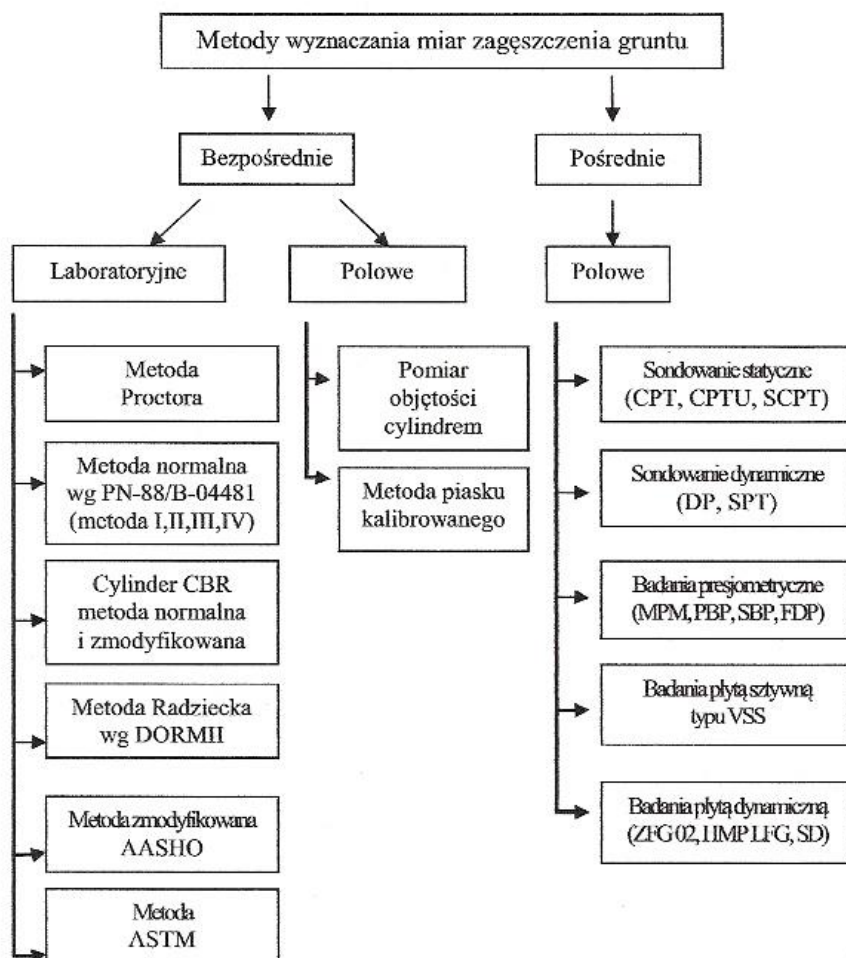
- Metody bezpośrednie polegają na wyznaczeniu gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_d na podstawie pomiaru in situ gęstości objętościowej gruntu ρ i porównaniu wyników liczbowych z wartością maksymalną gęstości objętościowej ρ_{ds} wyznaczoną w warunkach laboratoryjnych.



Rys.14. Metody bezpośredniego pomiaru gęstości objętościowej gruntu ρ .

- Metody pośrednie polegają na wyznaczeniu stopnia zagęszczenia gruntu I_D lub wskaźnika zagęszczenia I_s za pomocą badań, na podstawie których wyznaczane są parametry geotechniczne, służące później do obliczenia miar zagęszczenia.

Przykładowymi parametrami pośrednimi określenia miar zagęszczenia są np. moduły sztywności podłoża E_2 i E_1 , moduł dynamiczny odkształcenia podłoża E_{vd} lub liczba uderzeń wpędu sondy na 10 cm (N_{10}). Na schemacie poniżej przedstawiono metody bezpośrednie i pośrednie wyznaczania miar zagęszczenia.



Rys.15. Metody bezpośrednie i pośrednie wyznaczania miar jakości zagęszczenia.

6.2. Wybrane metody badań zagęszczalności gruntu.

Wybór metody badania zagęszczenia gruntów uwarunkowany jest przede wszystkim od rodzaju gruntu i w zależności od niego należy dobrać odpowiednią metodę badawczą. W przypadku gruntów gruboziarnistych piaszczystych możliwe jest zastosowanie wszystkich metod badawczych zarówno bezpośrednich, jak i pośrednich. Problem pojawia się natomiast w przypadku badania materiałów zasypowych o frakcjach żwirowych, tzn. powyżej 2 mm. W tym przypadku możliwe do zastosowania są metody:

- bezpośrednie laboratoryjne: np. metoda Proctora,
- bezpośrednie polowe: np. metoda piasku kalibrowanego,
- pośrednie polowe: badanie płytą VSS i badanie płytą dynamiczną.

Zastosowanie metod bezpośrednich jest procesem długotrwałym i trudnym do szybkiego weryfikowania prawidłowości zagęszczenia w warunkach budowy, gdzie najistotniejsza jest możliwość szybkiej oceny prawidłowości wbudowania materiału ziemnego. W celu przyspieszenia realizacji oraz ułatwienia badań polowych stosuje się obecnie w przypadku

materiałów gruboziarnistych odpowiadających frakcjom żwirowym dwie podstawowe metody badań polowych: badanie płytą typu VSS i badanie płytą dynamiczną.

Badania płytą typu VSS

Badania in situ za pomocą aparatu VSS polega na wyznaczeniu pierwotnego modułu odkształcenia E_1 , wtórnego modułu odkształcenia E_2 - tzw. modułu odkształcenia sprężystego oraz wskaźnika odkształcenia I_0 tzn. stosunku modułów wtórnego do pierwotnego

$I_0 = \frac{E_2}{E_1}$. Pomiar „płytą VSS” dokonuje się w dwóch cyklach obciążenia, pomiędzy którymi przeprowadza się proces odciążenia podłoża. Obciążenie odbywa się stopniami co 0,05 MPa do wymaganej wartości końcowej natomiast odciążenie realizuje się stopniami co 0,1 MPa. Moduły odkształcenia określa się z zależności:

$$E_1 = \frac{3\Delta\rho_1 D}{4\Delta s_1}, \quad E_2 = \frac{3\Delta\rho_2 D}{4\Delta s_2},$$

gdzie:

E_1 - pierwotny moduł odkształcenia [MPa],

E_2 - wtórny moduł odkształcenia [MPa],

$\Delta\rho_{1,2}$ - różnica obciążeń w pierwszym (1) i drugim (2) cyklu obciążenia w [MPa],
w zakresach zależnych od rodzaju podłoża, gdzie dla podłoża gruntowego zakres wynosi 0,05 ÷ 0,15 MPa a dla ulepszonego 0,15 ÷ 0,25,

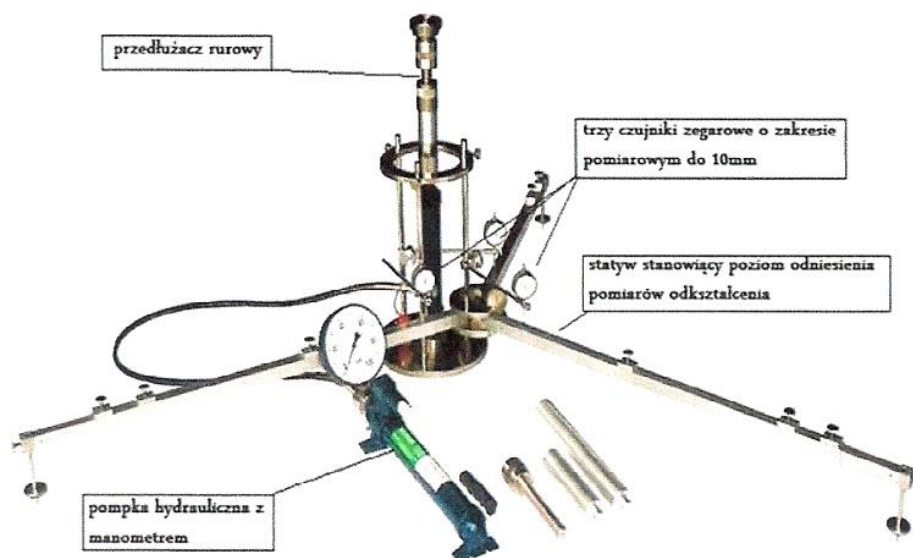
$\Delta s_{1,2}$ - przyrost osiadań w pierwszym (1) i drugim (2) cyklu obciążenia w [mm],
odpowiadający zakresom obciążeń,

D - średnica płyty pomiarowej i $D=300$ mm.

Na polskim rynku dostępne są następujące aparaty VSS:

- 3a - aparat trzypunktowy z licznikami analogowymi,
- 3e - aparat trzypunktowy z licznikami elektronicznymi,
- 1a - aparat jednopunktowy z licznikiem analogowym,
- 1e - aparat jednopunktowy z licznikiem elektronicznym,

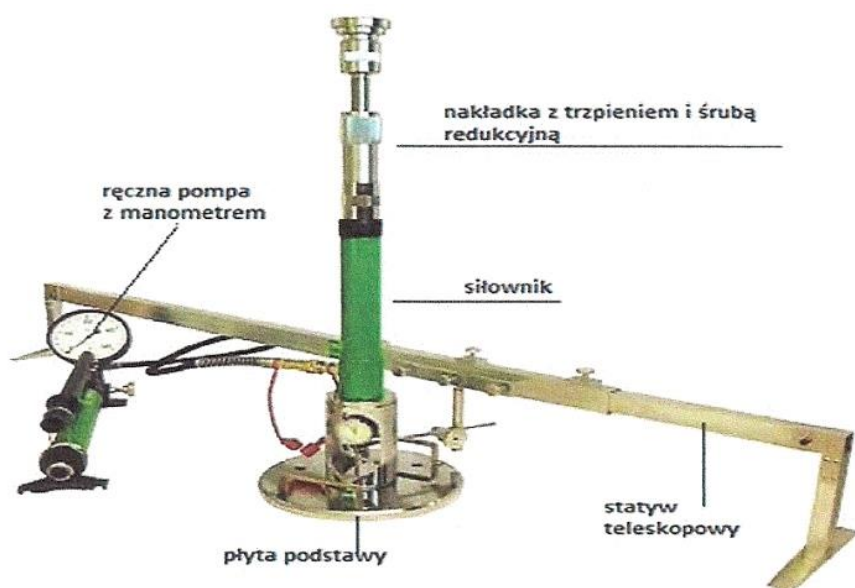
Jedno- lub trzy-punktowy odnosi się tutaj do liczby liczników zamieszczonych na statywie teleskopowym - w przypadku aparatu 1e i 1a lub statywie w kształcie trójnogu - dla aparatów 3a i 3e. Niezależnie od rodzaju narzędzia procedura badania pozostaje niezmienna, różnica polega jedynie na tym, że w przypadku aparatu trzypunktowego bierze się średnią wartość osiadania odczytaną z trzech liczników, a w przypadku aparatu jednopunktowego wartość osiadania otrzymujemy bezpośrednio. Poniżej przedstawiono budowę aparatu trzypunktowego.



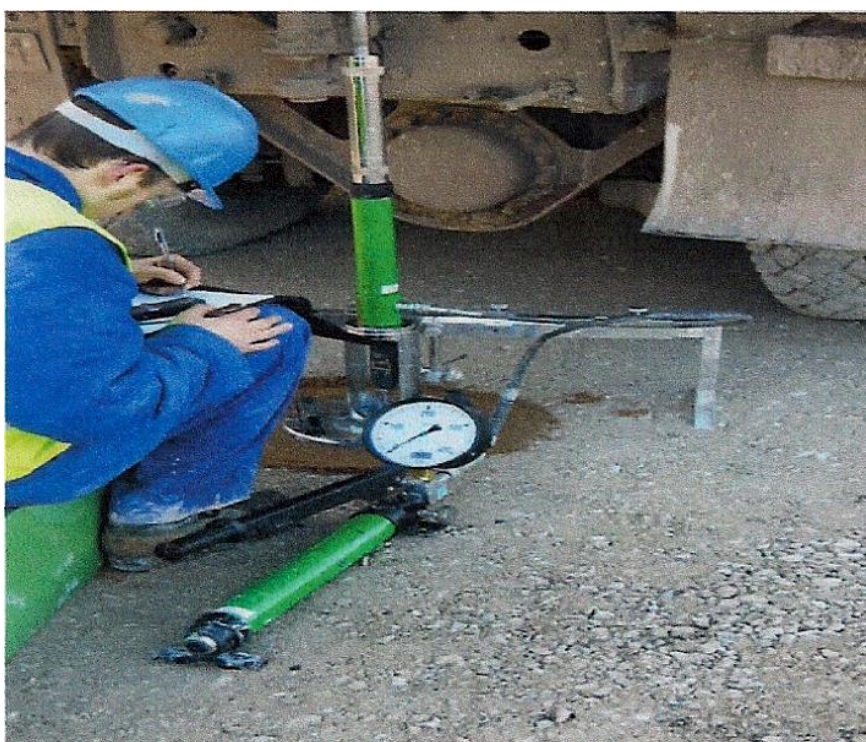
Rys.16. Budowa aparatu VSS -3a



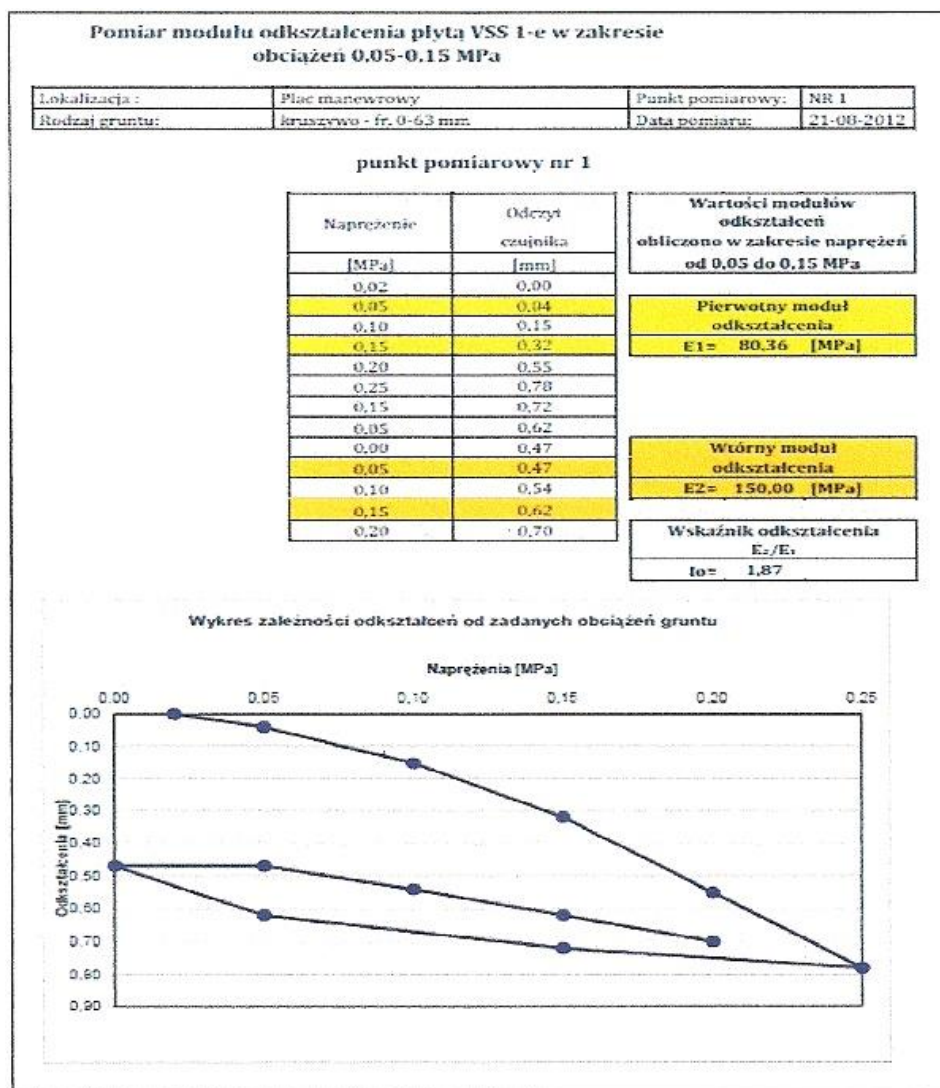
Fot. 1. Aparat VSS-3a w trakcie wykonywania badania.



Rys.17. Budowa aparatu VSS-1a.



Fot. 2. Aparat VSS-1a w trakcie badań in situ.



Rys18. Graficzne przedstawienie wyników badań z testu VSS.

Ocenę prawidłowości zagęszczenia nasypów w zależności od ich funkcji wykonuje się na podstawie porównania otrzymanych wartości modułów odkształceń $E_{1,2}$ i wskaźnika odkształcenia I_0 z wartościami wymaganymi.

Reasumując wymagania zagęszczenia gruntów w nasypach i wykopach zawarte są w normie drogowej PN-S-02205:1998.

Zgodnie ze sztuką inżynierską przy ocenie prawidłowości zagęszczenia materiału należy kierować się uzyskaniem projektowanych wartości modułów odkształcenia podłoża E_1 i E_2 oraz, w zależności od rodzaju gruntu otrzymaniem prawidłowej wartości odkształcenia podłoża I_0 , która zależnie od rodzaju gruntu wynosi:

- dla gruntów piaszczystych $I_0 \leq 2,2$ i $I_s \geq 1,0$, oraz $I_0 \leq 2,5$ i $I_s < 1,0$,
- dla gruntów drobnopziarnistych $I_0 \leq 2,0$,
- dla gruntów różnypziarnistych $I_0 \leq 3,0$,
- dla narzutów kamiennych rumoszy $I_0 \leq 4,0$,
- dla gruntów antropogenicznych I_0 - wyznacza się doświadczalnie,
- dla gruntów ulepszonych spoiwami $I_0 \leq 2,2$.

W realizacjach bardzo często spotyka się wymagania – w przypadku budowy nasypów pod obiekty kubaturowe – dotyczące wartości liczbowych modułów odkształcenia podłoża na poziomie $E_1 > 60 \text{ MPa}$, $E_2 > 120$ dla $I_0 \leq 2,5$.

Metodyka badań



Fot.3. Aparat VSS

Badanie płytą VSS polega na pomiarze odkształceń pionowych (osiadań) badanej warstwy pod wpływem nacisku statycznego.

Obciążenia są realizowane skokowo podobnie jak w przypadku badania edometrycznego. Przyrost obciążeń następuje co 50 kPa aż do osiągnięcia wartości 350 kPa, po czym następuje odciążenie i ponowne zadawanie obciążeń. Moduły odkształceń dla nasypów wyznacza się dla zakresu 150 – 250 kPa.

Odkształcenia powstałe w wyniku zadawanych obciążeń są odkształceniami trwałymi, związanymi z przemieszczeniami cząstek gruntu względem siebie na skutek poślizgu bądź toczenia oraz kruszeniem i pękaniem ziarn w miejscach styków, oraz sprężystymi polegającymi na odkształceniach poszczególnych cząstek. Jak wynika z doświadczeń, poślizg międzycząsteczkowy, powodujący przegrupowanie ziarn w masie gruntowej, wpływa w największej mierze na całkowite odkształcenia. Sprężysta praca materiału staje się istotna, gdy na skutek przemieszczeń ziarn (zagęszczania) masa gruntowa nabiera sztywności.

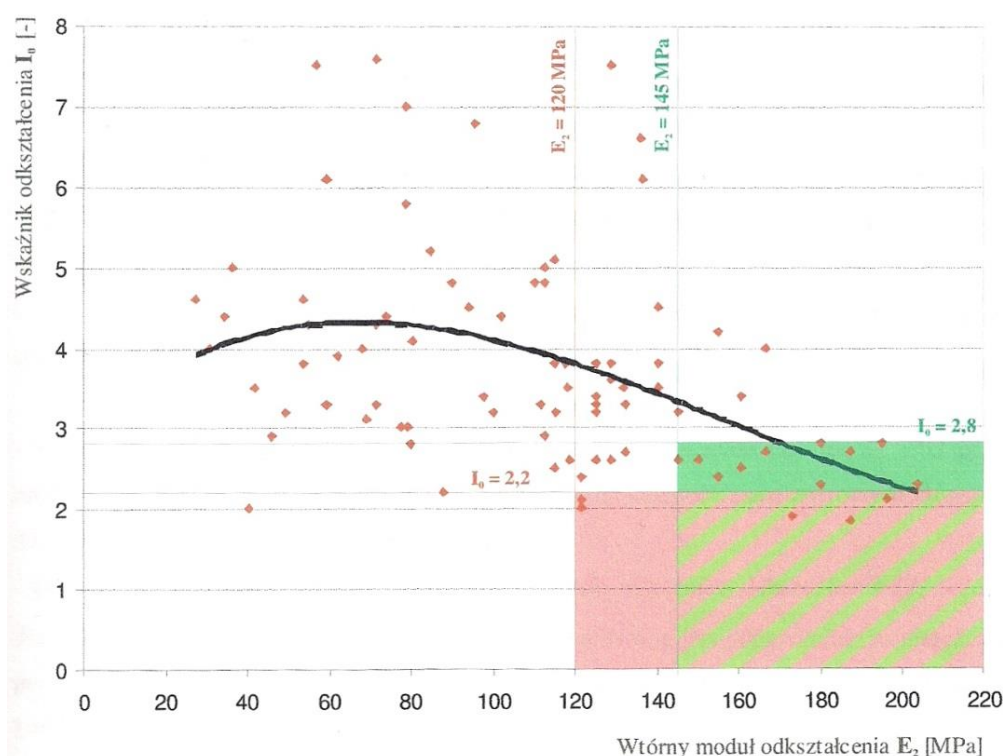
Nieulepszone grunty spoiste, nawet w stanie zwartym, wykazują wtórny moduł odkształcenia, zazwyczaj poniżej 50 MPa (np. il. mioceński – $E_2 \sim 38 \text{ MPa}$, glina zwałowa – $E_2 \sim 27 \text{ MPa}$, mada pylasta – $E_2 \sim 14 \text{ MPa}$), przy wskaźniku odkształcenia poniżej 2,0.

Piaski średnie w stanie zagęszczonym ($I_D \sim 0,7$) wykazują wartości wtórnego modułu odkształcenia z przedziału 78,9 – 112,5 MPa, przy wskaźniku odkształcenia często poniżej 2,2.

Piaski pomimo nawet dobrego zagęszczenia nie posiadają odpowiednio wysokiej nośności. Pospółki i żwiry, ze względu na znaczną zawartość frakcji żwirowej, osiągają nośność znacznie wyższą od piasków. Przeprowadzone na przestrzeni ostatnich 10 lat badania płytą VSS wskazują, że pospółki i żwiry mogą osiągać moduł odkształcenia wtórnego E_2 nawet ponad 200 MPa. Dla tego typu materiałów szczególnie istotnymi cechami są: kształt ziarn oraz uziarnienie. Wykazano, że dla danego stopnia zagęszczenia moduł odkształcenia materiału o ziarnach kanciastych będzie mniejszy niż takiego o ziarnach obtoczonych. Ziarna dobrze obtoczone (szczególnie kuliste) są bowiem znacznie mniej podatne na pękanie i kruszenie ich krawędzi.

Grunty o nierównomiernym uziarnieniu zagęszczają się znacznie lepiej niż grunty równomiernie uziarnione, gdyż drobniejsze cząstki wnikają pomiędzy grubsze, wypełniając wolne przestrzenie

W praktyce okazuje się, że skład petrograficzny żwirów i pospółek staje się bardzo istotny przy wykonywaniu pomiarów odkształceń płytą VSS. Otoczaki skał krystalicznych oraz kwarcytów wykazują znaczną kulistość względem dyskoidalnych i wrzecionowatych otoczków piaskowcowych. Przyjęcie w normie jednego kryterium wskaźnika odkształcenia $I_0 \leq 2,2$ oraz wtórnego modułu odkształcenia $E_2 \geq 120$ MPa wspólnie dla piasków, pospółek i żwirów sprawia w praktyce duże trudności wykonawcom robót ziemnych w zakresie możliwości jednoczesnego dotrzymania wymaganych wartości obu wymienionych parametrów.



Rys.19. Zależność wskaźnika odkształcenia (I_0) od wtórnego modułu odkształcenia (E_2) dla nasypów z materiału dunajcowego. Obszar czerwony obejmuje wyniki spełniające kryteria normowe ($E_2 \geq 120$ MPa i $I_0 \leq 2,2$). Obszar zielony obejmuje wyniki dla przyjętych kryteriów ($E_2 \geq 145$ MPa i $I_0 \leq 2,8$). [2]

Mechanizm odkształceń nasypów poddanych obciążeniu jest zagadnieniem złożonym, zależnym od wielu czynników (rodzaj podłoża, miąższość nasypu, znaczna zmienność materiału, nawet w obrębie jednego złoża). Znaczny rozrzut wyników wskaźnika odkształcenia wskazuje, że zachowanie się nasypów pod obciążeniem, dla różnych materiałów, jest zmienne, pomimo że badania wykonywano na nośnym podłożu rodzimym. Obecnie stosowane przepisy i normy nie dopuszczają możliwości indywidualnego doboru wielkości parametrów zagęszczenia i nośności nasypu w zależności od użytego kruszywa i jego cech jakościowych.

Wydaje się, że celowe byłoby rozważenie dopuszczenia możliwości wyznaczania określonych parametrów jakości nasypów (np. I_0) w odniesieniu do danego materiału. Jest to szczególnie istotne w przypadku, gdy określony materiał ze względu np. na skład petrograficzny, kulistość ziarn lub inne specyficzne cechy odróżnia się od większości kruszyw stosowanych w Polsce.

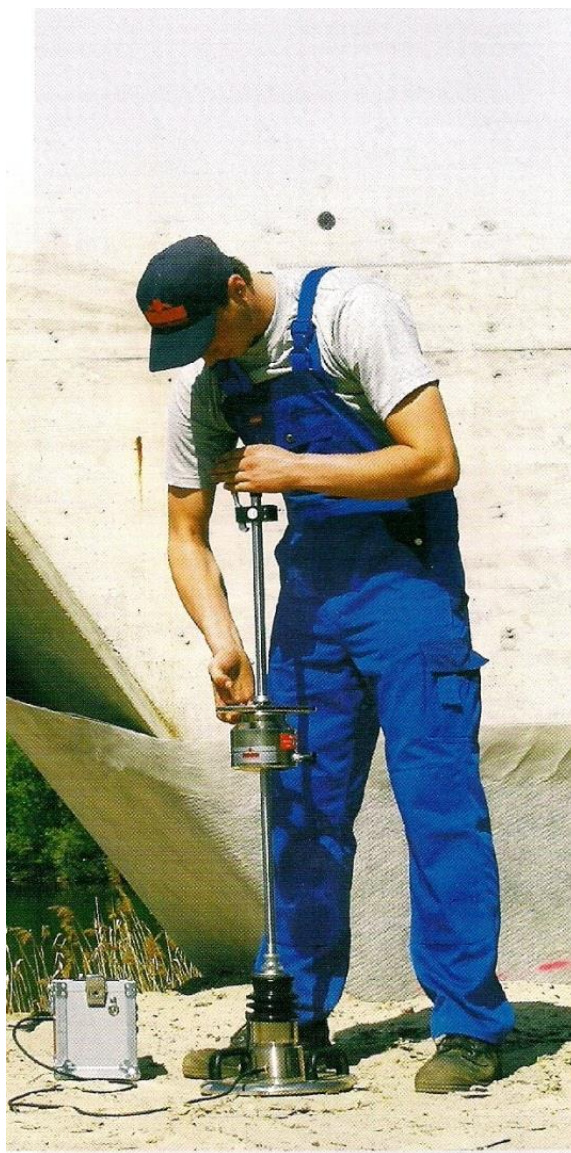
Płyty obciążane dynamicznie

Płyta obciążana dynamicznie jest przeznaczona do badania nośności nie związanych warstw nośnych jako alternatywa lub uzupełnienie badania przyrządem VSS (badanie statyczne).

Płyta dynamiczna spełnia wymogi technicznych przepisów kontrolnych dotyczących badań gruntu i skał w budownictwie drogowym. Przyrząd ten pozwala na szybkie ustalenie dynamicznego modułu odkształcenia E_{vd} [MN/m²] wierzchniej warstwy nośnej. Ocenę nośności można przeprowadzać dla gruntów o wielkości ziaren do 63mm i dynamicznym module odkształcenia równym E_{vd} 125 MN/m². Szczególną zaletą płyty dynamicznej jest to, że w przeciwieństwie do aparatu VSS nie wymaga ona zastosowania statywu i samochodu ciężarowego jako przeciwwagi. Z tego powodu płytę można stosować w trudniej dostępnych miejscach, takich jak odwierty, rowy, nasypy. Płyta znajduje zastosowanie w drogownictwie, kolejnictwie oraz budownictwie sieci kablowych, gazowych, wodno-kanalizacyjnych.

Metodyka badań

Przed przystąpieniem do pomiarów płytę obciążającą należy starannie ułożyć na badanej powierzchni i połączyć z elektronicznym rejestratorem. Prowadnicę z ciężarkiem należy umieścić centralnie na kuli centrującej płyty. Przed opuszczeniem ciężarka należy podnieść go na wyznaczoną wysokość i zablokować mechanizmem spustowym znajdującym się w górnej części prowadnicy. Przed właściwym pomiarem należy wykonać trzy uderzenia wstępne zapewniające właściwy kontakt płyty z podłożem. Seria pomiarowa składa się z trzech kolejnych uderzeń. W czasie pomiaru na ekranie wskazywane są poszczególne amplitudy osiadania w mm. Następnie zostaje obliczona i wyświetlona wartość średnia z trzech kolejnych pomiarów oraz moduł odkształcenia dynamicznego.



Rys. 4. Widok płyty obciążanej dynamicznie [10]

Istotą każdego badania pośredniego jest uzyskanie wyniku liczbowego parametru, dzięki któremu można w sposób bezpośredni wyznaczyć miary zagęszczenia gruntu, tj. I_s oraz I_D . W przypadku płyty dynamicznej uzyskuje się parametr zagęszczenia w postaci modułu dynamicznego, na podstawie którego można wyznaczyć wartość wskaźnika zagęszczenia I_s oraz wartość wtórnego modułu odkształcenia gruntu E_2 . W Polsce stosuje się niemieckie wytyczne do przeliczania wartości modułu dynamicznego na opisane powyżej parametry gruntu (tab. 9 i 10).

Tablica 9. Zestawienie wartości modułu dynamicznego w odniesieniu do I_s i E_2 , według (niemieckiej literatury)

Wytyczne wg:	Zależności		Parametr		
			E_{vd}	I_s	E_2
Niemiecka kolej Deutsche Bahn NGT 39 [xxx] (nasypy)	torowiska przelotowe głównych linii kolejowych	$C_u > 15$	50	1,00	120
	torowiska przelotowe linii S-bahn oraz pobocznic	$C_u > 15$	45	1,00	100
	torowiska linii pozostałych	$C_u > 15$	40	0,97	80
Niemiecka kolej Deutsche Bahn NGT 39 [xxx] (podłoże gruntowe)	torowiska przelotowe głównych linii kolejowych	żwiry i piaski	40	1,00	80
		pozostałe grunty	35		
	torowiska przelotowe linii S-bahn oraz pobocznic	żwiry i piaski	35	0,97	60
		pozostałe grunty	30		
	torowiska linii pozostałych	żwiry i piaski	30	0,95	45
		pozostałe grunty	25		
ZTVA-StB 97 ⁴	zasypki przekopów i wykopów w budownictwie komunikacyjnym		60	-	120
			50	-	100
			40	-	80
			25	-	45

Tablica10. Zestawienie wartości modułu dynamicznego w odniesieniu do I_s , E_2

ZTVE-StB 94 ⁵	roboty ziemne w budownictwie drogowym	żwir	≥ 55	$\geq 1,00$	≥ 100
			≥ 45	$\geq 0,98$	≥ 80
			≥ 40	$\geq 0,97$	≥ 70
		żwiry i piaski	≥ 40	$\geq 1,00$	≥ 80
			≥ 35	$\geq 0,98$	≥ 70
			≥ 32	$\geq 0,97$	≥ 60
		grunty mieszane drobnoziarniste	≥ 25	$\geq 1,00$	≥ 45
			≥ 15	$\geq 0,97$	≥ 30
			≥ 10	$\geq 0,95$	≥ 20

Tablica 11 Zestawienie wartości modułu dynamicznego w odniesieniu do wymagań ZTVT

Typ gruntu		Wskaźnik zagęszczalności	Moduł odkształcenia	
		I_s	E_2 [MPa]	E_{vd} [MPa]
Różnoziarniste	Z domieszką ziaren $d \leq 2$ mm poniżej 60% wagi oraz $d \leq 0,063$ mm pon. 7% wagi	$\geq 1,03$	≥ 120	≥ 60
	Z domieszką ziaren $d \leq 2$ mm poniżej 60% wagi	$\geq 1,00$	≥ 100	≥ 50
		$\geq 0,98$	≥ 80	≥ 40
		$\geq 0,97$	≥ 70	≥ 35
	O ziarnie równym	$\geq 1,00$	≥ 80	≥ 40
		$\geq 0,98$	≥ 70	≥ 35
		$\geq 0,97$	≥ 60	≥ 32
Różnoziarniste	Z udziałem ziaren $d \leq 0,063$ mm od 7 do 15 % wagi oraz $d \leq 2$ mm poniżej 60% wagi	$\geq 1,00$	≥ 70	≥ 35
		$\geq 0,97$	≥ 45	≥ 25
	Z udziałem ziaren $d \leq 0,063$ mm od 15 do 40% wag. oraz $d \leq 2$ mm poniżej 60% wagi	$\geq 0,97$	≥ 45	≥ 25
		$\geq 0,95$	≥ 30	≥ 20

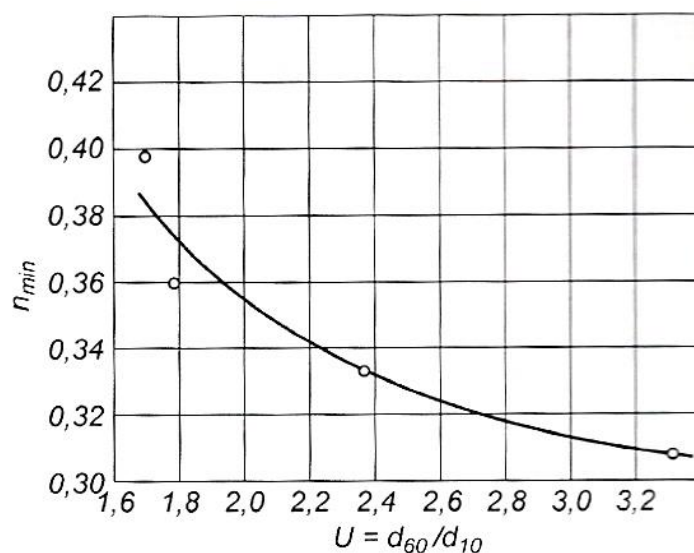
Uwagi praktyczne:

1) Wpływ różnoziarnistości gruntu

Skład ziarnowy mieszanki gruntowej i stąd wynikający wskaźnik różnoziarnistości U ma zasadniczy wpływ na zagęszczanie gruntów i jego maksymalny ciężar objętościowy szkieletu gruntowego (γ_{dmax}) oraz minimalny (γ_{dmin}).

Grunty niespoiste zawierające dużo cząstek pylistych ($>5\%$) zagęszczają się gorzej w trakcie wibracji. Lepsze efekty uzyskuje się tutaj metodą ubijania. Na zagęszczalność ma też wpływ grubość żwiru. Przy grubszym uziarnieniu uzyskać można większą wartość (γ_{dmax}) i (γ_{dmin}) oraz większe porowatości minimalne.

Z dotychczasowych badań wynika, że ze wzrostem U maleje jednocześnie porowatość gruntu (n_{min}) i grunty zagęszczają się lepiej.



Rys.20. Wykres zależności porowatości minimalnej n_{min} od wskaźnika różnoziarnistości U piasku.[8]

2) Wpływ kształtu i obtoczenia ziarn.

Grunty o ziarnach kulistych i gładkich mają mniejszą porowatość minimalną w porównaniu z gruntami ostrokrawędzistymi i nieobtoczonymi, przez co wymagają mniejszego przyspieszenia wibracji.

3) Wpływ wilgotności.

Wilgotność gruntu jest kardynalnym czynnikiem wpływającym na jakość zagęszczenia. Najlepsze wyniki osiąga się przy wilgotności optymalnej.

4) Wpływ zawartości frakcji ilastej i pylastej.

Konieczność zbadania wpływu cyklicznych obciążeń na zachowanie się ośrodka gruntowego została spowodowana obserwowanymi w przeszłości licznymi katastrofami budowli w wyniku trzęsień ziemi. Zwrócono przy tym uwagę iż zjawisko zniszczenia gruntu przy cyklicznych obciążeniach ma zgoła inny charakter, co związane jest z trój-, a nawet w szczególnym przypadku z dwufazowością ośrodka i zachodzi poprzez tzw. „upłynnienie”. Jest to stan, w którym grunt traci całkowicie swą wytrzymałość na ścinanie i zachowuje się jak ciecz.

Jest to typowe zjawisko tiksotropii – czyli przechodzenia gruntów o dużej zawartości drobnych cząstek w płynną zawiesinę. Bardzo niepożądane szczególnie przy zagęszczaniu warstw gruntowych lub poddanych wstrząsom lub cyklicznym oddziaływaniom ruchu, wreszcie wibracjom.

Mowa tu nie tylko o dużej zawartości frakcji ilastych lecz również frakcji pylastej. W tego typu gruntach cząstki ilowe i koloidalne tworzą pomiędzy strukturą o grubszych frakcjach spoiwa w postaci ciągłej siatki przestrzennej. Wadą tego typu wiązania jest mała odporność na uplastycznienie gruntu lub nawet upłynnienie w warunkach oddziaływania obciążeń dynamicznych.

Proces rozchodzenia się fal sprężystych w podłożu gruntowym należy do zagadnień bardzo skomplikowanych.

Dlatego też, podobnie zresztą jak w innych dziedzinach, częstotliwość drgań własnych podłoża gruntowego jest taką częstotliwością, której najbardziej „sprzyja” grunt w propagowaniu się drgań i której towarzyszą największe amplitudy przy tej samej sile wzbudzenia. Oczywiście jest, że dla tego samego gruntu inne są częstotliwości dla składowych pionowych i poziomych drgań.

Częstotliwości drgań własnych „rezonansowe” dla typowych gruntów.

Rodzaj podłoża	Częstotliwość drgań [Hz]		
	pionowych	poziomych	bez podziału
Grunt bagnisty	4	-	-
Łł, glina i grunty gliniaste w zależności od wytrzymałości	15 – 28	15 – 28	5 – 10
Piaski w zależności od miąższości warstwy	19 – 26	5 – 15	5 – 18
Żwir w zależności od miąższości warstwy	23 – 30	7 – 20	7 – 22
Grunty skaliste	32	-	40 - 90

Znajomość częstotliwości własnych pozwala w praktyce inżynierskiej uniknąć nadmiernych drgań lub dynamicznych osiadań (poprzez eliminowanie drgań „rezonansowych”). Zależy ona również od np. masy wibratora i jego mechanicznych właściwości, rozkładu obciążeń przenoszonych z wibratora na podłoże, kontaktu jego z podłożem oraz od gęstości i sztywności podłoża. Ścisły związek z częstotliwościami „rezonansowymi” mają również mikrosejsmy, drgania gruntu (od ruchu pojazdów i maszyn). Są to drgania rzędu 0,1 – 1 μm i o okresach 0,05 – 1,2 sek.

5) Wpływ amplitudy drgań.

Amplitudę drgań należy dobierać w zależności od uziarnienia i wilgotności gruntu, wartości sił tarcia między cząsteczkami oraz od kształtu ziarn gruntu. Ze zwiększeniem średniej wielkości ziarn, podobnie jak ze zmniejszeniem wilgotności, powinna wzrastać amplituda drgań. Amplituda drgań powinna być także większa przy ziarnach ostrokrawędzistych niż przy ziarnach obtoczonych.

Amplituda drgań nie może być zbyt duża, gdyż przy zagęszczaniu cząstki gruntu przemieszczają się chaotycznie, co w rezultacie może powodować rozluźnienie się zagęszczonej masy gruntu. Dopuszczalna wartość amplitudy dla gruntów niespoistych powinna wynosić 0,3-0,4 mm.

Uwaga - wpływ amplitudy na zagęszczenie gruntów nie jest jednoznacznie wyjaśniony.

6) Wpływ częstotliwości drgań.

Częstotliwość drgań powinna być ściśle uzależniona od amplitudy drgań, w celu zapewnienia niegasnącego charakteru drgań. Zwiększeniu częstotliwości drgań powinno odpowiadać zmniejszenie amplitudy. Częstotliwość ma praktycznie niewielki wpływ na zagęszczenie (minimalna porowatość) gruntów suchych. Najmniejszą porowatość $n_{\min}$ otrzymuje się przy częstotliwości $22 \div 33$ Hz. Największy wpływ na wartość $n_{\min}$ ma grubość uziarnienia; ze wzrostem grubości uziarnienia wartość $n_{\min}$ rośnie.

7) Wpływ przyspieszenia drgań.

Panuje powszechny pogląd, że przyspieszenie drgań jest głównym czynnikiem dla dobrego zagęszczenia gruntu. Jeśli grunt był wstępnie zagęszczony przy określonej wielkości przyspieszenia, to wibrowanie przy mniejszym przyspieszeniu nie może powodować już dalszego zagęszczenia.

Wymagane przyspieszenie do uzyskania minimalnej porowatości jest większe przy wysokiej częstotliwości wibracji niż niskiej i większe przy większych obciążeniach.

Grunty wilgotne wykazują wzrost zagęszczenia ze wzrostem przyspieszenia drgań. Łatwiejsze zagęszczenie gruntów przy większym przyspieszeniu drgań spowodowane jest znacznym zmniejszeniem się tarcia wewnętrznego między ziarnami gruntu. Przy tym samym przyspieszeniu drgań, większy stopień zagęszczenia I_D uzyskuje się dla piasków drobnych niż grubych.

8) Wpływ obciążenia statycznego.

Wpływ obciążenia statycznego na zagęszczenie wibracyjne zależy od uziarnienia gruntu, przyspieszenia drgań, częstotliwości i amplitudy drgań.

Wzrost obciążenia statycznego powoduje konieczność zwiększenia przyspieszenia wibracji potrzebnego do uzyskania maksymalnego zagęszczenia, a to wiąże się ze wzrostem częstotliwości lub amplitudy drgań.

Wpływ obciążenia na wibracyjne zagęszczenie jest większy w przypadku gruntów wilgotnych niż suchych. Grunty niespoiste przy wilgotności ok. $(0,3 \div 0,5) w_{\text{opt}}$ zagęszczają się najtrudniej.

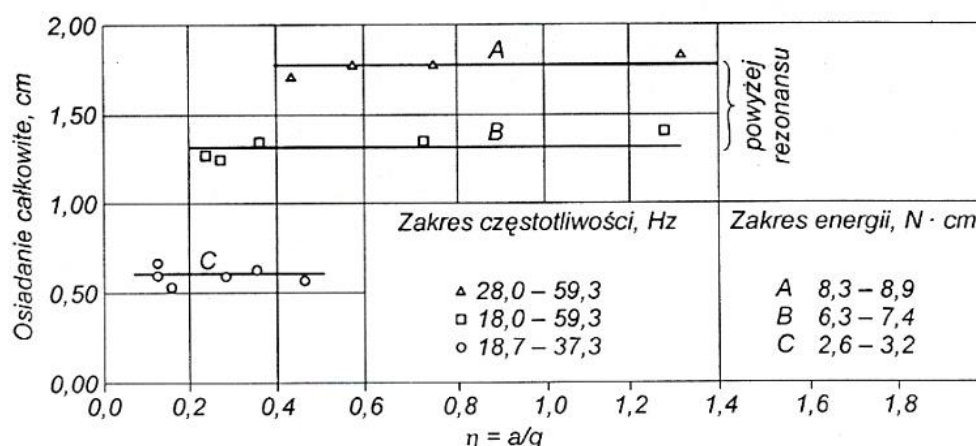
9) Wpływ czasu wibracji.

Zagęszczenie gruntu zwiększa się ze wzrostem czasu wibracji aż do wartości $\gamma_{d\max}$. Czas wibracji potrzebny do osiągnięcia $\gamma_{d\max}$ zależy od uziarnienia gruntu, wilgotności gruntu, obciążenia i zastosowanej metody zagęszczania. Czas potrzebny do uzyskania minimalnej porowatości gruntu o uziarnieniu $0,7 \div 1,0$ mm powinien zasadniczo wynosić ponad 15 min i zależy od amplitudy i rodzaju gruntu. Czas wibracji potrzebny do ustalenia się zagęszczenia piasku zależy także od obciążenia statycznego i przyspieszenia wibracji próbki gruntu i wynosi od ok. 5 do 15 min.

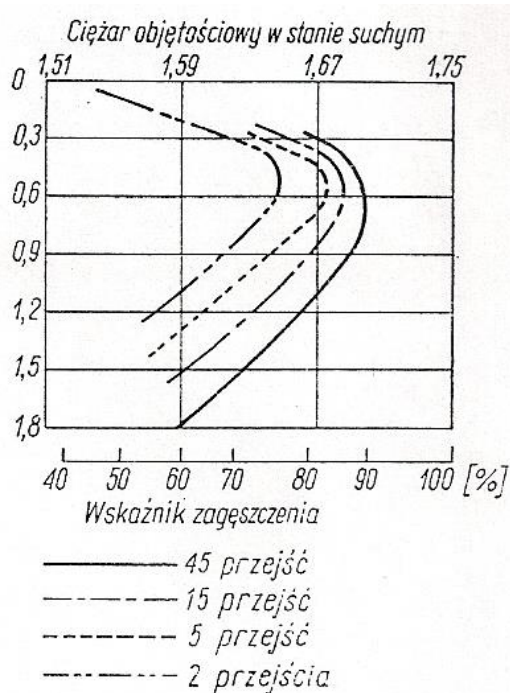
10) Wpływ energii zagęszczania.

Zagęszczenie gruntu metodą wibracyjną (zagęszczanie powierzchniowe) zależy od przekazywanej energii.

Przekazywana energia, a nie przyspieszenie, jest głównym parametrem wpływającym na zagęszczenie. Ze wzrostem energii wzrasta zagęszczenie, jest więc ona czynnikiem decydującym o zagęszczeniu gruntu.



Rys.21. Wykres zależności osiadania całkowitego od przyspieszenia drgań i przekazywanej energii:
a- przyspieszenie drgań urządzenia, g- przyspieszenie ziemskie. [8]



Rys.22. Określanie maksymalnej głębokości zagęszczenia dla różnych technik.[1]

Konkludując powyższe, można stwierdzić, że zagęszczenie wibracyjne jest procesem niezwykle wydajnym, umożliwiającym zagęszczenie gruntów mało spoiстых warstwami o grubości przekraczającej 1,0 m !!!

Tab.12. Współczesne techniki badań in situ i ich przydatność do badań stanu zagęszczenia.

Kategoria badania	Rodzaj testu	Symbol testu	Przydatność* do oceny I_D
Nieniszczące lub pseudoniszczące	Badania geofizyczne: • refrakcja sejsmiczna • test sejsmiczny • w otworze badawczym	SR CHT (Cross-hole) DHT (Down-hole)	– – –
	Badania presjometryczne: • presjometr w otworze wiertniczym • presjometr w rurze szczelinowej • presjometr samowwiercający	PBPT FDPT SBPT	C C B
	Statyczne obciążenie płytą sztywną	PLT	B
	Dynamiczne obciążenie płytą	FWD, LWD	A/B
Inwazyjne testy penetracyjne	Sondowanie statyczne: • stożek mechaniczny • stożek elektryczny • piezostożek • stożek dylatometryczny	CPT CPT CPTU DCPT	B A/B A/B C
	Sondowanie dynamiczne	DPT	B
	Badanie sondą cylindryczną	SPT	B
	Badanie dylatometryczne	DMT	C
	Ścięcie sondą obrotową	FVT	–
Mieszane (inwazyjno-nieniszczące)	Stożek presjometryczny	CPMT	B
	Stożek sejsmiczny	SCPTU	A/B
	Dylatometr sejsmiczny	SDMT	B
	Piezostożek opornościowy	RCPTU	A/B

* Ocena przydatności badań: A – wysoka, B – średnia, C – o. graniczna, (–) – brak zastosowania

Tab.13. Parametry sond dynamicznych.

Typ sondy	Symbol sondy	Masa młota m [kg]	Wysokość podnoszenia młota h [m]	Energia wbijania mgh [Nm]	Powierzchnia podstawy stożka [cm ²]	Wynik badania N_k	Interpretacja wyników według następujących równań:
Lekka (stożkowa)	DPL	10,0	0,50	49,1	10,0	N_{10}	$I_D = 0,429 \log N_{10} + 0,071$ (2.7)
Średnia (stożkowa)	DPM	30,0	0,50	147,2	10,0	N_{10}	$I_D = 0,431 \log N_{10} + 0,176$ (2.8)
Ciężka (stożkowa)	DPH	50,0	0,50	245,3	15,0	N_{10}	$I_D = 0,441 \log N_{10} + 0,271$ (2.9)
Bardzo ciężka (stożkowa)	DPSH	63,5	0,75	476,2	20,0	N_{20}	$I_D = 0,441 \log N_{20} + 0,196$ (2.10)
Sonda z końcówką cylindryczną	SPT	63,5	0,76	482,6	–	N_{30}	$I_D = 0,441 \log N_{30} + 0,118$ (2.11)

Tab.14. Związki korelacyjne I_s/I_D [12]

Autor	Rodzaj gruntu według [2.75]	$\overline{W}_0$	Odchylenie standardowe S_{W_0}	$\overline{\alpha}$	Odchylenie standardowe S_{α}	Równanie (2.14) (po przekształceniu)
Pisarczyk [2.70]	$P_d, P_s, P_r, P_o, \dot{Z}$ ($C_U = 1,36 - 13,00$)	0,832	0,023	0,973	0,039	$I_s = 0,855 + 0,165 I_D$ (2.17)
Borowczyk i Frankowski [2.14]	P_d, P_s, P_r ($C_U = 1,32 - 3,16$)	0,818	0,010	0,958	0,023	$I_s = 0,845 + 0,188 I_D$ (2.18)
Bojanowski i Kubiczek [2.9]	P_s ($C_U = 2,67$)	0,805	0,003	0,946	0,007	$I_s = 0,851 + 0,195 I_D$ (2.19)
Borkowski i in. [2.12]	P_d, P_s, P_r, P_o ($C_U = 1,69 - 5,26$)	0,840	0,005	0,939	0,005	$I_s = 0,895 + 0,160 I_D$ (2.20)
Sulewska [2.98]	P_{π}, P_d, P_s ($C_U = 1,40 - 3,53$)	0,816	0,019	0,983	0,035	$I_s = 0,830 + 0,184 I_D$ (2.21)
ŚREDNIO	$P_{\pi}, P_d, P_s, P_r, P_o, \dot{Z}$	0,822	0,012	0,960	0,022	$I_s = 0,856 + 0,178 I_D$ (2.22)
Pała [2.83]	P_o	model statystyczny				$I_{slab} = 0,785 + 0,182 I_{Dpol}$ (2.23)
Sulewska [2.98]	P_{π}, P_d, P_s ($C_U = 1,40 - 3,53$)	model statystyczny $r = 0,460$				$I_{slab} = 0,815 + 0,199 I_{Dpol}$ $\pm 0,026$ (2.24)

Związki korelacyjne dla sondy dynamicznej SD-10 można ustalać na podstawie bogatej literatury w tym temacie.

Wyliczenia wyników według normy PN - B - 04452:2002 dla sondy SD-10 gdzie stopień zagęszczenia I_D :

$$I_D = 0,429 \log N_{10} + 0,071$$

gdzie:

N_{10} — liczba uderzeń na 10 cm wpędu sondy.

Określać można również wskaźnik zagęszczenia I_s na podstawie zależności korelacyjnych:

$$I_s = 0,818 / (0,958 - 0,174 I_D)$$

Zależność ta ma przedział ufności 5%.

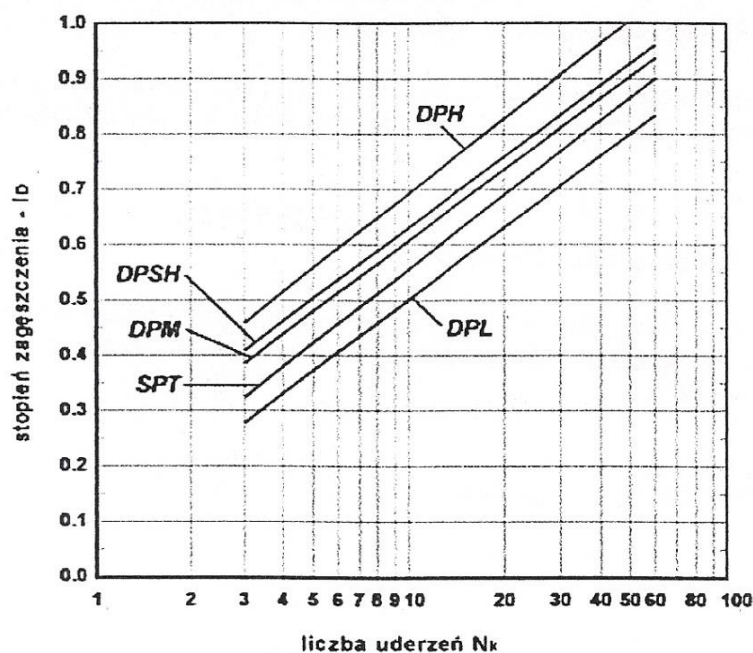
W przypadku korzystania z wyników sondowania w przedziale głębokości od 0 do 0,6 m , to należy przyjmować skorygowaną liczbę uderzeń N_{kor} według poniższego wzoru :

$$N_{kor} = N_{10}(0,6/z)$$

gdzie:

z — głębokość badania w metrach.

Zależności stopnia zagęszczenia I_D od liczby uderzeń N_k dla różnych rodzajów sond dynamicznych można przedstawić w postaci nomogramu zgodnie z PN-B-04452:2002:



Równanie opisujące prostą dla sondy DPL jest przedstawiane w formie funkcji:

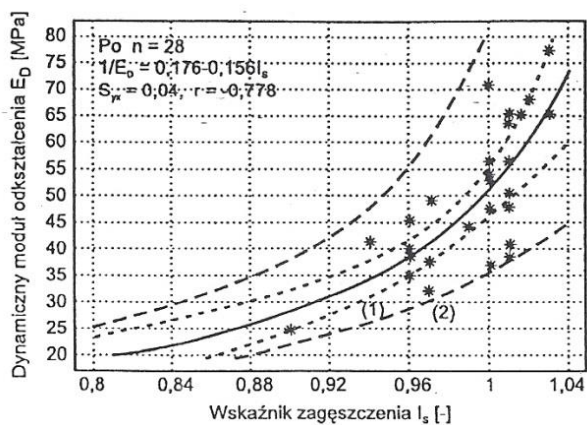
$$I_D = 0,429 \log N_{10} + 0,071$$

natomiast równanie opisujące prostą dla sondy DPM jest przedstawiane w formie funkcji:

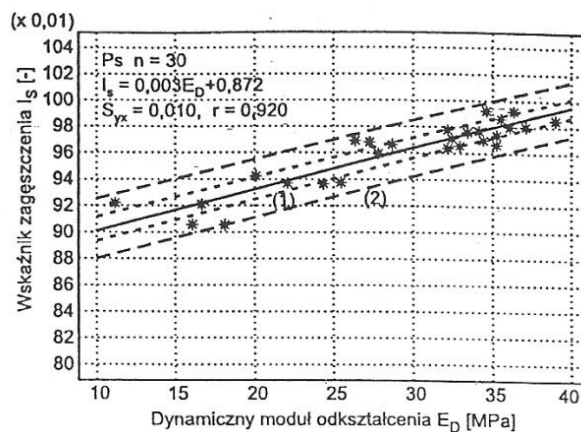
$$I_D = 0,431 \log N_{10} + 0,176$$

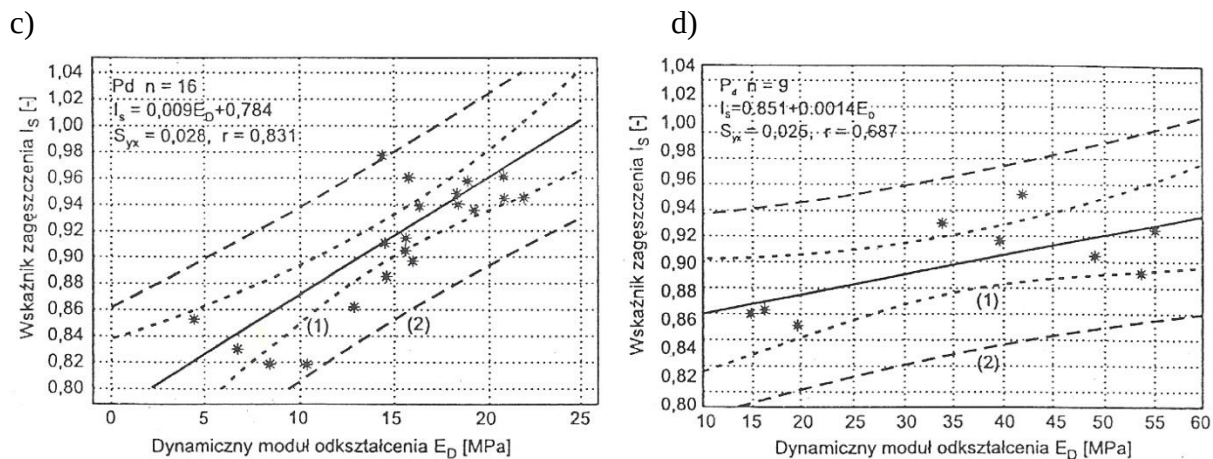
Przedstawione związki korelacyjne są bardzo pomocnym narzędziem przy interpretowaniu stopnia zagęszczenia lub przechodzenia na wskaźnik zagęszczenia.

a)

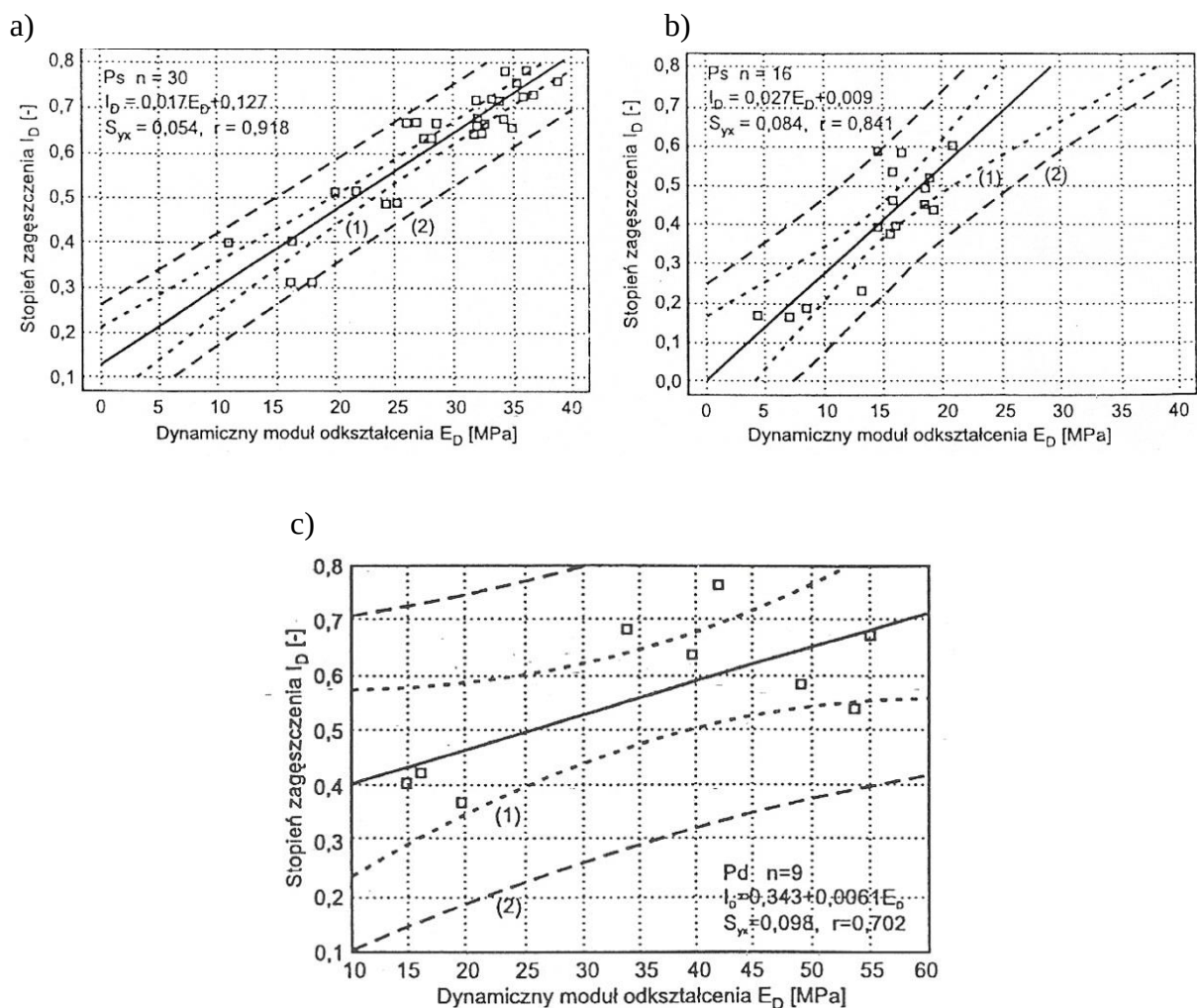


b)





Rys. 23. Zależności $I_s = f(E_D)$ dla: a) P_o , b) P_s , c) P_d , d) P_d
 (1), (2) – obszary ufności przy prawdopodobieństwie 95 % [12]



Rys. 24. Zależności $I_D = f(E_D)$ dla: a) P_s , b) P_d , c) P_d [12]

7. Stabilizacja gruntów.

7.1. Stabilizacja mechaniczna

Proces stabilizacji mechanicznej polega na właściwym zagęszczeniu, przy optymalnej wilgotności mieszanki, gruntów o ciągłym uziarnieniu. Nieodpowiednie grunty doziarnia się kruszywem w celu uzyskania właściwego składu ziarnowego. Dotyczy to głównie gruntów gruboziarnistych o nieciągłym uziarnieniu. Jako doziarnienie stosowane są: kruszywa naturalne (żwir, piasek), kruszywa łamane i żużle, a także popioły lotne i inne dodatki. Zalecane zakresy uziarnienia oraz szczegółowe wymagania dotyczące kruszyw podaje norma PN-S-06102:1997 oraz OST D-04.04.00. W celu neutralizacji nadmiaru frakcji pylasto- ilastych (ulepszenia właściwości mieszanki i jej wzmocnienia) dodaje się również cement, wapno, aktywne popioły lotne, żużel granulowany itp. mieszanki wykorzystuje się na ulepszone podłoże lub na podbudowy.

Mieszanki na ulepszone podłoże można wykonywać na miejscu za pomocą mieszarek frezujących lub w mieszalnikach stacjonarnych. Ułożoną i wyrównaną warstwę mieszanki, której grubość zwykle nie powinna być większa od 20 cm, zagęszcza się walcami ogumionymi lub stalowymi, wibracyjnymi lub statycznymi. W miejscach trudno dostępnych mogą być użyte zagęszczarki płytowe, ubijaki mechaniczne itp.

7.2. Stabilizacja spoiwami hydraulicznymi

Mieszanki związane hydraulicznie przeznaczone są do stosowania w warstwach drogowych, m.in. ulepszanego podłoża (warstwa mrozochronna, odcinająca, wzmacniająca). Do stabilizacji stosowane są różnego rodzaju spoiwa: cement, wapno, popioły lotne, żużle, spoiwa drogowe itd. Wymagania właściwości poszczególnych mieszanek zawierają normy: PN-S-96011:1998 (stabilizacja wapnem), PN-S-96012:1998 (stabilizacja cementem) oraz specyfikacje techniczne OST D.04.05.00 - 04.05.04. W 2006 roku do zbioru polskich norm zostały wprowadzone normy europejskie z serii PN-EN 14277, dotyczące gruntów stabilizowanych. Część 10 dotyczy stabilizacji cementem, cz. 11 stabilizacji wapnem, cz. 12 stabilizacji żużlem, cz. 13 stabilizacji spoiwami drogowymi, cz. 14 stabilizacji popiołami lotnymi. Wymienione normy są normami klasyfikacyjnymi. Podają one szereg właściwości służących do oceny mieszanki, a także szereg kategorii (poziomów) tych właściwości. Nie określają natomiast wymagań dla mieszanek odnośnie do konkretnych zastosowań.

Skład poszczególnych mieszanek należy dostosować do rodzaju stabilizowanego gruntu oraz ich przeznaczenia. Ilości poszczególnych składników powinny być ustalone laboratoryjnie.

Orientacyjna grubość warstwy ulepszanej do budowy nasypów lub podłoża nie powinna być większa od:

- 40 cm - w przypadku mieszania na miejscu sprzętem specjalistycznym,
- 20 do 40 cm - w przypadku mieszania w wytwórniach stacjonarnych - w zależności od sprzętu zagęszczającego.

W przypadku większej grubości mieszankę układa się i zagęszcza w dwóch warstwach. Poniżej opisano wybrane metody stabilizacji gruntów spoiwami hydraulicznymi.

7.2.1. Stabilizacja cementem

Jest metodą wzmacniania gruntów niespoistych, mało i średnio spoistych oraz kruszyw w celu poprawy nośności i zmniejszenia wrażliwości na wpływy atmosferyczne. Mieszanki wykorzystuje się m.in. na warstwy ulepszanego podłoża.

Najlepsze wyniki stabilizacji cementem uzyskuje się przy gruntach o wskaźniku piaskowym $20 \leq WP \leq 50$ oraz zawartości frakcji $< 0,075$ mm do 15%, a także zawartości ziaren > 2 mm co najmniej 30%. W celu sprawdzenia przydatności gruntu do stabilizacji cementem wykonuje się badania wytrzymałości na ściskanie i mrozoodporności próbek gruntu stabilizowanego.

Grunty o wskaźniku pH poza przedziałem od 5 do 8 oraz zawierające więcej niż 5 % (m/m) części organicznych i więcej niż 1 % (m/m) siarczanów (w przeliczeniu na SO_3) mogą być stabilizowane cementem po ulepszeniu chlorkiem wapniowym, wapnem lub popiołami lotnymi.

Stabilizacji nie należy wykonywać, gdy podłoże jest zamrożone, przy temperaturze poniżej $5^{\circ}C$ oraz podczas opadów deszczu.

Proces technologiczny stabilizacji cementem polega na zmieszaniu rozdrobnionego gruntu z optymalną ilością cementu i wody, a w razie potrzeby dodatków ulepszających, oraz na zagęszczeniu wytworzonej mieszanki. Wilgotność przed zagęszczeniem powinna być zbliżona do wilgotności optymalnej (w przedziale $0,9 \div 1,1 w_{opt}$). Orientacyjnie zawartość cementu w mieszance, w stosunku do masy gruntu suchego, wynosi od 2% do 10%. Zawartość cementu w mieszance na ulepszone podłoże nie powinna przekraczać, w zależności od kategorii ruchu, 8% do 10%.

W przypadku stabilizacji na miejscu zagęszczanie i obróbkę powierzchniową należy zakończyć w ciągu 5 godzin od rozpoczęcia mieszania gruntu z cementem.

Mieszanki dowożone z wytwórni powinny być zagęszczane niezwłocznie po ułożeniu (i wyrównaniu). Zagęszczanie i obróbkę powierzchniową należy zakończyć przed upływem 2 godzin od chwili dodania wody do mieszanki.

7.2.2. Stabilizacja wapnem

Jest to metoda wzmocnienia nadmiernie wilgotnych gruntów spoistych o wskaźniku plastyczności $I_p > 7\%$, zawierających minerały ilowe wchodzące w reakcję z wapnem, a także popiołów lotnych, w celu poprawy nośności i zmniejszenia wrażliwości na wpływy atmosferyczne. Mieszanki stabilizowane wapnem wykorzystuje się jako górne warstwy podłoża.

Zawartość frakcji kamienistej (ziaren większych od 40 mm) w gruncie nie powinna przekraczać 15%. Do stabilizacji wapnem są nieprzydatne grunty lub popioły lotne zawierające więcej niż 10% (m/m) części organicznych oraz o wskaźniku piaskowym $WP \geq 30$. Stabilizacji nie należy wykonywać, gdy podłoże jest zamrożone oraz w trakcie opadów deszczu.

Orientacyjnie do górnej warstwy ulepszanego podłoża dodatek wapna w stosunku do masy gruntu suchego wynosi od 3% do 7%.

Proces technologiczny stabilizacji polega na spulchnieniu i rozdrobnieniu gruntu, zmieszaniu go z optymalną ilością wapna oraz zagęszczeniu mieszanki przy wilgotności zbliżonej do

optymalnej. Spoiwem może być wapno palone niegaszone (grunty bardzo spoiste lub nadmiernie zawilgocone), jak i sucho gaszone (grunty średnio spoiste).

7.2.3. Stabilizacja popiołami lotnymi aktywnymi (tj. zawierającymi co najmniej 7% wolnego wapna) jest metodą wzmocnienia gruntów mało i średnio spoistych o wskaźniku plastyczności I_p do 20%, w celu poprawy nośności i zmniejszenia wrażliwości na wpływy atmosferyczne. Mieszanki te wykorzystuje się na ulepszone podłoże oraz na podbudowę zasadniczą i pomocniczą nawierzchni.

Proces technologiczny stabilizacji popiołami aktywnymi polega na zmieszaniu rozdrobnionego gruntu z optymalną ilością popiołu i wody, a w razie potrzeby dodatków ulepszających grunt, oraz zagęszczeniu wytworzonej mieszanki. Orientacyjnie zawartość popiołów w mieszance do ulepszanego podłoża, w stosunku do masy gruntu suchego wynosi od 6% do 10%. Jako dodatki ułatwiające zagęszczanie można stosować środki ulepszające (powierzchniowo czynne) rozcieńczone wodą w proporcji 1:200 (1:400).

Wilgotność przed zagęszczeniem powinna być zbliżona do wilgotności optymalnej (w przedziale $0,9 \div 1,1 w_{opt}$). Zagęszczanie należy zakończyć w dniu prowadzenia robót, a w przypadku dodawania cementu - w ciągu 5 godzin od rozpoczęcia mieszania go z gruntem.

8. Wymagania normowe i odbiory robót.

Ten rozdział opracowano wykorzystując Instrukcję ITB Nr 427/2007 [4] z myślą o kierownikach robót, technologach oraz osobach pełniących funkcje nadzoru.

Budowa nasypów obejmuje dwie czynności: przygotowanie gruntu do zagęszczania i właściwe zagęszczanie.

Z poprzednich rozważań wynika, że zagęszczany grunt powinien mieć wilgotność bliską optymalnej; bardzo często jednak grunt w wykopie ma wilgotność wyższą od optymalnej lub niższą.

W przypadku wilgotności niższej od optymalnej można albo nawilgocić grunt albo zastosować cięższy sprzęt do zagęszczania. Wilgotność gruntu można zwiększać bądź w wykopie przez odpowiednio wcześniejsze polewanie złoża wodą przed ukopaniem, bądź w trakcie ładowania na środki transportowe; można również nawilgocić grunt podczas transportu przez spryskanie wodą na wozach. W razie zbyt wilgotnego gruntu można go podsuszyć, pozostawiając na pewien czas w ścianie wykopu na działanie słońca i wiatru albo też rozścielając na nasypie na pewien okres przed zagęszczeniem; można również dać go na czasowy odkład aby po podsuszeniu użyć do nasypu.

W każdym przypadku o przydatności gruntu do nasypu należy decydować w zależności od uzyskiwanych wyników zagęszczania; w razie stwierdzenia, że grunt nie nadaje się do nasypu, należy go przewieźć na odkład lub odpowiednio ulepszyć przez stabilizację odpowiednimi dodatkami.

Zagęszczanie gruntów w nasypie może być osiągnięte przez regulowany ruch pojazdów transportujących grunt i przez sztuczne zagęszczanie za pomocą specjalnych maszyn.

Wstępne zagęszczanie przez środki transportu jest częstokroć niedoceniane lub niewłaściwie wykorzystywane. Stwierdzone fakty dobrej stateczności korpusów; ziemnych usypanych bez sztucznego zagęszczania (za pomocą transportu kolejowego lub kołowego) wskazują na możliwość uzyskania dość intensywnego zagęszczenia gruntu. Niewłaściwe wykorzystanie środków transportowych przejawia się w tym, że tory kolejowe nie są przesuwane w poprzek nasypu, a transport kołowy odbywa się tymi samymi koleinami, co powoduje nierównomierne zagęszczenie nasypu.

Przy transporcie kołowym należy regulować ruch pojazdów i używać równiarek lub spycharek do stałego równania powierzchni nasypu. Zacierają to ślady przejeżdżających wozów i uniemożliwiają jazdę tymi samymi koleinami. Przy dostatecznie cienkich warstwach ($0,3 \div 0,5$ m) i wilgotności bliskiej optymalnej transporty gąsienicowy i kołowy dają dość dobre zagęszczenie. Szczególnie dobre wyniki uzyskuje się przy użyciu dużych wozów ciężarowych; koła ciężkich samochodów dobrze zagęszczają górę warstwy i w przypadku piasków i żwirów otrzymuje się dość dobre zagęszczenie warstw grubości około 0,5 m. Ruch pojazdów transportowych daje więc dobre wstępne zagęszczenie warstw gruntu, co zmniejsza nakład pracy właściwych maszyn zagęszczających (walców, wibratorów, ubijaków itp.). Stosowanie równiarek i spycharek należy uważać za bezwzględnie konieczne również do wyrównywania powierzchni nasypu ze spadkiem 3÷4% ku krawężnikom szczególnie w celu zabezpieczenia gruntów spoistych w czasie budowy od zawilgocenia wodą opadową.

Niezbędne są również spycharki do wyrównywania dna wykopów, bo zapewniają szybki odpływ z nich wód opadowych i gruntowych. Równiarki natomiast powinny stale pracować na całej drodze dowozu gruntu do nasypów, by utrzymać ją w stanie równym i przydatnym do szybkiego i ciężkiego transportu. Liczba spycharek i równiarek powinna być ustalona z pewnym zapasem, gdyż sprzęt ten jest niezbędny do prawidłowego prowadzenia robót ziemnych. Zdaniem autora nie docenia się u nas roli spycharek przy utrzymaniu spadków na terenie robót ziemnych, co doprowadza do przewilgocenia gruntu zarówno w wykopach, jak i na nasypach.

Duży wpływ na jakość formowanych nasypów ma sprzęt używany do urabiania gruntu.

Urabianie gruntu za pomocą koparek ma tę zaletę, że grunt w ścianach wykopu nie ulega zawilgoceniu nawet w przypadku długotrwałych deszczów. Wadą koparek jest pionowe urabianie gruntu, powodujące wymieszanie różnych warstw i dające w efekcie nasyp niejednorodny, co jest niewskazane zwłaszcza w górnej warstwie nasypu, gdyż może prowadzić do nadmiernego zawilgocenia wnętrza nasypu wodami opadowymi, wsiąkającymi w gniazda piasków pomiędzy gliną. Poziome urabianie gruntu za pomocą spycharek lub zgarniarek pozwala uzyskiwać grunt bardziej jednorodny, lecz wymaga bardzo dokładnego odprowadzania wody gruntowej lub opadowej z dna wykopu, aby nie dopuścić do zawilgocenia gruntu.

Istotną sprawą jest również rozdrobnienie brył gruntów spoistych, co zależy od grubości skrawania koparką lub zgarniarką. Zbyt grube bryły nie pozwolą uzyskać odpowiedniego zagęszczenia zwłaszcza wtedy, gdy maszyny zagęszczające są zbyt lekkie.

Jak z powyższego wynika, wykonawcy robót ziemnych, mając możliwość doboru odpowiedniego sprzętu do urabiania gruntów, mogą we właściwy sposób kierować wykonawstwem robót ziemnych.

Oprócz właściwego urabiania gruntów i stosowania odpowiednio regulowanego ruchu środków transportowych, konieczne jest użycie specjalnych maszyn zagęszczających. Ustalane na podstawie laboratoryjnych badań wymagania dotyczące potrzebnych wskaźników zagęszczenia gruntów spoistych lub stopni zagęszczeń gruntów sypkich powinny być potwierdzone badaniami poligonowymi, które pozwolą na ustalenie optymalnego sposobu zagęszczania danego gruntu odpowiednimi maszynami. Należy zbadać, przy jakiej grubości warstw gruntu i po ilu przejściach maszyn uzyskuje się najlepsze rezultaty zagęszczenia. W tym celu należy przeprowadzić badania na specjalnych poletkach doświadczalnych, wydzielonych na części formowanego nasypu.

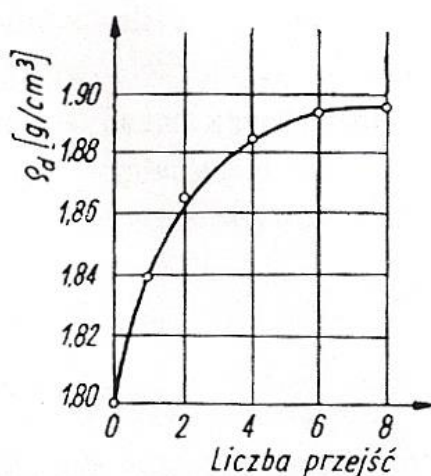
Poletko doświadczalne o podłożu z badanego gruntu powinno mieć pasy o wymiarach 50 x 3 m dla każdej maszyny. Przed usypaniem gruntu należy podłoże splantować ze spadkami, zapewniającymi jego dobre odwodnienie i dokładnie zagęścić do wymaganego ρ_d . Na tak przygotowanym podłożu usypuje się grunt o wilgotności naturalnej warstwą o zmiennej miąższości od grubości równej 2/3 normalnie stosowanej (dla danego gruntu i maszyny) do 1 1/2 normalnej grubości warstwy.

Tablica 15. Orientacyjne dane doboru sprzętu zagęszczającego. [11]

Działanie sprzętu	Rodzaj sprzętu	Grunty sypkie: piaski, żwiry, pospółki		Grunty spoiste: pyły, gliny i ility		Grunty zawierające frakcję kamienistą		Uwagi o przydatności maszyny
		grubość warstwy [cm]	liczba przejęć maszyny po 1 ślądzie	grubość warstwy [cm]	liczba przejęć maszyny po 1 ślądzie	grubość war- stwy [cm]	liczba przejęć maszyny po 1 ślądzie	
Statyczne	Walce gładkie	10 ÷ 20	4 ÷ 8	10 ÷ 20	4 ÷ 8	20 ÷ 30	4 ÷ 8	do zagęszczenia górnych warstw podłoża
	Walce okołkowane	—	—	20 ÷ 30	8 ÷ 12	20 ÷ 30	8 ÷ 12	
	Walce ogumione:							
	samojezdne	20 ÷ 30	6 ÷ 10	30 ÷ 40	6 ÷ 10	30 ÷ 40	6 ÷ 10	
	przyczepne	30 ÷ 50	6 ÷ 10	30 ÷ 40	6 ÷ 10	30 ÷ 40	6 ÷ 10	
Dynamiczne	Płyty spadające (ubijaki)	—	—	40 ÷ 50	2 ÷ 4	50 ÷ 70	2 ÷ 4	zaleca się w wąskich przekopach
	Szybko uderzające ubijaki	20 ÷ 40	3 ÷ 4	10 ÷ 30	3 ÷ 5	20 ÷ 40	3 ÷ 4	
	Walce wibracyjne przyczepne:							
	lekkie 50 kN	30 ÷ 50	3 ÷ 5	—	—	20 ÷ 40	3 ÷ 5	
	średnie	40 ÷ 60	3 ÷ 5	20 ÷ 30	3 ÷ 4	40 ÷ 60	3 ÷ 5	
	ciężkie, 80 kN	50 ÷ 80	3 ÷ 5	30 ÷ 40	3 ÷ 4	50 ÷ 90	3 ÷ 5	
	Płyty wibracyjne:							
	lekkie	20 ÷ 40	5 ÷ 8	—	—	10 ÷ 20	5 ÷ 8	
	ciężkie	30 ÷ 40	4 ÷ 6	20 ÷ 30	6 ÷ 8	20 ÷ 40	4 ÷ 6	

Wstępne zagęszczenie przeprowadza się przejściem spycharek i środków transportowych jak przy normalnym wykonywaniu robót. Następnie przeprowadza się zagęszczenie maszynami. Po pierwszym, drugim, czwartym, szóstym i ósmym przejściu (licząc po jednym śladzie) oznacza się ρ_i i wilgotność w_i zagęszczanego gruntu w co najmniej 10 punktach, rozmieszczonych równomiernie wzdłuż poletka, pobierając próby na całą grubość zagęszczanej warstwy gruntu. Po obliczeniu gęstości ρ_{di} i średniej arytmetycznej ρ_{di} należy sporządzić wykres zagęszczalności gruntu w zależności od liczby przejść maszyny oraz ustalić, jaka maszyna daje najbardziej ekonomiczne rezultaty.

Badania na poletku doświadczalnym przynoszą jeszcze jeden istotny efekt: dają wskazania dotyczące grubości warstw i liczby przejść maszyny zagęszczającej, ustalone doświadczalnie przy współudziale wykonawców robót, co zobowiązuje ich do przestrzegania reżimu zagęszczania i jest wstępną kontrolą wskaźnika zagęszczenia gruntu.



Rys.25. Zależność ρ_d od liczby przejść maszyny zagęszczającej. [11]

W przypadku konieczności używania gruntów spoistych zbyt wilgotnych ($w_n \geq 1,2 w_{opt}$) do górnej części nasypu, gdzie nie ma możliwości ich szybkiego skonsolidowania się, należy je osuszyć, stosując wapno lub popioły lotne.

W razie wykonywania nasypu z miękkich wapieni lub kredy należy górną warstwę nasypu lub dno koryta zabezpieczyć przed oddziaływaniem ruchu i wody opadowej, przykrywając je piaskiem stabilizowanym popiołami lub cementem ewentualnie stosując powierzchniowe bitumowanie; w przeciwnym przypadku w czasie deszczów i pod ruchem następuje głębokie rozmiękanie wapieni i może zachodzić konieczność ich usunięcia.

Niekiedy zdarzają się przypadki konieczności zagęszczania gruntu na podłożu nawodnionym, uginającym się pod uderzeniami ciężkiego ubijaka; w takich przypadkach zaleca się nawodnione podłoże przykryć 10÷15 centymetrową warstwą gruntu stabilizowanego cementem (60÷100 kg/m³), co utworzy rodzaj kowadła od spodu i umożliwi dokładne zagęszczenie gruntu nasypowego. Dużo trudności sprawia należyte zagęszczanie strefy przyskarpowej nasypów, gdzie ciężkie maszyny nie mogą pracować.

W strefie tej należy stosować warstwy o połowę cieńsze, aby można było zagęszczać je lżejszym sprzętem albo budować nasyp o ok. 0,5 m szerszy, aby po zagęszczeniu obciąć nadmiar.

Bardzo trudnym zagadnieniem jest budowa nasypów w okresie mrozów. W zasadzie prowadzenie robót zależy od stanu urabianego gruntu i możliwości jego zagęszczenia. Gdy tempo robót jest szybkie i nie dopuszcza się do zamarzania gruntu w ścianie wykopu oraz w czasie transportu, roboty ziemne nie różnią się od robót w okresie letnim.

Prowadzenie robót w przypadku gruntu zamarzniętego jest również możliwe, pod warunkiem, że jego wilgotność jest bliska optymalnej lub niższa, że jest on dostatecznie rozdrobniony i że stosuje się ciężki sprzęt zagęszczający, umożliwiający uzyskanie wymaganych wskaźników zagęszczenia. Powierzchnia ubitej warstwy powinna być na tyle szczelna, aby śnieg nie wnikał w głąb warstwy zagęszczonej.

Do prowadzenia robót ziemnych w zimie najlepiej nadają się mało wilgotne grunty sypkie, gdyż dają się łatwo rozdrobnić i zagęścić. W przypadku gruntów spoistych oraz możliwości zaistnienia dłuższych przerw, grunty zabezpiecza się przed przemarzaniem przez zaoranie do głębokości ok. 30 cm i zbronowanie, a następnie przykrycie miejscowym materiałem izolacyjnym (torf, mech). Ostatnio stosuje się maty izolacyjne. Grubość warstw z gruntu zamarzniętego nie powinna przekraczać 1/2 normalnej grubości. Przed ułożeniem następnej warstwy należy powierzchnię poprzedniej warstwy oczyścić ze śniegu i lodu.

8.2. Dokumentacja projektowa

Wymagania ogólne

Nasypy należy wykonywać na podstawie dokumentacji projektowej.

Projekty stanowiące dokumentację projektową powinny być wykonane zgodnie z obowiązującymi przepisami.

Dokumentacja projektowa powinna zawierać wszystkie dane niezbędne do właściwego i bezpiecznego zaplanowania i wykonania nasypu.

Dostarczoną przez inwestora dokumentację należy szczegółowo przeanalizować. Wszystkie niejasności lub braki w dokumentacji powinny być wyjaśnione lub uzupełnione przed podjęciem robót.

Przy ocenie zakresu dokumentacji należy mieć na uwadze, że do właściwego zaplanowania i wykonania nasypu potrzebne są dane dotyczące:

- ukształtowania terenu,
- warunków gruntowo-wodnych,
- przyległych dróg i budowli,
- położenia, rodzaju i stanu instalacji podziemnych (gazowych, elektryczności, wodociągów, kanalizacji, telekomunikacji),
- usytuowania, kształtu i wymiaru nasypu oraz jego wymaganych właściwości wytrzymałościowych,
- występujących w terenie ograniczeń z uwagi na drgania, hałas itp.,
- szczególnych wymagań ochrony środowiska.

Zakres dokumentacji projektowej

Zakres dokumentacji projektowej robót ziemnych dotyczących wykonania nasypów powinien być dostosowany do złożoności i zakresu przewidywanych robót. W większości przypadków do podjęcia robót wystarcza:

- projekt budowlany,
- dokumentacja geotechniczna lub geologiczno-inżynierska z geotechnicznymi warunkami posadowienia.

W przypadku nasypów konstrukcyjnych i podbudów w razie potrzeby dokumentacja projektowa powinna być uzupełniona o odpowiednie projekty wykonawcze:

- projekt wykonawczy drenażu lub instalacji wykonywanych w podłożu w obrębie lokalizacji nasypu lub w bezpośrednim jego sąsiedztwie,
- w szczególnych przypadkach, jeżeli wykonanie nasypu (budowli ziemnej) może mieć niekorzystny wpływ na obiekty sąsiednie (np. drgania), projekt monitoringu tych obiektów.

Projekt budowlany

Zakres projektu budowlanego określa Rozporządzenie MTBiGM z 25.04.2012 r. (Dz.U. poz.462 z późn. zmianami). Zgodnie z tym rozporządzeniem, w odniesieniu do nasypów związanych z realizacją obiektu projekt budowlany powinien jednoznacznie określać:

- lokalizację w planie nasypu,
- wymiary i usytuowanie nasypu (rzędną spodu i wierzchu nasypu).

Ponadto w odniesieniu do nasypów, którym stawia się określone wymagania dotyczące ich wytrzymałości lub odkształcalności (nasypów konstrukcyjnych, podbudów, wymiany gruntu), projekt powinien określać:

- rodzaj materiału, z którego powinien być wykonany nasyp, w razie potrzeby również jego wymagane właściwości (np. graniczna krzywa uziarnienia, wskaźnik różnoziarnistości),
- jeżeli nasyp ma być wykonany z różnych materiałów, ich wymagane rozmieszczenie,
- wymagane właściwości wytrzymałościowe materiału gruntowego w nasypie,
- w razie potrzeby warunki bezpiecznego dla obiektów sąsiednich zagęszczenia nasypu.

Wymagane właściwości wytrzymałościowe nasypu powinny być określone przez wskaźniki, które można w trakcie wykonywania nasypu w stosunkowo prosty sposób kontrolować.

Zalecane w projektach wskaźniki to:

- I_s - wskaźnik zagęszczenia,
- E_1, E_2 - odpowiednio moduł odkształcenia pierwotnego i wtórnego gruntu,
- I_0 - wskaźnik odkształcenia (E_2/E_1),
- $w_{noś}$ - wskaźnik nośności.

W przypadku dużych objętości projektowanych nasypów zalecane jest wskazanie w projekcie źródła pozyskania materiału zasypowego i metody jego transportu.

W przypadkach gdy wykonanie nasypu może mieć niekorzystny wpływ na tereny i obiekty sąsiednie, zakres rozpoznania zgodnie z normą powinien obejmować również ten teren.

Materiały

Wymagania ogólne

Materiał gruntowy stosowany do wykonania nasypu powinien się charakteryzować odpowiednią wytrzymałością, mrozoodpornością oraz właściwym uziarnieniem, umożliwiającym łatwe zagęszczenie i uzyskanie wymaganych właściwości wytrzymałościowych nasypu oraz wodoprzepuszczalności.

W miarę możliwości należy stosować materiały miejscowe. Jeśli miejscowe materiały nie nadają się do wbudowania w nasyp, należy rozważyć ich uzdatnienie przez:

- zmieszanie z cementem, wapnem lub innymi materiałami,
- skruszenie, przemycie lub przesiew,
- dostosowanie wilgotności.

Zgodnie z normą do wykonania nasypów nie należy stosować:

- gruntów zamarzniętych, pęczniejących i rozpuszczalnych w wodzie,
- iłów i glin zwięzłych o granicy płynności w_L powyżej 65%,
- gruntów z domieszkami rozpuszczalnymi w wodzie,
- gruntów zanieczyszczonych (zawierających dodatki gruzu, części roślinnych, drzew, śniegu, lodu, torfu).

Dobór materiału

Do wykonania nasypów należy stosować materiał gruntowy określony w dokumentacji projektowej. Wszelkie zmiany w stosunku do projektu powinny być uzgodnione z projektantem i inwestorem i wpisane do dziennika budowy.

Jeżeli projekt nie określa materiału, należy się kierować zaleceniami normy PN-B-06050:1999 [16], podanymi w tablicy 16. W przypadku podbudów posadzek przemysłowych można kierować się również zaleceniami normy PN-S-02205:1998 [14].

Na nasypy najwłaściwsze jest stosowanie gruntów mineralnych rodzimych, niespoistych lub mało spoistych. Są to grunty łatwe w zagęszczeniu, charakteryzujące się po właściwym zagęszczeniu wysokimi parametrami wytrzymałościowymi.

Do wykonania nasypów, którym nie stawia się szczególnych wymagań dotyczących ich wytrzymałości i odkształcalności (nasypów wyrównawczych, zasypek budynków), mogą być stosowane również grunty spoiste.

Oprócz gruntów rodzimych do wykonania nasypów stosuje się również kruszywo łamane. Używa się go najczęściej do wykonywania warstwy fundamentowej nasypów konstrukcyjnych. Zaletą tego kruszywa jest możliwość uzyskania warstw o wysokiej wytrzymałości i dobrych właściwościach drenujących.

Regionalnie do wykonania nasypów stosuje się również grunty antropogeniczne:

- iłołupki lub łupki przywęglowe przepalone,
- żużle wielkopiecowe,
- popioły i żużle elektrowni,
- skały płonne pogórnice.

Tablica 16. Możliwość wykorzystania gruntów i innych materiałów antropogenicznych do budowy nasypów [5]

Przeznaczenie	Przydatne bez zastrzeżeń	Przydatne z zastrzeżeniami
Na dolne warstwy nasypów poniżej głębokości przemarzania	Grunty frakcji głazowej i kamienistej (<i>zwietrzeliny, rumosze, otoczaki</i>)	Grunty frakcji głazowej i kamienistej z domieszką do 2% frakcji ilowej (<i>zwietrzeliny i rumosze gliniaste</i>), jeżeli są wbudowane w miejsca suche lub zabezpieczone od wód gruntowych i powierzchniowych
	Rozdrobnione skały twarde	Rozdrobnione skały miękkie, jeżeli puste przestrzenie są wypełnione gruntem lub innym materiałem o wymiarze ziarn do 2 mm
	Grunty frakcji żwirowej i piaskowej oraz mieszaniny tych frakcji, naturalne lub łamane (<i>żwiry, pospółki, piaski</i>)	Mieszaniny frakcji piaskowej z pyłową i ilową, zawierające do 10% frakcji ilowej (<i>piaski pylaste i gliniaste, pyły piaszczyste, pyły</i>), jeżeli są wbudowane w miejsca suche lub zabezpieczone od wód gruntowych i powierzchniowych
	Grunty frakcji żwirowej i piaskowej oraz mieszaniny tych frakcji, z domieszką do 10% frakcji ilowej (<i>żwiry i pospółki gliniaste, piaski gliniaste, gliny piaszczyste</i>)	Piaski z domieszką od 2% do 5% części organicznych (<i>piaski próchniczne z wyjątkiem pylastych piasków próchnicznych</i>), jeżeli nasyp ma wysokość do 3 m i będzie zabezpieczony przed zawilgoceniem
	Mieszaniny frakcji piaskowej z frakcją pyłową i ilową, zawierające od 10% do 20% frakcji ilowej (<i>piaski gliniaste i gliny piaszczyste</i>), z domieszką do 10% żwiru, kamieni i głazów (morenowe)	Mieszaniny frakcji pyłowej i ilowej zawierające od 10% do 20% frakcji ilowej (<i>gliny piaszczyste, gliny, gliny pylaste</i>), jeżeli są wbudowane w miejscach suchych lub przejściowo zawilgoconych
	Żuźle wielkopieczowe i inne metalurgiczne ze starych (powyżej 5 lat) zwalów	Mieszaniny frakcji pyłowej i ilowej zawierające od 20% do 30% frakcji ilowej, o małej i średniej plastyczności: $w_L \leq 50\%$ (<i>gliny piaszczyste zwięzłe, gliny zwięzłe, gliny pylaste zwięzłe</i>), jeżeli nasyp ma wysokość do 3 m i będzie zabezpieczony przed zawilgoceniem lub ulepszony spoiwami
	Żuźle wielkopieczowe i inne metalurgiczne	Żuźle wielkopieczowe i inne metalurgiczne z nowego (do 5 lat) studzenia, jeżeli mają ograniczoną podatność na rozpad (łączne straty masy do 5%)
	Iłolupki przywęglowe przepalone	Iłolupki przywęglowe nieprzebrane, jeżeli zawierają nie więcej niż 15% części organicznych
	Naturalne kruszywo łamane z domieszką do 2% frakcji ilowej	Naturalne kruszywo łamane z domieszką do 2% frakcji ilowej, jeżeli zwierciadło wody gruntowej znajduje się na głębokości większej od kapilarności biernej gruntu
		Mieszaniny popiołowo-żuźłowe, jeżeli są wbudowane w miejscach suchych lub izolowane od wody

Ocena właściwości materiału gruntowego

Uziarnienie gruntu jest podstawową właściwością decydującą o warunkach zagęszczenia oraz właściwościach mechanicznych i hydraulicznych nasypu. Grunty stosowane do wykonania nasypu:

- nie powinny zawierać więcej niż 15% wagowo ziaren o średnicy $d < 0,05$ mm,
- maksymalna średnica ziaren nie powinna przekraczać 150 mm,
- w przypadku obciążeń dynamicznych udział ziaren o średnicy $d > 100$ mm nie powinien przekraczać 25% wagowo.

Zalecane warunki graniczne frakcji dotyczące składu granulometrycznego gruntu podano w tablicy 17.

Grunty spełniające warunki podane w tablicy 17 należą do gruntów gruboziarnistych. Są to z reguły żwiry i pospółki.

Tablica 17. Zalecany skład granulometryczny do nasypów. [4]

Frakcja (f)	Wartości graniczne	Nazwa frakcji
do 0,002 mm	do 2%	iłowa
0,002 – 0,02 mm	do 8%	pyłowa
0,02 – 0,05 mm	do 5%	pyłowa
$150 > f > 100$ mm	do 25%	kamienista

Materiał gruntowy powinien ponadto charakteryzować się wskaźnikiem różno-ziarnistości $C_u \geq 4$. Wskaźnik krzywizny uziarnienia powinien wynosić $C_c = 1 \div 3$ (przeważnie $C_c \geq 1$).

Współczynnik filtracji materiału gruntowego w nasypie nie powinien być mniejszy od $k = 10^{-5}$ m/s.

Można dopuścić zastosowanie gruntów o mniejszym współczynniku filtracji, wymaga to jednak odpowiedniego formowania warstwy gruntu i stosowania dodatkowych warstw, o dostatecznej przepuszczalności, umożliwiającej odprowadzenie wody z nasypu.

Warunki wykonania nasypu

Przygotowanie podłoża

Nasyp powinien być układany na przygotowanej i odwodnionej powierzchni podłoża.

Przed ułożeniem nasypu musi być sprawdzona jakość podłoża. Wymagane w projekcie właściwości gruntu powinny być sprawdzone do głębokości 0,5 m poniżej poziomu posadowienia nasypu.

Jeżeli właściwości wytrzymałościowe podłoża są mniejsze od zakładanych w projekcie, podłoże należy wzmocnić.

Zgodnie z normą PN-B-06050 [16], jeżeli pochylenie terenu w poziomie posadowienia nasypu w stosunku do osi nasypu jest większe niż 1:5, należy w celu zabezpieczenia przed zsuwaniem się nasypu wykonać w zboczu stopnie. Górna powierzchnia stopni powinna być wykonana ze spadkiem wynoszącym $4\% \pm 1\%$. Szerokość stopni powinna wynosić od 1,0 m do 2,5 m.

Jeżeli zachodzi możliwość mieszania się gruntu nasypu z gruntem podłoża, należy stosować warstwę separacyjną z geosyntetyku (geowłókniny lub geotkaniny).

Jeżeli przewiduje się umieszczenie poniżej poziomu posadowienia nasypu konstrukcji i instalacji, to powinny być one wykonane wcześniej niż nasyp, chyba że w projekcie ustalono inaczej.

W szczególnych przypadkach, jeżeli nasyp ma być wykonywany na powierzchni skalnej lub gruntach spoistych o gładkiej powierzchni, to przed przystąpieniem do budowy nasypu

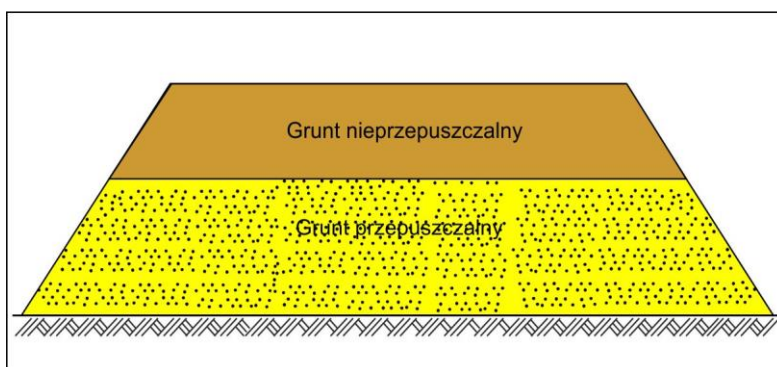
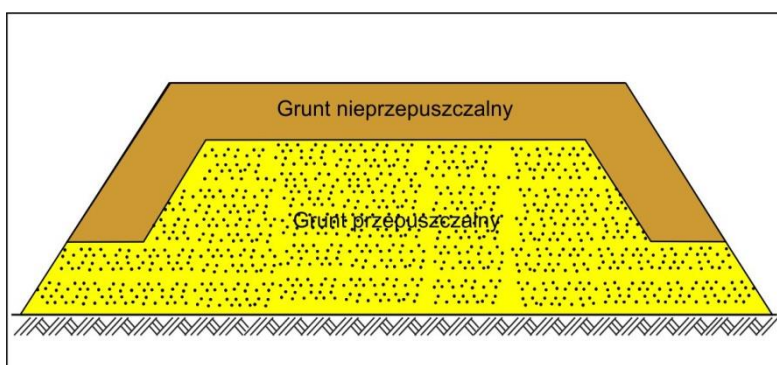
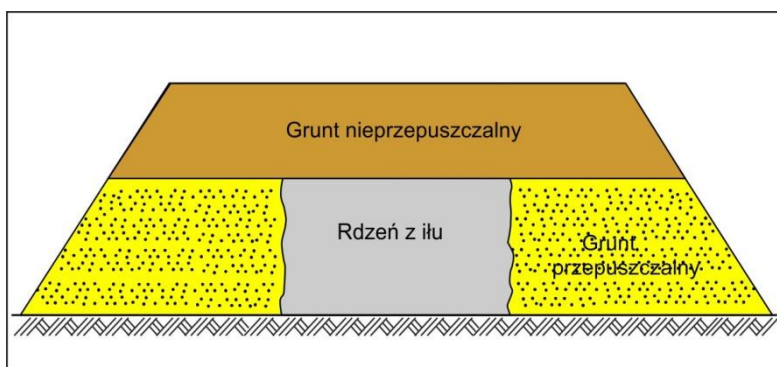
podłoże należy rozdrobnić lub spulchnić na głębokość co najmniej 15 cm w celu poprawy współpracy nasypu z podłożem.

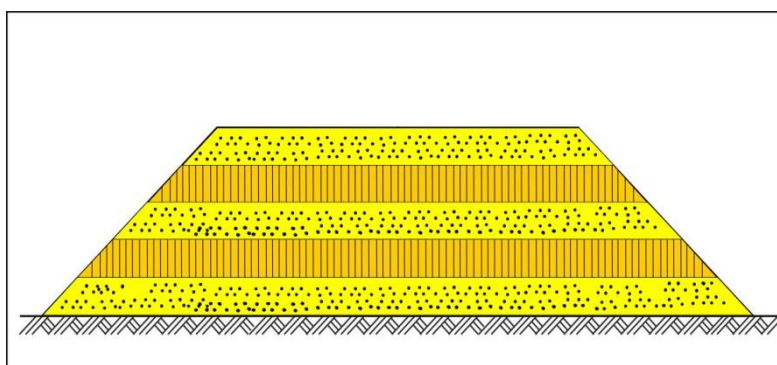
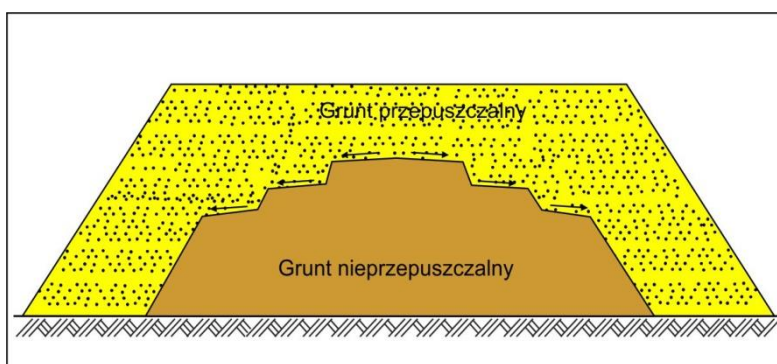
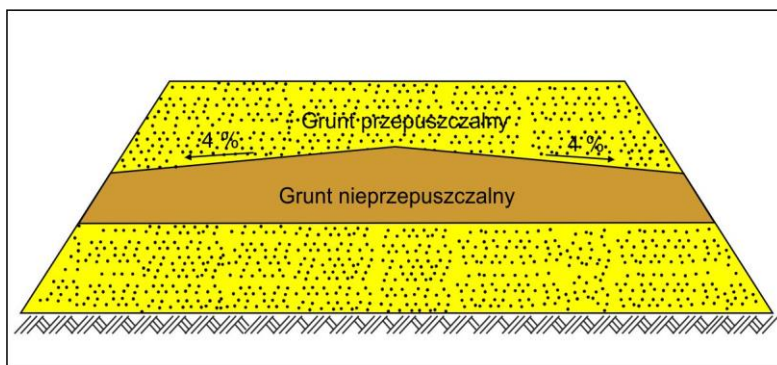
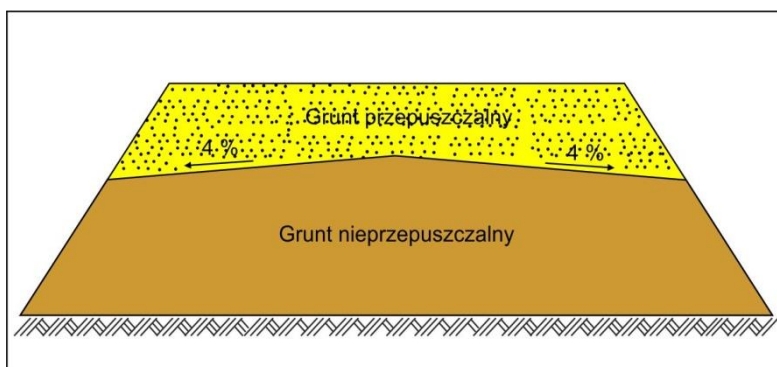
Układanie gruntów w nasypie

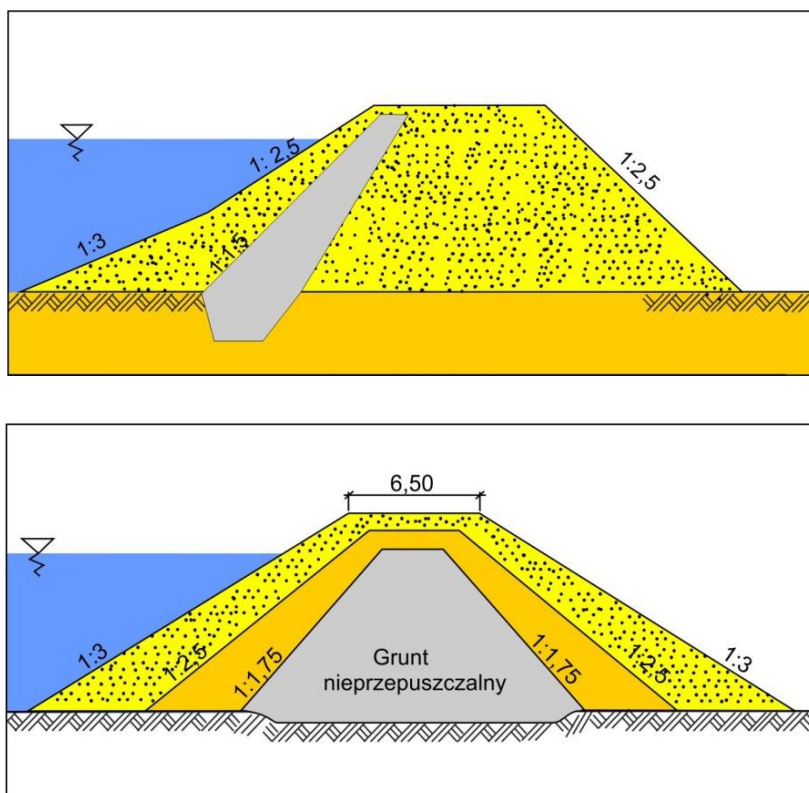
Nasypy należy wykonywać zgodnie z wymaganiami normy PN-B-06050 [16].

Materiał w nasypie należy układać i zagęszczać warstwami.

Rozmieszczanie poszczególnych warstw gruntów mineralnych spoistych i niespoistych należy realizować zgodnie z poniższymi schematami w zależności od rozpatrywanego obiektu, jego funkcji jak i jego wielkości.







Miękkość warstw nasypu należy ustalać w zależności od rodzaju materiału zasypowego i rodzaju stosowanego do zagęszczania sprzętu. Zalecaną w normie grubość warstw w zależności od stosowanego sprzętu podano w tablicy 18.

Układanie i zagęszczanie należy prowadzić w sprzyjających warunkach pogodowych. Jeżeli pogoda jest nieodpowiednia, robót nie należy prowadzić.

Tablica 18. Orientacyjne miękkości zagęszczanych warstw (h) i liczba przejazdów (n) maszyny. [4]

Rodzaj maszyn zagęszczających	Rodzaj gruntu					
	niespoiste		spoiste		gruboziarniste	
	h (m)	n	h (m)	n	h (m)	n
Walce wibracyjne gładkie	0,4–0,7	4–8	–	–	0,3–0,6	4–8
Walce wibracyjne okołkowane	0,4–0,6	4–8	0,2–0,3	6–10	–	–
Walce ogumione	0,2–0,3	6–8	0,2–0,3	6–10	–	–
Zagęszczarki wibracyjne	0,3–0,6	4–8	–	–	0,3–0,6	4–8
Ubijaki o masie od 1 Mg do 10 Mg opuszczane z wysokości od 5 m do 10 m	1–5	5–15	–	–	1–3	5–15

Materiał zasypowy, szczególnie grunty spoiste, należy zagęszczać bezpośrednio po ułożeniu każdej warstwy.

Powierzchnia warstw wykonywanych z gruntów spoistych powinna być ze spadkiem poprzecznym (4 - 6%), w celu odprowadzenia wód opadowych.

Jeżeli po zagęszczeniu gruntów otrzymuje się gładką powierzchnię warstwy (np. przy zastosowaniu walców gładkich), należy ją na krótko przed ułożeniem warstwy następnej spulchnić na głębokość około 5 cm i ewentualnie zrosić wodą w celu lepszego połączenia warstw.

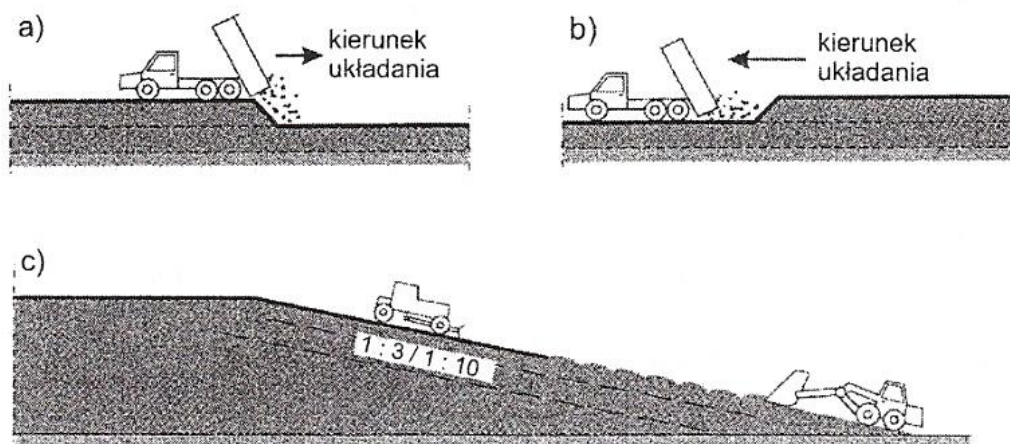
Przykład poletka doświadczalnego do badań zagęszczenia został pokazany na rysunku 26.

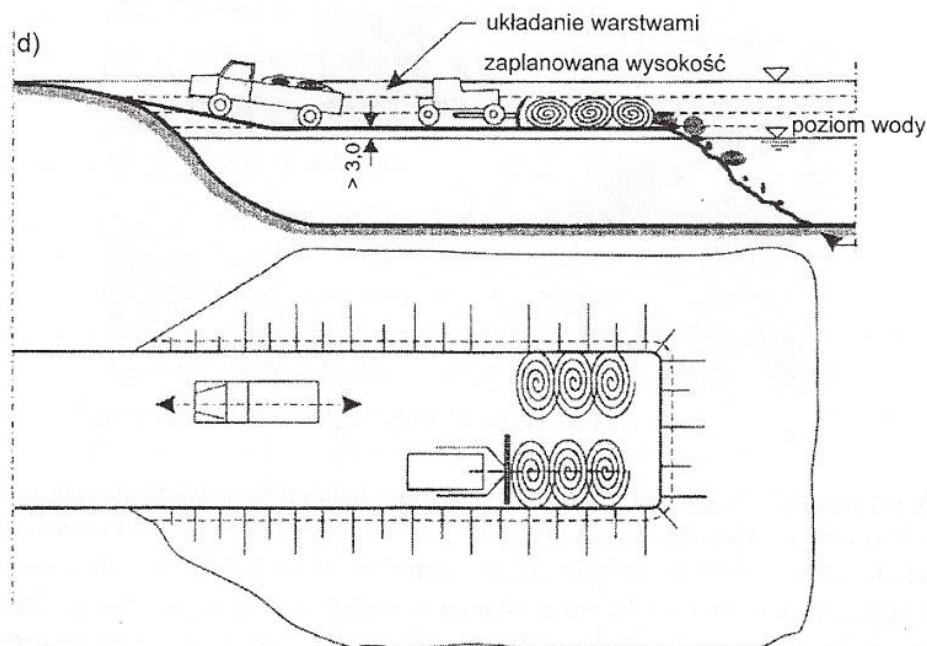


Rys.26 Poletko doświadczalne do badań technologii zagęszczenia. [4]

W przypadku nasypów o dużej powierzchni, szczególnie jeżeli nasypowi stawia projekt wysokie wymagania wytrzymałościowe, pożądane jest wykonanie poletka doświadczalnego. Jest to próbne zagęszczenie na danym terenie z zastosowaniem materiału przewidzianego do wbudowania w nasyp oraz sprzętu, którym będzie on zagęszczany. Pozwoli to na sprawdzenie jakości nasypu, tj. osiągniętych parametrów zagęszczenia i transportu, liczby przejść maszyn zagęszczających oraz ilości wody do nawilgacania.

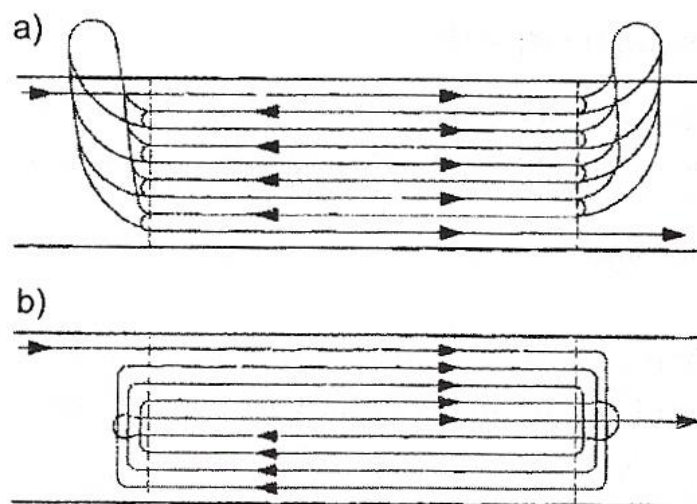
Na poletku należy wykonywać badania kontrolne identyczne do tych, które będą służyły do odbioru robót w liczbie gwarantującej poprawność ocen (uwzględnienie rozrzutu pomiarów). Stosowane metody układania warstw nasypu przedstawiono na rysunku 27.





Rys. 27. Metody układania warstw nasypu a) układanie warstwami na niezagęszczonym podłożu, b) układanie warstwami na zagęszczonym podłożu, c) układanie warstwami na podłożu nachylonym, d) układanie w wodzie. [4]

Na dużych powierzchniach zagęszczanie można prowadzić poruszając się wahadłowo - rys. 28a, lub przy robotach liniowych według wzorów na rysunku 28b. Zagęszczone pasy muszą nakładać się na siebie pasem o szerokości od 100 mm do 150 mm.



Rys. 28. Metody zagęszczania warstw na dużych powierzchniach a) zagęszczenie wahadłowe, b) zagęszczenie pierścieniowe. [4]

Wymagana dokładność wykonania

Jeżeli projekt nie stanowi inaczej lub nie zawiera żadnych wymagań w zakresie dokładności wykonania, to odchyłki w geometrii nasypu i jego usytuowaniu nie powinny przekraczać wartości podanych w tablicy 19.

Tablica 19. Dopuszczalne odchyłki w wykonaniu nasypów
(wg norm PN-B-06050 i PN-S-02205)

Rodzaj parametru nasypu	Dokładność
Wymiary w planie, cm	± 10
Oś nasypu (nasyp zwarty), cm	± 10
Rzędna wierzchu nasypu, cm	+2, -5
Pochylenie skarpy, stopnie	$\pm 1,5$
Nierówność powierzchni (gruntu), cm	± 10
Nierówność powierzchni wykończonej, cm	± 5

Kontrola prawidłowości wykonania nasypu

Zakres badań kontrolnych

Zakres kontroli powinien obejmować:

- badanie przydatności gruntów do budowy nasypu,
- badanie właściwości wytrzymałościowych warstw,
- po zakończeniu robót sprawdzenie geometrii nasypu.

Badanie przydatności gruntu

W przypadku nasypów, którym projekt stawia określone wymagania wytrzymałościowe, jeżeli projekt nie stanowi inaczej, należy określić następujące właściwości gruntu:

- skład granulometryczny,
- wilgotność naturalną,
- wilgotność optymalną i maksymalną gęstość objętościową.

W przypadkach wątpliwych należy dodatkowo ustalić zawartość części organicznych. Badania należy wykonywać według zaleceń normy PN-B-04481 [19].

Badania przydatności gruntów do budowy nasypu powinny być przeprowadzone na próbkach pobranych z każdej partii przeznaczonej do wbudowania w nasyp, pochodzącej z nowego źródła, nie rzadziej niż jeden raz na 3000 m³ masy nasypu.

W przypadku zasypek, którym projekt nie stawia określonych wymagań, należy sprawdzić, czy przewidziany do zasypki grunt nie zawiera niedopuszczalnych domieszek.

Badania kontrolne przydatności gruntów do wykonania nasypu powinny być udokumentowane w sprawozdaniu geotechnicznym. Sprawozdanie powinno zawierać opis sposobu badania i uzyskane wyniki.

Kontrola właściwości wytrzymałościowych nasypu

Sprawdzenie właściwości wytrzymałościowych nasypu należy wykonywać dla każdej wykonanej warstwy.

Sprawdzenie polega na określeniu w każdym punkcie wartości wskaźnika określonego w projekcie (np. I_s , E_2 , E_1 , I_0 , w_n) i porównaniu jej z wartością wymaganą w projekcie.

W przypadku zasypek lub nasypów, dla których projekt nie określa wymaganych właściwości wytrzymałościowych, za wystarczające uznaje się $I_s = 0,95$ ($I_D = 0,67$).

Badania podanych powyżej wskaźników należy wykonywać zgodnie z zaleceniami normy PN-S-02205 [14]. Mogą być stosowane również badania za pomocą innych wykalibrowanych urządzeń, takich jak płyta dynamiczna, sondy izotopowe itp.

Jeżeli projekt lub nadzór nie zaleca inaczej, należy badać każdą warstwę nie rzadziej niż:

- w trzech punktach przy nasypach o powierzchni mniejszej niż 1000 m^2 ,
- przy większych powierzchniach, w trzech punktach na każde 1000 m^2 .

Jeżeli chociaż jeden wynik badań jest negatywny (wartość wskaźnika jest mniejsza od wymaganej), zagęszczenie danego fragmentu warstwy nasypu, o powierzchni min. 500 m^2 , należy powtórzyć i wykonać ponowne badania kontrolne.

Badania kontrolne wytrzymałości warstwy powinny być udokumentowane w sprawozdaniu geotechnicznym.

Sprawozdanie powinno zawierać dane ogólne: miejsce (nazwę obiektu) i datę wykonania badania oraz usytuowanie badanej warstwy, rodzaj badanego wskaźnika i metodę badań oraz dane szczegółowe: lokalizację punktów badawczych (szkic) oraz wyniki oznaczenia wskaźnika.

Data badania kontrolnego oraz wyniki powinny być również udokumentowane w dzienniku budowy oraz zaakceptowane przez nadzór inwestorski.

Kontrola geometrii nasypu

Kontrolę geometrii nasypu przeprowadza się na podstawie pomiarów:

- rzędnej posadowienia nasypu,
- rzędnej wierzchu nasypu,
- w przypadku nasypów konstrukcyjnych: szerokości korony nasypu i pochylenia skarp.

Sprawdzenie prawidłowości wykonania polega na porównaniu wartości zmierzonych z wymaganymi w projekcie lub przejętymi zgodnie z zaleceniami podanymi w niniejszych warunkach.

Wyniki pomiarów powinny być udokumentowane w operacie geodezyjnym.

Odbiór robót

Każda wykonana warstwa nasypu musi być poddana procedurze odbioru częściowego. Następna, wyżej położona warstwa może być układana dopiero po osiągnięciu wymaganego zagęszczenia warstwy poprzedniej, potwierdzonego odbiorem w dokumentacji budowy. Odbiór warstw wykonuje się na podstawie wyników kontroli właściwości wytrzymałościowych warstw.

Odbiór końcowy robót ziemnych powinien być dokonany po ich całkowitym zakończeniu. Odbioru dokonuje się na podstawie oceny aktualnego stanu wyników robót oraz dokumentacji budowy związanej z ich wykonaniem.

Dokumentacja budowy niezbędna przy odbiorze końcowym powinna obejmować:

- dokumentację projektową,
- wyniki badań kontrolnych (operaty geodezyjne i geotechniczne),
- protokoły odbiorów częściowych,
- dziennik budowy.

W uzasadnionych przypadkach nadzór inwestorski może wymagać przedstawienia dodatkowych dokumentów, jeżeli są one niezbędne do oceny prawidłowości wykonania robót.

Roboty uznaje się za wykonane prawidłowo, jeżeli:

- zakres wykonanych badań kontrolnych i odbiorów częściowych był dostateczny,
- wyniki wszystkich badań kontrolnych i odbiorów częściowych były pozytywne,
- wyniki badań kontrolnych i odbiorów częściowych zostały właściwie udokumentowane.

Z odbioru końcowego robót ziemnych należy sporządzić protokół, w którym powinna być zawarta ostateczna ocena prawidłowości wykonania robót i stwierdzenie ich przyjęcia.

Fakt dokonania odbioru końcowego powinien być odnotowany w dzienniku budowy.

Zakończenie

Podstawową przesłanką właściwego zagęszczania warstw gruntowych jest zwiększenie nośności całego układu konstrukcji gruntowej, oraz zmniejszenie jej odkształcalności z jednoczesnym zwiększeniem odporności na działanie wody gruntowej i opadowej oraz mrozu.

Do tego dochodzi jeszcze obliczeniowe osiadanie powierzchni nasypu (suma osiadań korpusu nasypu, podłoża wzmocnionego i podłoża rodzimego), które od momentu wykonania podbudowy nie powinno przekraczać 10 cm.

Biorąc to wszystko pod uwagę należy stwierdzić, że tylko doświadczenie i umiejętności zarówno projektantów, wykonawców jak i operatorów maszyn oraz laborantów przynosi znakomite efekty w postaci trwałych konstrukcji ziemnych.

Literatura:

1. Arquie G.: Zagęszczanie. Drogi i pasy startowe. WKiŁ. Warszawa 1980,
2. Bardel T.: Ocena wyników badań płytą VSS kruszywa ze złóż aluwialnych z rejonu Tarnowa. Górnictwo i geologia, Zeszyt 2, T.2, 2012 r.,
3. Biernatowski K. [i in.]: Fundamentowanie. Tom I. Arkady, Warszawa 1987,
4. Instrukcja ITB Nr 427/2007: Warunki techniczne wykonania i odbioru robót budowlanych. z.1: Roboty ziemne,
5. Kostrzewski W.: Mechanika gruntów. PWN, W-wa 1980,
6. Kumor Ł.: Analiza wpływu zagęszczania kolejnych warstw zasypowych na stan nasypu budowlanego. Rozpr. doktorska. WT-P Bydgoszcz 2014,
7. Materiały z konf.: Podłoże i fundamenty budowli drogowych. IBDiM, Kielce 2012,
8. Pałys F., Smoręda Z.: Poradnik technika melioranta. PWRiL. W-wa 1986,
9. Pisarczyk S.: Geoinżynieria. Metody modyfikacji podłoża gruntowego. OWPW. Warszawa 2005,
10. Prospekt Merazet – Budownictwo i geodezja 2012 r.,
11. Rolla S, Sawicki E.: Technologia robót w budownictwie drogowym. PWSZ 1969,
12. Sulewska M.J.: Sztuczne sieci neuronowe w ocenie parametrów zagęszczenia gruntów niespoistych. PAN, W-wa-Białystok 2009,
13. Wiłun Z.: Zarys geotechniki. WKiŁ Warszawa 2013
14. Wysokiński L., Kotlicki W., Godlewski T.: Projektowanie geotechniczne według Eurokodu 7. Poradnik ITB, Warszawa 2011,
15. Zieliński Z., Stefańczyk B.: Roboty ziemne. Wyd. P.S. Szczecin 1997
16. PN-B-06050:1999 Geotechnika. Roboty ziemne. Wymagania ogólne ,
17. PN-S-02205:1998 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania ,
18. PN-B-02481:1998 Geotechnika. Terminologia podstawowa, symbole literowe i jednostki,
19. PN-B-02479:1998 Geotechnika. Dokumentowanie geotechniczne. Zasady ogólne,
20. PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie,
21. PN-86/B-02480 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów,
22. PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu ,
23. PN-B-03007:2013 Konstrukcje budowlane. Dokumentacja techniczna.