

Politechnika Koszalińska
Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji

Katedra Geotechniki

Dr hab. inż. Jerzy S. Madej

Profesor Politechniki Koszalińskiej

ULEPSZANIE PODŁOŻA

Materiały pomocnicze do wykładów z zakresu geotechniki

Od Autora

Niniejsze opracowanie przeznaczone jest przede wszystkim dla studentów kierunku *Budownictwo*, tak pierwszego jak i drugiego stopnia studiów. Zawiera ono klasyfikację i opis metod ulepszania podłoża, z uwzględnieniem technologii, w odniesieniu do metod wzmacniania gruntu, oraz konstrukcji i wykonawstwa, w odniesieniu do metod zbrojenia gruntu. Szczegółowe rozwiązania technologiczne i konstrukcyjne, jak również zasady wymiarowania gruntu zbrojonego, można znaleźć w materiałach zestawionych w bibliografii.

Ewentualne uwagi, opinie lub komentarze, proszę przysyłać pocztą elektroniczną na adres jerzmad@wp.pl.

J.S. Madej

1. Zasady ulepszania podłoża

Ulepszanie podłoża stało się, w ciągu ostatnich czterech dekad, najszybciej rozwijającą się dyscypliną nie tylko inżynierii geotechnicznej ale również inżynierii lądowej. Złożyły się na to dwie istotne przyczyny. Po pierwsze, rozwój budownictwa komunikacyjnego (drogi, koleje, mosty, wiadukty, tunele, lotniska), którego obiekty w wielu przypadkach posadowiane są na słabym podłożu, a często wykonywane są z gruntu (nasypy, konstrukcje oporowe). Po drugie, nowe technologie materiałów stosowanych do ulepszania podłoża (geosyntetyki, stabilizatory) i nowe techniki ulepszania podłoża (konsolidacja podciśnieniowa, wgłębne mieszanie gruntu, gwoździe gruntowe). Wynikiem tego są dziesiątki metod ulepszania słabego podłoża, które mogą być zastosowane w zależności od rodzaju i stanu gruntów tworzących podłoże, warunków wodnych w podłożu i rodzaju konstrukcji inżynierskiej, która ma być na tym podłożu posadowiona. Duża liczba i różnorodność metod ulepszania podłoża wymagały wprowadzenia nowych terminów i definicji, dotyczących zarówno ogólnych zasad jak i szczegółowych technik. Uzasadnione zatem było opracowanie klasyfikacji metod, która ma charakter nie tyle merytoryczny, ile porządkowy.

Ulepszanie podłoża (ang: *ground improvement*), zgodnie z powszechnie przyjętą definicją, jest to kontrolowana zmiana fizycznych i mechanicznych właściwości materiału podłoża, której celem jest osiągnięcie odpowiedniej reakcji podłoża na istniejące lub projektowane oddziaływania środowiska i budowli. Oczekiwany skutkiem takich działań jest osiągnięcie następujących celów:

- zwiększenie oporu podłoża poprzez wzrost wytrzymałości gruntów,
- zmniejszenie odkształcalności gruntów,
- zmniejszenie przepuszczalności, w tym wodoprzepuszczalności gruntów.

Ulepszanie gruntów słabych obejmuje dwie grupy metod:

- **wzmacnianie gruntu** (ang: *soil strengthening*) , polegające na zmianie właściwości gruntu rodzimego w całym obszarze podłoża , decydującym o stateczności budowli,
- **zbrojenie gruntu** (ang: *soil reinforcement*), polegające na umieszczeniu w gruncie elementów zbrojenia, współpracujących z otaczającym je gruntem rodzimym lub nasypowym.

W przypadku **wzmacniania gruntu**, poprawę jego właściwości mechanicznych, czyli wytrzymałości, odkształcalności i przepuszczalności, można uzyskać w dwojaki sposób, a mianowicie:

- **metodą zmiany stanu**, która oznacza zmniejszenie porowatości gruntu niespoistego w wyniku zagęszczania, zmniejszenie wilgotności gruntu spoistego w wyniku konsolidacji, albo zmianę postaci cząstek gruntu lub wody gruntowej w wyniku stabilizacji termicznej. Efektem tych zmian jest wzrost wytrzymałości i sztywności gruntu w obszarze objętym wzmacnianiem.
- **metodą zmiany składu**, która polega na wprowadzeniu do gruntu stabilizatora, powodującego wzrost sztywności szkieletu gruntowego oraz sił międzycząsteczkowych , decydujących o jego właściwościach mechanicznych. Skrajnym przypadkiem zmiany składu jest całkowita wymiana, czyli usunięcie gruntu słabego i zastąpienie go gruntem mocnym.

W przypadku **zbrojenia gruntu**, zasadniczym czynnikiem jest współpraca elementów zbrojenia z otaczającym je gruntem. Zadaniem zbrojenia jest przenoszenie przede wszystkim naprężeń rozciągających, nie przenoszonych przez grunt, ale także ścinających i ściskających, powstających w podłożu po przyłożeniu obciążenia. W wyniku tego na grunt przypada tylko pewna część przyłożonego obciążenia zewnętrznego, co powoduje odpowiedni przyrost oporu podłoża. Zbrojenie może być umieszczone w gruncie dwoma sposobami, którymi są:

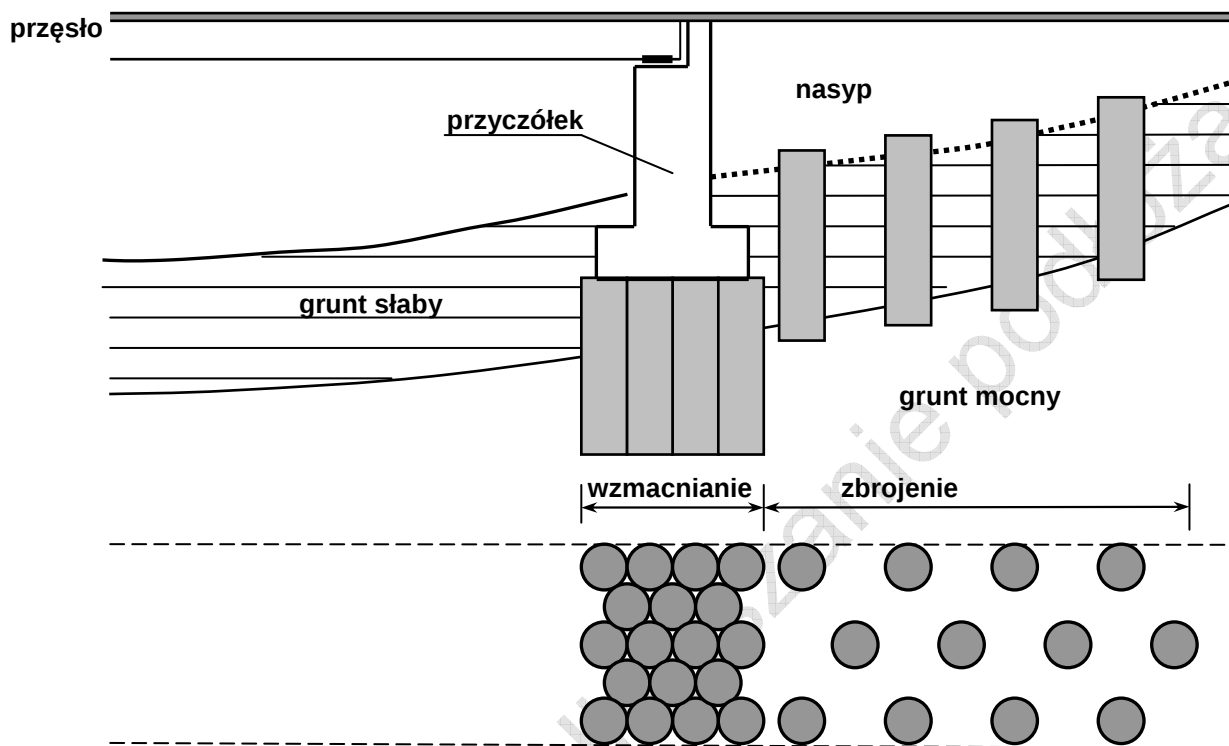
- **zbrojenie gruntu w podłożu (*in situ*)**, polegające na wprowadzeniu zbrojenia w grunt rodzimy, bez istotnych zmian właściwości tego gruntu. Zbrojenie to stanowią kolumny, mikropale i gwoździe gruntowe.
- **konstrukcje z gruntu zbrojonego**, w których zbrojenie współpracuje z gruntem nasypowym, stanowiącym materiał konstrukcyjny. Do tego rodzaju zbrojenia należą elementy metalowe, geosyntetyki i rozproszone włókna.

Wynikającą z tych zasad klasyfikację metod ulepszania gruntów zawiera tabela 1.

Tabela 1. Klasyfikacja metod ulepszania gruntów

Kategoria		Metoda ulepszania
1.a. Wzmacnianie gruntu poprzez zmianę stanu	grunty niespoiste	▶ zagęszczanie - impulsowe - wibracyjne - udarowe - wybuchowe
	grunty spoiste i organiczne	▶ konsolidacja wywołana obciążaniem lub przeciążaniem - bez drenażu pionowego - z drenażem pionowym - ze zmniejszaniem ciśnienia porowego ▶ elektroosmoza
	grunty spoiste i niespoiste	▶ wałowanie ▶ piaskowe pale zagęszczające ▶ stabilizacja termiczna - zamrażanie - spiekanie - wityfikacja
1.b. Wzmacnianie gruntu poprzez zmianę składu	grunty spoiste, niespoiste i organiczne	▶ wymiana gruntu ▶ stabilizacja - powierzchniowa - masowa - elektrokinetyczna ▶ zastrzyki ciśnieniowe - wypełniające - penetracyjne - rozpierające - zagęszczające ▶ mieszanie wgłębne - na sucho - na mokro
2.a. Zbrojenie gruntu w podłożu (<i>in situ</i>)		▶ pionowe kolumny - kamienne - w osłonie geotekstylnej - wykonywane metodą wgłębnego mieszania ▶ mikropale ▶ gwoździe gruntowe
2.b. Konstrukcje z gruntu zbrojonego		▶ zbrojenie metalowe ▶ zbrojenie geosyntetyczne ▶ zbrojenie włóknami rozproszonymi

Różnicę pomiędzy wzmocnianiem a zbrojeniem gruntu najlepiej ilustruje przykład zastosowania kolumn, wykonywanych metodą wgłębnego mieszania gruntu DSM (ang. *Deep Soil Mixing*), przedstawiony na rysunku 1.1. Jeżeli między kolumnami znajduje się grunt rodzimy, przenoszący część obciążenia zewnętrznego, to mamy do czynienia ze zbrojeniem gruntu. Natomiast jeżeli kolumny przylegają do siebie, przejmując całe obciążenie zewnętrzne, to wtedy mówimy o wzmocnieniu podłoża.



Rys. 1.1. Zasada wzmocniania i zbrojenia gruntu

2. Wzmacnianie gruntu metodą zmiany stanu

2.1. Grunty niespoiste

Zmiana stanu gruntów niespoistych polega na zmniejszeniu ich porowatości, czego efektem jest wzrost stopnia zagęszczenia, a tym samym poprawa właściwości mechanicznych gruntów. Zmniejszenie porowatości jest wynikiem przemieszczania się ziaren i cząstek mineralnych pod wpływem przyłożonego obciążenia, co wymaga zniszczenia naturalnej struktury gruntu. Struktura ta utrzymywana jest dzięki siłom kontaktowym, występującym na powierzchni styku ziaren i cząstek, a także dzięki siłom kapilarnym działającym, przy odpowiedniej wilgotności, w obrębie tych kontaktów. Dlatego o skuteczności zagęszczenia gruntów niespoistych decyduje, przede wszystkim, skład uziarnienia, porowatość i wilgotność gruntu w stanie naturalnym, a także wartość obciążenia i sposób jego działania (statyczne lub dynamiczne). Doświadczenie wykazało, że najbardziej skuteczną metodą zagęszczania gruntów niespoistych jest obciążenie dynamiczne, naruszające równowagę sił kontaktowych, połączone ze wzrostem wilgotności gruntu, powodującym likwidację sił kapilarnych.

2.1.1. Zagęszczanie impulsowe

Do zagęszczania impulsowego (*ang: impulse compaction*) stosowane są różnego rodzaju ubijaki (grawitacyjne, spalinowe, pneumatyczne), o masie od 50 do 1200 kg, wywierające na powierzchnię zagęszczanej warstwy obciążenie pionowe o różnej częstotliwości. Głębokość oddziaływania ubijaka zależy przede wszystkim od jego masy. Wynosi ona około 0,50 m w przypadku ubijaków lekkich i może dochodzić do 7,0 m w przypadku ubijaków ciężkich (rys. 2.3.).

2.1.2. Zagęszczanie vibracyjne

Istotą zagęszczania vibracyjnego (*ang: vibro compaction*) jest przenoszenie drgań mechanicznych z wibratora na podłoże gruntowe. Źródłem drgań mogą być zagęszczarki lub walce vibracyjne (zagęszczanie powierzchniowe), wibratory zagłębione w podłożu lub umieszczone na głowicy żerdzi sondy zagęszczającej (zagęszczanie wgłębne), albo wibratory na sztywnej żerdzi, zagłębiane w podłożu z równoczesnym upłynnianiem gruntu (wibroflotacja).

2.1.2.1. Zagęszczanie powierzchniowe

Zagęszczarki płytowe (*ang: vibratory plates*), stosowane są do zagęszczania podsyppek gruntowych i podbudów, przy układaniu przewodów kanalizacyjnych i wodociągowych oraz do zagęszczania gruntów w miejscach trudno dostępnych. Elementem roboczym jest metalowa płyta drgająca, przenosząca drgania na podłoże gruntowe. Drgania te, o różnym charakterze, wywoływane są przez zespół wymuszający, napędzany silnikiem elektrycznym, spalinowym lub mieszanym (spalinowym i hydraulicznym). Ze względu na niewielkie obciążenie jednostkowe wywierane na podłoże ($15 \div 25 \text{ kPa}$) oraz niewielką powierzchnię płyty drgającej (do $0,5 \text{ m}^2$), efektywność stosowania zagęszczarek płytowych nie przekracza głębokości 0,5 m.

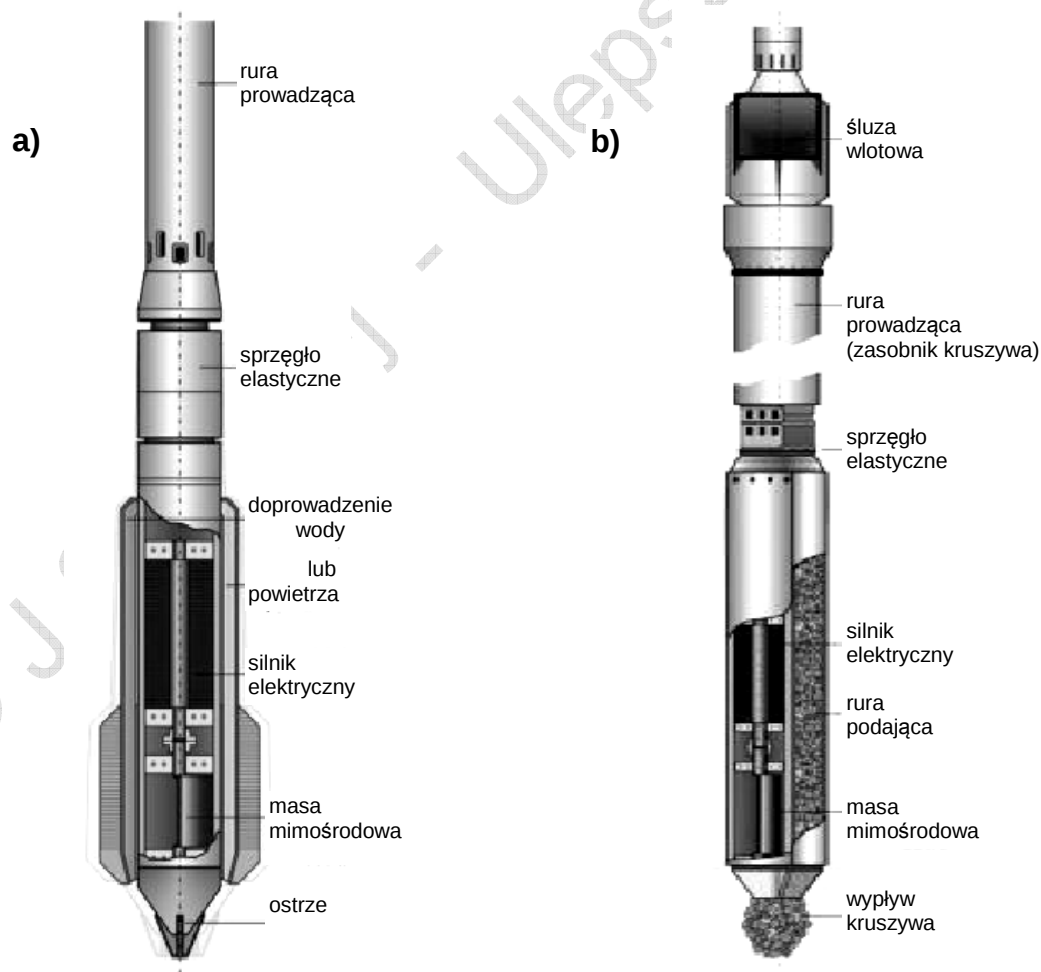
Walce vibracyjne (*vibratory rollers*), stanowiące grupę maszyn stosowanych do zagęszczania powierzchniowego, opisane są w rozdziale 2.3.1, dotyczącym zagęszczania gruntów niespoistych i spoistych.

2.1.2.2. Zagęszczanie wgłębne

Początkowo do zagęszczania wgłębego stosowano wibratory zagłębiane w podłożu pod własnym ciężarem lub za pomocą wplukiwania, jednakże zasięg takiej metody nie przekraczał głębokości 6.0 m. Dlatego też obecnie do tego celu stosuje się sondy wibracyjne, albo metodę wibroflotacji.

Sondy wibracyjne (*ang: vibratory probes*), z których najprostsze wykonane są w postaci perforowanych rur stalowych lub dwuteowników szerokostopowych, zagłębiane są w podłożu pod własnym ciężarem lub dodatkowo pod wpływem pionowych drgań wibratora, umieszczonego w głowicy sondy. Zagęszczanie gruntu następuje pod wpływem pionowych, a niekiedy i poziomych drgań wibratora. Obecnie stosowane są sondy wibracyjne o bardziej złożonych kształtach, będących wynikiem badań doświadczalnych. Odległość pomiędzy punktami zagęszczania wynosi od 1,5 do 4,5 m, a głębokość zagęszczania może dochodzić do 20 m.

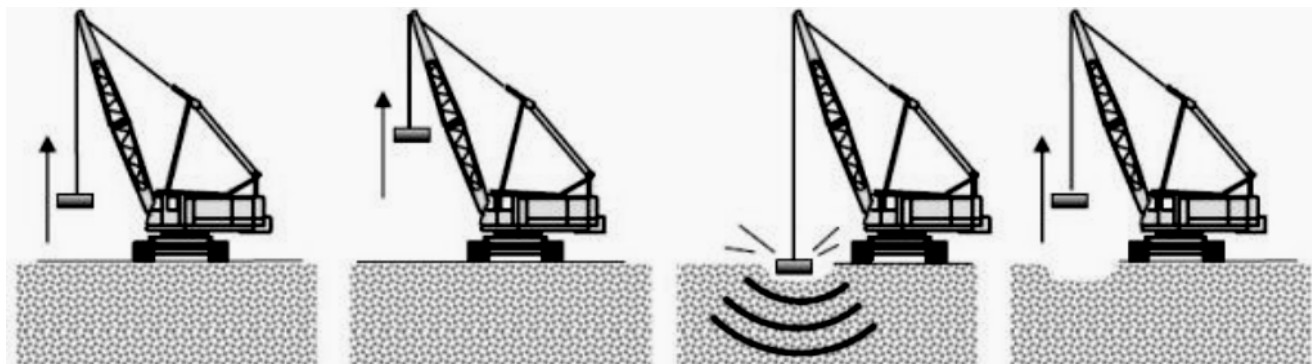
Wibroflotacja (*ang: vibroflotation*) jest metodą łączącą drgania mechaniczne wibratora z upłynnianiem gruntu, co znacznie zwiększa efektywność zagęszczania zwłaszcza w gruntach niespoistych o małej wilgotności. Sonda, nazywana wibroflotem (*ang: vibroflot*), w postaci rury stalowej o średnicy wynoszącej $0,35 \div 0,45$ m i długości do 5,0 m, wyposażona jest w wibrator wytwarzający drgania poziome (rys. 2.1.a). Zagłębianie wibroflota odbywa się pod własnym ciężarem, z ewentualnym udziałem płuczki wodnej, a zagęszczanie gruntu jest wynikiem pionowych i poziomych drgań wibratora. Strefa oddziaływania wibroflota ma zasięg $1,5 \div 4,0$ m, a głębokość zagęszczania może sięgać do 50 m.



Rys. 2.1. Wibroflot typu Keller

a) stosowany do zagęszczania gruntu b) stosowany do wibrowymiany

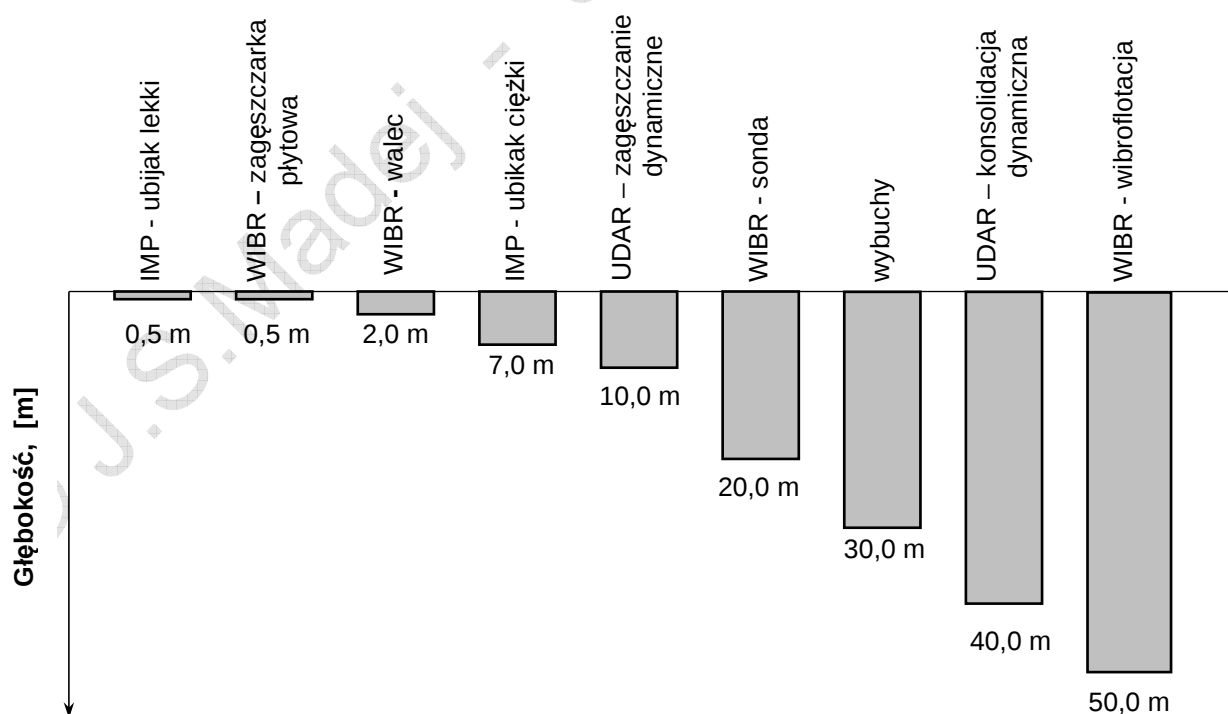
2.1.3. Zagęszczanie udarowe



Rys. 2.2. Schemat zagęszczania udarowego

Zagęszczanie udarowe (*ang: impact compaction*), którego zasadę przedstawiono na rysunku 2.2, polega na swobodnym spadaniu ciężkiego ubijaka z dużej wysokości na powierzchnię podłoża. W zależności od rodzaju i stanu gruntu oraz zastosowanej energii uderu, można tu wyróżnić dynamiczne zagęszczanie i dynamiczną konsolidację.

Zagęszczanie dynamiczne (*ang: dynamic compaction*), stosowane w odniesieniu do mało wilgotnych gruntów niespoistych lub gruntów antropogenicznych (odpady przemysłowe lub komunalne), polega na kilkakrotnym uderze w jednym miejscu ubijakiem o masie do 15 ton, spadającym z wysokości do 15 m. Powstające w wyniku tego kraterę wypełnia się gruntem gruboziarnistym, a przypowierzchniową strefę podłoża zagęszcza się metodą impulsową lub wibracyjną. Zasięg oddziaływania takiego zagęszczanie nie przekracza głębokości 10 m.



Rys.2.3. Głębokość zasięgu dynamicznego zagęszczania gruntów niespoistych

Konsolidacja dynamiczna (*ang: dynamic consolidation*), stosowana jest w odniesieniu do bardzo wilgotnych lub nasyconych wodą gruntów o małej wodoprzepuszczalności, w tym również niektórych gruntów spoistych, o zawartości frakcji iłowej poniżej 10 %. Polega ona na jedno- lub dwukrotnym uderze w jednym miejscu ubijakiem o masie do 200 ton, spadającym z wysokości do 25 m. Zabieg ten powtarzany jest po rozproszeniu nadwyżki ciśnienia porowego, wzbudzonego powstającą falą uderzeniową. Zasięg oddziaływania takiego zagęszczania dochodzi do głębokości 40 m.

2.1.4. Zagęszczanie wybuchami

Zagęszczanie wybuchami (*ang: blasting compaction*) stosuje się najczęściej w nawodnionych gruntach niespoistych i spoistych lub w gruntach lessowych po ich nawodnieniu. Eksplozja ładunków wybuchowych wywołuje drgania i naprężenia w ośrodku gruntowym, co prowadzi do zmiany struktury gruntu i zmniejszenia jego porowatości. Ładunki wybuchowe, o masie od 1 do 12 kg, można umieszczać na powierzchni podłoża, ponad dnem zbiornika wodnego lub w otworach wykonywanych pod osłoną rury stalowej. Kolejność detonowania ładunków zależy od rodzaju gruntu i miąższości warstwy zagęszczanej. Najlepsze wyniki uzyskuje się w przypadku ładunków umieszczonych poniżej zwierciadła wody gruntowej. Metoda jest szczególnie efektywna przy dużej miąższości warstwy zagęszczanego gruntu, w granicach $20 \div 30$ m.

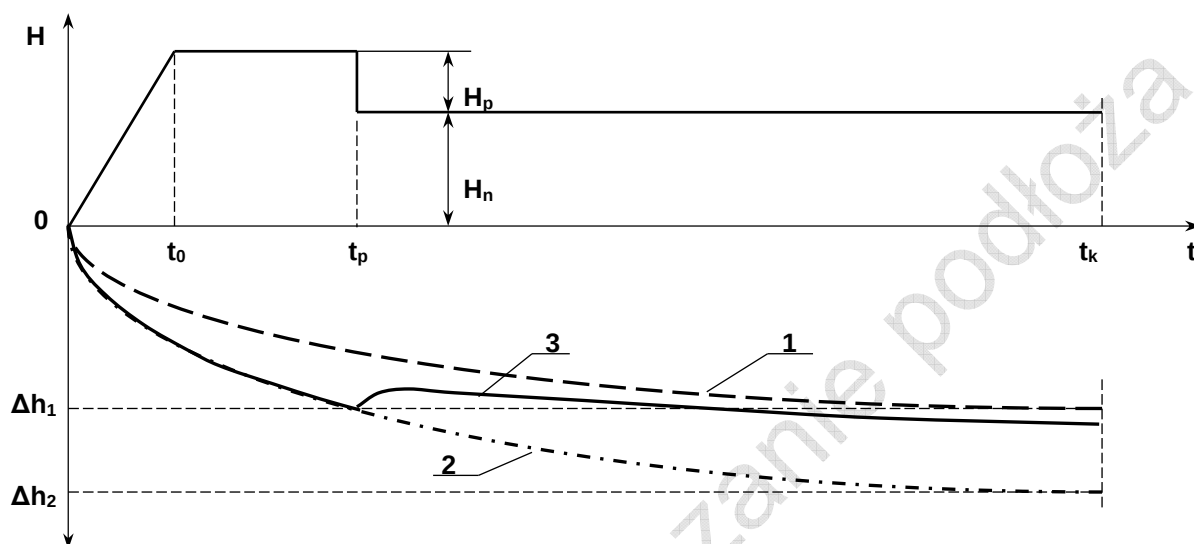
2.2. Grunty spoiste i organiczne

Właściwości mechaniczne gruntów spoistych i organicznych zależą oczywiście od ich składu uziarnienia (grunty spoiste) lub zawartości części organicznych (grunty organiczne), a także od porowatości i wilgotności. Dlatego zmiana stanu tych gruntów polega na zmniejszeniu ich wilgotności, poprzez usunięcie nadmiaru wody w gruncie. Zasadniczą metodą, zapewniającą osiągnięcie tego celu, jest konsolidacja gruntu, czyli wyciśnięcie nadmiaru wody z gruntu pod wpływem przyłożonego obciążenia. Wymienione grunty charakteryzują się z reguły małą wodoprzepuszczalnością i dużą wilgotnością, dlatego proces konsolidacji może zakończyć się po kilku miesiącach lub po kilku latach, ale może również trwać znacznie dłużej. Tak więc punktem wyjścia wszystkich metod zagęszczania gruntów spoistych i organicznych jest przyłożenie obciążenia, inicjującego proces konsolidacji gruntu, a następnie skrócenie do minimum czasu konsolidacji. Obciążenie może mieć charakter zewnętrzny, zazwyczaj w postaci warstwy nasypu o określonej wysokości, wywołującej wzrost naprężeń całkowitych i ciśnienia porowego w gruncie, albo charakter wewnętrzny, w postaci podciśnienia wywoływanego w gruncie naturalnym, powodującego spadek ciśnienia porowego, a tym samym wzrost naprężeń efektywnych. Natomiast skrócenie czasu konsolidacji uzyskuje się albo poprzez zastosowanie przeciążenia gruntu, utrzymywanego przez określony czas, albo poprzez umieszczenie w podłożu różnego rodzaju drenów pionowych. W praktyce stosowane są również metody łączące drenaż pionowy z przeciążeniem podłoża lub z podciśnieniem w podłożu, a także metody łączące te trzy sposoby jednocześnie. Wzmacnianie gruntów spoistych i organicznych metodą konsolidacji stosowane jest przede wszystkim w budownictwie komunikacyjnym, do ulepszania podłoża nawierzchni albo podłoża nasypu. Te właśnie przypadki będą analizowane przy opisywaniu poszczególnych metod.

2.2.1. Przeciążanie podłoża

Celem tej metody jest skrócenie czasu konsolidacji podłoża pod projektowanym nasypem. Cel ten osiąga się poprzez wykonanie nasypu dociążającego który, po określonym czasie, jest usuwany. Zasada działania takiej procedury pokazana jest na rysunku 2.4, obrazującym przebieg odkształcenia ściśliwej warstwy podłoża Δh w czasie t .

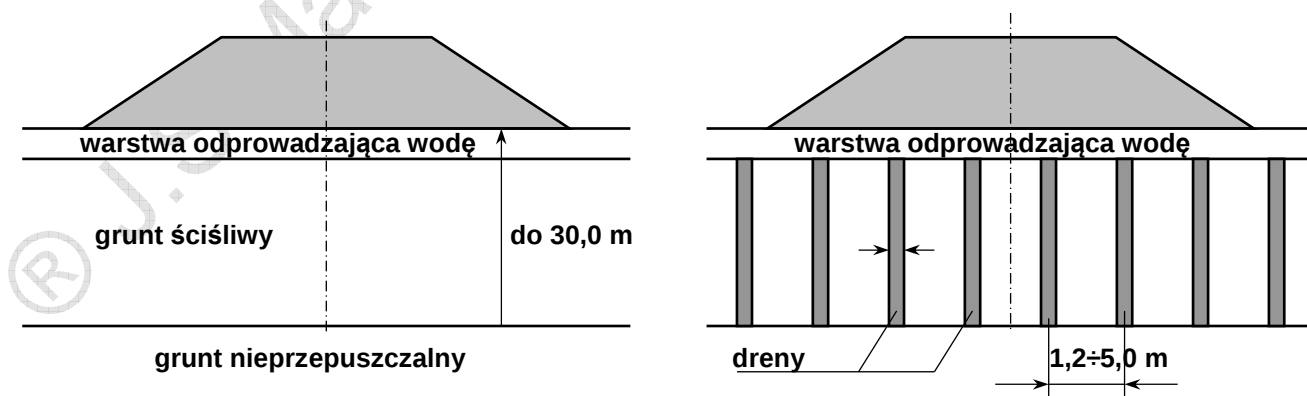
Linia 1 przedstawia przebieg odkształcenia w czasie ściśliwej warstwy podłoża obciążonej nasypem o projektowanej wysokości H_n . Linia 2 przedstawia przebieg tego odkształcenia pod dodatkowym przeciążeniem nasypem o wysokości H_p . Natomiast linia 3 przedstawia przebieg tej zależności w przypadku, gdy przeciążenie nasypem o wysokości H_p zostało zdjęte po czasie t_p , w którym przewidywane odkształcenie podłoża nasypem projektowanym i przeciążającym osiągnęło wartość Δh_1 , oznaczającą przewidywane odkształcenie podłoża pod projektowanym nasypem w czasie t_k , czyli po zakończeniu konsolidacji.



Rys. 2.4. Zasada skracania czasu konsolidacji metodą przeciążania

2.2.2. Drenaż pionowy

Istotą drenów pionowych (*ang: vertical drains*) jest skrócenie drogi filtracji wody w konsolidowanej warstwie gruntu, co radykalnie przyspiesza proces konsolidacji. W przypadku konsolidacji warstwy gruntu obciążonej nasypem, maksymalna długość drogi filtracji równa jest miąższości warstwy konsolidowanej, która w skrajnych przypadkach może dochodzić do 30 m. Natomiast w wyniku zastosowania drenów pionowych, długość drogi filtracji równa jest połowie rozstawu drenów, co oznacza wartości $0,6 \div 2,5$ m, jak to pokazano na rysunku 2.5.



Rys.2.5. Wpływ drenów pionowych na skrócenie drogi filtracji w podłożu

Rodzaje drenów

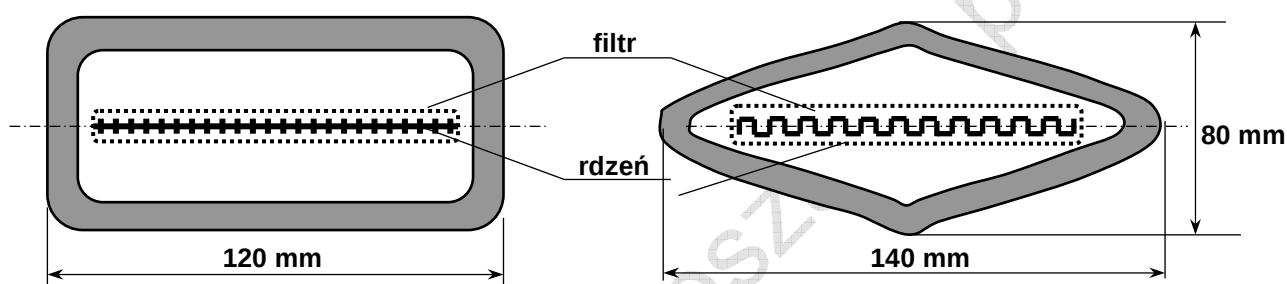
Norma europejska wyróżnia cztery rodzaje drenów pionowych, którymi są: dreny piaskowe, dreny piaskowe zabezpieczone osłoną (jutową lub geotekstylną), prefabrykowane

dreny taśmowe oraz prefabrykowane dreny rurowe. Wybór rodzaju drenu zależy od warunków gruntowych w podłożu, a także od rodzaju budowli i jej dopuszczalnych osiadań. Tym niemniej w praktyce najczęściej stosowane są prefabrykowane dreny taśmowe.

Dreny piaskowe (*ang: sand drains*), są najstarszym rodzajem drenów, wprowadzonym w latach trzydziestych XX wieku w USA. Są to dreny o średnicy $0.15 \div 0.6$ m i rozstawie $1.2 \div 5.0$ m, umieszczane w wykonanym uprzednio otworze. W zależności od rodzaju odwadnianego gruntu, mogą to być otwory wiercone (z rurą osłonową lub bez), wypłukiwane wodą pod ciśnieniem lub utworzone metodą wciskania lub wwibrowywania zamkniętej rury.

Dreny piaskowe zabezpieczone osłoną występują w dwóch wersjach, a mianowicie:

- prefabrykowane dreny piaskowe w osłonie jutowej (*ang: sandwicks*), o średnicy $0.06 \div 0.07$ m, a maksymalnie 0.15 m i rozstawie $1.2 \div 4.0$ m, umieszczane w otworze lub zagłębianie pod osłoną stalowej żerdzi, wciskanej w podłoże,
- dreny piaskowe w osłonie geotekstylnej (*ang: geotextile enclosed sand drains*), o średnicy dochodzącej do 0.8 m i maksymalnym rozstawie powyżej 5.0 m, wykonywane pod osłoną rury stalowej, zagłębianej w wierconym otworze lub wciskanej w podłoże.



Rys. 2.6. Typowe przekroje żerdzi zagłębiającej dren taśmowy

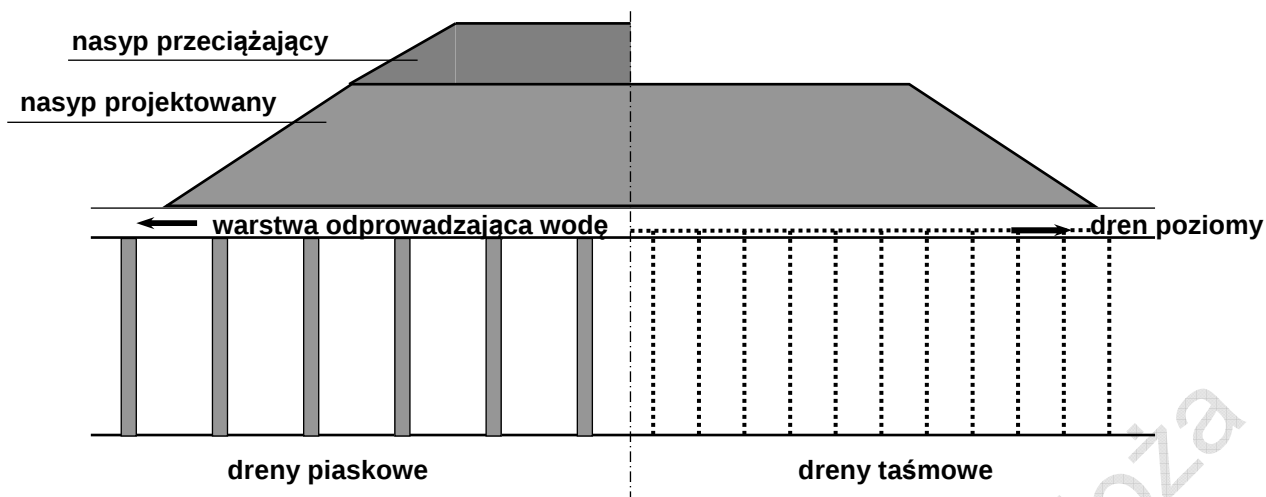
Prefabrykowane dreny taśmowe (*ang: prefabricated band drains*), składające się z rdzenia z tworzywa sztucznego, osłoniętego warstwą filtracyjną z papieru lub geosyntetyku, o szerokości wynoszącej zazwyczaj 100 mm, grubości $3 \div 7$ mm i rozstawie $1.2 \div 3.5$ m, umieszczane są w podłożu pod osłoną stalowej żerdzi (rys. 2.6).

Prefabrykowane dreny rurowe (*ang: prefabricated cylindrical drains*), składające się z karbowanej, perforowanej rury plastikowej, osłoniętej warstwą geosyntetyku, zazwyczaj o średnicy zewnętrznej 50 mm i wewnętrznej 45 mm, rozmieszczane w odległości $1.2 \div 4.5$ m, umieszczane są w podłożu pod osłoną stalowej żerdzi.

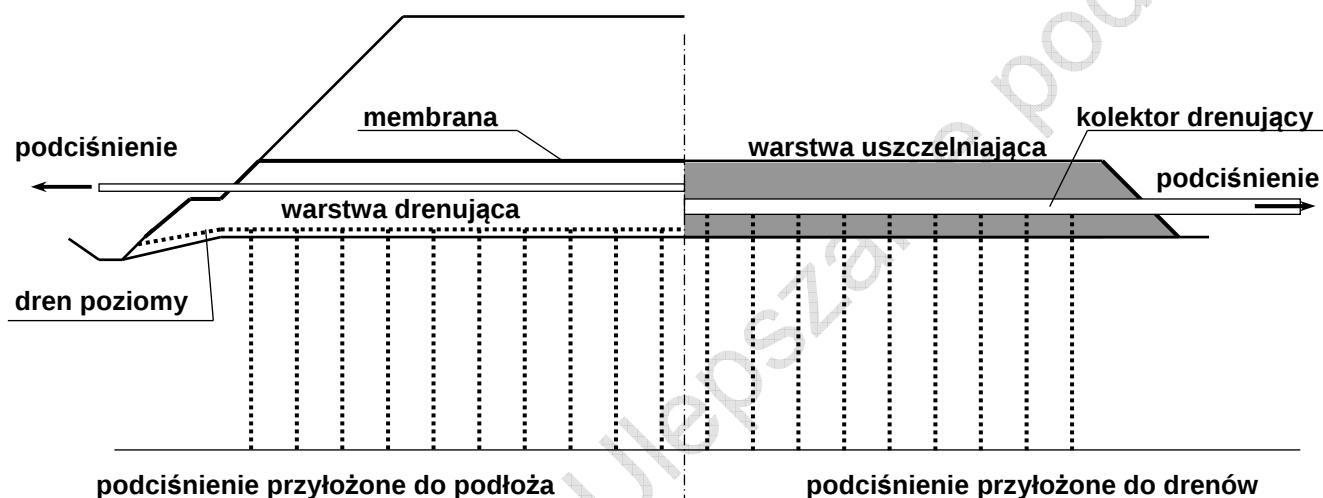
Większość drenów pionowych może być stosowana do głębokości 30 m, natomiast w przypadku drenów taśmowych ich długość może przekraczać 60 m.

Przyspieszanie konsolidacji drenowanego podłoża

Ponieważ wzmocnienie podłoża w tej metodzie następuje w wyniku konsolidacji gruntów spoistych lub organicznych, niezbędne jest zastosowanie wstępnego obciążenia wywołującego proces konsolidacji. W przypadku podłoża nasypu tym obciążeniem może być ciężar gruntu nasypowego (rys. 2.7), natomiast w przypadku podłoża nawierzchni drogi lub składowiska, albo podłoża zbiornika, obciążenie to uzyskuje się poprzez wytworzenie podciśnienia w warstwie gruntu konsolidowanego (rys. 2.8). Podciśnienie może być przykładane do podłoża, lub też bezpośrednio do drenów. W obu przypadkach możliwe jest dodatkowe zastosowanie nasypu przeciążającego, usuwanego po osiągnięciu założonego stopnia konsolidacji gruntu w podłożu.



Rys. 2.7. Przyspieszanie konsolidacji za pomocą przeciążenia lub drenów poziomych



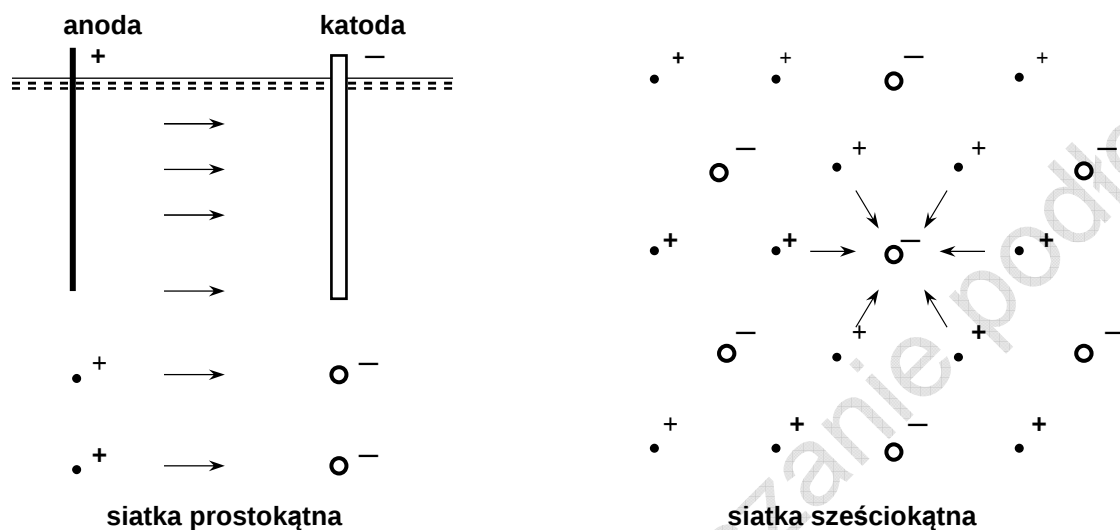
Rys. 2.8. Przyspieszanie konsolidacji za pomocą podciśnienia

2.2.3. Elektroosmoza

Elektroosmoza (ang: *electroosmosis*) związana jest z budową gruntów drobnoziarnistych, o dużej zawartości cząstek minerałów ilastych, o średnicy zastępczej $d \leq 0,002$ mm. Na powierzchni takich cząstek powstaje warstwa wody związanej a także podwójna warstwa jonowa, w której znajdują się zarówno jony ujemne (aniony) jak i dodatnie (kationy). Przyłożenie do gruntu pola elektrycznego, powstającego między elektroda dodatnią (anodą) i elektroda ujemną (katodą), wywołuje przyciąganie anionów do anody i kationów do katody. Przemieszczające się jony pociągają za sobą cząsteczki wody znajdującej się w porach gruntu. Ponieważ kationów jest znacznie więcej niż anionów, ostatecznym efektem jest filtracja wody od anody do katody, który to proces nazywany jest elektroosmozą.

Jeżeli w gruncie umieścimy pionową anodę, w postaci pręta stalowego lub aluminiowego i w pewnej odległości katodę, w postaci perforowanej rury owiniętej filtrem miedziowym, to po przyłożeniu prądu stałego wewnątrz katody zacznie zbierać się woda. Odprowadzanie wody z katody, pełniące rolę studni, przy jednoczesnym ograniczeniu dopływu wody w rejonie anody, spowoduje zmniejszenie ciśnienia wody w porach u . Zgodnie z koncepcją naprężeń efektywnych, przy stałej wartości naprężenia całkowitego σ wzrośnie odpowiednio naprężenie efektywne σ' , czego wynikiem będzie proces konsolidacji gruntu. Tak więc efektem drenażu elektroosmotycznego jest nie tylko zmniejszenie wilgotności gruntu lecz także poprawienie jego właściwości mechanicznych.

Elektroosmoza wykorzystywana była początkowo do odwadniania wykopów, a obecnie stosowana jest do wzmacniania podłoża drogowych budowli ziemnych i stabilizacji zboczy. Rozstaw elektrod, zależny od rodzaju i stanu gruntu, mieści się w przedziale $1,0 \div 5,0$ m, przy czym elektrody rozmieszcza się w siatce kwadratowej lub sześciokątnej, jak to pokazano na rysunku 2.9. W przypadku wzmacniania podłoża nasypu, gdzie istotne jest skrócenie czasu konsolidacji gruntu, szczególnie dobre efekty daje połączenie elektroosmozy z obciążeniem powierzchni podłoża. Natomiast w przypadku stabilizacji zboczy osuwiskowych, metalowe pręty (anody) umieszcza się w zboczu ukośnie, a dreny zbierające wodę (katody) umieszcza się poziomo, co umożliwia grawitacyjne odprowadzenie wody.



Rys. 2.9. Schemat drenażu elektroosmotycznego

2.3. Grunty spoiste i niespoiste

Przedstawione uprzednio sposoby wzmacniania gruntów metodą zmiany ich stanu, oddzielnie dla gruntów spoistych i niespoistych, uwzględniały specyfikę budowy i właściwości tych gruntów. Istnieją także metody stosowane w odniesieniu do obydwu rodzajów gruntu, do których należą: wałowanie, piaskowe pale zagęszczające oraz tak zwane metody termiczne, czyli zamrażanie, spiekanie i witrifikacja gruntu.

2.3.1. Wałowanie

Do zagęszczania gruntu tą metodą stosuje się różne rodzaje walców, przy czym zasadniczy podział związany jest ze sposobem przyłożenia obciążenia do podłoża, zależnym od rodzaju gruntu. Dlatego wyróżniamy tu wałowanie statyczne, stosowane przeważnie do gruntów drobnoziarnistych (spoistych) i wałowanie dynamiczne (wibracyjne), stosowane niemal wyłącznie do gruntów gruboziarnistych i kamienistych.

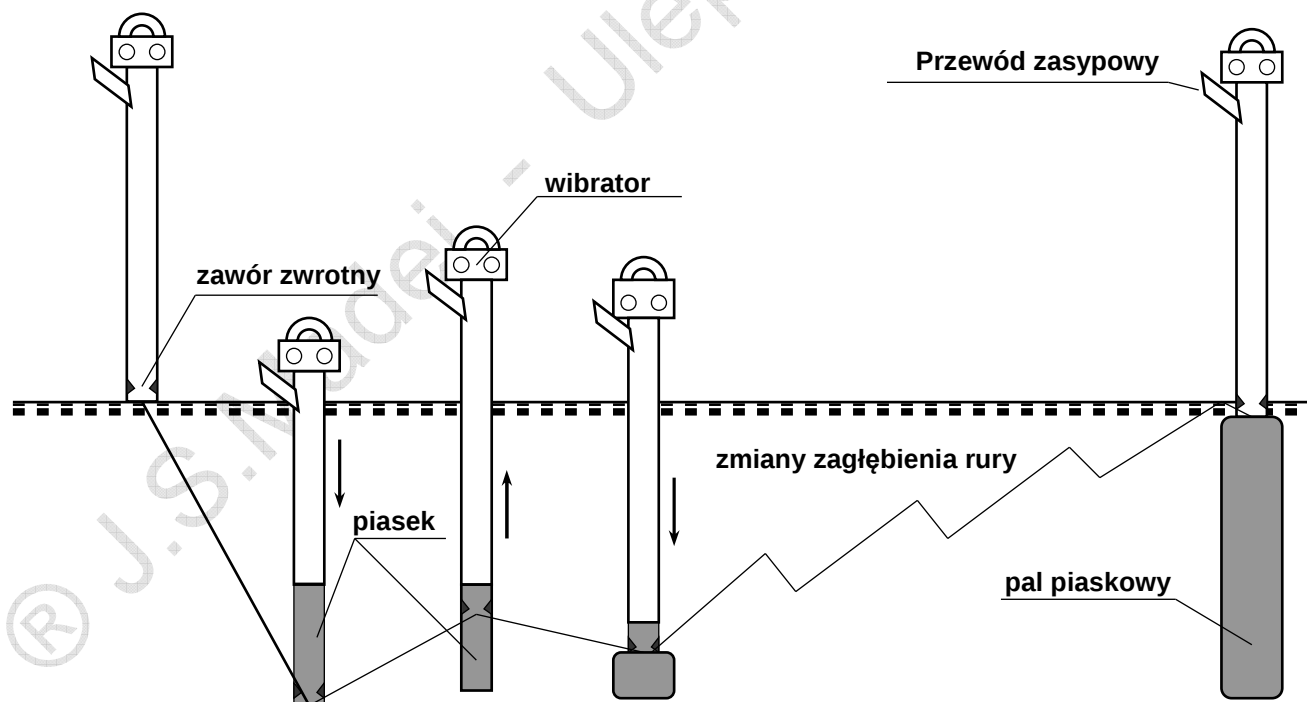
Wałowanie statyczne, wykonywane przy użyciu walców statycznych, charakteryzuje się niewielką głębokością oddziaływania, nieprzekraczającą $0,40$ m, a i to przy kilkukrotnym przejściu walca. W przypadku gruntów niespoistych stosuje się najczęściej walce z wałem gładkim, a w przypadku gruntów spoistych niemal wyłącznie walce z wałem okołkowym lub ogumionym.

Wałowanie dynamiczne, wykonywane przy użyciu walców wibracyjnych, zapewnia uzyskanie większej głębokości oddziaływania, dochodzącej do $2,0$ m. W powiązaniu z użyciem walców z wałem okołkowym lub ożebrowanym, zakres stosowania tej metody jest znacznie szerszy w porównaniu z wałowaniem statycznym.

2.3.2. Zagęszczające pale piaskowe

Zagęszczające pale piaskowe (SCP – *Sand compaction piles*) wykonywane są za pomocą wibracji, dynamicznego wbijania lub statycznego wciskania. Wykonywane mogą być zarówno na lądzie jak i poniżej zwierciadła wody, dzięki czemu znajdują szerokie zastosowanie w budownictwie hydrotechnicznym. W przypadku gruntów niespoistych, zwłaszcza nawodnionych, celem stosowania tych pali jest zagęszczenie gruntu i wprowadzenie dodatkowych elementów o grubszym uziarnieniu. Natomiast w przypadku gruntów spoistych, pale piaskowe wywołują wstępne zagęszczenie gruntu podczas ich wykonywania, a następnie pełnią rolę drenów pionowych, przyspieszających proces konsolidacji podłoża.

Oryginalna metoda wykonywania zagęszczających pali piaskowych, opracowana w Japonii, polega na zastosowaniu wibratora i sprężonego powietrza (rys. 2.10). Rura osłonowa, o średnicy $0,45 \div 0,50$ m, wyposażona jest w dolnej części w zawór zwrotny, umożliwiając przemieszczanie się piasku w dół podczas podciągania rury i uniemożliwiający przemieszczanie się piasku w górę, podczas zagłębiania rury. Na szczycie rury zamocowany jest wibrator wywołujący drgania pionowe oraz przewód służący do zasypywania piasku. Przebieg wykonywania pali pokazano na rysunku. W pierwszej fazie rura jest zagłębiania w podłożu za pomocą wibratora. Po osiągnięciu założonej głębokości do rury wsypywana jest określona porcja piasku, a następnie rura jest podciągana do góry przy jednoczesnym zadawaniu ciśnienia powietrza w rurze, co powoduje wyciskanie piasku z rury do podłoża. Kolejną czynnością jest ponowne zagłębianie rury, wywołujące zagęszczanie piasku i zwiększanie średnicy pala do wartości około 0,70 m. Takie postępowanie powtarza się cyklicznie, aż do wykonania pala na całej głębokości.



Rys. 2.10. Kolejne fazy wykonywania zagęszczającego pala piaskowego

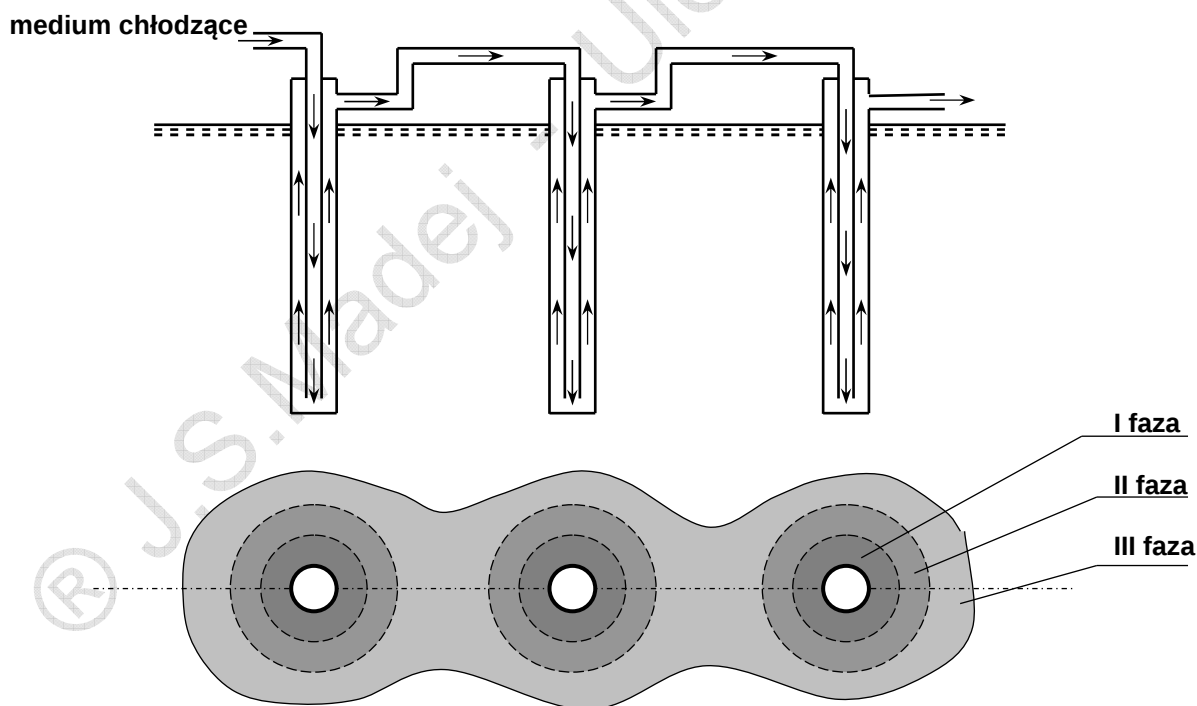
Zagęszczające pale piaskowe wykonywane są przede wszystkim z piasku. Rozwój tej metody spowodował, że do wykonywania takich pali stosuje się grunty o różnym uziarnieniu, od średnicy $d_{50} = 0,25$ mm do średnicy $d_{50} = 25,0$ mm. Pale piaskowe wykonuje się w siatce prostokątnej lub trójkątnej, zazwyczaj w rozstawie $1,5 \div 3,0$ m. Istotnym parametrem jest wskaźnik powierzchni pala piaskowego a_s (ang: *sand pile area ratio*), określony stosunkiem

powierzchni pala A_s do powierzchni podłoża przypadającej na jeden pal A . Rozstaw pali, a jednocześnie związana z nim wartość współczynnika a_s , zależą od budowy i właściwości podłoża oraz od zakładanych efektów wzmacniania gruntu. Z praktyki wynika, że wartości tego współczynnika mieszczą się najczęściej w przedziale $0,05 \div 0,12$. Jednakże w skrajnych przypadkach, zwłaszcza gdy stosowane są pale piaskowe o średnicy dochodzącej do 2,0 m, uzyskuje się wartości $a_s = 0,6$. W takiej sytuacji należało by już mówić o wzmacnianiu gruntu metodą zmiany składu.

2.3.3. Stabilizacja termiczna

Stabilizacja termiczna (*ang: thermal stabilization*) obejmuje trzy metody wzmacniania podłoża, którymi są: zamrażanie, ogrzewanie (nazywane w polskiej literaturze spiekaniem) i witrifikacja, czyli zeszklenie.

Sztuczne zamrażanie podłoża (*ang: artificial ground freezing*) ma już 150-letnią historię. Podstawa tej technologii jest schłodzenie wody występującej w gruncie poniżej temperatury zamarzania, czyli poniżej 0°C . Zamrożona woda w porach gruntu staje się czynnikiem wiążącym zarówno drobne cząstki i ziarna gruntu, jak i kamienie czy głazy. Efektem tego jest wyraźne ulepszenie mechanicznych właściwości gruntu, czyli zwiększenie sztywności i wytrzymałości, a dodatkowo wyeliminowanie jego wodoprzepuszczalności. Jest rzeczą oczywistą, że technologia ta może być stosowana w gruntach całkowicie nasyconych wodą. W przypadku gruntów niespoistych, w których decydujące znaczenie ma woda w porach, efekty uzyskuje się już po schłodzeniu gruntu o kilka stopni Celsjusza poniżej zera. Natomiast w gruntach spoistych, w których dużą rolę odgrywa woda związana, konieczne jest schłodzenie gruntu o kilkanaście stopni Celsjusza poniżej zera.



Rys. 2.11. Zasada zamrażania gruntu

Proces zamrażania polega na odebraniu z gruntu energii cieplnej poprzez jego schłodzenie. Podstawowym elementem urządzenia są dwie koncentryczne rury, wykonane ze stali nierdzewnej lub miedzi. Rura zewnętrzna o średnicy $10 \div 15$ cm, zamknięta od dołu, jest wyposażona w specjalną głowicę, w której koncentrycznie zamocowana jest rura

wewnętrzna, sięgająca niemal do dna rury zewnętrznej. Medium chłodzące, wtłaczane pod ciśnieniem do rury wewnętrznej, przepływa od dołu do góry w rurze zewnętrznej, odbierając ciepło z gruntu. Rury zazwyczaj łączy się szeregowo, co zapewnia lepsze wykorzystanie energii. W pierwszej kolejności woda zamarza w najbliższym otoczeniu rury, a potem strefa zamrożonego gruntu rozszerza się, co doprowadza do uzyskania wytrzymałej i wodoszczelnej przegrody (rys. 2.11).

Obecnie istnieją dwie technologie zamrażania gruntu, różniące się stosowaniem medium chłodzącego. Jest to tak zwana metoda pośrednia (zamknięta) i metoda bezpośrednia (otwarta). W metodzie pośredniej medium chłodzącym jest solanka, czyli roztwór wodny chlorku wapnia CaCl_2 lub chlorku sodu NaCl . Solanka, schładzana do temperatury w przedziale od -20°C do -40°C , wtłaczana jest do pierwszej rury w rzędzie, a po przejściu kilku kolejnych rur powraca do chłodnicy w celu ponownego schłodzenia. Tak więc obieg cieczy chłodzącej jest zamknięty (stąd nazwa metody), ale do funkcjonowania systemu niezbędna jest przemysłowa chłodziarka. W metodzie bezpośredniej medium chłodzącym jest ciekły azot o temperaturze -196°C . Azot wtłaczany jest do rur, a podczas przepływu paruje, pobierając ciepło z otoczenia. Po przejściu określonej liczby rur azot, o temperaturze od -40°C do -100°C , uwalniany jest do atmosfery. Metodę bezpośrednią, która jest bardziej kosztowna ale zapewnia szybkie zamrażanie gruntu, stosuje się w przypadkach awaryjnych lub do zabezpieczenia robót krótkotrwałych. W przypadku robót wymagających zamrożenia gruntu na dłuższy czas, pierwszy etap zamrażania wykonuje się metodą bezpośrednią, a po szybkim zamrożeniu gruntu do podtrzymywania temperatury stosuje się metodę pośrednią.

Zamrażanie gruntu stosuje się głównie przy wykonywaniu pionowych szybów, a także tuneli i innych robót podziemnych, zwłaszcza na terenach zurbanizowanych. Technologia ta umożliwia bowiem wykonywanie takich robót bez konieczności przekładania torów tramwajowych, kabli a także rur wodociągowych czy kanalizacyjnych.

Sztuczne ogrzewanie podłoża (*ang: artificial ground heating*), nazywane w polskiej literaturze technicznej **spiekaniem**, polega na podgrzaniu gruntu do temperatury w przedziale $600 \div 1000^\circ\text{C}$. Wynikiem tego jest całkowite odparowanie wody z gruntu, a w przypadku zapadowych gruntów lessowych, o dużej zawartości węglanu wapnia CaCO_3 , kilkukrotny wzrost wytrzymałości i trwałe zabezpieczenie przed wpływem zmiennych warunków wodnych w podłożu. Natomiast ogrzewanie gruntów spoistych, o dużej zawartości frakcji ilowej, powoduje dodatkowo wzrost ich wodoprzepuszczalności. Ogrzewanie gruntów wykonywane jest albo za pomocą wtłaczania rozgrzanego powietrza, albo za pomocą spalania w podłożu paliwa płynnego. W obu przypadkach niezbędne jest wykonanie otworów w podłożu, a promień zasięgu obszaru wzmacnianego gruntu nie przekracza wartości 1,0 m. Z tych względów metoda ta w praktyce stosowana jest bardzo rzadko.

Witryfikacja albo **zeszklenie** (*ang: vitrification*) jest najnowszą metodą termicznej stabilizacji podłoża, stosowaną niemal wyłącznie w ochronie środowiska. Grunt, podgrzewany jest do temperatury w zakresie $1600 \div 2000^\circ\text{C}$, przy wykorzystaniu energii elektrycznej. W podłożu umieszczane są grafitowe elektrody, służące do wywołania przepływu prądu przez grunt. W wyniku tego, energia elektryczna zamieniana jest w energię cieplną, co powoduje topienie się gruntu, począwszy od strefy przypowierzchniowej aż do głębokości wynikającej z zasięgu pionowych elektrod. Po ostygnięciu, powstałe w procesie topienia ziaren i cząstek gruntu tlenki krzemu i glinu tworzą szkło i produkty krystaliczne, które charakteryzują się wysoką wytrzymałością i idealną szczelnością.. Dlatego też witryfikacja stosowana jest do neutralizacji różnego rodzaju zanieczyszczeń podłoża, albo do uszczelniania podłoża pod składowiskami odpadów niebezpiecznych dla środowiska.

3. Wzmacnianie gruntu metodą zmiany składu

Zmiana składu gruntu polega na dodaniu do gruntu stabilizatora, który wprowadzony do gruntu lub wymieszany z gruntem, da w wyniku nowy materiał o pożądanych właściwościach mechanicznych. Obecnie istnieje wiele stabilizatorów, począwszy od gruntu gruboziarnistego (dodawanego jako stabilizator do gruntów drobnoziarnistych) i popiołów lotnych, poprzez cement, wapno, bentonit, żywice, bitumy, skończywszy na chemicznych związkach, zwłaszcza krzemianach. Należy tu zauważyć, że stabilizator może składać się z kilku wymienionych uprzednio materiałów, przy czym istotnym składnikiem jest również woda. Jednakże pomimo tej różnorodności, podstawowym składnikiem większości stabilizatorów jest cement. Wybór stabilizatora zależy przede wszystkim od rodzaju i stanu gruntu, który ma być wzmacniany, jak również od sposobu dodania stabilizatora do gruntu. Może to być mechaniczne mieszanie na powierzchni podłoża (stabilizacja powierzchniowa) lub na małej głębokości (stabilizacja masowa), mechaniczne lub hydrauliczne mieszanie na dużej głębokości (wglębne mieszanie gruntu), wprowadzanie stabilizatora w grunt pod ciśnieniem (zastrzyki ciśnieniowe), jak również wykorzystanie elektrycznej przewodności wody gruntowej (stabilizacja elektrokinetyczna). Oprócz metody zmiany składu poprzez dodanie stabilizatora, istnieje jeszcze metoda totalnej zmiany składu, czyli wymiana gruntu słabego i zastąpienie go gruntem mocnym.

W przeciwieństwie do metod zmiany stanu, nie ma tu wyraźnego podziału na metody stosowane tylko w odniesieniu do gruntów spoistych lub niespoistych. Wzmacnianie stosuje się najczęściej w przypadku występowania w podłożu gruntów spoistych o konsystencji plastycznej lub gruntów organicznych, a znacznie rzadziej w przypadku występowania gruntów niespoistych w stanie luźnym. Oczywiście wybór metody wzmacniania, a zwłaszcza stabilizatora będzie zależał od rodzaju gruntu, ale metody te są w pewnym sensie uniwersalne.

3.1. Wymiana gruntu

Wymiana gruntu (*ang: soil replacement*) wykonywana jest wtedy, gdy warstwa gruntu słabego znajduje się na małej głębokości poniżej powierzchni podłoża (w przypadku budownictwa komunikacyjnego), lub poniżej poziomu posadowienia (w przypadku fundamentów bezpośrednich). W tym pierwszym przypadku słaby grunt, którym najczęściej jest torf, można usunąć mechanicznie, a jeżeli w podłożu występuje jednocześnie woda gruntowa, warstwę gruntu słabego wyciska się poprzez przeciążenia nasypem, niekiedy przy użyciu małych ładunków materiału wybuchowego.

3.2. Stabilizacja powierzchniowa

Stabilizacja powierzchniowa (*ang: surface stabilization*) jest jedną z najstarszych metod ulepszania podłoża nawierzchni drogowych. Polega ona na mieszanii stabilizatora z gruntem górnej warstwy podłoża i odpowiednim zagęszczeniu tej warstwy. W zależności od rodzaju gruntu i końcowego efektu stabilizacji, stabilizatorem mogą być: grunt gruboziarnisty, wapno, cement, popioły lotne lub określone preparaty bitumowe. Ze względu na sposób mieszania wyróżniamy trzy metody przeprowadzania robót stabilizacyjnych, przedstawione poniżej.

Mieszanie na miejscu, które odbywa się w koronie drogi, przy zastosowaniu frezarek drogowych lub maszyn rolniczych. Zaletą tej metody jest łatwość wykonania i niski koszt,

natomiast wadą jest niejednorodny rozkład wilgotności stabilizowanego gruntu, nierównomierne wymieszanie gruntu ze stabilizatorem i zmienna grubość stabilizowanej warstwy.

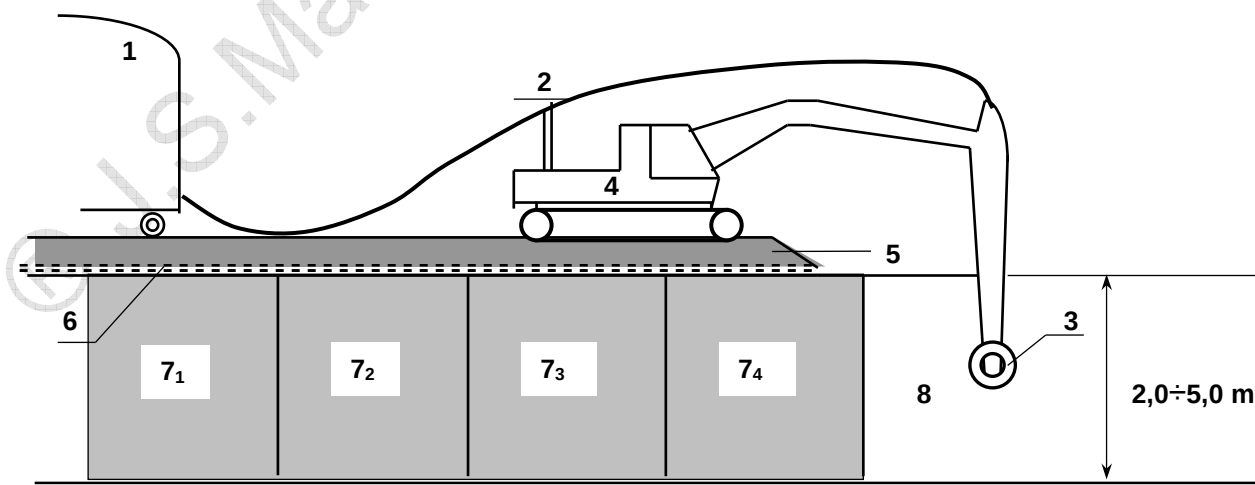
Mieszanie w mieszarkach ruchomych, które przemieszczają się w miarę postępu prac. Górna warstwa podłoża musi być zdjęta i dostarczona do mieszarki, gdzie jest mieszana ze stabilizatorem, a następnie grunt rozkładany jest w korycie drogi i odpowiednio zagęszczany. Taka technologia zapewnia równomierne wymieszanie wszystkich składników (grunt, woda, stabilizator) i wysoką wydajność, z czym wiążą się jednakże stosunkowo wysokie koszty.

Mieszanie w mieszarkach stacjonarnych, lokalizowanych na trasie wykonywanej drogi, wymaga wprawdzie dowożenia gruntu z korony drogi lub z kopalni, ale gwarantuje dokładne mieszanie składników oraz kontrolę dna koryta i grubości stabilizowanej warstwy podłoża. Podobnie jak w przypadku mieszarek ruchomych, wadą są wysokie koszty, przy niezbyt wysokiej wydajności robót.

W odniesieniu do ogólnej metody stabilizacji powierzchniowej istotnym problemem jest miąższość warstwy stabilizowanego gruntu. W przypadku mieszania na miejscu, miąższość ta wynosi około 30 cm, co nie zawsze gwarantuje odpowiednie wzmocnienie podłoża. Wprawdzie mieszanie w mieszarkach ruchomych czy stacjonarnych umożliwia znaczne zwiększenie miąższości warstwy stabilizowanej, jednakże może to się okazać rozwiązaniem ekonomicznie nieuzasadnionym.

3.3. Stabilizacja masowa

Stabilizacja masowa (*ang: mass stabilization*), w odniesieniu do której stosuje się także określenie płytkie mieszanie gruntu SSM (*ang: shallow soil mixing*), jest jedną z nowszych metod wzmocniania powierzchniowych warstw podłoża, utworzonych przede wszystkim z gruntów organicznych. Wzmocnienie uzyskuje się poprzez mechaniczne mieszanie gruntu z odpowiednią ilością stabilizatora, podawanego najczęściej w postaci suchego proszku, którego ilość mieści się w przedziale $100 \div 250$ kg na jeden metr sześcienny gruntu. Podstawowymi stabilizatorami są cement i wapno, ale stosowane są również lotne popioły, rozdrobniony żużel i gips. Stabilizatorem może być jeden z tych materiałów, jak również ich mieszanka, składająca się z dwóch do trzech składników.



Rys. 3.1. Schemat stabilizacji masowej

1 – zbiornik i dozownik stabilizatora, 2 – przewód ciśnieniowy, 3 – miesządko, 4 – koparka z wysięgnikiem
5 – nasyp dociągający, 6 – geosyntetyk, 7 – kolejne bloki zestabilizowanego gruntu, 8 – grunt rodzimy

Podstawowym urządzeniem stosowanym w tej metodzie jest koparka wyposażona w mieszadło, zainstalowane na dolnym końcu sztywnej żerdzi (rys. 3.1). Stabilizator podawany jest pod ciśnieniem do mieszadła, które porusza się pionowo i poziomo w określonym bloku stabilizowanego gruntu. Wymiary takiego bloku zależą od rodzaju i stanu gruntu, a jego powierzchnia wynosi zazwyczaj $10 \div 25 \text{ m}^2$. Minimalna miąższość warstwy stabilizowanego gruntu wynosi 2,0 m, zaś maksymalna, ograniczona długością żerdzi na której zamocowane jest mieszadło, wynosi najczęściej 5,0 m, a niekiedy dochodzi do 7,0 m.

Ze względu na stosowaną technologię, stabilizacja masowa jest najbardziej ekonomicznym rozwiązaniem posadawiania obiektów o dużej powierzchni. Należą do nich nasypy drogowe i kolejowe, a także składowiska ciężkich materiałów.

3.4. Stabilizacja elektrokinetyczna

Stabilizacja elektrokinetyczna (*ang: electrokinetic stabilization*), jest to metoda wzmacniania podłoża, w której stabilizator wprowadzany jest do gruntu za pomocą prądu stałego. Ruch czynników stabilizujących w masywie gruntowym jest związany z zasadami elektrokinetyki, podczas gdy mechanizm stabilizacji może być wyjaśniony zasadami stabilizacji chemicznej. Jeżeli czynnikiem stabilizującym są kationy, to jony te przemieszczają się w gruncie w wyniku procesów elektromigracji i elektroosmozy. Te właśnie jony ulepszają mechaniczne właściwości gruntu w wyniku wymiany jonowej, mineralizacji i usuwania wody z porów gruntu. Dlatego też stabilizacja elektrokinetyczna daje lepsze efekty w porównaniu do elektroosmozy, gdzie zasadniczym elementem wzmocnienia gruntu jest jego konsolidacja.

Praktyczne stosowanie tej metody polega na umieszczeniu w podłożu dwóch rodzajów elektrod, którymi są: anody, w postaci perforowanych rur, przez które podawany jest stabilizator oraz katody, w postaci pręta stalowego lub aluminiowego (rys. 3.2). Przyłożenie do gruntu pola elektrycznego prądu stałego powoduje że, zgodnie z zasadami elektrokinetyki, jednym ze skutków będzie przemieszczanie się kationów w kierunku katody, jednakże w tym przypadku zasadniczą rolę odgrywać będzie ruch kationów stabilizatora w wodzie porowej. Stosowanym stabilizatorem jest najczęściej szkło wodne sodowe Na_2SiO_3 oraz chlorek wapniowy CaCl_2 . W zależności od rodzaju gruntu i chemizmu wody gruntowej, stabilizatory te stosuje się indywidualnie lub łącznie. W tym drugim przypadku wprowadza się w podłoże najpierw szkło wodne, a potem chlorek wapniowy, który jest wtedy reagentem, przyspieszającym chemiczne procesy stabilizacji materiału znajdującego się w porach gruntu.



Rys. 3.2. Schemat stabilizacji elektrokinetycznej

Ten sposób wzmacniania podłoża stosuje się zazwyczaj w gruntach spoistych o niskiej wodoprzepuszczalności, w których stosowanie zastrzyków ciśnieniowych jest zabiegiem nieefektywnym. Zakres stosowania stabilizacji elektrokinetycznej w ostatnich latach rozszerzył się również na inne grunty, głównie w wyniku wprowadzenia geosyntetyków elektrokinetycznych (*ang: electrokinetic geosynthetics*). Geosyntetyki te, oprócz swojej

podstawowej roli w postaci drenażu i zbrojenia, działają również jako elektrody, umożliwiając dodatkowo wywołanie w gruncie korzystnych zmian fizycznych (konsolidacja gruntu), jak i chemicznych (stabilizacja materiału w wodzie porowej).

Stabilizacja elektrokinetyczna stosowana jest często w celu uszczelnienia i wzmocnienia podłoża istniejących obiektów, posadowionych na fundamentach bezpośrednich, lub w celu zapobieżenia procesowi upłynniania gruntów drobnoziarnistych. Wykorzystywana jest także do stabilizacji zboczy osuwiskowych, zwłaszcza w przypadku osuwisk o charakterze spływu.

3.5. Zastrzyki ciśnieniowe

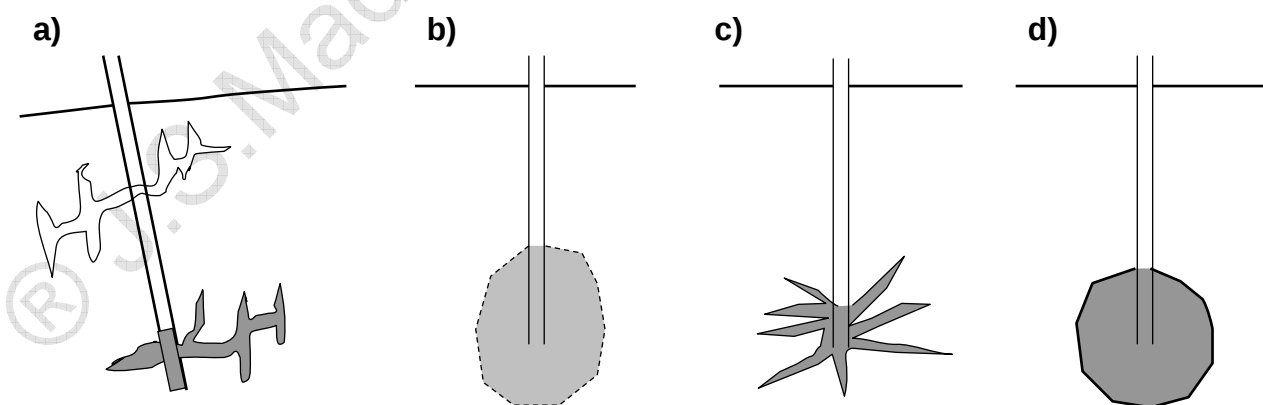
Zastrzyki ciśnieniowe (*ang: grouting*) są jedną z najstarszych metod ulepszania podłoża, a jednocześnie jedną z nielicznych metod których głównym obszarem stosowania nie było budownictwo komunikacyjne, w szerokim tego słowa znaczeniu. W pierwszej kolejności zastrzyki ciśnieniowe stosowane były do uszczelniania i wzmacniania podłoża skalnego, a dopiero później zostały wykorzystane do wzmocniania podłoża gruntowego. W obu przypadkach stabilizator, o odpowiednio dobranym składzie i konsystencji, włączany jest pod ciśnieniem w podłoże, wypełniając w miarę możliwości pory gruntowe i nieciągłości skalne. Po wprowadzeniu w podłoże, stabilizator, w wyniku procesów fizycznych i chemicznych, twardnieje, wpływając na zmianę mechanicznych właściwości ośrodka.

Najczęściej stosowanym stabilizatorem jest cement, o uziarnieniu normalnym lub ultra drobnym, wraz z dodatkami, którymi są:

- bentonit, opóźniający proces sedymentacji i polepszający właściwości filtracyjne stabilizatora,
- popioły i piaski, stanowiące wypełnienie,
- woda,
- dodatki chemiczne, najczęściej w postaci krzemianów (szkło wodne).

Ze względu na różne rozmiary porów gruntowych i nieciągłości skalnych, a także różny sposób oddziaływania stabilizatora na wzmacniany ośrodek, stabilizator może mieć postać zaprawy, zaczynu (pasty), zawiesiny, roztworu lub emulsji.

Obecnie wyróżnia się cztery zasadnicze rodzaje zastrzyków, a mianowicie: zastrzyki wypełniające, penetracyjne, rozpierające i zagęszczające, pokazane na rysunku 3.3.



Rys. 3.3. Rodzaje zastrzyków ciśnieniowych

a – wypełniające, b – penetracyjne, c – rozpierające, d - zagęszczające

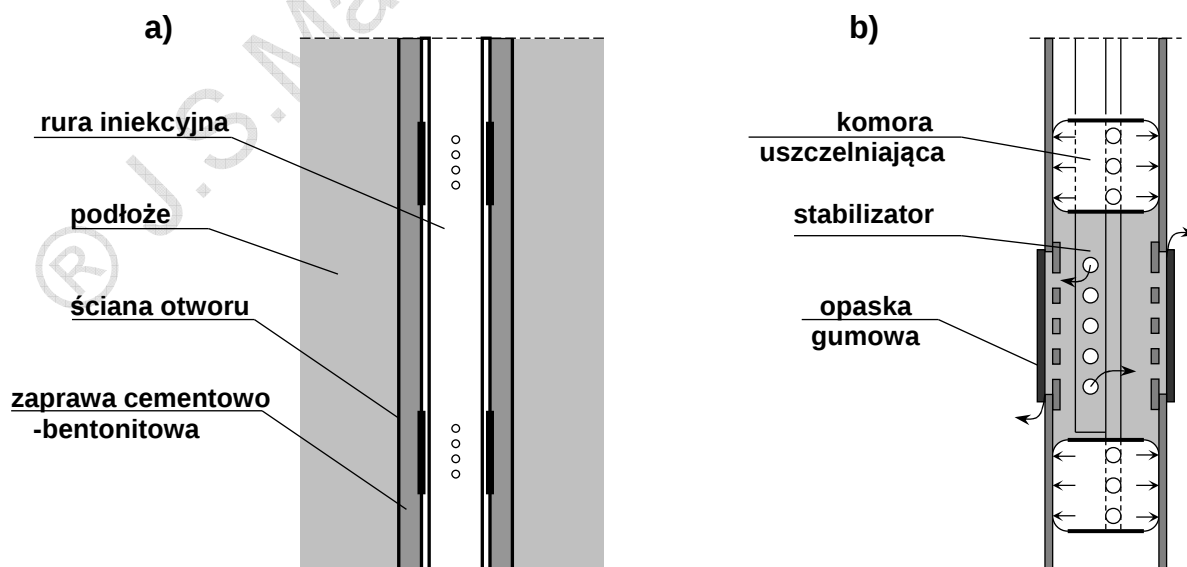
Zastrzyki wypełniające (*ang: intrusion grouting*), stosowane najczęściej w ośrodku skalnym (rys. 3.3.a), polegają na wprowadzeniu do podłoża iniektu o znacznej gęstości, wypełniającego szczeliny, o dużej rozwartości lub pustki. Iniekt podawany jest pod ciśnieniem hydrostatycznym lub pod niewielkim nadciśnieniem.

Zastrzyki penetracyjne (*ang: permeation grouting*), polegają na wypełnieniu porów gruntowych (rys. 3.3.b) lub nieciągłości skalnych o małej rozwarłości, bez naruszenia struktury ośrodka. Oznacza to, że w gruntach woda porowa zastępowana jest stabilizatorem, natomiast w skałach stabilizator, całkowicie lub częściowo, wypełnia istniejące nieciągłości. W obu przypadkach stosuje się niskie ciśnienie wtlaczania, zazwyczaj nie przekraczające nacisku od ciężaru własnego ośrodka. Z tych względów stosowanie tej metody ograniczone jest do gruntów gruboziarnistych (niespoistych), zaś w odniesieniu do skał decyduje wielkość rozwarcia nieciągłości.

Zastrzyki rozpierające (*ang: hydro-fracture grouting*), polegają na celowym podzieleniu podłoża, na większe lub mniejsze bryły gruntu lub skały, za pomocą stabilizatora wtlaczanego pod wysokim ciśnieniem, dochodzącym do wartości 3,0 MPa. Celem tego zabiegu jest zagęszczenie podłoża lub wypełnienie pustek niedostępnych przy użyciu innej technologii, wynikiem czego jest zmniejszenie wodoprzepuszczalności podłoża, a niekiedy kontrolowane wyparcie istniejącej konstrukcji. Jeżeli ciśnienie wtlaczania jest wystarczająco wysokie, w gruncie powstają szczeliny wypełnione stabilizatorem (rys. 3.3.c), natomiast w skałach powiększają się istniejące szczeliny (rys. 3.3.a), a także mogą powstawać nowe. Jedynym ograniczeniem stosowania tej metody w gruntach jest wysoka zawartość frakcji ilowej.

Zastrzyki zagęszczające (*ang: compaction grouting*), polegają na wtlaczaniu w podłoże gruntowe stabilizatora o konsystencji gęstoplastycznej lub plastycznej. W tym przypadku stabilizator nie wnika w pory przylegającego gruntu, lecz rozprzestrzenia się w podłożu, tworząc mniej lub bardziej regularne kuliste bryły (rys. 3.3.d). Wynikiem tego jest przemieszczanie się gruntu i jego zagęszczanie (w gruntach niespoistych) lub konsolidacja (w gruntach spoistych). Również w tej metodzie ograniczeniem stosowania jest wysoka zawartość frakcji ilowej w gruncie.

Przy wykonywaniu zastrzyków zagęszczających wykorzystuje się stosunkowo prostą technologię. Rura iniekcyjna wprowadzana jest do podłoża, za pomocą techniki wiertniczej lub wibracyjnej, na określoną głębokość, a następnie, poprzez wylot u spodu rury, wtlaczana jest do gruntu zaprawa iniekcyjna. Podczas stopniowego podciągania lub zagłębiania rury iniekcyjnej powstaje pionowa kolumna, utworzona z przylegających do siebie brył. Wykonywanie zastrzyków penetracyjnych i rozpierających jest prowadzone przy zastosowaniu specjalnych rur. Rura iniekcyjna, na której znajdują się odcinki z nawierconymi otworkami, zabezpieczonymi gumową opaską, umieszczana jest w wykonanym uprzednio



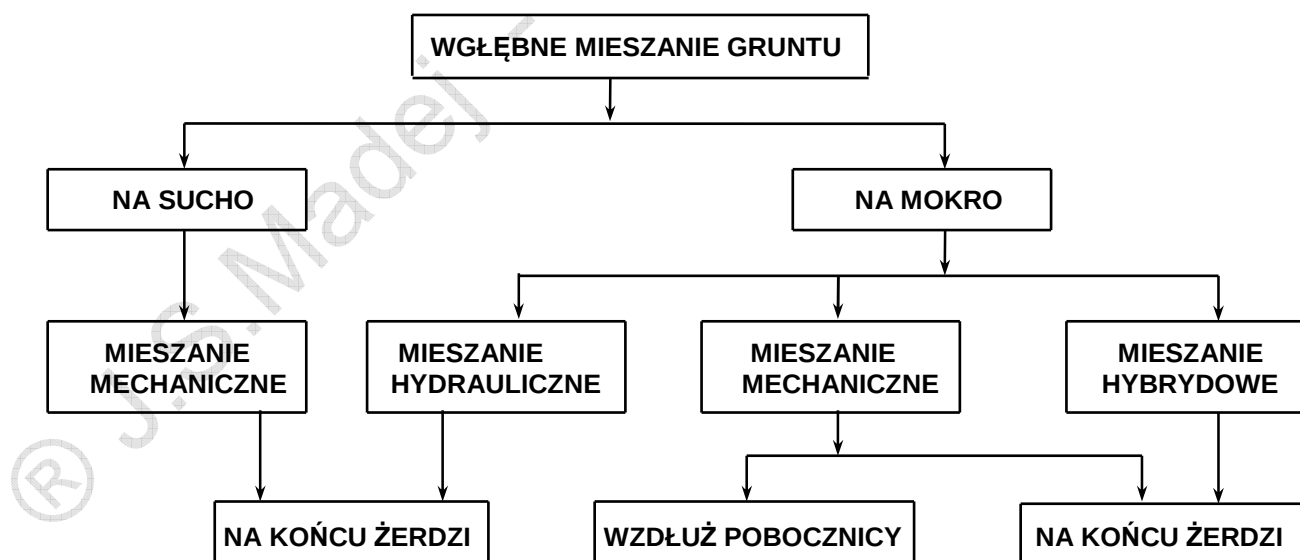
Rys. 3.4. Technologia wykonywania zastrzyków penetracyjnych i rozpierających
a – umieszczanie rury iniekcyjnej w podłożu, b – wykonywanie iniekcji

otworze, a przestrzeń pomiędzy rurą i ścianą otworu uszczelniana jest za pomocą zaprawy cementowo-bentonitowej (rys. 3.4.a). Następnie do rury wprowadzany jest zestaw iniekcyjny, składający się z rurki ciśnieniowej i dwóch komór uszczelniających, stabilizowanych powyżej i poniżej perforowanego odcinka rury (rysunek 3.4.b). Stabilizator wtłaczany jest w podłoże tylko na tym odcinku rury, a przemieszczanie zestawu iniekcyjnego w górę lub w dół zapewnia równomierne wzmocnienie podłoża na całej głębokości. Rura iniekcyjna może pozostawać w podłożu przez dłuższy czas, umożliwiając nawet kilkukrotne wykonywanie iniekcji, co ma miejsce szczególnie w przypadku zastrzyków rozpierających.

3.6. Wgłębne mieszanie gruntu

Wgłębne mieszanie gruntu, określane skrótem DSM (*ang: deep soil mixing*), jest obecnie rozpowszechnioną metodą wzmocniania gruntów. Początki jej stosowania sięgają lat sześćdziesiątych, a rozwój rozpoczął się w latach siedemdziesiątych XX wieku, w wyniku badań i wdrożeń prowadzonych głównie w Japonii, Szwecji i Finlandii. Znalazło to odbicie w nazwie jednej z metod, która obecnie nazywana jest metoda nordycką.

Wzmocnianie podłoża tą metodą polega na wymieszaniu gruntu *in situ* z materiałami wiążącymi, które wchodzą w reakcje chemiczne z gruntem, a zwłaszcza z wodą gruntową. Jako materiał wiążący stosowane są najczęściej cement i wapno, a także, jako dodatki, gips, żużel i popioły. Stabilizator, który ma być wymieszany z gruntem, może być podawany na sucho, w postaci sproszkowanej lub na mokro, w postaci zaczynu o odpowiedniej konsystencji. Z kolei mieszanie stabilizatora z gruntem może być realizowane w sposób mechaniczny, za pomocą ruchu obrotowego mieszadła, albo w sposób hydrauliczny, za pomocą strumienia wody pod ciśnieniem. Stosowany jest również sposób hybrydowy, czyli połączenie mieszania mechanicznego z hydraulicznym. Wreszcie ostatnim elementem jest strefa mieszania gruntu ze stabilizatorem, która może znajdować się w rejonie dolnego końca żerdzi lub wzdłuż jej pobocznic. Wymienione tu elementy są podstawą klasyfikacji metod DSM, której ogólny schemat przedstawiono na rysunku 3.5.



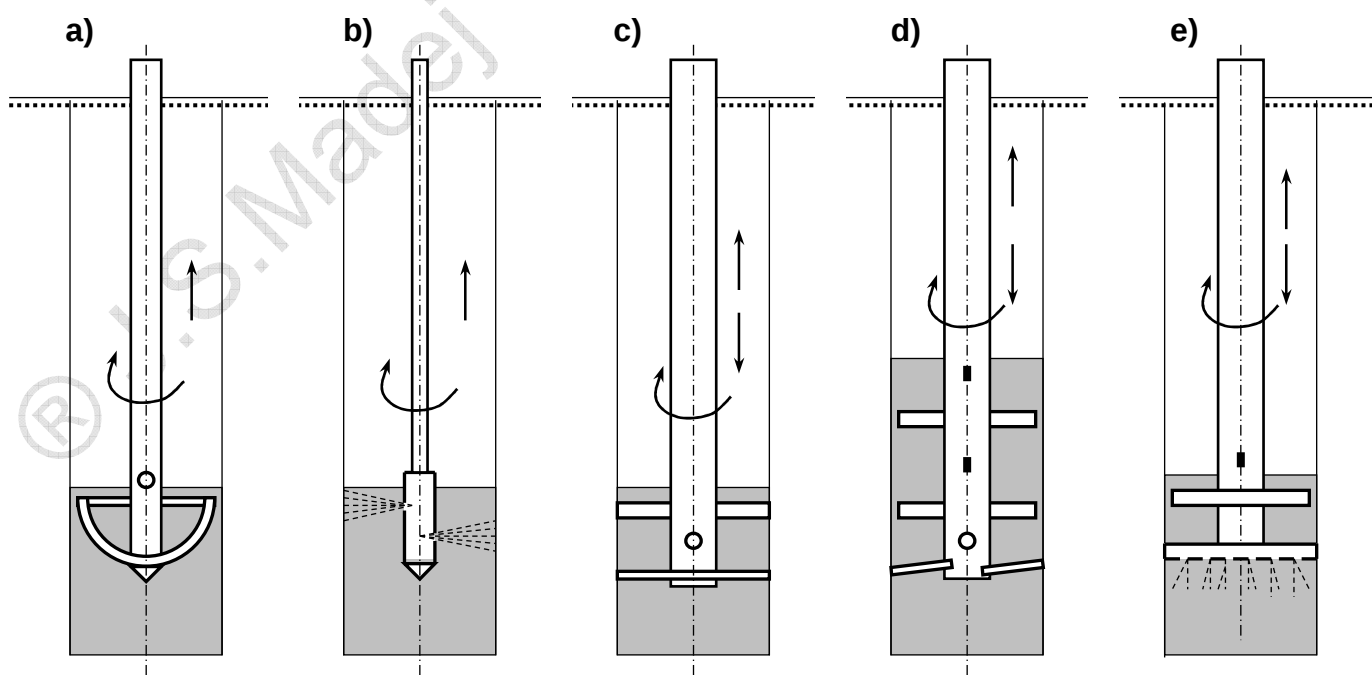
Rys. 3.5. Schemat ogólnej klasyfikacji metod DSM

Kolumny wapienno-cementowe (*ang: lime cement columns*), są klasyczną metodą mieszania gruntu na sucho, a jednocześnie jedną z najstarszych metod. W podłoże wprowadza się ruchem obrotowym mieszadło na sztywnej żerdzi do określonej głębokości. Podczas podciągania mieszadła do góry, również ruchem obrotowym, pod ciśnieniem podaje się sproszkowane spoiwo, które jest mieszane z gruntem (rys. 3.6.a). W metodzie

nordyckiej (*ang: Nordic method*) stosuje się maszyny o prostym, pojedynczym mieszadle, tworzące kolumny o średnicy $0,6 \div 0,8$ m, sięgające głębokości do 25,0 m. Natomiast w metodzie japońskiej DJM (*ang: dry jet mixing*) maszyna wiertnicza ma jedno lub dwa złożone mieszadła, które umożliwiają wykonanie kolumn o średnicy $1,0 \div 1,3$ m i maksymalnej głębokości odpowiednio 16,0 lub 33,0 m. Metodę tę stosuje się w przypadku słabych gruntów spoistych i organicznych, o minimalnej wilgotności 60 %. Do wzmacniania gruntów spoistych używa się wapna niegaszonego lub cementu z wapnem, natomiast w gruntach organicznych mieszanek z dodatkiem żużli wielkopieczowych. Należy pamiętać, że chociaż w publikacjach używane jest określenie *kolumny wapienno-cementowe*, to w rzeczywistości są to *kolumny gruntowo-wapienno-cementowe*, gdyż podstawowym składnikiem materiału tworzącego kolumny jest grunt.

Iniekcja strumieniowa (*ang: jet grouting*) jest pierwszą metodą mieszania na mokro, w której zastosowano mieszanie hydrauliczne, realizowane za pomocą strumienia zaczynu cementowego (metoda pojedyncza), zaczynu i powietrza (metoda podwójna), albo zaczynu, powietrza i wody (metoda potrójna), pod ciśnieniem dochodzącym do 40,0 MPa (rys. 3.6.b). Technologia tej metody polega na zagłębieniu w podłożu żerdzi iniekccyjnej, wyposażonej na dolnym końcu w odpowiednie dysze. Żerdź zagłębianą jest metodą wiertniczą, a w przypadku mocniejszych gruntów, lub wykonywania kolumn o większej średnicy, również przy użyciu strumienia wody pod ciśnieniem. Po osiągnięciu założonej głębokości rozpoczyna się podciąganie żerdzi do góry z jednoczesnym podawaniem zaczynu pod wysokim ciśnieniem. Ponieważ żerdź iniekcyjna podczas podciągania jest obracana, grunt zmieszany ze stabilizatorem tworzy mniej lub bardziej regularną kolumnę, której średnica zależy od rodzaju gruntu, ciśnienia iniekcji oraz prędkości podciągania i obracania żerdzi iniekccyjnej. Średnica kolumn mieści się w szerokim przedziale od 0,6 m do $2,0 \div 3,0$ m. Metoda ta może być stosowana we wszystkich rodzajach gruntów wymagających wzmocnienia.

Mieszanie mechaniczne na mokro (*ang: wet-rotary mixing*), może być realizowane za pomocą mieszadła znajdującego się u dołu żerdzi (rys. 3.6.c), albo na krótszym lub dłuższym odcinku poboczniczy tej żerdzi (rys. 3.6.d).



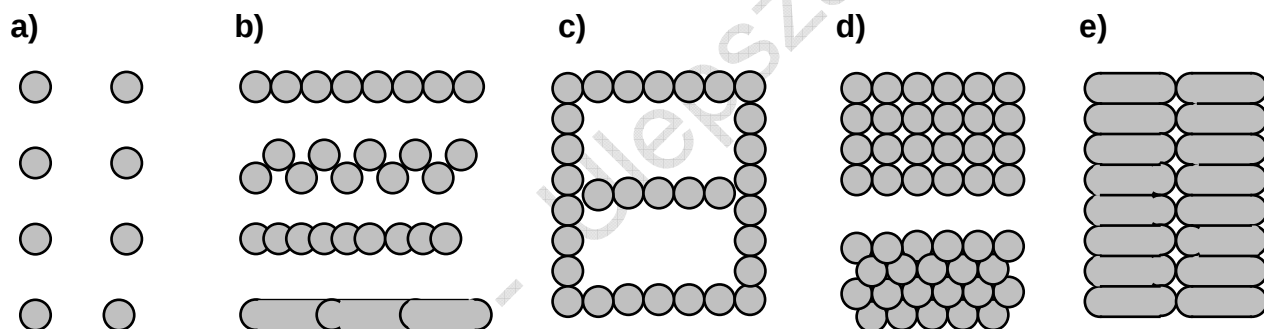
Rys. 3.6. Technologie wgłębnego mieszania gruntu

a – sucha, mieszanie mechaniczne, b – mokra, mieszanie hydrauliczne, c – mokra, mieszanie mechaniczne, d – mokra, mieszanie mechaniczne wzdłuż poboczniczy, e – mokra, mieszanie hybrydowe

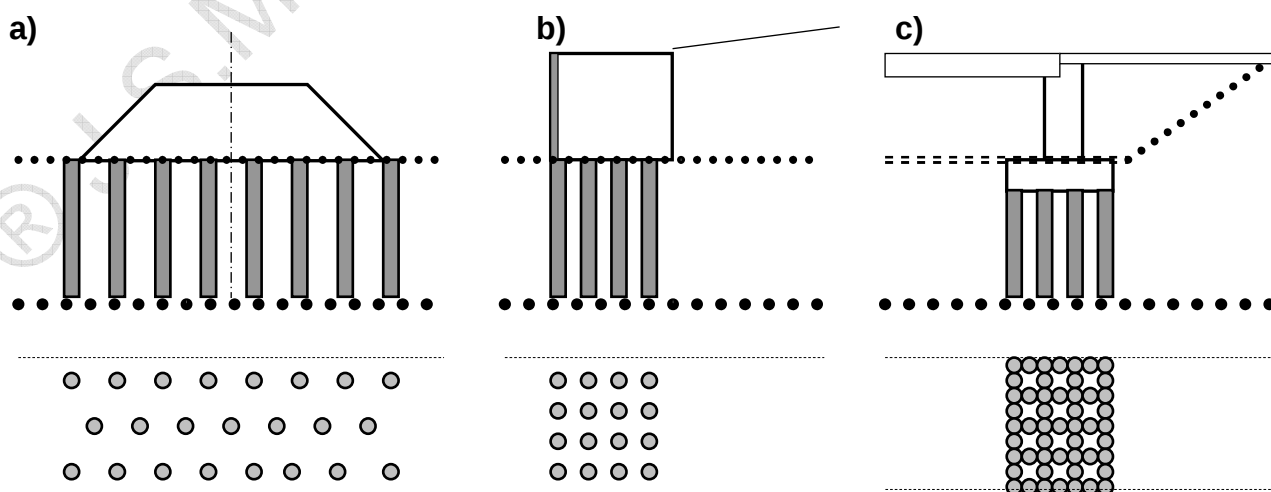
Mieszanie hybrydowe na mokro (*ang: wet-rotary-jet mixing*) wykonywane jest za pomocą strumienia zaczynu cementowego, poprzez dysze znajdujące się w mieszadlu u dołu żerdzi i dodatkowo za pomocą mieszadła, znajdującego się nieco powyżej (rys. 3.6.e).

W przypadku mechanicznego i hybrydowego mieszania na mokro, średnica kolumny zależy od wymiaru mieszadła, który mieści się najczęściej w przedziale $0,5 \div 1,5$ m, przy głębokości od 20,0 m do 35,0 m. W każdym przypadku stosowania przedstawionych technologii, bryła wzmocnionego gruntu ma kształt mniej lub bardziej regularnej kolumny walcowej. Ze względu na to, że metody DSM używane są również do uszczelniania podłoża lub obudowy wykopów, stosowane są urządzenia wyposażone w kilka, od dwóch do pięciu, mieszadeł które umożliwiają wykonanie segmentu ściany o długości $2,0 \div 3,0$ m. Technologia taka określana jest skrótem SMW (*ang: soil mixed wall*).

Wzmacnianie gruntu metodą DSM ma bardzo szerokie zastosowanie praktyczne, zwłaszcza w budownictwie komunikacyjnym i hydrotechnicznym. W tym miejscu należy zwrócić uwagę na fakt, że w przypadkach występowania dużych obciążeń na małej powierzchni kolumny będą ściśle przylegać do siebie, a zatem zgodnie z rozdziałem 1 będzie to klasyczne wzmacnianie podłoża. Natomiast w większości przypadków kolumny rozmieszczane są albo pojedynczo (w trójkątnej lub kwadratowej siatce), albo liniowo (w postaci ściany), albo też w postaci konstrukcji szkieletowych (patrz rys. 3.7). W wyniku tego będziemy mieli do czynienia ze zbrojeniem podłoża, gdyż część obciążenia będzie również przenoszona przez grunt rodzimy, w którym wykonano kolumny.



Rys. 3.7. Wybrane przykłady rozmieszczenia kolumn w podłożu
a – siatka, b – ściana, c – szkielet, d, e – blok



Rys. 3.8. Wybrane przykłady posadowienia za pomocą metody DSM
a – nasyp, b – konstrukcja oporowa, c – przyczółek wiaduktu

Zastosowanie metody DSM w budownictwie komunikacyjnym obejmuje przede wszystkim posadowienie nasypów, przyczółków mostów i wiaduktów oraz konstrukcji oporowych, a także niekiedy pasów startowych na lotniskach. W budownictwie hydrotechnicznym wzmacnianie i zbrojenie podłoża tą metodą stosowane jest do posadowienia falochronów, nabrzeży portowych, zbiorników, a także uszczelniania podłoża i korpusu budowli piętrzących wodę. Dobre wyniki daje również wykorzystanie tej metody do stabilizacji zboczy osuwiskowych. Wybrane przykłady zastosowań pokazano na rysunku 3.8.

® J.S.Madej - Ulepszanie podłoża

4. Zbrojenie gruntu w podłożu (*in situ*)

Zbrojenie gruntu (*ang: soil reinforcement*) jest obecnie szeroko rozpowszechnioną metodą ulepszania podłoża, obejmującą wszystkie dziedziny budownictwa. Przyczyniły się do tego z jednej strony nowe materiały i technologie, a z drugiej strony udoskonalone metody wymiarowania. Zgodnie z definicją, ten sposób zbrojenia polega na wprowadzeniu do podłoża elementów zbrojenia, współpracujących z otaczającym je gruntem rodzimym, bez istotnych zmian właściwości tego gruntu.

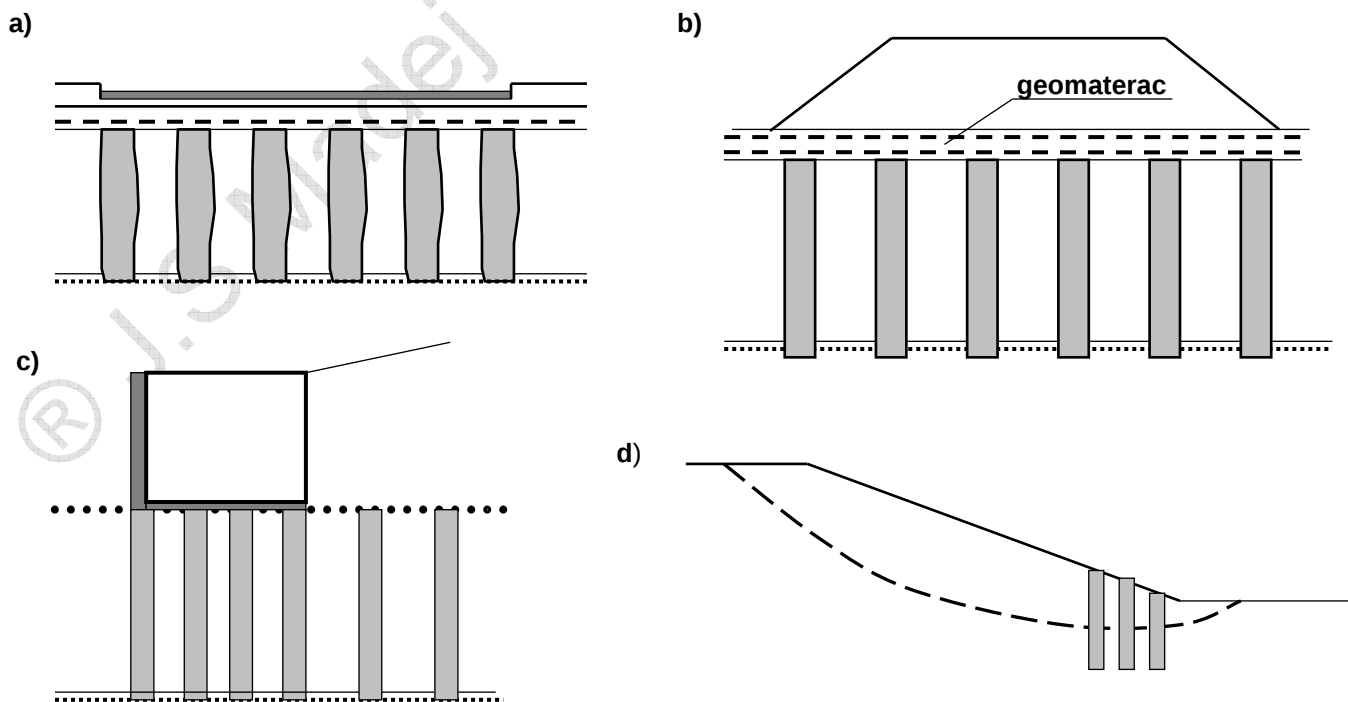
Jak to przedstawiono w rozdziale 1, można wyróżnić trzy rodzaje zbrojenia gruntu w podłożu, którymi są:

- kolumny,
- mikropale,
- gwoździe gruntowe.

Kolumny, w zależności od materiału z jakiego są wykonane, przenoszą najczęściej obciążenia ściskające, rzadziej ścinające, a jeszcze rzadziej zginające. Z kolei mikropale przenoszą zazwyczaj obciążenia ściskające i rozciągające, a niekiedy zginające. Wreszcie gwoździe gruntowe przenoszą głównie obciążenia rozciągające, a także ścinające i zginające.

4.1. Kolumny

Kolumny (*ang: columns*) są najstarszym sposobem zbrojenia gruntu, stosowanym głównie w budownictwie komunikacyjnym. Początkowo zasadniczym celem kolumn było zmniejszenie pionowych odkształceń podłoża, a tym samym zmniejszenie osiadania nawierzchni drogowej lub nasypu drogowego. Obecnie kolumny stosowane są również do zbrojenia podłoża innych konstrukcji inżynierskich, w tym hydrotechnicznych, a także do stabilizacji zboczy osuwiskowych. Ze względu na sposób przenoszenia obciążeń na podłoże, kolumny stosuje się zazwyczaj tylko wtedy, gdy warstwa gruntu słabego stanowi



Rys. 4.1. Wybrane przykłady zbrojenia podłoża kolumnami

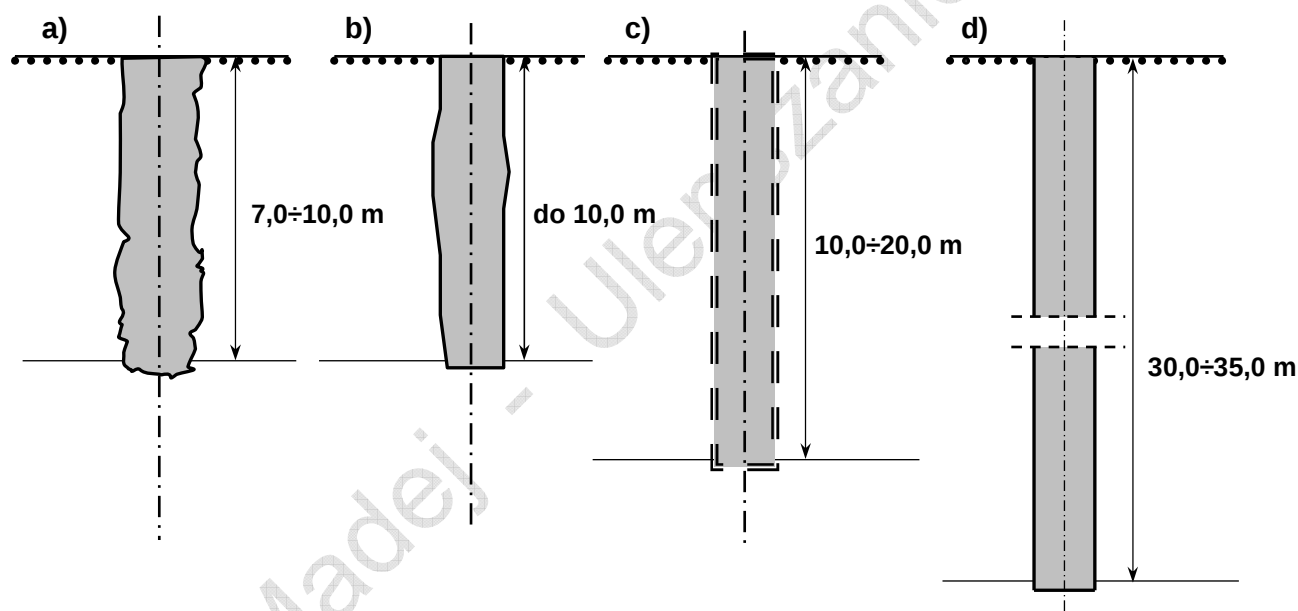
a – nawierzchnia drogowa, b – nasyp drogowy, c – konstrukcja oporowa, d – zbocze osuwiskowe

przypowierzchniową warstwę podłoża, a poniżej znajduje się warstwa gruntu mocnego, na której opierają się kolumny. Przykłady zastosowania kolumn do zbrojenia podłoża pokazano na rysunku 4.1. Ponieważ sztywność kolumn jest znacznie większa niż sztywność otaczającego je gruntu rodzimego to, w celu równomiernego przekazania obciążenia na zbrojone podłoże, stosuje się przynajmniej jedną (rys. 4.1.a), a zazwyczaj dwie (rys. 4.1.b) lub nawet trzy warstwy geosyntetyku, przedzielone warstwą kruszywa mineralnego. Konstrukcję taką nazywamy geomateracem (*ang: load transfer platform*).

Wymagana głębokość zasięgu kolumn zależy oczywiście od budowy podłoża, natomiast głębokość możliwa do osiągnięcia zależy od rodzaju materiału i technologii wykonania. Z tego względu, kolumny można podzielić na cztery grupy, a mianowicie:

1. Kolumny kamienne, sięgające maksymalnie do głębokości 10,0 m
2. Kolumny scementowane, o podobnym zasięgu głębokości jak kolumny kamienne.
3. Kolumny w osłonie geotekstylnej, osiągające maksymalną głębokość 20,0 m.
4. Kolumny wykonane metodą wgłębego mieszania gruntu, DSM, o długości do 30,0 m, a wyjątkowo nawet do 35,0 m.

Trzy pierwsze rodzaje kolumn formowane są w otworze wykonywanym w podłożu, a materiał używany do ich wykonania musi być odpowiednio zagęszczony. Kolumny czwartej grupy formowane są w podłożu z gruntu rodzimego, wymieszanego ze stabilizatorem.



Rys. 4.2. Długość kolumn w zależności od rodzaju materiału

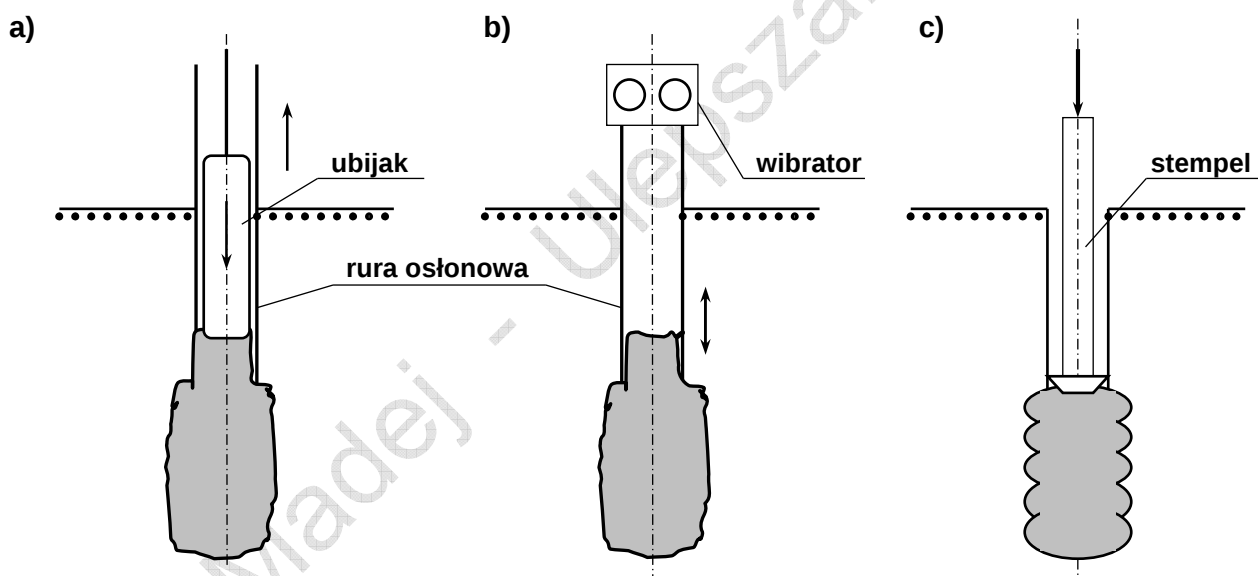
a – kamienne, b – scementowane, c – w osłonie geotekstylnej, d – wykonane metodą DSM

Wykonywanie kolumn w podłożu realizowane jest dwiema metodami, podobnie jak w przypadku pali fundamentowych. Kolumny mogą być wykonane w otworze, uprzednio wywierconym lub wypłukanym wodą, albo w otworze powstałym w wyniku zagłębienia w podłożu stalowej rury osłonowej, często z zamkniętym dnem. Ta pierwsza metoda nazywana jest metodą wymiany gruntu (*ang: replacement method*), a druga metodą przemieszczania gruntu (*ang: displacement method*). Natomiast zagłębianie rur osłonowych, jak również zagęszczanie materiału kolumny, wykonywane jest albo metodą udarową, albo metodą wibracyjną. Specyficzna technologia, stanowiąca połączenie metod wymiany i przemieszczania gruntu, polega na wbijaniu materiału kamiennego w słabe podłoże, za pomocą ubijaka o określonej masie i średnicy. Opis poszczególnych rodzajów kolumn jest treścią dalszej części rozdziału.

Kolumny kamienne

Kolumny kamienne (*ang: stone columns*) mogą być wykonywane w otworze zabezpieczonym stalową rurą osłonową, lub bez takiego zabezpieczenia. Wybór jednego z dwóch rozwiązań zależy od rodzaju i stanu gruntu w podłożu oraz od technologii wykonywania kolumny.

W pierwszym przypadku rura osłonowa, często z zamkniętym dnem, zagłębiania jest w podłożu metodą uderową lub wibracyjną. Po osiągnięciu projektowanej głębokości, do rury wsypywany jest materiał tworzący kolumnę (żwir, kamień naturalny lub łamany), który w miarę podciągania rury jest zagęszczany, w wyniku czego średnica kolumny jest w przybliżeniu dwukrotnie większa od średnicy rury osłonowej. Zagęszczanie materiału, tak jak zagłębianie rury, jest wykonywane metodą uderową przy użyciu ubijaka, analogicznie do wykonywania pali Franki (rys. 4.3.a), albo metodą wibracyjną przy użyciu wibratora zamocowanego na szczycie rury, podobnie do wykonywania zagęszczających pali piaskowych (rys. 4.3.b), opisanych w rozdziale 2.3.2. Taką samą technologię zagęszczania stosuje się w przypadku otworów zabezpieczonych rurą osłonową, wykonywanych za pomocą wiercenia. Specyficzną odmianą kolumn kamiennych są geosłupy (*ang: Geopiers*), których technologia wykonywania została opatentowana w USA, a które stosowane są w gruntach pozwalających na wykonanie otworu bez zabezpieczenia rurą. Kamień, wsypywany porcjami do otworu, zagęszczany jest metodą uderową za pośrednictwem stempla, tworząc charakterystyczny kształt kolumny.



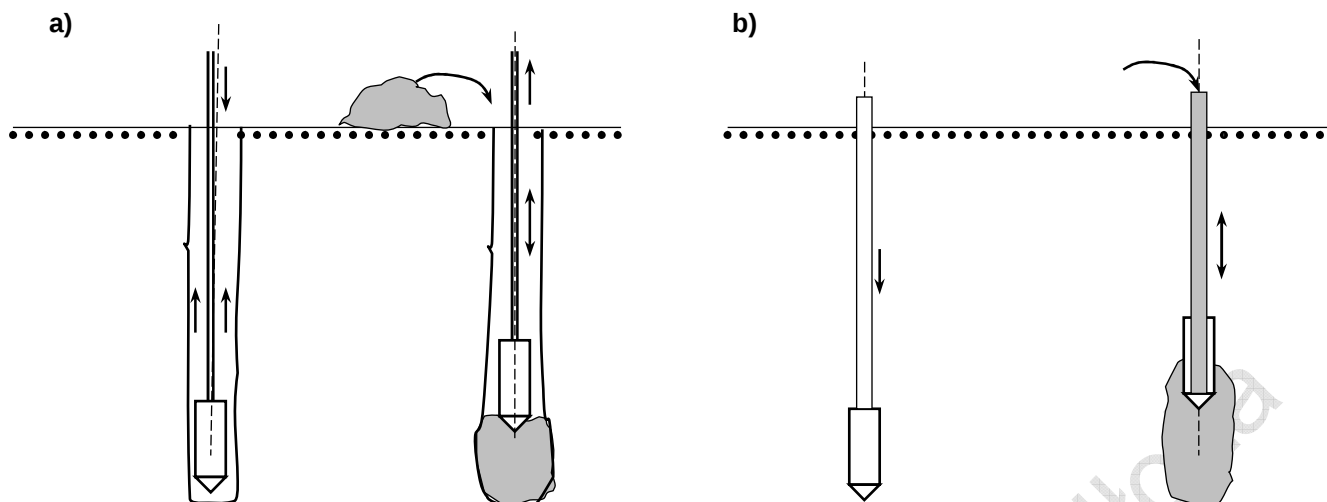
Rys. 4.3. Metody zagęszczania kolumn kamiennych

a – uderowa, b – wibracyjna, c – technologia Geopier®

Szybkie wykonywanie kolumn kamiennych umożliwia metoda wibracyjna, przy użyciu wibroflotatora, stosowanego do zagęszczania gruntów niespoistych (patrz rozdział 2.1.2.2). Istnieją dwa warianty tej technologii, a mianowicie:

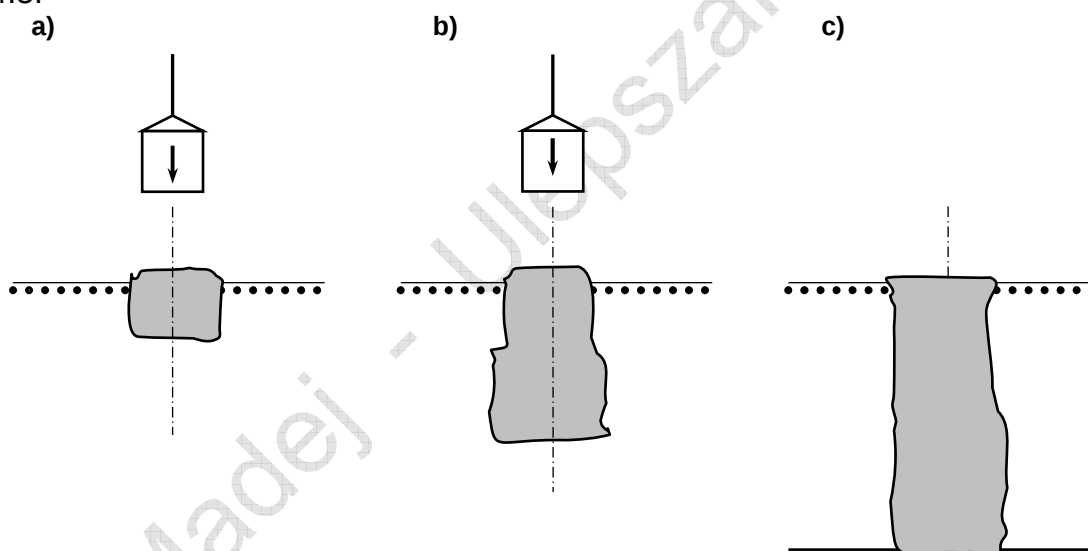
- metoda zasypywania materiału od góry (*ang: top feed method*),
- metoda podawania materiału od dołu (*ang: bottom feed method*).

Pierwsza metoda, nazywana metodą mokrą, polega na wykonaniu otworu w wyniku zagłębiania wibroflota (rys. 2.1.a) z jednoczesnym wypłukiwaniem gruntu, za pomocą strumienia wody, na powierzchnię podłoża. Do tak wykonanego otworu wsypywany jest materiał kamienny, zagęszczany warstwami metodą wibracyjną (rys. 4.4.a). Druga metoda, nazywana metodą suchą, polega na zagłębianiu wibroflota (rys. 2.1.b) z jednoczesnym przemieszczaniem gruntu, a po uzyskaniu planowanej głębokości materiał kamienny podawany jest poprzez żerdź i sondę na dno otworu, gdzie jest warstwami zagęszczany (rys. 4.4.b).



Rys. 4.4. Wykonywanie kolumn kamiennych przy użyciu wibroflota
a – metoda mokra, b – metoda sucha

Wbijane kolumny kamienne (*ang: driven stone columns*) wykonywane są przy użyciu ubijaka, o masie od 10 do 15 ton, a niekiedy do 30 ton, spadającego z wysokości od 10 do 25 m, a w skrajnych przypadkach do 30 m. Zasady wykonywania tych kolumn pokazano na rysunku 4.5.



Rys. 4.5. Fazy wykonywania kolumny wbijanej
a – faza pierwsza, b – sukcesywne zagłębianie kolumny, c – wykonana kolumna

W pierwszej fazie wykonywany jest płytki wykop, wypełniany odpowiednim kruszywem (rys. 4.4.a). W miarę ubijania w podłożu powstaje krater, który sukcesywnie wypełniany jest materiałem zasypowym (rys. 4.4.b), aż do osiągnięcia przez kolumnę warstwy gruntu mocnego (rys. 4.4.c). Wynikiem takiego postępowania są kolumny o średnicy $1,6 \div 3,0$ m i głębokości $4,0 \div 7,0$ m. Wykonywane są one zazwyczaj z materiału gruboziarnistego, o uziarnieniu 30/300 mm. Ponieważ kolumny te wykonywane są metoda przemieszczania gruntu, dodatkowym efektem w tym przypadku jest wzmocnienie gruntu rodzimego.

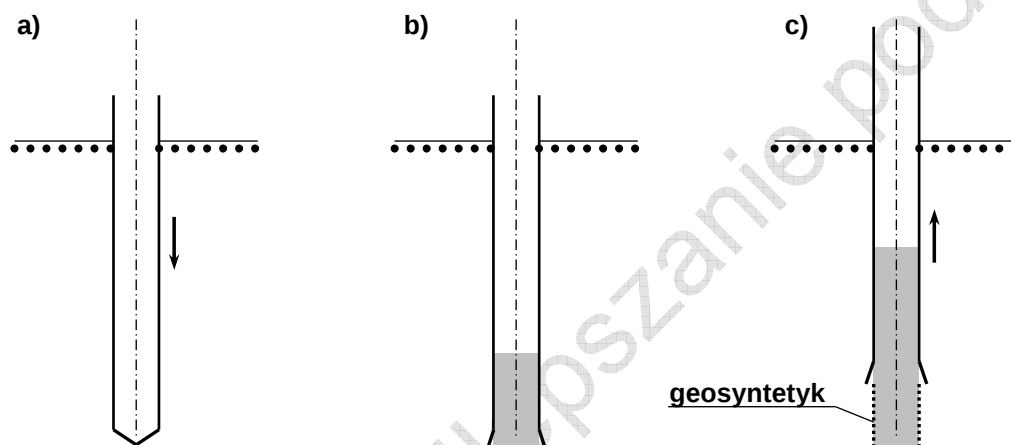
Kolumny scementowane

Kolumny scementowane (*ang: grouted stone columns, concrete columns*), stosowane są w słabych gruntach organicznych. Wykonywane są one przy użyciu wibroflota, metodą podawania materiału od dołu (rys. 4.4.b), przy czym najczęściej materiałem tym jest

mieszanina zaczynu cementowego ze żwirem, lub po prostu beton. Mają one większą sztywność niż kolumny kamienne, ale nie pełnią roli drenów.

Kolumny w osłonie geotekstylnej

Kolumny w osłonie geotekstylnej (*ang: geotextile encased columns*), stosowane są w bardzo słabych gruntach organicznych. Wykonywane są pod osłoną rury stalowej, zazwyczaj o średnicy 0,8 m, która zagłębiania jest w podłożu albo metodą wibracyjną (z przemieszczeniem gruntu rodzimego) albo, w przypadku gruntów mocniejszych, metodą wiercenia. W rurze umieszczona jest osłona geotekstylna, wypełniana piaskiem a niekiedy żwirem. W miarę uzupełniania materiału zasypowego rura osłonowa podciągana jest do góry przy użyciu wibratora, co zapewnia zagęszczenie tego materiału. W przypadku zagłębiania rury osłonowej metodą wibracyjną, dno rury jest zamykane i otwierane hydraulicznie, jak to pokazano na rysunku 4.6.



Rys. 4.6. Fazy wykonywania kolumny w osłonie geotekstylnej
a – zagłębianie rury, b – otwarcie dna i podawanie materiału, c – podciąganie rury

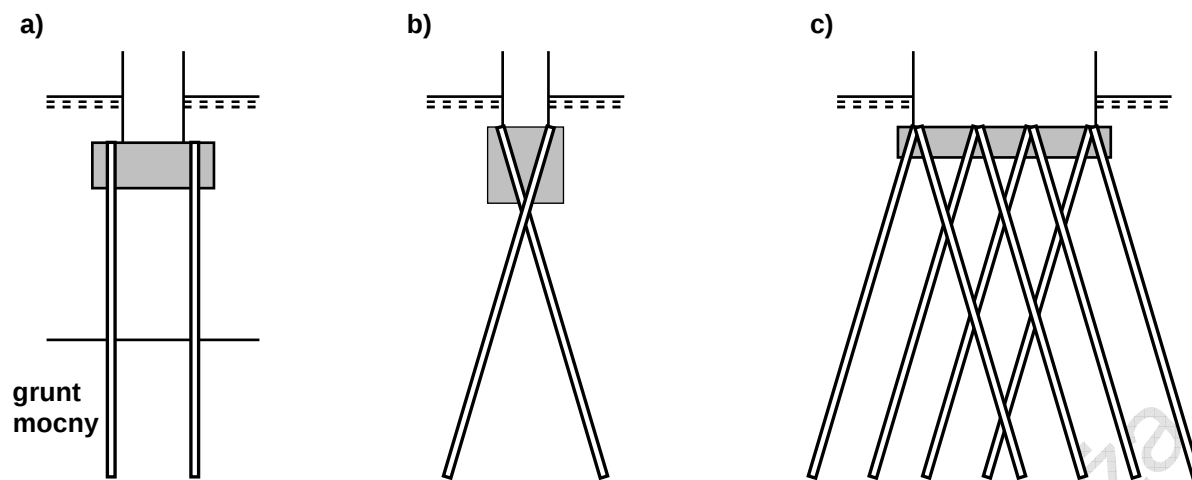
Kolumny wykonywane metodą DSM

Kolumny wykonywane metodą DSM opisano w rozdziale 3.6, jako jedną z metod wzmocniania podłoża za pomocą zmiany składu.

Mikropale

Mikropale (*ang: micropiles*), są to małowymiarowe pale, o średnicy $D \leq 300$ mm w przypadku pali wierconych lub o średnicy albo wymiarach przekroju poprzecznego nie większych niż 150 mm w przypadku pali prefabrykowanych. Długość mikropali zazwyczaj nie przekracza 20,0 m, chociaż jako górna granica podawana jest długość 30,0 m. Mikropale mogą przenosić zarówno obciążenie osiowe jak i poprzeczne, przy czym zasadniczą, a przeważnie jedyną składową nośności mikropala jest nośność poboczniczy.

Stosowanie mikropali zapoczątkowane zostało w latach pięćdziesiątych XX wieku, a ich przeznaczeniem było wzmacnianie fundamentów istniejących budynków, zwłaszcza zabytkowych. Zaletą takiej technologii była możliwość wykonywania pali w miejscach trudno dostępnych, przy minimalnym zagrożeniu bezpieczeństwa istniejących budowli. Skuteczne zwłaszcza było działanie mikropali nachylonych pod różnym kątem, które nazwano palami korzeniowymi (*ang: root piles*), a wreszcie pali rozmieszczonych w zagęszczonej siatce



Rys. 4.7. Przykłady stosowania mikropali

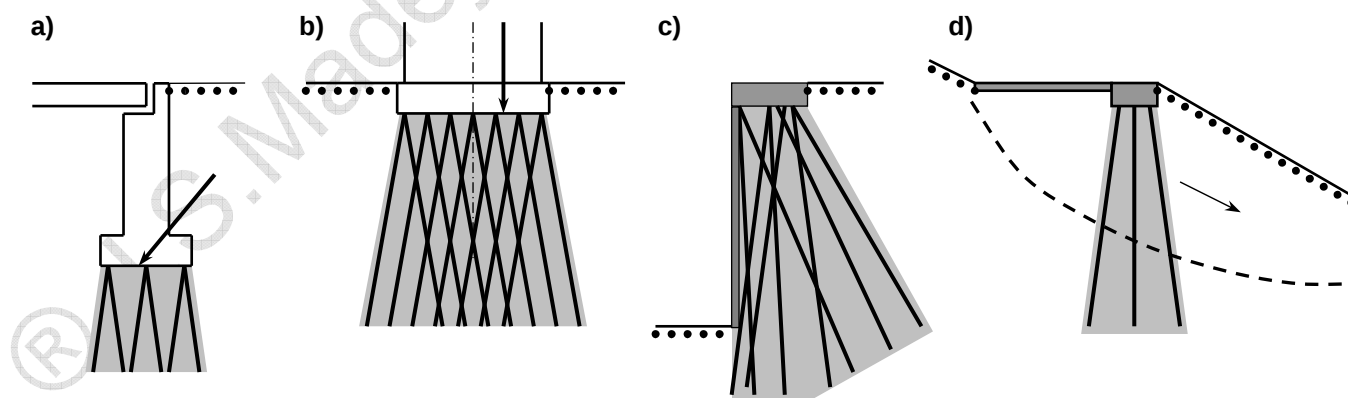
a – mikropale jako fundament palowy, b – pale korzeniowe, c – pale w zagęszczonej siatce

(ang: *reticulated piles*). W tym ostatnim przypadku, pale wraz ze znajdującym się między nimi gruntem tworzą ośrodek kompozytowy, który odpowiada definicji gruntu zbrojonego, podanej w rozdziale 1. W wyniku tego mikropale mają obecnie dwojakie zastosowanie: jako małowymiarowe pale fundamentowe, przenoszące samodzielnie obciążenie na mocniejsze warstwy podłoża (rys. 4.7.a), albo jako elementy zbrojenia gruntu, przenoszące tylko część obciążenia we współpracy z gruntem, w postaci pali korzeniowych (rys. 4.7.b) lub pali w zagęszczonej siatce (rys. 4.7.c).

Traktując mikropale jako elementy zbrojenia gruntu, można wyróżnić cztery przypadki ich stosowania, a mianowicie:

- zbrojenie podłoża fundamentu obciążonego siłą poziomą,
- zbrojenie podłoża fundamentu obciążonego mimośrodowo siłą pionową,
- trwałe konstrukcje oporowe,
- stabilizacja zboczy osuwiskowych,

jak to pokazano na rysunku 4.8, gdzie obszar zacieniowany obejmuje masyw gruntu zbrojonego.



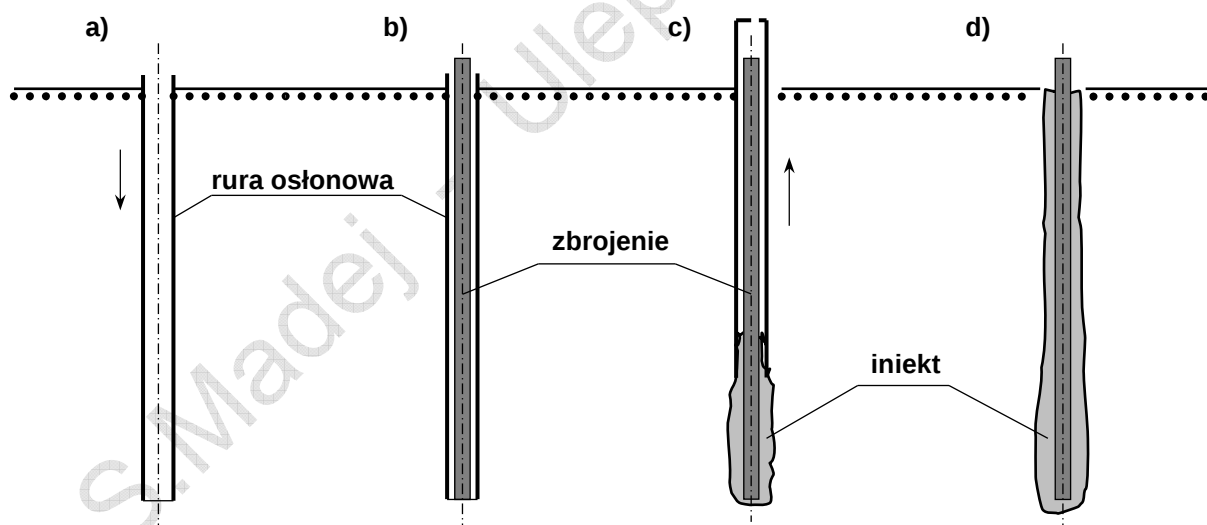
Rys. 4.8. Przykłady zbrojenia gruntu mikropalami

a – fundament obciążony poziomo, b – fundament obciążony mimośrodowo, c – konstrukcja oporowa, d – stabilizacja zbocza

W przypadku fundamentu bezpośredniego, obciążonego siłą poziomą (rys. 4.8.a), istotnym warunkiem, oprócz stateczności fundamentu na wypieranie, jest stateczność na przesunięcie wzdłuż powierzchni kontaktu fundamentu z podłożem. Efektem zastosowania pali korzeniowych, nawet o niewielkiej długości, jest dodatkowa siła oporu na przesunięcie.

Mimośrodowe obciążenie (rys. 4.8.b), wywołujące nierównomierny rozkład naprężeń pod fundamentem, może powodować nierównomierne osiadanie budowli, a nawet utratę stateczności na wypieranie. Pale korzeniowe, a zwłaszcza pale w zagęszczonej siatce, tworzą masyw gruntu zbrojonego, przenoszącego obciążenie podłoża na większą głębokość, zmniejszając jednocześnie mimośród obciążenia i osiadanie budowli. W trwałych konstrukcjach oporowych, wykonywanych przy zastosowaniu pali korzeniowych połączonych żelbetowym oczepem (rys. 4.8.c), stateczność zapewnia masyw gruntu zbrojonego, w którym znaczącą rolę odgrywają właściwości gruntu rodzimego. Podobna zasada działania pali korzeniowych wykorzystywana jest przy stabilizacji zboczy osuwiskowych (rys. 4.8.d), gdzie dodatkowa siła, zapewniająca stateczność zbocza na poślizg, wzbudzana jest przez żelbetowy oczep, przenoszący osiowe obciążenia na mikropale, jak i nośność mikropali na zginanie wzdłuż powierzchni poślizgu. Należy tu zwrócić uwagę na fakt, że tak w przypadku pali korzeniowych jak i pali w zagęszczonej siatce, odległość między rzędami mikropali jest z reguły mniejsza niż 1,0 m.

Do zbrojenia gruntu stosuje się zawsze mikropale wiercone, których konstrukcja i wykonawstwo są zbliżone do wierconych pali fundamentowych. W podłożu wykonywany jest otwór o projektowanej średnicy i głębokości, zabezpieczany najczęściej stalową rurą osłonową (rys. 4.9.a). Do wykonanego otworu wstawiane jest zbrojenie (rys. 4.9.b), a następnie rozpoczyna się proces iniekcji czyli wypełniania otworu, pod mniejszym lub większym ciśnieniem, odpowiednim materiałem twardniejącym, określanym ogólnie jako iniekt. W miarę wypełniania otworu iniektem rura osłonowa podciągana jest do góry (rys. 4.9.c), aż do zakończenia iniekcji na całej długości mikropala (rys. 4.9.d). Jest to oczywiście ogólny schemat wykonawstwa, gdyż istnieją metody wykonywania mikropali bez rury osłonowej, a w wielu przypadkach iniekcja powtarzana jest jedno- lub dwukrotnie, w celu lepszego powiązania iniektu z podłożem gruntowym.

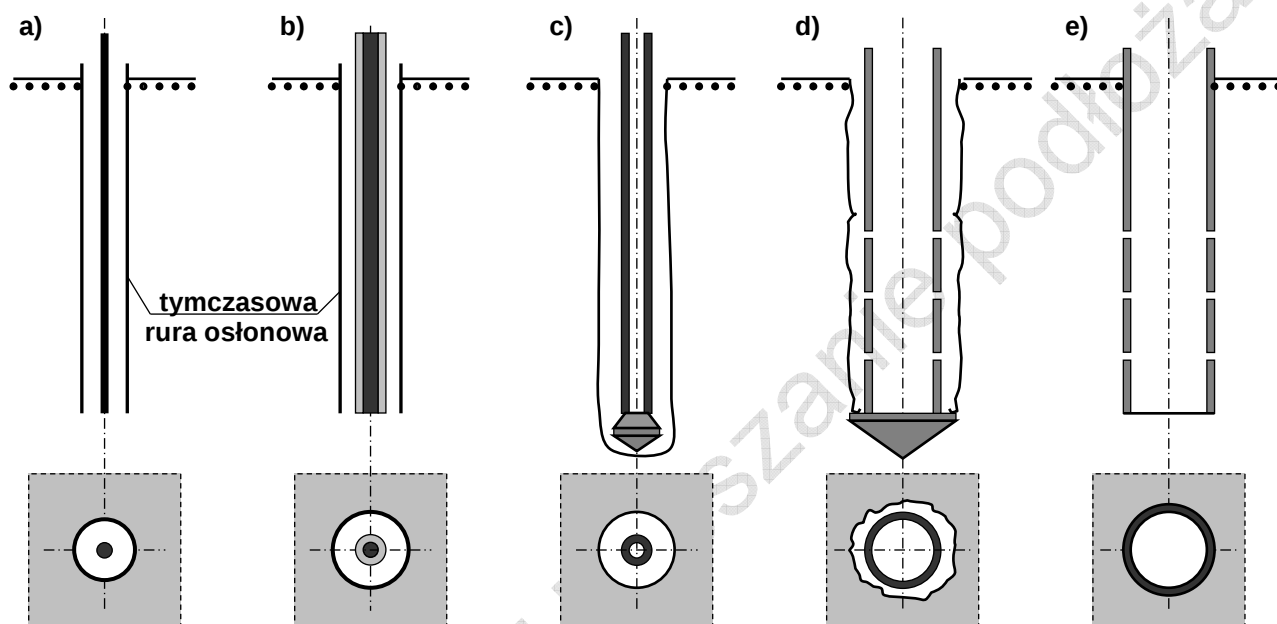


Rys. 4.9. Fazy wykonywania mikropala wierconego

a – wykonanie otworu, b – wstawienie zbrojenia, c – iniekcja z podciąganiem rury osłonowej, d – ewentualna iniekcja powtórna

Najprostszym zbrojeniem mikropala są pręty ze stali zbrojeniowej, o średnicy 25 ÷ 63 mm. W mikropalach wykorzystywanych do zbrojenia gruntu stosuje się zazwyczaj jeden pręt (rys. 4.10.a), natomiast przy wymaganej większej nośności pala zbrojenie stanowią dwa lub trzy pręty. Ze względu na ochronę przeciwkorozyjną oraz lepsze powiązanie iniektu ze zbrojeniem, często stosowane są stalowe żerdzie z nagwintowaną pobocznicą, na którą fabrycznie nałożona jest pojedyncza warstwa ochronna z żywicy epoksydowych (rys. 4.10.b), lub podwójna warstwa ochronna, w której zewnętrzna osłona z PCV połączona jest ze zbrojeniem za pomocą odpowiedniego zaczynu cementowego. Takie zbrojenie występuje

w palach GEWI firmy Dywidag. Coraz częściej stosowane jest zbrojenie w postaci stalowych rur grubościennych, o zewnętrznej średnicy $30 \div 250$ mm i grubości ścianki $7 \div 10$ mm. Szczególnym rozwiązaniem jest tu technologia mikropali TITAN firmy Ischebeck. Rury o zewnętrznej średnicy $30 \div 130$ mm służą jednocześnie jako żerdzie wiernicze, do głębinienia otworu przy użyciu płuczki i bez rury osłonowej, a także do wprowadzania iniektu od dołu żerdzi (rys. 4.10.c). Natomiast rury o zewnętrznej średnicy $100 \div 175$ mm mogą być umieszczane w wywierconym uprzednio otworze lub, po wyposażeniu ich w traconą końcówkę, mogą służyć do wykonywania otworu bez rury osłonowej (rys. 4.10.d). Przykładem takiego rozwiązania są mikropale MESI firmy Keller. Zbrojeniem o największej średnicy zewnętrznej, dochodzącej do 250 mm, są rury osłonowe, zabezpieczające ściany otworu (rys. 4.10.e).



Rys. 4.10. Rodzaje zbrojenia mikropali

a – pręt zbrojeniowy, b – gwintowana żerdź z warstwą ochronną (system GEWI), c – rura jako żerdź wiernicza i zbrojenie (system TITAN), d – rura umieszczana w otworze wykonanym bez zabezpieczenia (system MESI), e – zbrojenie w postaci rury osłonowej

Zbrojenie w postaci prętów, żerdzi lub rur o średnicy do 100 mm, wyposażone jest w elementy centrujące, zapewniające osiowe położenie zbrojenia w otworze, a głównie odpowiednią grubość warstwy iniektu pomiędzy poboczną zbrojenia a ścianą otworu. Rury o średnicy powyżej 100 mm, wykorzystywane jednocześnie do iniekcji, mają odpowiednio rozmieszczone otwory lub specjalne dysze, umożliwiające wypełnienie otworu iniektem. Każdy rodzaj zbrojenia składa się z odcinków o określonej długości, które łączone są na budowie. Pręty zbrojeniowe mogą być spawane, natomiast pozostałe rodzaje zbrojenia łączone są albo na gwint (rury o średnicy powyżej 100 mm), albo specjalnymi łącznikami.

Istotnym elementem technologicznym mikropala, stanowiącym ostatni etap jego wykonywania, jest wypełnienie otworu odpowiednim materiałem wiążącym, czyli iniektem (*ang.* grout). Ponieważ najczęściej iniekt wprowadzany jest pod ciśnieniem, cały proces nosi nazwę iniekcji (*ang.* grouting). Znaczenie tej operacji wynika z faktu, że w ogólnym przypadku iniekt spełnia cztery zadania, a mianowicie:

- przenosi obciążenie ze zbrojenia na otaczający grunt,
- stanowi część przekroju pala pracującego na ścisnienie lub zginanie,
- służy do zabezpieczenia stalowego zbrojenia przed korozją,
- wpływa na wzmacnianie podłoża w bliskim sąsiedztwie pala, wypełniając pory gruntu lub zagęszczając grunt.

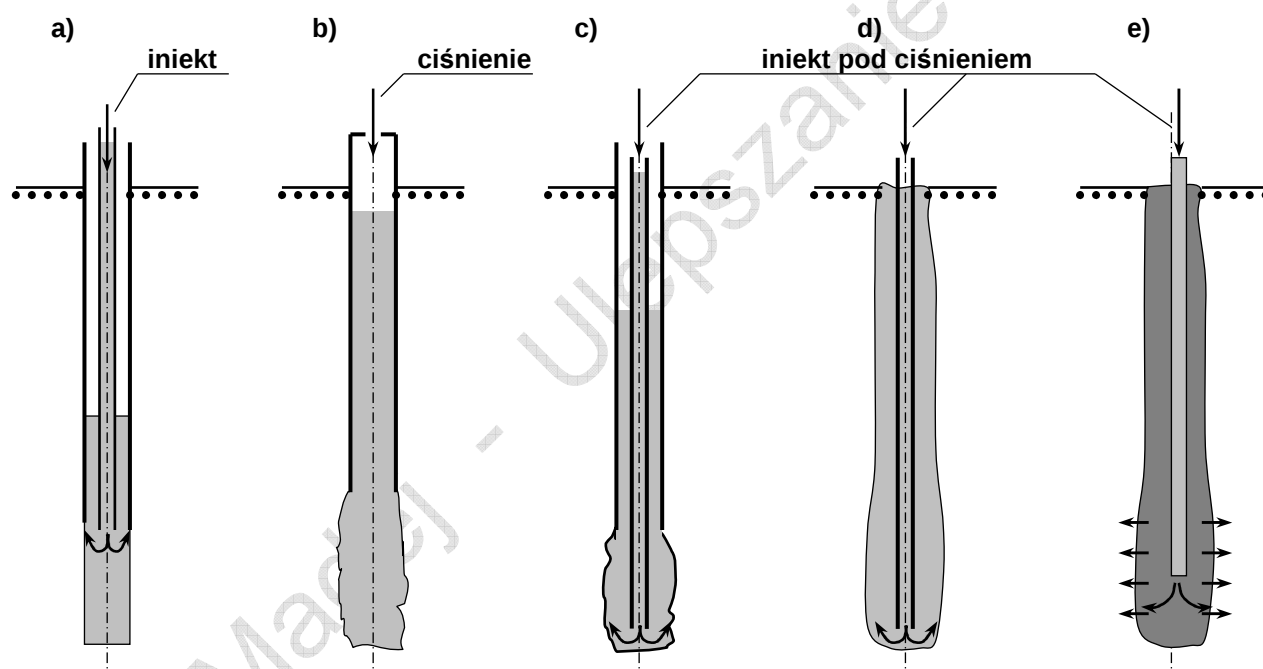
W zależności od wymaganej wytrzymałości iniektu oraz od sposobu jego umieszczenia w otworze, iniekt występuje w trzech postaciach, którymi są:

- zaczyn cementowy (*ang: cement grout*), o wskaźniku wodno-cementowym w granicach $0,40 \div 0,50$,
- zaprawa (*ang: mortar*), w której średnica największych ziaren kruszywa nie może przekraczać 8,0 mm,
- beton (*ang: concrete*), o maksymalnej średnicy ziaren kruszywa wynoszącej 16,0 mm.

Ze względu na sposób umieszczania iniektu w otworze, stosowane w praktyce metody pogrupowane są następująco:

- wypełnianie otworu iniektem,
- iniekcja pojedyncza,
- iniekcja wielokrotna.

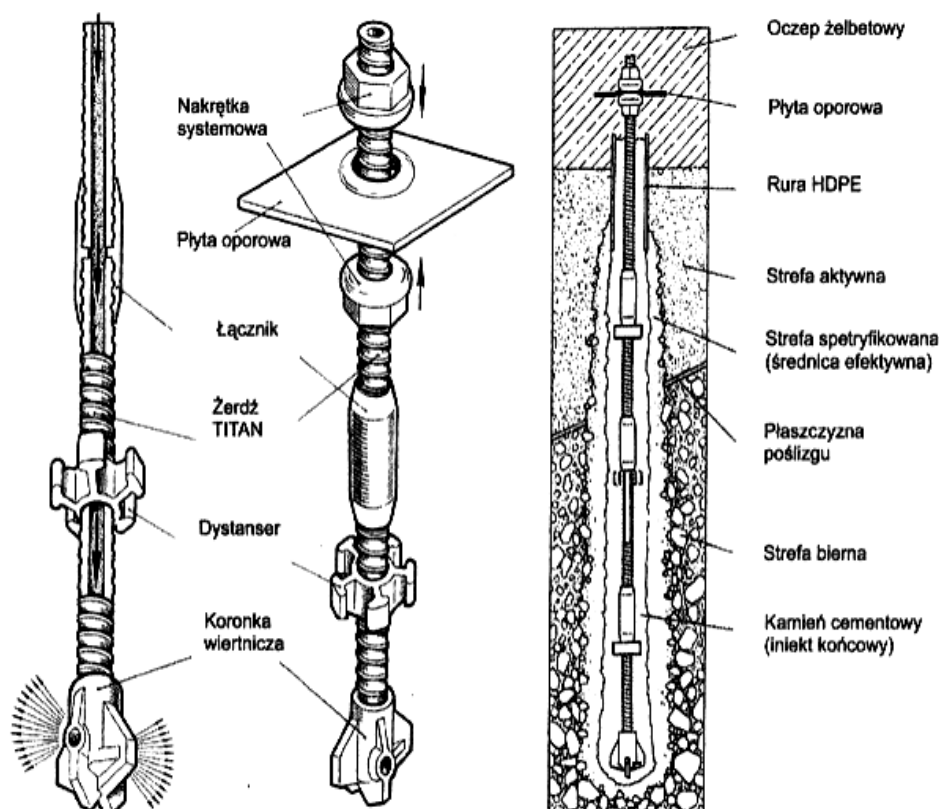
Wypełnianie otworu iniektem, nazywane jest niekiedy iniekcją grawitacyjną, gdyż iniekt wprowadzany jest tylko pod ciśnieniem hydrostatycznym, związanym z jego ciężarem objętościowym. Wypełnianie otworu prowadzone jest zawsze od dołu do góry, przy czym iniekt podawany jest przez rurkę iniekcyjną o odpowiedniej średnicy (rys. 4.11.a). Taka technologia może być również stosowana w otworach bez rury osłonowej.



Rys. 4.11. Przykładowe rodzaje iniekcji

a – grawitacyjna, b – pojedyncza z wykorzystaniem rury osłonowej, c – pojedyncza poprzez rurowe zbrojenie, d – pojedyncza podczas wiercenia otworu, e – powtórna przy użyciu dodatkowej rurki

Iniekcja pojedyncza może mieć kilka wariantów. Jednym z nich jest iniekcja z wykorzystaniem tymczasowej rury osłonowej. W pierwszym etapie otwór wypełniany jest metodą grawitacyjną, bez usuwania rury osłonowej. Bezpośrednio po tym rura osłonowa jest zamykana i podciągana do góry (rys. 4.11.b), przy czym w rurze utrzymywane jest ciśnienie w przedziale $0,5 \div 1,0$ MPa. Taka procedura może być stosowana na całej długości mikropala lub tylko na jego dolnym odcinku. Drugi wariant polega na podawaniu iniektu po wykonaniu otworu, pod odpowiednim ciśnieniem, poprzez rurowe zbrojenie mikropala (rys. 4.11.c). Wariantem trzecim jest iniekcja wykonywana podczas wiercenia otworu bez rury osłonowej, przy użyciu płuczki która, po osiągnięciu założonej głębokości, zastępowana jest iniektem (rys. 4.11.d). Technologia ta stosowana jest w mikropalach TITAN, a także w kotwach i gwoździach gruntowych, których konstrukcję i zasady wykonawstwa przedstawiono na rysunku 4.12.



Rys. 4.12. Mikropal systemu TITAN

Pierwszą fazą iniekcji wielokrotnej jest iniekcja pojedyncza, która w tym przypadku nazywana jest iniekcją pierwotną. Iniekcja wielokrotna może być wykonywana poprzez zbrojenie rurowe (rys. 4.11.c i d), przy użyciu dodatkowych rurek iniekcyjnych (rys. 4.11.e), lub za pomocą rurki z zaworami opaskowymi (rys. 3.4). Powtórna iniekcję wykonuje się albo przed stwardnieniem iniektu pierwotnego i wtedy stosuje się ciśnienie przynajmniej o wartości 1,0 MPa, albo po upływie 24 godzin od zakończenia iniekcji pierwotnej i wtedy wymagane jest ciśnienie w przedziale 2,0 ÷ 8,0 MPa.

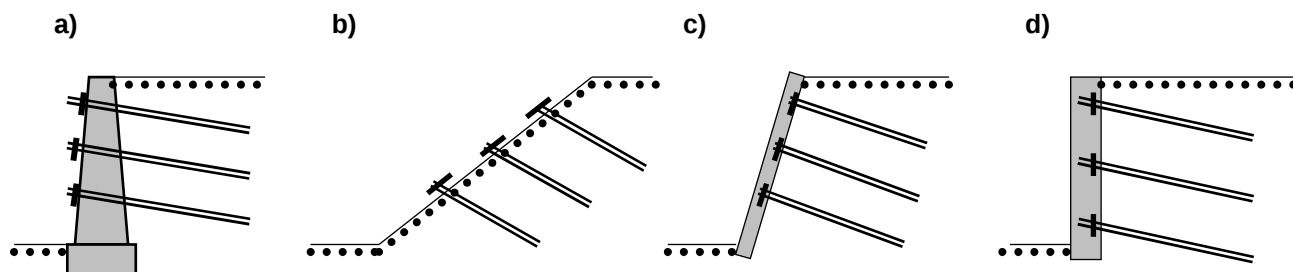
Gwoździe gruntowe

Gwoździe gruntowe (*ang: soil nails*) są jednym z systemów zbrojenia gruntu, które zawdzięczamy geotechnice francuskiej. Ich stosowanie rozpoczęło się w początkach lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia, a jedną z pierwszych konstrukcji z gruntu gwoździowanego było zabezpieczenie skarpy wykopu, wykonanego w celu poszerzenia trasy kolejowej nieopodal Wersalu. W miarę rozwoju techniki gwoździowania gruntów rozszerzył się zakres jej stosowania. Obecnie gwoździe gruntowe stosuje się w czterech przypadkach, którymi są:

- wzmacnianie lub naprawa istniejących konstrukcji oporowych,
- stabilizacja zboczy osuwiskowych,
- tymczasowa obudowa na terenach zabudowanych,
- trwale konstrukcje oporowe,

zgodnie ze schematami przedstawionymi na rysunku 4.13.

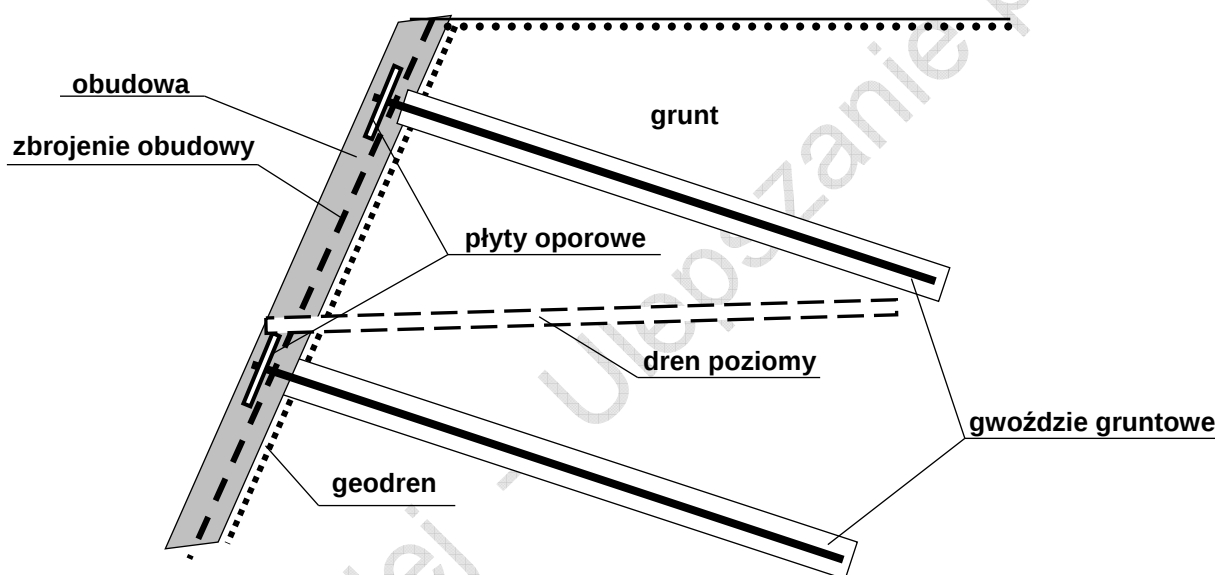
Podstawą działania gruntu gwoździowanego jest współpraca gwoździ z gruntem, w postaci oporu tarcia na kontakcie grunt-gwóźdź. Dzięki temu możliwe jest przenoszenie przez gwoździe obciążeń rozciągających (głównie w przypadku konstrukcji oporowych),



Rys. 4.13. Zakres stosowania gwoździ gruntowych

a – wzmacnianie istniejących konstrukcji oporowych, b – stabilizacja zboczy, c – tymczasowa obudowa głębokich wykopów, d – trwałe konstrukcje oporowe.

jak również zginających i ścinających (zwłaszcza w przypadku stabilizacji zboczy). Wymaga to zastosowania płyt oporowych, przekazujących osiowe siły rozciągające na powierzchnię podłoża, a także obudowy, zabezpieczającej powierzchnię gruntu przed erozją. Ponadto we wszystkich konstrukcjach oporowych niezbędne jest odpowiednie odwodnienie. Elementy składowe konstrukcji z gruntu gwoździowanego pokazano na rysunku 4.14 i omówiono w dalszej części niniejszego rozdziału.



Rys. 4.14. Elementy konstrukcji oporowej z gruntu gwoździowanego

Początkowo zbrojenie gwoździami gruntowymi stosowane było w gruntach niespoistych, zapewniających odpowiedni opór tarcia na pobocznicę gwoździa. Udoskonalenie konstrukcji i technologii wykonywania gwoździ, umożliwia obecnie stosowanie tego typu zbrojenia niemal we wszystkich gruntach, z wyjątkiem gruntów organicznych, gruntów spoistych w stanie plastycznym i niezagęszczonych, a zwłaszcza nawodnionych gruntów niespoistych.

Pierwsze gwoździe gruntowe stanowiły stalowe pręty o średnicy $14 \div 26$ mm i kątowniki równoramienne o wymiarach $50 \times 50 \times 5$ mm lub $60 \times 60 \times 6$ mm, wbijane lub wwirowywane w grunt (*ang: driven soil nails*). Dlatego ten rodzaj zbrojenia gruntu określany jest terminem „gwoździowanie”. Pomimo udoskonalania konstrukcji i technologii gwoździowania, nadal stosowane są gwoździe w postaci prętów stalowych, wstrzeliwanych w grunt za pomocą sprężonego powietrza (*ang: launched soil nails*). Ze względu na małą średnicę prętów, nie większą niż 38 mm, i niewielką długość, nie przekraczającą 8,0 m, na 1 m^2 powierzchni obudowy przypada $2 \div 4$ gwoździ.

Największe zastosowanie znalazły gwoździe gruntowe wiercone i betonowane w podłożu (*ang: drilled and grouted soil nails*), wykonywane identyczną technologią jak mikropale, opisane w rozdziale 4.2. W podłożu wiercony jest otwór o średnicy $100 \div 200$ mm,

nachylony do poziomu pod kątem $10 \div 20^\circ$ w przypadku konstrukcji oporowych, lub większym w przypadku stabilizacji zboczy. Otwór zabezpieczony jest stalową rurą osłonową lub cieczą stabilizującą. Po umieszczeniu zbrojenia, w postaci pręta stalowego lub grubościennej rury o średnicy $30 \div 100$ mm, o powierzchni zabezpieczonej powłoką antykorozyjną, otwór wypełniany jest iniektem, grawitacyjnie lub pod niewielkim ciśnieniem. Długość tak wykonywanych gwoździ gruntowych może dochodzić do 20 m, zaś na jeden gwóźdź może przypadać powierzchnia do $6,0 \text{ m}^2$.

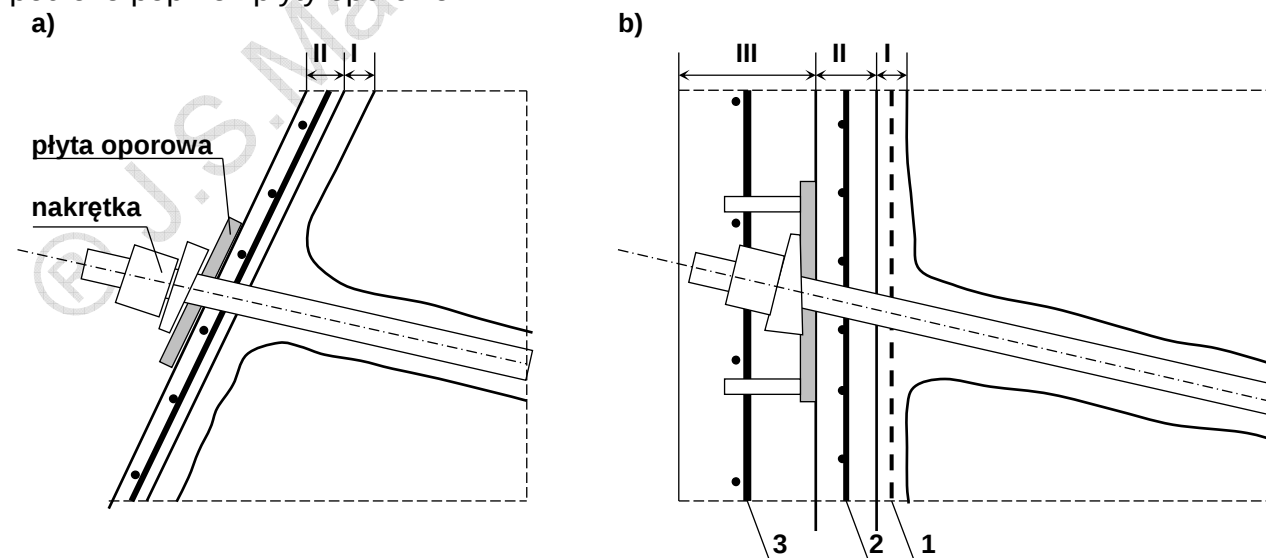
Szczególnym wariantem opisanych powyżej gwoździ gruntowych są samowierzące gwoździe systemu TITAN (*ang: self-drilling soil nails*), stosowane również jako mikropale (rys. 4.12). Zbrojenie gwoździa stanowi rura grubościenna, o zewnętrznej średnicy $30 \div 130$ mm, która pełni również funkcje przewodu wiertniczego i przewodu iniekcyjnego. Wiercenie wykonuje się przy użyciu płuczki z zaczynu cementowego, która służy do usuwania urobku w trakcie wiercenia, a dodatkowo zabezpiecza ściany otworu. Końcowa iniekcja gwoździa wykonywana jest pod ciśnieniem $0,5 \div 6,0 \text{ MPa}$. Maksymalna długość tak wykonywanych gwoździ przekracza 20,0 m.

Jednym z elementów gwoździa gruntowego jest płyta oporowa, przenosząca obciążenie na podłoże, bezpośrednio albo poprzez obudowę. Najczęściej stosowane są płyty stalowe, o wymiarach od 200×200 mm do 400×400 mm i grubości do 20 mm. Wymiary płyt zależą od rodzaju obudowy i wielkości siły wzbudzanej w gwoździu.

Obudowa (*ang: facing*), nazywana również osłoną lub oblicowaniem, zależy od rodzaju gruntu występującego w strefie gwoździowania i od funkcji jaką ma spełniać grunt gwoździowany. Z tego względu wyróżnia się trzy rodzaje obudowy: miękką, podatną i sztywną.

Obudowa miękka (*ang: soft facing*), występująca zazwyczaj w postaci geosiatki lub georusztu, wykorzystywana jest przy stabilizacji zboczy łagodnych, o nachyleniu powierzchni nieprzekraczającym 45° . Nie przenosi ona żadnych obciążeń, a głównym jej zadaniem jest zabezpieczenie powierzchni zbocza przed erozją. Obciążenie osiowe, wzbudzone w gwoździach przenoszone jest, poprzez płyty oporowe, bezpośrednio na podłoże,

Obudowa podatna (*ang: flexible facing*), występująca najczęściej w postaci siatek stalowych o różnej wytrzymałości, stosowana jest przy stabilizacji zboczy stromych, o kącie nachylenia powierzchni zbocza w granicach $45 \div 70^\circ$. Nie są to sztywne granice, gdyż na wybór obudowy ma również wpływ rodzaj i stan gruntu. Obudowa taka może przenosić obciążenia od gruntu, ale nie od sił wzbudzanych w gwoździach, które przekazywane są na podłoże poprzez płyty oporowe.

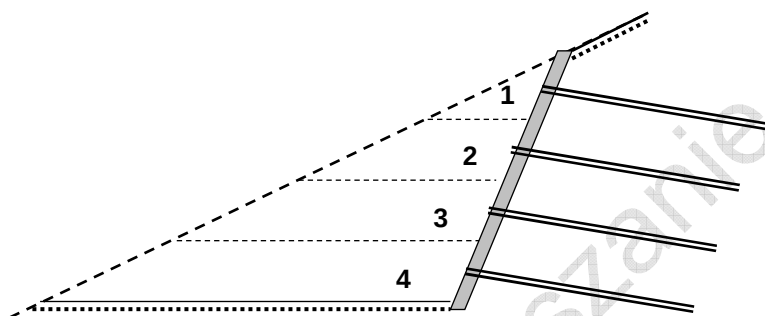


Rys. 4.15. Przykładowe rodzaje obudowy sztywnej

a – tymczasowa obudowa wykopu, b – trwała konstrukcja oporowa

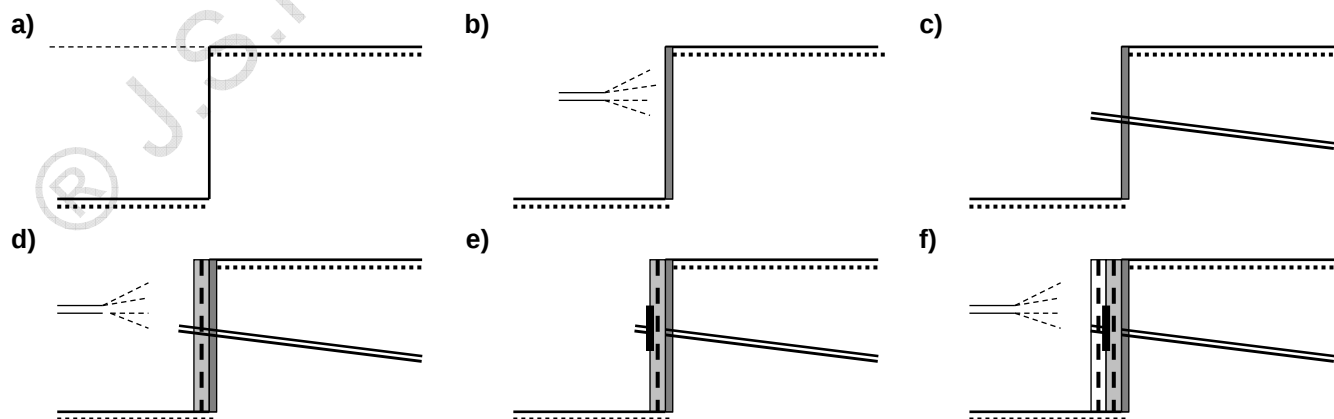
Obudowa sztywna (*ang: hard facing*), składa się z kilku (dwóch do trzech) warstw natryskiwanego betonu i z jednej do trzech warstw zbrojenia (w postaci stalowej siatki lub rusztu), o łącznej grubości 10 ÷ 20 cm. Obudowa taka stosowana jest niekiedy przy stabilizacji zboczy, natomiast zawsze wtedy, gdy grunt gwoździowany stanowi tymczasową (rys. 4.13.c) lub trwałą (rys. 4.13.d) konstrukcję oporową. Siła wzbudzana w gwoździu przekazywana jest na podłoże głównie poprzez płytę oporową, ale również poprzez obudowę. Przykłady najsłabszej i najmocniejszej obudowy sztywnej pokazano na rysunku 4.15. Na rysunku tym kolejne warstwy obudowy oznaczono cyframi rzymskimi I, II i III, a kolejne warstwy zbrojenia cyframi arabskimi 1, 2 i 3. Ostatnia warstwa obudowy trwałej konstrukcji oporowej (rys. 4.15.b) może być wykonana z betonu natryskiwanego, z betonu układanego w szalowaniu lub przy użyciu prefabrykowanych paneli.

Konstrukcja obudowy gruntu gwoździowanego wynika z technologii wykonywania takiego systemu zbrojenia. Ściana oporowa wykonywana jest od góry do dołu. Jest to zasadnicza zaleta zbrojenia, umożliwiająca znaczne zmniejszenie robót ziemnych podczas wykonywania drogi w wykopie (rys. 4.16).



Rys. 4.16. Kolejność wykonywania warstw ściany oporowej

Kolejne etapy wykonywania jednej warstwy gruntu gwoździowanego przedstawiono na rysunku 4.17. Pierwszym etapem jest wykonanie wykopu o głębokości zależnej od rodzaju gruntu, mieszczącej się w zakresie 1,0 ÷ 2,0 m (rys. 4.17.a). W gruntach niespoistych skarpa wykopu nie może być pionowa, z czego wynika odpowiedni kąt odchylenia obudowy od pionu (rys. 4.16). W drugim etapie powierzchnia skarpy wykopu zabezpieczana jest zazwyczaj kilkucentymetrową warstwą natryskiwanego betonu, zabezpieczającą stateczność skarpy podczas wykonywania gwoźdź (rys. 4.17.b). W niektórych przypadkach, takich jak grunt niespoisty lub skarpa pionowa, konieczne jest zbrojenie warstwy natryskiwanego betonu siatką stalową. Trzeci etap obejmuje wykonanie gwoźdźa gruntowego, zgodnie z przyjętą technologią (rys. 4.17.c). Kolejnym etapem jest umieszczenie zbrojenia z siatki stalowej



Rys. 4.17. Etapy wykonywania konstrukcji oporowej z gruntu zbrojonego

a – wykop, b – pierwsza warstwa betonu, c – gwoździec, d – druga warstwa betonu zbrojonego siatką stalową, e – płyta oporowa, f – zewnętrzna warstwa betonu zbrojonego rusztem stalowym

i wykonanie drugiej warstwy natryskiwanego betonu (rys. 4.17.d), na której opiera się płyta oporowa, mocowana na gwoździu w etapie piątym (rys. 4.17.e). Jest to w zasadzie ostatni etap wykonywania tymczasowych konstrukcji oporowych. Natomiast w konstrukcjach trwałych, ostatnim etapem jest umieszczenie zbrojenia w postaci rusztu stalowego i wykonanie ostatniej, zewnętrznej warstwy obudowy z betonu natryskiwanego (rys. 4.17.f), układanego w szalowaniu lub przy wykorzystaniu prefabrykowanych paneli elewacyjnych. Taki cykl technologiczny powtarzany jest aż do osiągnięcia pełnej wysokości ściany. W niektórych przypadkach ostatnia warstwa obudowy wykonywana jest jednorazowo, na całej wysokości ściany.

Drenaż ścian oporowych z gruntu gwoździowanego składa się z pasm geokompozytu drenującego, układanych pionowo na powierzchni skarpy wykopu, pod pierwszą warstwą betonu natryskiwanego (rys. 4.14) i zbiorczego drenu u podstawy obudowy. Przy większym nawodnieniu gruntu za ścianą stosowane są wiercone dreny poziome, odprowadzające wodę poza obudowę.

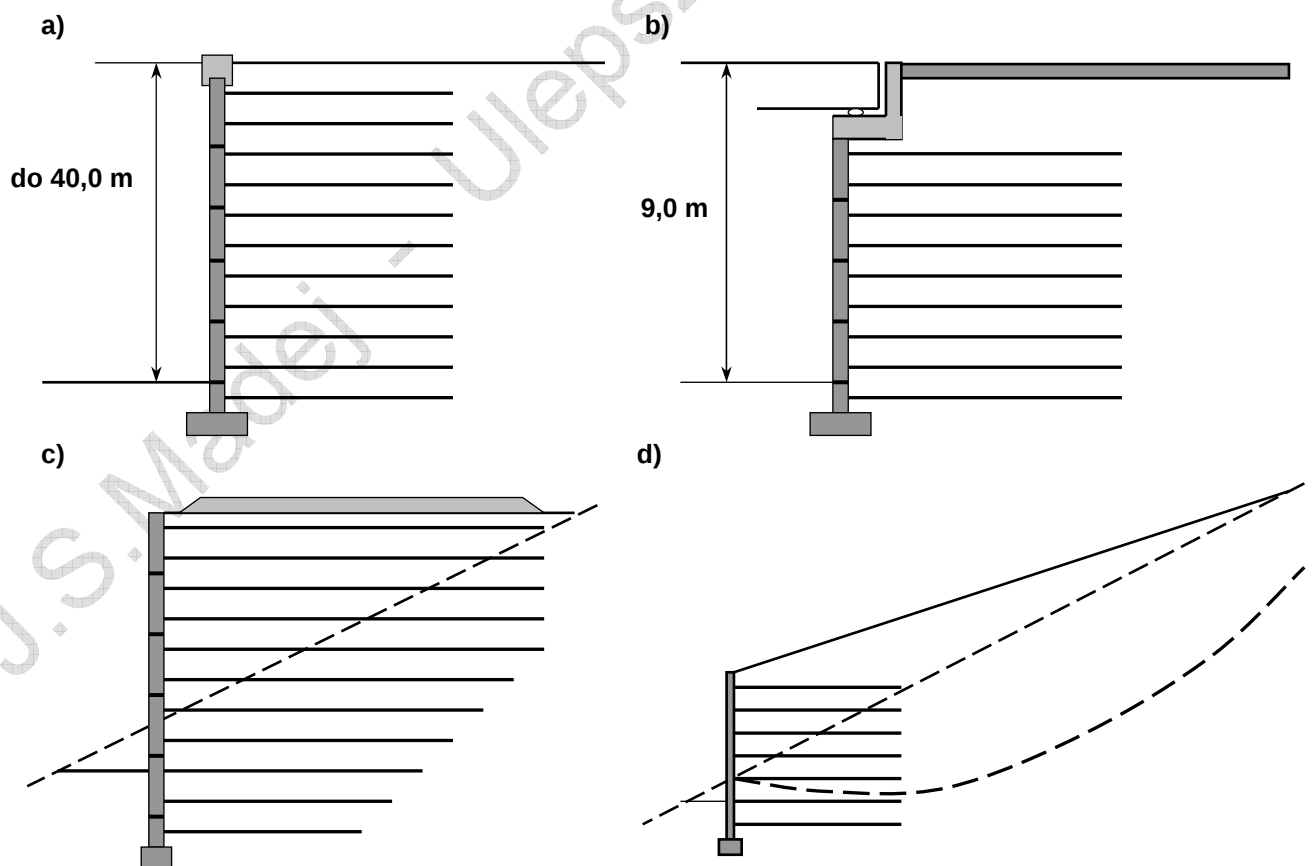
5. Konstrukcje z gruntu zbrojonego

Konstrukcje z gruntu zbrojonego (*ang: reinforced soil structures*) wykonywane są zawsze z gruntów nasypowych, niespoistych lub spoistych, przy czym jedynym zadaniem zbrojenia jest przenoszenie naprężeń rozciągających, czego wynikiem jest wzrost wytrzymałości zbrojonego gruntu. Taki materiał jest najczęściej używany do ulepszania podłoża drogowego oraz do wykonywania różnego rodzaju nasypów i konstrukcji oporowych. Wyróżnia się w tej dziedzinie trzy rodzaje zbrojenia, którymi są:

- taśmy i siatki stalowe,
- geosyntetyki,
- włókna naturalne i sztuczne.

5.1. Taśmy i siatki stalowe

Taśmy i siatki stalowe zaczęto wprowadzać w latach sześćdziesiątych XX wieku. Głównym, a praktycznie jedynym zastosowaniem takiego zbrojenia są konstrukcje oporowe, określane anglojęzycznym skrótem MSEW lub MSE (*ang: Mechanically stabilized earth walls*). Mają one zastosowanie przede wszystkim w budownictwie komunikacyjnym, ale także w budownictwie hydrotechnicznym i powszechnym (rys. 5.1)



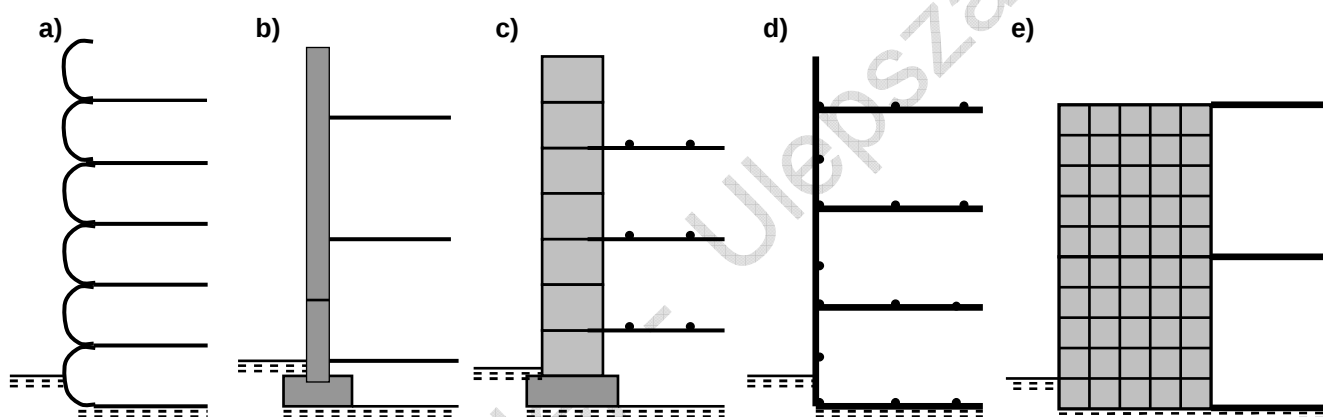
Rys.5.1. Zakres stosowania konstrukcji oporowych

a – stateczność skarpy pionowej, b – przyczółki mostów i wiaduktów, c – podłoże drogi na zboczu, d – stabilizacja zboczy osuwiskowych

Ściana oporowa z gruntu zbrojonego składa się z trzech zasadniczych elementów: obudowy, zbrojenia i materiału zasypowego. Istniejące rozwiązania konstrukcyjne, stosowane najczęściej w praktyce, różnią się rodzajem obudowy i zbrojenia, zależnym od przeznaczenia konstrukcji, wielkości obciążeń czy przewidywanego okresu użytkowania.

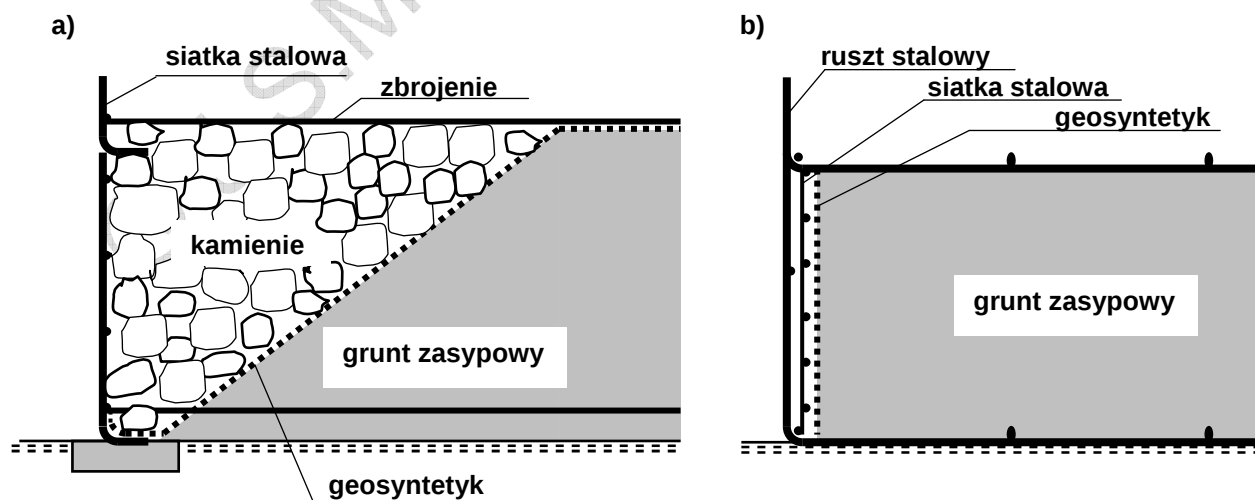
Obudowa (ang. *facing*), ma istotne znaczenie z punktu widzenia estetyki wyglądu konstrukcji, natomiast podstawowym jej zadaniem jest zakotwienie zbrojenia przenoszącego siły rozciągające, a także zabezpieczenie przed wysypywaniem się lub przed wypłukiwaniem materiału zasypowego, którym najczęściej jest grunt gruboziarnisty (niespoisty). Z tych względów, główne rodzaje obudowy, przedstawione na rysunku 5.2, stanowią:

1. Stalowe profile półeliptyczne, o standardowej wysokości 0,375 m i długości 3,0 m.
2. Prefabrykowane panele betonowe lub żelbetowe, o grubości 140 ÷ 200 mm i powierzchni 2,0 ÷ 5,0 m². Panele te mogą mieć różne kształty (kwadratowe, prostokątne, sześciokątne, krzyżowe), o czym decydują nie tylko względy estetyczne, ale także wymagania dotyczące stateczności połączeń paneli.
3. Prefabrykowane bloczki betonowe, o wysokości 100 ÷ 300 mm (najczęściej 200 mm), wykonywane w postaci bloczków masywnych lub pustaków, układane bez zaprawy.
4. Siatki, a ściślej mówiąc ruszty, ze zgrzewanych lub spawanych prętów stalowych, które wymagają dodatkowego zabezpieczenia materiału zasypowego przed erozją (rys. 5.3).
5. Gabiony, czyli kosze ze stalowych prętów, spawanych lub zgrzewanych, wypełnione kamieniami.



Rys. 5.2. Typowe rodzaje obudowy

a – profile stalowe, b – panele betonowe lub żelbetowe, c – bloczki betonowe, d - ruszt stalowy, e - gabiony



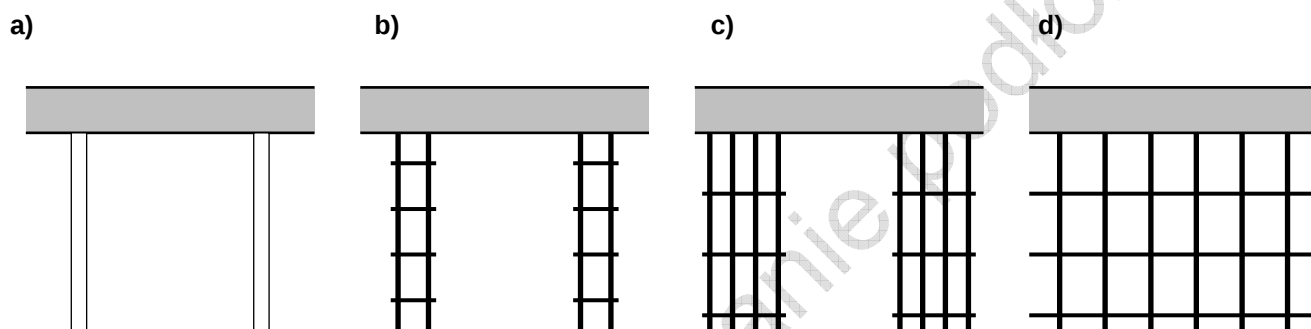
Rys. 5.3. Zabezpieczenie obudowy z rusztu stalowego

a – system TerraTrel® (Francja), b – system Hilfiger (USA)

Zbrojenie (ang: *reinforcement*), wykonywane jest zazwyczaj ze stali galwanizowanej. Można tu wyróżnić trzy rodzaje zbrojenia, pokazane na rysunku 5.4, a mianowicie:.

1. Taśmy stalowe, z żeberkami na dolnej i górnej powierzchni, o standardowych wymiarach przekroju poprzecznego 45 x 5 mm lub 50 x 4 mm.
2. Ruszty stalowe, drabinkowe, pasmowe i powierzchniowe, wykonywane ze zgrzewanych lub spawanych prętów stalowych. Pręty podłużne, w rozstawie 150 ÷ 200 mm, mają średnicę w przedziale 9 ÷ 14 mm. Rozstaw prętów poprzecznych mieści się w przedziale 230 ÷ 600 mm, a średnica w granicach 10 ÷ 14 mm.
3. Siatki stalowe, o oczkach 50 x 50 mm, wykonywane ze spawanych lub zgrzewanych drutów o średnicy kilku milimetrów, stosowane w obudowie z rusztu stalowego (rys. 5.3.b).

Na rysunku 5.4 nie uwzględniono jedynie zbrojenia z siatki stalowej, które różni się od rusztu powierzchniowego mniejszym wymiarem oczek siatki i mniejszą średnicą drutów.

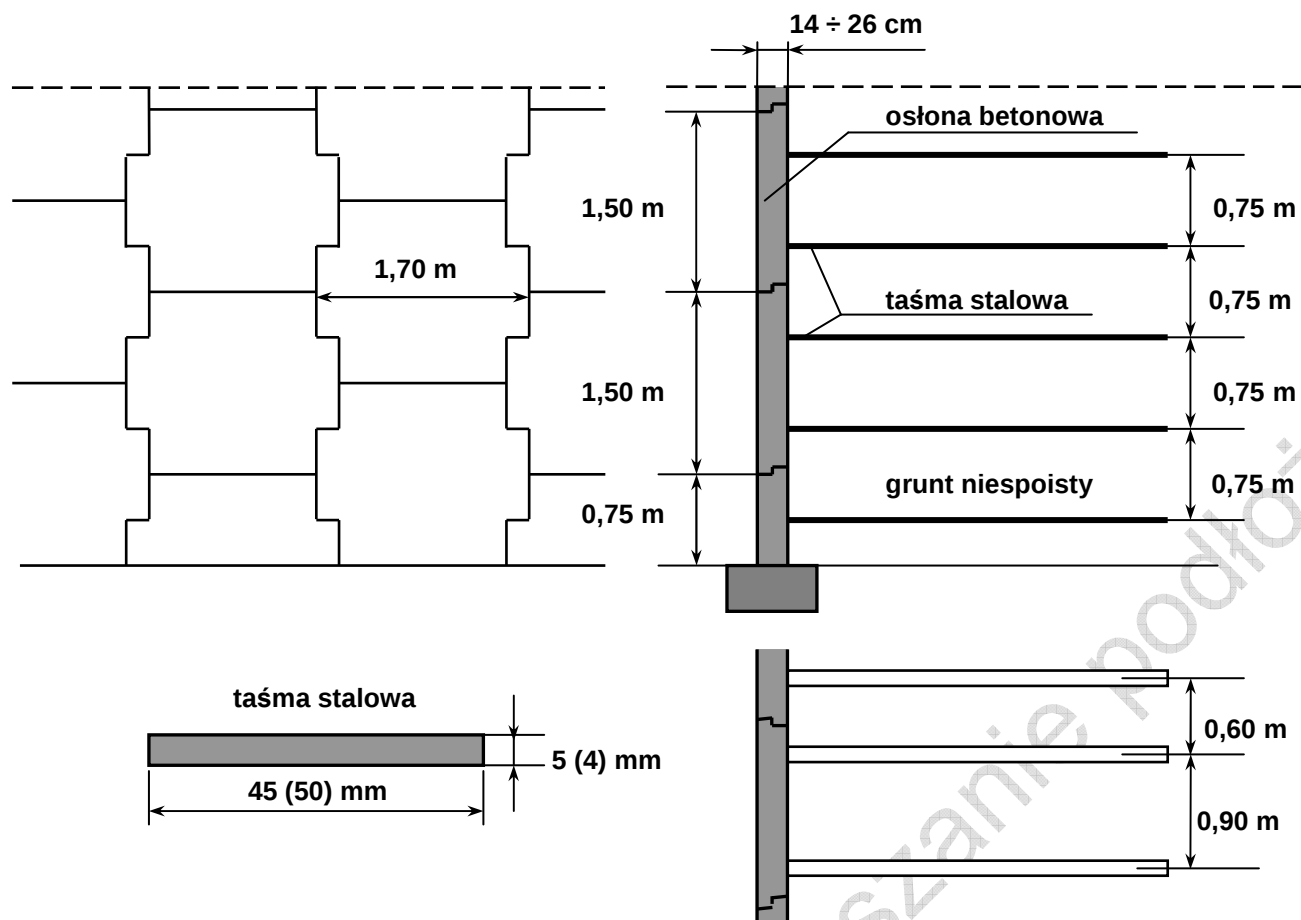


Rys. 5.4. Rodzaje zbrojenia stalowego
a – taśmy, b - ruszt drabinkowy, c – ruszt pasmowy, d – ruszt powierzchniowy

Materiał zasypowy (ang: *fill material*) powinien zapewniać współpracę ze stalowym zbrojeniem, co wymaga odpowiedniego oporu tarcia lub ścinania na powierzchni kontaktu tego materiału ze zbrojeniem. Z tego względu najczęściej stosowane są grunty gruboziarniste (niespoiste), bez zawartości części organicznych i z niewielką zawartością (do 15%) cząstek o średnicy zastępczej równej 0,075 mm, o wskaźniku plastyczności $I_p \leq 6\%$. Standardy amerykańskie wymagają ponadto, aby kąt tarcia wewnętrznego tego materiału, wyznaczony w badaniu bezpośredniego ścinania, był nie mniejszy niż 34° . Jako szczególnie szkodliwe uznawane są zanieczyszczenia powodujące korozję zbrojenia.

Wykonawstwo (ang: *construction*) konstrukcji oporowych z gruntu zbrojonego jest procesem powtarzających się czynności, obejmujących ustawianie elementów obudowy, mocowanie do nich elementów zbrojenia oraz układanie kolejnych warstw odpowiednio zagęszczonego materiału zasypowego. Pierwszą czynnością jest przygotowanie podłoża konstrukcji, a w przypadku paneli betonowych wykonania betonowej ławy fundamentowej. Na tak przygotowanym podłożu ustawiane są panele pierwszej warstwy, a następnie wykonywana zasypka do poziomu pierwszej warstwy zbrojenia. Zagęszczanie wykonywane jest warstwami o grubości 35 ÷ 40 cm, przy czym w odległości do 2,0 m od paneli obudowy stosowany może być tylko lekki sprzęt zagęszczający. Po ułożeniu i połączeniu warstwy zbrojenia z obudową cały cykl powtarzany jest aż do osiągnięcia projektowanej wysokości konstrukcji.

Są to ogólne zasady wykonawstwa, które wymagają uwzględnienia specyfiki poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych, dotyczących zwłaszcza obudowy (panele betonowe lub siatki stalowe) i zbrojenia (taśmy lub ruszty stalowe).



Rys. 5.5. Francuskie rozwiązanie konstrukcji z gruntu zbrojonego

Przedstawione na rysunku 5.5 rozwiązanie, nazywane początkowo *Terre Armée®*, a obecnie określane jako *TerraClass®*, jest konstrukcją wzorcową, na której oparta jest większość stosowanych obecnie systemów. Zasadniczą innowacją w stosunku do rozwiązania oryginalnego było zastosowanie zbrojenia z prętów stalowych (rys. 5.4), a następnie zastosowanie obudowy z rusztu stalowego (rys. 5.3) lub prefabrykowanych bloczków betonowych, o wymiarach nieprzekraczających kilkudziesięciu centymetrów.

5.2. Geosyntetyki

Geosyntetyki (*ang: geosynthetics*) znajdują szerokie zastosowanie w budownictwie, zwłaszcza w geotechnice, a także w ochronie środowiska, począwszy od lat siedemdziesiątych XX wieku. Ze względu na różnorodność form i zróżnicowane właściwości, geosyntetyki mogą pełnić wiele funkcji, wśród których istotne znaczenie ma zbrojenie gruntu. Klasyfikacja geosyntetyków wyróżnia trzy zasadnicze grupy, a mianowicie: geosyntetyki przepuszczalne, nieprzepuszczalne i geokompozyty. Do zbrojenia gruntów stosuje się z zasady geosyntetyki przepuszczalne (rys. 5.6.), do których należą:

- geotekstylia, w postaci geowłókniny, geodżianiny i geotkaniny,
- georuszty i geosiatki,
- geosyntetyki komórkowe (geokraty).

Natomiast geomaty stanowią zabezpieczenie powierzchni konstrukcji z gruntu zbrojonego.

W klasyfikacji geosyntetyków, podanej w normie PN-EN ISO 10318, geosiatki i georuszty znajdują się w jednej grupie, oznaczonej symbolem GGR, podczas gdy w międzynarodowej klasyfikacji International Geosynthetics Society wyróżnia się georuszty (*ang: geogrids*), oznaczone symbolem GGR i geosiatki (*ang: geonets*), oznaczone symbolem GNT.

Te ostatnie w cytowanej normie zostały natomiast określone jako georuszty drenażowe. Chociaż w polskiej literaturze geotechnicznej terminy geosiatki i georuszty używane są zamiennie w odniesieniu do zbrojenia gruntów, to w publikacjach anglojęzycznych georuszty, charakteryzujące się większą sztywnością i wytrzymałością w porównaniu z geosiatkami, są traktowane jako zbrojenie zasadnicze (*ang: primary reinforcement*), zaś geosiatki jako zbrojenie pomocnicze (*ang: secondary reinforcement*). Z kolei geosyntetyki komórkowe (*ang: geocells*), oznaczone symbolem GCE, w literaturze krajowej określane są często jako geokomórki lub geokraty. Ostatni problem terminologiczny jest natury językowej i wynika z faktu, że w języku polskim rzeczownik geotekstylija (*ang: geotextiles*) nie ma liczby pojedynczej. Dlatego angielski termin *geotextile* powinien być tłumaczony poprawnie jako geosyntetyk tekstylny. Natomiast w literaturze wyrób taki określany jest bardzo często językowym nowotworem jako geotekstyl. Wprawdzie są to tylko nieścisłości czy niejednoznaczności terminologiczne, jednakże należy je mieć na uwadze przy opisywaniu zbrojenia gruntu za pomocą geosyntetyków.

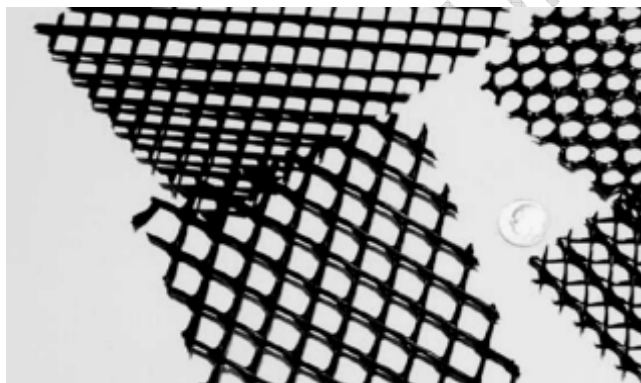
a)



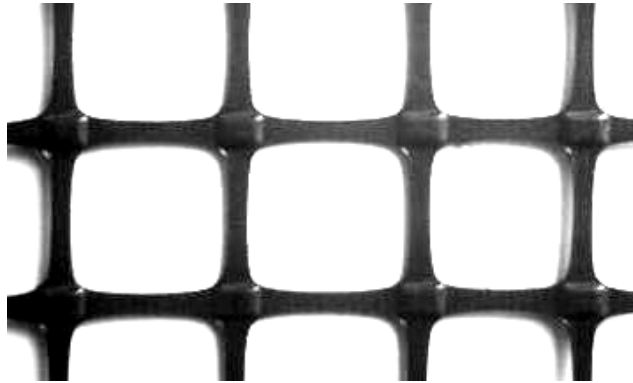
b)



b)



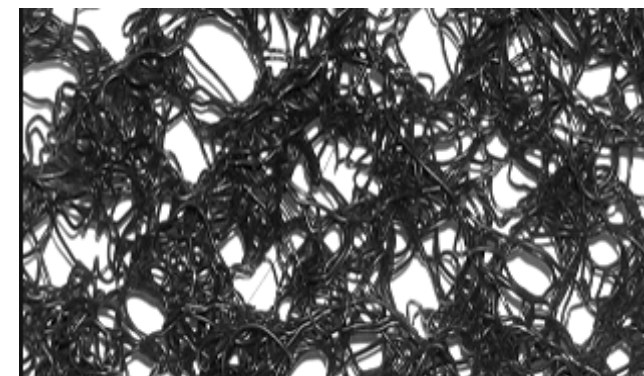
d)



d)



f)



<http://geokrata.com>

Rys. 5.6 Rodzaje geosyntetyków stosowane do zbrojenia gruntu

a – geowłoknina, b – geotkanina, c – geosiatki, d – georuszt, e - geokrata, f - geomata

Zgodnie z klasyfikacją metod ulepszania gruntów, przedstawioną w rozdziale 1, do kategorii „konstrukcje z gruntu zbrojonego” należało by zaliczyć tylko dwa ogólne przypadki:

- zbrojenie skarp nasypu ,
- konstrukcje oporowe z gruntu zbrojonego.

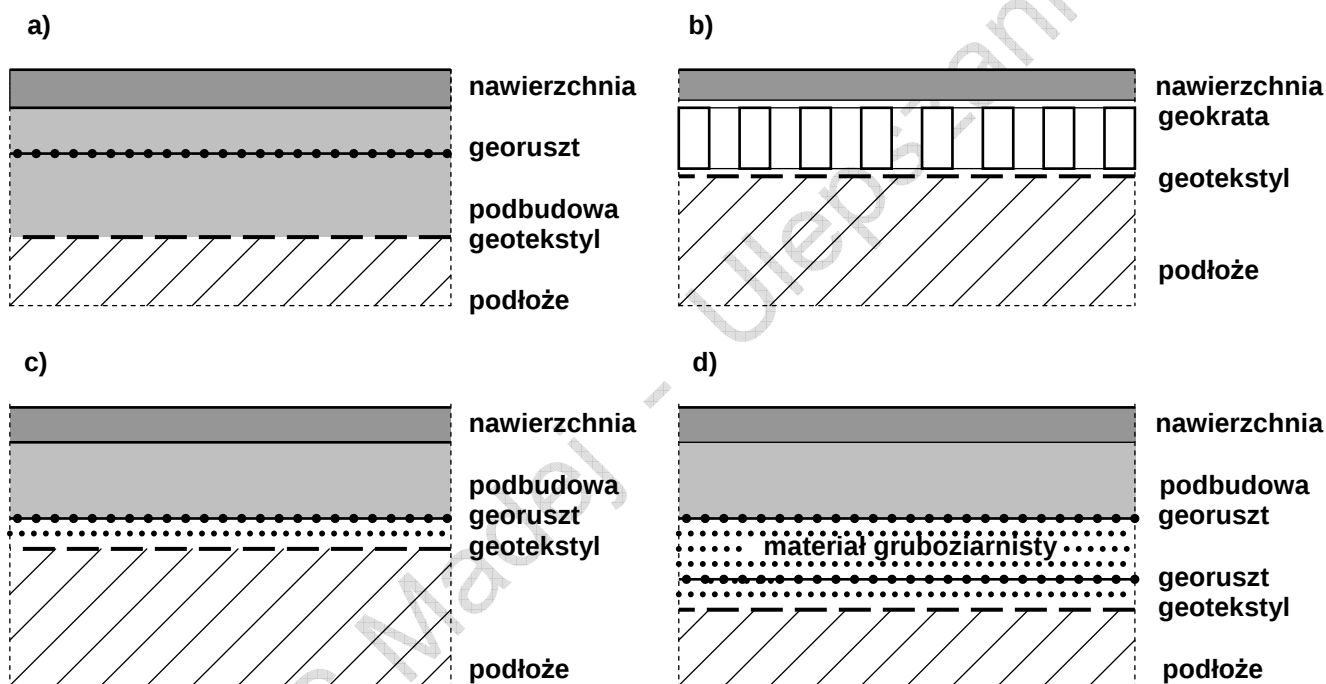
Natomiast dwa pozostałe przypadki zbrojenia geosyntetykami, którymi są:

- zbrojenie podłoża nawierzchni drogowej, kolejowej lub parkingowej ,
- zbrojenie podłoża nasypu, posadowionego bezpośrednio lub za pomocą kolumn albo pali,

nie są konstrukcjami, ale elementem konstrukcyjnym z gruntu zbrojonego, uwzględnianym w tej kategorii.

5.2.1. Zbrojenie podłoża nawierzchni

Wybór rodzaju i sposobu zbrojenia podłoża nawierzchni drogowej zależy od rodzaju nawierzchni (sztywna, półsztywna, podatna), materiału podbudowy (kruszywa naturalne, grunt stabilizowany cementem, mieszanki mineralno-emulsyjne) oraz budowy podłoża (grunty niespoiste, spoiste lub organiczne). Zbrojenie może dotyczyć tylko podbudowy nawierzchni, górnej warstwy podłoża a także, zwłaszcza w przypadku występowania w podłożu gruntów organicznych, głębszych warstw tego podłoża. Wybrane przykłady zbrojenia podłoża nawierzchni pokazano na rysunku 5.7.

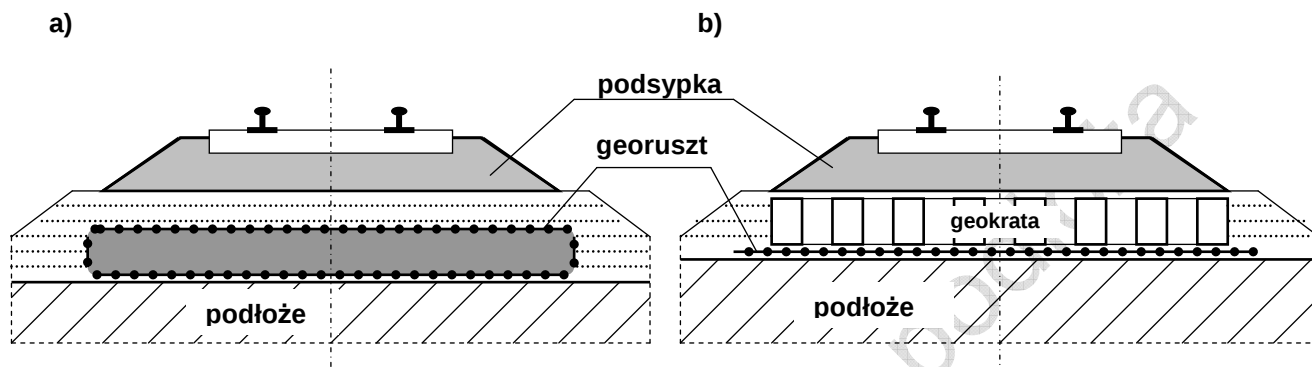


Rys. 5.7. Zbrojenie podłoża nawierzchni drogowej

a – zbrojenie podbudowy georusztem, b – zbrojenie podbudowy geokrata, c – zbrojenie podłoża georusztem, d – zbrojenie podłoża geomateracem

W pierwszym przypadku (rys. 5.7.a, celem zbrojenia jest zwiększenie sztywności podbudowy, natomiast w drugim przypadku (rys. 5.7.b) warstwę podbudowy stanowi geokrata, wypełniona zagęszczonym materiałem gruboziarnistym. Zbrojenie podłoża, którego celem jest rozkład naprężeń na większą powierzchnię i zmniejszenie odkształcalności podłoża, realizowane jest za pomocą jednej warstwy georusztu (rys. 5.7.c) lub, w przypadku słabszego podłoża, za pomocą geomateraca (rys. 5.7.d). Geomaterac tworzą zazwyczaj dwie warstwy georusztu, pomiędzy którymi znajduje się warstwa zagęszczonego materiału gruboziarnistego, o grubości 20 ÷ 30 cm. W każdym przypadku zbrojenia podłoża pierwszą warstwę stanowi geosyntetyk tekstylny, pełniący funkcję separacyjną.

Nawierzchnia kolejowa składa się najczęściej z trzech elementów: szyn, podkładów i podsypki. Podsypkę stanowi warstwa materiału gruboziarnistego, o grubości $25 \div 35$ cm i uziarnieniu 2,0/63,0 mm, a jej zadaniem jest przeniesienie obciążeń na podłoże, którego górna warstwa w terminologii kolejowej nazywana jest podtorzem. Zbrojenie geosyntetykiem dotyczy niekiedy warstwy podsypki, natomiast najczęściej jego celem jest ulepszenie górnej warstwy podłoża. Podobnie jak w przypadku nawierzchni drogowej, zbrojenie to może stanowić jedna warstwa georusztu, geomaterac utworzony z dwóch warstw georusztu (rys. 5.8.a) lub geokrata wypełniona materiałem gruboziarnistym (rys. 5.8.b).

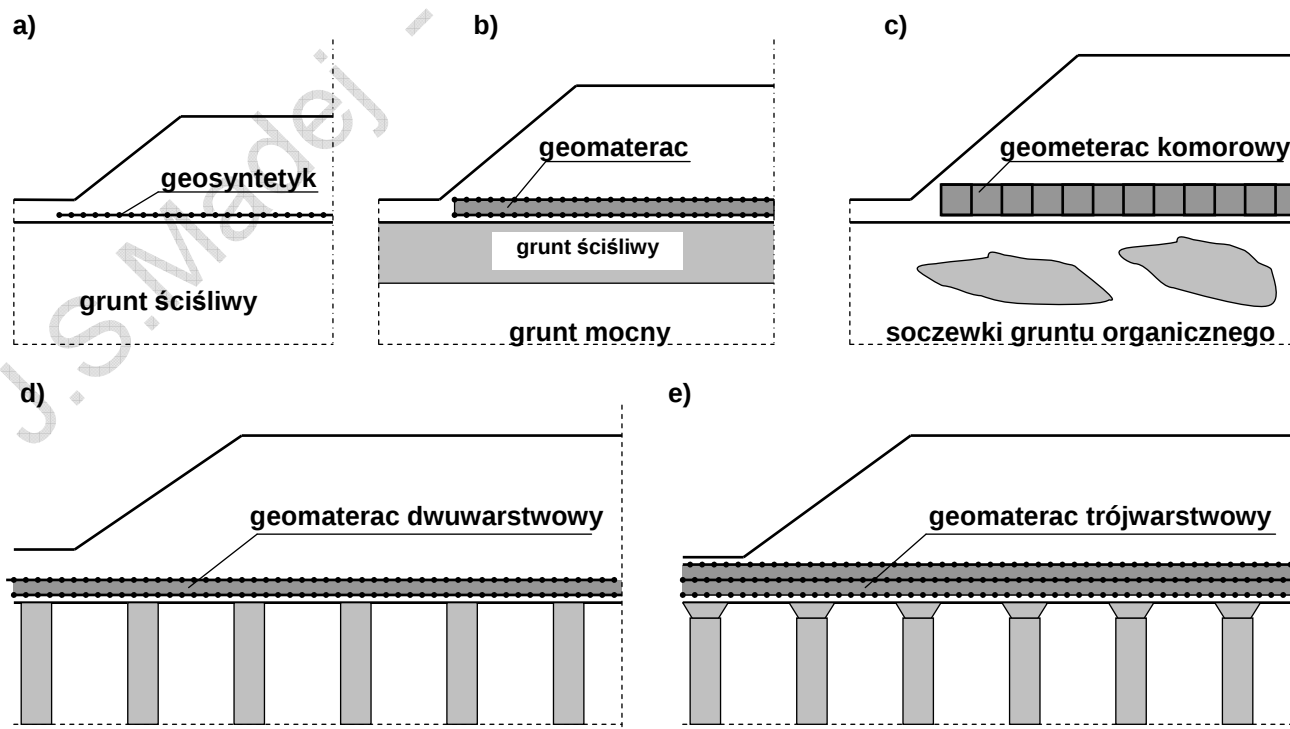


Rys.5.8. Zbrojenie podłoża nawierzchni kolejowej
a – zbrojenie geomateracem, b – zbrojenie geokrata

5.2.2. Zbrojenie podłoża nasypu

Celem zbrojenia podłoża nasypu geosyntetykiem jest zmniejszenie wartości osiadania nasypu i zapewnienie jego stateczności na wypieranie i na poślizg. Podstawowym zbrojeniem w przypadku bezpośredniego posadowienia nasypu może być:

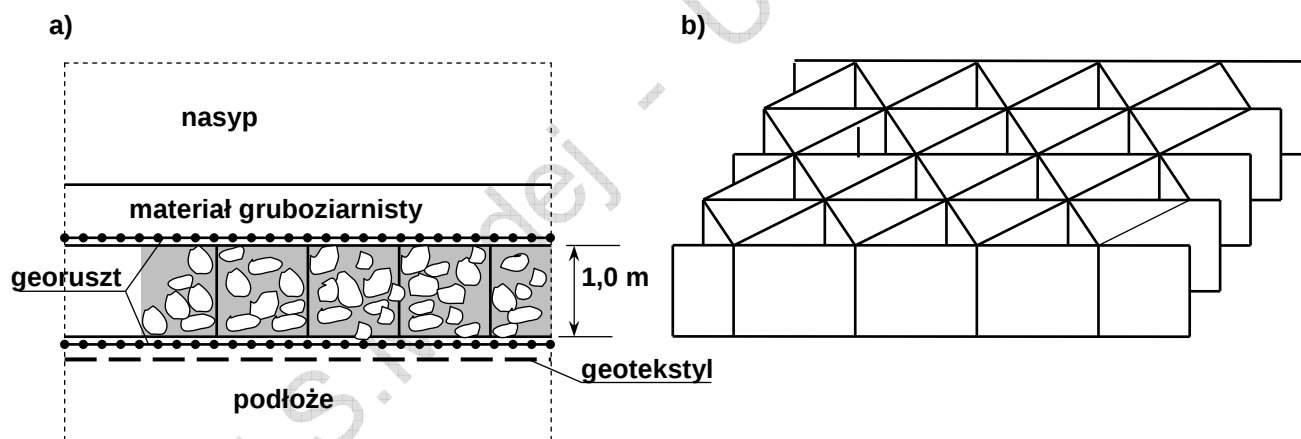
- jedna warstwa geosyntetyku (geotekstyl lub georuszt),
- geomaterac, złożony z dwóch lub trzech warstw georusztu,
- geomaterac komorowy.



Rys. 5.9. Rodzaje zbrojenia podłoża nasypu geosyntetykiem
a,b,c – posadowienie bezpośrednie, d – posadowienie na kolumnach, e – posadowienie na palach

Natomiast w przypadku posadowienia nasypu na kolumnach lub na palach, zadaniem zbrojenia geosyntetykiem jest prawidłowe przekazanie obciążenia od nasypu na te konstrukcje geotechniczne. Zadanie to realizowane jest za pomocą dwu- lub trójwarstwowego geomateraca. Wymienione powyżej sposoby zbrojenia pokazano na rysunku 5.9

Bezpośrednie posadowienie nasypu na warstwie gruntu ściśliwego, ale o wytrzymałości zapewniającej stateczność nasypu, spowoduje znaczne, ale przede wszystkim nierównomierne jego osiadanie. Aby tego uniknąć, w niektórych przypadkach wystarczy zbrojenie podłoża jedną warstwą geosyntetyku, w postaci geotkaniny lub georusztu (rys. 5.9.a). Efektem działania tego zbrojenia jest zmniejszenie naprężeń pionowych pod środkową częścią nasypu, a tym samym bardziej równomierny rozkład jego osiadania. Jeżeli w podłożu nasypu występuje warstwa gruntu słabego, wówczas niezbędne jest wykonanie zbrojenia podłoża w postaci geomateraca dwuwarstwowego (rys. 5.9.b), opisanego w rozdziale 5.2.1. Zadaniem tego zbrojenia jest z jednej strony zmniejszenie wartości i nierównomierności osiadania nasypu, a z drugiej strony zwiększenie sił utrzymujących stateczność nasypu na wypieranie i na poślizg. Zbrojenie w postaci geomateraca komorowego stosowane jest wtedy, gdy w podłożu nasypu występują rozległe soczewki gruntu organicznego o dużej miąższości lub podziemne pustki (rys. 5.9.c). Szczegóły geomateraca komorowego pokazano na rysunku 5.10.a. Jest to konstrukcja trójwymiarowa, o wysokości 1,0 m, wykonana z pionowych arkuszy sztywnego georusztu, w sposób pokazany na rysunku 5.10.b. Przed ustawieniem geomateraca, na wyrównanym podłożu rozkładany jest geotekstyl, stanowiący warstwę separacyjną, a następnie georuszt, stanowiący jeden z elementów zbrojenia. Po ustawieniu geomateraca jest on wypełniany materiałem kamiennym, a po zagęszczeniu wypełnienia rozkładana jest górna warstwa georusztu. Kolejno wykonywana jest warstwa materiału gruboziarnistego i na niej wykonywany jest nasyp. Takie zbrojenie podłoża gwarantuje niemal równomierne osiadanie nasypu i odpowiedni zapas bezpieczeństwa w odniesieniu do stateczności nasypu.

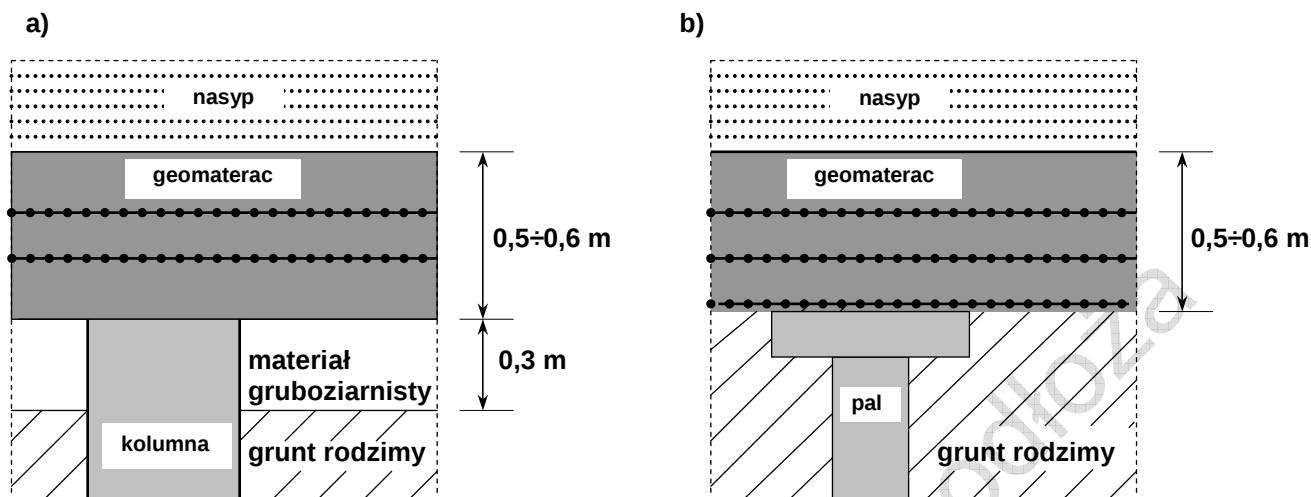


Rys. 5.10. Zbrojenie podłoża geomateracem komorowym Tensar

a – elementy składowe zbrojenia, b – konstrukcja geomateraca

Jeżeli w podłożu projektowanego nasypu do większej głębokości zalegają warstwy gruntu słabego, zwłaszcza organicznego, a wymagane są nieznaczne, albo prawie zerowe osiadania nasypu, wówczas nasyp posadowiany jest na kolumnach lub na palach, jak to pokazano na rysunkach 5.9.d i 5.9.e. Termin *posadowienie nasypu na kolumnach* należy rozumieć jako zbrojenie podłoża nasypu kolumnami, opisanymi w rozdziale 4.1. Zadaniem tego zbrojenia jest redukcja wartości osiadania i zapewnienie równomiernego ich rozkładu pod nasypem. Z tego względu zbrojenie kolumnami stosuje się na krótkich odcinkach drogi, gdy w podłożu zalega soczewka słabego gruntu o ograniczonym zasięgu. Natomiast termin *posadowienie nasypu na palach* oznacza zastosowanie pali jako fundamentu,

gwarantującego niemal zerowe osiadania nasypu. Rozwiązanie takie najczęściej stosuje się na odcinkach dojazdowych do mostów lub wiaduktów, których przyczółki mogą wykazywać jedynie minimalne osiadania.



Rys. 5.11. Geomaterac w podłożu nasypu
a – podłoże zbrojone kolumnami, b – nasyp posadowiony na palach

Funkcja, jaką przy takim rodzaju posadowienia nasypu spełniają geosyntetyki polega jedynie na przeniesieniu obciążenia z nasypu na kolumny i grunt rodzimy lub na pale. Stosowane w tym celu geomaterace, dwuwarstwowy w przypadku zbrojenia podłoża kolumnami, lub trójwarstwowy w przypadku posadowienia na palach, wynikają z różnego sposobu pracy podłoża nasypu. Materac taki w niektórych publikacjach nosi nazwę platformy przekazującej obciążenie (*ang: Load Transfer Platform*) i oznaczany jest symbolem LTP. Szczegóły rozwiązań pokazano na rysunku 5.11. Obciążenie od nasypu posadowionego na podłożu zbrojonym kolumnami (rys. 5.11.a) przenoszone jest częściowo przez kolumny, a częściowo przez grunt rodzimy. Zadaniem geomateraca jest zapewnienie prawidłowego rozkładu tego obciążenia, proporcjonalnie do sztywności kolumn i gruntu rodzimego, co można osiągnąć przez zastosowanie geomateraca dwuwarstwowego, ułożonego na warstwie materiału gruboziarnistego. Natomiast obciążenie od nasypu posadowionego na palach (rys. 5.11.b) przenoszone jest wyłącznie przez pale. Z tego względu niezbędne jest zastosowanie sztywnego geomateraca trójwarstwowego, układanego bezpośrednio na głowicach pali. Dodatkowym elementem tego rozwiązania są poszerzone głowice pali, skracające odległość pomiędzy punktami podparcia geomateraca.

5.2.3. Zbrojenie skarp nasypu

Zasadniczym celem zbrojenia skarp nasypu geosyntetykiem jest zapewnienie stateczności na poślizg. Dotyczy to zarówno nasypów nowo wznoszonych jak i poszerzania nasypów istniejących, a także przypadków odbudowy zboczy w których wystąpiło osuwisko. Potrzeba stosowania takiego zbrojenia wynika z faktu, że coraz częściej, ze względów ekonomicznych, wykonywane są nasypy, w których kąt nachylenia skarpy do poziomu jest większy od 45°, a w skrajnych przypadkach dochodzi do 90°. Do zbrojenia skarp nasypów stosowane są geotekstylia, geosiatki i georuszty. Dodatkowymi elementami są: siatki stalowe, wykorzystywane jako tymczasowa forma w trakcie wznoszenia nasypu lub część składowa oblicowania oraz geomaty i geokraty, stanowiące zabezpieczenie powierzchni skarpy przed erozją, a także przed szkodliwym oddziaływaniem promieniowania słonecznego na geosyntetyczne zbrojenie skarpy. Wybór rodzaju i sposobu zbrojenia oraz zabezpieczenia powierzchni skarpy zależy od kąta nachylenia skarpy, wysokości nasypu, materiału zasypowego, a także w pewnym stopniu od właściwości podłoża nasypu. Najważniejszym

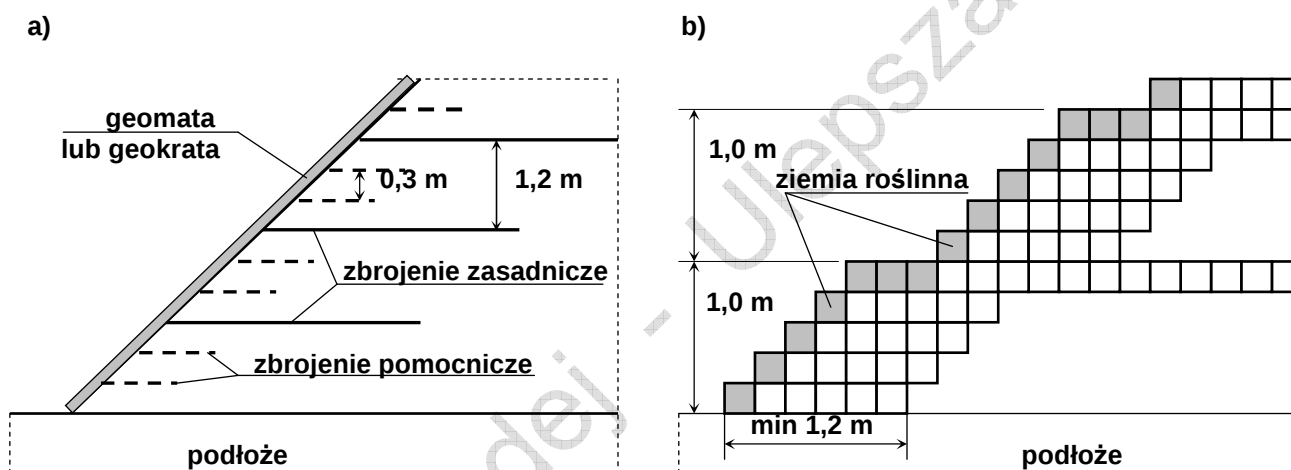
czynnikiem jest kąt nachylenia skarpy do poziomu, stanowiący podstawę podziału skarp na dwie grupy:

- skarpy łagodne (*ang: shallow slopes*), o kącie nachylenia do poziomu $\alpha \leq 45^\circ$,
- skarpy strome (*ang: steep slopes*), o kącie nachylenia $45^\circ < \alpha \leq 70^\circ$.

Należy tu wyjaśnić, że nasypy o skarpie nachylonej pod kątem $\alpha > 70^\circ$ traktowane są jako konstrukcje oporowe.

5.2.3.1. Skarpy łagodne

Najczęściej stosowanym rodzajem zbrojenia są geosiatki lub georuszty, układane poziomymi warstwami w miarę wznoszenia nasypu. Ze względu na stosunkowo niewielkie nachylenie skarpy, pionowy rozstaw warstw zbrojenia, zapewniający ogólną stateczność na poślizg, wynosi około 1,0 m. Natomiast w celu uniknięcia utraty stateczności lokalnej, pomiędzy dwiema warstwami zbrojenia zasadniczego (*ang: primary reinforcement*) umieszcza się dodatkowe warstwy zbrojenia pomocniczego (*ang: secondary reinforcement*), o znacznie mniejszym zasięgu niż zbrojenie zasadnicze. Maksymalny rozstaw warstw zbrojenia, zalecany przez FDOT Design Standards, pokazano na rysunku 5.12.a. W każdym przypadku, powierzchnia skarpy nasypu wymaga zabezpieczenia przed erozją. W przypadku skarpy zbrojonej geosyntetykiem, dodatkowym elementem jest zabezpieczenie zbrojenia przed oddziaływaniem promieniowania słonecznego. W tym celu na powierzchni skarpy układana jest geomata, wypełniona ziemią roślinną i obsiana trawą, albo geokrata, wypełniona materiałem gruboziarnistym, przykrytym warstwą ziemi roślinnej obsianej trawą.



Rys.5.12. Zbrojenie łagodnej skarpy nasypu

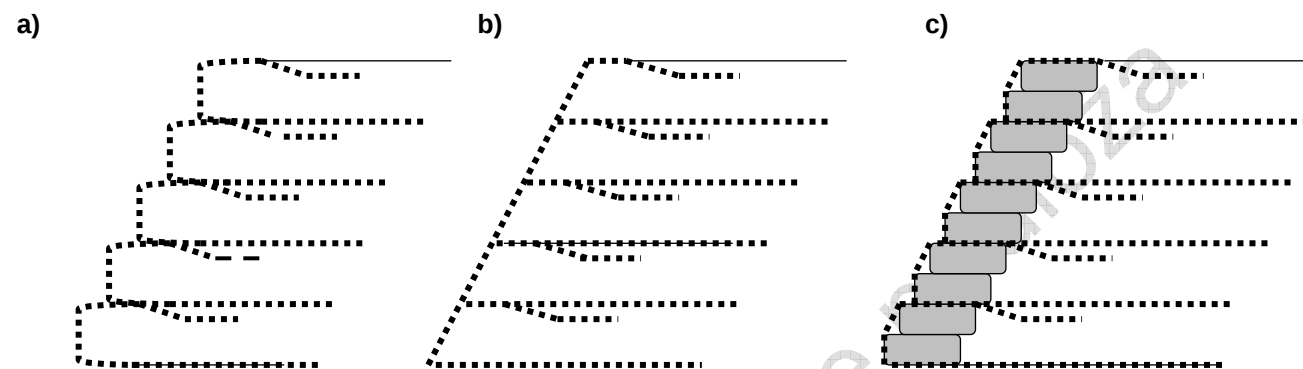
a – geosiatką lub georusztą, b - geokrata

Zasady zbrojenia łagodnej skarpy geokrata widoczne są na rysunku 5.12.b. Geokrata rozkładana jest pasmami o minimalnej szerokości 1,2 m, a jedna warstwa na każdy 1,0 m wysokości ma większą szerokość, zależną od nachylenia i wysokości skarpy. Każda warstwa geokraty wypełniana jest materiałem zasypowym, z wyjątkiem komórek znajdujących się na powierzchni skarpy, które wypełniane są ziemią roślinną, stanowiącą podłoże dla określonej roślinności. Rozwiązanie takie stosuje się zazwyczaj w przypadku konstrukcji tymczasowych, ze względu na niepełne zabezpieczenie geosyntetycznego zbrojenia przed promieniowaniem słonecznym.

5.2.3.2. Skarpy strome

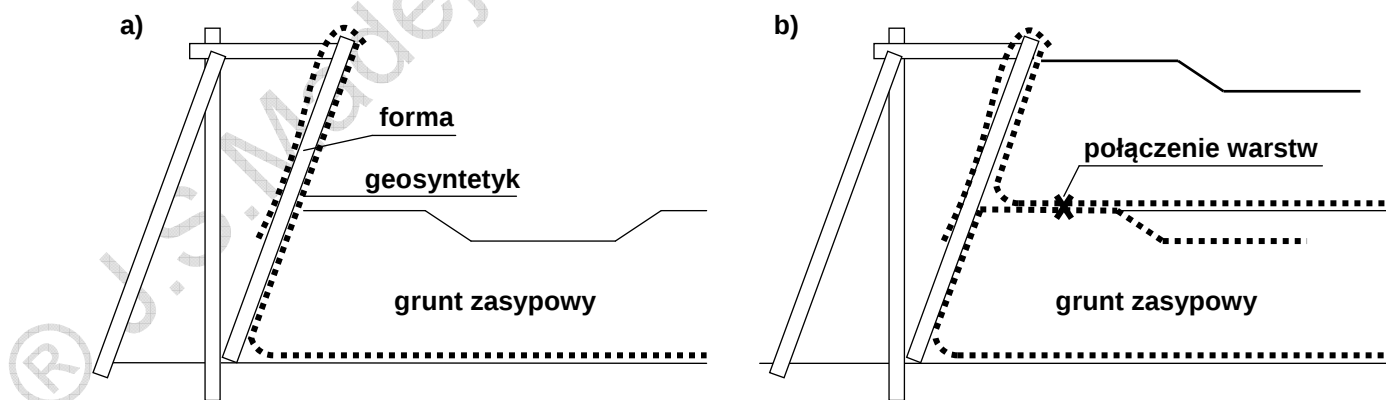
Do zbrojenie skarp stromych, o kącie nachylenia powierzchni skarpy do poziomu mieszczącym się w przedziale $45^\circ < \alpha \leq 70^\circ$, wykorzystuje się zazwyczaj geotekstylię i georuszty. Zbrojenie tych skarp wymaga jednakże zastosowania rozwiązań takich jak

w konstrukcjach oporowych z gruntu zbrojonego, a mianowicie odpowiedniego oblicowania powierzchni skarpy. Nie może to być zabezpieczenie w postaci geomaty lub geokraty, jak w przypadku zboczy łagodnych, lecz oblicowanie o odpowiedniej wytrzymałości a niekiedy sztywności, zapewniające lokalną stateczność skarpy i możliwość przeniesienia sił rozciągających, wzbudzanych w poziomych warstwach zbrojenia. Dodatkową funkcją oblicowania jest ochrona zbrojenia przed promieniowaniem słonecznym. Konstrukcyjnym elementem oblicowania jest zazwyczaj geosyntetyk stosowany jako zbrojenie, a także siatka ze spawanych prętów stalowych, która stanowi jednocześnie formę, umożliwiającą wykonanie stromej powierzchni skarpy.



Rys. 5.13. Schemat oblicowania powierzchni skarpy z geosyntetyku
a – powierzchnia schodkowa, b – powierzchnia płaska, c – powierzchnia nieregularna

Odpowiednie nachylenie powierzchni skarpy uzyskuje się za pomocą jednej z trzech metod, przedstawionych schematycznie na rysunku 5.13. Najstarsza metoda polega na wykonywaniu kolejnych warstw gruntu zbrojonego, których pionowa obudowa tworzy konstrukcję schodkową (rys. 5.13.a). Kolejną metodą jest wykonywanie obudowy pod kątem równym kątowi nachylenia skarpy (rys. 5.13.b). Wreszcie ostatnim rozwiązaniem jest kształtowanie powierzchni skarpy przy użyciu worków wypełnionych gruntem, a następnie owinięcie tych worków geosyntetykiem stanowiącym zbrojenie skarpy (rys. 5.13.c). Każda z tych metod wymaga użycia określonej technologii i określonej obudowy, pełniące wszystkie przypisane jej funkcje. We wszystkich przykładach pokazanych na rysunku 5.13 oblicowanie stanowi geosyntetyk tekstylny lub georuszt.

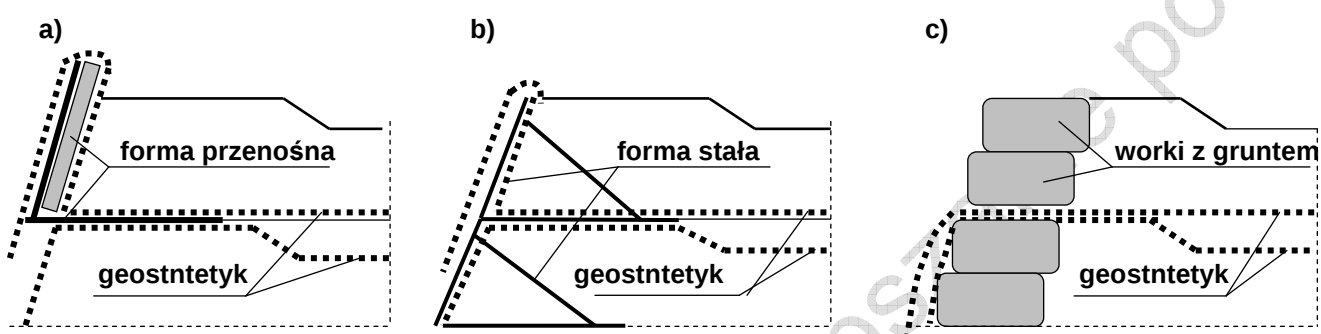


Rys. 5.14. Zasady techniki *wrap-around*
a – wykonywanie pierwszej warstwy, b – wykonywanie kolejnych warstw

Przeważająca większość stromych skarpy zbrojonych geosyntetykiem wykonywana jest techniką owijania gruntu geosyntetykiem (*ang: wrap-around technique*), której zasady pokazano na rysunku 5.14. Arkusz geosyntetyku rozkładany jest na podłożu i na wewnętrznej powierzchni formy. Po rozłożeniu i zagęszczeniu gruntu, do profilu pokazanego na rysunku 5.14.a, geosyntetyk zawijany jest do wnętrza nasypu, a grunt uzupełniany do

poziomu powierzchni warstwy. Następnie rozkładana jest kolejna warstwa geosyntetyku, którą łączy się liniowo z warstwą dolną (rys. 5.14.b). Cały cykl powtarzany jest aż do uzyskania projektowanej wysokości skarpy. Taka sama technika stosowana jest przy wykonywaniu skarpy o powierzchni schodkowej z tą różnicą, że forma jest pionowa i ma wysokość równą pionowej odległości warstw zbrojenia.

Wynika stąd konieczność, dotycząca również skarpy o powierzchni płaskiej, przenoszenia formy w miarę podwyższania nasypu. Służą do tego drewniane formy na ramie stalowej, której poziome wsporniki umieszczane są pomiędzy dwiema warstwami geosyntetyku (rys. 5.15.a). Po wykonaniu warstwy forma jest usuwana i umieszczana wyżej. Najnowszym rozwiązaniem tego problemu, stosowanym zwłaszcza w USA, są formy wykonane ze spawanych prętów stalowych, które pozostają w nasypie, stanowiąc jeden z elementów oblicowania skarpy (rys. 5.15.b). Natomiast metoda kształtowania skarpy nasypu za pomocą worków wypełnionych gruntem ma istotną zaletę, jaką jest możliwość wykonywania zbrojenia bez użycia formy. Funkcję takiej formy pełnią w pewnym sensie worki z gruntem, które umożliwiają zagęszczanie kolejnych warstw zbrojonego gruntu.



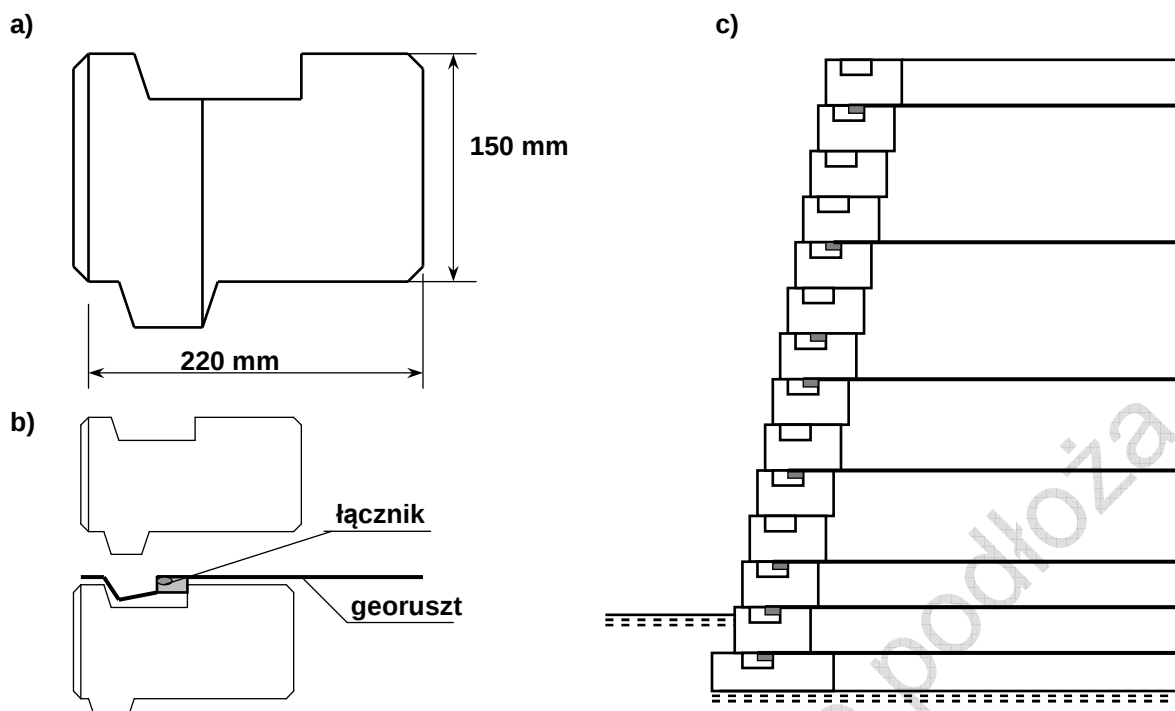
Rys. 5.15. Metody kształtowania stromej skarpy
a –przenośne formy drewniane, b – stałe formy stalowe, c – worki z gruntem

Ze względu na to, że geosyntetyki są wrażliwe na działanie promieniowania słonecznego, zewnętrzną warstwę oblicowania stanowią geomaty lub biomaty, mocowane trwale do obudowy, umożliwiające wzrost i wegetację roślinności, naniesionej na przykład metodą hydroobsiewu.

5.2.4. Zbrojenie konstrukcji oporowych

Konstrukcje oporowe z gruntu zbrojonego różnią się od stromych skarp kątem nachylenia powierzchni ściany do poziomu, który mieści się w przedziale $70^\circ < \alpha \leq 90^\circ$. Z tego względu, technologia wykonywania takich konstrukcji jest identyczna, jak w przypadku zbrojenia stromych skarp, opisanego w rozdziale 5.2.3.2. Jedyna różnica dotyczy zabezpieczenia powierzchni ściany oporowej przed działaniem promieniowania słonecznego., gdyż granicą stosowania metod zabezpieczania stromych skarp za pomocą geomat lub biomat, jest kąt nachylenia powierzchni ściany $\alpha = 80^\circ$. Funkcję tę w przypadku ścian pionowych lub niewiele odchylonych od pionu spełniają prefabrykowane panele, mocowane do obudowy ściany.

Konstrukcją, rozwiązującą wszystkie problemy oblicowania ścian oporowych z gruntu zbrojonego geosyntetykiem jest system modułowy, w którym oblicowanie stanowią prefabrykowane bloczki betonowe (*ang: modular block concrete facing*). Oblicowanie takie zapewnia lokalną stateczność gruntu zasypowego, przeniesienie sił rozciągających, wzbudzanych w zbrojeniu, a także ochronę zbrojenia przed działaniem promieniowania słonecznego. Z tego względu system modułowy jest coraz częściej stosowany w praktyce.



Rys. 5.16. Zasady systemu Tensar Wall TW1
a – podstawowy bloczek, b – sposób blokowania zbrojenia, c – ściana oporowa

Przykładem takiego rozwiązania jest brytyjski system Tensar Wall TW1, którego podstawowym elementem są betonowe bloczki (rys. 5.16.a), o długości 400 mm. Zamocowanie zbrojenia, w postaci polimerowego georusztu, pomiędzy dwiema warstwami bloczków, zapewnia odpowiednie wyprofilowanie górnej i dolnej powierzchni bloczków, a także polimerowe łączniki przytwierdzone do zbrojenia (rys. 5.16.b). Wykonywane w ten sposób oblicowanie nie jest pionowe, ale nachylone do poziomu pod kątem wynoszącym 86° (rys. 5.16.c).

5.3. Włókna rozproszone

Zbrojenie gruntu rozproszonymi włóknami (*ang: soil reinforcement by randomly distributed fibers*), lub grunt zbrojony włóknami (*ang. fiber reinforced soil*), ma historię sięgającą starożytności, kiedy do zbrojenia gruntu używano włókien naturalnych. Nowa era tego rodzaju zbrojenia rozpoczęła się w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku, wraz z rozwojem technologii produkcji tworzyw polimerowych. Termin „grunt zbrojony włóknami” oznacza maszyn gruntowy zawierający rozproszone, dyskretne (nieciągłe) elementy w postaci włókien, które zapewniają ulepszenie mechanicznych właściwości zbrojonego gruntu. Grunt zbrojony włóknami zachowuje się jak materiał kompozytowy w którym włókna, o stosunkowo wysokiej wytrzymałości na rozciąganie, są umieszczone w ośrodku grunтовым. Naprężenia ścinające w gruncie wzbudzają opór na rozciąganie włókna, co z kolei powoduje wzrost wytrzymałości gruntu. Zbrojenie włóknami naśladuje w pewnym sensie działanie korzeni roślin, przyczyniających się do stateczności przypowierzchniowych warstw podłoża gruntowego.

Pierwszym współczesnym zastosowaniem włókien do zbrojenia gruntu były ciągłe nici poliestrowe, mieszane z gruntem niespoistym, znane pod handlową nazwą TexSol, które wykorzystywano do wykonywania konstrukcji oporowych i stabilizacji stromych skarp. Obecnie, grunty zbrojone włóknami rozproszonymi, nazywane kompozytami krótkich włókien i gruntu, są przedmiotem licznych badań, zarówno teoretycznych jak i doświadczalnych. Na podstawie dotychczasowych informacji, można wyróżnić sześć dziedzin stosowania tych kompozytów, którymi są:

- podłoża nawierzchni drogowych,
- ściany oporowe,
- nasypy kolejowe,
- stabilizacja zboczy,
- konstrukcje geotechniczne w strefach wstrząsów sejsmicznych,
- podłoża fundamentów bezpośrednich.

Do zbrojenia gruntów stosowane są dwa rodzaje włókien: naturalne (biologiczne) i syntetyczne (wytworzone przez człowieka).

Do włókien naturalnych zalicza się:

- włókna kokosowe, pochodzące z powłoki dojrzałych orzechów kokosowych,
- włókna sizalowe, otrzymywane z liści rośliny,
- włókna palmowe, uzyskiwane z drewna palm daktylowych,
- włókna jutowe, pobierane z powłoki pnia rośliny,
- włókna ze słomy jęczmiennej.

Długość takich włókien mieści się zazwyczaj w przedziale $10 \div 50$ mm, a w przypadku włókien kokosowych i słomy jęczmiennej dochodzi do 500 mm. Średnica włókna zmienia się w granicach $10 \div 400$ μ m z wyjątkiem słomy jęczmiennej, której średnica osiąga wartość 4 mm. Włókna naturalne, używane głównie do zbrojenia gruntów spoistych, dodawane są w proporcji $0,5 \div 1,0$ % masy gruntu.

Do włókien syntetycznych zalicza się:

- włókna propylenowe (PP), stosowane najczęściej w praktyce,
- włókna poliestrowe (PET),
- włókna polietylenowe (PE), stosowane również w postaci pasków,
- włókna szklane,
- włókna nylonowe,
- włókna z alkoholu poliwinylowego (PVA).

Długość włókien syntetycznych mieści się w przedziale $3 \div 64$ mm, a średnica w granicach $3 \div 150$ μ m. Wyjątek stanowią włókna polietylenowe, których średnica dochodzi do 800 μ m. Włókna te, używane najczęściej do zbrojenia gruntów niespoistych, ale także spoistych, dodawane są w proporcji $1,0 \div 4,0$ % masy gruntu.

Jak wykazują badania doświadczalne, efektem zbrojenia gruntów spoistych włóknami naturalnymi jest umiarkowany wzrost wytrzymałości na ścinanie, wyraźny wzrost wartości wskaźnika CBR, przy jednoczesnym pogorszeniu parametrów zagęszczalności (spadek wartości gęstości objętościowej $\rho_{d,max}$ i wzrost wilgotności optymalnej w_{opt}). Natomiast efektem zbrojenia gruntów niespoistych włóknami sztucznymi jest wyraźny wzrost ich wytrzymałości na ścinanie. Z tego względu zbrojenie gruntu spoistego włóknami stosuje się najczęściej w celu ulepszania podłoża nawierzchni drogowych, a w pozostałych przypadkach używany jest zbrojony grunt niespoisty, który ma największe zastosowanie praktyczne. Właściwości gruntu niespoistego, zbrojonego włóknami zależą od rodzaju gruntu, charakteryzowanego składem uziarnienia i stopniem obtoczenia cząstek, od parametrów zbrojenia, w postaci wymiarów włókien i modułu sprężystości materiału oraz od wzajemnych relacji gruntu i zbrojenia, a zwłaszcza tarcia na powierzchni kontaktu gruntu ze zbrojeniem.

Podsumowaniem wyników dotychczasowych badań jest stwierdzenie, że zbrojenie gruntu krótkimi włóknami stosowane jest w praktyce, w ograniczonym zakresie. Podstawowym problemem technologicznym jest mieszanie gruntu z włóknami, utrudnione zwłaszcza w przypadku gruntów spoistych. Nawet w przypadku gruntów niespoistych, mechaniczne mieszanie z włóknami powoduje ich skręcanie lub tworzenie kulek o mniejszej lub większej średnicy, czego wynikiem jest niejednorodna struktura kompozytu. Jeżeli dodatkowo uwzględnić brak informacji dotyczących tarcia pomiędzy gruntem a włóknami, to szersze stosowanie konstrukcji z gruntu zbrojonego krótkimi włóknami jest dopiero sprawą przyszłości.

6. Słownik terminów występujących w tekście

columns kolumny

- **driven stone columns** kolumny kamienne wbijane
- **geopier** geosłup
- **geotextile encased columns** kolumny w osłonie geotekstylnej
- **grouted stone columns** kolumny kamienne scementowane
- **lime cement columns** kolumny wapienno-cementowe
- **stone columns** kolumny kamienne

column construction wykonawstwo kolumn

- **bottom feed method** metoda podawania materiału od dołu
- **displacement method** metoda przemieszczania gruntu w podłożu
- **replacement method** metoda wymiany gruntu
- **top feed method** metoda podawania materiału od góry
- **Nordic method** metoda nordycka (kolumny wapienno-cementowe)

compaction zagęszczanie

- **blasting compaction** zagęszczanie wybuchami
- **dynamic compaction** zagęszczanie dynamiczne
- **impact compaction** zagęszczanie udarowe
- **impulse compaction** zagęszczanie impulsowe
- **sand compaction piles** zagęszczające pale piaskowe

drains dreny

- **geocomposite drain** geodren, dren geokompozytowy
- **geotextile enclosed sand drains** dreny piaskowe w osłonie geotekstylnej
- **prefabricated band drains** prefabrykowane dreny taśmowe
- **prefabricated cylindrical drains** prefabrykowane dreny rurowe
- **sand drains** dreny piaskowe
- **sandwicks** prefabrykowane dreny piaskowe w osłonie jutowej
- **vertical drains** dreny pionowe

dynamic consolidation konsolidacja dynamiczna

electroosmosis elektroosmoza

facing obudowa, oblicowanie, osłona (konstrukcji z gruntu zbrojonego)

- **flexible facing** obudowa podatna
- **hard facing** obudowa sztywna
- **modular block concrete facing** obudowa modułarna z bloczków betonowych
- **soft facing** obudowa miękka

geosynthetics geosyntetyki

- **electrokinetic geosynthetics** geosyntetyki elektrokinetyczne
- **geocell** geosyntetyk komórkowy, geokrata
- **geogrid** georuszt
- **geomat** geomata
- **geonet** geosiatka
- **geotextile** geosyntetyk tekstylny, geotekstyl

grout materiał wiążący, iniekt

- **cement grout** zaczyn cementowy
- **concrete** beton
- **mortar** zaprawa cementowa

grouting zastrzyki ciśnieniowe

- **compaction grouting** ciśnieniowy zastrzyk zagęszczający
- **hydro-fracture grouting** ciśnieniowy zastrzyk rozpierający

- **intrusion grouting** ciśnieniowy zastrzyk wypełniający
- **jet grouting** iniekcja strumieniowa
- **permeation grouting** ciśnieniowy zastrzyk penetracyjny

improvement ulepszanie

- **ground improvement** ulepszanie podłoża
- **soil improvement** ulepszanie gruntu
- **soil replacement** wymiana gruntu
- **soil strengthening** wzmacnianie gruntu
- **soil treatment** ulepszanie gruntu, wzmacnianie gruntu

micropiles mikropale

- **reticulated piles** pale w siatce zagęszczonej
- **root piles** pale korzeniowe

mixing mieszanie gruntu ze stabilizatorem

- **deep soil mixing** wgłębne mieszanie gruntu
- **dry jet mixing** mieszanie na mokro strumieniem powietrza
- **shallow soil mixing** płytkie mieszanie gruntu, stabilizacja masowa
- **wet-rotary mixing** mechaniczne mieszanie na mokro
- **wet-rotary-jet mixing** mechaniczno-hydrauliczne mieszanie na mokro

reinforced soil structures konstrukcje z gruntu zbrojonego

- **load transfer platform** platforma przenosząca obciążenie, geomaterac
- **mechanically stabilized earth walls** ściany oporowe z gruntu zbrojonego
- **soil mixed walls** ściany z gruntu zmieszanego ze stabilizatorem
- **fill material** materiał nasypowy (zasypowy)
- **wrap-around technique** technika owijania gruntu geosyntetykiem

reinforcement zbrojenie

- **primary slope reinforcement** zasadnicze zbrojenie skarpy
- **secondary slope reinforcement** pomocnicze zbrojenie skarpy
- **soil reinforcement** zbrojenie gruntu
- **soil reinforcement by fibers** zbrojenie gruntu włóknami
- **soil slope reinforcement** zbrojenie skarpy gruntowej

soil nails gwoździe gruntowe

- **drilled and grouted soil nail** gwóźdź gruntowy wiercony i betonowany
- **driven soil nail** gwóźdź gruntowy wbijany lub wwibrowywany
- **launched soil nail** gwóźdź gruntowy wstrzeliwany
- **self-drilling soil nail** gwóźdź gruntowy samowiercący

stabilization stabilizacja

- **electrokinetic stabilization** stabilizacja elektrokinetyczna
- **mass stabilization** stabilizacja masowa, płytkie mieszanie gruntu
- **surface stabilization** stabilizacja powierzchniowa
- **thermal stabilization** stabilizacja termiczna
- ***artificial ground freezing** zamrażanie podłoża
- ***artificial ground heating** spiekanie podłoża
- ***vitrification** witrifikacja, zeszklenie

vibro compaction zagęszczanie vibracyjne

- **vibratory plate** płyta vibracyjna
- **vibratory probe** sonda vibracyjna
- **vibratory roller** walec vibracyjny
- **vibroflot** wibroflot
- **vibroflotation** wibroflotacja

Materiały źródłowe wykorzystane w opracowaniu

Publikacje

1. Bell F.G. – Engineering Treatment of Soils. E&FN Spon, 1993
2. British Standard 8006:1995, Strengthened/reinforced soils and other fills.
3. Chu J., Varaksin S., Ménége P. – Construction process. State of the art report. Proc. of the 17th CSMGE Alexandria, Egipt, 2009
4. Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume I. FHWA-NHI-10-024, US Dept. of Transportation, November 2009
5. Hejazi S.M., Sheikzadeh M., Abtahi S.M., Zadhouh A. – A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. Construction and Building Materials, 30/2012, s. 100-116
6. Jarominiak A. – Lekkie konstrukcje oporowe. WKiŁ, Warszawa 2000
7. Micropile Design and Construction Guidelines. Reference Manual. FHWA NHI-05-039, US Dept. of Transportation, December 2005
8. Mitchell J.K. – Soil improvement. State of the art. Proc. of the 10th ICSMFE, Stockholm, 1981
9. Moseley M.P., Kirsch K. – Ground Improvement. Spon Press, 2004
10. Nordic Guidelines for Reinforced Soils and Fills. Nordic Geosynthetic Group, May 2003
11. Pisarczyk S. – Geoinżynieria. Metody modyfikacji podłoża gruntowego. Oficyna Wydawnicza P.W., Warszawa 2005
12. Shaefer V.R., Mitchell J.K., Berg R.R., Filz G.M., Douglas S.C. - Ground improvement in the 21st century: A comprehensive web-based information system Geotechnical engineering. State of the art and practice. ASCE GeoCongres Oakland, USA, 2012
13. Soil Nails Walls. Geotechnical Engineering Circular No. 7. FHWA0-IF-03-017, US Dept. of Transportation, March 2003
14. Terashi M., Juran I. – Ground improvement – state of the art. Proc. of the Int. GeoEng2000, Melbourne, Australia, 2000
15. Topolnicki M. – Wzmacnianie i uszczelnianie gruntu metodą mieszania in-situ (Soil Mixing). Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 6/2003, s. 385-398
16. Townsend F.C., Anderson J.B. – A compendium of ground modification techniques Florida Department of Transportation, April 2004
17. Wesolowski A., Krzywosz Z., Brandyk T. – Geosyntetyki w konstrukcjach inżynierskich. Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2000
18. SCDOT Geotechnical design manual. Chapter 19 – Ground improvement. The South Carolina Department of Transportation, June 2010
19. Wytyczne wzmacniania podłoża gruntowego w budownictwie drogowym. IBDiM, Warszawa 2002

Prospekty firmowe - [łącza internetowe](#)

1. Dywidag Systems International
www.dywidag-systems.com
 2. Freyssinet Polska
www.freyssinet.pl
 3. Keller Polska, Sp. z o.o.
www.keller.com.pl/technologie
 4. Maccaferri Ltd
www.maccaferri.co.uk
 5. Menard Polska Sp. z o.o.
www.menard.pl
 6. Przedsiębiorstwo Realizacyjne INORA[®], Sp. z o.o.
www.inora.pl
 7. Tenax
www.tenax.net
 8. Tencate Geosynthetics North America
www.tencate.com
 9. Tensar International Ltd
www.tensar.pl
 10. TITAN Polska Sp. z o.o.
<http://www.titan.com.pl/>
-