

Ulepszanie podłoża. Terminologia i klasyfikacja metod

Dr hab. inż. Jerzy S. Madej

Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji

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 są posadawiane na słabym podłożu, a często są wykonywane 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). Duża liczba i różnorodność metod ulepszania podłoża wymagały wprowadzenia nowych terminów i definicji, dotyczących zarówno ogólnych zasad, jak i szczegółowych technik. Analiza publikacji, głównie anglojęzycznych i polskojęzycznych, wskazująca na brak konsekwencji i jednoznaczności w odniesieniu do stosowanej terminologii i klasyfikacji metod, stanowi zasadniczą część niniejszego artykułu. Wynikiem tej analizy jest proponowana klasyfikacja metod ulepszania gruntów przedstawiona w podsumowaniu.

TERMINOLOGIA

Zgodnie z propozycją przedstawioną przez autorów raportu CIRIA C573 [11], a cytowaną w wielu publikacjach, ulepszanie podłoża jest to kontrolowana zmiana stanu, rodzaju lub zachowania materiałów podłoża, której celem jest osiągnięcie odpowiedniej reakcji podłoża na istniejące lub projektowane oddziaływanie środowiska i obiektów budowlanych. Natomiast sam termin „ulepszanie podłoża” nie jest już tak jednoznaczny. Choć niektóre techniki ulepszania gruntów były stosowane od dawna, to dopiero w 1981 roku zagadnienia te stanowiły tematykę jednej z głównych sesji konferencji w Sztokholmie. Tytuł raportu przedstawionego przez Mitchella [10] brzmiał: *Soil improvement*, co można przetłumaczyć jako „ulepszanie gruntu” lub „ulepszanie gruntów”. Już kilka lat później wpro-

wadzono termin *Ground improvement* [27], czyli „ulepszanie podłoża”. Jest on powszechnie stosowany w literaturze anglojęzycznej, co jest związane między innymi z faktem, że taką nazwę nosi Technical Committee 211 ISSMGE, organizujący międzynarodowe sympozja poświęcone tej tematyce (czyli *International Symposium on Ground Improvement*), czy też prestiżowe periodyki, jak wydawany od 1997 roku *Proceedings of the ICE – Ground Improvement*. Tym niemniej w literaturze można nierzadko spotkać publikacje, których autorzy posługują się terminem *soil improvement* [12]. Należy w tym miejscu zauważyć, że w geotechnice francuskiej jest stosowany termin *amélioration des sols*, czyli ulepszanie gruntów [6]. Nie jest to jednakże jedyny termin używany w tej dziedzinie. Niekiedy występuje termin *ground treatment* [11], *treatment of soils* [2] albo *ground modification* [23]. Wyrażenie *treatment* jest tłumaczone na język polski jako „obróbka cieplna, chemiczna”, ale nie ma odpowiednika w polskiej terminologii geotechnicznej. W niektórych materiałach anglojęzycznych można znaleźć wyjaśnienie, że technika *ground treatment* polega na wprowadzeniu do podłoża stabilizatora za pomocą zastrzyków ciśnieniowych, mieszania powierzchniowego lub mieszania wgłębного [13]. Natomiast w podstawowym opracowaniu brytyjskim [11] autorzy wyjaśniają, że termin *ground improvement* może mieć różną interpretację. Przede wszystkim oznacza on cel, a nie proces osiągania tego celu, który to proces jest określany właśnie terminem *ground treatment*. Odpowiednio do tego, metody osiągania tego celu są określane terminami *treatment methods* lub *treatment techniques*. Pomimo tego, we wspomnianym raporcie [11], w którym jest wymienionych osiem ogólnych sposobów ulepszania podłoża, w tytułach poszczególnych rozdziałów występuje termin *improvement*, a nie *treatment*.

Termin *ground modification*, czyli modyfikacja podłoża, jest traktowany niekiedy jako synonim terminu *ground improvement*, chociaż wydaje się, że jest on znaczeniowo bardziej zbliżony do terminu *ground treatment*. Rozbieżności te próbuje wyjaśnić Charles [4], który, zgodnie z zasadami przedstawionymi w raporcie [11], stwierdza, co następuje:

- *ground treatment*, czyli „obróbka” podłoża, jest procesem,
- celem tego procesu jest *ground improvement*, czyli ulepszenie podłoża,
- bezpośrednim wynikiem tego procesu jest *ground modification*, czyli modyfikacja podłoża, oznaczająca zmianę właściwości tego podłoża.

Podsumowując krótki przegląd literatury głównie anglojęzycznej, można stwierdzić, że termin *ground improvement* jest stosowany zazwyczaj w odniesieniu do ogólnych zasad ulepszenia podłoża (z wyjątkiem francuskiego terminu *amélioration des sols*), natomiast w odniesieniu do poszczególnych gruntów lub metod ulepszenia są stosowane terminy *soil improvement methods* lub *soil treatment techniques*, przy czym terminy *methods* i *techniques* są w tym przypadku synonimami.

W polskiej literaturze geotechnicznej termin „ulepszanie podłoża” występuje sporadycznie [1], nieco częściej w drogownictwie [17], gdzie istnieje termin „podłoże ulepszone” [26]. Najczęściej spotykanymi terminami są „wzmacnianie podłoża” [7, 8, 18, 30] i „wzmacnianie gruntu” [22], co jest związane z terminologią normową wprowadzoną w 1998 roku [25]. Termin „wzmacnianie podłoża” był stosowany jednakże już wcześniej, o czym świadczą liczne publikacje cytowane w wytycznych IBDM [29]. Zaskakującym tłumaczeniem terminu *ground improvement* na język polski jest termin „geoinżynieria”, zaproponowany przez Pisarczyka [16], a wykorzystywany przez niektórych autorów [20]. Gdyby przyjąć takie rozwiązanie, to jakie znaczenie miałby angielski termin *geotechnical engineering*?

Brak ujednoliconych czy usystematyzowanych terminów nie jest problemem merytorycznym, ale głównie porządkowym. Przy założeniu, że „wzmacnianie podłoża” należy traktować jako tłumaczenie terminu *ground improvement*, wyrażenia „sposoby stabilizacji i wzmacniania gruntów” [9] czy też „wzmacnianie i uszczelnianie gruntu” [22] będą niepoprawne, gdyż stabilizacja jest jedną z metod wzmacniania, a uszczelnienie jest jednym ze skutków wzmacniania gruntów. Dlatego za uzasadnione należy uznać stosowanie w polskiej geotechnice alternatywnych terminów „ulepszanie podłoża” lub „ulepszanie gruntów”, z jednoczesnym uwzględnieniem klasyfikacji tych metod.

KLASYFIKACJA METOD

Próby stworzenia klasyfikacji metod ulepszenia podłoża wynikały z ich różnorodności. Fundamentalny raport Mitchella [10] z 1981 roku zawierał sześć zasadniczych kategorii ulepszenia podłoża, którymi były: zagęszczanie, konsolidacja, zastrzyki ciśnieniowe, stabilizacja przy użyciu domieszek, stabilizacja termiczna i zbrojenie gruntu. Modyfikacje tej klasyfikacji były związane z rozwojem i rozpowszechnianiem się metod ulepszenia gruntów, zwłaszcza w krajach azjatyckich (Japonia, Chiny, Indie). Dlatego też klasyfikacja japońska stanowiła podstawę propozycji Terashiego i Jurana [21], która do klasyfikacji Mitchella [10] wprowadzała dwie dodatkowe kategorie: wymianę gruntu słabego na mocny i metody różne, polegające na kombinacji metod wymienionych w pozostałych kategoriach. W Zaleceniach Federalnego Zarządu Autostrad USA (FHWA), cytowane w poradniku SCDOT [28], podaje się klasy-

fikację zawierającą siedem kategorii metod ulepszenia podłoża, wśród których nową kategorią jest zmniejszanie obciążenia poprzez zastosowanie lekkich materiałów nasypowych. Nietypowa klasyfikacja jest stosowana w geotechnice francuskiej [6]. Wyróżnia ona tylko dwie kategorie metod ulepszenia gruntów, a mianowicie: ulepszenie gruntu rodzimego w podłożu, poprzez zagęszczanie, konsolidację, zamrażanie gruntów i zastrzyki ciśnieniowe oraz ulepszenie gruntów za pomocą pionowych wkładek, w postaci różnego rodzaju kolumn.

Na nieco odmiennych kryteriach systematyki jest oparta szczegółowa klasyfikacja, przedstawiona przez Chu i współautorów [5], a przyjęta przez Technical Committee 211 ISSMGE, zawierająca pięć zasadniczych kategorii ulepszenia podłoża, wraz z przypisanymi do nich metodami i zasadami ich działania. Kategorie te mają następujący zakres:

- A. Ulepszenie podłoża utworzonego z gruntów niespoistych lub materiałów nasypowych bez stosowania domieszek. Obejmuje wszystkie metody zagęszczania dynamicznego.
- B. Ulepszenie podłoża utworzonego z gruntów spoistych bez stosowania domieszek, poprzez wymianę gruntów, konsolidację i elektroosmozę, oraz stabilizację termiczną.
- C. Ulepszenie podłoża za pomocą domieszek i wkładek umieszczanych lub wykonywanych w podłożu. Są to kolumny kamienne, piaskowe w osłonie geotekstylnej i sztywne kolumny przenoszące obciążenie na dolne warstwy podłoża.
- D. Ulepszenie podłoża za pomocą domieszek cementujących grunt. Mieszczą się tu zastrzyki ciśnieniowe, metoda elektrokinetyczna i wszystkie metody mieszania.
- E. Zbrojenie gruntu. Obejmuje zbrojenie geosyntetykami, konstrukcje oporowe z gruntu zbrojonego oraz kotwy i gwoździe gruntowe.

Wreszcie Schaefer i inni [19] przedstawiają syntezę kilku klasyfikacji zawierającą osiem kategorii ulepszenia podłoża:

1. Zagęszczanie obejmujące wszystkie metody dynamiczne, powierzchniowe i głębokie oraz zagęszczające zastrzyki ciśnieniowe.
2. Konsolidacja z użyciem drenów ze wstępnym obciążeniem lub podciśnieniem, a także za pomocą elektroosmozy.
3. Zmniejszanie obciążenia poprzez zastosowanie lekkich materiałów nasypowych.
4. Zbrojenie uwzględniające wszystkie rodzaje zbrojenia.
5. Stabilizacja chemiczna obejmująca zastrzyki ciśnieniowe i wglębne mieszanie gruntów.
6. Stabilizacja termiczna, czyli zamrażanie, spiekanie i wiotryfikacja gruntów.
7. Stabilizacja biotechniczna, w formie roślinności na zboczach i metod mikrobiologicznych.
8. Różne, odnoszące się do oczyszczania gruntów skażonych.

Większość klasyfikacji opiera się na schemacie przyjętym przez Mitchella [10], gdzie w poszczególnych kategoriach są

Na podstawie przeprowadzonej analizy stosowanej terminologii i klasyfikacji metod ulepszania podłoża można przedstawić następujące propozycje:

1. Wszystkie metody ulepszania podłoża, z wyjątkiem zbrojenia, umieścić w jednej grupie, określonej terminem „wzmacnianie podłoża”, który odpowiadałby angielskiemu terminowi *soil treatment* lub *ground treatment*. Odpowiednio do klasyfikacji Chu [5], znalazłyby się tu dwie następujące kategorie wzmacniania podłoża:
 - a) wzmacnianie poprzez zmianę stanu, odpowiadające angielskiemu terminowi *ground improvement without admixtures*, z podziałem na grunty niespoiste, spoiste oraz organiczne,
 - b) wzmacnianie poprzez zmianę składu, odpowiednio do angielskiego terminu *ground improvement with admixtures*.

Tabl. 1. Klasyfikacja metod ulepszania gruntów

Kategoria		Metoda ulepszania
1.a. Wzmacnianie podłoża 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 wody w porach ▶ elektroosmoza
	grunty spoiste i niespoiste	▶ wałowanie ▶ piaskowe pale zagęszczające ▶ stabilizacja termiczna: – zamrażanie – spiekanie – wityfikacja
1.b. Wzmacnianie podłoża 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 podłoża (<i>in situ</i>)		▶ pionowe kolumny: – kamienne – w osłonie geotekstylnej – wykonywane metodą wgłębego mieszania ▶ mikropale ▶ gwoździe gruntowe
2.b. Konstrukcje z gruntu zbrojonego		▶ zbrojenie metalowe ▶ zbrojenie geosyntetyczne ▶ zbrojenie rozproszone

zgrupowane metody o podobnej technologii czy podobnych efektach, bez wyraźnego rozróżnienia rodzaju ulepszanego gruntu. Wyjątkiem od tej zasady jest konsolidacja (gruntów spoistych) i zagęszczanie (gruntów niespoistych). Natomiast klasyfikacja Chu [5] zawiera dwie kategorie metod zależnych od rodzaju gruntu, niezależnie od stosowanej technologii ulepszania. Drobnym wyjątkiem, znajdującym się w klasyfikacjach amerykańskich [19] i [28] jest zmniejszanie obciążenia podłoża, traktowane jako jedna z metod jego ulepszania. Mniejsze wątpliwości budzi ujęcie w klasyfikacji Schafera [19] roślinności na zboczach, jako metody ulepszania podłoża.

Natomiast zasadnicze różnice są związane z kategorią metod określanych terminem „zbrojenie podłoża”. W klasyfikacji Mitchella [10] jest to kategoria nr 6 obejmująca wszystkie ówczesne rodzaje zbrojenia. Podobnie jest w klasyfikacji Terashiego i Jurana [21], gdzie metody te znajdują się w kategorii nr 7. W klasyfikacji FHWA [28] kategoria nr 4 obejmuje tylko zbrojenie za pomocą kolumn kamiennych wykonywanych różną technologią. Natomiast klasyfikacja Chu [5] umieszcza zbrojenie gruntu w ostatniej kategorii E obejmującej zbrojenie geosyntetykami, kotwami i gwoździami gruntowymi oraz konstrukcje oporowe z gruntu zbrojonego. W grupie tej nie ma kolumn, które znajdują się w kategorii C jako pionowe wkładki w podłożu, przenoszące obciążenie zewnętrzne na dolne warstwy. Ponadto w tej klasyfikacji zbrojenie nie jest formalnie traktowane jako ulepszanie podłoża, w odróżnieniu od pozostałych czterech grup. Podobna sytuacja jest w klasyfikacji francuskiej [6], gdzie wszystkie kolumny znajdują się w kategorii metod ulepszania gruntów za pomocą pionowych wkładek. Wreszcie w klasyfikacji Schafera [19] wszystkie rodzaje zbrojenia gruntu, łącznie z konstrukcjami z gruntu zbrojonego, stanowią czwartą kategorię metod ulepszania podłoża.

W klasyfikacji metod zbrojenia gruntu są uwzględniane dwie kategorie [3, 15]. Pierwsza kategoria to zbrojenie konstrukcyjne, które jest umieszczane w gruncie w trakcie wykonywania konstrukcji geotechnicznych, takich jak: ściany oporowe, przyczółki mostów lub wiaduktów, czy nasypy ze zbrojonymi skarpami. W tym przypadku najczęściej jest stosowane zbrojenie metalowe i geosyntetyczne, a niekiedy tak zwane zbrojenie rozproszone, na przykład w postaci włókien [14]. Druga kategoria to zbrojenie *in situ*. W tym przypadku zbrojenie jest umieszczane w rodzimym gruncie podłoża, przy mniejszym lub większym naruszeniu struktury tego gruntu. Do tego rodzaju zbrojenia zalicza się: gwoździe gruntowe, mikropale przenoszące osiowe obciążenia ściskające, a także pionowe kolumny lub pale przenoszące obciążenia ścinające.

Przy omawianiu zasad działania gruntu zbrojonego wymienia się jedynie warunek współpracy zbrojenia z gruntem rodzimym lub nasypowym. Natomiast nie podaje się oczywistego elementu, że tylko część obciążenia jest przenoszona przez zbrojenie, a część jest przenoszona przez grunt. Nie są to tylko obciążenia rozciągające, jak w przypadku zbrojenia geosyntetykami, ale ścinające (w przypadku gwoździ gruntowych), a także ściskające (w przypadku mikropali). Takie same warunki spełnia zbrojenie kolumnami, zwłaszcza podatnymi (kolumny kamienne i w osłonie geotekstylnej) i półsztywnymi (kolumny wykonywane metodą wgłębego mieszania gruntu). Kolumny przenoszą obciążenia ściskające i ścinające, ale część całkowitego obciążenia przenosi grunt rodzimy. Nie ma zatem podstaw do tego, aby tych kolumn nie zaliczać do kategorii zbrojenia gruntu lub podłoża.

2. Ulepszanie gruntu za pomocą zbrojenia podzielić na dwie kategorie w zależności od sposobu umieszczania zbrojenia, a mianowicie:
 - a) zbrojenie podłoża (ang. *ground reinforcement*) lub zbrojenie *in situ* (ang. *reinforcement in situ*).
 - b) zbrojenie gruntu (ang. *soil reinforcement*) lub konstrukcje z gruntu zbrojonego (ang. *reinforced soil constructions*).

Wybór alternatywnych terminów dotyczących metod zbrojenia gruntu będzie zależał od tego, czy cel wzmacniania i zbrojenia gruntów nazwiemy „ulepszaniem podłoża” (ang. *ground improvement*), czy „ulepszaniem gruntów” (ang. *soil improvement*), jak to przyjęto w geotechnice francuskiej. Termin „ulepszanie podłoża” wyłącza formalnie z klasyfikacji wszystkie konstrukcje z gruntu zbrojonego, posadowione najczęściej na powierzchni podłoża, a nie stanowiące części podłoża. Z tego względu w klasyfikacji Chu [5] tę ostatnią kategorię ulepszania podłoża określono angielskim terminem *earth reinforcement*, oznaczającym dosłownie „zbrojenie ziemi”. Natomiast termin „ulepszanie gruntów” obejmuje zarówno podłoże zbudowane z gruntów, jak i konstrukcje z gruntu zbrojonego, w których jednym z elementów jest grunt. Ten drugi termin przyjęto w proponowanej klasyfikacji przedstawionej w tabl. 1 zawierającej kategorie i metody ulepszania gruntów.

Z propozycji tej widać, że przeważająca większość metod ulepszania gruntów mieści się w kategoriach 1a i 1b określonych terminem „wzmacnianie podłoża”. Taki właśnie termin jest stosowany najczęściej w literaturze polskojęzycznej, chociaż przez większość autorów jest on traktowany jako tłumaczenie angielskiego terminu *ground improvement*. Stosowanie proponowanej terminologii i klasyfikacji, w której wzmacnianie podłoża i zbrojenie podłoża są dwiema kategoriami ulepszania gruntów, pozwoli na uniknięcie cytowanych już uprzednio określeń rodzaju „ulepszanie i uszczelnianie gruntu”, „stabilizacja i wzmacnianie gruntów”, czy też „wzmacnianie gruntu georuszem” [24].

LITERATURA

1. Bartoszek Z., Gryczmański M., Sękowski J.: Ulepszanie podłoża nasypowego poduszką lub warstwą wzmacniającą zbrojoną geomateracem. *Przegląd Budowlany* nr 9/2006, 33-36.
2. Bell F. G.: *Engineering Treatment of Soils*. Wyd. E&FN Spon, UK, 1993.
3. Bruce D. A., Jewell R. A.: *Soil nailing: Application and practice – part 1*, www.geosystem.bruce.
4. Charles J. A.: Ground improvement: the interaction of engineering science and experience-based technology. *Geotechnique* 52, No. 7, 527-532.
5. Chu J., Varaksin S., Méné P.: Construction process. State of the art report. Proc. of the 17th ICSMGE Alexandria, Egipt, 2009.
6. Dhouib A., Magnan J-P., Guilloux A.: Procédés d'amélioration des sols: Historique, méthodes de reconnaissance, applications et données économiques. Symposium International ASEP – GI 2004, vol.2. Presses de l'ENPC/LCPC, Paris 2004, 577-598.
7. Gajewska B.: Nieznormalizowane metody wzmacniania podłoża. *Geoinżynieria – drogi, mosty, tunele*, nr 4/2007, 60-64.
8. Cichy W., Cudny M., Dembicki E., Imiołek R.: Wzmacnianie podłoża gruntowego pod nasypami drogowymi. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 3-4/2003, 251-256.
9. Łęcki P., Dojcz P.: Problematyka oraz sposoby stabilizacji i wzmacniania gruntów budowlanych. www.gtprojekt.pl.
10. Mitchell J. K.: Soil improvement: State of the art. Proc. of the 10th ICSMFE, Stockholm 1981.
11. Mitchel J. M., Jardine F.M.: A guide to ground treatment, CIRIA C573, London, 2002.
12. Montoya B. M., Feng K., Shanahan C.: Bio-mediated soil improvement utilized to strengthen coastal deposits. Proc. of the 18th ICSMGE, vol. 1. Paris 2013, 2565-2568.
13. Nicholson Construction Company, Ground Treatment. www.nicholson-construction.com.
14. Pawłowski A., Garlikowski D., Orzeszyna H., Lejcuś K.: Możliwości wykorzystania zbrojenia rozproszonego do poprawy właściwości gruntów. *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich* nr 9/2008. Wyd. PAN oddział w Krakowie, 137-147.
15. Pedley M. J.: The performance of soil reinforcement in bending and shear, www.eng.ox.uk/civil/publications.
16. Pisarczyk S.: *Geoinżynieria. Metody modyfikacji podłoża gruntowego*. Oficyna Wyd. P.W., Warszawa 2005.
17. Rolla S.: Ulepszanie gruntów wbudowywanych w nasyp. *Drogownictwo* nr 8/2001, 248-251.
18. Rzeźniczak J.: Wzmacnianie słabych podłoży. *Geoinżynieria – drogi, mosty, tunele*, Nr1/2007, 34-42.
19. 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.
20. Stryczek S., Gonet A., Wiśniowski R.: Geoinżynierskie metody stabilizacji skarp i zboczy. *Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie*, listopad-grudzień 2008, 78-81.
21. Terashi M., Juran I.: Ground improvement – state of the art. Proc. of the Int. Conf. GeoEng2000, Melbourne, Australia, 2000.
22. Topolnicki M.: Wzmacnianie i uszczelnianie gruntu metodą mieszania in-situ (Soil Mixing). *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 6/2003, 385-389.
23. Townsend F.C., Anderson J. B.: A compendium of ground modification techniques. Florida Department of Transportation, USA, April 2004.
24. Wesolowski A., Krzywosz Z., Brandyk T.: *Geosyntetyki w konstrukcjach inżynierskich*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2000.
25. PN-B-02481. *Geotechnika. Terminologia podstawowa, symbole literowe i jednostki miar*.
26. PN-S-96012. *Drogi samochodowe. Podbudowa i ulepszone podłoże z gruntu zbrojonego cementem*.
27. Proceedings of the 8th ECSMFE., Improvement of ground, Helsinki 1983.
28. SCDOT Geotechnical design manual. Chapter 19 – Ground improvement. The South Carolina Department of Transportation, USA, June 2010.
29. Wytyczne wzmacniania podłoża gruntowego w budownictwie drogowym. IBDiM, Warszawa 2002.
30. Wzmacnianie podłoża gruntowego i fundamentów budowli. Seminarium IBDiM i PZWFS, Warszawa, 2007.