

dr inż. Agata Kowalewska^{1)*}

ORCID 0000-0002-5819-8430;

dr hab. inż. Mirosław Graczyk¹⁾

ORCID 0000-0002-0601-7554

dr inż. Marcin Świtala¹⁾

ORCID 0000-0002-4001-8948

Durability of ground improvement in road construction projects

Trwałość wzmocnień podłoża gruntowego w inwestycjach drogowych

DOI: 10.15199/33.2025.10.03

Abstract: The durability of ground improvement is a key factor determining the long-term performance and safety of road construction projects. This paper presents selected aspects that influence the durability of ground improvement, as well as an overview of the most important reinforcement methods. It also includes a review of international experiences, highlighting differences in the selection of technologies and improvement depths, as well as an analysis of the costs of selected methods in relation to their effectiveness and service life. The findings confirm that material properties, quality of execution, and economic and environmental aspects play a decisive role in ensuring the long-term reliability of applied solutions.

Keywords: soil subgrade; ground improvement; durability; efficiency; road construction

Streszczenie: Trwałość wzmocnień podłoża gruntowego stanowi kluczowy czynnik decydujący o długoterminowej trwałości i bezpieczeństwie inwestycji drogowych. W artykule przedstawiono wybrane aspekty determinujące trwałość wzmocnień podłoża gruntowego oraz przytoczono najważniejsze metody stosowane do jego wzmacniania. Uwzględniono przegląd doświadczeń zagranicznych, wskazujących na różnice w podejściu do doboru technologii i głębokości wzmocnienia, oraz analizę kosztów wybranych metod w odniesieniu do ich efektywności i trwałości eksploatacyjnej. Analiza potwierdza, że zarówno właściwości materiałów, precyzja wykonania, jak i aspekty ekonomiczne oraz środowiskowe decydują o długotrwałej skuteczności wzmocnienia podłoża.

Słowa kluczowe: podłoże gruntowe; wzmacnianie podłoża; trwałość; efektywność; budowa dróg

The durability of ground improvement is a key factor influencing the long-term efficiency and safety of road structures. This article presents the main factors determining the durability of soil reinforcement and discusses selected implementation methods in the context of both domestic and international experience.

The project carried out at the Road and Bridge Research Institute (IBDiM), financed under the RID program, aims to develop updated guidelines for testing, design, and selection of ground improvement technologies under various geotechnical and hydrogeological conditions. It also includes verification of existing and new technologies, particularly for challenging foundation conditions such as landslides, mining areas, and karst terrains.

The durability of reinforcements primarily depends on the accurate recognition of soil and groundwater conditions, the quality of materials, and the correctness of execution. Comprehensive investigations and proper selection of the reinforcement method ensure the long-term and reliable performance of the structure.

Trwałość wzmocnienia podłoża gruntowego stanowi kluczowy czynnik wpływający na długotrwałą efektywność i bezpieczeństwo konstrukcji drogowych.

W artykule przedstawiono główne czynniki determinujące trwałość wzmocnień oraz omówiono wybrane metody ich wykonania w kontekście doświadczeń krajowych i zagranicznych. Projekt realizowany w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów (IBDiM), finansowany w ramach programu RID, ma na celu opracowanie aktualnych wytycznych dotyczących badań, projektowania i doboru technologii wzmocnienia podłoża w różnych warunkach gruntowo-wodnych. Obejmuje również weryfikację istniejących i nowych technologii, szczególnie dla trudnych warunków posadowienia, takich jak osuwiska, tereny górnicze czy krasowe. Trwałość wzmocnień zależy przede wszystkim od poprawnego rozpoznania warunków gruntowo-wodnych, jakości materiałów oraz prawidłowego wykonania. Dokładne badania i właściwy dobór metody wzmacniania zapewniają długą i niezawodną pracę konstrukcji.

Ocena warunków gruntowo-wodnych

Jednym z najważniejszych czynników decydujących o skuteczności wzmocnienia podłoża jest prawidłowa ocena warunków gruntowo-wodnych. To od rodzaju gruntów oraz warunków wodnych występujących na terenie inwestycji zależy zaprojektowanie odpowiedniego wzmocnienia podłoża.

Wyniki badań potwierdzają, że brak precyzyjnego rozpoznania i monitoringu podłoża może prowadzić nie tylko do problemów technicznych, lecz także do poważnych zagrożeń środowiskowych i społecznych. Potwierdza to uniwersalny charakter

Identification of Geotechnical and Hydrogeological Conditions

One of the most important factors determining the effectiveness of ground improvement is the proper identification of geotechnical and hydrogeological conditions. Without a thorough and accurate understanding of the subsoil, it is impossible to

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów

^{*)} Correspondence address: agata.kowalewska@ibdim.edu.pl

design an appropriate ground reinforcement system. The design of ground improvement depends directly on the type of soil and the groundwater conditions present within the investment area. Research results confirm that the lack of precise site characterization and monitoring may lead not only to technical problems but also to serious environmental and social hazards. This provides evidence supporting the universal principle that the effectiveness of engineering activities, including ground improvement, largely depends on a reliable assessment of soil and groundwater conditions [1].

Insufficient or uncertain recognition of geotechnical and hydrogeological conditions results in the design of ground reinforcement that is inadequate for the actual site conditions. Consequently, the risk of failure during the operation phase of the road infrastructure increases. This relationship is bidirectional: not only does improper identification of soil conditions affect the safety and durability of the structure, but the road infrastructure itself can also modify the properties of the geotechnical and hydrogeological environment. Studies have shown that materials used in road construction, characterized by higher permeability coefficients than native soils, promote the migration of contaminants into the subsoil [2].

Detailed Guidelines for Subsoil Investigations for Road Construction Purposes [3] were developed as part of the scientific project Modern Methods of Subsoil Investigation in Road Engineering, financed by the National Centre for Research and Development and the General Directorate for National Roads and Motorways under the joint initiative Development of Road Innovations (RID). The aforementioned guidelines were implemented by Order No. 22 of the General Director for National Roads and Motorways, dated June 27, 2019 [4].

The Guidelines [3] are addressed to a wide range of professional groups involved in the investment process. Therefore, participants in this process should use those sections of the document that pertain to their specific role in documenting subsoil conditions.

An important aspect influencing the quality and, consequently, the durability of ground improvement is the identification of the level and nature of the groundwater table, as well as any potential groundwater flow. Particularly hazardous are pressurized groundwater and horizontal water flow, which may cause, for instance, the erosion of concrete columns and piles or prevent proper execution of grouting works. The durability of applied technologies is also affected by the action of water through filtration and variations in hydrogeological conditions (e.g., fluctuations in the groundwater table). Excessive quantities of surface and groundwater, especially in cohesive soils, may lead to softening or liquefaction, resulting in reduced subsoil bearing capacity. The level of both free and confined groundwater significantly affects the properties of soils, particularly cohesive and organic ones.

The chemical aggressiveness of groundwater or the soil itself has a major influence on the durability of reinforcements made of concrete, cement mortar, grout, or cement-treated soil. Chemical compounds associated with the aggressiveness of water and soil can impact the binding processes of stabilizing agents or act directly on materials during their service life.

tezy, że skuteczność działań inżynierskich, w tym wzmocnienia podłoża, w dużej mierze zależy od rzetelnej oceny warunków gruntowo-wodnych [1].

Niedostateczne lub obarczone niepewnością rozpoznanie warunków gruntowo-wodnych skutkuje zaprojektowaniem wzmocnienia podłoża nieadekwatnego do rzeczywistych warunków. W konsekwencji zwiększa się ryzyko wystąpienia awarii w trakcie eksploatacji inwestycji drogowej. Zależność ta ma charakter dwustronny: nie tylko błędna ocena warunków gruntowych wpływa na bezpieczeństwo i trwałość inwestycji, ale także infrastruktura drogowa może modyfikować właściwości środowiska gruntowo-wodnego. Z badań wynika, że materiały zastosowane w konstrukcji drogi, charakteryzujące się większym współczynnikiem filtracji niż grunty rodzime, sprzyjają migracji zanieczyszczeń w głąb podłoża [2].

Szczegółowe „Wytyczne badań podłoża budowlanego na potrzeby budownictwa drogowego” [3] zostały opracowane w ramach projektu naukowego *Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie* sfinansowanego ze środków NCBiR oraz GDDKiA w ramach wspólnego przedsięwzięcia Rozwój Innowacji Drogowych (RID). Przedmiotowe wytyczne zostały wprowadzone zarządzeniem Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad (nr 22) z 27 czerwca 2019 r. [4]. Wytyczne... [3] są skierowane do wielu grup zawodowych biorących udział w procesie inwestycyjnym. W związku z tym, uczestnicy tego procesu powinni korzystać z tych elementów dokumentu, które dotyczą ich roli w dokumentowaniu podłoża budowlanego.

Ważnym aspektem wpływającym na jakość, a tym samym trwałość wzmocnienia podłoża jest rozpoznanie poziomu i charakteru zwierciadła wód gruntowych oraz jej ewentualnego przepływu w gruncie. Szczególnie niebezpieczne są wody pod ciśnieniem oraz poziomy przepływ wody, które mogą powodować np. rozmycie betonu kolumn i pali lub uniemożliwić wykonanie iniekcji. Na trwałość zastosowanych technologii ma również wpływ oddziaływanie wody: filtracja, zmiana warunków wodnych (zmiana poziomu wody gruntowej). Nadmierna ilość wody opadowej i gruntowej, zwłaszcza w przypadku gruntów spoi- stych, może prowadzić do ich uplastycznienia lub upłynnienia, co zmniejsza nośność podłoża. Poziom zwierciadła wody gruntowej, zarówno swobodnego, jak i napiętego, ma istotny wpływ na właściwości gruntów, w szczególności spoi- stych i organicznych.

Agresywność chemiczna wody gruntowej lub gruntu ma duży wpływ na trwałość wzmocnienia wykonanego z betonu, zaprawy cementowej, iniektu lub cementogruntu. Związki chemiczne związane z agresywnością wody i gruntu mogą oddziaływać na wiązanie spoiw lub bezpośrednio na materiały w okresie użytkowania.

Wpływ głębokości i rodzaju wzmocnienia na jego trwałość

Głębokość i rodzaj wzmocnienia podłoża gruntowego z uwzględnieniem sytuacji geotechnicznej wpływa istotnie na trwałość zastosowanego rozwiązania technologicznego. Na trwałość rozwiązania wpływają również czynniki zewnętrzne, do których należą obciążenia, jakie będą oddziaływały na pod- łożo gruntowe.

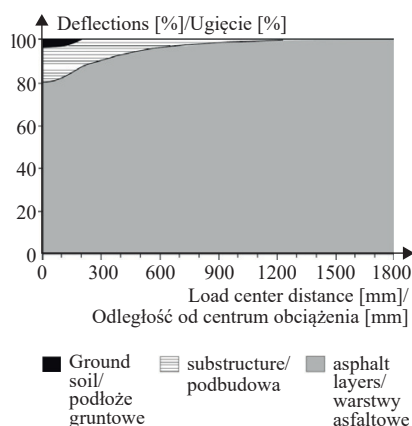
Influence of Depth and Type of Ground Improvement on the Durability of the Applied Technological Solution Considering the Type of Reinforced Subsoil

The depth and type of ground improvement, taking into account the geotechnical conditions, have a significant impact on the durability of the applied technological solution. The durability of the system is also influenced by external factors that must be considered during the design phase. These external influences primarily include the loads to which the subsoil will be subjected.

The bearing capacity of the subsoil has a substantial effect on the durability of the pavement structure, particularly in the case of roads subjected to heavy truck traffic, as well as in situations where pavement structures on local roads of lower traffic categories are overloaded. The subsoil and the interacting groundwater affect the deflections of the pavement structure, which vary depending on the thickness, stiffness, and Poisson's ratio of the individual pavement layers and the subgrade soil.

Figure presents an example illustrating the influence of individual pavement components on surface deflections under a heavy vehicle load. The analysis indicates that the subgrade soil plays a decisive role in determining the magnitude of maximum surface deflections. The influence of subgrade bearing capacity on the total surface deflection of the pavement under load is approximately 80%.

Pavement deflections are measured using a Falling Weight Deflectometer (FWD). These are point measurements based on the dynamic dropping of a load of a specified mass (maximum impact force of 120 kN [5]) onto a circular loading plate with a diameter of 0.30 m resting on the pavement surface. During the measurement, the deflections of the pavement are recorded using nine geophones mounted on a measuring beam. The test allows for the determination of the deflection bowl of the pavement structure and the subsoil. Based on the obtained deflection results, as well as the known thicknesses of the pavement layers and the characteristics of the materials from which they are made, the elastic moduli of the individual structural layers are determined. The elastic modulus is the fundamental parameter in mechanistic analyses of the durability (bearing capacity) of road pavement structures [5].



Influence and contribution of pavement structural layers to deflections measured with the FWD device [6]

Wpływ i udział warstw konstrukcyjnych na ugięcia nawierzchni określone w badaniu urządzeniem FWD [6]

Nośność podłoża gruntowego ma istotny wpływ na trwałość konstrukcji nawierzchni, szczególnie w przypadku dróg obciążonych dużym ruchem pojazdów ciężarowych oraz przeciążenia konstrukcji nawierzchni na drogach lokalnych o niskiej kategorii ruchu. Podłoże gruntowe oraz oddziałująca woda gruntowa mają wpływ na ugięcia konstrukcji nawierzchni, które zmieniają się wraz ze zmianą grubości, sztywności i współczynnika Poissona poszczególnych warstw konstrukcyjnych i podłoża gruntowego.

Na rysunku przedstawiono wpływ obciążenia od pojazdu ciężarowego na ugięcie nawierzchni. Z analizy wynika, że podłoże gruntowe ma decydujący wpływ na wielkość maksymalnego ugięcia nawierzchni. Wpływ nośności podłoża na ugięcie całkowite nawierzchni pod obciążeniem wynosi ok. 80%.

Ugięcie nawierzchni mierzone jest za pomocą ugięciomierza dynamicznego FWD (ang. Falling Weight Deflectometer). Są to pomiary punktowe, polegające na zrzucie dynamicznym obciążenia o ustalonej masie (maksymalny nacisk 120 kN [5]) na płytę naciskową o średnicy 0,30 m, spoczywającą na nawierzchni. Ugięcie nawierzchni jest rejestrowane za pomocą dziewięciu geofonów zamontowanych na listwie pomiarowej. Badanie pozwala na pomiar czaszy ugięć konstrukcji nawierzchni oraz podłoża. Na podstawie uzyskanych wyników ugięć, znajomości grubości warstw konstrukcyjnych oraz charakterystyki materiałów, z których są wykonane, określa się moduł sprężystości poszczególnych warstw konstrukcyjnych, który jest podstawowym parametrem w analizach trwałości (nośności) konstrukcji nawierzchni drogowych [5].

Przegląd technologii wzmacniania podłoża

Właściwe dobranie metody wzmacniania podłoża decyduje o trwałości np. inwestycji drogowej. Odpowiednio wykonana analiza i implementacja rozwiązań pozwala zachować bezpieczeństwo obiektów i nawierzchni drogowych przy jednoczesnym optymalnym wykorzystaniu zasobów.

Niezbędnymi elementami poprzedzającymi dobór metody wzmocnienia podłoża jest analiza warunków gruntowo-wodnych (stan i rodzaj gruntu, parametry fizyczne i mechaniczne gruntu, poziom zwierciadła wody gruntowej), w tym rozpoznanie nietypowych zjawisk geologicznych mogących pojawić się na danym obszarze. Istotny wpływ na dobór wzmocnienia ma również rodzaj obiektu, który będzie budowany, sposób, w jaki będzie on przekazywał obciążenie na ośrodek gruntowy oraz późniejsza jego eksploatacja.

W praktyce najczęściej wykorzystywane są następujące technologie wzmacniania podłoża:

- wymiana gruntu;
- kompensacja obciążenia działającego na podłoże z zastosowaniem materiałów lekkich;
- zbrojenie podstawy nasypu;

Groups of Ground Improvement Technologies

The proper selection of a ground improvement method is crucial in road construction projects. A well-conducted analysis and the implementation of suitable solutions ensure the safety of structures and road pavements while enabling the optimal use of available resources.

Essential preliminary steps in selecting a ground improvement method include the analysis of geotechnical and hydro-geological conditions (soil type and condition, physical and mechanical parameters, groundwater level), as well as the identification of atypical geological phenomena that may occur within the project area. The type of structure to be built, the manner in which it transmits loads to the soil medium, and its subsequent operating conditions also have a significant influence on the choice of reinforcement method.

In practice, the most commonly used ground improvement technologies include: soil replacement, load compensation using lightweight materials, embankment base reinforcement, embankments with geosynthetic mattresses or layers without deep reinforcement, dynamic compaction, deep compaction, surface stabilization with the addition of supplementary materials, consolidation, deep reinforcement using granular materials with consolidation, deep reinforcement with rigid columns incorporating deformable elements, mixed methods and working platforms.

For each applied ground improvement technology, testing of the materials used is of key importance to verify whether they meet the specified requirements. The completed ground reinforcement must also comply with the conditions defined in the design documentation, which necessitates quality control of the executed works.

The durability of a given ground improvement technology is influenced by numerous factors. To properly assess it, it is recommended to verify the quality of input materials, perform acceptance testing, conduct post-construction monitoring, and carry out pavement bearing capacity tests as part of both acceptance and periodic inspections. The periodic measurements should include, during the first year after commissioning, deflection tests on the right lane in the right wheel path, with particular attention to transition zones and culvert areas. Surface evenness should also be evaluated through both acceptance and routine testing procedures.

Review of International Experience

Foreign experience indicates that the use of deeper ground reinforcement, incorporating larger quantities of binding agents, enhances durability by improving resistance to water and frost action and, most importantly, by reducing deflections of pavement structural layers under vehicle loads.

French practice demonstrates that an effective solution involves the construction of a load-bearing platform within the native soil, capable of supporting construction traffic while maintaining a constant bearing capacity consistent with the design service life of the pavement structure. The bearing capacity of such a platform ranges from 50 to 200 MPa. The platform is typically constructed by stabilization with lime, or lime followed by cement. The thickness of the platform reaches up to 50 cm when both lime and cement are used, 70 cm with lime only, and up to 80 cm without any binder. The permissible deflections on a platform stabilized with lime and cement—measured with a Benkelman Beam—range from 0.5 to 0.8 mm [7].

In Spain, the thickness of ground reinforcement, usually constructed in two layers, can reach up to 60 cm. For higher traf-

- nasypy z materacami lub warstwami geosyntetycznymi bez wzmocnienia wgłębnego;
- dogęszczanie dynamiczne;
- dogęszczanie wgłębne;
- stabilizacja powierzchniowa z wprowadzaniem dodatkowych materiałów;
- konsolidacja;
- wzmocnienie wgłębne z materiałów sypkich z konsolidacją;
- wzmacnianie wgłębne kolumnami sztywnymi z elementami podatnymi;
- metody mieszane;
- platformy robocze.

W zastosowaniu każdej z technologii wzmacniania istotne są badania materiałów, z których dane wzmocnienie ma zostać wykonane, pod kątem spełnienia założonych wymagań. Wzmocnienie podłoża musi również spełnić warunki określone w projekcie, w związku z tym należy przeprowadzić kontrolę jakości wykonanych robót.

W celu określenia trwałości technologii wzmocnienia podłoża rekomenduje się sprawdzenie jakości materiałów wejściowych, wykonanie badań odbiorowych, prowadzenie monitoringu powykonawczego, wykonanie badań nośności nawierzchni w ramach badań odbiorczych oraz badań okresowych: w pierwszym roku od oddania na prawym pasie w prawym śladzie koła, ze szczególnym uwzględnieniem stref przejściowych oraz okolic przepustów, a także badań równości nawierzchni jako odbiorowych i okresowych.

Przegląd doświadczeń zagranicznych

Z doświadczeń zagranicznych wynika, że stosowanie głębszego wzmocnienia, z większą ilością środków wiążących pozwala osiągnąć większą trwałość przez zwiększoną odporność na oddziaływanie wody i przemarzanie, a przede wszystkim mniejsze ugięcie od obciążenia pojazdami na powierzchni warstw konstrukcyjnych nawierzchni drogowej.

Doświadczenia francuskie pokazują, że właściwym rozwiązaniem jest wykonanie w gruncie rodzimym platformy nośnej, która jest w stanie przenieść ruch technologiczny oraz zachować stałą nośność powiązaną z okresem trwałości konstrukcji nawierzchni drogi. Nośność platformy wynosi 50÷200 MPa. Platformę wykonuje się przez stabilizację wapnem lub wapnem i następnie cementem. Grubość platformy z dodatkiem wapna i cementu dochodzi do 50 cm, a z dodatkiem tylko wapna 70 cm, natomiast bez dodatku spoiwa do 80 cm. Dopuszczalne ugięcie platformy stabilizowanej wapnem i cementem mierzone Belką Belkelmana wynosi 0,5÷0,8 mm [7].

W Hiszpanii grubość wzmocnienia podłoża realizowanego w dwóch warstwach dochodzi do 60 cm. Wymagany moduł wtórny E_2 w przypadku wyższych kategorii ruchu to 160 MPa. Przy uwarstwionym podłożu przyjmuje się do oceny nośność najsłabszego rodzaju gruntu z wszystkich warstw, chyba że warstwa nośna w podłożu ma minimalną grubość 1 m, to wówczas można przyjąć rodzaj podłoża wynikający z tej warstwy [8].

W Wielkiej Brytanii maksymalna grubość warstw wzmacniających podłoże gruntowe w przypadku zastosowania mie-

fic categories, the required secondary modulus of deformation (E_2) is 160 MPa. In the case of stratified subsoils, the bearing capacity group is determined by the weakest soil layer, unless a bearing layer at least 1 m thick exists, in which case the classification is based on that layer [8].

In the United Kingdom, the maximum thickness of soil improvement layers reaches 45 cm for unbound mixtures and 34 cm for bound mixtures of class C3/4 or C5/6. For such reinforced subgrades, the expected modulus of deformation, according to the British method, is 100 MPa [9]. Soil replacement to a depth of 0.5–1.0 m is recommended when the California Bearing Ratio (CBR) is below 2.5%. In other cases, in-situ binder stabilization or reinforcement with geosynthetics is commonly applied [10].

In Germany, three main methods are used for reinforcing weak subgrades: mixing native soils with aggregates such as sand or gravel, partial or complete soil replacement, and geotechnical reinforcement methods. The most common approaches involve soil stabilization with hydraulic binders or lime, as well as mechanical stabilization. The required compressive strength for soils and mixtures stabilized with hydraulic binders is 6 MPa, while the minimum modulus of deformation (E_2) must exceed 45 MPa [11].

In summary, foreign practices employ ground improvement techniques of comparable or greater thickness and bearing capacity than those typically used in Poland. The thickness of reinforcement layers may reach up to 80 cm, and the expected bearing capacity of the improved subgrade can be as high as $E_2 \geq 200$ MPa.

Efficiency and Durability Versus Costs of Selected Ground Improvement Methods

An analysis of the literature on ground improvement methods, with particular emphasis on the cost aspects of applied structural solutions, has allowed the identification of several key factors related to the economic efficiency of implemented projects. **The costs of ground improvement methods depend on numerous variables, including: type of soil, depth of improvement, location and site conditions, as well as of environmental impact and regulatory requirements [12].**

Below, Table 1 presents a comparison of the costs of selected ground improvement methods based on the analyzed studies. The table also includes an assessment of their efficiency and durability, as well as remarks concerning their applicability in road construction.

The data presented in the table enable an analysis of the economic viability of individual technologies and may be useful in making investment decisions. The most expensive methods, such as pile foundations and vacuum consolidation, offer the highest stability but are associated with high costs due to the complexity of the technology and the need for advanced equipment. These methods are most commonly used in difficult ground conditions, where other approaches do not provide sufficient stability. They exhibit very high durability, which translates into long-term savings in maintenance and repair costs [19].

Medium-cost technologies, such as rapid impact compaction and gravel columns, represent a compromise between cost and

szanki niezwiązanej dochodzi do 45 cm, a mieszanki związanej C3/4 lub C5/6 do 34 cm. Oczekiwany moduł odkształcenia wzmocnionego podłoża wg metody brytyjskiej wynosi 100 MPa [9]. Wymiana gruntu na głębokości 0,5 m÷1 m zalecana jest w sytuacji, gdy kalifornijski wskaźnik nośności $CBR < 2,5\%$, w innych przypadkach stosowana jest m.in. stabilizacja spoiwami na miejscu lub zbrojenie geosyntetykami [10].

W Niemczech wykorzystywane są trzy sposoby wzmocniania słabego podłoża gruntowego: wymieszanie gruntu rodzimego z kruszywem typu piasek czy pospółka; częściowa lub całkowita wymiana gruntu; metody geotechniczne. Najczęściej stosowane są metody wzmocniania gruntów przez stabilizację spoiwami hydraulicznymi lub wapnem albo przez stabilizację mechaniczną. Wymagana wytrzymałość na ściskanie gruntów i mieszanek związanych spoiwami hydraulicznymi wynosi 6 MPa, natomiast wymagany minimalny moduł odkształcenia $E_2 > 45$ MPa [11].

Podsumowując, za granicą stosowane są wzmocnienia gruntów o podobnej lub większej grubości i nośności niż w Polsce. Grubość wzmocnienia dochodzi do 80 cm, a oczekiwana nośność wzmocnionego podłoża może wynosić nawet $E_2 \geq 200$ MPa.

Efektywność i trwałość a koszty wybranych metod wzmocniania podłoża

Analiza literatury dotyczącej metod wzmocniania podłoża, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki kosztów zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego, pozwoliła na wyróżnienie kilku kluczowych aspektów związanych z efektywnością ekonomiczną realizowanych inwestycji. **Koszty metod wzmocniania podłoża zależą m.in. od: rodzaju gruntu; głębokości wzmocnienia; lokalizacji i warunków terenowych; wpływu na środowisko i wymagania regulacyjne [12].**

W tabeli porównano koszty wybranych metod wzmocniania podłoża na podstawie analizowanych prac. Dokonano oceny ich efektywności i trwałości oraz określono uwagi dotyczące ich zastosowania w budownictwie drogowym.

Dane w tabeli pozwalają na analizę ekonomicznej opłacalności poszczególnych technologii i mogą być przydatne przy podejmowaniu decyzji inwestycyjnych. Najdroższe metody, jak fundamenty palowe czy konsolidacja próżniowa, gwarantują największą stabilność, ale ich koszty są duże, ze względu na złożoność technologii oraz konieczność użycia zaawansowanego sprzętu. Najczęściej stosowane są w trudnych warunkach gruntowych, gdzie inne metody nie zapewniają wystarczającego efektu. Wykazują bardzo dużą trwałość, co przekłada się na długoterminowe oszczędności związane z utrzymaniem i konserwacją [19].

Technologie o średnich kosztach, jak zagęszczanie impulsowe czy kolumny żwirowe, stanowią kompromis między kosztem a efektywnością – ich koszty są umiarkowane i w wielu przypadkach zapewniają dobrą stabilność gruntu. Dla przykładu, zagęszczanie impulsowe sprawdza się w przypadku gruntów piaszczystych i jest tańszą alternatywą dla fundamentów palowych. Kolumny żwirowe są z kolei powszechnie stosowane w projektach infrastrukturalnych i umożliwiają redukcję kosztów nawet o 40% w porównaniu z tradycyjnymi fundamentami palowymi. W opracowaniu [13], wykazano, że

Cost intensity of selected ground improvement methods considering their effectiveness and durability [13÷18]*Kosztochłonność wybranych metod wzmacniania podłoża z uwzględnieniem ich efektywności i trwałości [13÷18]*

Method/ Metoda	Cost Level/ Koszty	Efficiency and Durability/ Efektywność i trwałość	Remarks/ Uwagi dotyczące technologii
Pile Foundations/ Pale fundamentowe	Big – costly implementation and materials/ duże – kosztowne wykonanie i materiały	Very high stability, but long construction time/ bardzo duża stabilność, ale długi czas realizacji	Particularly expensive at greater depths and in difficult ground conditions/ szczególnie droga na dużej głębokości i w trudnych warunkach gruntowych
Rapid Impact Compaction (RIC)/ Zagęszczanie impulsowe (Rapid Impact Compaction)	Average – moderate equipment and operational costs/ średnie – umiarkowane koszty sprzętu i operacji	Effective in sandy soils, limited depth of influence/ skuteczna w przypadku gruntów piaszczystych, ograniczona głębokość działania	Applied, among others, in Dubai, where it was considered more economical than pile foundations/ używana m.in. w Dubaju, gdzie uznano ją za bardziej ekonomiczną niż fundamenty palowe
Chemical Stabilization (lime, cement, fly ash)/ Stabilizacja chemiczna (wapno, cement, popioły lotne)	Average/Big – depending on material prices and transport costs/ średnie/duże – zależne od ceny materiałów i kosztów transportu	Good solution for cohesive soils, less effective at greater depths/ dobre rozwiązanie w przypadku gruntów spoiwistych, ale może być mniej efektywne na dużej głębokości	Economical method but characterized by high CO ₂ emissions, which limits its use/ rozwiązanie ekonomiczne, ale duża emisja CO ₂ , co ogranicza jej stosowanie
Gravel Columns/ Kolumny żwirowe	Average – relatively low material costs but requires heavy equipment/ średnie – stosunkowo niewielkie koszty materiałów, ale wymagany ciężki sprzęt	High effectiveness in low-bearing-capacity soils/ duża skuteczność w przypadku gruntów o małej nośności	Significantly cheaper than pile foundations, though less effective in clayey soils/ znacznie tańsza od pali fundamentowych, ale mniej skuteczna w przypadku gruntów gliniastych
Geosynthetics (geogrids, geomembranes)/ Geosyntetyki (geosiatki, geomembrany)	Small/Average – depending on the type of geosynthetic and project scale/ małe/średnie – zależnie od rodzaju geosyntetyków i rozmiaru projektu	Effectiveness depends on soil conditions/ skuteczność zależy od warunków gruntowych	Widely used in road construction as an economical solution/ powszechnie stosowana w budownictwie drogowym jako rozwiązanie ekonomiczne
Vacuum Consolidation/ Konsolidacja próżniowa	Big – requires long implementation time and high precision/ duże – wymaga długiego czasu realizacji i dużej precyzji	Good alternative to traditional stabilization/ dobra alternatywa tradycyjnej stabilizacji	Requires an extended consolidation period/ wymaga długiego okresu konsolidacji

effectiveness. Their costs are moderate, and in many cases they provide satisfactory soil stability. For example, rapid impact compaction is effective in sandy soils and serves as a less expensive alternative to pile foundations. Gravel columns, widely applied in infrastructure projects, can reduce costs by up to 40% compared with traditional pile foundations. According to study [13], gravel columns and rapid impact compaction are more cost-effective in the long term than pile foundations, primarily due to the absence of maintenance requirements.

The least expensive methods, such as geosynthetics, are advantageous in road construction projects; however, their effectiveness in improving soil bearing capacity may be limited. As noted in analysis [17], they can reduce construction costs by up to 50%, but they are not suitable for all soil types – their performance is restricted in soils with very low bearing capacity.

The selection of an appropriate method should balance initial investment costs with long-term savings, which is crucial for the optimization of construction projects. The use of digital design technologies (e.g., BIM modeling in geotechnics) enables more precise cost optimization already at the planning stage [17].

Summary

The durability of applied ground improvement methods is primarily influenced by the investigation of geotechnical and hydrogeological conditions, as well as by the quality of the design and construction processes. A well-designed and properly executed reinforcement system, based on thorough site investigations, ensures long-term and reliable performance of the

kolumny żwirowe i zagęszczanie impulsowe są bardziej ekonomiczne w dłuższym okresie w porównaniu z fundamentami palowymi, ze względu na brak kosztów ich konserwacji.

Najtańsze metody, np. geosyntetyki, są korzystne w projektach drogowych, lecz ich skuteczność bywa ograniczona w zakresie nośności gruntu. Zgodnie z [17] mogą zmniejszyć koszty budowy nawet o 50%, nie nadają się jednak do wszystkich typów gruntów – ich skuteczność jest ograniczona w przypadku gruntów o bardzo małej nośności.

Wybór odpowiedniej metody powinien uwzględniać równowagę między kosztami początkowymi a długoterminowymi oszczędnościami, co jest kluczowe dla optymalizacji inwestycji budowlanych. Zastosowanie cyfrowych technologii projektowych, np. modelowanie BIM w geotechnice, pozwala na dokładniejszą optymalizację kosztów jeszcze na etapie planowania [17].

Podsumowanie

Na trwałość zastosowanych metod wzmacniania podłoża mają wpływ przede wszystkim badania warunków gruntowo-wodnych podczas procesu projektowania oraz wykonania. Dobrze zaprojektowane i wykonane wzmocnienie, oparte na dokładnych badaniach, zapewni długotrwałą i niezawodną pracę konstrukcji.

Do najważniejszych elementów decydujących o trwałości wzmocnienia podłoża gruntowego można zaliczyć:

- głębokość wzmocnienia podłoża gruntowego;
- zabezpieczenie podłoża gruntowego oraz wykonywanego wzmocnienia przed oddziaływaniem wody;

structure. The key factors determining the durability of ground improvement works include:

- Depth of ground reinforcement,
- Protection of the subsoil and the reinforcement structure from water influence,
- Proper selection of the reinforcement method (the design process enables the selection of the optimal technique, considering soil characteristics, structural requirements, and operational conditions),
- Definition of design parameters (the project specifies parameters such as depth, width, and types of materials used for reinforcement),
- Quality control (the design process also includes quality assurance of construction works, which directly affects durability).

The durability of ground reinforcement is closely linked to the quality of materials used in its construction. Therefore, it is essential to assess the suitability of materials and to conduct aging and durability tests to determine their long-term performance characteristics.

The costs of ground improvement technologies vary significantly and also affect their quality and durability. When selecting an appropriate reinforcement technology, it is necessary to maintain a balance between initial costs and long-term savings. Choosing a cheaper system that is not adapted to local geotechnical and hydrogeological conditions poses a high risk of failure, the financial consequences of which may exceed the initial investment savings.

- odpowiedni dobór metody wzmocnienia (proces projektowania pozwala na selekcję optymalnej metody wzmocnienia, biorąc pod uwagę specyfikę gruntu, wymagania budowlane i warunki eksploatacyjne);

- określenie parametrów, takich jak głębokość/szerokość wzmocnienia, czy rodzaj materiałów użytych do wzmocnienia;
- kontrolę jakości wykonania wzmocnienia.

Trwałość wzmocnień podłoża pozostaje w ścisłym związku z jakością materiałów użytych do ich wykonania. Z tego względu konieczna jest ocena przydatności materiałów, a także prowadzenie badań starzeniowych i badań trwałościowych, pozwalających na określenie ich długoterminowych właściwości.

Koszty technologii wzmocnienia są bardzo zróżnicowane. Przy ich wyborze należy uwzględnić równowagę między kosztami początkowymi a długoterminowymi oszczędnościami. Dobór tańszego, lecz niedostosowanego do lokalnych warunków gruntowo-wodnych systemu wzmocnienia podłoża, wiąże się z dużym ryzykiem awarii, której konsekwencje finansowe mogą przewyższyć oszczędności inwestycyjne.

Received: 12.05.2025

Revised: 09.07.2025

Published: 23.10.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 12.05.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 09.07.2025 r.

Opublikowano: 23.10.2025 r.

Literature

- [1] Choudhury M, Jyethi D, Dutta J, Purkayastha S, Deb D, Bhattacharyya K. „Investigation of groundwater and soil quality near to a municipal waste disposal site in Silchar, Assam, India,” *International journal of energy and water resources*, 2022; 6(11): 37–44.
- [2] Earon R, Olofsson B, Renman G. „Initial effects of a new highway section on soil and groundwater,” w *Water, Air & Soil Pollution*, 2012.
- [3] Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy; Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie; Politechnika Warszawska, *Wytyczne wykonywania badań podłoża gruntowego na potrzeby budownictwa drogowego*, 2019.
- [4] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, <https://www.gov.pl/web/gddkia/generalna-dyrekcja-drog-krajowych-i-autostrad>, [Online]. Available: www.gddkia.gov.pl/pl/3812/Rok-2019. [Data uzyskania dostępu: 22 sierpień 2025].
- [5] Mechowski T, Jacek S, Harasim P. „Diagnostyka stanu technicznego dróg,” *Materiały Budowlane*, 2014; 4: 51–52.
- [6] Van Gurp C. *Characterisation of Seasonal Influences on Asphalt Pavements with the use of Falling Weight Deflectometers*, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, 1995.
- [7] L. C. d. P. e. C. (LCPC), *French Design Manual for pavement structures. Guide technique*, 1997.
- [8] *Conglomerantes hidráulicos y ligantes hidrocarbonados: pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3)*, 2001.
- [9] *Design manual for roads and bridges 26/06 Pavement Design*, Highways Agency DMRB, 2006.
- [10] Chaddock B, Roberts C. *Road foundation design for major UK highways*, TRL, 2006.
- [11] *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau ZTVE-StB 94*, 1994.
- [12] M. D. S. D. Almeida, M. E. S. Marques, M. Riccio, D. D. F. Fagundes, B. T. Lima, U. F. Polido i I... & Hosseinpour, „Ground improvement techniques applied to very soft clays: state of knowledge and recent advances,” *Soil and Rocks*, nr 46 (1), 2023.
- [13] Varaksin S, Hamidi B, Huybrechts N, i N. & Denies, *Ground improvement vs. pile foundations*, ISSMGE-ETC, 2016, pp. 28–29.
- [14] B. Tarawneh i M. & Matraji, „Ground improvement using rapid impact compaction: case study in Dubai,” *Gradevinar*, nr 66 (11.), pp. 1007–1014, 2014; 66(11): 1007–1014.
- [15] Raymond AJ, DeJong JT, Kendall A, Blackburn JT i R. & Deschamps, „Life cycle sustainability assessment of geotechnical ground improvement methods,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, nr 147 (12), 2021.
- [16] Mitchell JK, Kelly R. „Addressing some current challenges in ground improvement,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement*, 2013; 166(3): 127–137.
- [17] Mach A Wałach D. „Implementation of Integrated Life Cycle Design Principles in Ground Improvement and Piling Methods—A Review,” *Sustainability*, 2024; 16(2): 659.
- [18] Bryson S, Naggar H. „Evaluation of the efficiency of different ground improvement techniques” w *Proceeding of the 18th International conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, 2013.
- [19] Armstrong J, Helm P, Preston J, Loveridge F. „Economics of geotechnical asset deterioration, maintenance and renewal” *Transportation Geotechnics*, 2024; 45.
- [20] Savard Y, de Blois K, Bontonnet M, Hornych P, Manduit C. „7th Int. Conf. Bearing Capacity Roads, Railways & Airfields” w *Analysis of seasonal bearing capacity correlated to pavement deformation in cold regions*, Trondheim, 2005.