

Analysis of the opinions of investors and industry enterprises on the durability of ground reinforcement methods in road construction

Analiza opinii inwestorów i przedsiębiorstw branżowych dotyczących trwałości wzmocnienia podłoża w budownictwie drogowym

DOI: 10.15199/33.2024.12.16

Abstract. The article analyses the durability of various ground reinforcement methods in road construction. The aim of the study was to assess solutions such as stone columns, concrete columns, prefabricated piles, geosynthetics, and chemical and hydraulic stabilizations, while also taking into account the impact of reinforcement depth and the type of reinforced ground on their durability. The study is based on the analysis of opinions from investors and industry companies collected through electronic survey questionnaires. The results indicate that the most durable solutions are piles (CFA, prefabricated), soil replacement, and concrete columns, which significantly stand out in terms of the examined feature compared to other solutions. The key factors determining the durability of the applied methods turned out to be the type of ground and the depth of reinforcement. Proper adaptation of technology to specific soil conditions and correct design of reinforcement depth directly affect the effectiveness of the implemented solutions. Moreover, a comparative analysis showed that representatives of industry companies, in comparison to investors, expressed more positive opinions on all analysed research areas.

Keywords: durability of ground reinforcement; type of ground; depth of reinforcement; investors; industry enterprises.

Ground reinforcement in road construction plays an important role for several reasons. Firstly, it improves the bearing capacity of the soil, which has a significant impact on the stability and durability of the pavement, particularly in the case of weak soils [1]. Secondly, it minimises the risk of problems such as subsidence or deformation, which can lead to costly repairs in the future [2]. While the initial cost of the ground reinforcement can be high, its long-term benefits – such as reduced repair expenses, increased safety and shorter construction times – make the use of reinforcement on road projects economically justifiable. These solutions can also have a positive impact on the environment by reducing erosion and pollution, which is an additional argument for their use [3].

Streszczenie. Artykuł analizuje trwałość różnych rodzajów wzmocnienia podłoża w budownictwie drogowym. Celem badania była ocena rozwiązań, takich jak kolumny kamienne, betonowe, pale prefabrykowane, geosyntetyki oraz stabilizacja chemiczna i hydrauliczna, przy jednoczesnym uwzględnieniu wpływu głębokości wzmocnienia i rodzaju wzmacnianego podłoża na ich trwałość. Badanie bazuje na analizie opinii inwestorów oraz przedsiębiorstw branżowych zebranych za pomocą ankiet elektronicznych. Wyniki wskazują, że najtrwalszymi rozwiązaniami są pale (CFA, prefabrykowane), wymiana gruntu oraz kolumny betonowe, które istotnie wyróżniają się pod względem badanej cechy w porównaniu z innymi rozwiązaniami. Kluczowymi czynnikami determinującymi trwałość zastosowanych metod okazały się rodzaj podłoża oraz głębokość wzmocnienia. Odpowiednie dostosowanie technologii do specyficznych warunków gruntowych oraz prawidłowe zaprojektowanie głębokości wzmocnienia bezpośrednio wpływają na skuteczność wdrożonych rozwiązań. Ponadto analiza porównawcza wykazała, że reprezentanci przedsiębiorstw branżowych bardziej pozytywnie wypowiadali się na temat wszystkich analizowanych obszarów badawczych niż inwestorzy.

Słowa kluczowe: trwałość wzmocnienia podłoża; rodzaj podłoża; głębokość wzmocnienia; inwestorzy; przedsiębiorstwa branżowe.

Wzmocnienie podłoża w budownictwie drogowym odgrywa istotną rolę z kilku powodów. Po pierwsze, poprawia nośność gruntu, co ma istotny wpływ na stabilność i trwałość nawierzchni, szczególnie w przypadku słabych gruntów [1]. Po drugie, minimalizuje ryzyko problemów, takich jak osiadanie czy deformacje, co może prowadzić do kosztownych napraw w przyszłości [2]. Początkowe koszty wzmocnienia podłoża mogą być wprowadzić wysokie, ale ich długoterminowe korzyści – takie jak mniejsze wydatki na remonty, zwiększone bezpieczeństwo i krótszy czas budowy – sprawiają, że zastosowanie wzmocnień na inwestycjach drogowych jest ekonomicznie uzasadnione. Rozwiązania te mogą ponadto pozytywnie wpływać na środowisko, ograniczając erozję i zanieczyszczenia, co jest dodatkowym argumentem za ich stosowaniem [3].

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów: mswitala@ibdim.edu.pl

The paper discusses an important and up-to-date topic related to the durability of ground reinforcement made using various methods illustrated with the example of road projects. It is analysed how the different methods of ground reinforcement have an impact on the durability of the road infrastructure, particularly in the context of specific soil conditions, allowing the technology to be better adapted to the requirements of specific projects. An important element of the analysis is the results of surveys of those directly involved in the implementation of road projects, namely the investors, who are responsible for the financing and long-term quality of the project, and the industry enterprises, including contractors, planners and construction supervisors, who are involved in the technical aspects of project implementation. These results were subjected to statistical analysis.

Theoretical framework

Durability is defined in a variety of ways in the literature, reflecting the multifaceted nature of the concept. De Borst and Crisfield emphasise that sustainability refers to the ability of a technology or solution to retain its functionality and properties over a long period of time, despite the impact of degrading factors such as mechanical loads or environmental impact [4]. Similarly, Neville points out that durability is about retaining mechanical and physical properties under operating conditions, including weathering, chemical and mechanical resistance [5]. Chastre and co-authors define durability in terms of a material's ability to maintain its structural integrity and aesthetics over time, despite the action of various external degrading factors [6]. Li and co-authors propose a more complex approach and suggest that durability should be analysed at two levels: the material level, which refers to the properties of the individual components used in the structure, and the structural level, which refers to the whole engineering solution [7].

The common denominator in these definitions is the ability of a solution to maintain its properties and efficiency in the long run despite the influence of degrading factors. Durability in the context of ground reinforcement methods therefore refers to the extent to which a particular method is able to maintain the ground properties, such as bearing capacity and stability, under changing operational conditions. This includes resistance to degradation caused by loads, changing weather conditions, fluctuations in moisture content, as well as the action of chemicals that may affect the stability of the ground [8].

The literature on the durability of ground reinforcement indicates that the effectiveness of reinforcement methods depends on a number of factors, such as the type of soil, the loads, the quality of workmanship, the quality of the materials used and their resistance to degradation in difficult soil and water conditions. **Ground stabilisation** has been identified as one of the key methods for improving the mechanical properties of weak soils, enabling structures to be safely founded and minimising the risk of excessive settlement. **Reinforced grounds** show high durability, low compressibility and low hydraulic permeability, which significantly improves their performance [9, 10]. The use of geosynthetics, as demonstrated by Zadehmohamad and co-authors, is an ecological and economical alternative with good

W artykule omówiono istotny i aktualny temat związany z trwałością wzmocnienia podłoża wykonanego różnymi metodami na przykładzie inwestycji drogowych. Analizowano, w jaki sposób różne metody wzmocnienia podłoża wpływają na trwałość infrastruktury drogowej, szczególnie w kontekście specyficznych warunków gruntowych, co pozwala na lepsze dostosowanie technologii do wymagań konkretnych projektów. Ważnym elementem analizy są wyniki badań opinii podmiotów bezpośrednio zaangażowanych w realizację inwestycji drogowych, a mianowicie inwestorów, odpowiedzialnych za finansowanie i długoterminową jakość projektu, oraz przedsiębiorstwa branżowe, w tym wykonawców, projektantów i nadzór budowlany, którzy są zaangażowani w techniczne aspekty realizacji inwestycji. Wyniki te zostały poddane analizie statystycznej.

Ramy teoretyczne

W literaturze przedmiotu trwałość jest definiowana w różnorodny sposób, co odzwierciedla wieloaspektowość tego pojęcia. De Borst i Crisfield podkreślają, że trwałość odnosi się do zdolności danej technologii lub rozwiązania do zachowania swojej funkcjonalności i właściwości przez długi okres, pomimo wpływu czynników degradujących, takich jak obciążenia mechaniczne czy wpływ środowiska [4]. Podobnie Neville wskazuje, że trwałość polega na zachowaniu właściwości mechanicznych i fizycznych w warunkach eksploatacyjnych, w tym odporności na działanie czynników atmosferycznych, chemicznych oraz mechanicznych [5]. Chastre i współautorzy definiują trwałość w kontekście zdolności materiału do utrzymania integralności strukturalnej oraz estetyki na przestrzeni czasu, pomimo działania różnorodnych zewnętrznych czynników niszczących [6]. Li i współautorzy proponują bardziej złożone podejście i sugerują, aby analizować trwałość na dwóch poziomach: materiałowym, który odnosi się do właściwości poszczególnych elementów użytych w konstrukcji, oraz konstrukcyjnym dotyczącym całego rozwiązania inżynierskiego [7].

Wspólnym mianownikiem w przytoczonych definicjach jest zdolność danego rozwiązania do utrzymywania swoich właściwości i efektywności w długiej perspektywie czasowej, pomimo wpływu czynników degradujących. Trwałość w kontekście metod wzmocnienia podłoża dotyczy zatem tego, na ile dana metoda jest w stanie zachować właściwości podłoża, takie jak nośność i stabilność, w zmieniających się warunkach eksploatacyjnych. Obejmuje to odporność na degradację spowodowaną obciążeniami, zmiennymi warunkami atmosferycznymi, wahaniami wilgotności, a także działaniem chemikaliów, które mogą wpływać na stabilność gruntu [8].

W literaturze dotyczącej trwałości wzmocnienia podłoża wskazuje się, że skuteczność metod wzmocnienia zależy od wielu czynników, takich jak rodzaj gruntu, obciążenia, jakość wykonania, jakość użytych materiałów oraz ich odporność na degradację w trudnych warunkach gruntowo-wodnych. **Stabilizacja gruntu** została uznana za jedną z kluczowych metod poprawy właściwości mechanicznych słabych gruntów, co umożliwia bezpieczne posadowienie konstrukcji oraz minimalizację ryzyka nadmiernego osiadania. **Wzmocnione grunty** wykazują dużą trwałość, małą ściśliwość oraz małą przepusz-

durability in the processes of reinforcement and stabilisation of pavement layers on weak natural soils [11]. However, the durability of these materials may be limited when exposed to chemical and mechanical agents, which may require precise selection of the technology to suit the type of ground and specific operating conditions [12–14]. Compaction methods, including dynamic compaction, are rated positively in terms of long-term soil bearing capacity, although their effectiveness may be reduced by the presence of fines in the soil and its limited ability to dissipate excess pore pressure. However, research suggests that compacted soils can gain strength over time, which is beneficial to their durability [15].

In the case of reinforced concrete piles, research by Shao and co-authors shows that they are susceptible to degradation by aggressive compounds such as chlorides and sulphates [16]. In order to increase their durability, the use of fibreglass-reinforced polymer (FRP) composites is recommended, which are characterised by high strength, corrosion resistance and low weight [17, 18]. On the other hand, a study by Mutaz and co-authors on the chemical stabilisation of highly expansive clayey soil shows that chemical stabilisation can significantly improve the mechanical and physical properties of the ground, resulting in greater durability of road pavements, even under difficult environmental conditions [19].

The durability of the ground reinforcement is closely linked to the operation of the structure founded on such ground. This means that if the reinforcement is durable and constructed to the applicable standards, the structure founded on such a foundation will have adequate bearing capacity and resistance to various loads throughout its lifetime. In this context, it is worth citing studies on the influence of the thickness of stabilisation layers on the durability of road pavements. The results of these studies indicate that increasing the thickness of such a layer increases the durability of the pavement significantly, which can increase the traffic category and provide better operating conditions. Precise selection of the thickness of the stabilisation layer is key to ensuring optimum performance depending on the type of ground and anticipated loads [20].

Test method

The research carried out between March and June 2024, consisted of the analysis of two electronic survey questionnaires. The research sample consisted of 131 road project investors and 83 enterprises from the design and construction industry, which were purposively selected. Representatives of the public sector dominated the investors, accounting for more than 90 per cent of the sample, while the rest came from the public-private sector, the corporate sector and were individual investors. Small organisations predominated in the research group (47%), while medium and large organisations were represented by 29% and 17% of the surveyed entities, respectively. Respondents differed in the road projects implemented. The largest group were investors in municipal (45.80%) and district (35.90%) roads. More than 15% of respondents were implementing projects on expressways and motorways, and 8.50% on provincial roads. A lower percentage indicated national roads (1.60%) and

czalność hydrauliczną, co znacznie poprawia ich właściwości użytkowe [9, 10]. Zastosowanie geosyntetyków, jak wykazali Zadehmohamad i współautorzy, stanowi ekologiczną oraz ekonomiczną alternatywę, charakteryzującą się dobrą trwałością w procesach wzmocnienia i stabilizacji warstw nawierzchniowych na słabych gruntach naturalnych [11]. Trwałość tych materiałów może być jednakże ograniczona w przypadku ekspozycji na czynniki chemiczne i mechaniczne, co może wymagać precyzyjnego doboru technologii do rodzaju podłoża oraz specyficznych warunków eksploatacyjnych [12–14]. Metody zagęszczania, w tym zagęszczanie dynamiczne, są oceniane pozytywnie pod względem długoterminowej nośności gruntu, choć ich skuteczność może być zmniejszona przez obecność drobnych frakcji w glebie i jej ograniczoną zdolność do rozpraszania nadmiaru ciśnienia porowego. Badania sugerują jednak, że zagęszczone grunty mogą zyskiwać na wytrzymałości z czasem, co korzystnie wpływa na ich trwałość [15].

W przypadku pali żelbetowych, badania Shao i współautorów wykazują, że są one podatne na degradację w wyniku działania agresywnych związków, takich jak chlorki i siarczany [16]. W celu zwiększenia ich trwałości zaleca się stosowanie kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknem szklanym (FRP), które cechują się dużą wytrzymałością, odpornością na korozję oraz małą masą [17, 18]. Z kolei badania Mutaza i współautorów dotyczące stabilizacji chemicznej silnie ekspansywnego gruntu gliniastego dowodzą, że stabilizacja chemiczna może znacznie poprawić właściwości mechaniczne i fizyczne podłoża, co przekłada się na większą trwałość nawierzchni drogowych, nawet w trudnych warunkach środowiskowych [19].

Trwałość wzmocnienia podłoża jest ściśle powiązana z eksploatacją konstrukcji posadowionej na takim podłożu. Oznacza to, że jeśli wzmocnienie jest trwałe i wykonane zgodnie z obowiązującymi standardami, konstrukcja posadowiona na takim podłożu będzie miała zapewnioną odpowiednią nośność i odporność na różne obciążenia przez cały okres eksploatacji. W tym kontekście warto przywołać badania dotyczące wpływu grubości warstw stabilizacyjnych na trwałość nawierzchni drogowych. Wyniki tych badań wskazują, że zwiększenie grubości takiej warstwy zwiększa znacznie trwałość nawierzchni, co może podnieść kategorię ruchu i zapewnić lepsze warunki eksploatacyjne. Precyzyjny dobór grubości warstwy stabilizacyjnej jest kluczowy do zapewnienia optymalnych parametrów użytkowych w zależności od typu podłoża i przewidywanych obciążeń [20].

Metoda badań

Badania przeprowadzone od marca do czerwca 2024 r. polegały na analizie dwóch kwestionariuszy ankiet elektronicznych. Próba badawcza obejmowała 131 inwestorów inwestycji drogowych oraz 83 przedsiębiorstwa z branży projektowej i wykonawczej, które zostały celowo dobrane. Wśród inwestorów dominowali przedstawiciele sektora publicznego, stanowiący ponad 90% próby, natomiast pozostali należeli do sektora publiczno-prywatnego, korporacyjnego oraz byli inwestorami indywidualnymi. W badanej grupie przeważały małe organizacje (47%), natomiast średnie i duże reprezentowane były odpowiednio przez 29% oraz 17% ankietowanych podmiotów. Re-

combinations of expressways, motorways and other national roads (3.10%). Respondents had diverse experience in the implementation of the number of road projects – from a few to over twenty. Participants in the survey were mainly senior and middle managers, including those employed as project inspectors, who made up the majority of the sample.

The second group of respondents comprised companies from the road construction industry, differing in the scope of services provided. The largest group was designers and contractors (41%), including companies acting as both designer and contractor (22.9%). Road project contractors accounted for 26.5% of the participants, and construction supervision – 24.1%. Other specialists were involved in laboratory services, quality control and mathematical modelling. Most of the companies had more than ten years of experience in the industry, with the majority specialising in the design and construction of expressways and motorways. Large enterprises dominated (57.8%), while the SME sector was represented by just over 32% of participants and micro-enterprises accounted for 9.6%.

Data were collected using questionnaires containing nominal and ordinal questions on various ground reinforcement technologies, such as stone columns, concrete columns, soil-cement, drainage, dynamic compaction, prefabricated piles and others. The durability of the ground reinforcement was analysed, taking into account the depth of the reinforcement, the type of ground and the influence of the type of reinforcement on the durability of the technological solutions. SPSS software was used to process the results, using standard measures of descriptive statistics and the Mann-Whitney U test, with statistical significance set at $p < 0.05$.

Research results

Assessment of durability of ground reinforcement methods. Figure 1 shows the responses of all the participants in the survey to the question regarding the assessment of the durability of ground reinforcement made using specialised methods. The data are presented on a bar chart with confidence intervals for the mean of 95%, meaning that with 95% probability the estimated parameter is within the specified range. Respondents rated the method on a seven-point scale, with a rating of 1 indicating very poor durability and a rating of

7 indicating very good durability. Respondents differed in the implemented road projects. The largest group were investors in municipal (45.80%) and county (35.90%) roads. Over 15% of respondents implemented projects on expressways and motorways, and 8.50% on provincial roads. Fewer respondents had differentiated experience in the implementation of road projects – from a few to over twenty projects. The respondents of the survey were mainly senior and middle managers, including those employed as project inspectors, who made up the majority of the sample.

The second group of respondents included companies from the road construction industry, differing in the scope of services provided. The largest group were designers and contractors (41%), including companies acting as both designer and contractor (22.9%). Road project contractors accounted for 26.5% of the participants, and construction supervision – 24.1%. Other specialists were involved in laboratory services, quality control and mathematical modelling. Most of the companies had more than ten years of experience in the industry, with the majority specialising in the design and construction of expressways and motorways. Large enterprises dominated (57.8%), while the SME sector was represented by just over 32% of participants and micro-enterprises accounted for 9.6%.

Data were collected using questionnaires containing nominal and ordinal questions, regarding different technologies of ground reinforcement, such as stone columns, concrete columns, soil-cement, drainage, dynamic compaction, prefabricated piles and others. The durability of the ground reinforcement was analysed, taking into account the depth of the reinforcement, the type of ground and the influence of the type of reinforcement on the durability of the technological solutions. SPSS software was used to process the results, using standard measures of descriptive statistics and the Mann-Whitney U test, with statistical significance set at $p < 0.05$.

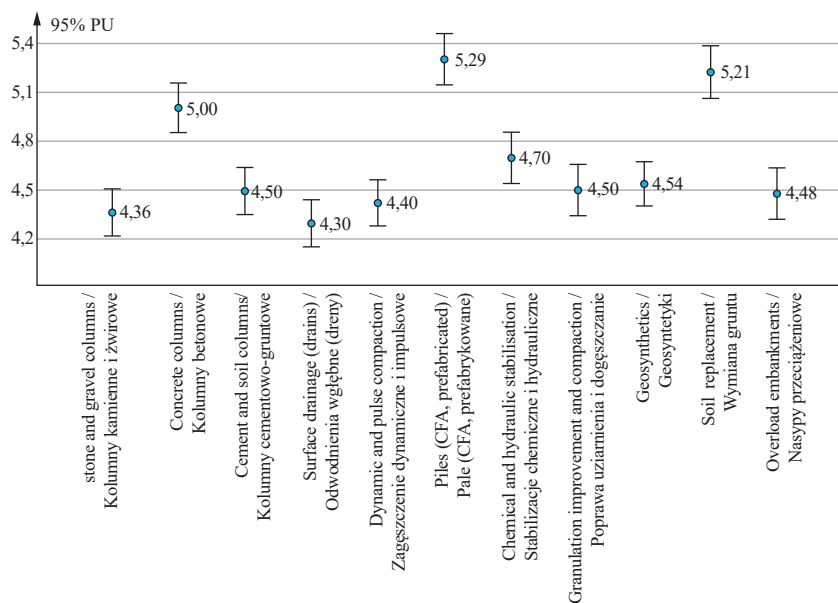


Fig. 1. Durability of ground reinforcement methods according to respondents' opinions
Rys. 1. Trwałość metod wzmocnienia podłoża wg opinii respondentów

Wyniki badań

Ocena trwałości metod wzmocnienia podłoża. Na rysunku 1 przedstawiono odpowiedzi wszystkich uczestników badania na pytanie dotyczące oceny trwałości wzmocnienia podłoża wykonanego za pomocą wyspecjalizowanych metod. Dane zostały zaprezentowane na wykresie słupkowym z przedziałem

7 indicating very high durability. The results indicate that respondents were more likely to form positive rather than negative opinions about the durability of the ground reinforcement solutions studied. In each case, the average ratings were above the middle of the scale (4), meaning that the durability of the solution is at least at an acceptable level, while meeting the basic expectations of the road project in question.

Three methods of ground reinforcement stand out clearly from the other solutions: piles (CFA, prefabricated), soil replacement and concrete columns. Their average ratings are at or above 5, which means that they have a rather high durability and thus not only meet the basic requirements for ground reinforcement, but also ensure an adequate lifespan for the project implemented. It is worth noting that the confidence intervals for these solutions do not overlap with the confidence intervals of the others, meaning that there is a statistically significant difference between them. In practice, this means that the aforementioned solutions are considered to be more durable and have a clear advantage over others in terms of the characteristic under study.

Table 1 shows the results of the comparative analysis conducted between the two groups of respondents: investors and industry enterprises. The last two columns of the table contain the results of the Mann-Whitney U test, indicating statistically significant differences in respondents' opinions.

ufności dla średniej wynoszącym 95%, co oznacza, że z 95% prawdopodobieństwem szacowany parametr znajduje się w wyznaczonym przedziale. Respondenci dokonywali oceny w skali siedmiostopniowej, w której ocena 1 oznaczała bardzo słabą trwałość metody, a ocena 7 – trwałość bardzo dużą. Wyniki badań wskazują, że respondenci byli bardziej skłonni do formułowania raczej pozytywnych niż negatywnych opinii na temat trwałości badanych rozwiązań wzmocnienia podłoża. W każdym przypadku średnie oceny znajdowały się powyżej środka skali (4), co oznacza, że trwałość danego rozwiązania kształtuje się na poziomie co najmniej akceptowalnym, spełniając jednocześnie podstawowe oczekiwania związane z daną inwestycją drogową.

Na tle pozostałych rozwiązań wyraźnie wyróżniają się trzy sposoby wzmocnienia podłoża: **pale (CFA, prefabrykowane); wymiana gruntu oraz kolumny betonowe**. Średnie oceny w ich przypadku wynoszą lub przekraczają 5, co oznacza, że charakteryzują się one raczej dużą trwałością, a tym samym nie tylko spełniają podstawowe wymagania dotyczące wzmocnienia podłoża, ale także zapewniają odpowiednią żywotność realizowanej inwestycji. Warto podkreślić, że przedziały ufności w przypadku tych rozwiązań nie pokrywają się z przedziałami ufności pozostałych, co oznacza, że istnieje statystycznie istotna różnica między nimi. W praktyce oznacza to, że ww. rozwiązania są uznawane za bardziej trwałe i mają wyraźną przewagę nad innymi pod względem badanej cechy.

Table 1. Comparative analysis of the durability assessment of ground reinforcement methods between the two surveyed groups of respondents

Tabela 1. Analiza porównawcza oceny trwałości wzmocnienia podłoża między dwiema badanymi grupami respondentów

Specification / Wyszczególnienie	Investors / Inwestorzy		Industry enterprises / Przedsiębiorstwa branżowe		Statistical description / Opis statystyczny	
	mean / średnia	standard deviation / odchylenie standardowe	mean / średnia	standard deviation / odchylenie standardowe	U	P
Stone and gravel columns / Kolumny kamienne i żwirowe	4,21	1,05	4,60	1,03	4408,000	0,013*
Concrete columns / Kolumny betonowe	4,83	1,14	5,27	1,05	4363,000	0,011*
Cement and soil columns / Kolumny cementowo-gruntowe	4,37	1,01	4,69	1,08	4685,500	0,074
Subsurface drainage (drains) / Odwodnienia wgłębne (dreny)	4,29	1,03	4,31	1,03	5310,500	0,763
Dynamic and pulse compaction / Zagęszczanie dynamiczne i impulsowe	4,39	0,96	4,47	1,10	5293,000	0,729
Piles (CFA, prefabricated) / Pale (CFA, prefabrykowane)	5,11	1,10	5,58	1,16	4104,500	0,002**
Chemical and hydraulic stabilisation / Stabilizacje chemiczne i hydrauliczne	4,77	1,03	4,58	1,23	5115,000	0,449
Granulation improvement and compaction / Poprawa uziarnienia i dogęszczanie	4,56	1,03	4,40	1,25	4953,000	0,254
Geosynthetics / Geosyntetyki	4,56	0,95	4,51	1,07	5323,000	0,785
Soil replacement / Wymiana gruntu	5,11	1,18	5,37	1,28	4803,000	0,138
Overload embankments / Nasypty przeciążeniowe	4,43	1,09	4,55	1,20	5132,000	0,466

* significance level / poziom istotności $p < 0,05$

** significance level / poziom istotności $p < 0,01$

Industry enterprises were found to be more inclined to express a positive opinion on the durability of the chosen ground reinforcement solutions than the investors. This is particularly noticeable with regard to the reinforcement of the ground by piling, where the average rating of the companies significantly exceeds the “rather high” rating declared by the representatives of the peer group. The results of the analysis indicate that the differences between companies and investors are significant and highly statistically significant, meaning that designers and contractors rate the durability of this solution significantly higher than investors. Similar conclusions can also be drawn with regard to stone and gravel columns and concrete columns. In all cases, the differences in the ratings are statistically significant and indicate a preponderance of positive ratings in the group of industry enterprises.

Highest concordance of responses was observed in the case of methods involving geosynthetics, dynamic compaction and subsurface drainage, where the opinions of the groups compared were very similar.

Influence of depth of reinforcement and type of ground on the durability of the solution used

Figure 2 shows the responses of all participants in the study to the question regarding the assessment of the effect of the depth of the ground reinforcement on the durability of the reinforced ground. The data were presented in a bar chart with a 95% confidence interval for the mean, meaning that with 95% probability the estimated parameter is within the designated interval. Respondents performed the rating using, as before, a seven-point scale, where ratings of 1 accounted for very low significance and ratings of 7 – very high significance. The range of ratings for the different types of ground proved to be significant (from the lowest of 3.96 to the highest of 5.51), indicating that it is a determinant of the durability of a given technological solution in the context of depth of reinforcement.

According to the results presented, the greatest impact on the depth of reinforcement was recorded for organic and peat soils, which are characterised by high compressibility and low bearing capacity, making them particularly difficult to stabilise. The mean score was 5.51, i.e. between those indicating a high or rather high significance of the characteristic under study. This means that, in the case of the aforementioned soils, the depth of ground reinforcement is considered one of the key factors determining the durability of a given technological solution. The confidence interval for peat and organic soils does not overlap with the confidence intervals of the other grounds, which means that the differences in the rating of the studied characteristic are statistically significant.

The second most significant group relates to cohesive soils, i.e. clays and silts, which can have poor bearing properties and are susceptible to volume change due to moisture fluctuations, and mixed soils being a combination of different soil types. In both cases, the average scores are close 5, meaning that the depth of reinforcement of both types of ground has a significant impact on the durability of the solution used and is often

W tabeli 1 przedstawiono wyniki analizy porównawczej przeprowadzonej między dwiema grupami respondentów: inwestorami oraz przedsiębiorstwami branżowymi. Ostatnie dwie kolumny tabeli zawierają wyniki testu U Manna-Whitneya, wskazujące na statystycznie istotne różnice w opiniach respondentów.

Stwierdzono, że przedsiębiorstwa branżowe przejawiają większą skłonność do wyrażania pozytywnych opinii na temat trwałości wybranych rozwiązań wzmocnienia podłoża niż inwestorzy. Jest to szczególnie zauważalne w odniesieniu do wzmocnienia podłoża za pomocą palowania, gdzie średnia ocen przedsiębiorstw znacznie przewyższa ocenę „raczej wysoko”, jaką deklarowali przedstawiciele grupy porównawczej. Wyniki analizy wskazują, że różnice między przedsiębiorstwami a inwestorami są znaczące oraz wysoce istotne statystycznie, co oznacza, że projektanci i wykonawcy oceniają trwałość tego rozwiązania znacznie wyżej niż inwestorzy. Podobne wnioski można także sformułować w odniesieniu do kolumn kamiennych i żwirowych oraz kolumn betonowych. W każdym przypadku różnice ocen są istotne statystycznie i wskazują na przewagę ocen pozytywnych w grupie przedsiębiorstw branżowych.

Największą zgodność odpowiedzi odnotowano w przypadku metod zakładających wykorzystanie geosyntetyków, zagęszczania dynamicznego oraz odwodnienia wgłębnego, gdzie opinie porównywanych grup były do siebie bardzo zbliżone.

Wpływ głębokości wzmocnienia i rodzaju podłoża na trwałość zastosowanego rozwiązania

Rysunek 2 przedstawia odpowiedzi wszystkich uczestników badania na pytanie dotyczące oceny wpływu głębokości wzmocnienia podłoża na trwałość wzmocnianego podłoża. Dane zostały zaprezentowane na wykresie słupkowym z przedziałem ufności dla średniej wynoszącym 95%, co oznacza, że z 95% prawdopodobieństwem szacowany parametr znajduje się w wyznaczonym przedziale. Respondenci dokonywali oceny z użyciem, podobnie jak wcześniej, skali siedmiostopniowej, gdzie oceny 1 oznaczały bardzo niskie znaczenie, a oceny 7 – znaczenie bardzo wysokie. Rozpiętość ocen poszczególnych rodzajów podłoża okazała się znaczna (od najmniejszej 3,96 do największej 5,51), co świadczy, że stanowi on determinantę trwałości danego rozwiązania technologicznego w kontekście głębokości wzmocnienia.

Zgodnie z przedstawionymi wynikami największy wpływ na głębokość wzmocnienia odnotowano w przypadku gruntów organicznych i torfowych, które charakteryzują się wysoką kompresyjnością i niską nośnością, co powoduje, że są szczególnie trudne w stabilizacji. Średnia ocen wyniosła 5,51, a zatem mieściła się pomiędzy ocenami świadczącymi o wysokim bądź raczej wysokim znaczeniu badanej cechy. Oznacza to, że w przypadku wymienionych gruntów głębokość wzmocnienia podłoża jest uznawana za jeden z kluczowych czynników determinujących trwałość danego rozwiązania technologicznego. Przedział ufności dotyczący gruntów torfowych i organicznych nie nakłada się na przedziały ufności pozostałych podłoży, co

taken into account when designing the technology. In the case of contaminated soils, which may require reinforcement or stabilisation not only for the purpose of improvement of their geotechnical properties, but also the disposal or isolation of contaminants, the average score was 4.55. It was, therefore, between neutral and rather high, indicating that the depth of the ground reinforcement has an important influence on the durability of the solution, but is not the only factor that determines it.

In the case of contaminated soils, which may require reinforcement or stabilisation not only for the purpose of improvement of

their geotechnical properties, but also the disposal or isolation of contaminants, the average score was 4.55. It was, therefore, between neutral and rather high, indicating that the depth of the ground reinforcement has an important influence on the durability of the solution, but is not the only factor that determines it.

In the case of non-cohesive soils, such as sands and gravels, the average rating fluctuates around a value of 4. They may need to be reinforced to increase stability, especially with high groundwater levels or dynamic loads. A similar rating was given to rocks and poorly weathered soils, which may need to be reinforced if their natural state does not provide adequate structural stability. This shows that, with these grounds, the depth of reinforcement is unlikely to have a decisive influence on the durability of the technological solution.

Table 2 presents the results of a comparative analysis between two groups of respondents: investors and industry enterprises. The last two columns of the table contain the results of the Mann-Whitney U-test, which show significant differences in opinion on the given solutions between the respondents. For cohesive, organic and peat soils as well as mixed soils, the differences proved to be statistically highly significant. This allows the conclusion to be drawn that, in the case of such grounds the industry enterprises are more convinced than the investors that the depth of the ground reinforcement has a significant

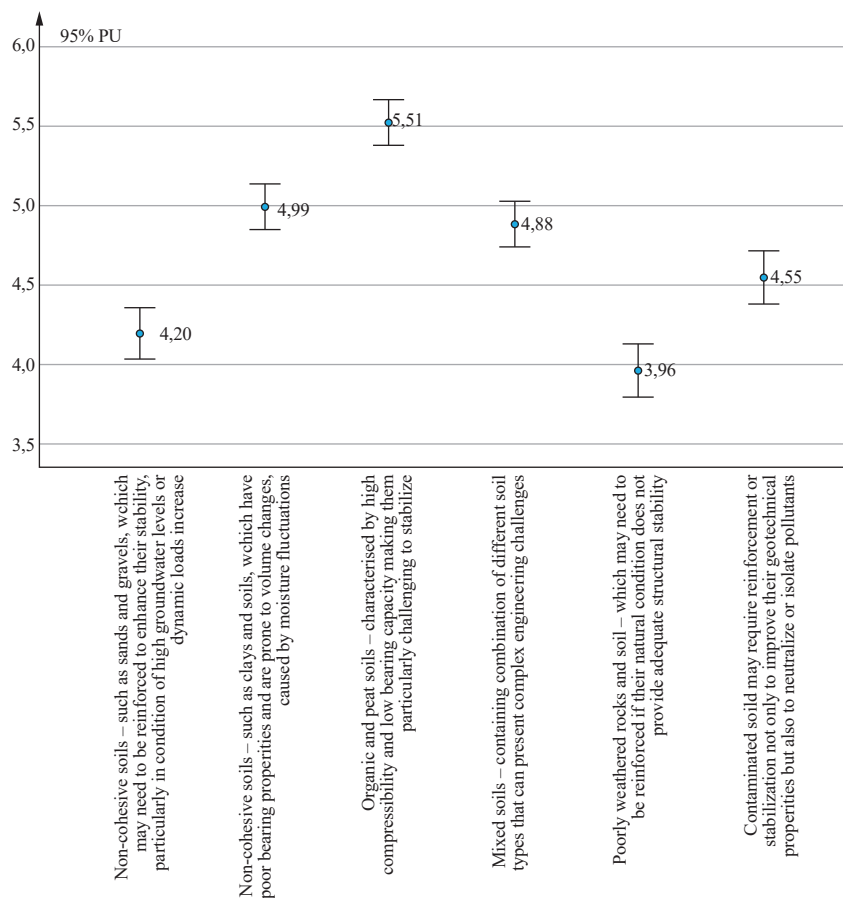


Fig. 2. The significance of reinforcement depth on the durability of a technological solution from the perspective of ground type, according to respondents' opinions

Rys. 2. Wpływ głębokości wzmocnienia podłoża na trwałość rozwiązania technologicznego z perspektywy rodzaju podłoża wg opinii respondentów

oznacza, że różnice w ocenie badanej cechy są między nimi statystycznie istotne.

Druą pod względem istotności grupa dotyczy gruntów spoistych, tj. glin i ilów, które mogą mieć słabe właściwości nośne i są podatne na zmianę objętości spowodowaną wahaniami wilgotności, oraz gruntów mieszanych, zawierających kombinacje różnych typów gleby. W obu przypadkach średnia ocen mieści się blisko oceny 5, co oznacza, że głębokość wzmocnienia obu typów podłoża ma znaczny wpływ na trwałość użytego rozwiązania i jest często brana pod uwagę przy projektowaniu danej technologii.

W przypadku

gruntów zanieczyszczonych, które mogą wymagać wzmocnienia lub stabilizacji nie tylko w celu poprawy ich właściwości geotechnicznych, ale także unieszkodliwienia lub izolacji zanieczyszczeń, średnia ocen wyniosła 4,55. Mieściła się więc między oceną neutralną a raczej wysoką, co wskazuje, że głębokość wzmocnienia podłoża ma istotny wpływ na trwałość danego rozwiązania, ale nie jest jedynym czynnikiem, który o niej decyduje. W przypadku gruntów niespoistych, takich jak piaski i żwiry, średnia ocena oscyluje wokół wartości 4. Mogą one wymagać wzmocnienia w celu zwiększenia stabilności, szczególnie przy wysokim poziomie wód gruntowych lub obciążeniach dynamicznych. Podobną ocenę otrzymały skały i grunty słabo zwietrzałe, które mogą potrzebować wzmocnienia, gdy ich stan naturalny nie zapewnia odpowiedniej stabilności konstrukcji. Świadczy to o tym, że w przypadku wymienionych podłoży głębokość wzmocnienia raczej nie ma decydującego wpływu na trwałość rozwiązania technologicznego.

Tabela 2 przedstawia wyniki analizy porównawczej między dwiema grupami respondentów: inwestorami oraz przedsiębiorstwami branżowymi. Ostatnie dwie kolumny tabeli zawierają wyniki testu U Manna-Whitneya, które pokazują istotne różnice opinii na temat danych rozwiązań między respondentami. W przypadku gruntów spoistych, organicznych i torfowych oraz gruntów mieszanych różnice te okazały się wysoce

Table 2. Comparative analysis of the assessment of the significance of reinforcement depth on the durability of the applied technological solution from the perspective of ground type

Tabela 2. Analiza porównawcza oceny znaczenia głębokości wzmocnienia na trwałość zastosowanego rozwiązania technologicznego w zależności od rodzaju podłoża

Specification / Wyszczególnienie	Investors / Inwestorzy		Industry enterprises / Przedsiębiorstwa branżowe		Statistical description / Opis statystyczny	
	mean / średnia	standard deviation / odchylenie standardowe	mean / średnia	standard deviation / odchylenie standardowe	U	P
Non-cohesive soils / Grunty niespoiste	4,21	1,16	4,19	1,19	5167,500	0,527
Cohesive soils / Grunty spoiste	4,80	0,92	5,28	1,15	3944,500	<0,001***
Organic and peat soils / Grunty organiczne i torfowe	5,25	0,85	5,93	1,25	3130,500	<0,001***
Mixed soils / Grunty mieszane	4,50	0,88	5,47	1,13	2731,000	<0,001***
Rocks and poorly weathered soil / Skały i grunt słabo zwiertzały	3,99	1,11	3,94	1,40	5137,000	0,478
Contaminated soils / Grunty zanieczyszczone	4,41	1,05	4,77	1,35	4531,500	0,034*

* significance level / poziom istotności $p < 0,05$

*** significance level / poziom istotności $p < 0,001$

effect on improving the durability of the technical solution. A similar conclusion can be drawn with regard to contaminated grounds, where the differences in the rating were found to be statistically significant.

istotne statystycznie. Pozwala to na sformułowanie wniosku, że w przypadku tych gruntów przedsiębiorstwa branżowe są bardziej przekonane niż inwestorzy, że głębokość wzmocnienia podłoża ma istotny wpływ na poprawę trwałości zastosowanego rozwiązania technologicznego. Podobny wniosek można sformułować w odniesieniu do gruntów zanieczyszczonych, gdzie różnice w ocenie okazały się istotne statystycznie.

Effect of reinforcement type on durability depending on the type of ground

Figure 3 shows the results of the survey on how the participants rate the effect of the type of reinforcement on the durability of the technological solution applied, while taking into account the type of ground to be reinforced. The data are presented in a bar chart with a 95% confidence interval for the mean. Respondents completed the rating using a seven-point scale. The results of the study indicate that the differences in the ratings between the different ground types are considerable, ranging from 4.15 for non-cohesive soils to 5.34 for organic and peat soils. This testifies to the different perceptions of the si-

Wpływ rodzaju wzmocnienia na trwałość w zależności od typu podłoża

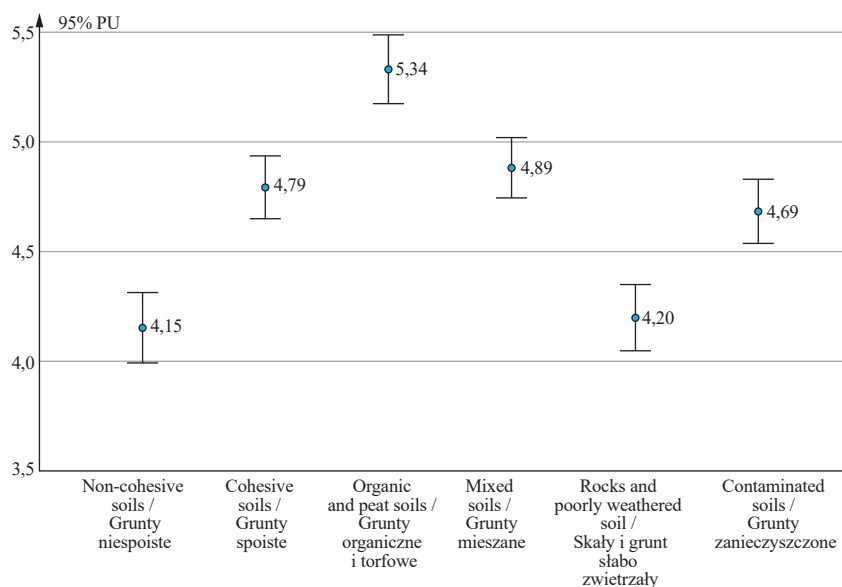


Fig. 3. The significance of the type of ground reinforcement for the durability of the technological solution from the perspective of ground type, according to respondents' opinions

Rys. 3. Wpływ rodzaju wzmocnienia podłoża na trwałość rozwiązania technologicznego z perspektywy typu podłoża wg opinii respondentów

Rysunek 3 przedstawia wyniki badania dotyczące tego, jak uczestnicy oceniają wpływ rodzaju wzmocnienia na trwałość zastosowanego rozwiązania technologicznego, przy jednoczesnym uwzględnieniu rodzaju wzmocnianego podłoża. Dane zostały zaprezentowane na wykresie słupkowym z przedziałem ufności dla średniej wynoszącym 95%. Respondenci dokonywali oceny z użyciem skali siedmiostopniowej. Wyniki ba-

nificance of the type of reinforcement and its impact on the durability of the technology used depending on the type of ground.

Organic and peat soils proved to be the ground where the selection of the right type of reinforcement is of the greatest significance in ensuring the durability of the solution used. This means that, in the example under consideration, the choice of reinforcement method should be carried out through an individual assessment, taking into account detailed geotechnical analyses to better understand the properties of these grounds, including their bearing capacity, compressibility and permeability. It is worth noting that the confidence interval of organic and peat soils does not overlap with the confidence intervals of the other ground types. This means that the differences in the rating of the characteristic under study are statistically significant.

The significance of the type of subsoil reinforcement on the durability of the technological solution is less, but still significant, in the case of mixed, cohesive and contaminated soils. The average scores are close to 5, which means that for these soils the type of reinforcement has a significant impact on the durability of the solution and should be taken into account when designing the technology. The data indicate that the confidence intervals do not overlap with the confidence intervals of the other grounds, which means that the differences in the assessment of the studied characteristic are statistically significant.

Non-cohesive soils, as well as rocks and poorly weathered soils, have proven to be soils that have little effect on how the choice of reinforcement method affects the durability of the technological solution used. In both cases the mean score is close to the neutral score indicating neither low nor high significance. It therefore appears that a greater range of ground reinforcement solutions are available for projects on both types of ground.

In the case of non-cohesive soils and rocks, the opinions of respondents are more varied, which may be due to the natural properties of these grounds, which can provide sufficient durability on their own without the need for additional reinforcement.

Table 3 presents the results of a comparative analysis between investors and industry enterprises. The last two columns of the table contain the results of Mann-Whitney U test showing for which types of ground respondents' opinions differed to a statistically significant degree. It turned out that in five cases the differences between the assessments of investors and industry companies are statistically significant. Only in the case of poorly weathered rocks and soils, no significant differences were found, which means that both groups of respondents have similar attitudes to the durability of the reinforcement type of ground. Industry enterprises rate the significance of reinforcement on different types of ground higher than investors, especially for problematic soils such as organic and peat soils. The exception to this is in the case of non-cohesive soils, where investors rate the significance of reinforcement on this type of ground slightly higher than industry companies.

Summary

The paper provides detailed information on the durability of ground reinforcement made by various methods used in road construction. The results of the research confirm that an ap-

dań wskazują, że różnice w ocenach pomiędzy poszczególnymi typami podłoża są znaczne i wahają się od 4,15 w przypadku gruntów niespoistych do 5,34 w przypadku gruntów organicznych i torfowych. Świadczy to o różnym postrzeganiu znaczenia rodzaju wzmocnienia i jego wpływu na trwałość użytej technologii w zależności od rodzaju podłoża.

Grunty organiczne i torfowe okazały się podłożem, w przypadku którego wybór odpowiedniego rodzaju wzmocnienia ma największe znaczenie w zapewnieniu trwałości użytego rozwiązania. Oznacza to, że w rozpatrywanym przykładzie wybór metody wzmocnienia powinien zostać przeprowadzony na drodze indywidualnej oceny, z uwzględnieniem szczegółowych analiz geotechnicznych, aby lepiej zrozumieć właściwości tych gruntów, w tym ich nośność, ścisłość i przepuszczalność. Warto podkreślić, że przedziały ufności gruntów organicznych i torfowych nie nakładają się na przedziały ufności pozostałych typów podłoża. Oznacza to, że różnice w ocenie badanej cechy są istotne statystycznie.

Mniejsze, choć nadal znaczne, znaczenie rodzaju wzmocnienia podłoża na trwałość rozwiązania technologicznego występuje przy gruntach mieszanych, spoistych oraz zanieczyszczonych. Średnie oceny znajdują się blisko wartości 5, co oznacza, że w przypadku tych gruntów rodzaj wzmocnienia ma znaczny wpływ na trwałość rozwiązania i powinien być brany pod uwagę przy projektowaniu danej technologii. Dane wskazują, że przedziały ufności nie nakładają się na przedziały ufności pozostałych gruntów, co oznacza, że różnice w ocenie badanej cechy są istotne statystycznie.

Grunty niespoiste oraz skały i grunty słabo zwietrzałe okazały się podłożem, które w małym stopniu wpływa na to, jak wybór metody wzmocnienia oddziałuje na trwałość zastosowanego rozwiązania technologicznego. W obu przypadkach średnia ocen znajduje się blisko oceny neutralnej oznaczającej ani niskie, ani wysokie znaczenie. Wydaje się zatem, że przy inwestycjach realizowanych na obu typach gruntów dostępna jest większa paleta rozwiązań wzmocnienia podłoża.

W przypadku gruntów niespoistych oraz skał opinie respondentów są bardziej zróżnicowane, co może wynikać z naturalnych właściwości tych podłoży, które mogą same zapewniać wystarczającą trwałość bez potrzeby dodatkowego wzmocnienia.

Tabela 3 przedstawia wyniki analizy porównawczej między inwestorami oraz przedsiębiorstwami branżowymi. Ostatnie dwie kolumny tabeli zawierają wyniki testu U Manna-Whitneya pokazujące, w przypadku których rodzajów podłoża opinie respondentów różnią się w stopniu statystycznie istotnym. Okazało się, że w pięciu przypadkach różnice między ocenami inwestorów i przedsiębiorstw branżowych są statystycznie istotne. Jedynie w przypadku skał i gruntów słabo zwietrzałych nie stwierdzono istotnych różnic, co oznacza, że obie grupy respondentów mają podobne podejście do trwałości wzmocnienia typu podłoża. Przedsiębiorstwa branżowe oceniają znaczenie wzmocnienia na różnych rodzajach terenu wyżej niż inwestorzy, szczególnie w przypadku problematycznych gruntów, takich jak grunty organiczne i torfowe. Wyjątek stanowią grunty niespoiste, gdzie inwestorzy oceniają znaczenie wzmocnienia na tym typie podłoża nieco wyżej niż przedsiębiorstwa branżowe.

Table 3. Comparative analysis of the assessment of the significance of reinforcement type on the durability of the applied technological solution from the perspective of ground type

Tabela 3. Analiza porównawcza oceny znaczenia rodzaju wzmocnienia na trwałość zastosowanego rozwiązania technologicznego z perspektywy typu podłoża

Specification / Wyszczególnienie	Investors / Inwestorzy		Industry enterprises / Przedsiębiorstwa branżowe		Statistical description / Opis statystyczny	
	mean / średnia	standard deviation / odchylenie standardowe	mean / średnia	standard deviation / odchylenie standardowe	U	P
Non-cohesive soils / Grunty niespoiste	4,28	1,12	3,95	1,27	4478,500	0,024*
Cohesive soils / Grunty spoiste	4,61	1,00	5,08	1,09	4190,500	0,003***
Organic and peat soils / Grunty organiczne i torfowe	4,93	1,04	5,99	1,02	2574,000	<0,001***
Mixed soils / Grunty mieszane	4,69	9,89	5,20	1,13	4033,000	<0,001***
Rocks and poorly weathered soil / Skały i grunt słabo zwietrzały	4,24	1,06	4,14	1,21	5147,000	0,494
Contaminated soils / Grunty zanieczyszczone	4,47	0,85	5,04	1,29	3976,500	<0,001***

* significance level / poziom istotności $p < 0,05$ *** significance level / poziom istotności $p < 0,001$

appropriately selected ground reinforcement method can significantly increase the durability of the road pavement, which in turn translates into structural stability and lower operating costs. Prefabricated piles, concrete columns or soil replacement are proving to be particularly effective in carrying heavy loads and providing resistance to external factors, enabling roads to be used safely over the long term.

Research indicates that the choice of the correct method of ground reinforcement should be tailored precisely to the ground conditions in order to optimise costs and increase the efficiency of road projects. The depth of reinforcement plays a key role, especially in the case of organic and peat soils, which are characterised by high compressibility and low bearing capacity, making them difficult to stabilise. In such cases, the use of deep reinforcement, using concrete columns or prefabricated piles, makes it possible to transfer loads to more stable soil layers, improving the durability of the structure. Such reinforcement reduces the risk of settlement and strain of the pavement, which in turn translates into long-term savings in the operating and maintenance costs of the road infrastructure. The research results also indicate the significance of the type of ground when choosing a reinforcement method and its durability. Organic and peat soils have proven to be particularly challenging grounds and therefore the correct choice of reinforcement technique is key to ensuring the durability of the solution used. This means that, for this type of ground, it is necessary to carry out a detailed geotechnical assessment to gain a thorough understanding of its characteristic properties, such as bearing capacity, compressibility and permeability. These grounds require the use of adaptive design, which takes into account the specific characteristics of the subsoil. This may involve the need to modify the foundations and the use of additional reinforcement techniques to effectively secure the structure and ensure its long-term stability.

Podsumowanie

Artykuł dostarcza szczegółowych informacji na temat trwałości wzmocnienia podłoża wykonanego różnymi metodami, stosowanymi w budownictwie drogowym. Wyniki badań potwierdzają, że odpowiednio dobrana metoda wzmocnienia gruntu może w znacznym stopniu zwiększyć trwałość nawierzchni drogowej, co z kolei przekłada się na stabilność konstrukcji oraz niższe koszty eksploatacyjne. Pale prefabrykowane, kolumny betonowe czy wymiana gruntu okazują się szczególnie skuteczne w przenoszeniu dużych obciążeń oraz zapewnieniu odporności na czynniki zewnętrzne, co umożliwia bezpieczne użytkowanie dróg przez długi czas.

Badania wskazują, że wybór odpowiedniej metody wzmocnienia podłoża powinien być precyzyjnie dostosowany do warunków gruntowych, aby zoptymalizować koszty oraz zwiększyć efektywność inwestycji drogowych. Głębokość wzmocnienia odgrywa kluczową rolę, szczególnie w przypadku gruntów organicznych i torfowych, które cechują się dużą kompresyjnością i małą nośnością, dzięki czemu ich stabilizacja jest trudna. W takich przypadkach zastosowanie głębokiego wzmocnienia, za pomocą kolumn betonowych lub pali prefabrykowanych, umożliwia przeniesienie obciążeń na stabilniejsze warstwy gruntu, co poprawia trwałość konstrukcji. Tego typu wzmocnienia zmniejszają ryzyko osiadania i deformacji nawierzchni, co z kolei przekłada się na długoterminowe oszczędności w kosztach eksploatacji i konserwacji infrastruktury drogowej. Wyniki badań wskazują również na istotne znaczenie rodzaju podłoża w przypadku wyboru metody wzmocnienia i jego trwałości. Grunty organiczne i torfowe okazały się szczególnie wymagającymi podłożami i dlatego odpowiedni dobór techniki wzmocnienia jest kluczowy do zapewnienia trwałości zastosowanego rozwiązania. Oznacza to, że w przypadku tego typu gruntów niezbędne jest przeprowadzenie szczegółowej oceny geotechnicznej w celu dokładnego

Research has shown that industry companies rate the durability of ground reinforcement methods higher than investors, especially in relation to piling, concrete and stone columns. The industry enterprises also emphasised more strongly the influence of the depth of reinforcement and type of ground on the durability of the solutions used. This may be due to the practical experience of companies in project implementation and direct implementation of technology, which translates into their greater confidence in the effectiveness and sustainability of solutions in real-life conditions. Investors, on the other hand, may be more cautious in their assessments, especially towards more advanced technologies, due to financial liability.

Research Funding

The research was conducted as part of the project titled Methods for Conducting Research and Selecting Geotechnical Solutions for Road Investments, funded by the RID II program (NCBR-GDDKiA).

go poznania ich charakterystycznych właściwości, takich jak nośność, ścisłość i przepuszczalność. Podłoża te wymagają zastosowania projektowania adaptacyjnego, które uwzględnia specyficzne cechy gruntów. Może to wiązać się z koniecznością modyfikacji fundamentów oraz zastosowania dodatkowych technik wzmocnienia, aby skutecznie zabezpieczyć konstrukcję i zapewnić jej długoterminową stabilność.

Badania wykazały, że przedsiębiorstwa branżowe oceniają trwałość metod wzmocnienia podłoża wyżej niż inwestorzy, szczególnie w odniesieniu do palowania, kolumn betonowych i kamiennych. Przedsiębiorstwa branżowe silniej akcentowały również wpływ głębokości wzmocnienia i rodzaju podłoża na trwałość zastosowanych rozwiązań. Może to wynikać z praktycznego doświadczenia przedsiębiorstw w realizacji projektów i bezpośredniego wdrażania technologii, co przekłada się na ich większą pewność dotyczącą skuteczności i trwałości rozwiązań w warunkach rzeczywistych. Inwestorzy natomiast, ze względu na odpowiedzialność finansową, mogą wykazywać większą ostrożność w swoich ocenach, szczególnie wobec bardziej zaawansowanych technologii.

Badania zostały zrealizowane w ramach projektu pn. Metody prowadzenia badań i doboru rozwiązań geotechnicznych dotyczących inwestycji drogowych, finansowanego przez program RID II (NCBR-GDDKiA).

Received: 09.09.2024 r.

Revised: 08.10.2024 r.

Published: 20.12.2024 r.

Artykuł wpłynął do redakcji: 09.09.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 08.10.2024 r.

Opublikowano: 20.12.2024 r.

Literature

- [1] Huat BB, Prasad A, Kazemian S, Anggraini V. Ground improvement techniques. London: CRC Press; 2019.
- [2] Puppala AJ, Pedarla A. Innovative ground improvement techniques for expansive soils. Innov. Infrastruct. Solut. 2017. <https://doi.org/10.1007/s41062-017-0079-2>.
- [3] Correia AG, Winter MG, Puppala AJ. A review of sustainable approaches in transport infrastructure geotechnics. Transportation Geotechnics. 2016; 7: 21–28.
- [4] De Borst R, Crisfield MA, Remmers JJ, Verhoosel CV. Nonlinear Finite Element Analysis of Solids and Structures. West Sussex: John Wiley & Sons; 2012.
- [5] Neville AM. Properties of Concrete. Harlow Essex: Longman; 1995.
- [6] Chastre C, Faria P, Neves J, Ludovico-Marques M, Biscaia H, Nunes L. Testing Durability on Construction Materials. In: Chastre C., Neves J., Ribeiro D., Neve, M.G., Faria P., editors. Advances on Testing and Experimentation in Civil Engineering. Cham: Springer; 2023. pp. 29–51.
- [7] Li K, Zhang D, Li Q, Fan Z. Durability for concrete structures in marine environments of HZM project: Design, assessment and beyond. Cement and Concrete Research. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.08.006>.
- [7] Koerner RM. Designing with Geosynthetics. Bloomington: Xlibris Corporation; 2012.
- [8] Nicholson PG. Soil improvement and ground modification methods. Kidlington: Butterworth-Heinemann; 2014.
- [9] Kazemian S, Barghchi M. Review of soft soils stabilization by grouting and injection methods with different chemical binders. Sci Res Essays. 2012; 7(24): 2104–11.
- [10] Chen H, Wang Q. The behaviour of organic matter in the process of soft soil stabilization using cement. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2006; 65: 445–448.
- [11] Zadehmohamad M, Luo N, Abu-Farsakh M, Voyiadjis G. Evaluating long-term benefits of geosynthetics in flexible pavements built over weak subgrades by finite element and Mechanistic-Empirical analyses. Geotextiles and Geomembranes. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2022.01.004>.
- [12] Hsuan YG, Schroeder HF, Rowe K, Müller W, Greenwood J, Cazzuffi D, Koerner RM. Long-term performance and lifetime prediction of geosynthetics. In: Proceeding of EuroGeo 4-4th European Geosynthetics Conference. 2008.
- [13] Górszczyk J, Malicki K. Badania deformacji geosiatki poliestrowej wykorzystywanej w inżynierii lądowej. Materiały Budowlane. 2024. <https://doi.org/10.15199/33.2024.03.07>.
- [14] Keerthi N, Kori S. Study on improvement of sub grade soil using soil-reinforcement technique. International Journal of Applied Engineering Research. 2018; 13(7): 126–134.
- [15] Jha JN, Singh H. Ground Improvement Techniques: Issues, Methods and their Selection. Guru Nanak Dev Engineering College Ludhiana (Punjab)-141006. 2012.
- [16] Shao W, Zhang W, Shi D, Xu Y, Liu E. Time-varying characteristics of the durability and lateral bearing behaviour of FRP bar-reinforced concrete piles in marine environments. Construction and Building Materials. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124192>.
- [17] Purushotham Reddy B, Alagusundaramoorthy P, Sundaravivelu R. Retrofitting of RC piles using GFRP composites. KSCE Journal of Civil Engineering. 2009. <https://doi.org/10.1007/s12205-009-0039-2>.
- [18] Sen R, Mullins G. Application of FRP composites for underwater piles repair. Composites Part B: Engineering. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.07.011>.
- [19] Mutaz E, Shamrani MA, Puppala AJ., Dafalla MA. Evaluation of chemical stabilization of a highly expansive clayey soil. Transportation research record. 2011. <https://doi.org/10.3141/2204-19>.
- [20] Mackiewicz P. Ocena wpływu wybranego wzmocnienia podłoża gruntowego na trwałość konstrukcji nawierzchni drogowej z uwzględnieniem kryteriów deformacji podłoża gruntowego. Przegląd Komunikacyjny. 2014; 5: 27–30.