

**MARCIN ŚWITAŁA**¹⁾

ORCID: 0000-0002-4001-8948

RENATA CICHOS-KABUT²⁾

ORCID: 0009-0007-7364-1377

COST-INTENSITY OF GROUND IMPROVEMENT METHODS IN ROAD CONSTRUCTION – PERSPECTIVES OF INVESTORS AND INDUSTRY ENTERPRISES

KOSZTOCHŁONNOŚĆ METOD WZMOCNIENIA PODŁOŻA W BUDOWNICTWIE DROGOWYM – PERSPEKTYWY INWESTORÓW ORAZ PRZEDSIĘBIORSTW BRANŻOWYCH

STRESZCZENIE. Artykuł ma charakter badawczy i koncentruje się na analizie oraz ocenie kosztochłonności różnych metod wzmocnienia podłoża w budownictwie drogowym. Podstawę źródłową stanowią wyniki badań opinii respondentów. Badanie przeprowadzono wśród szerokiego grona inwestorów oraz przedsiębiorstw branżowych reprezentujących różne segmenty rynku budownictwa drogowego. W analizie uwzględniono szeroki wachlarz technologii, w tym kolumny betonowe, stabilizacje chemiczne czy pale prefabrykowane. Wyniki badań wskazują, że kosztochłonność różni się w zależności od zastosowanej metody, choć w większości przypadków pozostaje na poziomie zbliżonym, odpowiadając standardowym kosztom wzmocnienia podłoża przyjętym w branży. Metody charakteryzujące się wyższymi kosztami, takie jak palowanie i kolumny betonowe, znacząco wpływają na łączne koszty inwestycji drogowych. Zidentyfikowano istotne różnice w postrzeganiu tych kosztów między inwestorami a przedsiębiorstwami branżowymi, co sugeruje, że wykonawcy usług mogą mieć inną perspektywę na koszty związane z wzmocnieniem podłoża. Artykuł omawia również możliwości optymalizacji kosztów wzmocnienia podłoża, a także przedstawia zalecenia mające na celu poprawę efektywności kosztowej oraz zwiększenie trwałości inwestycji drogowych.

SŁOWA KLUCZOWE: działania naprawcze, kosztochłonność, metody wzmocnienia podłoża, optymalizacja kosztów.

ABSTRACT. The paper is a research paper and focuses on the analysis and evaluation of the cost-intensity of different ground improvement methods in road construction. The source basis is the results of a survey of respondents. The survey was conducted among a wide range of investors and industry enterprises representing different segments of the road construction market. A wide range of technologies were included in the analysis, including concrete columns, chemical stabilisation or precast piles. The results of the study show that the cost intensity varies depending on the method used, although in most cases it remains similar, corresponding to the standard cost of ground improvement adopted by the industry. Methods with higher costs, such as piling and concrete columns, significantly affect the total cost of road projects. Significant differences in the perception of these costs were identified between investors and industry enterprises, suggesting that service contractors may have a different perspective on the costs associated with ground improvement. The paper also discusses opportunities to optimise the cost of ground improvement and makes recommendations to improve the cost-intensity and sustainability of road projects.

KEYWORDS: corrective actions, cost-intensity, cost optimisation, ground improvement methods.

DOI: 10.7409/rabdim.024.019

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; marcin.switala@ibdim.edu.pl (✉)

²⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; renata.cichos-kabut@ibdim.edu.pl

1. WSTĘP

Projekty drogowe, ze względu na swoją złożoność i dynamicznie zmieniające się warunki realizacji, wymagają skutecznego zarządzania kosztami już na wczesnych etapach planowania inwestycji [1]. Kluczowym elementem takiego zarządzania jest właściwy dobór metod wzmocnienia podłoża, które odgrywają istotną rolę w całym cyklu życia drogi. Poprawa nośności i stateczności gruntów, na których opiera się konstrukcja, ma bezpośredni wpływ nie tylko na trwałość drogi i bezpieczeństwo ruchu drogowego, ale także na koszty oraz efektywność realizacji projektu.

W ostatnich latach dynamicznie rozwijają się metody wzmocnienia podłoża gruntowego, które znajdują coraz szersze zastosowanie w inżynierii lądowej [2], szczególnie ze względu na rosnącą liczbę inwestycji drogowych. Praktycznie każda budowa drogi wymaga obecnie zastosowania kilku metod wzmocnienia i modyfikacji podłoża w zróżnicowanych warunkach gruntowych, w tym na gruntach słabych lub podatnych na pęcznienie [3]. W budownictwie drogowym techniki te obejmują szeroki zakres działań inżynierskich, mających na celu zwiększenie wytrzymałości podłoża, minimalizację osiadań oraz zapobieganie niekorzystnym zmianom w strukturze gruntu [4]. Badania potwierdzają, że wzmocnienie podłoża znacząco poprawia stateczność gruntu oraz jego zdolność do opierania się procesom zewnętrznym, takim jak erozja, wietrzenie czy hydroinfiltracja, co bezpośrednio przekłada się na wzrost bezpieczeństwa konstrukcji [5-7]. Wśród stosowanych technik wyróżnić można ogólnie metody zagęszczania i konsolidacji oraz metody wzmocnienia gruntu przez wprowadzenie dodatkowego materiału [8]. Właściwe zastosowanie tych metod jest kluczowe dla wszystkich etapów realizacji projektu, co wpływa na jego trwałość i ekonomiczność w dłuższej perspektywie [9, 10].

W niniejszym artykule przedstawiono analizę kosztów metod wzmocnienia podłoża, opartą na danych empirycznych uzyskanych z dwóch ankiet online, które przeprowadzono wśród inwestorów oraz przedsiębiorstw branżowych. Podstawę źródłową stanowią wyniki badań opinii obu grup respondentów. Zakres badania objął szeroki zakres technologii, w tym kolumny kamienne i betonowe, zagęszczenia dynamiczne i impulsowe, pale prefabrykowane, geosyntetyki, stabilizacje chemiczne i hydrauliczne

1. INTRODUCTION

Road projects, due to their complexity and dynamically changing implementation conditions, require effective cost management from the early stages of investment project planning [1]. A key element of such management is the correct choice of ground improvement methods, which play an important role throughout the life cycle of the road. Improving the load-bearing capacity and stability of the underlying ground has a direct impact not only on the durability of the road and traffic safety, but also on the cost and efficiency of the project.

Ground improvement methods have been developing rapidly in recent years and are finding increasing application in civil engineering [2], particularly due to the increasing number of road projects. Virtually all road construction nowadays requires the use of several methods to reinforce and modify the ground in varying soil conditions, including on weak or swell-prone soils [3]. In road construction, these techniques encompass a wide range of engineering measures aimed at increasing the strength of the ground, minimising settlement and preventing adverse changes to the soil structure [4]. Research confirms that ground improvement significantly improves the stability of the soil and its ability to resist external processes such as erosion, weathering or hydroinfiltration, which directly translates into an increase in the safety of structures [5-7]. Among the techniques used, a general distinction can be made between compaction and consolidation methods as well as methods of ground improvement by introducing additional material [8]. The correct application of these methods is crucial for all phases of a project, which affects its sustainability and cost-intensity in the long term [9, 10].

This paper presents a cost analysis of ground improvement methods, based on empirical data obtained from two online surveys carried out with investors and industry companies. The source basis is the results of the survey among both groups of respondents. The scope of the study covered a wide range of technologies, including stone and concrete columns, dynamic and impulse compaction, precast piles, geosynthetics, chemical and hydraulic stabilisation, as well as soil replacement and overload embankments. The survey aimed to find answers to the following research questions:

1. What is the cost intensity of the different methods of ground improvement?

ne, a także wymianę gruntu oraz nasypy przeciążeniowe. Badanie miało na celu znalezienie odpowiedzi na następujące pytania badawcze:

1. Jaka jest kosztochłonność poszczególnych metod wzmocnienia podłoża?
2. Jaki jest udział kosztów wzmocnienia podłoża w łącznych kosztach inwestycji?
3. Jaka jest kosztochłonność poszczególnych zadań związanych z wzmocnieniem podłoża?
4. Czy występują istotne różnice w postrzeganiu kosztów między uczestnikami badania?
5. Czy istnieją obszary wymagające optymalizacji kosztów wzmocnienia podłoża?

2. KONCEPCJA KOSZTÓW CAŁKOWITYCH I WSPÓŁZALEŻNOŚĆ KOSZTÓW

Jak zaznaczono we wstępie, inwestycje drogowe cechują się wysokim stopniem złożoności oraz zmiennością warunków otoczenia, co sprawia, że precyzyjne szacowanie i kontrola kosztów są kluczowe dla pomyślnej realizacji projektu [11]. W tym kontekście analizy ekonomiczne nabierają szczególnego znaczenia, zwłaszcza w zakresie dokładności prognoz finansowych. Badania wskazują, że niedoszacowanie kosztów lub ich nieprzewidziany wzrost stanowią istotne ryzyko finansowe, które może zagrozić pomyślnemu zakończeniu projektów drogowych [12]. Problem ten jest szczególnie widoczny w projektach o długim czasie realizacji, gdzie dokładne prognozowanie kosztów staje się coraz trudniejsze [13]. Co więcej, proces kontroli kosztów staje się znacznie bardziej skomplikowany, jeśli projekt opiera się na niedokładnych kosztorysach [14].

Przeprowadzone przez Odecka badania 42 projektów drogowych dowodzą, że problem błędnych szacunków kosztów pojawia się już na etapie planowania [15]. Z kolei badania Flyvbjerga i współautorów, obejmujące 258 projektów infrastruktury transportowej, wykazały, że w 9 na 10 przypadków koszty były niedoszacowane, a rzeczywiste wydatki przewyższały prognozowane średnio o 28% [16]. Te wyniki podkreślają konieczność przeprowadzania rzetelnych analiz kosztowych w praktyce zawodowej, jak i podejmowania tego tematu w badaniach naukowych. W tym kontekście koncepcja kosztów całko-

2. What is the share of ground improvement costs in total project costs?
3. What is the cost intensity of the various ground improvement tasks?
4. Are there significant differences in cost perceptions between the survey participants?
5. Are there areas for optimising the cost of ground improvement?

2. TOTAL COST CONCEPT AND COST INTERDEPENDENCE

As noted in the introduction, road projects are characterised by a high degree of complexity and variability in the environment, making precise cost estimation and control crucial for successful project implementation [11]. In this context, economic analyses take on particular importance, especially with regard to the accuracy of financial forecasts. Studies indicate that underestimation of costs or unanticipated cost increases are significant financial risks that can jeopardise the successful completion of road projects [12]. This problem is particularly evident in projects with long lead times, where accurate cost forecasting is becoming increasingly difficult [13]. Moreover, the cost control process becomes much more complicated if the project is based on inaccurate cost estimates [14].

Odeck's study of 42 road projects shows that the problem of erroneous cost estimates occurs already at the planning stage [15]. In contrast, a study by Flyvbjerg and co-authors, covering 258 transport infrastructure projects, found that in 9 out of 10 cases costs were underestimated and actual expenditure exceeded forecasts by an average of 28% [16]. These findings highlight the need for reliable cost analyses in professional practice, as well as addressing this topic in research. In this context, the total cost concept can be extremely helpful as it enables a comprehensive approach to the analysis, covering all stages of a project's life cycle – from the preparation phase through to implementation and operation. A key element of this method is the principle of cost interdependence or substitution, which highlights the complexity of the links between different expenses and the need to understand trade-offs [17].

In economic analyses of ground improvement, the principle of cost interdependence seems particularly relevant. Taking preventive actions is usually cheaper and more

witych może okazać się niezwykle pomocna, ponieważ umożliwia kompleksowe podejście do analizy, obejmując wszystkie etapy cyklu życia projektu – od fazy przygotowawczej, przez realizację, aż po eksploatację. Kluczowym elementem tej metody jest zasada współzależności lub substytucji kosztów, która uwidacznia złożoność powiązań między poszczególnymi wydatkami oraz potrzebę zrozumienia kompromisów typu „trade-off” [17].

W analizach ekonomicznych dotyczących wzmocnienia podłoża zasada współzależności kosztów wydaje się szczególnie istotna. Podejmowanie działań zapobiegawczych jest zazwyczaj tańsze i bardziej opłacalne niż działania reaktywne w przypadku awarii lub bezpośredniego zagrożenia jej wystąpieniem, nie wspominając o zagrożeniach dla bezpieczeństwa [18]. Wybór najlepiej dostosowanego rozwiązania do danych warunków gruntowych wymaga szczegółowych badań geotechnicznych oraz analiz konstrukcyjnych. Alternatywne metody wzmocnienia podłoża powinny być oceniane pod kątem zdolności do zwiększania nośności i zmniejszania osiadania gruntu [19], z jednoczesnym uwzględnieniem kosztów i korzyści związanych z eksploatacją i utrzymaniem posadowionych na nich obiektów. Niestety, ze względu na wysokie koszty, często są one realizowane jedynie w ograniczonym zakresie [20].

W budownictwie drogowym optymalizacja kosztów polega na poszukiwaniu rozwiązań, które minimalizują wydatki finansowe, nie wpływając negatywnie na harmonogram, zakres i jakość realizowanego projektu [21]. Szczególnie istotna jest przy tym ocena rentowności ekonomicznej, uwzględniająca analizę zależności między kosztami danej technologii a wydatkami ponoszonymi przez inwestora na późniejszych etapach cyklu życia projektu. Analiza kosztów różnych wariantów wzmocnienia podłoża, z uwzględnieniem możliwości przeprowadzenia wymiany kompensacyjnej, może dostarczyć cennych informacji, które pomogą zarządcom wybrać optymalne rozwiązanie w perspektywie długoterminowej [22]. Celem tej analizy jest znalezienie równowagi między potencjalnym wzrostem kosztów na etapie przygotowawczym a redukcją kosztów w kolejnych fazach realizacji, w tym podczas eksploatacji.

Takie podejście pozwala na optymalizację całkowitych kosztów inwestycji drogowej, uwzględniając zarówno krótkoterminowe nakłady, jak i długoterminowe oszczędności wynikające z wyższej trwałości i mniejszej potrzeby

cost-effective than reactive action in the event of an accident or the imminent threat of one, not to mention safety risks [18]. Selecting the best suited solution for the given ground conditions requires detailed geotechnical investigations and structural analyses. Alternative methods of ground improvement should be assessed for their ability to increase bearing capacity and reduce ground settlement [19], while taking into account the costs and benefits associated with the operation and maintenance of structures founded on them. Unfortunately, due to their high cost, they are often only implemented to a limited extent [20].

In road construction, cost optimisation involves seeking solutions that minimise financial expenditure without adversely affecting the schedule, scope and quality of the completed project [21]. Particularly important in this is the assessment of economic viability, taking into account an analysis of the relationship between the costs of the technology in question and the expenses incurred by the investor at the later stages of the project life cycle. The analysis of the costs of different ground improvement options, taking into account the possibility of compensatory replacement, can provide valuable information to help managers choose the optimal solution in the long term [22]. The aim of this analysis is to find a balance between potential cost increases in the preparation phase and cost reductions in subsequent implementation phases, including during operation.

This approach optimises the total cost of the road projects, taking into account both the short-term outlay and the long-term savings resulting from higher durability and less need for maintenance activities. For example, opting for a more costly method of ground improvement can lead to higher initial costs, more expense during the construction phase, but at the same time save money in the long term through increased durability and less maintenance.

Recognising and understanding these relationships allows total costs to be optimised, leading to more efficient management of road infrastructure. In other words, an increase in costs in one or more phases of a project is offset by a decrease in costs in other phases, which is key to achieving the economic viability of the project. However, cost optimisation should not take place to the exclusion of environmental aspects [23]. Economic and environmental considerations favour the use of almost all local soil and waste materials in earthworks [24].

realizowania działań utrzymaniowych. Przykładowo, wybór bardziej kosztownej metody wzmocnienia podłoża może prowadzić do wyższych kosztów początkowych, większych nakładów w fazie budowy, ale jednocześnie przynieść oszczędności w długim okresie dzięki zwiększonej trwałości i mniejszej potrzebie konserwacji.

Rozpoznanie i zrozumienie tych zależności pozwala na optymalizację kosztów całkowitych, prowadząc do bardziej efektywnego zarządzania infrastrukturą drogową. Innymi słowy, wzrost kosztów w jednej lub kilku fazach projektu zostaje zrównoważony spadkiem kosztów w pozostałych fazach, co jest kluczowe dla osiągnięcia ekonomicznej efektywności inwestycji. Optymalizacja kosztowa nie powinna jednak odbywać się z pominięciem aspektów środowiskowych [23]. Względy ekonomiczne i środowiskowe przemawiają za wykorzystywaniem w budowlach ziemnych niemal wszystkich miejscowych gruntów oraz materiałów odpadowych [24].

3. MATERIAŁY I METODY BADAWCZE

Przyjęte w badaniach podejście, polegające na pozyskaniu danych o kosztach poprzez ankietyzację opinii respondentów, jest szeroko praktykowane w badaniach naukowych. Przykładem mogą być badania dotyczące analizy kosztów w projektach budowlanych, w których opinie ekspertów branżowych pozwoliły na oszacowanie czynników kosztotwórczych związanych z zastosowaniem różnych technologii [25], a także badania identyfikujące kluczowe czynniki kontroli kosztów w projektach hydrotechnicznych [26]. Takie podejście znajduje również zastosowanie w badaniach ekonomicznych i społecznych, gdzie opinie respondentów stanowią istotne źródło informacji o zmiennych rynkowych czy kosztach produkcji [27].

Analiza kosztowości oparta na danych z badań kwestionariuszowych przeprowadzonych z udziałem respondentów może stanowić istotne źródło wiedzy ekonomicznej w ramach badań wstępnych, obejmujących pomiar i ogólne rozpoznanie przedmiotu badań [28]. Warto podkreślić, że starannie dobrani eksperci branżowi posiadają praktyczną wiedzę na temat kosztów, wyzwań technicznych oraz zmiennych warunków towarzyszących stosowaniu różnych technologii wzmocnienia podłoża. Tego rodzaju doświadczenie jest trudne do uchwycenia wyłącznie na podstawie danych wtórnych, ponieważ wiele projektów w praktyce napotyka na złożone warunki grun-

3. RESEARCH MATERIALS AND METHODS

The approach adopted in the research, to obtain cost-intensity data by surveying respondents' opinions, is widely practised in scientific research. Examples include studies on cost analysis in construction projects, in which the opinions of industry experts allowed the estimation of cost drivers associated with the use of different technologies [25], as well as studies identifying key cost control factors in hydraulic engineering projects [26]. This approach is also used in economic and social research, where respondents' opinions are an important source of information about market variables or production costs [27].

A cost-intensity analysis based on data from questionnaire surveys with respondents can be an important source of economic knowledge as part of preliminary research involving measurement and general identification of the research subject [28]. It is noteworthy that the carefully selected industry experts have a working knowledge of the costs, technical challenges and varying conditions surrounding the use of different ground improvement technologies. This type of experience is difficult to capture from secondary data alone, as many projects in practice encounter complex ground conditions that require specialised solutions and ongoing updating of cost estimates in response to new circumstances. As a result, this type of analysis allows for a more flexible and adequate capture of the specifics of the phenomenon under study than standard price bulletin data, which has proven to be relatively limited in the context of the research undertaken [29].

The surveys were conducted between March and June 2024 using two electronic survey questionnaires. The research sample consisted of 131 entities representing road project investors and 83 companies representing the design and contracting industry. In both cases, the sample was selected in a purposeful manner, driven by the need to focus on a specific group of actors with unique characteristics and experiences central to the subject of the survey. Invitations to participate in the survey were sent to respondents whose email addresses were obtained from the PressInfo tender platform.

The first sample was predominantly made up of public investors, representing more than 90% of the survey participants. The public-private sector accounted for just under 5% of the sample, the corporate sector 1% and

towe, które wymagają specjalistycznych rozwiązań i bieżącej aktualizacji kosztorysów w odpowiedzi na nowe okoliczności. W rezultacie, tego typu analizy umożliwiają bardziej elastyczne i adekwatne uchwycenie specyfiki badanego zjawiska niż standardowe dane z biuletynów cenowych, które w kontekście realizowanych badań okazały się stosunkowo ograniczone [29].

Badania zostały przeprowadzone w okresie od marca do czerwca 2024 roku z wykorzystaniem dwóch kwestionariuszy ankiet elektronicznych. Próbę badawczą stanowiło 131 podmiotów reprezentujących inwestorów inwestycji drogowych oraz 83 przedsiębiorstw reprezentujących branżę projektową i wykonawczą. W obu przypadkach próbę dobrano w sposób celowy, co wynikało z potrzeby skoncentrowania się na specyficznej grupie podmiotów, które posiadają unikalne cechy i doświadczenia kluczowe dla przedmiotu badania. Zaproszenia do udziału w badaniu skierowano do respondentów, których adresy mailowe pozyskano z platformy przetargowej PressInfo.

Pierwszą próbę w głównej mierze tworzyli inwestorzy publiczni, reprezentujący ponad 90% uczestników badania. Sektor publiczno-prywatny stanowił niecałe 5% próby, sektor korporacyjny 1%, a inwestorzy indywidualni – 1,5%. Przedstawiciele małych organizacji stanowili nieco ponad 47% próby, średnie organizacje reprezentowane były przez 29% uczestników badania, a organizacje duże – niecałe 17% (7% ankietowanych nie określiło wielkości swojej organizacji). Respondenci wskazali na zróżnicowany zakres realizowanych inwestycji. W próbie badawczej dominowali inwestorzy realizujący inwestycje na drogach gminnych (45,80%) oraz drogach powiatowych (35,90%). Ponad 15% respondentów wskazało na drogi ekspresowe i autostrady, a 8,50% – na drogi wojewódzkie. Pozostali wskazali na drogi krajowe (1,60%) oraz drogi ekspresowe, autostrady oraz inne drogi krajowe (3,10%).

Charakterystyka respondentów przekłada się na znaczną różnorodność odpowiedzi dotyczących liczby zrealizowanych projektów drogowych. Respondenci reprezentują szeroki zakres doświadczenia, od tych, którzy zrealizowali jedynie kilka projektów (24%), do tych, którzy mają na koncie ponad 20 projektów (34,4%). Uczestnikami badania byli więc zarówno mniej doświadczeni, jak i bardzo doświadczeni inwestorzy.

individual investors – 1.5%. Representatives of small organisations made up just over 47% of the sample, medium-sized organisations were represented by 29% of survey participants and large organisations by just under 17% (7% of respondents did not specify the size of their organisation). Respondents indicated a diverse range of projects being implemented. The research sample was dominated by investors implementing projects on municipal roads (45.80%) and district roads (35.90%). More than 15% of respondents indicated express ways and motorways and 8.50% indicated provincial roads. The remainder indicated national roads (1.60%) and express ways, motorways and other national roads (3.10%).

The characteristics of the respondents translate into a wide variety of responses regarding the number of road projects completed. Respondents represent a wide range of experience, from those who have completed only a few projects (24%) to those with more than 20 projects to their credit (34.4%). The participants in the survey were, therefore, both less experienced and very experienced investors.

The investor representatives taking part in the survey were mainly senior and middle managers, including those employed as investment inspectors, who made up the majority of the sample. The remaining respondents were employed in positions such as senior inspector, chief specialist, head of investment and municipal affairs, head of department, director and deputy director.

The second group of respondents consisted of companies representing the supply side of the road construction services market. The sample was diverse in terms of the range of services provided, with a predominance of companies specialising in the development of design documentation (41.0%), including the provision of comprehensive services involving the simultaneous role of designer and contractor (22.9%). Road project contractors were represented by 26.5% of the survey participants and construction supervisors by 24.1%. In other cases, respondents declared specialisations related to laboratory services, quality control and mathematical modelling.

The results indicate that the majority of respondents have considerable experience in road projects, which demonstrates the high level of competence and professionalism of the survey participants. The largest group of respondents (61.4%) has more than 10 years of experience in road projects. Respondents with 5-10 years of industry experience were also a significant segment (24.1%). Less

Reprezentantami inwestorów biorących udział w badaniu byli głównie menedżerowie wyższego i średniego szczebla, w tym osoby zatrudnione na stanowiskach inspektora ds. inwestycji, którzy stanowili większość próby. Pozostali respondenci byli zatrudnieni na stanowiskach takich jak: starszy inspektor, główny specjalista, kierownik referatu inwestycji i spraw komunalnych, naczelnik wydziału, dyrektor oraz zastępca dyrektora.

Drugą grupę respondentów stanowiły przedsiębiorstwa reprezentujące stronę podażową rynku usług budownictwa drogowego. Próba była zróżnicowana ze względu na zakres świadczonych usług, z dominacją przedsiębiorstw wyspecjalizowanych w opracowywaniu dokumentacji projektowych (41,0%), w tym w świadczeniu usług kompleksowych, polegających na jednoczesnym pełnieniu roli projektanta i wykonawcy (22,9%). Wykonawcy inwestycji drogowych reprezentowani byli przez 26,5% uczestników badania, a podmioty sprawujące funkcje nadzoru budowlanego – 24,1%. W pozostałych przypadkach respondenci zadeklarowali specjalizacje związane z obsługą laboratoryjną, kontrolą jakości oraz modelowaniem matematycznym.

Wyniki wskazują, że większość respondentów posiada znaczne doświadczenie w realizacji inwestycji drogowych, co świadczy o wysokim poziomie kompetencji i profesjonalizmu uczestników badania. Największa grupa respondentów (61,4%) ma więcej niż 10 lat doświadczenia w realizacji inwestycji drogowych. Znaczący segment stanowili także respondenci z 5-10 latami doświadczenia branżowego (24,1%). Mniejsze doświadczenie w realizacji inwestycji drogowych, rzędu 2-5 lat, wskazało 7,2% ankietowanych przedsiębiorstw.

Biorąc pod uwagę rodzaj realizowanych projektów drogowych, niemal 80,4% badanych przedsiębiorstw zadeklarowało wykonywanie prac projektowych bądź robót budowlanych dotyczących dróg ekspresowych i autostrad, z czego 16,9% świadczy dodatkowo usługi na drogach wojewódzkich, a 20,5% – na drogach wojewódzkich, powiatowych oraz gminnych. Pozostali respondenci specjalizują się w realizacji inwestycji dotyczących wyłącznie dróg niższej kategorii, tj. dróg gminnych oraz dróg powiatowych. W zakresie zatrudnienia dominowały przedsiębiorstwa duże, które stanowiły 57,8% wszystkich uczestników badania. Przedstawiciele sektora MŚP (małych i średnich przedsiębiorstw) stanowili nieco ponad 32% próby, w tym średnie przedsiębiorstwa stanowiły około 22% badanych

experience in road projects, of 2-5 years, was indicated by 7.2% of the companies surveyed.

Taking into account the type of road projects carried out, almost 80.4% of the companies surveyed declared that they perform design or construction work on express ways and motorways, of which 16.9% additionally provide services on provincial roads, and 20.5% on provincial, district and municipal roads. The remaining respondents specialise in projects exclusively on lower category roads, i.e. municipal roads and district roads.

In terms of employment, large companies dominated, accounting for 57.8% of all survey participants. Representatives of the SME (small and medium-sized enterprise) sector accounted for just over 32% of the sample, with medium-sized enterprises making up around 22% of the entities surveyed. Micro-enterprises were represented by 9.6% of the companies surveyed.

The companies were represented in the survey mainly by middle and senior managers employed in positions such as contract managers, site managers, inspectors, contract engineers, designers, specialists and contract directors.

Data collection was carried out using two electronic questionnaires, which included questions in the form of nominal and ordinal scales and open-ended questions. The survey covered a wide range of technologies: stone, concrete and cement-soil columns, subsurface drainage, dynamic and impulse compaction, prefabricated piles, grain size improvement and compaction, geosynthetics, chemical and hydraulic stabilization, as well as ground replacement and overload embankments. The thematic scope of the study included the cost intensity of ground improvement methods, the contribution of ground improvement costs to total project costs and the cost burden of tasks included in the ground improvement work. An important element of the questionnaires were open-ended questions on how to optimise the cost of ground improvement. Semantic analysis and a frequency survey were used in answering these questions.

For the purposes of conceptualising the research problem, an index-based definition of cost intensity was adopted, denoting the level of resultant costs [30]. In this view, cost-intensity refers to the amount of costs incurred in carrying out a specific task, classified on a scale from “very low” to “very high”. The reliability of the ordinal scales devoted to cost-intensity was assessed using Cronbach’s α

podmiotów. Mikroprzedsiębiorstwa były reprezentowane przez 9,6% ankietowanych firm.

Reprezentantami przedsiębiorstw biorących udział w badaniu byli głównie menedżerowie średniego i wyższego szczebla zatrudnieni na stanowiskach takich jak: kierownicy kontraktu, kierownicy budowy, inspektorzy, inżynierowie kontraktów, projektanci, specjaliści oraz dyrektorzy kontraktów.

Zebranie danych przeprowadzono za pomocą dwóch kwestionariuszy elektronicznych, które zawierały pytania w formie skal nominalnych i porządkowych oraz pytań otwartych. Badania obejmowały szeroki zakres technologii: kolumny kamienne, betonowe i cementowo-gruntowe, odwodnienia wgłębne, zagęszczenia dynamiczne i impulsowe, pale prefabrykowane, poprawę uziarnienia i dogęszczanie, geosyntetyki, stabilizacje chemiczne i hydrauliczne, a także wymianę gruntu oraz nasypy przeciążeniowe. Zakres tematyczny badań obejmował kosztocłonność metod wzmocnienia podłoża, udział kosztów wzmocnienia podłoża w łącznych kosztach inwestycji oraz obciążenie kosztowe zadań wchodzących w zakres prac związanych z wykonaniem wzmocnienia podłoża. Ważnym elementem kwestionariuszy były pytania otwarte dotyczące możliwości optymalizacji kosztów wzmocnienia podłoża. W odpowiedziach na te pytania zastosowano analizę semantyczną oraz badanie frekwencyjności.

Dla potrzeb konceptualizacji problemu badawczego przyjęto wskaźnikową definicję kosztocłonności, oznaczającą poziom kosztów wynikowych [30]. W takim ujęciu kosztocłonność odnosi się do wysokości kosztów poniesionych w związku z realizacją określonego zadania, klasyfikowanych w skali od „bardzo niskiej” do „bardzo wysokiej”. Rzetelność skal porządkowych poświęconych kosztocłonności została oceniona za pomocą współczynnika α Cronbacha, którego wartości przekraczające 0,6 są uznawane za wskazujące na wysoką rzetelność skali [31]. Jak wynika z danych przedstawionych w Tabl. 1, wszystkie zastosowane skale osiągnęły wartości współczynnika α Cronbacha wyraźnie powyżej tego progu, co potwierdza ich wysoką rzetelność.

Przy opracowaniu wyników posłużono się oprogramowaniem SPSS. W opisie statystycznym wykorzystano standardowe miary statystyki opisowej, rozkłady częstości udzielanych odpowiedzi, test U Manna-Whitneya, dwukierunkową analizę wariancji Friedmana oraz wspomniany już współczynnik α Cronbacha. Przyjęto, że wynik jest istotny statystycznie dla $p < 0,05$.

coefficient, whose values exceeding 0.6 are considered to indicate high scale reliability [31]. As can be seen from the data presented in Table 1, all the scales used achieved Cronbach's α values clearly above this threshold, confirming their high reliability.

Table 1. Cronbach's α coefficient values for scales examining the cost-intensity of ground improvement
Tablica 1. Wartości współczynnika α Cronbacha dla skal badających kosztocłonność metod wzmocnienia podłoża

No. Lp.	Type of question (scale) Rodzaj pytania (skali)	Cronbach's α α Cronbacha
1	Measuring the cost-intensity of ground improvement methods (11 methods of ground improvement were evaluated using a 7-point scale) Pomiar kosztocłonności metod wzmocnienia podłoża (za pomocą skali 7-stopniowej oceniono 11 metod wzmocnienia podłoża)	0.840
2	Measurement of the share of ground improvement costs in total project costs (using a 7-point scale, the share of the costs of the 11 methods of ground improvement to the total project costs was assessed) Pomiar udziału kosztów wzmocnienia podłoża w łącznych kosztach inwestycji (za pomocą skali 7-stopniowej oceniono udział kosztów 11 metod wzmocnienia podłoża w łącznych kosztach inwestycji)	0.892
3	Measuring the amount of costs generated at different stages of ground improvement works (using a 7-point scale, the cost-generating level of the 7 stages of ground improvement works was assessed) Pomiar wysokości kosztów generowanych na różnych etapach prac związanych ze wzmocnieniem podłoża (za pomocą skali 7-stopniowej oceniono poziom kosztotwórczy 7 etapów prac związanych z realizacją wzmocnienia podłoża)	0.798

SPSS software was used to compile the results. The statistical description used standard measures of descriptive statistics, frequency distributions of responses, the Mann-Whitney U test, Friedman's two-way analysis of variance and the aforementioned Cronbach's α coefficient. The result was assumed to be statistically significant at $p < 0.05$.

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. KOSZTOCHŁONNOŚĆ METOD WZMOCNIENIA PODŁOŻA

Rys. 1 przedstawia odpowiedzi wszystkich uczestników badania na pytanie dotyczące kosztocłonności jedenastu metod wzmocnienia podłoża. Dane zostały zaprezentowane na wykresie słupkowym z przedziałem ufności dla średniej wynoszącym 95%. Respondenci dokonywali oceny z użyciem skali 7-stopniowej, gdzie ocena 1 oznaczała bardzo niską kosztocłonność danej metody, a ocena 7 – kosztocłonność bardzo wysoką. Różnice pomiędzy poszczególnymi metodami są znaczące: od 3,76 w przypadku poprawy uziarnienia i dogęszczania, do 5,26 w sytuacji palowania w gruncie. Wyniki dwukierunkowej analizy wariancji Friedmana potwierdzają, że kosztocłonność nie jest taka sama dla wszystkich metod ($F = 346,754$ dla $p < 0,001$). Dominują jednak oceny zbliżone do 4, co oznacza, że spora część ujętych w badaniu metod została oceniona w podobny sposób. Respondenci preferowali tym samym udzielanie odpowiedzi neutralnych (ani niska, ani wysoka kosztocłonność), co może wskazywać, że koszty większości metod są do siebie podobne i odpowiadają przyjętym w branży standardowym kosztom wzmocnienia podłoża. Porównania parami w teście Friedmana wykazały brak istotnych statystycznie różnic ($p > 0,05$) w ocenie kosztocłonności między piętnastoma parami metod, w tym: między zagęszczaniem dynamicznym i impulsowym a odwodnieniem wgłębnym, odwodnieniem wgłębnym a stabilizacją chemiczną i hydrauliczną, a także między stabilizacją chemiczną i hydrauliczną a nasypami przeciążeniowymi.

Wyniki badań wskazują, że respondenci byli bardziej skłonni do formułowania wyższych ocen kosztocłonności w odniesieniu do czterech metod: 1) wzmocnienia podłoża palami, 2) użycia kolumn betonowych, 3) zastosowania wymiany gruntu oraz 4) kolumn cementowo-gruntowych. W każdym z tych przypadków średnie oceny znajdowały się wyraźnie powyżej środka skali (wartości 4), co sugeruje, że: 1) koszty wymiany gruntu oraz kolumn cementowo-gruntowych są nieco wyższe niż koszty przeciętne, nadal mieszczą się jednak w akceptowalnych granicach; 2) koszty palowania gruntu oraz kolumn betonowych są wyższe niż koszty pozostałych rozwiązań i mogą być uznawane za metody generujące wysokie koszty.

4. TEST RESULTS

4.1. MEASURING THE COST-INTENSITY OF GROUND IMPROVEMENT METHODS

Fig. 1 shows the responses of all survey participants to the question on the cost-intensity of the eleven ground improvement methods. The data are presented in a bar chart with a 95% confidence interval for the mean. Respondents made a rating using a 7-point scale, where a rating of 1 meant very low cost intensity of a method and a rating of 7 meant very high cost intensity. The differences between the different methods are significant: from 3.76 in the case of grain size improvement and compaction, to 5.26 in the case of in-ground piling. The results of Friedman's two-way analysis of variance confirm that the cost intensity is not the same for all methods ($F = 346.754$ for $p < 0.001$). However, ratings close to 4 predominate, which means that quite a few of the methods included in the survey were rated in a similar way. Respondents thus preferred to give neutral answers (neither low nor high cost intensity), which may indicate that the costs of most methods are similar to each other and correspond to industry standard costs for ground improvement. Pairwise comparisons using the Friedman test showed no statistically significant differences ($p > 0.05$) in the assessment of cost-intensity between fifteen pairs of methods, including: between dynamic and pulse compaction and subsurface drainage, subsurface drainage and chemical and hydraulic stabilisation, and between chemical and hydraulic stabilisation and overload embankments.

The results indicate that respondents were more likely to form higher cost-intensity ratings for the four methods: 1) ground improvement with piles, 2) the use of concrete columns, 3) the use of soil replacement and 4) cement-soil columns. In each of these cases, the average ratings were clearly above the middle of the scale (value of 4), suggesting that: 1) the costs of soil replacement and cement and soil columns are slightly higher than average costs, but are still within acceptable limits; 2) the costs of soil piling and concrete columns are higher than the costs of the other solutions and can be considered high-cost methods.

It is worth noting that the confidence intervals for the piles and concrete columns do not overlap with the confidence intervals of the other methods, indicating a statistically significant difference between their mean values and those of the other methods. In addition, the cost intensity

Warto podkreślić, że przedziały ufności dla pali oraz kolumn betonowych nie pokrywają się z przedziałami ufności pozostałych metod, co wskazuje na statystycznie istotną różnicę między ich średnimi wartościami a wartościami pozostałych metod. Dodatkowo kosztocłonność pali różni się statystycznie od kosztów kolumn betonowych, a kosztocłonność wymiany gruntu znacząco różni się od kosztocłonności stabilizacji chemicznej i hydraulicznej oraz pozostałych metod o niższych ocenach. Podobne zależności można zaobserwować w przypadku kolumn cementowo-gruntowych. Porównania parami przeprowadzone za pomocą testu Friedmana wykazały statystycznie istotne różnice ($p < 0,05$) w ocenie kosztocłonności między analizowanymi metodami.

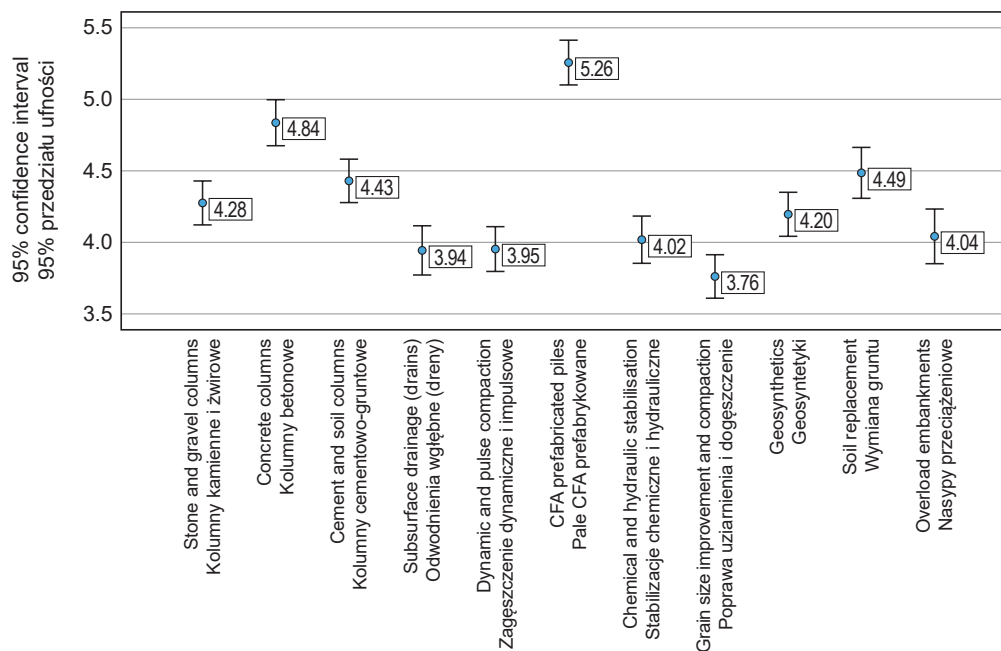


Fig. 1. Cost intensity of ground improvement methods according to respondents' opinions
Rys. 1. Kosztocłonność metod wzmocnienia podłoża według opinii respondentów

W Tabl. 2 przedstawiono wyniki analizy porównawczej między dwiema grupami respondentów: inwestorami oraz przedsiębiorstwami branżowymi. Ostatnie dwie kolumny tablicy zawierają wyniki testu U Manna-Whitneya, który wskazuje, dla których metod opinie respondentów różnią się w stopniu statystycznie istotnym. Takie różnice odnotowano dla siedmiu z jedenastu metod, szczególnie w odniesieniu do ocen kosztocłonności zastosowania odwodnienia wgłębego, zagęszczania dynamicznego i impulsowego, stabilizacji chemicznych i hydraulicznych, poprawy uziarnienia i dogęszczania oraz nasypów przeciążeniowych, gdzie różnice okazały się być wysoce

of piles is statistically different from that of concrete columns, and the cost intensity of soil replacement is significantly different from that of chemical and hydraulic stabilisation and the other methods with lower ratings. Similar relationships can be observed in the case of cement and soil columns. Pairwise comparisons using the Friedman test showed statistically significant differences ($p < 0.05$) in the assessment of cost-intensity between the methods analysed.

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 indicates for which methods respondents' opinions differ to a statistically significant degree. Such differences were recorded for seven of the eleven methods, particularly with regard to the cost-intensity ratings of the use of subsurface drainage, dynamic and pulse compaction, chemical and hydraulic stabilisation, grain size improvement and compaction, and overload embankments, where the differences were found to be highly

istotnie statystycznie ($p < 0,001$). Oznacza to, że przedsiębiorstwa branżowe znacznie częściej niż inwestorzy uważają, iż wymienione metody nie są zbyt kosztowne w praktycznym zastosowaniu. Średnie oceny dla tych metod mieszczą się w granicach oceny 3, oznaczającej, że koszty są nieznacznie niższe od kosztów porównywalnych rozwiązań, oraz oceny 4, oznaczającej, że koszty są na poziomie przeciętnym, odpowiadającym standardowym metodom wzmocnienia podłoża. Respondenci okazali się natomiast zgodni w kwestii oceny kosztów związanych z zastosowaniem pozostałych metod, w tym kolumn betonowych, które cechują się relatywnie wysoką kosztownością w porównaniu do większości metod. W porównaniu do inwestorów, przedsiębiorstwa branżowe wykazują tendencję do przypisywania wyższych kosztów metodzie palowania gruntów – w tym przypadku różnica ocen jest jednak bliska istotności statystycznej.

statistically significant ($p < 0.001$). This means that industry enterprises are much more likely than investors to believe that the methods mentioned are not too costly in practical application. The average ratings for these methods are within the range of a rating of 3, indicating that the costs are slightly lower than those of comparable solutions, and a rating of 4, indicating that the costs are at an average level, corresponding to standard ground improvement methods. In contrast, respondents appeared to agree on the assessment of the costs associated with the other methods, including concrete columns, which have a relatively high cost intensity compared to most methods. Compared to investors, industry companies tend to attribute higher costs to the soil piling method – in this case, however, the difference in ratings is close to statistical significance.

Table 2. Comparative analysis of cost intensity assessment of ground improvement methods between the two surveyed groups of respondents
Tablica 2. Analiza porównawcza oceny kosztowności metod wzmocnienia podłoża między dwiema badanymi grupami respondentów

No. Lp.	Specification Wyszczególnienie	Investors Inwestorzy		Industry enterprises Przedsiębiorstwa branżowe		Statistical description Opis statystyczny	
		Mean Średnia	Standard deviation Odchylenie standard.	Mean Średnia	Standard deviation Odchylenie standard.	<i>U</i>	<i>p</i>
1.	Stone and gravel columns Kolumny kamienne i żwirowe	4.31	1.09	4.22	1.22	5085.500	0.404
2.	Concrete columns Kolumny betonowe	4.82	1.12	4.87	1.30	5136.000	0.481
3.	Cement and soil columns Kolumny cementowo-gruntowe	4.54	1.00	4.25	1.29	4558.000	0.037 ^{*)}
4.	Subsurface drainage (drains) Odwodnienia wglębne (dreny)	4.22	1.12	3.51	1.38	3747.000	< 0.001 ^{**)}
5.	Dynamic and pulse compaction Zagęszczanie dynamiczne i impulsowe	4.19	0.95	3.58	1.36	3716.500	< 0.001 ^{**)}
6.	Piles (CFA, prefabricated) Pale (CFA, prefabrykowane)	5.15	1.23	5.43	1.07	4611.500	0.053
7.	Chemical and hydraulic stabilisation Stabilizacje chemiczne i hydrauliczne	4.25	1.25	3.65	1.10	3807.500	< 0.001 ^{**)}
8.	Granulation improvement and compaction Poprawa uziarnienia i dogęszczanie	4.02	1.07	3.35	1.10	3578.500	< 0.001 ^{**)}
9.	Geosynthetics Geosyntetyki	4.11	1.14	4.34	1.13	4867.500	0.180
10.	Soil replacement Wymiana gruntu	4.62	1.36	4.28	1.23	4558.500	0.040 ^{*)}
11.	Overload embankments Nasypy przeciążeniowe	4.48	1.15	3.35	1.53	3106.500	< 0.001 ^{**)}

^{*)} statistically significant result at $p < 0.05$ / wynik istotny statystycznie na poziomie $p < 0,05$
^{**)} statistically significant result at $p < 0.001$ / wynik istotny statystycznie na poziomie $p < 0,001$

4.2. UDZIAŁ KOSZTÓW WZMOCNIENIA PODŁOŻA W ŁĄCZNYCH KOSZTACH INWESTYCJI

Rys. 2 przedstawia odpowiedzi wszystkich uczestników badania na pytanie dotyczące udziału kosztów wzmocnienia podłoża w łącznych kosztach inwestycji. Dane zostały zaprezentowane na wykresie słupkowym z przedziałem ufności dla średniej wynoszącym 95%. Respondenci dokonywali oceny z użyciem skali 7-stopniowej, gdzie oceny 1 oznaczały bardzo niski udział kosztów, a oceny 7 – udział bardzo wysoki. Wyniki analizy wskazują, że rozstęp ocen jest znaczący, co świadczy o różnorodnych opiniach respondentów na temat istotności poszczególnych kosztów w łącznych kosztach inwestycji. Z badań wynika, że najwyższy udział kosztów w kosztach łącznych inwestycji cechuje metodę palowania. Średnia ocen wyniosła 5,01, co wskazuje na raczej istotny wpływ kosztów wzmocnienia podłoża na łączne koszty projektu. Drugi najwyższy wynik uzyskały kolumny betonowe, ze średnią oceną wynoszącą 4,71. Przedział ufności dla metody palowania nie pokrywa się z przedziałami ufności pozostałych metod, za wyjątkiem kolumn betonowych, co wskazuje na statystycznie istotne różnice między palowaniem a innymi technikami wzmocnienia podłoża. Oznacza to, że metoda palowania oraz kolumny betonowe mogą być uznawane za bardziej kosztotwórcze elementy rachunku kosztów, wykazując wyraźną przewagę nad innymi metodami pod względem udziału kosztów w łącznych kosztach inwestycji.

Poprawę uziarnienia i dogęszczanie można uznać za metodę, która w najmniejszym stopniu wpływa na strukturę kosztów budżetu inwestycji drogowej. Średnia ocen wyniosła 3,60, co wskazuje, że metoda ta ma pewien wpływ na wysokość budżetu, jednak nie jest on szczególnie znaczący. Najprawdopodobniej jest to związane z niskimi kosztami zakupów materiałowych oraz niskimi kosztami wykonania, które są typowe dla tej metody. Jest to stosunkowo prosta technika wzmocnienia podłoża, która nie wymaga skomplikowanych technologii ani specjalistycznego sprzętu.

W Tabl. 3 przedstawiono wyniki analizy porównawczej między dwiema grupami respondentów: inwestorami oraz przedsiębiorstwami branżowymi. Ostatnie dwie kolumny tabeli zawierają wyniki testu U Manna-Whitneya, które wskazują, dla których metod opinie respondentów różnią się w sposób statystycznie istotny.

4.2. SHARE OF GROUND IMPROVEMENT COSTS IN TOTAL PROJECT COSTS

Fig. 2 shows the responses of all survey participants to the question on the contribution of ground improvement costs to total project costs. The data are presented in a bar chart with a 95% confidence interval for the mean. Respondents made a rating using a 7-point scale, where a rating of 1 meant very low cost share and a rating of 7 meant very high share. The results of the analysis show that the spread of assessments is significant, reflecting the varying opinions of respondents on the relevance of individual costs to the total project costs. The survey shows that the piling method has the highest cost share in the total project costs. The average rating was 5.01, indicating a rather significant impact of ground improvement costs on total project costs. The second highest rating was given to concrete columns, with an average score of 4.71. The confidence interval for the piling method does not overlap with the confidence intervals of the other methods, except for concrete columns, indicating statistically significant differences between piling and other ground improvement techniques. This means that the piling method and concrete columns can be considered the more cost-intensive elements of costing, showing a clear advantage over the other methods in terms of cost share to total project costs.

Grain size improvement and compaction can be considered the method that has the least impact on the cost structure of a road project budget. The average rating was 3.60, indicating that the method has some impact on the budget, but not a particularly significant one. This is most likely due to the low cost of material purchase and low manufacturing costs that are typical of this method. It is a relatively simple ground improvement technique that does not require sophisticated technology or specialised equipment.

Table 3 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 indicates for which methods respondents' opinions differ in a statistically relevant way.

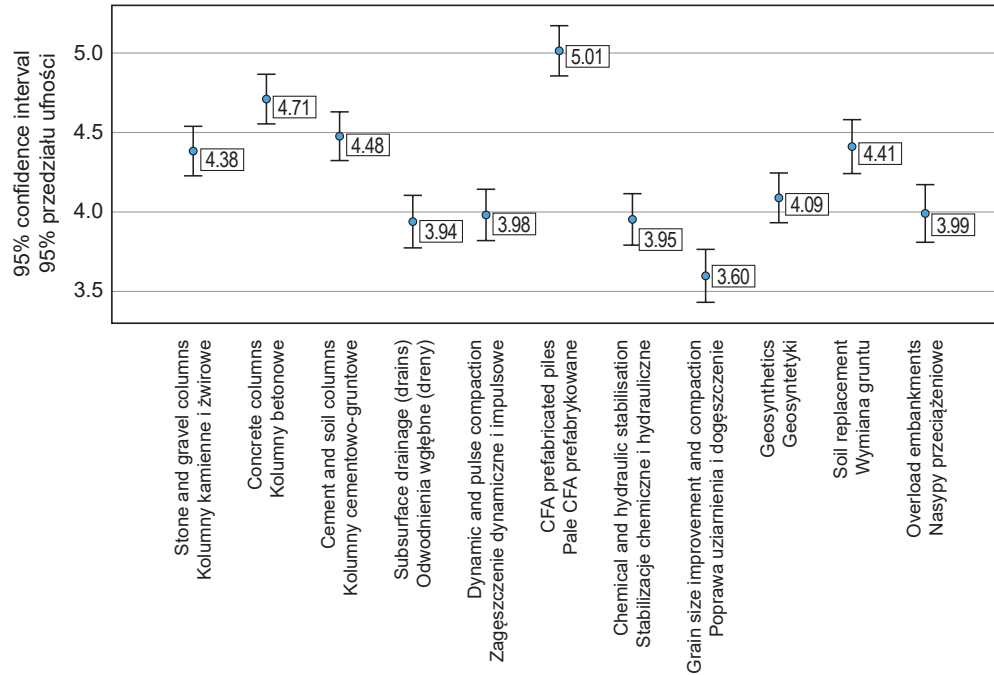


Fig. 2. Proportion of ground improvement costs in total investment costs according to respondents' opinions
Rys. 2. Udział kosztów wzmocnienia podłoża w łącznych kosztach inwestycji według opinii respondentów

Ogólnie można zauważyć, że przedsiębiorstwa branżowe, w porównaniu do inwestorów, mają tendencję do wyrażania opinii przypisujących niższy udział kosztów wzmocnienia podłoża w łącznych kosztach inwestycji. Różnice o wysokiej istotności statystycznej wystąpiły w sześciu przypadkach, do których zaliczały się: kolumny kamienne i żwirowe, odwodnienia wgłębne, zagęszczanie dynamiczne i impulsowe, stabilizacje chemiczne i hydrauliczne oraz poprawa uziarnienia i dogęszczanie. Wyniki sugerują, że przedsiębiorstwa branżowe, które są bezpośrednio zaangażowane w realizację prac budowlanych, mogą mieć inną perspektywę na koszty związane ze wzmocnieniem podłoża niż inwestorzy, którzy zarządzają finansowaniem inwestycji. Jest to szczególnie widoczne w ocenie udziału kosztów wzmocnienia podłoża poprzez poprawę uziarnienia i dogęszczanie. Projektanci i wykonawcy oceniają te koszty jako raczej mało znaczące w strukturze budżetu, podczas gdy inwestorzy uważają, że udział tych kosztów w całkowitych kosztach inwestycji znajduje się co najmniej na przeciętnym poziomie. Warto zauważyć, że w przypadku metody palowania oraz kolumn betonowych różnice między porównywanymi grupami okazały się niewielkie i statystycznie nieistotne.

In general, it can be seen that industry enterprises, compared to investors, tend to express opinions attributing a lower share of ground improvement costs to total project costs. Differences of high statistical significance occurred in six cases, which included: stone and gravel columns, subsurface drainage, dynamic and pulse compaction, chemical and hydraulic stabilisation, and grain size improvement and compaction. The results suggest that industry enterprises that are directly involved in the construction work may have a different perspective of the costs associated with ground improvement than investors who manage the financing of the projects. This is particularly evident in the assessment of the cost share of ground improvement through improved granulation and compaction. Designers and contractors assess these costs as rather of low significance in the budget structure, while investors believe that the share of these costs in the total project costs is at least at an average level. It is worth noting that for the piling method and the concrete columns, the differences between the compared groups proved to be small and statistically insignificant.

Table 3. Comparative analysis of the assessment of ground improvement cost proportion in total investment costs
 Tablica 3. Analiza porównawcza oceny udziału kosztów wzmocnienia podłoża w łącznych kosztach inwestycji

No. Lp.	Specification Wyszczególnienie	Investors Inwestorzy		Industry enterprises Przedsiębiorstwa branżowe		Statistical description Opis statystyczny	
		Mean Średnia	Standard deviation Odchylenie standard.	Mean Średnia	Standard deviation Odchylenie standard.	<i>U</i>	<i>p</i>
1.	Stone and gravel columns Kolumny kamienne i żwirowe	4.62	1.02	4.01	1.26	3910.000	< 0.001***)
2.	Concrete columns Kolumny betonowe	4.80	1.06	4.57	1.30	4805.000	0.138
3.	Cement and soil columns Kolumny cementowo-gruntowe	4.63	1.05	4.23	1.22	4276.000	0.006**)
4.	Subsurface drainage (drains) Odwodnienia wgłębne (dreny)	4.25	1.06	3.45	1.31	3406.500	< 0.001***)
5.	Dynamic and pulse compaction Zagęszczanie dynamiczne i impulsowe	4.34	1.06	3.41	1.19	3090.500	< 0.001***)
6.	Piles (CFA, prefabricated) Pale (CFA, prefabrykowane)	5.01	1.13	5.02	1.25	5311.500	0.770
7.	Chemical and hydraulic stabilisation Stabilizacje chemiczne i hydrauliczne	4.31	1.016	3.39	1.26	3078.500	< 0.001***)
8.	Granulation improvement and compaction Poprawa uziarnienia i dogęszczanie	4.05	1.01	2.89	1.23	2519.500	< 0.001***)
9.	Geosynthetics Geosyntetyki	4.24	0.97	3.86	1.39	4454.500	0.021 ^{*)}
10.	Soil replacement Wymiana gruntu	4.59	1.19	4.13	1.32	4247.500	0.005**)
11.	Overload embankments Nasypy przeciążeniowe	4.37	1.18	3.40	1.39	3215.500	< 0.001***)

^{*)} statistically significant result at $p < 0.05$ / wynik istotny statystycznie na poziomie $p < 0,05$
^{**)} statistically significant result at $p < 0.01$ / wynik istotny statystycznie na poziomie $p < 0,01$
^{***)} statistically significant result at $p < 0.001$ / wynik istotny statystycznie na poziomie $p < 0,001$

4.3. HIERARCHIA ELEMENTÓW KOSZTOWÓRCZYCH

Rys. 3 ilustruje odpowiedzi wszystkich uczestników badania na pytanie dotyczące oceny kosztowności poszczególnych zadań wchodzących w zakres prac związanych z wykonaniem wzmocnienia podłoża. Dane zostały zaprezentowane na wykresie słupkowym z przedziałem ufności dla średniej wynoszącym 95%. Respondenci oceniali koszty w skali 7-stopniowej, gdzie ocena 1 oznaczała bardzo niski poziom kosztowórczy danego zadania, a ocena 7 – poziom bardzo wysoki. Rozpiętość ocen poszczególnych zadań okazała się wysoka, od 2,91 w przypadku dokumentacji i administracji do 4,98 w przypadku prac budowlanych związanych z zastosowaniem danego wzmocnienia. Różnica ta wydaje się naturalna, biorąc

4.3. HIERARCHY OF COST ELEMENTS

Fig. 3 illustrates the responses of all survey participants to the question regarding the assessment of the cost intensity of the various tasks included in the ground improvement work. The data are presented in a bar chart with a 95% confidence interval for the mean. Respondents rated the costs on a 7-point scale, where a rating of 1 meant a very low cost-intensity level for a given task, and a rating of 7 meant a very high level. The range of ratings for individual tasks proved to be high, from 2.91 for documentation and administration to 4.98 for the construction work involved in applying the improvement in question. This difference seems natural given the nature of the activities carried out under the various tasks. According to the survey participants, the costs of implementing ground

pod uwagę charakter działań wykonywanych w ramach poszczególnych zadań. W opinii uczestników badania koszty realizacji wzmocnienia podłoża kształtują się raczej na wysokim poziomie, co oznacza, że wymagają znacznej alokacji budżetu oraz szczegółowej analizy i monitorowania. W działaniu praktycznym realizacja wzmocnienia podłoża, a także prace ziemne i przygotowawcze, które stanowią drugie najwyżej ocenione zadanie, często obejmują skomplikowane i szeroko zakrojone prace o charakterze fizycznym. Wymagają dużej ilości robocizny, sprzętu oraz materiałów, co znacząco zwiększa ich koszty. Warto zauważyć, że przedział ufności obu zadań nie pokrywa się z przedziałami ufności pozostałych, co wskazuje na statystycznie istotną różnicę w poziomie kosztowności w porównaniu z pozostałymi zadaniami.

improvement are rather high, which means that they require significant budget allocation and detailed analysis and monitoring. In practical terms, the implementation of ground improvement, as well as earthworks and preparatory works, which are the second highest rated task, often involve complex and extensive works of a physical nature. They require a lot of labour, equipment and materials, which adds significantly to their cost. It is worth noting that the confidence interval of the two tasks does not overlap with the confidence intervals of the other tasks, indicating a statistically significant difference in the level of cost intensity compared to the other tasks.

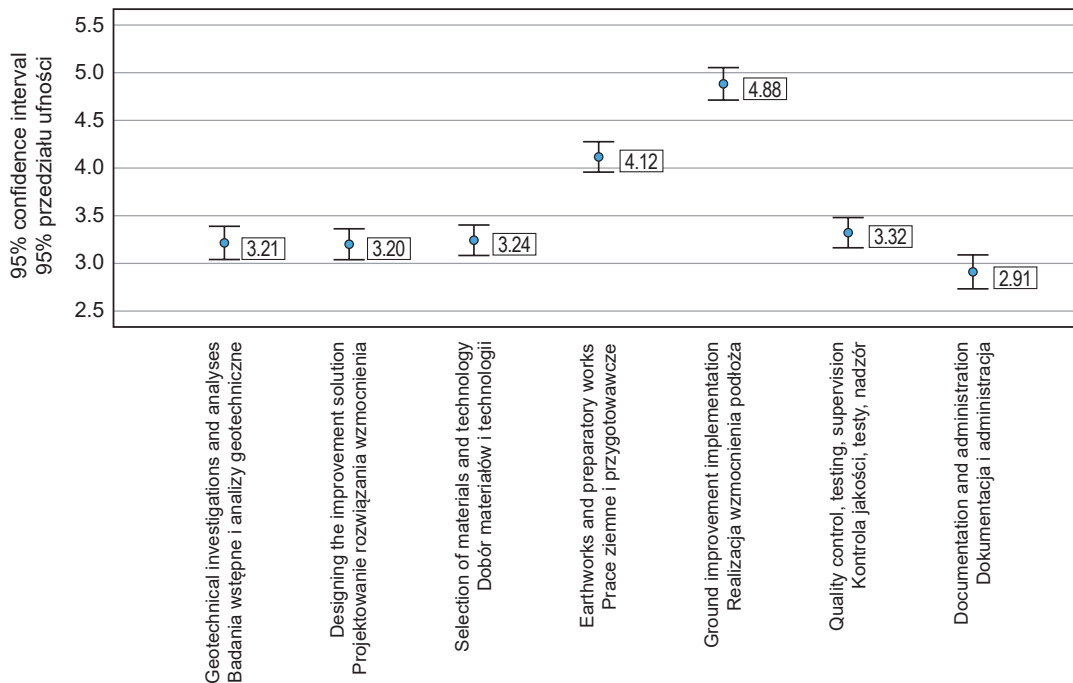


Fig. 3. Assessment of cost levels generated at different stages of ground improvement work according to respondents' opinions
Rys. 3. Ocena wysokości kosztów generowanych na różnych etapach prac związanych ze wzmocnieniem podłoża według opinii respondentów

Zadania polegające na przeprowadzeniu badań wstępnych z analizą geotechniczną, wykonaniu projektu rozwiązania wzmocnienia, doborze metod i technologii oraz czynności kontrolnych zostały ocenione na bardzo zbliżonym poziomie. W każdym przypadku średnia ocen nieznacznie przekraczała ocenę wskazującą na ich raczej niskie obciążenie kosztowe. Świadczy to o tym, że choć koszty te wymagają uwagi w budżecie, nie stanowią dla inwestora głównego obciążenia.

The tasks of preliminary investigations with geotechnical analysis, design of the improvement solution, selection of methods and technologies and control activities were rated at a very similar level. In each case, the average rating was slightly above the rating indicating their rather low cost burden. This shows that, although these costs require attention in the budget, they are not a major burden for the investor.

W Tabl. 4 przedstawiono wyniki analizy porównawczej między dwiema grupami respondentów: inwestorami oraz przedsiębiorstwami branżowymi. Ostatnie dwie kolumny tablicy zawierają wyniki testu U Manna-Whitneya, który wskazuje, dla których metod opinie respondentów różnią się w sposób statystycznie istotny. Analizując dane z tabeli, można zauważyć, że dla pięciu zadań różnice ocen okazały się statystycznie istotne. Inwestorzy mają tendencję do wyższej wyceny kosztów generowanych na różnych etapach prac związanych ze wzmocnieniem podłoża, z wyjątkiem zasadniczych robót budowlanych, które przedsiębiorstwa branżowe oceniają jako bardziej kosztochłonne. Największa rozbieżność ocen wystąpiła w zadaniu dotyczącym wykonywania czynności obsługi dokumentacyjnej i administracyjnej. Inwestorzy są przekonani o wyższej kosztochłonności tego zadania niż projektanci i wykonawcy. Natomiast respondenci wykazali zgodność co do wysokości kosztów generowanych w trakcie wykonywania badań i analiz geotechnicznych oraz prac ziemnych i przygotowawczych.

Table 4 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 indicates for which methods respondents' opinions differ in a statistically relevant way. Analysing the data in the table, it can be seen that for five tasks the differences in ratings proved to be statistically significant. Investors tend to have a higher valuation of the costs generated at the various stages of ground improvement works, with the exception of the basic civil works, which industry companies rate as more costly. The greatest discrepancy in ratings occurred in the task of performing documentary and administrative service activities. Investors are convinced that this task is more cost-intensive than the designers and contractors. On the other hand, respondents showed agreement on the amount of costs generated during geotechnical investigations and analyses as well as earthworks and preparatory works.

Table 4. Comparative analysis of respondents' assessments regarding cost levels generated at different stages of ground improvement work

Tablica 4. Analiza porównawcza ocen respondentów w kwestii wysokości kosztów generowanych na różnych etapach prac związanych ze wzmocnieniem podłoża

No. Lp.	Specification Wyszczególnienie	Investors Inwestorzy		Industry enterprises Przedsiębiorstwa branżowe		Statistical description Opis statystyczny	
		Mean Średnia	Standard deviation Odchylenie standard.	Mean Średnia	Standard deviation Odchylenie standard.	U	p
1.	Geotechnical investigations and analyses Badania i analizy geotechniczne	3.21	1.25	3.22	1.37	5263.500	0.687
2.	Designing the improvement solution Projektowanie rozwiązania wzmocnienia	3.35	1.18	2.96	1.19	4404.500	0.016 ^{*)}
3.	Selection of materials and technology Dobór materiałów i technologii	3.40	1.12	2.99	1.24	4151.000	0.002 ^{**)}
4.	Earthworks and preparatory works Prace ziemne i przygotowawcze	4.22	1.05	3.95	1.35	4836.000	0.155
5.	Ground improvement implementation Realizacja wzmocnienia podłoża	4.66	1.20	5.23	1.29	4081.500	0.002 ^{**)}
6.	Quality control, testing, supervision Kontrola jakości, testy, nadzór	3.52	1.16	3.01	1.14	4087.500	0.001 ^{**)}
7.	Documentation and administration Dokumentacja i administracja	3.23	1.27	2.41	1.24	3508.000	< 0.001 ^{***)}

^{*)} statistically significant result at $p < 0.05$ / wynik istotny statystycznie na poziomie $p < 0,05$

^{**)} statistically significant result at $p < 0.01$ / wynik istotny statystycznie na poziomie $p < 0,01$

^{***)} statistically significant result at $p < 0.001$ / wynik istotny statystycznie na poziomie $p < 0,001$

4.4. OPTIMALIZACJA KOSZTÓW WZMOCNIENIA PODŁOŻA

W kolejnej części badania respondenci zostali poproszeni o wyrażenie swoich sugestii dotyczących możliwości optymalizacji kosztów związanych ze wzmocnieniem podłoża. Inwestorzy sformułowali łącznie 33 sugestie, które następnie zgrupowano w pięć kategorii działań potencjalnie sprzyjających optymalizacji kosztowej (Rys. 4). Zaliczono do nich: 1) badania geotechniczne, 2) projektowanie i dobór metod, 3) materiały i technologie, 4) organizację i logistykę oraz 5) szkolenia i dostęp do wiedzy. Łącznie stanowią one podstawę dla kompleksowego podejścia do optymalizacji kosztów wzmocnienia podłoża w budownictwie drogowym, które powinno być dostosowane każdorazowo do specyfiki danego projektu.

4.4. OPTIMISATION OF GROUND IMPROVEMENT COSTS

In the next part of the survey, respondents were asked for their suggestions on how to optimise the costs associated with ground improvement. Investors made a total of 33 suggestions, which were then grouped into five categories of actions potentially conducive to cost optimisation (Fig. 4). These included: 1) geotechnical tests, 2) design and method selection, 3) materials and technologies, 4) organisation and logistics, and 5) training and access to knowledge. Taken together, these form the basis for a comprehensive approach to optimising the cost of ground improvement in road construction, which should be tailored on a project-by-project basis.

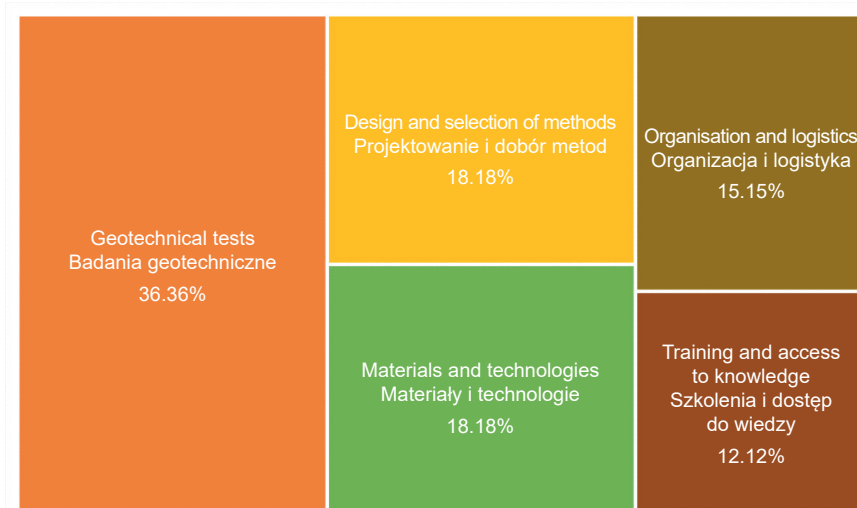


Fig. 4. Areas of cost optimization in ground improvement according to investors' opinions
Rys. 4. Obszary optymalizacji kosztów wzmocnienia podłoża według opinii inwestorów

Wyniki badań sugerują, że rozwiązanie problemu optymalizacji kosztów wymaga podjęcia licznych działań naprawczych w obszarze związanym z badaniami geotechnicznymi. W niniejszym badaniu geotechnika stanowiła obszar działań najczęściej wskazywany przez inwestorów, osiągając 36% wszystkich wskazań, co jest dwukrotnie wyższym wynikiem w porównaniu do kolejnych obszarów, tj. projektowania i doboru metod oraz materiałów i technologii. Należy wskazać, że wśród respondentów istnieje silna potrzeba dysponowania jasnymi wytycznymi dotyczącymi doboru zarówno rozwiązań geotechnicznych, jak i zakresu badań do konkretnych projektów. W opinii uczestników badania wnikliwa analiza warunków gruntowo-wodnych minimalizuje ryzyko wystąpienia awarii na dalszych etapach procesu inwestycyjnego.

The findings suggest that solving the problem of cost optimisation requires a number of corrective actions in the area related to geotechnical investigations. In this survey, geotechnics was the area of activity most frequently indicated by investors, reaching 36% of all indications, which is twice as high as the next areas, i.e. design and selection of methods and materials and technologies. It is important to point out that there is a strong need among respondents to have clear guidelines on the selection of both geotechnical solutions and the scope of investigations for specific projects. According to the participants in the study, a thorough analysis of the soil and water conditions minimises the risk of failure at later stages of the investment process. Examples of such problems are soil subsidence and excessive water saturation, which can lead to costly corrections

Przykładami takich problemów są osiadanie gruntu oraz nadmierne nasycenie wodą, które mogą prowadzić do kosztownych poprawek oraz opóźnień na dalszych etapach realizacji robót budowlanych, głównie z powodu konieczności wykonania dodatkowej stabilizacji lub wzmocnienia, aby zapewnić odpowiednie warunki dla kontynuacji prac. Badania wskazują, że precyzyjne dane z badań geotechnicznych umożliwiają lepsze planowanie i harmonogramowanie prac, co z kolei pozwala na uniknięcie niepotrzebnych przestojów i zwiększa efektywność wykorzystania zasobów, w tym eliminuje nadmierne zapasy materiałowe, co dodatkowo przyczynia się do redukcji kosztów danej inwestycji.

W zakresie projektowania i doboru metod wzmocnienia podłoża wielu respondentów zwróciło uwagę, że ww. czynności stanowią kluczowe obszary wymagające optymalizacji kosztów. Podkreślono, że dobry projekt, uwzględniający lokalne warunki gruntowe i klimatyczne, w znaczący sposób może przyczynić się do redukcji zakresu koniecznych prac, co z kolei powinno dać pozytywny efekt w postaci redukcji kosztów oraz kompresji czasu potrzebnego na realizację całego przedsięwzięcia. W opinii respondentów długoterminowe korzyści finansowe mogą pochodzić ze standaryzacji wyboru metod wzmocnienia podłoża, co w działaniu praktycznym wymaga ujednoczenia i określenia jednoznacznych kryteriów oraz procedur, które będą prowadziły do wyboru najlepszej i najbardziej odpowiedniej metody w danym kontekście gruntowym. Procedury te mogą zawierać kroki do przeprowadzenia analizy, sposób oceny i porównywania metod oraz instrukcje dotyczące dokumentowania i raportowania wyników badań. Kryteria optymalizacyjne mogą natomiast obejmować efektywność danej metody, jej koszty, czas realizacji, bezpieczeństwo, zgodność z przepisami, wpływ na środowisko, a także inne czynniki, które zostaną uznane za istotne. Podstawę źródłową stanowić powinny studia przypadków obejmujące wyniki badań, dokumentacje projektowe i rekomendowane technologie rozwiązań.

Optymalizacja kosztów wzmocnienia podłoża wiąże się także z działaniami z zakresu szeroko rozumianej gospodarki materiałowej, wspartej wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi IT, które powinny wspomagać procesy analityczne i decyzyjne po stronie inwestora. W pierwszym przypadku respondenci sugerowali wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu, takich jak kru-

and delays at later stages of the construction work, mainly due to the need for additional stabilisation or reinforcement to ensure adequate conditions for the work to continue. Research indicates that precise geotechnical survey data enables better planning and scheduling of works, which in turn allows to avoid unnecessary downtime and increases resource efficiency, including the elimination of excessive material stockpiles, further contributing to a reduction in the cost of a given project.

In terms of the design and selection of ground improvement methods, many respondents pointed out that the aforementioned activities are key areas that require cost optimisation. It was emphasised that good design, taking into account local ground and climate conditions, can significantly reduce the scope of work required, which in turn should have a positive effect of reducing costs and compressing the time required for the whole project. According to the respondents, long-term financial benefits can come from the standardisation of the choice of ground improvement methods, which in practical operation requires standardisation and the determination of unambiguous criteria and procedures that will lead to the selection of the best and most appropriate method in a given ground context. These procedures may include steps to perform the analysis, how to evaluate and compare methods, and instructions for documenting and reporting test results. Optimisation criteria, on the other hand, may include the efficiency of a method, its cost, implementation time, safety, regulatory compliance, environmental impact, as well as other factors deemed relevant. Case studies including research findings, design documents and recommended solution technologies should form the source base.

The optimisation of ground improvement costs is also linked to activities in the field of broadly understood material management, supported by the use of modern IT tools, which should support analytical and decision-making processes on the investor's side. In the former case respondents suggested using recycled materials, such as aggregates from road demolition, and chemical stabilisers, such as cement or lime. The use of recycled materials not only promotes sustainability, but also brings real economic benefits that can significantly reduce the operating costs of ongoing projects. The main cost benefits relate to lower raw material purchase and storage costs and reduced transport costs.

szywa z rozbiórek dróg, oraz stabilizatorów chemicznych, np. cementu czy wapna. Stosowanie materiałów z recyklingu nie tylko wspiera zrównoważony rozwój, ale także przynosi realne korzyści ekonomiczne, które mogą znacząco obniżyć koszty operacyjne realizowanych inwestycji. Główne korzyści kosztowe związane są z niższymi kosztami zakupu surowców i składowania odpadów oraz redukcją kosztów transportu.

Jeśli chodzi o użyteczność narzędzi IT, respondenci rekomendują implementację technologii cyfrowych, takich jak *Building Information Modeling* (BIM) w praktyce wzmocnienia podłoża. Ich wdrożenie powinno dać pozytywny efekt ekonomiczny w postaci lepszego planowania i precyzyjniejszej kontroli kosztów. Innowacyjne metody budowlane, takie jak prefabrykacja elementów, polegająca na produkcji i wstępnym montażu komponentów budowlanych w warunkach fabrycznych (np. elementy prefabrykowane do odwodnienia pasa drogowego), mogą dodatkowo znacząco skrócić czas realizacji projektu, przynosząc jednocześnie korzyści ekonomiczne. Wydaje się jednak, że korzyści te dotyczą przede wszystkim szeroko pojętej budowy drogi, a w mniejszym stopniu samego wzmocnienia podłoża.

Efektywna organizacja pracy i logistyka to kolejny obszar, w którym, zdaniem respondentów, można uzyskać lepsze efekty kosztowe. Respondenci dostrzegają konieczność usprawnienia dotychczasowej obsługi logistycznej dostaw materiałów budowlanych oraz praktykowanych obecnie metod zarządzania pracą na placu budowy. Wyniki badań wskazują, że planowanie i nadzorowanie wszystkich zasobów, procesów oraz przestrzeni na placu budowy powinno odbywać się w sposób, który maksymalizuje wydajność pracy, minimalizuje koszty i zapewnia bezpieczeństwo. Istotna jest także efektywna współpraca z dostawcami surowców; zdaniem części respondentów powinna opierać się ona na długoterminowych kontraktach, umożliwiającym wynegocjowanie korzystniejszych warunków cenowych. W opinii części respondentów taki sposób działania powinien prowadzić do optymalizacji kosztów transportu i magazynowania, a także kosztów zapasów poprzez eliminację nadmiernego zapasu.

Ostatni obszar działań wykazujących potencjał do optymalizacji kosztów dotyczy edukacji oraz dostępu do informacji. Wśród wszystkich sugestii inwestorów nieco ponad 12% wskazań dotyczyło konieczności podjęcia działań w zakresie szkoleń i dostępu do wiedzy. Respon-

Regarding the usability of IT tools, respondents recommend the implementation of digital technologies such as *Building Information Modelling* (BIM) in ground improvement practice. Their implementation should have a positive economic effect in terms of better planning and more precise cost control. Innovative construction methods, such as component prefabrication, which involves the manufacture and pre-assembly of building components in a factory setting (e.g. prefabricated components for the right-of-way drainage), can further significantly reduce project times while bringing economic benefits. However, these benefits appear to relate primarily to the wider road construction and less to the ground improvement itself.

Efficient work organisation and logistics is another area where respondents believe better cost performance can be achieved. Respondents recognise the need to improve the existing logistics handling of construction material deliveries and the methods currently practised for managing work on site. The findings indicate that the planning and supervision of all resources, processes and space on site should be done in a way that maximises productivity, minimises costs and ensures safety. Effective cooperation with raw material suppliers is also important; according to some respondents, this should be based on long-term contracts, enabling more favourable price conditions to be negotiated. In the opinion of some respondents, such a course of action should lead to the optimisation of transport and storage costs, as well as inventory costs by eliminating excess stock.

A final area of activity showing potential for cost optimisation relates to education and access to information. Among all investor suggestions, just over 12% of the indications related to the need to take action on training and access to knowledge. Respondents emphasised the need to make good practices available and to provide training on how to optimise the cost of ground improvement. Training and access to knowledge can lead to cost optimisation by increasing employee motivation and engagement, improving the quality of work by reducing errors and the need for corrections, and better time management. The studies show that creating a model improvement catalogue and investing in staff training in area of the latest technologies and working methods can improve the efficiency of road projects and reduce the costs associated with failures.

denci podkreślali potrzebę udostępniania dobrych praktyk oraz organizowania szkoleń na temat optymalizacji kosztów wzmocnienia podłoża. Szkolenia i dostęp do wiedzy mogą prowadzić do optymalizacji kosztów poprzez zwiększenie motywacji i zaangażowania pracowników, poprawę jakości pracy dzięki redukcji błędów i konieczności wprowadzania poprawek, a także lepsze zarządzanie czasem pracy. Z badań wynika, że stworzenie wzorcowego katalogu wzmocnień oraz inwestowanie w szkolenia pracownicze z zakresu najnowszych technologii i metod pracy mogą poprawić efektywność realizacji projektów drogowych i zmniejszyć koszty związane z awariami.

Respondenci reprezentujący przedsiębiorstwa branżowe, mimo iż stanowili mniej liczną próbę badawczą, wykazali większą skłonność do udzielania odpowiedzi na pytanie dotyczące możliwości optymalizacji kosztów wzmocnienia podłoża niż inwestorzy. Łącznie projektanci i wykonawcy sformułowali 45 sugestii, które, podobnie jak w pierwszym przypadku, zgrupowano w pięć kategorii wskazujących na potencjalne obszary działań sprzyjających optymalizacji kosztowej (Rys. 5). Zaliczono do nich: badania geotechniczne, procedury administracyjne i organizacyjne, jakość dokumentacji i wykonania robót budowlanych, zasoby materiałowe, technologie wykonania wzmocnień.

Respondents representing industry companies, despite being a smaller survey sample, showed a greater inclination to answer the question on the possibility of optimising ground improvement costs than investors. A total of 45 suggestions were made by designers and contractors, which, as in the first case, were grouped into five categories indicating potential areas of action to encourage cost optimisation (Fig. 5). These included: geotechnical investigations, administrative and organisational procedures, quality of documentation and execution of construction works, material resources, improvement execution technologies.

Based on the suggestions collected from respondents, the most important category appears to be geotechnical investigations and analysis of soil and water conditions, which accounted for more than 38% of all responses. Respondents repeatedly stressed that accurate and reliable geotechnical investigations are a key component in optimising the cost of ground improvement, Investment in accurate and reliable geotechnical investigations at an early stage of design can, therefore, lead to significant savings and increase efficiency of road projects. An important element is the accurate identification of the subsoil and the division into homogeneous sections. As a result, stabilisation methods can be better adapted to specific geotechnical conditions, which contributes to cost optimisation.

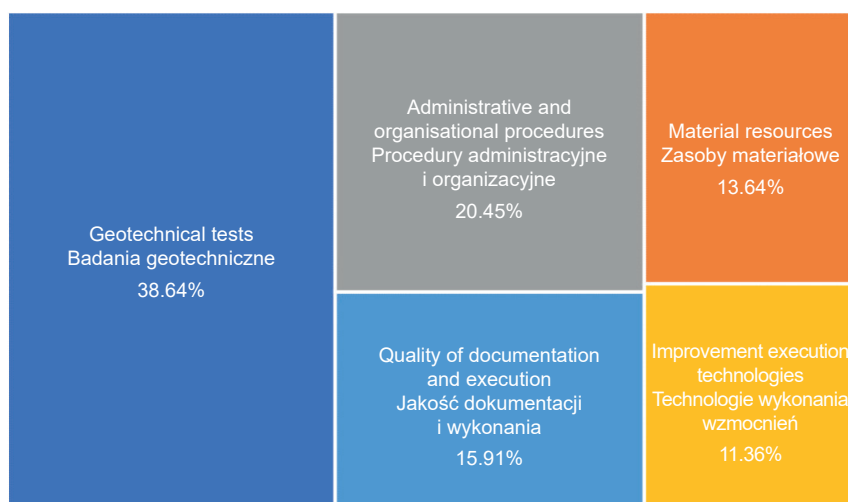


Fig. 5. Areas of cost optimization in ground improvement according to industry companies' opinions

Rys. 5. Obszary optymalizacji kosztów wzmocnienia podłoża według opinii przedsiębiorstw branżowych

Na podstawie zebranych sugestii respondentów najważniejszą kategorią wydają się być badania geotechniczne i analiza warunków gruntowo-wodnych, które stanowiły ponad 38% wszystkich odpowiedzi. Respondenci wielokrotnie podkreślali, że dokładne i rzetelne badania geo-

In terms of the impact of administrative and organisational procedures on cost optimisation, many respondents highlighted the need to develop clearly defined procedures, i.e. procedures that speed up the decision-making process and reduce the associated bureaucracy. The survey results

techniczne stanowią kluczowy komponent w procesie optymalizacji kosztów wzmocnienia podłoża. Inwestycje w dokładne i rzetelne badania geotechniczne na wczesnym etapie projektowania mogą zatem prowadzić do znacznych oszczędności i zwiększenia efektywności realizacji projektów drogowych. Ważnym elementem jest dokładne rozpoznanie podłoża gruntowego i podział na jednorodne odcinki. Dzięki temu, można lepiej dostosować metody stabilizacji do specyficznych warunków geotechnicznych, co przyczynia się do optymalizacji kosztów.

W zakresie wpływu procedur administracyjnych i organizacyjnych na optymalizację kosztów wielu respondentów zwróciło uwagę na potrzebę opracowania jednoznacznie zdefiniowanych procedur, a więc takich, które przyspieszą proces podejmowania decyzji oraz zredukują związaną z tym biurokrację. Wyniki badań pozwalają na sformułowanie wniosku, że jasne procedury administracyjne i organizacyjne powinny prowadzić do większej przejrzystości działań oraz przypisania odpowiedzialności konkretnym osobom/zespołom, co w praktyce powinno skutkować lepszą kontrolą kosztów. Respondenci podkreślają również potrzebę zwiększenia uprawnień projektantów oraz zapewnienia im większej elastyczności w projektowaniu i wyborze rozwiązań dostosowanych do konkretnych warunków lokalnych. Dodatkowo należy uwzględnić fakt, że nie wszyscy wykonawcy posiadają taki sam potencjał do optymalizacji kosztów. W praktyce jest on zależny od wielu czynników, m.in. od posiadanego know-how, a także od zasobów kadrowych i sprzętowych będących w dyspozycji danego wykonawcy.

Trzeci obszar o dużym potencjale do optymalizacji kosztów obejmuje zagadnienia związane z jakością dokumentacji oraz jakością wykonania robót budowlanych, wskazane przez niecałe 16% respondentów odpowiadających na pytanie dotyczące możliwości optymalizacji kosztów wzmocnienia podłoża. Respondenci wskazali na potrzebę intensyfikacji funkcji kontrolnej podczas realizacji robót budowlanych, aby zapobiegać przypadkom oszustw oraz nadzorować jakość realizowanych prac. Za kluczowy element uznano ponadto kwestię przygotowania precyzyjnej i szczegółowej dokumentacji przetargowej. W opinii respondentów dokładna dokumentacja ofertowa, z jasno określonymi wymaganiami i oczekiwaniami, zmniejsza ryzyko nieporozumień i błędów podczas realizacji projektu, a tym samym optymalizuje koszty poprzez eliminację marnotrawstwa.

lead to the conclusion that clear administrative and organisational procedures should lead to greater transparency of activities and the assignment of responsibilities to specific individuals/teams, which in practice should result in better cost control. Respondents also emphasise the need to empower designers and give them more flexibility to design and choose solutions tailored to specific local conditions. In addition, it must be taken into account that not all contractors have the same potential to optimise costs. In practice, it depends on a number of factors, including the know-how, as well as the personnel and equipment resources at the contractor's disposal.

The third area with high potential for cost optimisation includes issues related to the quality of documentation and the quality of construction work, indicated by just under 16% of respondents answering the question on the potential for cost optimisation of ground improvement. Respondents indicated the need to intensify the control function during construction works to prevent cases of fraud and to supervise the quality of the works carried out. The preparation of accurate and detailed tender documentation was furthermore considered a key element. According to respondents, accurate tender documentation, with clearly defined requirements and expectations, reduces the risk of misunderstandings and errors during project implementation and thus optimises costs by eliminating waste.

More than 13% of the suggestions given by designers and contractors of road projects were related to issues of the use of local and existing soils in the ground improvement process. Respondents emphasise the importance of maximising the use of native soil and existing subbase for ground stabilisation, thus minimising the costs associated with sourcing new materials. They also highlight the growing popularity of stabilising existing (native) subsoils with hydraulic binders as a cost-effective solution to improve in-situ soil properties.

In addition, maximising the use of local materials contributes to a significant reduction in transport costs and has a positive impact on the environment through reduced CO₂ emissions. Respondents also suggest using demolition materials and refining existing materials through soil gradation improvement, which can have positive cost effects by reducing the cost of purchasing new materials and reducing construction waste.

Ponad 13% sugestii udzielonych przez projektantów i wykonawców inwestycji drogowych dotyczyło zagadnień związanych z wykorzystaniem lokalnych i istniejących gruntów w procesie wzmocnienia podłoża. Respondenci podkreślają znaczenie maksymalnego wykorzystania gruntu rodzimego oraz istniejącej podbudowy do stabilizacji podłoża, co pozwala na zminimalizowanie kosztów związanych z pozyskiwaniem nowych materiałów. Zwracają również uwagę na rosnącą popularność stabilizacji istniejących (rodzimych) podłoży gruntowych za pomocą spoiw hydraulicznych, co stanowi efektywne rozwiązanie kosztowe, poprawiające właściwości gruntu na miejscu.

Ponadto maksymalne wykorzystanie materiałów lokalnych przyczynia się do znacznej redukcji kosztów transportu i ma pozytywny wpływ na środowisko dzięki redukcji emisji CO₂. Respondenci sugerują także wykorzystanie materiałów z rozbiórek oraz uszlachetnianie istniejących materiałów poprzez doziarnianie, co może przynieść pozytywne efekty kosztowe dzięki redukcji kosztów zakupu nowych materiałów oraz zmniejszeniu ilości odpadów budowlanych.

Ostatnim obszarem o znacznym potencjale do optymalizacji kosztów jest aspekt związany z technologiami wykonywania wzmocnień, zgłoszony w nieco ponad 11% otrzymanych odpowiedzi. Zdaniem respondentów optymalizacja kosztów wzmocnienia podłoża wymaga uwzględnienia nowych technologii dostępnych na rynku, przeprowadzenia dokładnych badań podłoża, odpowiedniej koordynacji robót oraz stałego monitoringu konstrukcji geotechnicznych przy jednoczesnym zarządzaniu ryzykiem eksploatacyjnym.

Dokładna analiza właściwości podłoża umożliwi lepsze dostosowanie technologii wzmocniania oraz minimalizację ryzyka związanego z późniejszą eksploatacją. Ponadto konieczne jest uwzględnienie potencjalnych problemów eksploatacyjnych na etapie planowania i realizacji inwestycji oraz regularne monitorowanie konstrukcji geotechnicznych, co pozwoli na wczesne wykrywanie problemów i podejmowanie działań naprawczych istotnych dla zapewnienia bezpieczeństwa i trwałości inwestycji.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Celem niniejszej pracy była analiza i ocena kosztowności różnych metod wzmocniania podłoża w budownictwie drogowym. Badania oparte na ankietach przeprowadzonych wśród inwestorów i przedsiębiorstw

The final area with significant potential for cost optimisation is the aspect related to reinforcement technologies, reported in just over 11% of the responses received. According to respondents, optimising the cost of ground improvement requires taking into account new technologies available on the market, carrying out thorough ground investigations, proper coordination of works and continuous monitoring of geotechnical structures while managing operational risks.

A thorough analysis of the subsoil properties enables better adaptation of the improvement technology and minimisation of the risks associated with subsequent operation. In addition, it is necessary to take into account potential operational problems at the planning and implementation stage of the project and to monitor geotechnical structures on a regular basis so that problems can be detected early and corrective action taken, which is important to ensure the safety and sustainability of the project.

5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The aim of this paper was to analyse and evaluate the cost-intensity of different soil strengthening methods in road construction. Research based on surveys of investors and industry enterprises allowed data to be collected, which was then subjected to detailed statistical analysis. The following are the main conclusions, which relate directly to the research questions formulated in the introduction, and also take into account the research limitations and proposed directions for further research:

1. The cost intensity of the methods varies, although in most cases it is within industry standards. The highest expenditure is generated by methods such as soil piling and the use of concrete columns, which is associated with advanced technology and high equipment requirements. In contrast, solutions such as grain size improvement and compaction are less expensive, mainly due to simpler technology and lower material costs. The survey indicates that ground improvement can account for a significant proportion of total road project expenditure, with methods such as piling and concrete columns making a significant contribution to the final road project budget. Their high cost underscores the crucial importance in the optimal choice of technology and implementation strategy, which should be taken into account when planning and implementing projects. Physical ground improvement activities,

branżowych pozwoliły na zgromadzenie danych, które następnie poddano szczegółowej analizie statystycznej. Poniżej przedstawiono najważniejsze wnioski, które odnoszą się bezpośrednio do pytań badawczych sformułowanych we wstępie, a także uwzględniają ograniczenia badawcze oraz proponowane kierunki dalszych badań:

1. Kosztowność metod jest zróżnicowana, choć w większości przypadków mieści się w granicach standardów branżowych. Najwyższe wydatki generują metody takie jak palowanie gruntu i stosowanie kolumn betonowych, co jest związane z zaawansowaną technologią i wysokimi wymaganiami sprzętowymi. Natomiast rozwiązania takie jak poprawa uziarnienia i dogęszczanie są tańsze, głównie z uwagi na prostszą technologię i niższe koszty materiałowe. Badania wskazują, że wzmocnienie podłoża może stanowić istotną część całkowitych wydatków na inwestycje drogowe, a metody takie jak palowanie i kolumny betonowe znacząco wpływają na finalny budżet projektu drogowego. Ich wysoki koszt podkreśla kluczowe znaczenie w optymalnym doborze technologii i strategii realizacji, co powinno być uwzględnione przy planowaniu i realizacji inwestycji. Fizyczne czynności związane z wzmocnieniem podłoża, w tym prace ziemne i przygotowawcze, są najbardziej kosztotwórczym etapem, co wynika z ich złożoności, wymagającej znacznych nakładów finansowych i dużych zasobów ludzkich.
 2. Badania ujawniły istotne różnice między inwestorami a przedsiębiorstwami branżowymi. Przedsiębiorstwa wykonawcze często oceniają koszty metod jako niższe, co może wynikać z ich doświadczenia w realizacji projektów i lepszej znajomości kosztów operacyjnych. Inwestorzy, którzy zarządzają budżetami projektów, mają tendencję do wyższej wyceny większości kosztów, zarówno tych związanych z daną metodą, jej udziałem w całkowitych kosztach inwestycji, jak i kosztami poszczególnych zadań. Wyniki badań sugerują, że różnice w postrzeganiu kosztów są związane z rolą, jaką respondenci pełnią w projekcie budowlanym, co może wpływać na ich podejście do budżetowania i alokacji zasobów.
 3. Istotnym elementem badań było zidentyfikowanie obszarów wymagających optymalizacji kosztów w projektach wzmocnienia podłoża. Wyniki analiz przedstawiają te kwestie z dwóch perspektyw: inwestorów oraz przedsiębiorstw branżowych. Inwestorzy szczególnie
- including earthworks and preparatory works, are the most cost-intensive stage due to their complexity, and the need for significant financial and human resources.
2. The survey revealed significant differences between investors and industry enterprises. Contractor companies often rate the cost of methods as lower, which may be due to their experience with projects and better knowledge of operating costs. Investors who manage project budgets tend to value most costs higher, both those associated with a particular method, its share in the total project cost and the cost of individual tasks. The findings suggest that differences in cost perceptions are related to the respondents' role in the construction project, which may influence their approach to budgeting and resource allocation.
 3. An important element of the survey was to identify areas for cost optimisation in ground improvement projects. The results of the analyses present these issues from two perspectives: those of investors and those of industry companies. Investors particularly emphasise the importance of thorough geotechnical investigations, which are key to reducing risk and minimising subsequent repair costs. They also point out the need for precise design of reinforcement methods, tailored to specific soil conditions, thus reducing the scope of work and project times. Industry companies also emphasise the importance of reliably carried out geotechnical investigations to optimise costs, but additionally they focus on the practical aspects of implementation, such as improving the quality of bid and design documentation, streamlining administrative and organisational procedures, as well as empowering designers and giving them more flexibility in their operations. They highlight the benefits of maximising the use of local resources and recycling, which should lead to a reduction in transport and material costs. Both groups of respondents unanimously emphasise that proper work organisation, logistics and access to new knowledge are key to efficient project implementation while reducing costs.
 4. When analysing the results of the study, it is important to take into account its limitations, which may affect the interpretation and possibility of generalising the conclusions. In the case of the survey in question, the results may be more related to the unique characteristics of the survey group than to those of the population

podkreślają znaczenie dokładnych badań geotechnicznych, które są kluczowe dla redukcji ryzyka i minimalizacji późniejszych kosztów naprawczych. Zwracają również uwagę na potrzebę precyzyjnego projektowania metod wzmacniania, dostosowanych do specyficznych warunków gruntowych, co pozwala na ograniczenie zakresu prac i skrócenie czasu realizacji inwestycji. Przedsiębiorstwa branżowe również podkreślają znaczenie rzetelnie przeprowadzonych badań geotechnicznych dla optymalizacji kosztów, ale dodatkowo koncentrują się na praktycznych aspektach realizacji, takich jak poprawa jakości dokumentacji ofertowej i projektowej, usprawnienie procedur administracyjno-organizacyjnych, a także zwiększenie uprawnień projektantów i zapewnienie im większej elastyczności w działaniu. Zwracają uwagę na korzyści płynące z maksymalnego wykorzystania lokalnych zasobów i recyklingu, co powinno prowadzić do redukcji kosztów transportu i materiałów. Obie grupy respondentów zgodnie podkreślają, że odpowiednia organizacja pracy, logistyka oraz dostęp do nowej wiedzy są kluczowe dla efektywnej realizacji projektów przy jednoczesnej redukcji kosztów.

4. Analizując wyniki badań, należy uwzględnić ich ograniczenia, które mogą wpływać na interpretację i możliwość generalizacji wniosków. W przypadku niniejszych badań wyniki mogą być bardziej związane z unikalnymi cechami badanej grupy niż z cechami całej populacji, co ogranicza możliwość ich uogólnienia oraz formułowania szeroko zakrojonych wniosków. Badania oparte na analizie opinii wyrażanych przez respondentów są obarczone określonymi ograniczeniami, takimi jak subiektywność odpowiedzi, błędy samoopisu oraz wpływ warunków, w których respondenci udzielają odpowiedzi. W odniesieniu do analiz kosztowych mają one charakter eksploracyjny i w miarę możliwości powinny zostać poddane walidacji w kolejnych badaniach.
5. Ciekawym kierunkiem badawczym mogą być systematyczne badania porównawcze przeprowadzane w regularnych odstępach czasu. Tego rodzaju podejście pozwoli na monitorowanie zmian i trendów, co zwiększy możliwość identyfikacji długoterminowych zależności oraz czynników wpływających na badane zjawiska. Warto również rozważyć przyszłe badania porównawcze technologii w obrębie grup o zbliżonych

as a whole, limiting their generalisability and the formulation of broad conclusions. Surveys based on the analysis of opinions expressed by respondents are subject to certain limitations, such as the subjectivity of responses, self-reporting errors and the influence of the conditions under which respondents give their answers. As far as cost analyses are concerned, they are exploratory and should be validated in subsequent surveys where possible.

5. Systematic comparative studies carried out at regular intervals could be an interesting research direction. This type of approach will allow changes and trends to be monitored, enhancing the ability to identify long-term relationships and the factors influencing the phenomena under study. It is also worth considering future comparative studies of technologies within groups with similar parameters, for example methods based solely on subsoil compaction or grading, compared with technologies which require the introduction of an additional medium into the ground. Such studies will allow a more precise analysis of the effectiveness of different technological approaches in the context of specific geotechnical conditions.

ACKNOWLEDGEMENT

The paper presents the results of a study that was carried out as part of the project entitled: *Methods for surveying and selecting geotechnical solutions for road projects*, funded by the RID II programme (NCBR-GDDKiA).

REFERENCES / BIBLIOGRAFIA

- [1] *Urbański M., Świtała M., Liszewski W., Ślusarczyk B., Piechowicz K.*: Waloryzacja cen budowy obiektów drogowych i mostowych na przykładzie wybranej inwestycji. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, **21**, 4, 2022, 365-378, DOI: 10.7409/rabdim.022.021
- [2] *Son J.S., Song, S.Y., Nam, M.J.*: Complex resistivity survey for the evaluation of ground reinforcement in a karst area. *Engineering Geology*, **269**, 2020, ID article: 105555, DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105555
- [3] *Szajna W.*: Stabilizacja chemiczna gruntów problematycznych. *Przegląd Budowlany*, **92**, 2021, 38-43
- [4] *Das K., Chattaraj S., Bandyopadhyay K.*: Review on the Application of Geosynthetic for Ground Improvement. *Proceedings of Indian Geotechnical Conference*, Springer Nature Singapore, 2021, 79-89

parametrach, na przykład metod opartych wyłącznie na dogęszczaniu lub doziarnieniu podłoża, w porównaniu z technologiami wymagającymi wprowadzenia dodatkowego medium do gruntu. Tego typu badania pozwolą na bardziej precyzyjną analizę efektywności różnych podejść technologicznych w kontekście specyficznych uwarunkowań geotechnicznych.

INFORMACJE DODATKOWE

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

- [5] Sun Z., Zhang D., Fang Q.: Determination method of reasonable reinforcement parameters for subsea tunnels considering ground reinforcement and seepage effect. *Applied Sciences*, **9**, 17, 2019, ID article: 3607, DOI: 10.3390/app9173607
- [6] Chatrabhuj, Meshram K.: Use of geosynthetic materials as soil reinforcement: an alternative eco-friendly construction material. *Discover Civil Engineering*, **1**, 2024, ID article: 41, DOI: 10.1007/s44290-024-00050-6
- [7] Kang D.H., Kim J.: Development of Eco-Friendly Soil Improvement Agent for Enhanced Slope Stability and Erosion Control in Urban Areas. *Buildings*, **14**, 4, 2024, ID article: 1021, DOI: 10.3390/buildings14041021
- [8] Moseley M.P., Kirsch K.: *Ground improvement*. CRC Press, London, 2004
- [9] Barley A.D., Windsor C.R.: Recent advances in ground anchor and ground reinforcement technology with reference to the development of the art. *ISRM International Symposium*, Curtin University, 2000
- [10] Thompson A.G., Villaescusa E., Windsor C.R.: Ground support terminology and classification: an update. *Geotechnical and Geological Engineering*, **30**, 2012, 553-580, DOI: 10.1007/s10706-012-9495-4
- [11] Top Construction Risks and How to Mitigate Them. AEI Consultants, <https://aeiconsultants.com/top-construction-risks-and-how-to-mitigate-them/>, 10.08.2024
- [12] Kamińska E., Świtła M., Kamiński T.: Selected issues of the ecobalance analysis of recycled materials used in road construction. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, **22**, 4, 2023, 481-490, DOI: 10.7409/rabdim.023.029
- [13] Banaitiene N., Banaitis A.: Risk management in construction projects. *Risk Management – Current Issues and Challenges*, 2012, 429-448, DOI: 10.5772/51460
- [14] Tayefeh Hashemi S., Ebadati O.M., Kaur H.: Cost estimation and prediction in construction projects: a systematic review on machine learning techniques. *SN Applied Sciences*, **2**, 2020, ID article: 1703, DOI: 10.1007/s42452-020-03497-1
- [15] Odeck J.: Cost overruns in road construction – what are their sizes and determinants?. *Transport Policy*, **11**, 1, 2004, 43-53, DOI: 10.1016/S0967-070X(03)00017-9
- [16] Flyvbjerg B., Holm M.S., Buhl S.: Underestimating costs in public works projects: Error or lie?. *Journal of the American Planning Association*, **68**, 3, 2002, 279-295, DOI: 10.1080/01944360208976273
- [17] Pereira T., Ferreira F.A., Martins A.: Logistics trade-offs. *AIP Conference Proceedings*, **2116**, 1, 2019, ID article: 110003, DOI: 10.1063/1.5114096
- [18] Evans J., Ruffing D., Elton D.: *Fundamentals of ground improvement engineering*. CRC Press, London, 2021
- [19] Flyvbjerg B., Holm M.K.S., Buhl S.L.: How common and how large are cost overruns in transport infrastructure projects? *Transport reviews*, **23**, 1, 2003, 71-88, DOI: 10.1080/01441640309904
- [20] Armstrong J., Helm P., Preston J., Loveridge F.: Economics of geotechnical asset deterioration, maintenance and renewal. *Transportation Geotechnics*, **45**, 2024, ID article: 101185, DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101185
- [21] Chassiakos A.P., Sakellaropoulos S.P.: Time-cost optimization of construction projects with generalized activity constraints. *Journal of Construction Engineering and Management*, **131**, 10, 2005, 1115-1124, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:10(1115)
- [22] Fernandes I., Chaminé H.I.: In Situ Geotechnical Investigations. In: Chastre C., Neves J., Ribeiro D., Neves M.G., Faria P. (eds): *Advances on Testing and Experimentation in Civil Engineering*. Springer Tracts in Civil Engineering. Springer, Cham, 2023, DOI: 10.1007/978-3-031-05875-2_2
- [23] Król M.: Łatwe technologie na trudne czasy – metody wzmacniania podłoża w budownictwie infrastrukturalnym. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, **107**, 2, 2023, 36-38
- [24] Gajewska B., Kłosiński B.: Rozwój metod wzmacniania podłoża gruntowego. *Magazyn Autostrady*, **3**, 2012, 26-31
- [25] Cheng Y.M.: An exploration into cost-influencing factors on construction projects. *International Journal of Project Management*, **32**, 5, 2014, 850-860, DOI: 10.1016/j.ijproman.2013.10.003
- [26] Ding Z., Liu X., Xue Z., Li X.: Expert opinion on the key influencing factors of cost control for water engineering contractors. *Sustainability*, **15**, 8, 2023, ID article: 6963, DOI: 10.3390/su15086963
- [27] Bazarnik J., Manczak I.: Koszty targowe w opinii przedsiębiorstw-wystawców – próba zdiagnozowania. *Handel Wewnętrzny*, **350**, 3, 2014, 25-40

- [28] *Gabrusewicz W.*: Metody analizy finansowej przedsiębiorstwa. PWE, Warszawa 2019
- [29] Biuletyn Cen Robót Ziemnych i Inżynieryjnych BRD, 24, Sekocenbud, Warszawa 2022
- [30] *Krajewski M.*: Kierunki analizy kosztów działalności operacyjnej przedsiębiorstw. Studia i Prace, Wydział Nauk Ekonomicznych i Zarządzania Uniwersytetu Szczecińskiego, 6, 2008, 61-68
- [31] *Sagan A.*: Badania marketingowe – podstawowe kierunki. Akademia Ekonomiczna, Kraków, 2004