

RYSZARD DACHOWSKI<sup>1</sup>

PAULINA KOSTRZEWA<sup>2</sup>

Kielce University of Technology

<sup>1</sup> e-mail: tobrd@tu.kielce.pl

<sup>2</sup> e-mail: pkostrzewa@tu.kielce.pl

## REALIZATION OF UNDERGROUND OBJECTS BY THE OPEN CAISSON METHOD IN CONDITIONS OF BUILT-UP AREAS

### REALIZACJA OBIEKTÓW PODZIEMNYCH METODĄ STUDNI OPUSZCZANYCH W WARUNKACH SĄSIEDZTWA ISTNIEJĄCYCH BUDOWLI

#### Abstract

*The article presents the construction of underground objects by open caisson method, under conditions of built-up areas. The technological stages of the open caisson sinking have been separated. The work identified the main causes affecting the deformation of the soil mass surrounding the open caisson. On this basis, the most important construction and technological projects were devoted to the reduction of deformation of the ground surrounding the open caisson during sinking. The ultimate goal of the article is to determine the optimal way to reduce the frictional forces on the outer surface of the reinforced concrete coat of the open caisson. This has been achieved through the implementation of multidimensional technical and economic analysis as the main components in the form of biplots.*

**Keywords:** open caisson method, sinking, land settlement, criterion analysis

#### Streszczenie

*Artykuł przedstawia realizację obiektów podziemnych w technologii studni opuszczanych, w warunkach ścisłej zabudowy urbanistycznej. Wydzielone zostały możliwe stadia technologiczne pogrążania studni. W pracy określono główne przyczyny mające wpływ na deformację masywu gruntu otaczającego studnie. Na tej podstawie wydzielono najważniejsze przedsięwzięcia konstrukcyjno-technologiczne dotyczące zmniejszania deformacji ośrodka gruntowego wokół pogrążanej studni opuszczanej. Celem ostatecznym artykułu jest wyznaczenie optymalnego sposobu zmniejszania sił tarcia po zewnętrznej powierzchni płaszcza żelbetowego studni opuszczanej. Osiągnięto to poprzez wykonanie wielowymiarowej analizy techniczno-ekonomicznej jako analizy głównych składowych w postaci biplotów.*

**Słowa kluczowe:** studnia opuszczana, pogrążanie, osiadanie gruntu, analiza kryterialna

#### 1. Introduction

The realization of underground industrial, municipal, transport, urban, hydrotechnical or specialized industrial facilities is becoming increasingly important. Often the problem of implementing underground objects is the neighborhood of existing buildings. An important feature of building in conditions of „infill” is to preserve the existing state of nearby objects (preventing the appearance of significant soil deformation). The high responsibility

#### 1. Wprowadzenie

Realizacja podziemnych obiektów przemysłowych, komunalnych, transportowych, urbanistycznych, hydrotechnicznych czy też specjalistycznych nabiera coraz większego znaczenia. Częstym problemem realizacji obiektów podziemnych są warunki sąsiedztwa istniejących budowli. Istotną cechą budowy w warunkach „plombowych” jest zachowanie stanu istniejącego usytuowanych w pobliżu obiektów (zapobieganie pojawieniu się znacznych deformacji gruntu).

for the performance of underground facilities under such conditions and the considerable amount of involved resources, increased the design and implementation requirements.

Existing technologies and constructions allow to build tall buildings up to almost 1000 m, even buildings up to about 4000 m high are planned. With such constructions, the foundations are always complicated because the dimensions of the foundation plate and piles are significant. Therefore, it is rational to realize a foundation plate with underground rooms.

During the implementation of objects in the vicinity of existing buildings, the appearance of significant subsidence of the substrate must be eliminated (to ensure the integrity of the existing buildings and their equipment, as well as to reduce the labor intensity). In this case, the following technological and constructional solutions may be used:

- slurry wall, made by piling overlap;
- excavation using the open-pit method with a temporary excavation casing, eg Larssen sheet piling;
- open caisson method.

The first technology, it is most friendly in the conditions of dense urban development, when there can be no deformation of the land near the existing buildings. This technology requires a high performing culture, otherwise there is often a violation of the structure of the concreted sections of the wall, which results in lower quality concrete works.

The second technology – excavation with temporary casing (Larssen sheet piling), is not always acceptable under „infill” conditions, because rammers or vibratory technology are used to sink them into the ground.

Third technology is most commonly used to implement underground objects. In this case, the object is completely executed on the surface of the ground, which allows for constant control of the quality of the sinking down underground structure. However, the deformation of the surrounding ground masses occurs in the sinking down process.

In the implementation of large-scale underground facilities using the open caisson, methods are used to reduce the zones of violation of the structure of the ground. It gives the opportunity to work near the existing foundations of the building.

Duża odpowiedzialność za wykonawstwo obiektów podziemnych w takich warunkach oraz znaczna ilość zaangażowanych środków spowodowały podwyższenie wymogów w projektowaniu i realizacji.

Istniejące technologie i konstrukcje pozwalają budować wysokościowe budynki do prawie 1000 m, planuje się nawet budynki o wysokości około 4000 m. Przy takich budowlach zawsze komplikuje się wykonawstwo fundamentów, ponieważ wymiary płyty fundamentowej i pali są znaczne. W związku z tym racjonalnym staje się realizacja płyty fundamentowej z podziemnymi pomieszczeniami.

W trakcie realizacji obiektów w warunkach sąsiedztwa istniejących budowli trzeba wyeliminować pojawianie się znacznych osiadań podłoża (dla zapewnienia stanu nienaruszonego istniejących budowli i ich urządzeń, a także obniżenia pracochłonności). W tym przypadku mogą być wykorzystane następujące rozwiązania technologiczno-konstrukcyjne:

- ściana szczelinowa, wykonywana metodą pali zachodzących na siebie;
- wykop realizowany metodą odkrywkową z obudową tymczasową wykopu np. ścianka Larsena;
- studnia opuszczana.

Pierwsza technologia jest najbardziej przyjazna w warunkach gęstej zabudowy miejskiej, kiedy niedopuszczalne są żadne deformacje gruntu w pobliżu istniejących budowli; wymaga ona wysokiej kultury wykonawstwa, w przeciwnym razie często pojawia się naruszenie struktury zabetonowanych odcinków ściany, co doprowadza do obniżenia jakości robót betonowych.

Druga technologia – wykop z obudową tymczasową (ścianka szczelna) – nie zawsze jest do przyjęcia w warunkach „plombowych”, ponieważ do pogrążania ich w grunt stosuje się urządzenia do wbijania albo technikę wibracyjną.

Trzecia technologia jest najczęściej stosowana do realizacji obiektów podziemnych. W tym przypadku obiekt wykonywany jest całkowicie na powierzchni gruntu, co pozwala prowadzić stałą kontrolę jakości pogrążanej podziemnej budowli. Jednakże w procesie pogrążania studni pojawiają się deformacje otaczającego masywu gruntu.

Przy realizacji obiektów podziemnych o dużych wymiarach metodą studni opuszczanej stosuje się sposoby pozwalające zmniejszać strefy naruszenia struktury gruntu. Daje to możliwość prowadzenia prac w pobliżu istniejących fundamentów budowli.

**2. Analysis of the influence of factors that occur as a result of sinking the caisson to land deformation**

As a result of a comparative analysis of the various technological developments in sinking walls, a significant technogenic impact of the descent process on existing buildings has been determined. This effect is expressed in the form of settling of the surrounding ground base [1-6].

When determining the width of the soil deformation zone, it is recommended to adopt a soil shear plane at an angle of  $45^\circ$  to  $\phi/2$  to a level. Where  $\phi$  is the design value of the internal friction angle of the soil [7]. The open caisson sinking is possible in the neighborhood of existing buildings, if existing buildings and equipment are not within the boundaries of the structure of the soil, the width of which is determined in accordance with formula:

$$B = H_k \cdot \text{tg} (45^\circ - \phi/2) \quad (1)$$

where:  $B$  – width of soil deformation zone,  $H_k$  – design depth of caisson sinking,  $\phi$  – angle of friction.

Based on the analysis of literature as well as own research, the main causes that influence the deformation of the surrounding ground base are shown in Figure 1 [38].

**2. Analiza wpływu na deformację gruntu czynników, pojawiających się w wyniku pograżania studni opuszczanej**

W wyniku analizy porównawczej różnorodnych przedsięwzięć technologiczno-konstrukcyjnych studni opuszczanych ustalono znaczny technogeniczny wpływ procesu opuszczania na istniejące budowle. Wpływ ten wyraża się w postaci osiadania otaczającego ośrodka gruntowego [1-6].

Przy określeniu wymiarów strefy naruszenia struktury gruntu zalecane jest przyjęcie płaszczyzny ścinania gruntu pod kątem od  $45^\circ$  do  $\phi/2$  do poziomu, gdzie  $\phi$  to wartość obliczeniowa kąta tarcia wewnętrznego gruntu [7]. Pograżanie studni opuszczanych jest możliwe w warunkach sąsiedztwa istniejących budowli, jeśli istniejące budynki i urządzenia nie znajdują się w granicach strefy naruszenia struktury gruntu, szerokość której określa się wg wzoru:

$$B = H_k \cdot \text{tg} (45^\circ - \phi/2) \quad (1)$$

gdzie:  $B$  – szerokość strefy deformacji gruntu,  $H_k$  – głębokość projektowa pograżenia studni,  $\phi$  – kąt tarcia wewnętrznego gruntu.

Na podstawie analizy literatury, a także badań własnych, wydziela się główne przyczyny, wpływające na deformacje otaczającego ośrodka gruntowego, przedstawione na rysunku 1 [8].

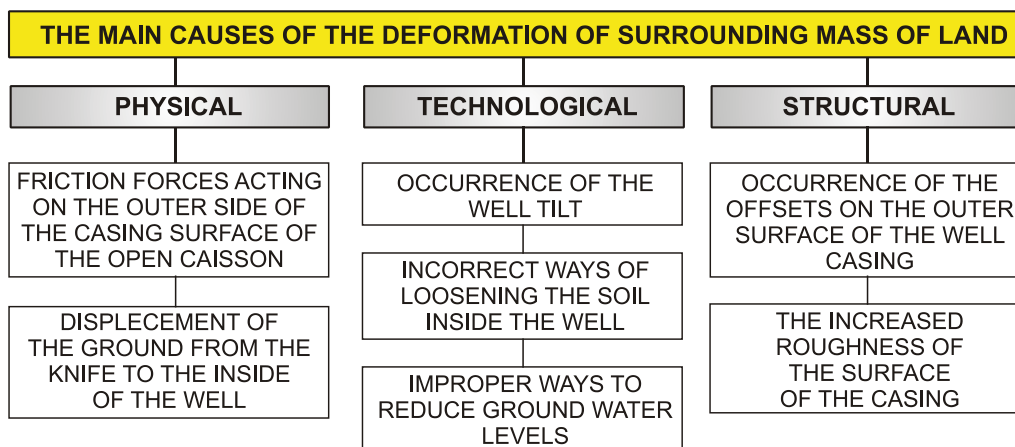


Fig. 1. Main causes affecting the deformation of the ground base that surrounds the caisson sinking

Rys. 1. Główne przyczyny wpływające na deformację ośrodka gruntowego otaczającego pograżane studnie

Based on the analysis of Figure 1 and the generalization of bibliographic data, a classification of technological and construction projects has been developed, to improve the way the caisson is sinking during the implementation of the existing buildings and foundations (Fig. 2) [9-15].

Na podstawie analizy rysunku 1 oraz uogólnienia danych literaturowych opracowano klasyfikację przedsięwzięć technologiczno-konstrukcyjnych w celu doskonalenia sposobu studni opuszczanej podczas realizacji w warunkach sąsiedztwa istniejących budowli i fundamentów (rys. 2) [9-15].

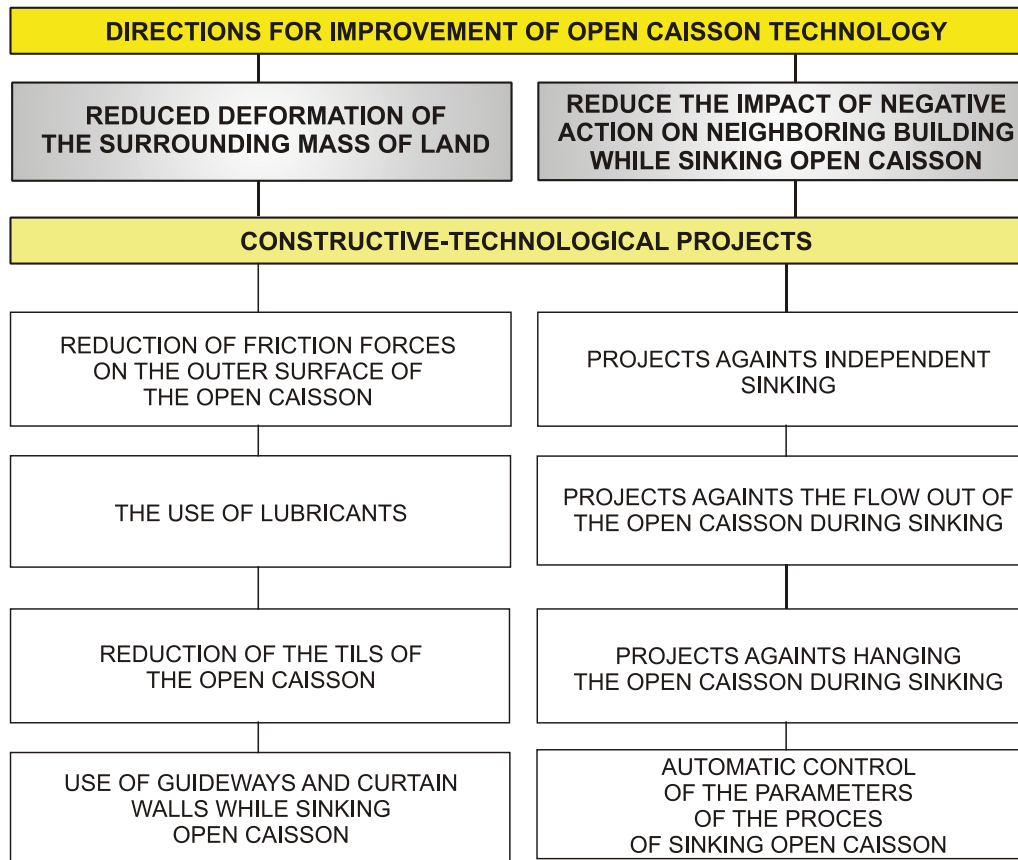


Fig. 2. Classification of structure and technological projects for the construction of underground building in conditions of built-up areas using open caisson method

Rys. 2. Klasyfikacja konstrukcyjno-technologicznych przedsięwzięć realizacji budowli podziemnych w warunkach zabudowy „plombowej”, sposobem studni opuszczanych

**3. Multidimensional technical and economical analysis of ways to reduce ground frictional forces on the outer side of the cover of caisson sinking**

Technological and economic analyzes of construction-technology-material projects can be made through a variety of mathematical tools. The most familiar measurement tool is the SERVQAL scale used to measure the perceived quality of the projects. The second type of scale for qualitative measurement is the SIMALTO scale, which is the scale of simultaneous multi-parameter compromises. Decisions are made by participants in the investment process on the basis of various combinations of variable ventures. The third direction of assessment is comparative scales, where relative scales are used, eg importance scales. The methods presented above are the most commonly used combinations of mean values of evaluated criteria, which are classified on the axes of the coordinate system. The advantage of this method is the simplicity of the graphic interpretation, but at the same time the main disadvantage is subjectivism when assessing critical scale values, or

**3. Wielowymiarowa analiza techniczno-ekonomiczna sposobów zmniejszających siły tarcia gruntu po zewnętrznej stronie ściany płaszczu studni opuszczanej**

Analizy techniczno-ekonomicznej przedsięwzięć konstrukcyjno-technologiczno-materiałowych można dokonać, opierając się na różnorodnych narzędziach matematycznych. Najbardziej znanym z nich narzędziem pomiaru jest skala SERVQAL, używana w pomiarze postrzegawczej jakości przedsięwzięć. Drugim typem skali do pomiarów jakościowych jest skala SIMALTO, która jest skalą jednoczesnych compromised wieloparametrowych. Decyzje podejmowane są przez uczestników procesu inwestycyjnego na podstawie różnych kombinacji zmiennych przedsięwzięć. Trzeci kierunek oceny to skale porównawcze, w których stosuje się względne skale oceny, np. skale wag. Przedstawione powyżej metody są najczęściej zestawieniami wartości średnich ocenianych kryteriów, sklasyfikowanymi na osiach układu współrzędnych. Zaletą tej metody jest prostota interpretacji graficznej, ale jed-



lack of interdependence between criteria and hidden attribute systems [16].

The tools of multivariate analysis are more comprehensive methods of recognizing factors influencing the evaluation of construction projects. They allow an in-depth understanding of the dependencies. These maps (called biplots) provide an opportunity to determine the relationships that occur between comparable cases (construction and technology and materials) and their characteristics (criteria, variables) at the same time. This is a graphical representation of both line items and columns on the same graph. This facilitates the interpretation of the analyzed relationships [16].

The article uses the method of analysis of main components and classification analysis included in the module „Multidimensional Exploratory Techniques”, STATISTICA v.10.

The choice of projects reducing the negative impact of the surrounding environment is based on the analysis of various criteria. Characterizing the quality of the criteria quality assessment of projects improving the way of sinking the open caisson is based on the most important technological criteria.

Main criteria for improvement projects of sinking open caisson:

- K1 – Efficiency.
- K2 – Reduction of soil deformation.
- K3 – Ability to adjust friction forces.
- K4 – Economic efficiency of the process (costs).
- K5 – Ecological security.
- K6 – Reliability of the works.

The quality criteria of the projects were determined on the basis of the analysis of the open caisson sinking technology as well as the experimental data and expressed in points from 1.0 to 5.0. The highest point value of 5.0 expresses full compliance with the presented quality criteria; the other points indicate partial compliance. The greater the value of criterion K, the more effective the technological project. The qualitative comparison of the criteria presented for the methods of reducing the friction forces of the ground on the outer surface of the coat of open caisson is shown in Table 1. As a technology and material venture, prior to the analysis, the following were selected:

- Concrete surface – i.e. reinforced concrete open caisson coat without any cover,
- Polymer coatings – monolithic coatings, eg epoxy resins with various additives, as lubricants,
- Polymer plates – eg plates PE, PP,
- Thixotropic shirts – based on bentonite slurry.

nocześnie główną wadą jest subiektywizm przy ocenie krytycznych wartości skali, czy też brak współzależności pomiędzy kryteriami i ukrytych układów cech [16].

Pełniejszymi metodami rozpoznawania czynników wpływających na ocenę przedsięwzięć budowlanych są narzędzia analizy wielowymiarowej. Pozwalają na dogłębne zrozumienie występujących zależności. Mapy te (nazywane biplotami) dają możliwość określania zależności zachodzących jednocześnie między porównywalnymi przypadkami (przedsięwzięciami konstrukcyjno-technologiczno-materiałowymi) i ich cechami (kryteriami, zmiennymi). Jest to odwzorowanie graficzne zarówno elementów wierszy, jak i kolumn na tym samym wykresie. Ułatwia się przez to interpretację analizowanych zależności [16].

W artykule wykorzystano metodę analizy składowych głównych i analizy klasyfikacyjnej zawartej w module „Wielowymiarowe techniki eksploracyjne” programu STATISTICA v.10.

Wybór przedsięwzięć zmniejszających negatywne oddziaływanie procesu pograżania obiektu na otaczające środowisko odbywa się na podstawie wyniku analizy różnych kryteriów charakteryzujących jakość przedsięwzięcia. Kryterialna ocena jakości przedsięwzięć doskonalących sposób opuszczania studni dokonana jest na podstawie najważniejszych kryteriów technologiczności.

Główne kryteria przedsięwzięć doskonalących sposób opuszczania studni:

- K1 – Wydajność.
- K2 – Zmniejszenie deformacji gruntu.
- K3 – Możliwość regulowania sił tarcia.
- K4 – Efektywność ekonomiczna sposobu (koszty).
- K5 – Bezpieczeństwo ekologiczne.
- K6 – Niezawodność wykonawstwa robót.

Kryteria cząstkowe jakości przedsięwzięć określono na podstawie analizy technologii opuszczania studni, a także danych eksperymentalnych i wyrażono w punktach od 1,0 do 5,0. Największa wartość punktowa 5,0 wyraża pełną zgodność z przedstawionymi kryteriami jakości, a pozostałe wskazują na częściową zgodność. Im większa wartość kryterium K, tym bardziej efektywne jest przedsięwzięcie technologiczne. Jakościowe porównanie przedstawionych kryteriów dla sposobów zmniejszenia sił tarcia gruntu po powierzchni zewnętrznej płaszcza studni opuszczanej (przypadki) przedstawiono w tabeli 1. W charakterze przedsięwzięć technologiczno-materiałowych na podstawie wcześniejszej analizy wybrano: – powierzchnię betonową, tj. płaszcza studni opuszczanej żelbetowej bez jakiegokolwiek pokrycia,

Table 1. Qualitative comparison of criteria for methods of reducing friction forces of the ground on the outer surface of a open caisson

Tabela 1. Porównanie jakościowe kryteriów dla sposobów zmniejszenia sił tarcia gruntu po powierzchni zewnętrznej płaszcza studni opuszczanej

Number	Ways to reduce the friction between the ground and the wall of the open caisson	Technology indicators					
		K1	K2	K3	K4	K5	K6
1	Concrete surface	5.0	1.0	1.0	1,0	5.0	5.0
2	Polymer coatings	4.0	5.0	5.0	5,0	5.0	5.0
3	Polymer plates	3.0	4.0	5.0	4,0	5.0	5.0
4	Thixotropic shirts	2.0	5.0	5.0	3,0	4.0	2.0

Table 1 presents 4 technological and material solutions for methods of reducing friction forces of the ground on the wall of the open caisson coat and 6 variables as technological criteria. Active variables are the criteria associated with rational parameters, the additional variable (passive) is a descriptive element. Biplot was constructed on the basis of the covariance matrix.

During the development of biplot, a graphic interpretation was interesting. The main coordinates represent almost 98% of the total variance of the 5 active variables involved in the analysis. The ecology variable, due to the unreliable nature and similar medians, found itself passive (additional), did not participate in the interpretation. 2W charts are shown for the variables and technology and material projects. To get the correct interpretation, one graph was applied to the other. On the common coordinate system there are active vectors (blue circles) and passive variable (red square), as well as points representing technological and material projects (green circles).

- powłoki polimerowe – powłoki monolityczne, np. z żywic epoksydowych z różnorodnymi dodatkami stanowiącymi materiały poślizgowe,
- płyty polimerowe, np. płyty z PE, PP,
- koszulki tiksotropowe na bazie zawiesiny bentonitowej.

W tabeli 1 przedstawiono 4 rozwiązania technologiczno-materiałowe dla sposobów zmniejszenia sił tarcia gruntu po ścianie płaszcza studni opuszczanej i 6 zmiennych jako kryteria technologiczne. Zmiennymi aktywnymi są kryteria związane z parametrami wymiernymi, zmienna dodatkowa (pasywna) stanowi element opisowy. Biplot został skonstruowany na bazie macierzy kowariancji.

Opracowując biplot, interesującym faktem była interpretacja graficzna. Główne współrzędne przedstawiają prawie 98% całkowitej wariancji 5 zmiennych aktywnych, które biorą udział w analizie. Zmienna ekologii, w związku z niewymiernym charakterem i podobnymi medianami, znalazła się jako pasywna (dodatkowa), bez udziału w interpretacji. Dla zobrazowania zmiennych (kryteriów) i przedsięwzięć technologiczno-materiałowych przedstawiono wykresy 2W. Aby uzyskać poprawną interpretację nałożono jeden wykres na drugi. Na wspólnym układzie współrzędnych usytuowane są zmienne-kryteria (wektory) aktywne (strzałki-kółka niebieskie) i pasywna zmienna (strzałka-kwadrat czerwony), a także punkty przedstawiające przedsięwzięcia technologiczno-materiałowe (kółka zielone).

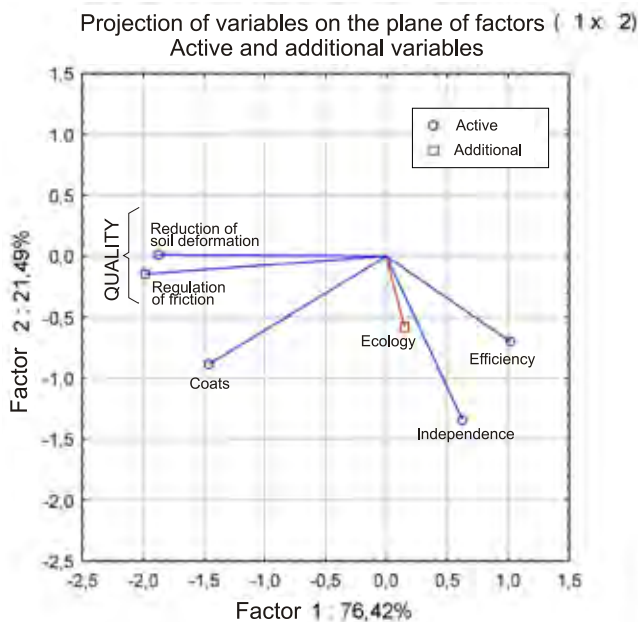


Fig. 3. Chart 2w co-factors for criteria

Rys. 3. Wykres 2W współrzędnych czynnikowych kryteriów

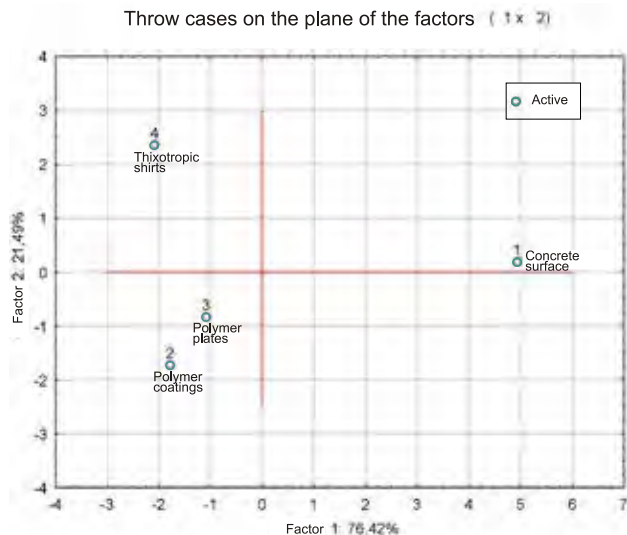


Fig. 4. Graph 2W of coordinates of technological and material projects.

Rys. 4. Wykres 2W współrzędnych czynnikowych przedsięwzięć technologiczno-materiałowych.

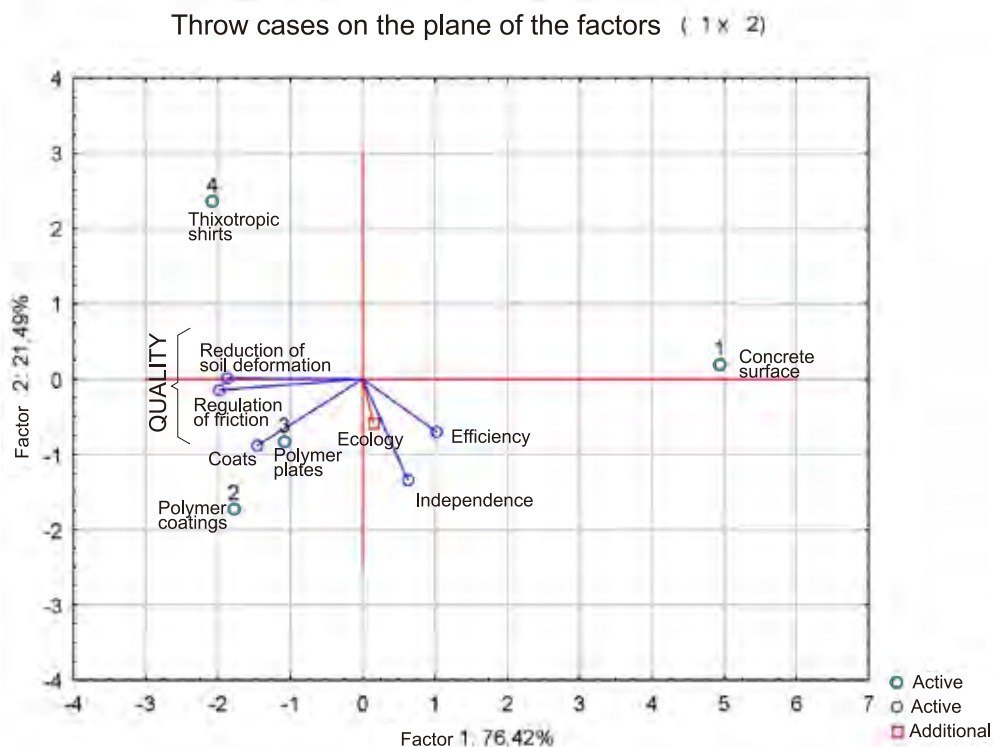


Fig. 5. Common coordinate diagram of criteria co-factors and technology and material co-factors

Rys. 5. Wspólny wykres 2W współrzędnych czynnikowych kryteriów oraz czynnikowych przedsięwzięć technologiczno-materiałowych

The graphic interpretation of the map shows that two variables (reduction of soil deformation and friction regulation) are strongly correlated. Consequently, they were merged into a qualitative group. Other variables are more distant (no correlation). Quality vectors are strongly inclined to the horizontal main axis. Also worth noting is the cost vector. Since quality

Z graficznej interpretacji mapy wynika, że dwie zmienne (zmniejszenie deformacji gruntu i regulacja tarcia) są silnie skorelowane. W związku z tym połączono je w grupę jakościową. Pozostałe zmienne są bardziej oddalone od siebie (brak korelacji). Wektory jakościowe są silnie nachylone do osi głównej poziomej. Warto zwrócić uwagę również na wektor

and cost vectors explain more than half of the total variance (76%) of data sets, they are very important criteria. The efficiency and reliability dimension is responsible for 21% of the variance. The vector of ecology that does not participate in the analysis, that is, unreliable and having close-to-medium medians is short and irrelevant.

In total, three vectors are characterized by variable quality and cost. From this point of view, these vectors most accurately evaluate technology and material projects: reducing soil deformation and adjusting friction. Vectors of efficiency and reliability are correlated with the traditional technology of open caisson sinking method, without projects reducing friction.

#### 4. Conclusions

Based on the analysis following conclusions can be drawn:

- The construction of subterranean spaces in the neighborhood of existing buildings requires the removal of significant subsoil occurring during construction works. Existing technological and constructional solutions that are appropriate in this situation are: slurry wall, excavation using the open-pit method with a temporary excavation casing and open caisson method. The last (most commonly used) carries with it the risk of significant deformation of the surrounding mass of land.
- On the basis of literature analysis and their own experimental research, the main causes of these deformations have been identified: the mass friction of the soil on the outer surface of the open caisson.
- Multi-criteria analysis using biplots was used for the evaluation. The analysis of the charts allowed us to identify the optimal projects: plates and polymeric coatings for the most important criteria: reduction of soil deformation, ability to regulate friction and cost.

#### References

- [1] Алмазов А.Н., Гарибина Т.А., Зерцалова Р.Х.: *Разработка алгоритмов расчета и выбора оптимальных конструктивно-технологических решений опускных колодцев.* - В кн.: Производство специальных строительных работ: Сб. науч. тр. / ВНИИГС. Л., 1987, с. 28-33.
- [2] Алмазов А.Х., Ветров Б.Д., Гоникман И.Ш.: *Исследования характеристик преобразователей условий трения грунта на контакте движущаяся стена - грунт.* - В кн.: Специальные строительные давления и сил: Сб. тр./ ВНИИГС. Л., 1981, с. 40-46.
- [3] Березницкий Ю.А.: *Опыт применения опускных колодцев при строительстве зданий в местах плотной застройки Москвы.* - Основания, фундаменты и механика грунтов, 1977, № 2, с. 41-43.
- [4] Векслер А.Б., Ивашинов Д.А., Стефанишин Д.В.: *Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений.* СПб.: Изд-во ОАО ВНИИГ, 2002, 589 с.

kosztów. W związku z tym, że wektory jakości i kosztów wyjaśniają ponad połowę całkowitej wariancji (76%) zbioru danych są kryteriami bardzo istotnymi. Wymiar wydajności i niezawodności odpowiada za 21% wariancji. Wektor ekologii nie biorący udziału w analizie, tj. niewymierny i posiadający zbliżone do siebie mediany, jest krótki i nieistotny.

W sumie trzy wektory charakteryzują zmienne jakości i kosztów. Z tego punktu widzenia wektory te najwyżej oceniają przedsięwzięcia technologiczno-materiałowe: zmniejszanie deformacji gruntu i regulacja tarcia. Wektory wydajności i niezawodności są skorelowane z tradycyjną technologią studni opuszczanej bez przedsięwzięć zmniejszających siły tarcia.

#### 4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy można sformułować następujące wnioski:

- Budowa podziemnych pomieszczeń w warunkach sąsiedztwa istniejących budowli wymaga wyeliminowania pojawiających się podczas robót budowlanych znacznych osiadań podłoża. Z istniejących rozwiązań technologiczno-konstrukcyjnych właściwymi w tej sytuacji są: ściana szczelinowa, wykop otwarty z obudową tymczasową i studnia opuszczana. Ta ostatnia (najczęściej stosowana) niesie za sobą ryzyko znacznych deformacji otaczającego masywu gruntu.
- Na podstawie analizy literaturowej i własnych badań eksperymentalnych wydzielono główne przyczyny mające wpływ na te deformacje, tj. siły tarcia masywu gruntu po zewnętrznej powierzchni ściany studni opuszczanej.
- Do oceny przyjęto analizę wielokryterialną z zastosowaniem biplotów. Analiza wykresów pozwoliła wytypować optymalne przedsięwzięcia – płyty i powłoki polimerowe dla najważniejszych kryteriów: zmniejszenie deformacji gruntu, możliwość regulowania sił tarcia oraz kosztów, tj. najsilniej skorelowanych.



- [5] Верстов В.В., Перлей Е.М.: *Эффективные технологии и оборудование для производства специальных строительных работ*. - Монтажные и специальные работы в строительстве, 1998, № 4, с. 23-25.
- [6] Patent № 63-004119, класс E02 (Япония). Метод разрыхления грунта под ножом, 1988.
- [7] Алмазов А.Н., Перминов Н.А., Ольшевский Г.Ф., Феоктистова Н.В.: *Пути снижения сил трения при погружении опускных колодцев* - В кн.: Технология и оборудование для специальных строительных работ: Сб. науч. тр. / ВНИИГС. Л., 1982, с. 109-116.
- [8] ВНИИГС \ \ Сборник научных трудов, под ред. Верстов В.В. *Рациональная технология производства специальных строительных работ*. Л., 1991, 112 с.
- [9] ВНИИГС \ \ Сборник научных трудов, под ред. Верстов В.В. *Технология и оборудование для гидромеханизированных работ и устройства подземных сооружений*. Л., 1989, 132 с.
- [10] Заявка на изобретение № 19867119/24-19 (СССР). Способ погружения опускного колодца в грунт/Серегин Б.М., 1976.
- [11] Даховски Р.: *Совершенствование технологии сооружения опускных колодцев в стесненных условиях. Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2004. № 8. С.8-11.
- [12] Даховски Р.: *Совершенствование механизации погружения опускных колодцев в условиях городской застройки*. Механизация строительства. 2004. № 10. С.14-17.
- [13] Даховски Р.: *Строительство подземного объекта способом опускного колодца в стесненных условиях*. VIII Internationaler Kongress Industrielles Bauen (IKIB 88). Leipzig, 1988. s.127-131.
- [14] Dachowski R.: *The influence of sinking underground structures or foundations by the caisson method on the surrounding ground mass and neighbouring buildings*. The Ninth Danube-European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Budapest, 1990. S. 313-318.
- [15] Dachowski R.: *Analiza techniczno-ekonomiczna studni opuszczanych w warunkach sąsiedztwa istniejących budowli*. VI Vedecka Konferencia Technologia v stavebnictve. Košice, 06-08.05.1997. S.242-245.
- [16] Sagan A.: *Jeden obraz ukazuje więcej niż 10 liczb, czyli jak budować mapy zadowolenia klienta z wykorzystaniem programu STATISTICA*. StatSoft Polska. 2004.