

MICHAŁ PAWŁOWSKI<sup>1)</sup>

## ALTERNATIVE STRUCTURES OF RAILROAD SUBGRADE PROTECTIVE LAYERS

### KONSTRUKCJE ZAMIENNE WARSTW OCHRONNYCH PODTORZA

**STRESZCZENIE.** Konstrukcje wzmocnień górnej strefy podtorza, projektowane na podstawie wyników punktowych geotechnicznych badań podłoża, nie zawsze są adekwatne do stwierdzonych na budowie rzeczywistych warunków gruntowych. Konieczne jest wówczas przyjęcie i zastosowanie odpowiednich konstrukcji zamiennych. W artykule przedstawiono dwie podstawowe konstrukcje wzmocnień górnej strefy podtorza (dwu- i jednowarstwową) oraz trzy najczęściej stosowane rozwiązania zamienne (konstrukcję o zwiększonej grubości, konstrukcję zbrojoną geosiatką oraz konstrukcję z warstwą gruntu stabilizowanego spoiwem hydraulicznym). Przeanalizowano wpływ zastosowania wymienionych konstrukcji zamiennych na możliwość zmniejszenia wymaganych wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza przed wzmocnieniem, pozwalających na osiągnięcie docelowych wartości po zastosowaniu danego wzmocnienia. Omówiono warunki stosowania rozpatrywanych konstrukcji zamiennych oraz ich przydatność w zależności od występujących na budowie warunków gruntowych. Dwie z analizowanych konstrukcji – o zwiększonej grubości oraz zbrojona geosiatką – są przydatne w przypadku wystąpienia małych różnic pomiędzy rzeczywistymi a projektowymi wartościami wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza. Konstrukcja z warstwą gruntu stabilizowanego spoiwem hydraulicznym jest użyteczna w razie stwierdzenia na budowie znacznego niedoboru wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza.

**SŁOWA KLUCZOWE:** droga kolejowa, konstrukcje zamienne, podtorze kolejowe, warstwa ochronna.

**ABSTRACT.** Structural improvement of the upper zone of a railroad subgrade, which was designed based on local geotechnical testing, may not always prove adequate to actual geotechnical conditions observed in field during construction. When such discrepancies occur, it is necessary to adopt and install alternative solutions. The article presents two basic protective layer structures (single- and double-layer) that increase the bearing capacity of a railroad subgrade's upper zone, as well as three most popular alternative solutions (increased thickness of a layer, a geogrid-reinforced layer and a double-layer structure with bottom layer consisting of hydraulically-stabilized soil). The analysis included influence of introducing such alternative structures on a possibility to decrease required minimum values of subgrade's secondary deflection modulus observed in static plate load tests before structural improvement, that would still enable one to obtain the target modulus values after installation of the chosen alternative solution. Conditions of use and applicability of the analyzed alternative structures in various geotechnical conditions are also discussed. Two analyzed structures – i.e. single layer of increased thickness and single geogrid-reinforced layer – are adequate when small differences occur between the design and actual field values of secondary deflection moduli. The structure incorporating a layer of hydraulically-stabilized soil is proper for a considerable deficiency in secondary deflection moduli of the subgrade.

**KEYWORDS:** alternative structures, protective layer, railroad, railroad subgrade.

DOI: 10.7409/rabdim.023.016

<sup>1)</sup> Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, Instytut Inżynierii Lądowej, ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań; michal.pawlowski@put.poznan.pl

## 1. WPROWADZENIE

Modernizacja dróg kolejowych przeprowadzana jest głównie w celu poprawy ich parametrów techniczno-eksploatacyjnych, w tym zwiększenia prędkości pociągów, skrócenia czasu podróży i poprawy warunków bezpieczeństwa ruchu. Obejmuje ona przede wszystkim przebudowę i dostosowanie do nowych warunków pracy budowli ziemnych, konstrukcji i urządzeń bezpośrednio związanych z prowadzeniem ruchu pociągów. Jedną z nich jest podtorze kolejowe, przejmujące przekazywane przez nawierzchnię obciążenia od przejeżdżających pociągów oraz podlegające wpływom klimatycznym [1].

Jeśli w dotychczasowym użytkowaniu podtorze nie wykazuje oznak braku stateczności i nie jest wymagane jego wglębne wzmocnienie [2], to jego modernizacja polega głównie na poprawie współpracy nawierzchni i podtorza poprzez zastosowanie różnego rodzaju zabiegów ulepszających właściwości gruntów górnej strefy podtorza, celem zminimalizowania uszkodzeń podtorza w jego przyszłej eksploatacji. Obecnie do poprawy właściwości gruntów górnej strefy podtorza stosuje się stabilizację mechaniczną i chemiczną, geosyntetyki [3,4] lub częściową wymianę gruntu poprzez wbudowanie warstw ochronnych. Podejmowane są próby stosowania warstw z pianobetonu [5] czy zawierających uboczne produkty rolnicze i przemysłowe [6] oraz materiały odpadowe [7, 8]. W wyniku modernizacji podtorze powinno charakteryzować się wymaganą nośnością (określaną wartością modułu wtórnego odkształcenia) oraz odpowiednim stanem zagęszczenia (definiowanym wartością wskaźnika zagęszczenia).

Warstwy ochronne, zastępujące dotychczasową górną strefę podtorza, wykonuje się z kruszyw kamiennych lub gruboziarnistych gruntów naturalnych. W uzasadnionych przypadkach konstrukcje wzmocnień podtorza mogą zawierać geosyntetyki. Grubość warstw ochronnych projektuje się według przepisów kolejowych [9] na podstawie wyników przedprojektowych badań geotechnicznych podtorza. Badania przedprojektowe polegają na określeniu warunków geologiczno-inżynierskich i geotechnicznych oraz ustaleniu wartości parametrów geotechnicznych gruntów podtorza w jego górnej strefie. Otwory badawcze i sondowania dynamiczne wykonuje się na głębokość około 3 m od poziomu niwelety toru. Próbnę obciążenia podtorza płytą sztywną obejmują zasięgiem górną strefę podtorza do głębokości około 4 średnic płyty [10]. Punkty badawcze, w zależności od stopnia skomplikowania warunków gruntowych, są oddalone od siebie o 25 m do 100 m [11], co jednak nie pozwala na szczegółowe odzwierciedlenie rzeczywistych właściwości, parametrów i wzajemnego rozmieszczenia gruntów w podtorzu.

## 1. INTRODUCTION

Railroad structures are modernized primarily in order to improve the technical and service parameters, including increased train speed, reduced travel time and improved safety. Modernization primarily encompasses reconstruction and adjustment of earthworks, structures and utilities associated with rail traffic. Such elements include the railroad subgrade, onto which the loads from the passing trains are transferred, and which is also under influence from weather and climate [1].

If the subgrade does not show signs of stability loss and does not require deep strengthening [2], its modernization mainly consists of improvement of its performance in combination with the railroad track; this is achieved through various actions that strengthen the upper zone of the subgrade and minimize its damage in future service. Currently, the properties of the upper zone of railroad subgrade are improved by mechanical and chemical stabilization, use of geosynthetics [3, 4] or partial soil replacement with protective layer incorporation. Use of foam concrete [5] layers incorporating agricultural and industrial by-products [6] or waste [7, 8] has also been attempted. After modernization, the subgrade should display the required bearing capacity (expressed by secondary deflection modulus from static plate load tests) and proper compaction (expressed using the soil compaction factor).

Protective layers that replace the upper zone of the subgrade are constructed using mineral aggregates or coarse natural soils. If necessary, they may also incorporate geosynthetic materials. Thickness of protective layers is designed in accordance with national regulations [9], based on the results from initial geotechnical tests of the subgrade. Tests performed before the design determine the geological-engineering and geotechnical conditions, including geotechnical parameters of subgrade soils in its upper zone. Test pits and dynamic penetration tests reach to the depth of approx. 3 m below elevation of the track profile. Static plate load tests reflect the bearing capacity of the subgrade to a depth of about four times the diameter of the plate used [10]. Depending on complexity of soil conditions, the tests are performed every 25 m to 100 m, which does not allow for a detailed analysis of the actual properties, parameters and relative location of soils.

Assumptions and solutions adopted in the design are verified during construction. The protective layers are placed

Weryfikacja przyjętych w projekcie założeń i konstrukcji wzmocnienia górnej strefy podtorza jest przeprowadzana w czasie realizacji inwestycji. Warstwy ochronne wbudowuje się w podtorze jedną z dwóch metod [12] – tradycyjną (z wykorzystaniem typowego sprzętu budowlanego) lub potokową (z użyciem pociągu do napraw podtorza).

Podczas prac wykonuje się geotechniczne badania kontrolne gruntów podtorza na poziomie posadowienia warstw ochronnych. Mają one na celu ocenę aktualnych parametrów gruntów oraz przydatności zaprojektowanych konstrukcji wzmocniających. W badaniach określone są wartości wtórnego modułu odkształcenia podtorza oraz wskaźnika zagęszczenia, które nie powinny być mniejsze od wartości projektowych. W przypadku uzyskania pozytywnych wyników, w górną strefę podtorza wbudowuje się konstrukcję wzmocnienia określoną w projekcie technicznym. W przypadku uzyskania negatywnych wyników badań kontrolnych, należy podjąć stosowne kroki do rozpoznania przyczyn tego stanu oraz wdrożyć niezbędne działania naprawcze [13], które mogą polegać na zastosowaniu jednej z kilku równoważnych konstrukcji zamiennych, umożliwiających uzyskanie spodziewanego efektu poprawy właściwości podtorza. Po zakończeniu prac przeprowadza się kontrolę ich jakości. W badaniach odbiorczych, wykonywanych na górnej powierzchni zmodernizowanego podtorza, ocenie podlegają geotechniczne parametry odbiorcze. Parametrami odbiorczymi podtorza są wtórny moduł odkształcenia i wskaźnik zagęszczenia. Ich wartości, które powinny spełniać założenia projektowe i wymogi przepisów [9], określa się w stosownie wykonanych próbnym obciążeniach podtorza płytą sztywną [14].

## 2. PODSTAWOWE KONSTRUKCJE WARSTW OCHRONNYCH

W latach 90. XX wieku powszechnie stosowaną konstrukcją wzmocnienia górnej strefy podtorza była warstwa ochronna składająca się z dwóch warstw kruszyw lub gruntów o różnym uziarnieniu (warstwa podwójna), przedstawiona na Rys. 1. Warstwa górna najczęściej wykonywana była z kruszywa łamanego o uziarnieniu 4/31,5 mm. Do wykonania dolnej warstwy stosowano żwir lub pospółkę. Ze względów technologicznych grubość każdej z tych warstw nie powinna być mniejsza niż 15 cm [9]. W projektowaniu konstrukcji najczęściej zakłada się stałą grubość górnej warstwy (15 cm lub 20 cm) i w zależności od stwierdzonej w badaniach przedprojektowych nośności podtorza dostosowuje się grubość warstwy dolnej. Jeżeli warstwa ochronna układana jest na drobnoziarnistych gruntach podtorza, to z uwagi na konieczność zachowania stabilności mechanicznej na styku warstw wymagane jest zastosowanie geowłókniny separacyjnej. Zastosowanie konstrukcji dwuwarstwowej powoduje utrudnienia logistyczne

over the railroad subgrade using one of the two methods [12] – traditional (using conventional construction machinery) or on-track (using subgrade repair trains).

During construction works, geotechnical control tests are performed at bottom level of the designed protective layer. Their aim is to enable assessment of the current soil parameters and usability of the designed structural improvements. The tests include static plate load tests, which yield the values of secondary deflection modulus and the soil compaction factor; the obtained values should not be lower than the design values. If the results are positive, the upper zone of the subgrade is constructed as provided for in the technical design. When the results are negative, the causes should be determined and adequate repair measures should be introduced [13]. They may consist of installation of one of several alternative structures, which provide the expected structural improvement of the railroad subgrade. Upon completion of the works, their quality is evaluated. End acceptance tests are performed on the surface of the new strengthened subgrade and the obtained geotechnical parameters are assessed. Acceptance is based on the values of the secondary deflection modulus and the soil compaction factor. These values, which should meet the design assumptions and the requirements given in regulations [9], are determined from static plate load tests performed on the surface of the subgrade [14].

## 2. BASIC PROTECTIVE LAYER STRUCTURES

In the 1990s, the most common structural improvement of the upper zone of a railroad subgrade was a placement of two courses of differently graded aggregates or soils (double-layer structure), as shown in Fig. 1. The upper course was usually constructed using 4/31.5 mm crushed aggregate. The lower course comprised of gravel or an all-in aggregate. Due to technological considerations, thickness of a single layer should not be less than 15 cm [9]. Usually, designers adopt a fixed thickness of the upper layer (15 cm or 20 cm) and adjust the thickness of the lower layer depending on the results of initial bearing capacity tests. If the protective layer is to be placed over fine soils, it is necessary to install a separation geotextile in order to provide mechanical stability at the layers connection. Use of a double-layer structure generates logistic and technological complications, both during design and construction. It is necessary to transport and store two different granular materials, which also require separate installation. The preferred construction technology in this case is the traditional method. When a subgrade repair train is used, each layer is placed in a separate pass. Due to

i technologiczne, zarówno na etapie projektowania, jak i budowy. Niezbędne jest dostarczenie i składowanie na miejscu realizacji inwestycji dwóch różnych materiałów, wymagających również odrębnego wbudowania w podtorze. Preferowaną technologią budowy jest metoda tradycyjna. W przypadku użycia do realizacji wzmocnienia pociągu do napraw podtorza, wbudowanie poszczególnych warstw następuje podczas kolejnych przejazdów maszyny. Ze względu na znaczną grubość, kłopotliwe może być jej dostosowanie do istniejących systemów odwodnieniowych.

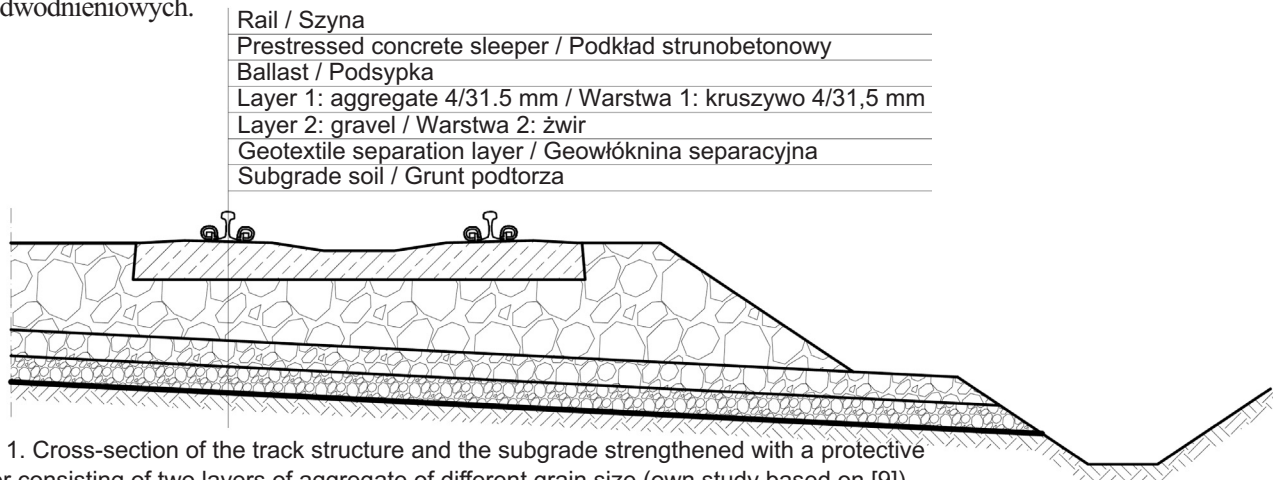


Fig. 1. Cross-section of the track structure and the subgrade strengthened with a protective layer consisting of two layers of aggregate of different grain size (own study based on [9])

Rys. 1. Przekrój poprzeczny nawierzchni i podtorza wzmocnionego warstwą ochronną złożoną z dwóch warstw kruszywa o różnym uziarnieniu (opracowanie własne na podstawie [9])

Problemy projektowe, logistyczne i technologiczne, dość znaczna minimalna grubość konstrukcji oraz ograniczona możliwość zastosowania pociągu do napraw podtorza spowodowały, że warstwa podwójna obecnie jest wykorzystywana jedynie do wzmocniania górnej strefy podtorza w obszarze stacji kolejowych, gdzie pełni również rolę drenażu powierzchniowego.

Aktualnie powszechnie stosowaną konstrukcją wzmocnienia górnej strefy podtorza jest jednorodna (pojedyncza) warstwa ochronna (Rys. 2) o minimalnej grubości 15 cm [9], najczęściej wykonywana z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm. W celu redukcji docelowej grubości warstwy można zastosować jej dodatkowe zbrojenie geosiatką. Jest to prosta konstrukcja, niesprawiająca większych problemów logistycznych i technologicznych. Konstrukcje o znacznych grubościach należy budować w kilku warstwach. W zależności od zaprojektowanej grubości oraz dostępności sprzętu może być wykonywana z zastosowaniem typowego sprzętu budowlanego lub przy użyciu pociągu do napraw podtorza. W drugim przypadku, z powodów technologicznych, jej grubość nie powinna przekraczać 40 cm. Jeżeli warstwa ochronna układana jest na drobnoziarnistych gruntach podtorza, to z uwagi na konieczność zachowania stabilności mechanicznej na styku warstw wymagane jest zastosowanie geowłókniny separacyjnej.

the considerable total thickness, it may prove problematic to combine such structural improvement with existing drainage systems.

Due to the design, logistic and technological problems, the considerable thickness of the structure and limitations in the use of subgrade repair trains, nowadays the double-layer structural improvements of railroad formation are used only at train stations, where they act as surface drainage as well.

Currently, the most common subgrade structural improvement is a uniform (single) protective layer (Fig. 2) of minimum thickness of 15 cm [9], most often constructed using 0/31.5 mm crushed aggregate. In order to reduce the final thickness of the layer, it is possible to incorporate a reinforcing geogrid. The single protective layer is a simple structure, which does not generate significant logistic or technological problems. Structures of considerable thickness should be placed in several layers. Depending on the designed layer thickness and availability of equipment, the layer may be installed using typical construction machinery or a subgrade repair train. In the latter case, its thickness should not exceed 40 cm due to technological considerations. If the protective layer is to be placed over fine soils, it is necessary to install a separation geotextile in order to provide mechanical stability at the layers connection.



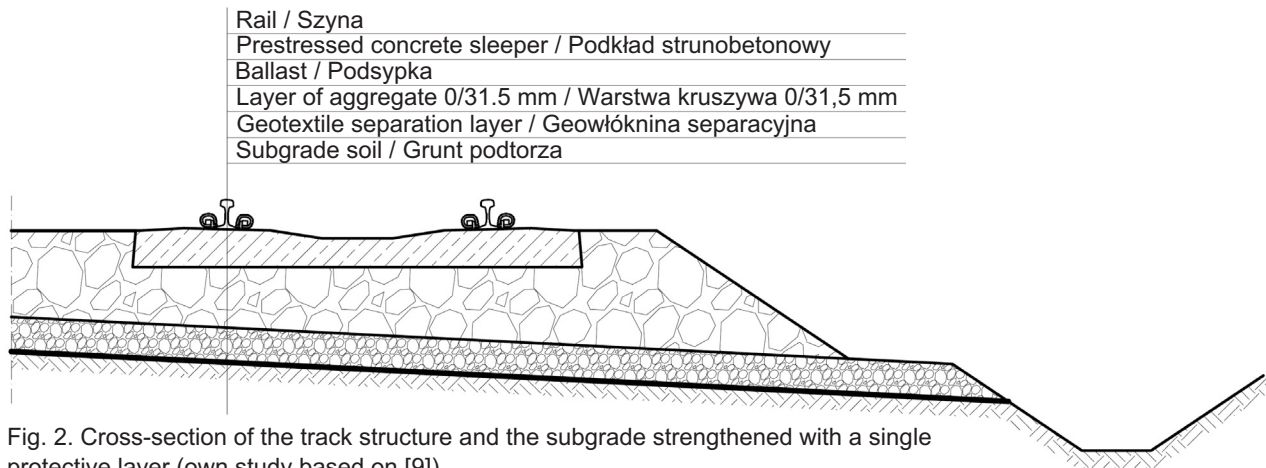


Fig. 2. Cross-section of the track structure and the subgrade strengthened with a single protective layer (own study based on [9])

Rys. 2. Przekrój poprzeczny nawierzchni i podtorza wzmocnionego pojedynczą warstwą ochronną (opracowanie własne na podstawie [9])

### 3. KONSTRUKCJE ZAMIENNE WARSTW OCHRONNYCH

#### 3.1. UWAGI OGÓLNE

Ograniczony zakres przedprojektowych punktowych badań geotechnicznych powoduje, że w czasie budowy wzmocnienia górnej strefy podtorza często dochodzi do rozbieżności między wartościami parametrów geotechnicznych przyjętymi w projekcie a wartościami rzeczywistymi, stwierdzonymi na budowie w badaniach kontrolnych. Wówczas niezbędne jest podjęcie stosownych działań, umożliwiających uzyskanie docelowych wartości parametrów odbiorczych podtorza po modernizacji. Konieczne jest wprowadzenie zmian w konstrukcji zaprojektowanego wzmocnienia i zastosowanie rozwiązania zamiennego. Liczbę niezbędnych interwencji projektowych można ograniczyć poprzez bardziej szczegółowe odwzorowanie rzeczywistego stanu górnej strefy podtorza w przedprojektowych badaniach geotechnicznych. W punktowych badaniach podtorza, niezależnie od ich rozmieszczenia, trudno jest odzwierciedlić rzeczywiste warunki gruntowe. Z tego względu oprócz badań punktowych powinno się stosować ciągłą ocenę zmienności parametrów gruntów podtorza jedną z metod geofizycznych [15, 16]. Należy mieć na uwadze, że model geotechniczny podtorza określony w badaniach – niezależnie od ich dokładności – charakteryzuje się pewnym stopniem niepewności i z tego względu całkowite wyeliminowanie konieczności stosowania konstrukcji zamiennych jest niemożliwe.

Konstrukcję rozwiązania zamiennego należy określić na podstawie zrealizowanych na budowie badań kontrolnych podtorza oraz stwierdzonych w terenie ograniczeń geometrycznych lub technicznych. Decydującym czynnikiem w doborze docelowego rozwiązania są aktualne rzeczywiste wartości

### 3. ALTERNATIVE PROTECTIVE LAYER STRUCTURES

#### 3.1. GENERAL REMARKS

Due to the limited scope of the initial geotechnical tests performed locally, discrepancies between values of the geotechnical parameters adopted in design and values measured in field during construction are often noted. In such cases, it is necessary to introduce adequate measures in order to obtain the target values during acceptance tests after modernization; these measures include changes to the originally designed structural improvement and use of an alternative solution. The quantity of situations in which changes of the design are required may be reduced through more detailed surveys of the actual state of the upper zone of subgrade in the initial tests before design. However, when the tests are performed locally at chosen locations, it is always difficult to determine real geotechnical conditions, regardless of the relative spatial concentration of the test pits. Therefore, it is advisable to use one of the continuous geophysical methods to evaluate the variability of subgrade soil parameters as well [15, 16]. One should bear in mind that the geotechnical model of a subgrade determined in surveys – regardless of their accuracy – will always display a certain level of uncertainty; therefore, complete elimination of the need for alternative structures is impossible.

The alternative solution should be determined based on the control tests performed on site during construction, as well as the observed geometric and technical limitations. The decisive factor in selection of the final structural improvement is the actual current condition of the subgrade. The ultimate choice of the structure is also affected by:

parametrów gruntów podtorza. Na ostateczny wybór typu konstrukcji mają również wpływ: ograniczenia terenowe i infrastrukturalne, dostępność dodatkowych materiałów, posiadany przez wykonawcę sprzęt, niezbędny czas na wdrożenie i realizację przyjętego rozwiązania zamiennego itp.

W analizie wyboru najlepszego rozwiązania konstrukcji zamienniej w warunkach stwierdzonego w badaniach kontrolnych deficytu wartości parametrów gruntów podtorza przyjęto następujące założenia:

- modernizacja dotyczy dwutorowej linii magistralnej i ma na celu zwiększenie wartości parametrów techniczno-eksploatacyjnych, w tym prędkości pociągów do 160 km/h, z możliwością późniejszego jej zwiększenia do 200 km/h;
- niekorzystne warunki gruntowe występują jedynie w górnej strefie podtorza, przy jednoczesnym braku oznak jego niestateczności, która wymagałaby realizacji wzmocnień wgłębnych;
- projektowaną pierwotnie konstrukcję wzmocnienia górnej strefy podtorza przyjęto w postaci pojedynczej warstwy ochronnej z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm (moduł sprężystości 200 MPa), o grubości od 15 cm do 40 cm (z krokiem 5 cm), umożliwiającej uzyskanie na zmodernizowanym podtorzu wtórnego modułu odkształcenia o wartości 120 MPa, pod warunkiem stwierdzenia w badaniach kontrolnych realnych wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza przed wzmocnieniem mieszczących się w zakresie od ok. 35 MPa do ok. 90 MPa;
- grubość konstrukcji zamiennych warstw ochronnych, w zakresie od 15 cm do 60 cm, wyznaczono przy użyciu metody modułu ekwiwalentnego [9], stosując zależność [17]:

$$h = -tg \left[ \frac{\pi}{2} \cdot \left( \frac{E_0}{E_g} \right)^{1,4} \cdot \frac{E_g - E_e}{E_e \cdot \left( \left( \frac{E_0}{E_g} \right)^{1,4} - 1 \right)} \right] \cdot \frac{D}{\left( \frac{E_0}{E_g} \right)^{0,4}}, \quad (1)$$

gdzie:

- $h$  – grubość warstwy [m],
- $E_0$  – moduł odkształcenia materiału warstwy ochronnej [MPa],
- $E_g$  – moduł odkształcenia gruntów podtorza [MPa],
- $E_e$  – wymagany ekwiwalentny moduł odkształcenia podtorza [MPa],
- $D$  – średnica płyty pomiarowej [m];
- zastosowanie zbrojenia warstwy geosiatką umożliwia zredukowanie pierwotnej grubości warstwy ochronnej o 30% [18];

terrain and infrastructural constraints, availability of additional materials, equipment used by the contractor, time required to install the alternative solution etc.

To choose the best alternative structure in the case of insufficient subgrade soil geotechnical parameters the following assumptions were adopted:

- the modernization is performed on a main double-track railroad and its aim is to improve the technical and service parameters, including an increase in train speed to 160 km/h, with a possible future increase to 200 km/h;
- unfavourable soil conditions occur only in the upper zone of the subgrade and there are no signs of a lack of stability, which would require deep strengthening;
- the original design assumed structural improvement of the subgrade's upper zone by incorporating a single protective layer of 0/31.5 mm crushed aggregate (with resilient modulus of 200 MPa), with thickness ranging from 15 cm to 40 cm (designed with discrete intervals of 5 cm), enabling to obtain the secondary deflection modulus value of 120 MPa on the surface of the subgrade after modernization, provided that the actual secondary deflection modulus values measured in the control tests before strengthening ranged from approx. 35 MPa to approx. 90 MPa;
- construction of the protective layer, between 15 and 60 cm, was determined using the equivalent deflection modulus method [9], utilising the following dependency [17]:

$$h = -tg \left[ \frac{\pi}{2} \cdot \left( \frac{E_0}{E_g} \right)^{1,4} \cdot \frac{E_g - E_e}{E_e \cdot \left( \left( \frac{E_0}{E_g} \right)^{1,4} - 1 \right)} \right] \cdot \frac{D}{\left( \frac{E_0}{E_g} \right)^{0,4}}, \quad (1)$$

where:

- $h$  – layer thickness [m],
- $E_0$  – deflection modulus of the protective layer material [MPa],
- $E_g$  – deflection modulus of subgrade soils [MPa],
- $E_e$  – the required equivalent deflection modulus of the subgrade [MPa],
- $D$  – diameter of the loading plate [m];
- use of geogrid reinforcement allows for a reduction of protective layer thickness by 30% [18];
- soil susceptibility to hydraulic stabilization was taken into account [19], with the possibility to make a hydraulic soil composite with the resilient modulus of 250 MPa.

- uwzględniono podatność gruntów podtorza na stabilizację spoiwem hydraulicznym [19], z możliwością uzyskania kompozytu gruntowego o module sprężystości 250 MPa.

W przypadku, gdy w badaniach kontrolnych stwierdza się małe różnice pomiędzy przyjętymi pierwotnie i pomierzonymi wartościami parametrów gruntów podtorza, można podjąć próbę poprawy parametrów poprzez stabilizację mechaniczną gruntu, poprawę jakości robót lub zastosowanie do budowy warstwy materiałów o lepszych parametrach. Jeżeli rozbieżności pomiędzy przyjętymi w projekcie a rzeczywistymi wartościami parametrów gruntów podtorza są znaczne, należy zastosować jedno z alternatywnych rozwiązań zamiennych konstrukcji warstwy ochronnej [20]. Powszechnie stosowanymi konstrukcjami zamiennymi warstwy ochronnej są: warstwa o zwiększonej grubości, warstwa zbrojona geosiatką oraz warstwa gruntu podtorza stabilizowanego spoiwem hydraulicznym. Przy wyborze konstrukcji równoważnej należy wziąć pod uwagę ilość potrzebnego materiału, dostępność niezbędnego sprzętu oraz czas realizacji.

W dotychczasowych rozważaniach dotyczących konstrukcji zamiennych warstw ochronnych podtorza [21] ustalono zapotrzebowanie na materiały konstrukcyjne, wymagane objętości robót i jednostkowe koszty ich realizacji. Na tej podstawie określono efektywność oraz zalecane warunki stosowania różnych typów konstrukcji zamiennych. Wykazano, że najmniej efektywną konstrukcją – ze względu na problemy technologiczne i znaczny koszt realizacji – jest warstwa podwójna. W sprzyjających warunkach gruntowych zalecanym typem wzmocnienia podtorza jest pojedyncza warstwa ochronna, opcjonalnie również zbrojona geosiatką. W niesprzyjających warunkach gruntowych optymalnym rozwiązaniem jest wstępne ulepszenie gruntów podtorza poprzez ich stabilizację spoiwami hydraulicznymi i zastosowanie warstwy ochronnej z kruszywa o minimalnej grubości.

### **3.2. KONSTRUKCJA ZAMIENNA 1: WARSTWA O ZWIĘKSZONEJ GRUBOŚCI**

Zwiększenie pierwotnej grubości warstwy ochronnej jest prostym w realizacji zabiegiem, stosowanym w przypadku stwierdzenia rozbieżności pomiędzy projektowymi i rzeczywistymi wartościami parametrów gruntów podtorza. To rozwiązanie wykorzystuje się głównie na krótkich odcinkach, używając dostępnego na budowie sprzętu i dotychczas używanego materiału konstrukcyjnego. Jednakże, ze względu na występujące ograniczenia terenowe lub infrastrukturalne (np. potrzebę zachowania położenia wysokościowego ciągów odwodnieniowych, kolizje z istniejącymi fundamentami), znaczne zwiększenie grubości warstwy nie zawsze jest możliwe. W przypadku zastosowania pociągu do napraw podtorza

If the control tests performed during the construction indicate only slight differences between the originally adopted values and real values of the subgrade parameters, one may attempt to improve the parameters through mechanical soil stabilization, improvement of work quality or use of protective layer materials with better parameters. However, when the discrepancies between the originally adopted values and values of the subgrade parameters are significant, the alternative protective layer solutions should be used [20]. The most popular alternative solutions include: a single layer of increased thickness, a single geogrid-reinforced layer, and a double-layer structure with the bottom layer consisting of hydraulically-stabilized soil. When choosing the equivalent structure, one should take into account the quantity of material needed, availability of equipment and required construction time.

Analyses of the alternative protective layer structures performed so far [21] resulted in determination of their demand for materials, required volumes of earthworks and unit costs. Based on the obtained data, the effectiveness and recommended conditions of use were identified for various types of alternative structures. It was shown that the double-layer structure is the least effective – due to technological problems and significant costs. Under favourable geotechnical conditions, the recommended type of the subgrade structural improvement is a single protective layer, optionally with the geogrid reinforcement. When geotechnical conditions are unfavourable, the optimum solution consists of an initial improvement of the subgrade by hydraulic soil stabilization and then placement of an aggregate protective layer of minimum possible thickness over the stabilized soil.

### **3.2. ALTERNATIVE SOLUTION 1: LAYER OF INCREASED THICKNESS**

An increase of the original thickness of the designed protective layer is a simple measure, used when differences occur between the designed and actual subgrade soil parameters. This solution is typically introduced on short sections, using available equipment and the same material as in the design. However, considerable increase in the thickness of the layer is not always possible, due to terrain and infrastructural constraints (e.g. the need to maintain the existing elevation of drainage courses or to avoid a conflict with existing foundations). When a subgrade repair train is used, the target thickness of the layer should not exceed 40 cm. One should bear in mind that the use of thick protective layers on longer sections may contribute to a significant increase in earthworks and the demand for aggregate. If the original design of the protective layer

docelowa grubość wzmocnienia nie powinna przekraczać 40 cm. Należy mieć na uwadze, że stosowanie na dłuższych odcinkach konstrukcji o większej grubości może przyczyniać się do istotnego zwiększenia objętości robót ziemnych i wielokrotnienia zapotrzebowania na kruszywo do budowy warstwy. Jeżeli w pierwotnej wersji wzmocnienia przewidziano użycie geowłókniny separacyjnej celem zachowania stabilności mechanicznej na styku warstw, to w rozwiązaniu zamiennym powinna ona również być zastosowana.

W analizie wpływu zmiany grubości warstwy na wymagane wartości wtórnych modułów odkształcenia podtorza przyjęto przyrosty grubości o 5 cm, 10 cm, 15 cm lub 20 cm. Wyznaczono wymagane realne wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza przed wzmocnieniem, pozwalające na doprowadzenie modułu do docelowych wartości za pomocą danej grubości wzmocnienia. Wyznaczono również krotność stwierdzonego w ten sposób dopuszczalnego ich zmniejszenia przed wzmocnieniem w stosunku do ich wartości projektowych. Wyniki obliczeń zestawiono w Tabl. 1.

Table 1. The effect of increasing the thickness of the protective layer and the geogrid incorporation on the required values of the subgrade's secondary deflection modulus measured before structural improvement  
Tablica 1. Wpływ zwiększenia grubości warstwy ochronnej i zastosowania geosiatki na wymagane wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza pomierzone przed wzmocnieniem

Original layer thickness Pierwotna grubość warstwy [cm]	The required value of the subgrade's secondary deflection modulus before the structural improvement [MPa] Wymagana wartość wtórnego modułu odkształcenia gruntów podtorza przed wzmocnieniem						Multiples by which the actual values of the subgrade's secondary deflection modulus can decrease (relative to the design values) before the given structural improvement [-] Krotność dopuszczalnego zmniejszenia wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza przed wzmocnieniem w stosunku do wartości projektowych				
	Change in layer thickness [cm] Zmiana grubości warstwy					+ grid + siatka	Change in layer thickness [cm] Zmiana grubości warstwy				+ grid + siatka
	+0	+5	+10	+15	+20		+5	+10	+15	+20	
15	88.5	76.0	63.9	52.9	43.5	72.5	1.16	1.38	1.67	2.03	1.22
20	76.0	63.9	52.9	43.6	35.9	55.9	1.19	1.44	1.74	2.12	1.36
25	63.9	52.9	43.6	35.9	29.8	42.4	1.21	1.47	1.78	2.14	1.51
30	52.9	43.6	35.9	29.8	25.0	32.3	1.21	1.47	1.78	2.12	1.64
35	43.6	35.9	29.8	25.0	21.1	25.0	1.21	1.46	1.75	2.06	1.75
40	35.9	29.8	25.0	21.1	18.1	19.7	1.21	1.44	1.70	1.99	1.82

Na podstawie analizy uzyskanych wyników można stwierdzić, że zwiększenie grubości konstrukcji zamiennnej powoduje zmniejszenie wymaganych rzeczywistych wartości wtórnych modułów odkształcenia podtorza pod warstwą. W zależności od zmiany grubości warstwy, spodziewany efekt wzmocnienia podtorza można osiągnąć, gdy wtórne moduły odkształcenia gruntów podtorza określone w badaniach kontrolnych są 1,16- do 2,14-krotnie mniejsze od ich wartości projektowych. Największy wpływ zwiększenia grubości konstrukcji zauważa się dla konstrukcji o pierwotnie projektowanych grubościach 25 cm i 30 cm.

included the separation geotextile on the contact with the soil located below, the alternative solution should also incorporate such geotextile.

In the analysis focused on the influence of changes in protective layer thickness on the acceptable values of the subgrade's secondary deflection modulus, the following thickness increments were adopted: 5 cm, 10 cm, 15 cm and 20 cm. The analysis consisted of determination of the required values of the subgrade's secondary deflection modulus observed in static plate load tests before the structural improvement that would still enable one to obtain the target modulus values after structural improvement of the given thickness. Multiples by which the actual values of the subgrade soil secondary deflection modulus can decrease (relative to the design values) before the given structural improvement also were determined. The results are presented in Table 1.

An analysis of the obtained results indicates that an increase in the thickness of the alternative structure results in a decrease in the required secondary deflection modulus of the subgrade under a given protective layer. Depending on the layer's thickness, the expected effect of the structural improvement may be achieved even for actual secondary deflection moduli of the subgrade lower than the design values by a factor of 1.16 to 2.14. The greatest influence of the increase in structure thickness is visible for structures with originally designed thickness of 25 cm and 30 cm.



### 3.3. KONSTRUKCJA ZAMIENNA 2: WARSTWA ZBROJONA GEOSIATKĄ

Kolejnym rozwiązaniem zamiennym, stosowanym przy stwierdzonym deficycie wartości parametrów gruntów w badaniach kontrolnych, jest zastosowanie dodatkowego zbrojenia geosiatką (Rys. 3). Wdrożenie takiego rozwiązania jest możliwe pod warunkiem, że geosiatka nie była elementem pierwotnej wersji wzmocnienia. Do zbrojenia warstw ochronnych stosuje się geosiatki o szerokości około 4 m, spełniające zdefiniowane w przepisach [9] wymagania. Siatki rozkłada się w strefie oddziaływań przekazywanych z nawierzchni na podtorze. Zastosowanie geosiatki nie wymaga użycia dodatkowego sprzętu, nie zwiększa objętości robót ziemnych i zapotrzebowania na główny materiał konstrukcyjny warstwy. Warstwa ochronna o grubości do 40 cm z geosiatką może być wbudowana pociągiem do napraw podtorza. Dodatkowymi kosztami realizacji tego typu konstrukcji zamiennej są koszty zakupu geosiatki i jej rozłożenia na gruntach podtorza. Jeżeli w pierwotnej konstrukcji zastosowana była geowłóknina separacyjna, to w rozwiązaniu zamiennym powinna ona również występować.

### 3.3. ALTERNATIVE SOLUTION 2: GEOGRID-REINFORCED LAYER

Another alternative solution used in the case of the insufficient subgrade soil parameters consists of reinforcement of the protective layer with a geogrid (Fig. 3). Introduction of this solution as an alternative structure is possible provided that the original design does not already include a geogrid reinforcement. The protective layers are reinforced with strips of the geogrid of about 4 m wide, meeting the requirements defined in the regulations [9]. The geogrids are located in the subgrade's zone subjected to loads transferred from the track. Use of the geogrid does not require additional equipment, does not increase the volume of earthworks or increase the demand for the primary material used in the layer. The geogrid-reinforced protective layer with thickness of up to 40 cm may be constructed using a subgrade repair train. Additional costs associated with this type of alternative structure are limited to the cost of the geogrid and its placement. If the original design includes a separation geotextile, the alternative solution should incorporate such geotextile as well.

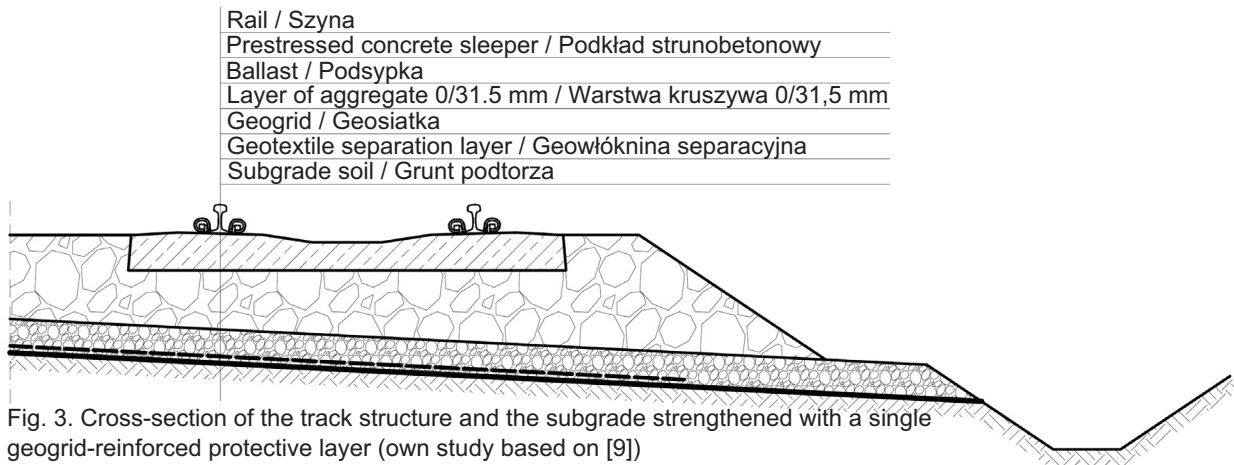


Fig. 3. Cross-section of the track structure and the subgrade strengthened with a single geogrid-reinforced protective layer (own study based on [9])

Rys. 3. Przekrój poprzeczny nawierzchni i podtorza wzmocnionego pojedynczą warstwą ochronną zbrojoną geosiatką (opracowanie własne na podstawie [9])

W tej części analizy również wyznaczono wymagane realne wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza przed wzmocnieniem, pozwalające na doprowadzenie modułu do docelowych wartości za pomocą danego rozwiązania wzmocnienia; wyznaczono też krotność stwierdzonego w ten sposób dopuszczalnego ich zmniejszenia przed wzmocnieniem w stosunku do ich wartości projektowych. Wyniki obliczeń poświęconych zastosowaniu geosiatki przedstawiono także w Tabl. 1, w kolumnach oznaczonych „+ siatka”.

Zbrojenie warstwy ochronnej geosiatką pozwala na uzyskanie spodziewanego efektu wzmocnienia podtorza w przypadkach, gdy określone na budowie rzeczywiste wartości wtórnego

In this part of the analysis, the required values of the subgrade's secondary deflection modulus noted before the structural improvement that would still enable to obtain the target modulus values after the given structural improvement were determined as well. Multiples (relative to the design values) by which the actual values of the subgrade soil secondary deflection modulus can decrease were also determined. The results of the calculations focused on the geogrid reinforcement are shown in Table 1 in the column labeled “+ geogrid”.

The expected effect of the structural improvement using the geogrid-reinforced protective layer may be achieved

modułu odkształcenia gruntów podtorza są około 1,2- do 1,8-krotnie mniejsze od ich wartości projektowych. Im większa pierwotna grubość warstwy, tym większy jest wpływ zastosowania geosiatki na efekt zwiększenia nośności warstwy.

### 3.4. KONSTRUKCJA ZAMIENNA 3: Z WARSTWĄ STABILIZOWANYCH GRUNTÓW PODTORZA

Rozwiązaniem zamiennym powszechnie stosowanym w celu zwiększenia wartości modułów odkształcenia gruntów podtorza jest konstrukcja składająca się z dwóch warstw: górnej (z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0-31,5 mm) oraz dolnej, powstałej w wyniku stabilizacji gruntów podtorza spoiwem hydraulicznym (Rys. 4). Rodzaj i ilość spoiwa dobiera się w zależności od właściwości gruntów podtorza [19, 22, 23].

for actual secondary deflection moduli of the subgrade lower than the design values by a factor of 1.2 to 1.8. The greater the original thickness of the layer is the greater becomes the influence of the geogrid reinforcement on the increase in bearing capacity.

### 3.4. ALTERNATIVE SOLUTION 3: STRUCTURE WITH HYDRAULICALLY-STABILIZED SOIL

A popular alternative solution used to increase the deflection moduli of the subgrade is an installation of a structure incorporating two layers: upper (crushed aggregate, particle size of 0-31.5 mm) and bottom (created through stabilization of subgrade soils with hydraulic binders), as shown in Fig. 4. The type and quantity of hydraulic binder is selected adequately to the type of subgrade soils [19, 22, 23].

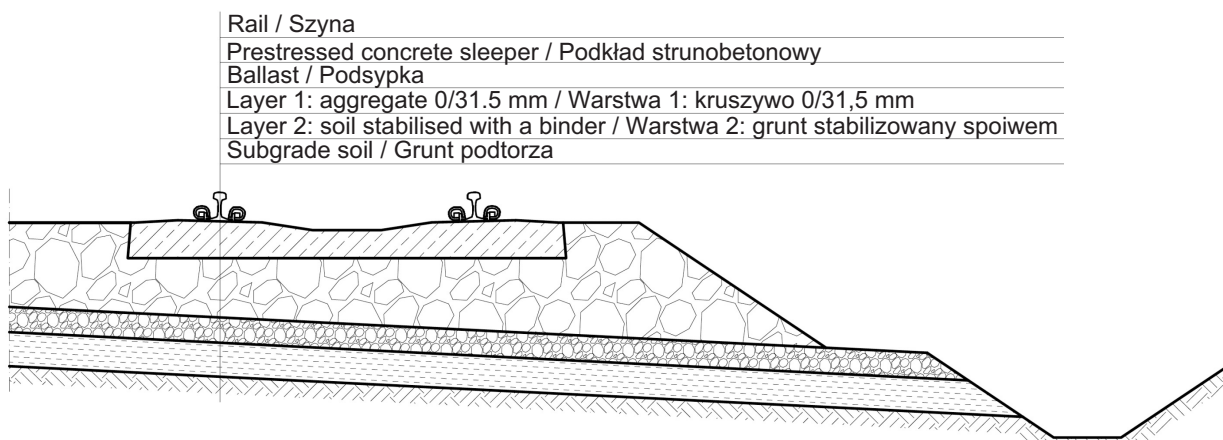


Fig. 4. Cross-section of the track structure and the subgrade strengthened with a structure consisting of a layer of crushed aggregate and a layer of subgrade soil stabilized with a hydraulic binder (own study based on [9])  
Rys. 4. Przekrój poprzeczny nawierzchni i podtorza wzmocnionego konstrukcją składającą się z warstwy kruszywa łamanego oraz warstwy gruntów podtorza stabilizowanych spoiwem hydraulicznym (opracowanie własne na podstawie [9])

W projektowaniu tej konstrukcji najczęściej zakłada się stałą grubość górnej warstwy (15 cm lub 20 cm), zaś w zależności od właściwości gruntów podtorza dobiera się grubość oraz wymagane cechy dolnej warstwy. Ponieważ ulepszone podtorze jest częścią konstrukcji wzmacniającej, możliwe jest zredukowanie objętości robót ziemnych oraz zmniejszenie zapotrzebowania na kruszywo. W tym przypadku badania parametrów gruntów podtorza wykonywane są na poziomie posadowienia projektowanej warstwy ochronnej, w przekopach kontrolnych, przed przystąpieniem do zasadniczych robót ziemnych. Jeżeli badania kontrolne wykonywane są po zrealizowaniu robót ziemnych i osiągnięciu poziomu posadowienia zaprojektowanej warstwy ochronnej, to stabilizacja gruntów spoiwem hydraulicznym nie ma już wpływu na redukcję objętości robót ziemnych i jest zabiegiem zwiększającym łączną grubość konstrukcji wzmocnienia podtorza. Budowa wzmocnienia jest zrealizowana w dwóch etapach. Początkowo wykonuje się

When such structure is designed, most often a fixed thickness of the upper layer is adopted (15 cm or 20 cm); it is the lower layer whose required properties and thickness are adjusted to the properties of the subgrade soil. Since the improved subgrade soil becomes a part of the strengthening structure, it is possible to reduce earthworks and demand for the aggregate. In this case the control tests of the subgrade soil parameters are performed at the depth of the originally designed bottom of the protective layer, using local test pits dug before the start of the main earthworks. If the control tests are performed after the earthworks have already been finished and the designed level of the bottom of protective layer has been excavated, then hydraulic stabilization of the subgrade will not reduce the volume of earthworks; it will only increase the total thickness of structural improvement in order to provide greater bearing capacity. This type of strengthening structure is constructed in two

stabilizację gruntów podtorza z wykorzystaniem specjalistycznego sprzętu, a następnie układa się warstwę kruszywa w standardowy sposób. W przypadku budowy warstw ochronnych pociągiem do napraw podtorza, stabilizacja gruntów podtorza spoiwem hydraulicznym musi być wykonana przed przystąpieniem do realizacji zasadniczych robót ziemnych – jako roboty wyprzedzające. Dodatek spoiwa hydraulicznego uszczelnia górną strefę podtorza i dzięki temu nie jest wymagana geowłóknina separacyjna na styku warstwy gruntu stabilizowanego i warstwy kruszywa. Spodziewany efekt stabilizacji może być zaobserwowany dopiero po pewnym czasie od momentu zastosowania spoiwa hydraulicznego.

W analizie wpływu stabilizacji spoiwem hydraulicznym na wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza rozważano następujące rozwiązania: zachowanie pierwotnej grubości warstwy ochronnej z kruszywa i uzupełnienie konstrukcji wzmocnienia o warstwę stabilizowanych gruntów podtorza (konstrukcja zamienna 3A) oraz zastosowanie konstrukcji składającej się z warstwy kruszywa łamanego o grubości 15 cm lub 20 cm i warstwy gruntu stabilizowanego spoiwem hydraulicznym o grubości stosownie dobranej do rzeczywistych warunków gruntowych (konstrukcja zamienna 3B). Przyjęto różne głębokości stabilizacji gruntu (w zakresie od 15 cm do 40 cm, z krokiem 5 cm), tak by łączna grubość konstrukcji wzmocnienia nie przekraczała 60 cm. Dla obu rozważanych rozwiązań zamiennych (3A i 3B) wyznaczono wymagane realne wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza przed wzmocnieniem, pozwalające na doprowadzenie modułu do docelowych wartości za pomocą danego rozwiązania wzmocnienia; wyznaczono też wynikającą z tego krotność dopuszczalnego zmniejszenia ich wartości w stosunku do ich wartości projektowych. Wyniki obliczeń dla obu rozpatrywanych przypadków zestawiono w Tabl. 2 i 3.

stages. First, the subgrade soils are subjected to a hydraulic stabilization using specialized equipment; subsequently, a layer of aggregate is placed over stabilized soil in a standard manner. If the protective layers are to be constructed using a subgrade repair train, the hydraulic stabilization of the subgrade must be performed beforehand, as preliminary works. Addition of a hydraulic binder hardens the upper zone of the subgrade, providing the geotextile separation between soil and aggregate unnecessary. The expected effect of the stabilization may be observed only after a certain time has passed since a hydraulic binder is used.

The analyses of the influence of the hydraulic stabilization on the secondary deflection moduli encompassed two solutions. The first solution retains the originally designed thickness of the aggregate protective layer and addition of the necessary thickness of stabilized soil (alternative structure 3A). The second solution consisted in adopting a set reduced thickness of the crushed aggregate protective layer (15 cm or 20 cm) and requires an addition of the stabilized soil with necessary thickness to achieve the target moduli for the observed conditions (alternative structure 3B). Various hydraulic stabilization depths were adopted (ranging from 15 cm to 40 cm, at the intervals of 5 cm); the total thickness of the stabilized soil and aggregate layer did not exceed 60 cm. For both alternative solutions with hydraulically-stabilized soil (3A and 3B), the required values of the subgrade's secondary deflection modulus before the structural improvement (that would still enable one to obtain the target modulus values after the given structural improvement) were determined. Multiples by which the actual values of the subgrade soil's secondary deflection modulus can decrease (relative to the design values) were also calculated. Results obtained for the both analyzed cases are presented in Tables 2 and 3.

Table 2. The effect of the subgrade soil stabilization with a hydraulic binder (while maintaining the original thickness of the protective layer – structure 3A) on the required values of the subgrade's secondary deflection modulus measured before the structural improvement  
Tablica 2. Wpływ stabilizacji gruntów podtorza spoiwem hydraulicznym (przy zachowaniu pierwotnej grubości warstwy ochronnej – konstrukcja 3A) na wymagane wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza pomierzone przed wzmocnieniem

Original layer thickness Pierwotna grubość warstwy [cm]	The required real value of the subgrade soil secondary deflection modulus before the structural improvement [MPa] Wymagana wartość wtórnego modułu odkształcenia gruntów podtorza przed wzmocnieniem								Multiples by which the actual values of the subgrade soil secondary deflection modulus can decrease (relative to the design values) before the given structural improvement [-] Krotność dopuszczalnego zmniejszenia wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza przed wzmocnieniem w stosunku do wartości projektowych					
	Depth of stabilization / Głębokość stabilizacji [cm]													
	0	15	20	25	30	35	40	15	20	25	30	35	40	
15	88.5	50.2	38.8	29.9	23.2	18.4	14.8	1.76	2.28	2.96	3.81	4.82	5.96	
20	76.0	40.1	30.2	22.8	17.6	13.8	11.2	1.90	2.52	3.33	4.33	5.50	6.82	
25	63.9	30.9	22.7	16.9	12.9	10.1	–	2.07	2.81	3.79	4.97	6.33	–	
30	52.9	23.3	16.7	12.2	9.3	–	–	2.27	3.17	4.34	5.72	–	–	
35	43.6	17.4	12.1	8.8	–	–	–	2.51	3.59	4.96	–	–	–	
40	35.9	12.9	8.8	–	–	–	–	2.78	4.06	–	–	–	–	

Table 3. The effect of the subgrade soil stabilisation with a hydraulic binder (when using an upper aggregate layer of constant thickness of 15 cm or 20 cm – structure 3B) on the required values of subgrade soil secondary deflection modulus measured before the structural improvement

Tablica 3. Wpływ stabilizacji gruntów podtorza spoiwem hydraulicznym (przy zastosowaniu górnej warstwy kruszywa o stałej grubości 15 cm lub 20 cm – konstrukcja 3B) na wymagane wartości wtórnych modułów odkształcenia podtorza pomierzone przed wzmocnieniem

Original layer thickness Pierwotna grubość warstwy [cm]	Multiples by which the actual values of the subgrade soil secondary deflection modulus can decrease (relative to the design values) before the given structural improvement [–] Krotność dopuszczalnego zmniejszenia wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza przed wzmocnieniem w stosunku do wartości projektowych											
	15-cm-thick aggregate layer / Warstwa kruszywa o grubości 15 cm						20-cm-thick aggregate layer / Warstwa kruszywa o grubości 20 cm					
	15	20	25	30	35	40	15	20	25	30	35	40
15	1.76	2.28	2.96	3.80	4.81	5.94	2.21	2.93	3.88	5.04	6.40	7.94
20	1.51	1.95	2.54	3.26	4.13	5.10	1.90	2.52	3.33	4.33	5.50	6.82
25	1.27	1.64	2.14	2.74	3.47	4.29	1.60	2.12	2.80	3.64	4.62	5.73
30	1.05	1.36	1.77	2.27	2.88	3.55	1.32	1.75	2.32	3.01	3.83	4.75
35	0.87	1.12	1.46	1.87	2.37	2.93	1.09	1.44	1.91	2.48	3.15	3.91
40	0.71	0.92	1.20	1.54	1.95	2.41	0.90	1.19	1.57	2.05	2.60	3.22

Na podstawie analizy uzyskanych wyników można stwierdzić, że wraz ze zwiększaniem łącznej grubości konstrukcji zamienniej zmniejszają się wymagane rzeczywiste wartości wtórnych modułów odkształcenia podtorza pod warstwą stwierdzone przed wzmocnieniem. W przypadku zachowania pierwotnej grubości warstwy ochronnej z kruszywa i zastosowania dodatkowej warstwy gruntu stabilizowanego (konstrukcja 3A) można uzyskać wymagane wartości parametrów odbiorczych nawet, gdy stwierdzone w badaniach kontrolnych rzeczywiste wtórne moduły odkształcenia gruntów podtorza są 1,76- do 6,82-krotnie mniejsze od wartości projektowych. W razie stwierdzenia w badaniach kontrolnych wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza mniejszych od założonych w projekcie, zastąpienie projektowej konstrukcji wzmocnienia zespołem warstw, składającym się z warstwy kruszywa o ustalonej grubości (15 cm lub 20 cm) i warstwy gruntu stabilizowanego spoiwem hydraulicznym o stosownie dobranej grubości (konstrukcja 3B), umożliwia uzyskanie wymaganych wartości parametrów odbiorczych podtorza pod warunkiem, że łączna grubość konstrukcji zamienniej będzie nie mniejsza od pierwotnie zaprojektowanej grubości konstrukcji wzmocnienia. W Tabl. 3 oznaczono kolorem szarym te z rozważanych rozwiązań, których użycie jako konstrukcji zamienniej nie przynosi spodziewanego efektu. W przypadku zastosowania konstrukcji 3B (o łącznej grubości nie mniejszej niż grubość pierwotnie zaprojektowanej konstrukcji wzmocnienia) realne wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza przed wzmocnieniem mogą być 1,05- do 7,94-krotnie mniejsze od ich wartości projektowych, w zależności od przyjętej grubości warstwy kruszywa i głębokości stabilizacji gruntów podtorza spoiwem hydraulicznym.

The obtained results indicate that the minimum acceptable values of the secondary deflection moduli measured before strengthening decrease as the total thickness of the alternative structural improvement increases. If the original design thickness of the aggregate protective layer is retained and the stabilized soil layer is added (solution 3A), one may obtain the required secondary deflection moduli in the acceptance tests even when the actual secondary deflection moduli of the subgrade before strengthening are lower than the design values by a factor of 1.76 to 6.82. When the solution requires a replacement of the designed strengthening with a two-layer structure consisting of a layer of aggregate of a fixed thickness (15 cm or 20 cm) and a hydraulically-stabilized soil layer of adequately adjusted thickness (solution 3B), the target acceptance parameters may be obtained under a condition that the total thickness of the alternative strengthening structure will not be less than the thickness of the originally designed strengthening. The analyzed solutions that did not provide such expected effect were shown in gray in Table 3. In the case of the alternative structure 3B (with the total thickness equal to or greater than the originally designed strengthening thickness) the values of the subgrade's secondary deflection moduli before construction may be lower by a factor of 1.05 to 7.94 than the design values, depending on the adopted thickness of the aggregate layer and the depth of the subgrade soil stabilization.

### 3.5. FEASIBILITY OF ALTERNATIVE SOLUTIONS

The proposed alternative structures may be used for the improvement of railroad subgrade parameters if differences are noted between the actual and designed values or



### 3.5. PRZYDATNOŚĆ KONSTRUKCJI ZAMIENNYCH

Zaproponowane w pracy konstrukcje zamienne można wykorzystać do poprawy parametrów podtorza w przypadku, gdy wykazano różnicę pomiędzy wartościami pomierzonymi i projektowanymi oraz w przypadku braku wystarczającej liczby danych pomiarowych. Należy mieć na uwadze uwarunkowania występujące przy ich wdrażaniu, takie jak: łatwość wykonania, możliwość budowy pociągiem do napraw podtorza, czas niezbędny do osiągnięcia zakładanego efektu, zapotrzebowanie na dodatkowy sprzęt i materiały, wpływ na docelową objętość robót ziemnych, czy konieczność realizacji z użyciem dodatkowych procesów budowlanych. Porównanie uwarunkowań występujących przy zastosowaniu omawianych konstrukcji zamiennych zawarto w Tabl. 4.

if the quantity of the test data is insufficient. When introducing an alternative solution, one should take into consideration its characteristic conditions, including: simplicity of construction, possibility of using a subgrade repair train, time required until the expected effect is obtained, demand for additional equipment and materials, influence on the final volume of the earthworks, need to introduce additional construction processes etc. A comparison of such considerations pertaining to the analyzed alternative structures is shown in Table 4.

Table 4. Comparison of conditions allowing the use of the alternative structures

Tablica 4. Porównanie uwarunkowań zastosowania konstrukcji zamiennych

Conditions Uwarunkowanie	Alternative structure in the form of a layer... Konstrukcja zamienna w postaci warstwy...			
	with increased thickness o zwiększonej grubości	reinforced with geogrid zbrojonej geosiatką	with a lower layer of stabilized soil and an upper layer with...	
			original thickness pierwotnej	alternative thickness zamiennej
	(1)	(2)	(3A)	(3B)
Multiples by which the values of the subgrade secondary deflection modulus can be decreased (relatively to the designed values) before the subgrade's strengthening [-] Krotność dopuszczalnego zmniejszenia wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza przed wzmocnieniem w stosunku do wartości projektowych	1.16-2.14	1.20-1.80	1.76-6.82	1.05-7.94
Ease of construction / Prostota wykonania	yes / tak	yes / tak	no / nie	no / nie
Possibility of construction using a subgrade repair train Możliwość budowy pociągiem do napraw podtorza	yes, up to 40 cm tak, do 40 cm	yes, up to 40 cm tak, do 40 cm	no / nie	no / nie
Immediate effect of construction / Natychmiastowy efekt wdrożenia	yes / tak	yes / tak	no / nie	no / nie
Increased volume of earthworks Konieczność zwiększenia objętości robót ziemnych	yes / tak	no / nie	no / nie	no / nie
Required soil susceptibility to hydraulic binder stabilization Wymagana podatność gruntów na ich stabilizację spoiwem hydraulicznym	no / nie	no / nie	yes / tak	yes / tak
Additional specialized equipment Konieczność wykorzystania dodatkowego specjalistycznego sprzętu	no / nie	no / nie	yes / tak	yes / tak
Possibility to reduce the volume of earthworks Możliwość zredukowania objętości robót ziemnych	no / nie	no / nie	no / nie	yes / tak
Required construction in two stages Potrzeba realizacji w dwóch etapach	no / nie	no / nie	yes / tak	yes / tak
Increased volume of aggregate Zapotrzebowanie na dodatkową objętość kruszywa	yes / tak	no / nie	no / nie	no / nie
Additional materials to be used Wskazane użycie dodatkowych materiałów	no / nie	yes / tak	yes / tak	yes / tak
Geotextile separation in the structure Potrzeba użycia w konstrukcji geowłókniny separacyjnej	yes / tak	yes / tak	no / nie	no / nie

Rzeczywiste wartości parametrów gruntów podtorza (lub brak wystarczającej liczby ich oznaczeń) są najczęściej decydującymi czynnikami przy wyborze rozwiązania zamiennego. W przypadku wystąpienia małych różnic pomiędzy pomierzonymi i projektowymi wartościami wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza można zastosować konstrukcje proste w realizacji, charakteryzujące się natychmiastowym efektem wdrożenia, niewymagające zastosowania dodatkowego sprzętu, wykazujące ograniczone zapotrzebowanie na pozaplanowy materiał konstrukcyjny. Takimi rozwiązaniami są: warstwa o zwiększonej grubości (konstrukcja 1) oraz z warstwa zbrojona geosiatką (konstrukcja 2). Dodatkowy koszt wdrożenia tych rozwiązań wynika głównie z konieczności realizacji ponadplanowych robót ziemnych i zapotrzebowania na uzupełniające materiały.

Przy znacznych różnicach pomiędzy pomierzonymi a projektowymi wartościami parametrów gruntów podtorza, konieczne jest użycie rozwiązań charakteryzujących się większą skutecznością. Należą do nich konstrukcje zamienne o znacznych grubościach (konstrukcje 1 i 2) oraz konstrukcje z warstwą gruntów podtorza stabilizowanych spoiwem hydraulicznym (konstrukcje 3A i 3B). Wykonanie wzmocnień o dużej grubości wiąże się jednak ze sporym zapotrzebowaniem na dodatkowe ilości materiału i z koniecznością realizacji robót ziemnych o znacznych objętościach. Podstawowy czas budowy warstw ochronnych może ulec wydłużeniu, np. ze względu na potrzebę realizacji wzmocnienia w kilku warstwach. Ponadto mogą wystąpić problemy projektowe wynikające z konieczności zachowania niezbędnej wysokości ciągów odwodnieniowych. W przypadku gruntów podtorza podatnych na stabilizację spoiwami hydraulicznymi [19] i przy znacznych różnicach pomiędzy pomierzonymi i projektowymi wartościami parametrów gruntów podtorza można również zastosować konstrukcje 3A i 3B, z dolną warstwą z gruntu stabilizowanego. Do ich wykonania konieczne jest jednak użycie ponadplanowego materiału, wykorzystanie specjalistycznego sprzętu, a ich realizacja wymusza przeprowadzenie dodatkowych procesów budowlanych i musi być wykonana w dwóch etapach. Nie ma możliwości ich budowy jedynie przy użyciu pociągu do napraw podtorza. Do wykonania tych wzmocnień niewymagane są ponadplanowe objętości głównego materiału konstrukcyjnego. Jest to bardzo korzystne z uwagi na możliwe problemy z pozyskaniem dodatkowych ilości wyselekcjonowanych kruszyw lub gruntów, wynikające z równoległego prowadzenia wielu inwestycji drogowych i kolejowych. Spodziewany efekt poprawy właściwości gruntów podtorza może być uzyskany dopiero po pewnym czasie od zastosowania spoiwa hydraulicznego. W przypadku użycia konstrukcji zamiennej z górną warstwą z kruszywa łamanego o pierwotnej grubości (konstrukcja 3A), objętość robót i zapotrzebowanie na podstawowy

The values of subgrade parameters (or insufficient quantity of data) are usually the decisive factor prompting a selection of an alternative solution. When the differences between the measured and the designed values of the subgrade's secondary deflection modulus are small, it is possible to use easy to construct structures, which instantly provide the expected effect, do not require additional equipment and have limited demand for additional material. Such solutions include: increasing of the layer's thickness (structure 1) and reinforcing the layer with geogrid (structure 2). The extra cost of their incorporation is primarily associated with the need for previously unplanned earthworks and additional materials.

If the differences between the measured and the designed values of the subgrade's secondary deflection modulus are significant, it is necessary to introduce more effective solutions, such as alternative structures of considerable thickness (solutions 1 and 2) or structures that include a layer of hydraulically-stabilized soil (solutions 3A and 3B). Construction of thick strengthening structures is associated with a high demand for additional materials and greater volumes of earthworks. The basic construction time may be extended due to such factors as the need to lay out the material in several layers. Moreover, design problems may arise from the necessity to maintain the existing elevations of drainage courses. If the differences between the designed and the measured subgrade soil parameters are considerable and the subgrade soils are susceptible to hydraulic stabilization [19], it is possible to use structures 3A and 3B, with the bottom layer of hydraulically-stabilized soil. However, their construction requires extra material (unplanned in the original design) and specialized equipment, additional construction processes and two-stage installation. It is impossible to construct such structures using only a subgrade repair train. Such strengthening does not require additional quantities of the primary protective layer material, which is very advantageous due to the possible problems with acquiring greater quantities of material with the required characteristics when multiple road and rail projects are in progress. The expected improvement of subgrade properties may be observed only after a certain time has passed since the hydraulic binder was used. If the alternative solution with the originally designed thickness of the upper crushed aggregate layer is used (structure 3A), the volume of earthworks and the demand for the primary designed material remain unchanged. The extra cost of this alternative solution is mainly associated with the need to use material that was not planned in the original design (hydraulic binder) and with additional construction processes.

materiał konstrukcyjny tej warstwy nie ulegają zmianie. Dodatkowy koszt wdrożenia tego rozwiązania zamiennego wynika głównie z konieczności użycia pozaplanowego materiału (spoiwa hydraulicznego) oraz potrzeby przeprowadzenia nadprogramowych procesów budowlanych. Zastosowanie rozwiązania zamiennego z grubością górnej warstwy kruszywa zmniejszoną w stosunku do pierwotnej (konstrukcja 3B) może znacząco zredukować zapotrzebowanie na podstawowy materiał konstrukcyjny oraz objętość niezbędnych do zrealizowania robót ziemnych. Należy jednak mieć na uwadze, że dla uzyskania spodziewanego efektu poprawy właściwości podtorza po modernizacji łączna grubość tego rodzaju konstrukcji zamienniej musi być nie mniejsza od grubości konstrukcji pierwotnej. Koszt wdrożenia tego rozwiązania zamiennego wynika głównie z konieczności użycia pozaplanowego materiału (spoiwa hydraulicznego) oraz potrzeby przeprowadzenia dodatkowych procesów budowlanych. Ostateczny koszt budowy konstrukcji wzmocnienia może być jednak mniejszy od kosztu realizacji rozwiązania pierwotnego, ze względu na zredukowane zapotrzebowanie na podstawowy materiał do budowy górnej warstwy oraz mniejsze objętości robót ziemnych.

## 5. WNIOSKI

Wykonano analizę wpływu zastosowania konstrukcji zamiennych na możliwość uzyskania wymaganych wartości parametrów odbiorczych zmodernizowanego podtorza w przypadku, gdy pomierzone realne parametry gruntów podtorza są mniejsze od zakładanych wartości projektowych. Na tej podstawie sformułowano następujące wnioski:

1. Konstrukcję rozwiązania zamiennego należy określić na podstawie połowych pomiarów kontrolnych parametrów podtorza oraz stwierdzonych w terenie ograniczeń geometrycznych lub technicznych.
2. Przy wyborze docelowego rozwiązania zamiennego decydującymi czynnikami są: ograniczona ilość danych o gruntach podtorza, wartości parametrów oraz rzeczywiste właściwości gruntów.
3. Podatność gruntów podtorza na stabilizację spoiwem hydraulicznym to czynnik warunkujący możliwość zastosowania konstrukcji zamiennych zawierających warstwę gruntów stabilizowanych tym spoiwem.
4. Wraz ze zwiększeniem łącznej grubości konstrukcji zamienniej zmniejszają się wymagane realne wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza w terenie przed wzmocnieniem, pozwalające na otrzymanie docelowych wartości po zastosowanym wzmocnieniu.
5. Dla różnych rozważanych typów konstrukcji zamiennych krotność stwierdzonego dopuszczalnego zmniejszenia

If the alternative solution with the reduced fixed thickness of the upper crushed aggregate layer is used (structure 3B), it is possible to considerably reduce the demand for the primary protective layer material and the required earthworks. However, one should bear in mind that it is necessary to adopt an alternative structure with the total thickness equal to or greater than the originally designed strengthening thickness. The cost of this alternative solution is mainly associated with the need to use material that was not planned in the original design (hydraulic binder) and with additional construction processes. However, the final total cost of structural improvement may be lower than that of the originally designed solution, due to the reduced demand for the primary protective layer material and the volume of earthworks.

## 5. CONCLUSIONS

The performed analysis was focused on the influence of the introduced alternative solutions on the possibility to obtain the required parameters of the modernized railroad subgrade in cases, when the subgrade parameters measured before the strengthening were lower than the values originally adopted in the design. The following conclusions were formulated:

1. The alternative solution should be determined based on the values of subgrade parameters measured in field control tests as well as the noted geometric and technical limitations.
2. The decisive factors in selection of the alternative solution to be used include: limited quantity of data on subgrade soils, the values of subgrade parameters and properties of the soils.
3. Susceptibility of the subgrade to the hydraulic stabilization is a factor that determines the possibility to introduce alternative solutions incorporating a layer of hydraulically-stabilized soil.
4. An increase in the total thickness of the alternative structure results in a decrease in the minimum required actual secondary deflection moduli of subgrade noted before the strengthening that still enables to obtain the target acceptance values after the strengthening.
5. Multiples by which the actual values of the subgrade's secondary deflection modulus can decrease (relative to the design values) vary for different alternative structures; they range from 1.05 to 7.94.
6. Introducing an alternative structure with the increased thickness gets the best effect when structures of the original thickness of 25 cm and 30 cm are replaced.

- wartości modułów odkształcenia gruntów podtorza przed wzmocnieniem (w stosunku do ich wartości projektowych) jest zróżnicowana i waha się w granicach od 1,05 do 7,94.
6. Największy wpływ zastosowania rozwiązania zamiennego ze zwiększoną grubością występuje przy zastąpieniu konstrukcji o pierwotnej grubości 25 cm i 30 cm.
  7. W przypadku zastosowania geosiatki, nośność konstrukcji wzmocnienia jest tym większa, im większa była jej pierwotna grubość.
  8. W przypadku użycia konstrukcji zastępczej z dolną warstwą gruntu stabilizowanego i górną warstwą kruszywa o zmniejszonej grubości łączna grubość konstrukcji zamiennego wzmocnienia nie powinna być mniejsza od pierwotnie zaprojektowanej grubości konstrukcji wzmocnienia, jeżeli ma zostać uzyskany efekt poprawy właściwości podtorza po modernizacji.
  9. W większości rozważanych przypadków wdrożenie konstrukcji zamiennego wiąże się z dodatkowymi kosztami, wynikającymi z potrzeby użycia pozaplanowych materiałów oraz wymogiem przeprowadzenia nadprogramowych procesów budowlanych.
7. When geogrid reinforcement is used, greater original thickness of the layer results in greater bearing capacity of the reinforced strengthening structure.
  8. In the case of alternative solution consisting of a bottom hydraulically-stabilized subgrade layer and an upper aggregate layer with a fixed reduced thickness, the total thickness of the two layers should not be smaller than the originally designed thickness of the protective layer, if an improvement in the subgrade parameters after modernization is expected.
  9. In the majority of the analyzed cases, installation of an alternative solution is associated with an additional costs, due to the need for materials unprovided for in the original design and the necessity to introduce additional construction processes.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Skrzyński E.*: Podtorze kolejowe. Kolejowa Oficyna Wydawnicza, Warszawa, 2010
- [2] *Bzówka J.*: Wybrane techniki wzmocnienia słabego podłoża gruntowego w budownictwie komunikacyjnym. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 3, 2015, 416-423
- [3] *Roshan M.J., Rashid A.S., Abdul Wahab N., Tamassoki S., Jusoh S.N., Hezmi M.A., Norsyahariati Daud N., Mohd Apandi N., Azmi M.*: Improved methods to prevent railway embankment failure and subgrade degradation: A review. *Transportation Geotechnics*, 37, 2022, ID article: 100834, DOI: 10.1016/j.trgeo.2022.100834
- [4] *Göbel C., Weisemann U., Kirschner R.*: Effectiveness of a reinforcing geogrid in a railway subbase under dynamic loads. *Geotextiles and Geomembranes*, 13, 2, 1994, 91-99, DOI: 10.1016/0266-1144(94)90041-8
- [5] *Sychova A., Solomahin A., Hitrov A.*: The increase of the durability and geoprotective properties of the railway subgrade. *Procedia Engineering*, 189, 2017, 688-694, DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.109
- [6] *Mishra P., Shukla S., Mittal A.*: Stabilization of subgrade with expansive soil using agricultural and industrial by-products: A review. *Materials Today: Proceedings*, 65, 2, 2022, 1418-1424, DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.397
- [7] *Ding Y., Zhang J., Chen X., Wang X., Jia Y.*: Experimental investigation on static and dynamic characteristics of granulated rubber-sand mixtures as a new railway subgrade filler. *Construction and Building Materials*, 273, 2021, ID article: 121955, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121955
- [8] *Krawczyk B., Mackiewicz P., Dobrucki D.*: Use of plastic waste in materials for road pavement construction and improved subgrade. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 21, 3, 2022, 203-216, DOI: 10.7409/rabd.022.012
- [9] Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego Id-3, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa, 2009
- [10] *Węgliński S.*: Determination of load action ranges in static and dynamic tests of subgrades by applying rigid plates. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 17, 1, 2018, 73-88, DOI: 10.7409/rabd.018.005
- [11] Wytyczne badań podłoża gruntowego na potrzeby budowy i modernizacji infrastruktury kolejowej Igo-1, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa, 2016
- [12] *Kędra Z.*: Technologia robót torowych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2015
- [13] *Siewczyński Ł., Pawłowski M.*: Algorytm postępowania w przypadku braku pełnych efektów wzmocnienia podtorza warstwą ochronną. *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie, Seria: Materiały Konferencyjne*, 2(119), 2019, 217-227



- [14] *Kraszewski C., Rafalski L., Ćwiakala M., Dreger M.*: Effect of applied stress increments of the secondary deformation modulus and the ratio between the secondary and primary moduli of sandy gravel and crushed aggregate in static plate load tests. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **19**, 4, 2020, 283-296, DOI: 10.7409/rabdim.020.018
- [15] *Maślakowski M., Józefiak K., Brzeziński K., Superczyńska M.*: ERT i GPR – geofizyczne metody badań podłoża wykorzystywane w budownictwie liniowym. *Przegląd Geologiczny*, **65**, 10/2, 2017, 765-771
- [16] *Abdelmawla A., Kim S.S.*: Application of ground penetrating radar to estimate subgrade soil density. *Infrastructures*, **5**, 2, 2020, 12, DOI: 10.3390/infrastructures5020012
- [17] *Sysak J.* (red.): *Drogi kolejowe*. PWN, Warszawa, 1982
- [18] *Zelek Z.*: Projektowanie warstw ochronnych i podłoża kolejowych budowli ziemnych wzmocnionych geotekstylami. *Problemy Kolejnictwa*, **53**, 149, 2009, 37-52
- [19] *Witun Z.*: *Zarys geotechniki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2005
- [20] *Siewczyński Ł., Pawłowski M.*: Stosowanie równoważnych konstrukcji wzmocnień górnej strefy podtorza. *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne*, 2(109), 2016, 137-146
- [21] *Pawłowski M., Tarnowski M.*: Efektywność konstrukcji zamiennych warstw ochronnych podtorza. *Przegląd Geologiczny*, **69**, 12, 2021, 851-860, DOI: 10.7306/2021.46
- [22] *Behnood A.*: Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: a state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques. *Transportation Geotechnics*, **17**, 2018, 14-32, DOI: 10.1016/j.trgeo.2018.08.002
- [23] *Ghrrair A.M., Louzi N.*: Recycling of cement kiln dust from cement plants to improve mechanical properties of road pavement base course. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **19**, 3, 2020, 199-210, DOI: 10.7409/rabdim.020.013