

## Efektywność konstrukcji zamiennych warstw ochronnych podtorza

Michał Pawłowski<sup>1</sup>, Michał Tarnowski<sup>2</sup>



M. Pawłowski



M. Tarnowski

**Efficiency of revised constructions of protective layers of the subgrade.** *Prz. Geol.*, 69: 851–860; doi: 10.7306/2021.46

*A b s t r a c t. Geotechnical examinations of the subgrade are conducted before its rehab, repair or upbrining works. Due to variability of parameters of the subgrade soil over time, and limited scope of such examinations, the geotechnical model of the subgrade, identified based on test results, is inevitably characterised by uncertainty. The actual soil conditions are identified as part of geotechnical checks performed during repair or upbrining building works. Using these test results, subgrade soil parameters are then checked for conformance with their design values. In case any discrepancy is found, or the ensuing inadequacy of the design construction of protective layers in the actual soil conditions, appropriate revised constructions are designed and implemented. This paper describes and compared the five most frequently used types of revised constructions of protective layers of the subgrade, whose parameters are adjusted to the prevailing local soil conditions. For each type of construction, its material requirements were analysed, as well as its required volume of earth works and its execution unit cost were identified. Upon this basis, the discussed protective layer revised constructions' efficiency and their recommended application conditions were determined, depending on their prevailing actual soil conditions.*

*protective layers of the subgrade, whose parameters are adjusted to the prevailing local soil conditions. For each type of construction, its material requirements were analysed, as well as its required volume of earth works and its execution unit cost were identified. Upon this basis, the discussed protective layer revised constructions' efficiency and their recommended application conditions were determined, depending on their prevailing actual soil conditions.*

**Keywords:** *railroad; railroad subgrade; protective layer; alternative structures*

W ostatnich latach w Polsce wykonywane są liczne modernizacyjne naprawy dróg kolejowych. Podstawowym ich celem jest poprawa stanu technicznego tych dróg umożliwiająca zwiększenie wartości parametrów techniczno-eksploatacyjnych, w tym prędkości jazdy pociągów. W efekcie modernizacji uzyskuje się m.in. skrócenie czasu jazdy pociągów, poprawę warunków bezpieczeństwa ruchu i komfortu podróży. Modernizacja dróg kolejowych obejmuje przede wszystkim przebudowę i przystosowanie do nowych warunków pracy oraz aktualnie obowiązujących wymagań budowli, konstrukcji i urządzeń bezpośrednio związanych z prowadzeniem ruchu pociągów. Jedną z nich jest podtorze kolejowe będące budowlą ziemną, przejmującą obciążenia od przejeżdżających pociągów oraz podlegającą wpływom klimatycznym i podłoża gruntowego zalegającego w jego najbliższym otoczeniu (Skrzyński, 2010).

Jeżeli dostosowanie drogi kolejowej do nowych warunków ruchu pociągów nie wymaga znaczących zmian układu geometrycznego torów, a podtorze w dotychczasowym użytkowaniu nie wykazuje oznak niestateczności, to modernizacyjna przebudowa podtorza wiąże się głównie ze wzmocnieniem jego górnej strefy oraz poprawą warunków odwodnienia. Wzmocnienie górnej strefy podtorza uzyskuje się poprzez zastosowanie warstw ochronnych. Po zakończeniu robót podtorze powinno spełniać wymagania określone w przepisach (PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., 2009).

Warstwy ochronne wbudowuje się w górną strefę podtorza z wykorzystaniem pociągu do napraw podtorza w technologii potokowej lub przy użyciu typowego sprzętu budowlanego w technologii klasycznej (Kędra, 2017). Technologia potokowa charakteryzuje się dużą wydajnością robót. W tej technologii, ze względu na racjonalne jej wykorzystanie, ograniczona jest możliwość wbudowania w podtorze warstw ochronnych o skomplikowanej konstrukcji

oraz o grubości większej niż 40 cm. Wydajność robót w technologii klasycznej uzależniona jest głównie od liczby użytkowanego sprzętu i efektywności transportu urobku i materiałów konstrukcyjnych w obrębie budowy (Pawłowski i in., 2018). W tej technologii można wbudować w podtorze konstrukcje warstw ochronnych o różnym stopniu skomplikowania i grubości.

Modernizacyjne przebudowy podtorza poprzedza się badaniami geotechnicznymi. W badaniach tych wykonuje się otwory badawcze, sondowania statyczne i dynamiczne oraz próbné obciążenia podtorza, określa się warunki geologiczno-inżynierskie oraz ustala się wartości parametrów geotechnicznych gruntów podtorza. W zależności od stopnia skomplikowania warunków gruntowych punkty badawcze mogą być oddalone od siebie o 25 do 100 m (PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., 2016). Z tego względu nie ma możliwości szczegółowego odzwierciedlenia rzeczywistych właściwości, parametrów i wzajemnego rozmieszczenia gruntów podtorza. Powoduje to, że ustalony na podstawie wyników badań model geotechniczny podtorza charakteryzuje się pewnym stopniem niepewności.

Z uwzględnieniem niepewnych wartości parametrów gruntów podtorza, ustalonych w badaniach geotechnicznych podtorza, konstrukcje oraz parametry warstw ochronnych projektuje się według przepisów (PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., 2009). Warstwy ochronne konstruuje się głównie jako układy subwarstw kruszyw łamanych lub gruboziarnistych gruntów naturalnych, subwarstw gruntów podtorza stabilizowanych spoiwami hydraulicznymi oraz geosyntetyków.

Kontrola przyjętych w projekcie założeń i konstrukcji wzmocnienia górnej strefy podtorza przeprowadzana jest w czasie realizacji inwestycji. Na poziomie posadowienia projektowanej warstwy ochronnej wykonuje się wówczas geotechniczne badania kontrolne, w których określa się rzeczy-

<sup>1</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Lądowej, ul. Piotrowo 5, 61-138 Poznań; [michal.pawlowski@put.poznan.pl](mailto:michal.pawlowski@put.poznan.pl)

<sup>2</sup> Future Adventure Construction Sp. z o.o., ul. Trzcinańska 21/23, 96-100 Skierniewice; [m.tarnowski@facrail.com](mailto:m.tarnowski@facrail.com)

wiste wartości parametrów gruntów podtorza – wtórnego modułu odkształcenia i wskaźnika zagęszczenia. Jeżeli stwierdzone na budowie wartości parametrów gruntów są nie mniejsze od ich wartości projektowych, wbudowuje się w podtorze warstwę ochronną o konstrukcji założonej w projekcie (konstrukcją bazową). W praktyce budowlanej często występują przypadki, w których określone w badaniach kontrolnych rzeczywiste parametry gruntów podtorza są mniejsze od ich wartości projektowych. Może to wynikać np. z niedostatecznie rozpoznanego stanu podtorza w badaniach przedprojektowych (Skrzyński, 2015). Należy wówczas zaprojektować oraz wbudować stosowną konstrukcję zamienną, zapewniającą osiągnięcie wymaganego efektu wzmocnienia podtorza (Siewczyński, Pawłowski, 2016).

Po zakończeniu robót przeprowadza się geotechniczne badania odbiorcze. Celem tych badań, wykonywanych na górnej powierzchni zmodernizowanego podtorza, jest kontrola efektu i jakości robót. Ocenie podlegają wartości wtórnego modułu odkształcenia podtorza i wskaźnika zagęszczenia, które powinny spełniać założenia projektowe i wymagania określone w przepisach (PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., 2009).

Jeżeli stwierdzone w badaniach kontrolnych rzeczywiste wartości parametrów gruntów podtorza (wtórnego modułu odkształcenia i wskaźnika zagęszczenia) są mniejsze od ich wartości projektowych, to należy zaprojektować, a następnie wbudować odpowiednią konstrukcję zamienną. Przy doborze optymalnego typu i parametrów konstrukcji zamiennych należy brać pod uwagę, m.in.: typ konstrukcji założonej w projekcie (bazowej), niedomiaru wartości parametrów gruntów podtorza, właściwości gruntów podtorza, występujące ograniczenia techniczne, terenowe i technologiczne, stosowaną technologię robót, dostępność dodatkowego specjalistycznego sprzętu i czasu na realizację zadania oraz koszty wykonania robót.

W przypadku, gdy niedomiar wartości parametrów gruntów podtorza (wtórnego modułu odkształcenia i wskaźnika zagęszczenia) jest niewielki, można zastosować pierwotną konstrukcję o powiększonej grubości, zwiększyć jakość robót, zastosować materiały o lepszych parametrach. Jeżeli, ze względu na wartość niedomiaru wartości parametrów podtorza, powyższe zabiegi będą niewystarczające, należy zastosować inny typ warstwy ochronnej, bardziej odpowiedni do stwierdzonych warunków gruntowych. Warstwa ochronna, jako konstrukcja bazowa i rozwiązanie zamienne, powinna być projektowana w możliwie najbardziej optymalny sposób, z uwzględnieniem m.in.: całkowitej jej grubości, dostępności materiałów, stopnia skomplikowania i pracochłonności robót, niezbędnych do wykonania objętości robót ziemnych i kosztów realizacji. Należy zwrócić uwagę, że w dobrych warunkach gruntowych niektóre typy konstrukcji, zwłaszcza wielowarstwowe, ze względu na minimalne grubości poszczególnych subwarstw mogą być przewymiarowane, co w efekcie może prowadzić do niezamierzonego zwiększenia niejednorodności i sztywności przebudowanego podtorza. W niektórych przypadkach, np. w wyniku zastosowania konstrukcji zamiennych o grubości mniejszej niż w rozwiązaniu pierwotnym, można osiągnąć efekt zmniejszenia niezbędnego zakresu robót ziemnych, ograniczenia zapotrzebowania na podstawowy materiał konstrukcyjny, a tym samym zminimalizować koszt realizacji zadania. Osiągnięcie tego efektu jest możliwe, pod warunkiem, że badania parametrów gruntów podtorza, na poziomie posadowienia projektowanej warstwy ochronnej, wykonywane będą w przekopach kontrolnych, przed przystąpie-

niem do zasadniczych robót ziemnych. Jeżeli badania kontrolne wykonuje się już po zrealizowaniu zasadniczych robót ziemnych i osiągnięciu poziomu posadowienia bazowej konstrukcji wzmocnienia, to wdrożenie konstrukcji zamiennych o mniejszej grubości nie jest już możliwe.

Aktualnie stosowanymi typami warstwy ochronnej, które w zależności od sytuacji mogą być konstrukcjami bazowymi lub zamiennymi, są: warstwa pojedyncza, warstwa podwójna, warstwa pojedyncza z geosiatką oraz warstwa pojedyncza z subwarstwą gruntów podtorza stabilizowanych spoiwem hydraulicznym. W szczególnych przypadkach mogą mieć zastosowanie jeszcze inne, niewymienione wyżej konstrukcje.

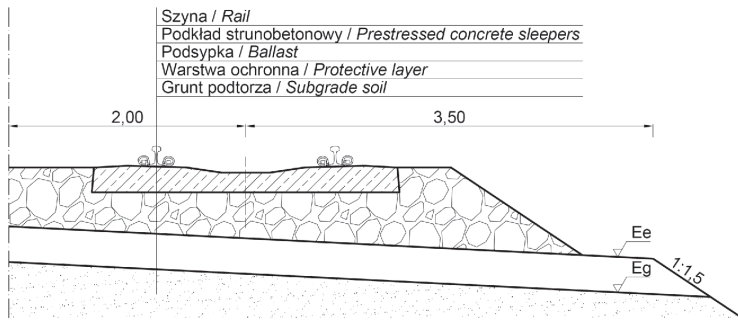
Celem artykułu jest określenie efektywności technicznej, technologicznej i ekonomicznej oraz zalecanych warunków stosowania typowych konstrukcji warstw ochronnych w zależności od występujących warunków gruntowych. Wyniki rozważań mogą być pomocne w doborze optymalnego rozwiązania zamiennego, w przypadku stwierdzenia na budowie różnych wartości niedomiaru wartości parametrów gruntów podtorza (wtórnego modułu odkształcenia i wskaźnika zagęszczenia).

## ZAŁOŻENIA ANALIZY

Analizę efektywności technicznej, technologicznej i ekonomicznej konstrukcji zamiennych opracowano przy założeniu modernizacji dwutorowej linii magistralnej, mającej na celu zwiększenie wartości parametrów techniczno-eksploatacyjnych, w tym prędkości pociągów do 160 km/h, z możliwością późniejszego osiągnięcia prędkości 200 km/h. Podtorze takiej linii powinno charakteryzować się odpowiednimi wymiarami (ryc. 1) i parametrami (PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., 2009), w tym wtórnym modułem odkształcenia podtorza określonym na torowisku ( $E_e$ ) o wartości 120 MPa.

Uznano, że niekorzystne warunki gruntowe występują jedynie w górnej strefie podtorza, przy jednoczesnym braku oznak jego niestateczności, która wymagałaby realizacji wzmocnień wgłębnych (Bzówka, 2015). Założono, że modernizacja podtorza będzie polegać na zastosowaniu warstwy ochronnej o konstrukcji składającej się z kombinacji subwarstw: kruszywa łamanych o uziarnieniu 4/31,5 mm (moduł sprężystości  $E_o = 250$  MPa) oraz o uziarnieniu 0/31,5 mm (moduł sprężystości  $E_o = 200$  MPa), geowłókniny separacyjnej w celu zachowania stabilności mechanicznej na styku kruszywa warstwy i gruntów podtorza, geosiatki wzmacniającej oraz gruntów podtorza stabilizowanych spoiwem hydraulicznym. Przyjęto, że zastosowanie geosiatki umożliwi zredukowanie pierwotnej grubości warstwy o 30% (Zelek, 2009). Geosyntetyki stanowiące element konstrukcji wzmocnień górnej strefy podtorza powinny spełniać wymagania zdefiniowane w przepisach (PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., 2009). Założono, że grunty podtorza są przydatne do stabilizacji spoiwem hydraulicznym (Wiłun, 2005), i że w efekcie zastosowania dodatku spoiwa powstanie kompozyt gruntowy o module sprężystości  $E_o = 250$  MPa.

Konstrukcje warstw ochronnych projektowano przy użyciu metody modułu ekwiwalentnego (PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., 2009) z zachowaniem grubości poszczególnych subwarstw, nie mniejszej niż 15 cm. Maksymalną łączną grubość konstrukcji wzmocnień ograniczono do 60 cm, z uwagi na konieczności zachowania warunków stateczności sąsiedniego, czynnego toru, przy realizacji robót w trybie



**Ryc. 1.** Przekrój naierzchni i górnej strefy podtorza wzmocnionej warstwą ochronną

**Fig. 1.** Cross-section of the surface and the subgrade upper area strengthened with a protective layer

zamknięć jednotorowych i w technologii klasycznej (Pawłowski i in., 2018). Optymalizowano grubości poszczególnych subwarstw, w celu ograniczenia łącznej grubości konstrukcji. Uwzględniono, że przy efektywnym wykorzystaniu pociągu do napraw podtorza i technologii potokowej, część z rozważanych konstrukcji może być wbudowana w górną strefę podtorza, o ile ich grubość nie przekracza 40 cm. W rozważaniach, ze względów porównawczych, szczególną uwagę zwrócono na konstrukcje o grubościach: minimalnej, 40 cm, i założonej maksymalnej, 60 cm.

W analizie ekonomicznej rozpatrywanych typów wzmocnień (Tarnowski, 2020) przyjęto orientacyjne koszty netto robocizny, materiałów i sprzętu z II kwartału 2020 r. (Eurocenbud, 2020). Koszty wykonania poszczególnych konstrukcji wyznaczono jako jednostkowe dla pojedynczego toru. Należy zwrócić uwagę, że ustalone w analizie koszty realizacji występują przy modernizacji długich odcinków podtorza. W przypadku napraw krótkich odcinków koszty te mogą być większe z uwagi na większe znaczenie kosztów mobilizacji sprzętu i transportu materiałów.

## KONSTRUKCJE ZAMIENNE

Przeanalizowano 5 typów konstrukcji wzmocnień górnej strefy podtorza: A – warstwa pojedyncza, B – warstwa podwójna, C – warstwa pojedyncza z geosiatką, D i E – warstwa pojedyncza z subwarstwą gruntów stabilizowanych spoiwem. Opracowano po kilka wariantów dla każdego z typów o różnej grubości, ze skokiem co 5 cm od grubości minimalnej do przyjętej grubości granicznej (60 cm). Rozważano łącznie 40 wariantów konstrukcji zamiennych (A – 10, B – 7, C – 10, D – 6, E – 7). Dla każdego z nich wyznaczono: wymaganą wartość wtórnego modułu odkształcenia gruntów podtorza (Eg), niezbędną objętość robót ziemnych, zapotrzebowanie na kruszywo oraz koszty realizacji, jako krotność kosztu wykonania warstwy pojedynczej o minimalnej grubości.

### Typ A: Warstwa pojedyncza

Warstwa ochronna składająca się z warstwy kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm i geowłókniny separacyjnej (ryc. 2A) jest przykładem aktualnie najczęściej stosowanej konstrukcji wzmocnienia górnej strefy podtorza – warstwy pojedynczej. Powszechność użycia warstwy pojedynczej wynika głównie z uniwersalności tej konstrukcji zapewniającej jej stosowalność w zróżnicowanych warunkach

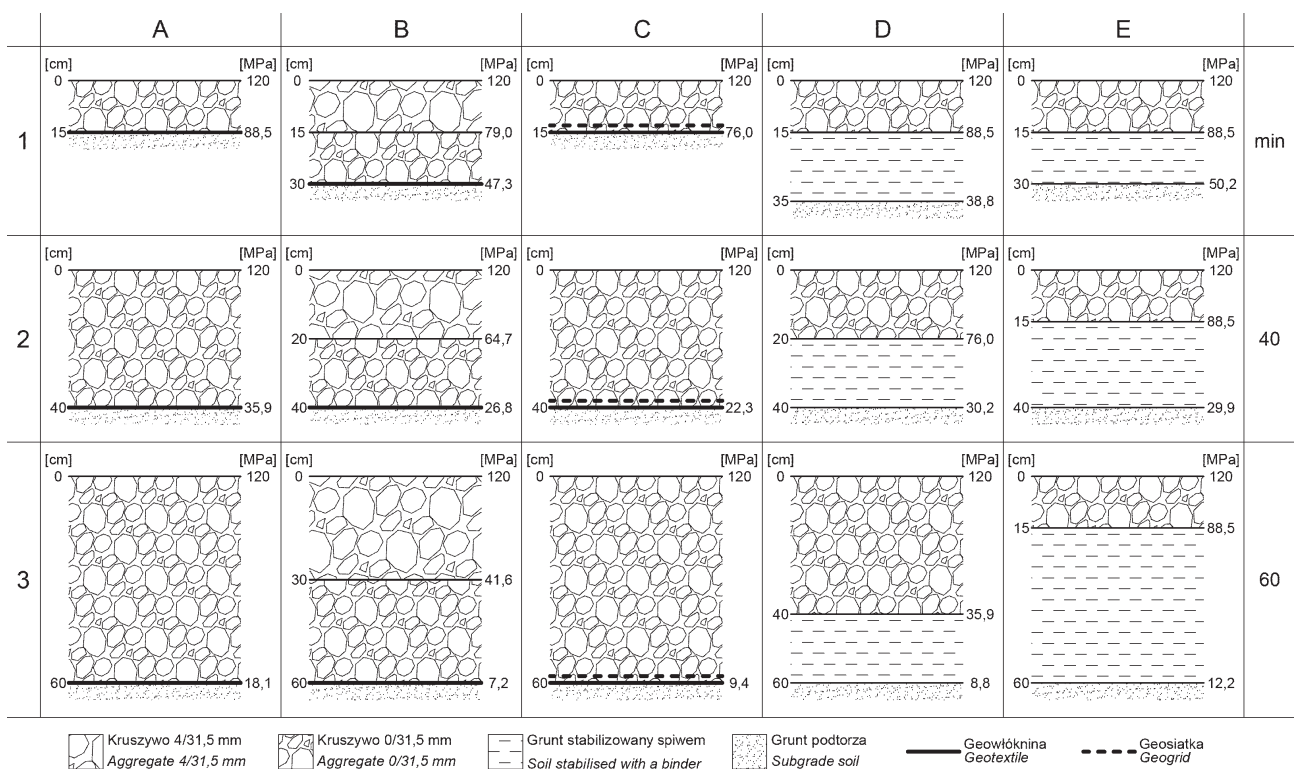
gruntowych. Dodatkowe czynniki, które mają wpływ na jej popularność, wynikają głównie ze względów technologicznych, logistycznych oraz organizacyjnych (możliwość budowy w dowolnej technologii, nieskomplikowane wykonanie, ograniczona liczba procesów wykonawczych i potrzebnych materiałów). Warstwa pojedyncza charakteryzuje się małą minimalną grubością konstrukcyjną, wynoszącą 15 cm (ryc. 2A.1). Z tego względu jest przydatna, gdy zwiększenie nośności podtorza nie jest głównym celem zastosowania warstwy ochronnej. Racjonalne wykorzystanie technologii potokowej do budowy warstwy wymaga ograniczenia jej grubości do 40 cm (ryc. 2A.2). Stanowi to barierę możliwości budowy konstrukcji w tej technologii w niesprzyjających warunkach gruntowych, gdzie konieczne jest zastosowanie znacznej grubości wzmocnienia (ryc. 2A.3). Warstwy o sporej grubości powinny być wykonywane w co najmniej dwóch subwarstwach i w technologii klasycznej.

Parametry pojedynczej warstwy ochronnej z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm przedstawiono w tabeli 1 i na rycinie 3. Konstrukcja ta może być stosowana, gdy grunty podtorza charakteryzują się wartościami wtórnego modułu odkształcenia nie mniejszymi niż 18,1 MPa, przy grubości 60 cm i 88,5 MPa, przy grubości minimalnej (15 cm). Przy małych grubościach konstrukcji objętość robót ziemnych i koszty wykonania są niewielkie. Wraz ze zwiększającą się grubością warstwy wzrastają objętość robót i koszty wykonania. Koszt wykonania warstwy o grubości 60 cm jest 3,6-krotnie większy od kosztu budowy warstwy o grubości minimalnej (15 cm) i 1,5-krotnie większy od kosztu realizacji warstwy o grubości 40 cm.

### Typ B: Warstwa podwójna

Konstrukcja wzmocnienia górnej strefy podtorza, składająca się z dwóch subwarstw kruszywa łamanego (górnjej o uziarnieniu 4/31,5 mm i dolnej – o uziarnieniu 0/31,5 mm) oraz geowłókniny separacyjnej (ryc. 2B), jest przykładem powszechnie stosowanej w latach 90. XX w. (Siewczyński, 1998) warstwy podwójnej. Warstwa podwójna charakteryzuje się dość dużą minimalną grubością konstrukcyjną, wynoszącą 30 cm (ryc. 2B.1). Z tego względu jej przydatność w przypadkach, gdy zwiększenie nośności podtorza nie jest głównym celem zastosowania warstwy ochronnej, jest ograniczona. Jest to konstrukcja powodująca pewne problemy projektowe oraz logistyczne i technologiczne w czasie budowy. Ze względu na znaczną grubość mogą wystąpić problemy z dostosowaniem warstwy do istniejących systemów odwodnieniowych. Wymaga dostarczenia na miejsce realizacji, składowania i wbudowania w podtorze dwóch różnych kruszyw. Konieczność wykonania konstrukcji, w co najmniej dwóch subwarstwach, wpływa na wydłużenie czasu realizacji, ogranicza racjonalne wykorzystanie do jej budowy technologii potokowej i predysponuje technologię klasyczną. Z uwagi na minimalizację procesów technologicznych celowym jest przyjmowanie jednakowych grubości subwarstw obu kruszyw (ryc. 2B.2 i 2B.3).

Parametry podwójnej warstwy ochronnej, składającej się z dwóch subwarstw kruszywa łamanego (górnjej o uziarnieniu 4/31,5 mm i dolnej o uziarnieniu 0/31,5 mm) oraz geowłókniny separacyjnej, przedstawiono w tabeli 2 i na rycinie 4. Konstrukcja ta może być stosowana, gdy grunty



**Ryc. 2.** Schematy konstrukcji wzmocnienia podtorza warstwą ochronną: **A** – z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm; **B** – z górną subwarstwą kruszywa łamanego o uziarnieniu 4/31,5 mm i z dolną subwarstwą z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm; **C** – z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm, zbrojoną geosiatką; **D** – z górną subwarstwą z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm i z dolną subwarstwą gruntów podtorza stabilizowanych spoiwem hydraulicznym na głębokość 20 cm; **E** – z górną subwarstwą o grubości 15 cm z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm i z dolną subwarstwą gruntów podtorza stabilizowanych spoiwem hydraulicznym

**Fig. 2.** Structural scheme of the subgrade strengthening with a protective layer: **A** – made of crushed stone aggregate with grain size of 0/31.5 mm; **B** – including the upper sublayer made of crushed stone aggregate with grain size of 4/31.5 mm, and including the lower sublayer made of crushed stone aggregate with grain size of 0/31.5 mm; **C** – made of crushed stone aggregate with grain size of 0/31.5 mm, strengthened with a geogrid; **D** – including the upper sublayer made of crushed stone aggregate with grain size of 0/31.5 mm, and including the lower sublayer subgrade soil stabilised with a hydraulic binder to the depth of 20 cm; **E** – including the 15 cm thick upper sublayer made of crushed stone aggregate with grain size of 0/31.5 mm, and including the lower sublayer subgrade soil stabilised with a hydraulic binder

**Tab. 1.** Parametry warstwy ochronnej z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm (typ A)

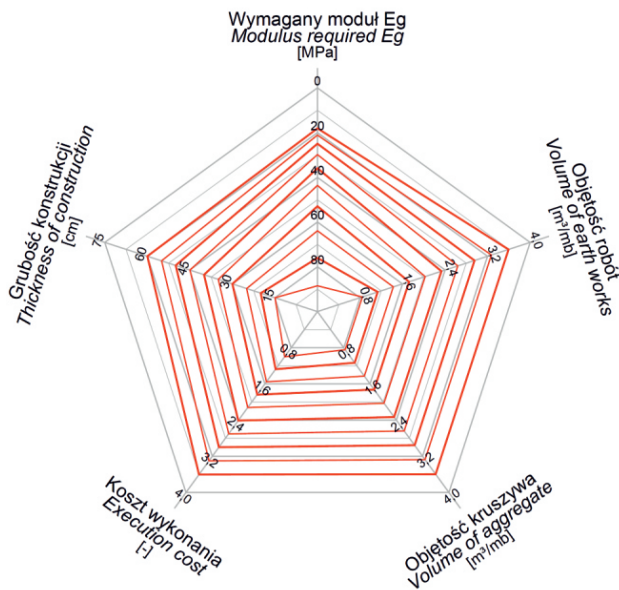
**Table 1.** Protective layer parameters made of crushed stone aggregate with grain size of 0/31.5 mm (type A)

Grubość konstrukcji Thickness of construction	Wymagana wartość Eg Eg value required	Objętość Volume of		Koszt wykonania Execution cost
		robót ziemnych earth works	kruszywa aggregate	
[cm]	[MPa]	[m <sup>3</sup> /mb]		[-]
15	88,5	0,84	0,84	1,00
20	76,0	1,13	1,13	1,27
25	63,9	1,43	1,43	1,55
30	52,9	1,72	1,72	1,84
35	43,6	2,03	2,03	2,12
40	35,9	2,33	2,33	2,41
45	29,8	2,64	2,64	2,70
50	25,0	2,96	2,96	3,00
55	21,1	3,27	3,27	3,30
60	18,1	3,60	3,60	3,60

podtorza charakteryzują się wartościami wtórnego modułu odkształcenia nie mniejszymi niż 7,2 MPa, przy grubości 60 cm i 47,3 MPa, przy grubości minimalnej (30 cm). Objętość robót i koszt wykonania konstrukcji o grubości minimalnej są znaczne i zwiększają się proporcjonalnie do zmian grubości warstwy. Koszt wykonania warstwy o grubości 60 cm jest 2-krotnie większy od kosztu budowy warstwy o grubości minimalnej (30 cm) i 1,5-krotnie większy od kosztu realizacji warstwy o grubości 40 cm.

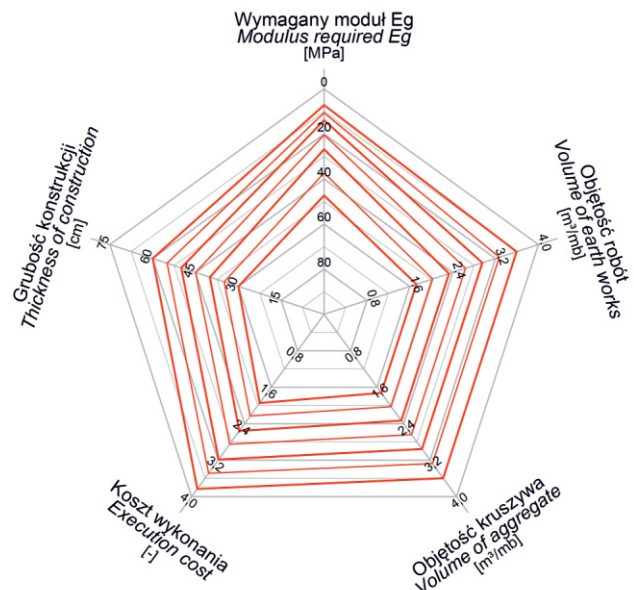
### Typ C: Warstwa pojedyncza z geosiatką

Warstwa ochronna składająca się z warstwy kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm, geosiatki i geowłókniny separacyjnej (ryc. 2C) jest przykładem konstrukcji zwiększającej możliwość użycia warstwy pojedynczej (ryc. 2A) w bardziej skomplikowanych warunkach gruntowych. Zastosowanie geosiatki pełniącej funkcję zbrojenia wpływa na zwiększenie nośności lub zmniejszenie grubości pierwotnej konstrukcji, przy jednoczesnym zachowaniu jej zalet. Geosiatki aplikuje się w strefie podtorowej, gdzie występują największe oddziaływania od obciążeń zewnętrznych. Uzupełnienie konstrukcji warstwy ochronnej o geosiatkę nie wpływa znacząco na technologię jej wyko-



**Ryc. 3.** Współzależność grubości konstrukcji, wymaganej minimalnej wartości wtórnego modułu odkształcenia gruntów podtorza  $E_g$ , objętości robót ziemnych, objętości kruszywa i kosztu realizacji wzmocnienia dla warstwy ochronnej z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm (typ A)

**Fig. 3.** Interdependence between construction thickness, the required minimum value of the subgrade soil's secondary deformation modulus  $E_g$ , the earth works volume, the aggregate volume, and the execution cost for the protective layer made of crushed stone aggregate with grain size of 0/31.5 mm (type A)



**Ryc. 4.** Współzależność grubości konstrukcji, wymaganej minimalnej wartości wtórnego modułu odkształcenia gruntów podtorza  $E_g$ , objętości robót ziemnych, objętości kruszywa i kosztu realizacji wzmocnienia dla warstwy ochronnej z górną subwarstwą kruszywa łamanego o uziarnieniu 4/31,5 mm i z dolną subwarstwą z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm (typ B)

**Fig. 4.** Interdependence between construction thickness, the required minimum value of the subgrade soil's secondary deformation modulus  $E_g$ , the earth works volume, the aggregate volume, and the execution cost for the protective layer including the upper sublayer made of crushed stone aggregate with grain size of 4/31.5 mm, and including the lower sublayer made of crushed stone aggregate with grain size of 0/31.5 mm (type B)

**Tab. 2.** Parametry warstwy ochronnej z górną subwarstwą z kruszywa łamanego o uziarnieniu 4/31,5 mm i z dolną subwarstwą z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm (typ B)

**Table 2.** Protective layer parameters including the upper sublayer made of crushed stone aggregate with grain size of 4/31.5 mm, and including the lower sublayer made of crushed stone aggregate with grain size of 0/31.5 mm (type B)

Grubość Thickness of		Wymagana wartość $E_g$ $E_g$ value required	Objętość Volume of			Koszt wykonania Execution cost	
konstrukcji construction	subwarstwy sublayer		robót ziemnych earth works	kruszywa subwarstwy sublayer aggregate			
	1			2	1		2
[cm]		[MPa]	[m <sup>3</sup> /mb]			[-]	
30	15	15	47,3	1,72	0,84	0,88	1,95
35	15	20	37,3	2,03	0,84	1,18	2,23
40	20	20	26,8	2,33	1,13	1,20	2,56
45	20	25	20,4	2,64	1,13	1,51	2,85
50	25	25	13,9	2,96	1,43	1,53	3,19
55	25	30	10,6	3,27	1,43	1,85	3,49
60	30	30	7,2	3,60	1,72	1,87	3,83

nia: nie wymaga użycia dodatkowego sprzętu, nie zwiększa objętości robót ziemnych i zapotrzebowania na główny materiał konstrukcyjny warstwy. Dodatkowymi operacjami roboczymi są dowóz i rozłożenie siatki na gruntach podtorza. Warstwa pojedyncza z geosiatką charakteryzuje się małą minimalną grubością konstrukcyjną, wynoszącą 15 cm (ryc. 2C.1). Racjonalne wykorzystanie technologii potokowej do budowy warstwy z geosiatką wymaga ograniczenia jej grubości do 40 cm (ryc. 2C.2). Warstwy o sporej grubości (ryc. 2C.3) powinny być wykonywane w co najmniej w dwóch subwarstwach i w technologii klasycznej.

Parametry pojedynczej warstwy ochronnej z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm zbrojonej geosiatką przedstawiono w tabeli 3 i na rycinie 5. Konstrukcja ta może być stosowana, gdy grunty podtorza charakteryzują się wartościami wtórnego modułu odkształcenia nie mniejszymi niż 9,4 MPa, przy grubości 60 cm i 76 MPa, przy grubości minimalnej (15 cm). Podobnie jak w przypadku warstwy pojedynczej przy małych grubościach konstrukcji objętość robót ziemnych i koszty wykonania są niewielkie i zwiększają się proporcjonalnie do zmian grubości warstwy.

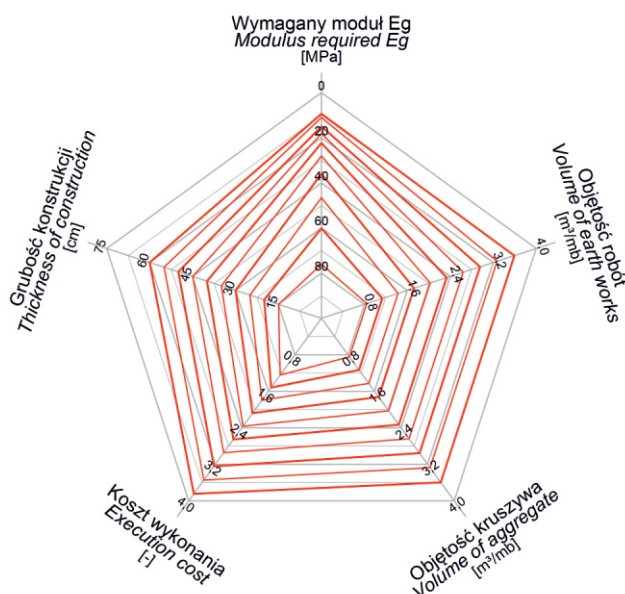
#### Typy D i E: Warstwa pojedyncza z subwarstwą gruntów stabilizowanych spoiwem

Konstrukcje typu D i E można zastosować wówczas, gdy w górnej strefie podtorza znajdują się grunty o małej wytrzyma-

**Tab. 3.** Parametry warstwy ochronnej, z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm, zbrojonej geosiatką (typ C)  
**Table 3.** Protective layer parameters made of crushed stone aggregate with grain size of 0/31.5 mm, strengthened with a geogrid (type C)

Grubość konstrukcji Thickness of construction	Wymagana wartość $E_g$ Eg value required	Objętość Volume of		Koszt wykonania Execution cost
		robót ziemnych earth works	kruszywa aggregate	
[cm]	[MPa]	[m <sup>3</sup> /mb]		[-]
15	76,0	0,84	0,84	1,24
20	60,1	1,13	1,13	1,52
25	46,5	1,43	1,43	1,80
30	35,9	1,72	1,72	2,08
35	28,1	2,03	2,03	2,36
40	22,3	2,33	2,33	2,65
45	18,1	2,64	2,64	2,95
50	14,9	2,96	2,96	3,24
55	11,0	3,27	3,27	3,54
60	9,4	3,60	3,60	3,85

małości, jednocześnie o właściwościach umożliwiających wykonanie dodatkowego zabiegu polegającego na stabilizacji tych gruntów spoiwem hydraulicznym (Wiłun, 2005). W zależności od przyjętej grubości górnej subwarstwy z kruszywa oraz wartości parametrów i właściwości gruntów podtorza projektuje się głębokość ich stabilizacji oraz dobiera wymagane jej cechy (rodzaj i ilość spoiwa). Zastosowanie mają dwie odmiany konstrukcji: pierwsza – z założoną, stałą głębokością stabilizacji gruntów podtorza i ze zmienną grubością subwarstwy kruszywa wyznaczaną w zależności od występujących warunków gruntowych (typ D, ryc. 2D) oraz druga – ze stałą, najczęściej minimalną, grubością subwarstwy kruszywa i ze zmienną głębokością stabilizacji gruntów podtorza projektowaną w zależności od występujących warunków gruntowych (typ E, ryc. 2E). Ulepszone grunty podtorza są częścią konstrukcji wzmacniającej, co umożliwia w niektórych przypadkach nawet znacznie zredukować objętość robót ziemnych, zmniejszyć zapotrzebowanie na kruszywo oraz ograniczyć koszty realizacji. Minimalna grubość konstrukcji uzależniona jest od zastosowanej jej odmiany i wynosi 35 cm (ryc. 2D.1) lub 30 cm (ryc. 2E.1). W obu tych przypadkach zastosowanie ma górna subwarstwa kruszywa o minimalnej grubości (15 cm). Budowa konstrukcji wzmocnienia przebiega w kilku etapach: po wykonaniu robót ziemnych i osiągnięciu poziomu posadowienia górnej subwarstwy, z wykorzystaniem specjalistycznego sprzętu, wykonuje się stabilizację gruntów podtorza, na które następnie układa się subwarstwę kruszywa. Z tego powodu zaleca się wykonywać roboty zasadnicze z wykorzystaniem sprzętu ogólnobudowlanego w technologii klasycznej. Z uwagi na konieczność przeprowadzenia dodatkowych procesów technologicznych czas wykonania konstrukcji może być wydłużony w stosunku do rozwiązań klasycznych. Spodziewany efekt poprawy właściwości gruntów podtorza w wyniku ich stabilizacji spoiwem hydraulicznym może być zaobserwowany po pewnym czasie od momentu aplikacji spoiwa. Czas ten uzależniony jest od wielu czynników, m.in. od właściwości



**Ryc. 5.** Współzależność grubości konstrukcji, wymaganej minimalnej wartości wtórnego modułu odkształcenia gruntów podtorza  $E_g$ , objętości robót ziemnych, objętości kruszywa i kosztu realizacji wzmocnienia dla warstwy ochronnej, z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm, zbrojonej geosiatką (typ C)

**Fig. 5.** Interdependence between construction thickness, the required minimum value of the subgrade soil's secondary deformation modulus  $E_g$ , the earth works volume, the aggregate volume, and the execution cost for the protective layer made of crushed stone aggregate with grain size of 0/31.5 mm, strengthened with a geogrid (type C)

gruntów podtorza, rodzaju i ilości dodatku spoiwa i może wynosić od kilku do kilkudziesięciu dni (Siewczyński, Pawłowski, 2009). Geowłóknina separacyjna na styku subwarstwy stabilizowanych gruntów podtorza i subwarstwy kruszywa nie jest wymagana.

Parametry warstwy ochronnej z górną subwarstwą z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm i z dolną subwarstwą gruntów stabilizowanych spoiwem dla obu jej odmian przedstawiono w tabelach 4 i 5 oraz na rycinach 6 i 7, odpowiednio dla konstrukcji typu D i E. Konstrukcja D może być stosowana, gdy grunty podtorza charakteryzują się wartościami wtórnego modułu odkształcenia, nie mniejszymi niż 8,8 MPa, przy łącznej grubości wzmocnienia wynoszącej 60 cm i 38,8 MPa, przy grubości minimalnej (35 cm). Konstrukcja E może być stosowana, gdy grunty podtorza charakteryzują się wartościami wtórnego modułu odkształcenia, nie mniejszymi niż 12,2 MPa, przy łącznej grubości wzmocnienia wynoszącej 60 cm i 50,2 MPa, przy grubości minimalnej (30 cm). Z uwagi na wykorzystanie w konstrukcji wzmocnienia ulepszonych gruntów podtorza objętość robót, zapotrzebowanie na kruszywo i koszt realizacji są zredukowane. Z tego względu, ze głównym składnikiem ogólnego kosztu wykonania wzmocnienia jest koszt realizacji robót ziemnych, konstrukcja E, o stałej, minimalnej grubości subwarstwy kruszywa jest rozwiązaniem tańszym od konstrukcji D.

## PORÓWNANIE I EFEKTYWNOŚĆ KONSTRUKCJI ZAMIENNYCH

Z uwzględnieniem cech i parametrów rozpatrywanych typów warstw ochronnych, przedstawionych w tabelach 1–5 i na rycinach 3–7, porównano te konstrukcje oraz oceniono ich efektywność techniczną, technologiczną i ekonomiczną oraz wykazano ich przydatność w zróżnicowanych warunkach gruntowych podtorza. Zestawienie parametrów analizowanych typów wzmocnień, o grubościach minimalnej 40 i 60 cm,

**Tab. 4.** Parametry warstwy ochronnej, z górną subwarstwą z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm i z dolną subwarstwą gruntów podtorza stabilizowanych spoiwem hydraulicznym na głębokość 20 cm (typ D)

**Table 4.** Protective layer parameters including the upper sublayer made of crushed stone aggregate with grain size of 0/31.5 mm, and including the lower sublayer subgrade soil stabilised with a hydraulic binder to the depth of 20 cm (type D)

Grubość Thickness of			Wymagana wartość Eg Eg value required	Objętość Volume of			Koszt wykonania Execution cost	
konstrukcji construction	subwarstwy sublayer			robót ziemnych earth works	kruszywa aggregate	stabilizacji stabilising works		
	1	2	[MPa]	[m <sup>3</sup> /mb]			[–]	
	[cm]							
	35	15	20	38,8	0,84	0,84	1,18	1,38
	40	20	20	30,2	1,13	1,13	1,20	1,66
	45	25	20	22,7	1,43	1,43	1,22	1,94
	50	30	20	16,7	1,72	1,72	1,23	2,23
	55	35	20	12,1	2,03	2,03	1,25	2,52
	60	40	20	8,8	2,33	2,33	1,26	2,82

**Tab. 5.** Parametry warstwy ochronnej, z górną z górną subwarstwą o grubości 15 cm z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm i z dolną subwarstwą gruntów podtorza stabilizowanych spoiwem hydraulicznym (typ E)

**Table 5.** Protective layer parameters including the 15 cm thick upper sublayer made of crushed stone aggregate with grain size of 0/31.5 mm, and including the lower sublayer subgrade soil stabilised with a hydraulic binder (type E)

Grubość Thickness of			Wymagana wartość Eg Eg value required	Objętość Volume of			Koszt wykonania Execution cost	
konstrukcji construction	subwarstwy sublayer			robót ziemnych earth works	kruszywa aggregate	stabilizacji stabilising works		
	1	2	[MPa]	[m <sup>3</sup> /mb]			[–]	
	[cm]							
	30	15	15	50,2	0,84	0,84	0,88	1,28
	35	15	20	38,8	0,84	0,84	1,18	1,38
	40	15	25	29,9	0,84	0,84	1,49	1,48
	45	15	30	23,2	0,84	0,84	1,80	1,58
	50	15	35	18,4	0,84	0,84	2,11	1,68
	55	15	40	14,8	0,84	0,84	2,43	1,78
	60	15	45	12,2	0,84	0,84	2,75	1,88

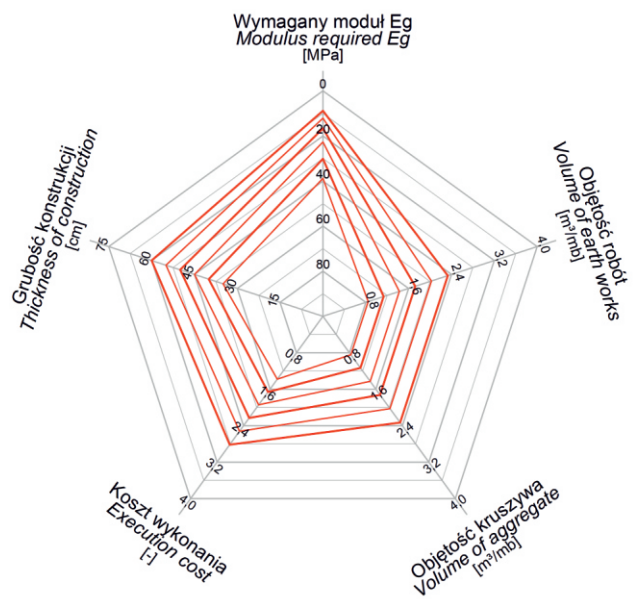
umożliwiający ich szczegółowe porównanie zawarto w tabeli 6. W tabeli przedstawiono zaprojektowany układ subwarstw oraz wymagane wartości wtórnego modułu odkształcenia gruntów podtorza (Eg), niezbędne objętości robót ziemnych i kruszywa oraz koszty realizacji, jako krotność kosztu wykonania warstwy pojedynczej (typ A) o minimalnej grubości, dla każdego z analizowanych typów konstrukcji.

Pojedyncza warstwa ochronna (typ A), również w wersji z geosiatką (typ C) charakteryzuje się najmniejszą grubością konstrukcyjną (15 cm). Pozostałe typy wzmocnień (B, D i E) mają porównywalną minimalną grubość konstrukcyjną (30–35 cm).

Warstwy typu B–E o łącznej grubości konstrukcji 60 cm mogą być stosowane, gdy parametry gruntów podtorza są o bardzo małych wartościach (w zakresie 7,2–12,2 MPa).

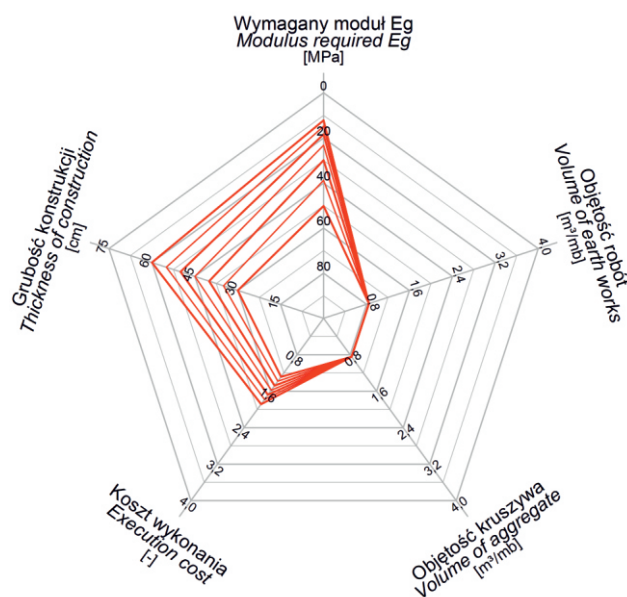
Przy grubości konstrukcyjnej, wynoszącej 40 cm, warstwa ochronna typu C ma największą nośność spośród wszystkich analizowanych typów, co może być wykorzystane, gdy roboty wykonuje się w technologii potokowej. Przy łącznej grubości 40 cm wzmocnienia typu D i E mają jednakową nośność, nieznacznie mniejszą od nośności konstrukcji typu B.

Warstwa pojedyncza (typ A) jest bardzo uniwersalną konstrukcją i może być stosowana w znacznie zróżnicowanych warunkach gruntowych. Zakres minimalnych wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza dla tej konstrukcji jest znaczny i wynosi około 70 MPa. Poprzez aplikację geosiatki (typ C) można ten zakres jeszcze



**Ryc. 6.** Współzależność grubości konstrukcji, wymaganej minimalnej wartości wtórnego modułu odkształcenia gruntów podtorza Eg, objętości robót ziemnych, objętości kruszywa i kosztu realizacji wzmocnienia dla warstwy ochronnej z górną subwarstwą z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm i z dolną subwarstwą gruntów podtorza stabilizowanych spoiwem hydraulicznym (typ D)

**Fig. 6.** Interdependence between construction thickness, the required minimum value of the subgrade soil's secondary deformation modulus Eg, the earth works volume, the aggregate volume, and the execution cost for the protective layer including the upper sublayer made of crushed stone aggregate with grain size of 0/31.5 mm, and including the lower sublayer subgrade soil stabilised with a hydraulic binder to the depth of 20 cm (type D)



powiększyć do około 80 MPa. Dobre dopasowanie konstrukcji wzmocnienia do występujących warunków gruntowych ma pozytywny wpływ na uzyskiwaną jednorodność podtorza po jego modernizacji. Najmniej uniwersalnymi rozwiązaniami są konstrukcje o znacznej minimalnej grubości, wynoszącej 30–35 cm (typy B, D i E). Minimalne wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza dla tych konstrukcji mieszczą się w zakresie wynoszącym około 30–40 MPa.

**Ryc. 7.** Współzależność grubości konstrukcji, wymaganej minimalnej wartości wtórnego modułu odkształcenia gruntów podtorza  $E_g$ , objętości robót ziemnych, objętości kruszywa i kosztu realizacji wzmocnienia dla warstwy ochronnej z górną subwarstwą o grubości 15 cm z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm i z dolną subwarstwą gruntów podtorza stabilizowanych spoiwem hydraulicznym (typ E)

**Fig. 7.** Interdependence between construction thickness, the required minimum value of the subgrade soil's secondary deformation modulus  $E_g$ , the earth works volume, the aggregate volume, and the execution cost for the protective layer including the 15 cm thick upper sublayer made of crushed stone aggregate with grain size of 0/31.5 mm, and including the lower sublayer subgrade soil stabilised with a hydraulic binder (type E)



Roboty ziemne o najmniejszych objętościach są wymagane przy wykonywaniu wzmocnień o małej grubości konstrukcyjnej. Wiąże się to również z minimalnym zapotrzebowaniem na kruszywo stanowiące materiał konstrukcyjny warstwy (typy A i C) lub górnej subwarstwy (typy D i E). Warstwa ochronna typu E, spośród wszystkich analizowanych, charakteryzuje się najmniejszą wartością niezbędnych robót ziemnych, jakie należy wykonać przy realizacji wzmocnienia podtorza, oraz najmniejszym zapotrzebowaniem na kruszywo. Realizacja warstw ochronnych typów A, B i C, o jednakowej grubości konstrukcyjnej, wiąże się z koniecznością wykonania robót ziemnych o takiej samej objętości oraz użycia identycznej ilości kruszywa. Konstrukcje wzmocnień wymagające wykonania dużych objętości robót ziemnych są problematyczne nie tylko z powodu dużego zakresu robót ziemnych, ale również z uwagi na znaczne zapotrzebowania na kruszywo i spore potrzeby transportowe w zakresie wywozu urobku

**Tab. 6.** Porównanie parametrów konstrukcji zamiennych warstw ochronnych podtorza  
**Table 6.** Comparison of parameters of revised constructions of protective layers of the subgrade

Typ konstrukcji <i>Type of construction</i>		A	B	C	D	E		
Układ warstw w przekroju poprzecznym <i>Arrangement of layers in cross-section</i>	Kruszywo łamane 4/31,5 <i>Crushed stone aggregate 4/31.5</i>	–	x	–	–	–		
	Kruszywo łamane 0/31,5 <i>Crushed stone aggregate 0/31.5</i>	x	x	x	x	x gr. 15 cm 15 cm th		
	Geosiatka <i>Geogrid</i>	–	–	x	–	–		
	Geowłóknina <i>Geotextile material</i>	x	x	x	–	–		
	Grunt stabilizowany spoiwem <i>Binder-stabilised soil</i>	–	–	–	x gł. 20 cm 20 cm d.	x		
Grubość konstrukcji <i>Construction thickness</i>	[cm]	–	min.	15	30	15	35	30
		max.	60	60	60	60	60	
Wymagana wartość $E_g$ <i>Eg value required</i>	[MPa]	Grubość konstrukcji <i>Construction thickness</i>	min.	88,5	47,3	76,0	38,8	50,2
			40	35,9	26,8	22,3	30,2	29,9
		60	18,1	7,2	9,4	8,8	12,2	
Zakres <i>Range</i>	–	70,4	40,1	66,6	30,0	38,0		
Objętość robót ziemnych <i>Earth works volume</i>	[m³/mb]	Grubość konstrukcji <i>Construction thickness</i>	min.	0,84	1,72	0,84	0,84	0,84
			40	2,33	2,33	2,33	1,13	
		60	3,60	3,60	3,60	2,33		
Objętość kruszywa <i>Aggregate volume</i>	[m³/mb]	Grubość konstrukcji <i>Construction thickness</i>	min.	0,84	1,72	0,84	0,84	0,84
			40	2,33	2,33	2,33	1,13	
		60	3,60	3,60	3,60	2,33		
Koszt wykonania <i>Cost of execution</i>	[–]	Grubość konstrukcji <i>Construction thickness</i>	min.	1,00	1,95	1,24	1,38	1,28
			40	2,41	2,56	2,65	1,66	1,48
		60	3,60	3,83	3,85	2,82	1,88	



**Tab. 7.** Zakres stosowania zamiennych konstrukcji warstwy ochronnej w zależności od wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza Eg  
**Table 7.** Application scope of protective layer revised constructions, depending on the value of the secondary deformation modulus of the subgrade soil

Typ konstrukcji Type of construction	Przedziały wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza Eg [MPa] Ranges of the subgrade soil's secondary deformation modulus Eg [MPa]					
	< 15	15–30	30–45	45–60	60–75	> 75
A	●	●/●	●/●	●	●	●
B	●/●	●	●	●	●	●
C	●/●	●/●	●	●	●	●
D	●	●/●	●	●	●/●	●
E	●	●	●	●	●/●	●
Parametry gruntów Soil parameters	bardzo małe very small	małe small	przeciętne average	dobrze good	bardzo dobre very good	doskonale excellent

● – niezalecany / not recommended; ● – dopuszczalny / allowable; ● – odpowiedni / suitable; ● – zalecany / recommended

i dowozu kruszywa. Ma to znaczenie zwłaszcza w przypadku realizacji robót w trybie zamknięć jednotorowych i dostarczania kruszyw w miejsce ich wbudowania wagonami samowładowczymi po sąsiednim, czynnym torze, w czasie zaplanowanych przerw w ruchu pociągów. Na liniach kolejowych, o dużym natężeniu ruchu, możliwe są tylko krótkie przerwy w ruchu pociągów, co dodatkowo wydłuża czas realizacji zadania (Pawłowski i in., 2018).

Z tego względu, że podstawowym składnikiem kosztu wykonania wzmocnienia jest koszt realizacji robót ziemnych, najkorzystniejszymi kosztowo warstwami ochronnymi są konstrukcje o najmniejszej minimalnej grubości (typ A i C). Przy większych grubościach konstrukcyjnych optymalnym kosztowo rozwiązaniem jest warstwa ochronna typu E. Koszt wykonania wzmocnienia o łącznej grubości 60 cm tego typu konstrukcji jest około 2-krotnie mniejszy od kosztu realizacji wzmocnień o tej samej grubości w przypadku typu A, B i C oraz około 1,5-krotnie mniejszy od kosztu wykonania wzmocnienia typu D.

Na podstawie analizy parametrów rozpatrywanych typów warstw ochronnych podtorza, które w zależności od sytuacji mogą być konstrukcjami bazowymi lub zamiennymi, określono ich efektywność w różnych warunkach gruntowych i przedstawiono w tabeli 7. Zmienność warunków gruntowych odwzorowano przy pomocy wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza (Eg). Przedziałom wartości modułów przypisano sześciostopniową skalę parametrów gruntów. W tabeli 7 zawarto zalecane zakresy stosowania poszczególnych typów warstw ochronnych w zależności od występujących warunków gruntowych. Należy zwrócić uwagę, że przedstawione rozwiązanie dotyczy warunków określonych w założeniach do analizy.

Konstrukcje typu A i C, ze względu na małą minimalną grubość konstrukcyjną i wynikające z tego minimalne koszty realizacji, zaleca się stosować, gdy grunty podtorza charakteryzują się bardzo dobrymi i doskonałymi parametrami (wtórny moduł odkształcenia gruntów podtorza o wartości większej od 60 MPa). Wraz ze zmniejszającymi się wartościami parametrów gruntów, przydatność tych konstrukcji maleje. Ze względu na znaczne objętości robót ziemnych i spore zapotrzebowanie na kruszywo, pojedyncze warstwy ochronne o dużej grubości konstrukcyjnej, przy małych i bardzo małych parametrach gruntów (wtórny moduł odkształcenia gruntów podtorza o wartości mniejszej od 30 MPa) są niezalecane. Dopuszcza się ich zastosowanie jedynie w uzasadnionych przypadkach. Warstwy typu A

i C, o grubości do 40 cm, są jedynymi, które można zbudować, wykorzystując pociąg do napraw podtorza.

Konstrukcja typu B, z uwagi na znaczną minimalną grubość konstrukcyjną, spore objętości robót i zapotrzebowanie na kruszywo oraz duże koszty realizacji, powinna być stosowana w ograniczonym zakresie. Gdy parametry gruntów są przeciętne lub dobre (wtórny moduł odkształcenia gruntów podtorza o wartości w zakresie 30–60 MPa) jest konstrukcją odpowiednią. W lepszych warunkach gruntowych będzie to konstrukcja przewymiarowana, a w gorszych – zbyt droga. W pełnym zakresie zmienności parametrów gruntów nie zachodzi przypadek, aby konstrukcja typu B była zalecana.

Konstrukcje D i E są zalecane do stosowania, gdy parametry gruntów są nie większe niż przeciętne (wtórny moduł odkształcenia gruntów podtorza o wartości nie większej niż 45 MPa). Wynika to z ich ograniczonego zapotrzebowania na kruszywo oraz konkurencyjny, względem innych rozwiązań, koszt realizacji. W lepszych warunkach gruntowych (wtórny moduł odkształcenia gruntów podtorza o wartości większej od 60 MPa) będą przewymiarowane i z uwagi na właściwości gruntów może być niemożliwe ich wykonanie.

W przypadku, gdy grunty podtorza charakteryzują się przeciętnymi lub dobrymi parametrami (wtórny moduł odkształcenia gruntów podtorza w zakresie od 30 do 60 MPa) prawie nie występują ograniczenia w doborze typu konstrukcji wzmocnienia podtorza.

Powyższa analiza potwierdziła, że nie ma jednej uniwersalnej konstrukcji, która byłaby odpowiednia w pełnym zakresie zmienności warunków gruntowych. Rozwiązania zalecane w dobrych warunkach (wtórny moduł odkształcenia podtorza o wartościach większych od około 60 MPa) nie sprawdzą się w warunkach złych (wtórny moduł odkształcenia podtorza o wartościach mniejszych od około 30 MPa), przede wszystkim ze względu na znaczną wymaganą grubość konstrukcji i duży koszt ich wykonania. Wdrożenie złożonego wzmocnienia w odwrotnej sytuacji prowadzi do niezamierzonych zwiększenia sztywności podtorza, które może mieć niekorzystny wpływ na pracę toru kolejowego.

## WNIOSKI

Wykonawstwo wzmocnień górnej strefy podtorza wiąże się z licznymi problemami. Jednym z nich, z uwagi na stwierdzone na budowie mniejsze od projektowych rzeczywiste wartości parametrów gruntów podtorza (wtórny modułu

odkształcenia i wskaźnika zagęszczenia), jest konieczność zaprojektowania i wdrożenia konstrukcji zamiennych.

Przedstawione w artykule konstrukcje wzmocnień górnej strefy podtorza, które w zależności od sytuacji mogą być konstrukcjami bazowymi lub zamiennymi, charakteryzują się różną efektywnością techniczną, technologiczną i ekonomiczną. Przeprowadzona analiza potwierdziła, że nie można wskazać uniwersalnego typu konstrukcji, która niezależnie od występujących warunków gruntowych byłaby konkurencyjna względem pozostałych. Wykazano, że każdy z rozpatrywanych typów warstwy ochronnej ma ograniczony zakres stosowania, poza którym jego użycie jest niewskazane.

Najmniej efektywną konstrukcją, ze względu na problemy technologiczne i znaczny koszt realizacji, jest warstwa podwójna. W analizowanym zakresie zmienności wartości wtórnych modułów odkształcenia gruntów podtorza nie stwierdzono przypadku, aby konstrukcja ta była najlepszą spośród rozpatrywanych. Zastosowanie tego rozwiązania wymaga zatem szczególnego uzasadnienia.

W sprzyjających warunkach gruntowych (wtórny moduł odkształcenia gruntów podtorza o wartości większej niż 60 MPa) zalecanym typem wzmocnienia podtorza jest pojedyncza warstwa ochronna, również zbrojona geosiatką. Konstrukcja ta charakteryzuje się niewielkim stopniem skomplikowania robót, możliwością wykonywania w dowolnej technologii oraz małym kosztem realizacji. Efektywność tej konstrukcji jest odwrotnie proporcjonalna do jej grubości. Wraz z rosnącą grubością zwiększają się: zapotrzebowanie na kruszywo, objętość robót ziemnych i koszty realizacji. Można przyjąć, że uzasadniona ekonomicznie grubość graniczna dla tej konstrukcji wynosi 40 cm.

W niesprzyjających warunkach gruntowych (wtórny moduł odkształcenia gruntów podtorza o wartości mniejszej niż 45 MPa), najbardziej optymalnym rozwiązaniem jest wstępne ulepszenie gruntów podtorza poprzez ich stabilizację spoiwami hydraulicznymi. Znacząco redukuje to docelową objętość robót ziemnych oraz zapotrzebowanie na materiał konstrukcyjny warstwy ochronnej, przy jednoczesnym zachowaniu konkurencyjnych kosztów w odniesieniu do innych rozwiązań. Wykonanie tej konstrukcji wymaga jednak mobilizacji dodatkowego sprzętu i wiąże się z wydłużonym czasem realizacji.

Ostatecznie na wybór optymalnego rozwiązania powinny mieć wpływ nie tylko wymagana jego grubość i koszt wykonania, ale też inne czynniki, jak np. stopień skomplikowania robót, konieczność mobilizacji dodatkowego sprzętu, występujące warunki gruntowe, pracochłonność robót, liczba stosowanych materiałów, wymagane wartości parametrów odbiorczych itp.

Liczbę niezbędnych zmian w projekcie wzmocnienia górnej strefy podtorza można zminimalizować poprzez realizację dokładnych przedprojektowych badań geotechnicznych podtorza. W badaniach tych szczególnie ważne są oznaczenia wtórnych modułów odkształcenia podtorza, gdyż parametr ten jest jednocześnie parametrem projektowym oraz kontrolnym i odbiorczym w czasie realizacji robót.

Autorzy składają podziękowania Recenzentom za czas poświęcony na merytoryczną analizę treści artykułu oraz za wniesienie cennych uwag, które wpłynęły na jego formę.

## LITERATURA

- BZÓWKA J. 2015 – Wybrane techniki wzmocnienia słabego podłoża gruntowego w budownictwie komunikacyjnym. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 3: 416–423.
- Eurocenbud, 2020 – Ceny Pozycji Katalogowych 2020.2.
- KĘDRA Z. 2017 – Technologia robót torowych. Wydaw. PG, Gdańsk.
- PAWŁOWSKI M., PROTOSAWICKI K., STRASZEWSKI W. 2018 – Wpływ sposobu ograniczenia ruchu pociągów na czas realizacji robót podtorzowych. *Przegląd Komunikacyjny*, 10: 25–29.
- PKP POLSKIE LINIE KOLEJOWE S.A., 2009 – Id-3. Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego. Warszawa.
- PKP POLSKIE LINIE KOLEJOWE S.A., 2016 – Wytyczne badań podłoża gruntowego na potrzeby budowy i modernizacji infrastruktury kolejowej Igo-I. Warszawa.
- SIEWCZYŃSKI Ł. 1998 – Znaczenie szczegółowości badań i projektu podtorza dla procesu inwestycyjnego. [W:] *Materiały Sympozjum Zakładu Dróg Kolejowych Politechniki Krakowskiej „Techniczne, ekonomiczne i prawne problemy procesów inwestycyjnych w drogach kolejowych”* Kraków-Zakopane 2–3 grudnia 1998 r.: 111–119.
- SIEWCZYŃSKI Ł., PAWŁOWSKI M. 2009 – Stabilizacja podtorza dla budowy warstwy ochronnej. [W:] *Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Nowoczesne metody stabilizacji podłoża pod nawierzchnie drogowe i kolejowe”*, Żmigród-Węglewo 22–23.10.2009 r.: 111–117.
- SIEWCZYŃSKI Ł., PAWŁOWSKI M. 2016 – Stosowanie równoważnych konstrukcji wzmocnień górnej strefy podtorza. [W:] *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne*, 2 (109), „Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w transporcie szynowym” cz. I. Droga kolejowa: 137–146.
- SKRZYŃSKI E. 2010 – Podtorze kolejowe. Kolejowa Oficyna Wydawnicza, Warszawa.
- SKRZYŃSKI E. 2015 – Problemy modernizacji i rewitalizacji podtorza. *Problemy Kolejnictwa*, 167: 71–86.
- TARNOWSKI M. 2020 – Efektywność wybranych metod wzmocnienia górnej strefy podtorza. Praca magisterska (promotor: Pawłowski M.), Politechnika Poznańska, Poznań.
- WIŁUN Z. 2005 – Zarys geotechniki. WKiŁ, Warszawa.
- ZELEK Z. 2009 – Projektowanie warstw ochronnych i podłoża kolejowych budowli ziemnych wzmocnionych geotekstylami. *Problemy Kolejnictwa*, 2009, 149: 37–52.

Praca wpłynęła do redakcji 7.06.2021 r.  
Akceptowano do druku 24.08.2021 r.