

## Ochrona mat wibroizolacyjnych przed uszkodzeniami na skutek obciążeń od nawierzchni kolejowych

### Protection of under ballast mats against damage Due to loads from railroad tracks



**Remigiusz Duszyński**

Dr inż.

Politechnika Gdańska

rdusz@pg.edu.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono zastosowanie georusztów o równomiernej sztywności radialnej w konstrukcjach podtorza w funkcji ochrony mat wibroizolacyjnych przed uszkodzeniami spowodowanymi przez nawierzchnię kolejową. Wskazano na znaczenie funkcji stabilizacyjnej jako kluczowego mechanizmu współpracy georusztu i kruszywa, wpływającego na zwiększenie nośności podłoża, wydłużenie trwałości podsypki oraz zapewnienie wymaganych parametrów eksploatacyjnych podsypki układanej na matach wibroizolacyjnych.

**Słowa kluczowe:** Stabilizacja mechaniczna; Georuszty trójosiowe; Maty wibroizolacyjne; Podtorze

**Abstract:** The paper presents the application of geogrids with uniform radial stiffness in subgrade structures in the function of protecting under ballast mats from damage caused by the railroad superstructure. The importance of the stabilizing function as a key mechanism of cooperation between geogrid and aggregate was pointed out, affecting the increase of subgrade bearing capacity, extension of ballast life and ensuring the required operating parameters of the ballast placed on anti-vibration mats

**Keywords:** Mechanical stabilization; Hexagonal geogrids; Under ballast mats; Railway trackbed

Wykorzystanie mat wibroizolacyjnych staje się coraz powszechniejsze. Na rynku dostępne są maty wykonane z poliuretanu, wełny mineralnej oraz granulatu gumowego łączonego spoiwem poliuretanowym. Producenci deklarują dla swoich wyrobów skuteczne tłumienie drgań, niski współczynnik przeszywnienia dynamicznego, a także zwiększenie trwałości nawierzchni. Deklarowane zalety są jednak ściśle związane z rodzajem konstrukcji dróg szynowych. O ile w przypadku mat podtłuczniowych nie występują krytyczne czynniki mogące w krótkim czasie prowadzić do uszkodzenia mat o tyle maty podtłuczniowe, stosowane w nawierzchniach podsypkowych, poddane są destrukcyjnemu oddziaływaniu ułożonego na ich powierzchni tłucznia.

W wielu ośrodkach badawczych prowadzone są prace, których celem jest ocena trwałości mat podtłuczniowych stosowanych w konstrukcji nawierzchni kolejowych. Wyniki badań trwałości mat wibroizolacyjnych stosowanych w

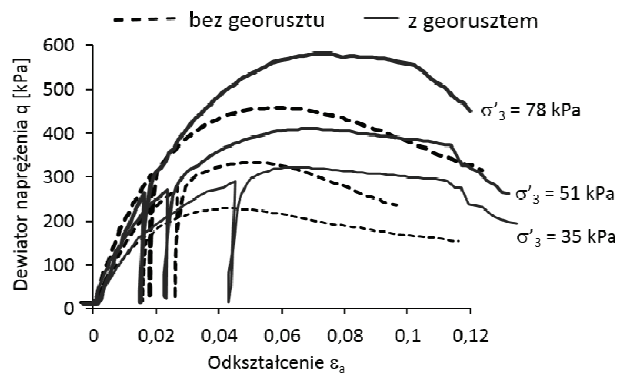
Ameryce Północnej przedstawiono w [8]. Jednocześnie prowadzone są badania których celem jest ocena możliwości zastosowania geosyntetyków w funkcji ochrony mat podtłuczniowych przed uszkodzeniami powodowanymi kontaktem z ostrymi krawędziami tłucznia, doznającego przemieszczeń na skutek oddziaływania obciążeń od ruchu pociągów.

#### Wykorzystania georusztów w funkcji stabilizacji do ochrony mat podtłuczniowych

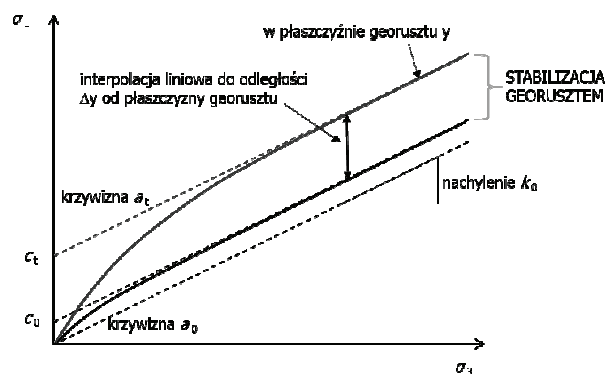
Zastosowanie geosyntetyków w budownictwie jest aktualnie powszechne, głównie ze względu na znaczące korzyści jakie wynikają z użycia tych materiałów. Szerokie spektrum zastosowań obejmuje funkcje: drenażową, filtracyjną, przeciwerozyjną, zbrojenia oraz stabilizacji. Funkcja stabilizacji, zdefiniowana w raporcie EOTA (Europejskiej Organizacji ds. Aprobatach Technicznych) [4], oznacza poprawę parametrów wy-

trzymałościowych kruszywa poprzez ograniczenie przemieszczeń pod obciążeniem [5]. Funkcja stabilizacyjna została również uznana przez ISO (Międzynarodową Organizację ds. Normalizacji) jako jedna z odrębnych funkcji geosyntetyków. Definicja stabilizacji geosyntetykami wprowadzona została w normie PN-EN ISO 10318 [10].

Dzięki zazębieniu się ziaren kruszywa w oczkach georusztu oraz klinowaniu się kolejnych ziaren w skrzepowanej warstwie ziaren zazębionych, uzyskiwana jest zwiększona odporność na obciążenia oraz ograniczone jest przemieszczenie warstwy tłucznia poddanej cyklicznym obciążeniom dynamicznym od ruchu pociągów. W przypadku podtorza, wykorzystanie geosiatek o sztywnych węzłach i równomiernej sztywności radialnej, często nazywanych georusztami heksagonalnymi, ma szczególne znaczenie przy poprawie nośności warstw słabego podłoża gruntowego, zwiększeniu trwałości i ograniczeniu deformacji warstw podsypki oraz



1. Efekt stabilizacji mechanicznej [7]



2. Obwódnia zniszczenia kruszywa stabilizowanego georusztem trójosiowym [7]

zapewnieniu właściwych parametrów pracy posypki tłuczniowej układanej na matach wibroizolacyjnych.

## Stabilizacja kruszywa georusztem

Połączenie georusztu i kruszywa tworzy stabilizowaną mechanicznie warstwę kompozytową o znacząco lepszych właściwościach i większych możliwościach przenoszenia obciążeń w porównaniu z samą warstwą kruszywa.

Mechanizm współpracy obu materiałów przeanalizowali Lees i Clausen [7] w badaniach trójosiowych, w specjalnie zaprojektowanym i zbudowanym aparacie o średnicy 50 cm i wysokości 100 cm. Dzięki takim wymiarom możliwe było stosowanie w badaniach tłucznia, którego wskaźnik różnoziarnistości wynosił  $C_u=23$ , średnice miarodajne  $d_{60}=8\text{ mm}$  i  $d_{100}=40\text{ mm}$ , a stopień zagęszczenia  $I_D \geq 0,95$ . Badania przeprowadzono zarówno dla samego kruszywa jak i dla kruszywa i georusztu trójosiowego ułożonego w połowie wysokości próbki. Wykresy dewiatora naprężenia  $q$  względem średniego odkształcenia osiowego  $\epsilon_s$  przedstawione na rysunku 1 pokazują zwiększoną maksymalną wytrzymałość na ścinanie w gruncie stabilizowanym georusztem dla każdej z trzech wielkości przyłożonego naprężenia ścisającego.

Wzrost wytrzymałości na ścinanie próbki stabilizowanej georusztem wynika z ograniczenia przemieszczeń i obrotów ziaren kruszywa. Na uwagę zasługuje także większa wartość odkształcenia kruszywa stabilizowanego, przy której następuje zniszczenie. Ścięcie próbki samego kruszywa wystąpiło przy odkształceniu około 4-5 %, podczas gdy znaczące osłabienie wytrzymałości na ścinanie próbki stabilizowanej georusztem zanotowano przy odkształceniu około 10%.

Ponieważ maksymalne ograniczenie przemieszczeń kruszywa występuje bezpośrednio w płaszczyźnie ułożenia georusztu i zmniejsza się wraz z odległością od tej płaszczyzny, uznano że obwódnia zniszczenia zmienia się liniowo od wartości maksymalnej w płaszczyźnie georusztu do wartości minimalnej w odległości  $\Delta y$ , gdzie przyjmuje się powierzchnię zniszczenia jak dla kruszywa bez stabilizacji (rys. 2).

W rezultacie przeprowadzonych badań Lees i Clausen opracowali liniowo sprężysty, idealnie plastyczny model konstytutywny geokompozytu (kruszywo + georuszt) wykorzystywany w analizach numerycznych MES w programie Plaxis 2D 2018. Wiarygodność modelu oraz dokładność wyznaczenia naprężeń niszczących została potwierdzona w analizie wstecznej.

## Badania wpływu georusztu na właściwości kruszywa w podtorzu

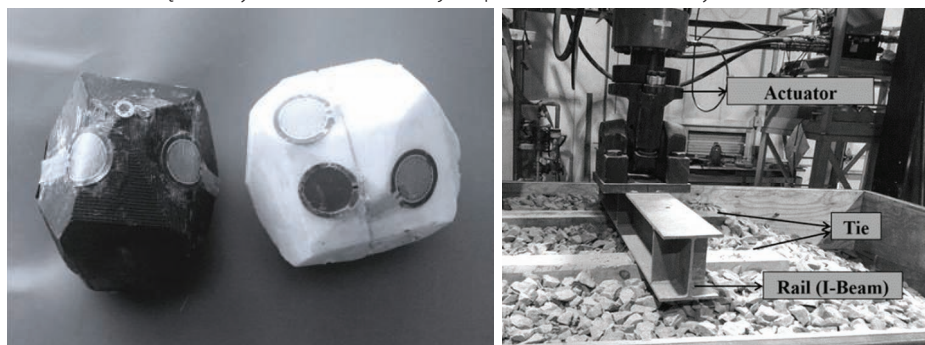
Na Uniwersytecie Pensylwania w USA zrealizowany został program badawczy, nakierowany na określenie wpływu georusztów na kruszywo w nawierzchniach podsypki tłuczniowej [9]. Na stanowisku modelowym badano wpływ oddziaływania cyklicznych obciążeń dynamicznych od przejazdu pociągów na zachowanie się kruszywa bez stabilizacji

oraz ze stabilizacją za pomocą georusztu dwuosowego oraz trójosiowego, ułożonego 25 cm poniżej górnej warstwy podsypki tłuczniowej.

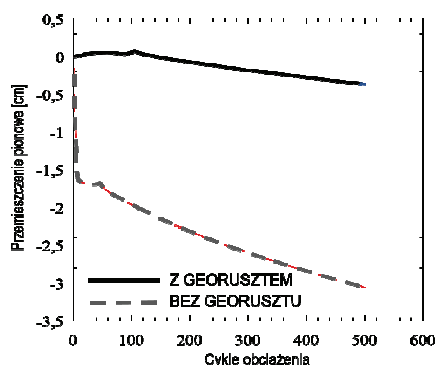
Do monitorowania ruchu ziaren kruszywa wykorzystano „SmartRock” (rys. 3) – bryłki kruszywa uformowane techniką druku 3D, wyposażone w bezprzewodowe czujniki rejestrujące położenie, obrót oraz przesunięcie elementu w przestrzeni. Mierzone parametry były rejestrowane z częstotliwością 500 Hz.

„SmartRock” zainstalowano na stanowisku badawczym w konstrukcji symulującej nawierzchnię kolejową. Konstrukcja składająca się z warstwy tłucznia o grubości 25 cm została obciążona cyklicznie z częstotliwością 1 Hz. Badania przeprowadzono na sekcji kontrolnej – bez georusztu i sekcji zbrojonej georusztem heksagonalnym. Georuszt został umieszczony na spodzie warstwy kruszywa, a SmartRock na poziomie 10 cm powyżej georusztu.

Na rysunku 4 przedstawiono przemieszczenie pionowe górnej warstwy podsypki tłuczniowej w zależności od liczby cykli obciążenia. W obu badaniach przemieszczenie wzrastało wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia, jednak dla badania bez georusztu wielkość przemieszczenia pionowego gwałtownie wzrosła w pierwszych 10 cyklach obciążenia, a maksymalne pomierzone przemieszczenie wyniosło 30 mm. W



3. Badania „SmartRock” (po lewej bryłki SmartRock, po prawej stanowisko badawcze) [9]



4. Przemieszczenie pionowe w zależności od liczby cykli obciążenia [9]

ze wzrostem liczby cykli obciążenia.

Na rysunku 6 przedstawiono przemieszczenia bryłek SmartRock w trakcie 500 cykli obciążenia w badaniach bez georusztu i z georusztem. Wyraźnie zauważalne jest oddalenie się obserwowanego ziarna z początkowego miejsca lokalizacji wraz ze wzrostem liczby cykli obciążeń, co wskazuje na znaczące rozluźnienie warstwy podsypki tłuczniowej w sekcji bez stabilizacji georusztem heksagonalnym.

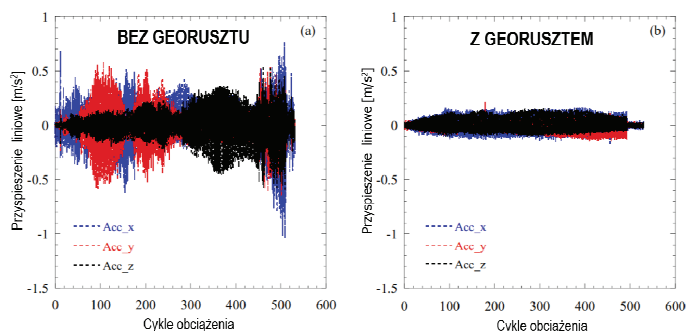
ści radialnej może być wykorzystana w konstrukcji podtorza na trzy możliwe sposoby:

- stabilizacja warstwy ochronnej,
- stabilizacja podsypki tłuczniowej,
- stabilizacja podsypki tłuczniowej na matach wibroizolacyjnych.

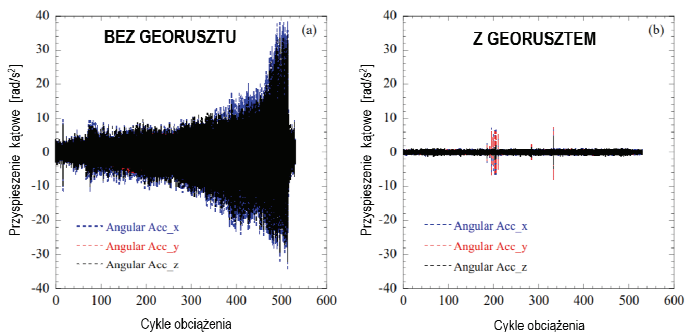
## Stabilizacja warstwy ochronnej

Stabilizacja warstwy ochronnej związana jest z występowaniem w podłożu gruntów o niekorzystnych parametrach geotechnicznych. Zastosowanie georusztu pozwala na podwyższenie nośności podłoża pod konstrukcją lub na zmniejszenie grubości kruszywa w stosunku do grubości bez georusztu, przy uzyskaniu tych samych parametrów nośności na górze warstwy ochronnej. Wspomniana redukcja grubości może sięgać do 50%, ale każdorazowo wymaga indywidualnej analizy. Przy bardzo słabej nośności gruntów w podłożu konieczne może być zastosowanie stabilizacji w układzie wielowarstwowym. Schematyczną lokalizację georusztu do stabilizacji warstwy ochronnej przedstawiono na rysunku 7.

## Przemieszczenia ziaren kruszywa



## Obroty ziaren kruszywa



5. Przemieszczenia i obroty ziaren SmartRock na skutek działania obciążeń cyklicznych [9]

przypadku badania z georusztem przyrost wielkości osiadań był zdecydowanie wolniejszy, a maksymalne przemieszczenie miało wartość 4 mm i po 500 cyklach obciążenia była mniejsza o 85% od przemieszczenia pomierzonego w badaniu bez georusztu.

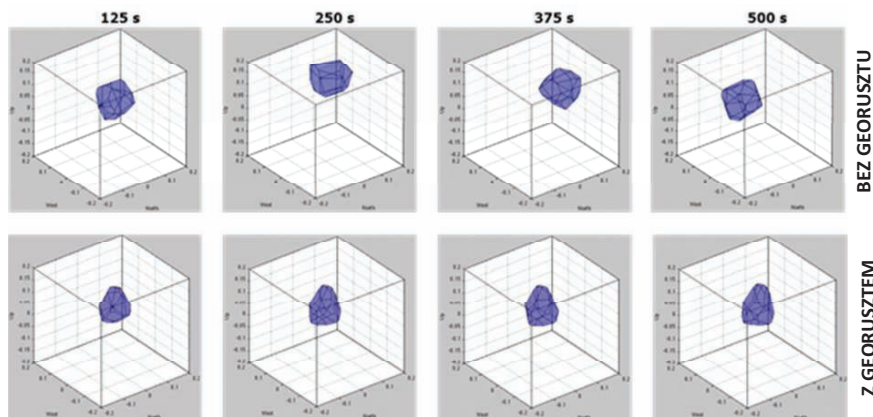
Analiza wyników potwierdziła wpływ stabilizacji mechanicznej georusztem heksagonalnym na znaczące ograniczenie przemieszczeń i obrotu ziaren kruszywa w warstwie podsypki tłuczniowej. Na rysunku 5 zestawiono wielkość przemieszczeń i obrotów bryłek SmartRock w badaniu bez georusztu i z georusztem trójosiowym. Przyspieszenia obrotu w sekcji stabilizowanej georusztem wynosiło w trakcie całego badania około 2 rad/s<sup>2</sup>, podczas gdy w badaniu na sekcji kontrolnej, gdzie nie stosowano georusztu, wartość początkowa wynosiła około 4 rad/s<sup>2</sup> i wzrosła do 30 rad/s<sup>2</sup> wraz

## Zastosowanie georusztów do stabilizacji kruszywa w inżynierii kolejowej

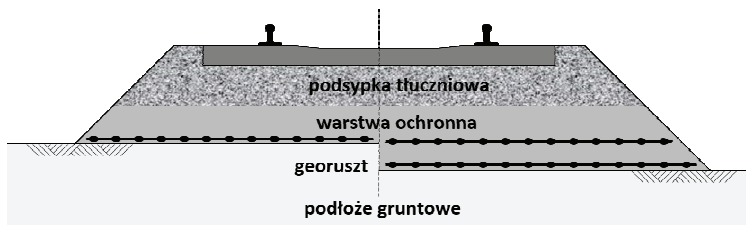
Funkcja stabilizacji kruszywa za pomocą geosiatek o równomiernej sztywno-

## Stabilizacja podsypki tłuczniowej

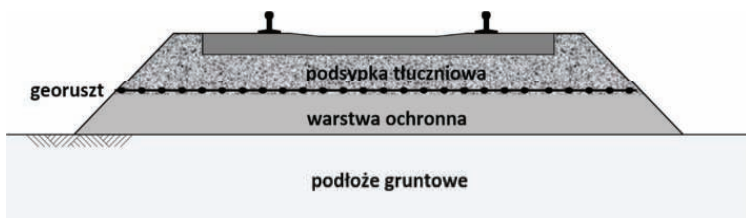
Zastosowanie georusztów do stabilizacji warstwy podsypki wpływa na ograniczenie przemieszczeń kruszywa, a przez to na ograniczenie jego degradacji w wyniku oddziaływania cyklicznych obciążeń dynamicznych. Większa sztywność warstwy podsypki wpływa na redukcję prędkości przyrostu jej deformacji, a w konsekwencji na redukcję deformacji (odkształcenia plastycznego) powstających w warstwie ochronnej. Na ogół deformacja ta objawia się nieregu-



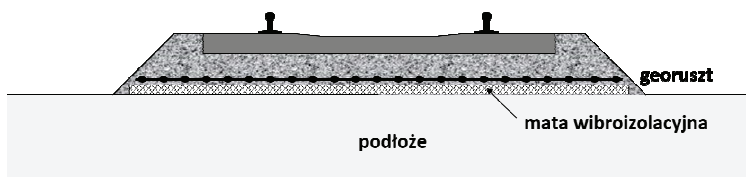
6. Przemieszczenia ziaren SmartRock w warstwie podsypki tłuczniowej (górne bez stabilizacji, dolne ze stabilizacją georusztem TriAx) [9]



7. Zastosowanie georusztu do stabilizacji warstwy ochronnej, po lewej układ jednowarstwowy, po prawej wielowarstwowy



8. Zastosowanie georusztu do stabilizacji podsyпки tłuczniowej



9. Zastosowanie georusztu do stabilizacji podsyпки tłuczniowej na matach wibroizolacyjnych

larnym osiadaniem toru i pogarszaniem jego geometrii w planie.

Badania wpływu georusztu na redukcję osiadania i tym samym niezbędnych zabiegów utrzymaniowych zostały zrealizowane na Uniwersytecie w Nottingham (Wielka Brytania). Analiza wyników [2] wykazują wzrost ilości cykli obciążeniowych o współczynnik 2,5 po zastosowaniu georusztu. Przykład zastosowania georusztu do stabilizacji podsyпки tłuczniowej przedstawiono na rysunku 8.

## Stabilizacja podsyпки tłuczniowej na matach wibroizolacyjnych

Coraz częściej w inwestycjach kolejowych istotnym zagadnieniem staje się uzyskanie właściwych parametrów pracy podsyпки tłuczniowej układanej na matach wibroizolacyjnych. Pochłanianie wibracji wymaga użycia materiałów, które charakteryzują się stosunkowo niewielką sztywnością statyczną i dynamiczną, co bezpośrednio wpływa na współpracę z tłuczniami. Rezultaty badań przeprowadzonych przez British Rail, przedstawione między innymi w [1], wskazują na znaczące ograniczenie deformacji warstwy podsyпки oraz przemieszczeń toru na odcinkach, gdzie w podłożu zastosowane zostały maty wibroizolacyjne.

## Przykłady zastosowania georusztów do stabilizacji podtorza

Zastosowanie geosiatek o równomiernej sztywności radialnej do stabilizacji kruszywa w konstrukcji podtorza jest często stosowane przy budowie i modernizacji linii kolejowych na całym świecie. Krajowe doświadczenia w tej dziedzinie przedstawiają się równie interesująco. Poniżej omówiono trzy wybrane realizacje z terenu Polski.

### LK E65 Gdynia Warszawa

Modernizacja linii E65 zrealizowana została w latach 2012 – 2014 [3]. Na podstawie ekspertyzy geotechnicznej na obszarze LCS Gdańsk na szlaku Pruszcz Gdański – Gdańsk Południowy pod nasypem kolejowym stwierdzono lokalnie niekorzystne warunki gruntowe w postaci występujących w podłożu torfów o miąższości do 4,5 m. Istniejący nasyp zbudowany był z gruntów piaszczystych z domieszką pyłów. Wymagania odnośnie warstwy ochronnej zakładały doprowadzenie jej bezpośrednio pod warstwą podsyпки tłuczniowej do nośności  $E2 \geq 120$  MPa, podczas gdy istniejące podłoże gruntowe charakteryzowało się wtórnym modułem odkształcenia  $E2 \geq 25$  MPa. W rezultacie przeprowadzonych obliczeń przyjęto konstrukcję

o całkowitej grubości 50 cm, na którą składały się:

- geowłóknina separacyjno filtracyjna,
- georuszt trójosiowy,
- warstwa kruszywa łamanego 0/31,5 o grubości 25 cm,
- georuszt trójosiowy,
- warstwa kruszywa łamanego 0/31,5 o grubości 25 cm.

### LK 273 Zielona Góra - Niedoradz

W trakcie modernizacji LK 273 na odcinku Głogów - Zielona Góra - Rzepin - Dolna Odra, sekcja Zielona Góra-Niedoradz, realizowanej w latach 2017-2018, problemem były zalegające w podłożu pod istniejącą nawierzchnią kolejową, grunty spoiste w postaci glin pylastych i piasków gliniastych w stanie plastycznym i miękkoplastycznym. Zastosowanie georusztu heksagonalnego do stabilizacji górnej warstwy ochronnej wykonanej z niesortu kamiennego o grubości warstwy 35cm pozwoliło uzyskać w wymagane wartości nośności określone modułem odkształcenia  $E2 \geq 110$  MPa i zagęszczenie  $E2/E1 \leq 2,2$  [3].

### Centralna Magistrala Kolejowa

W roku 2008 na odcinku testowym Centralnej Magistrali Kolejowej w rejonie miejscowości Psary na sekcji o długości około 800 m wykonano konstrukcję nawierzchni przedstawioną na rysunku 12. Składała się ona z kompozytu w postaci warstwy tłuczni stabilizowanej georusztami i miejscowo stabilizowanej specjalnym spoiwem wykonanym na bazie żywicy poliuretanowych (rozwiązanie autorskie opracowane w Zakładzie Infrastruktury Transportu Wydziału Transportu PW [6]). Było to nowatorskie rozwiązanie polegające na zwiększeniu odporności na dekonsolidację warstwy podsyпки w obszarach narażonych na intensywne drgania. Prace wykonano przy użyciu maszyny AHM (rys. 13).

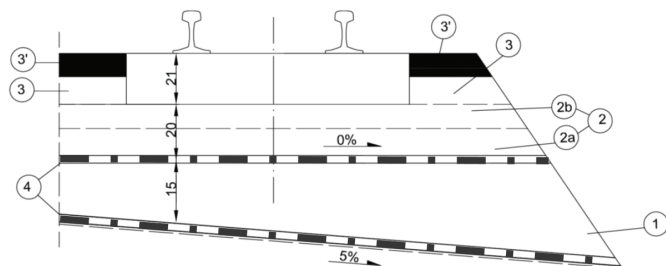
W okresie badań tor przeniósł obciążenie 18,6 Tg, tzn. nieznaczne w stosunku do obciążenia jakie może przenieść ta nawierzchnia w całym okresie eksploatacji. Na podstawie uzyskanych wyników, autorzy badań stwierdzili że odporność nawierzchni z kompozytem



10. Układanie pierwszej warstwy georusztu trójosiowego w trakcie modernizacji linii E65 na obszarze LCS Gdańsk



11. Stabilizacja warstwy ochronnej w trakcie modernizacji linii LK 273



12. Nawierzchnia testowa z kompozytem tłuczniowym [6]

1 – dolna warstwa zagęszczonego tłucznia, 2 – górna warstwa zagęszczonego tłucznia, 3 – zagęszczona warstwa tłucznia, w której zatopiona jest rama toru, 3' – warstwa tłucznia stabilizowanego chemicznie, 4 – georuszt



13. Układanie georusztu Tensar TriAx za pomocą maszyny AHM

tłuczniowym jest większa o około 30 % w stosunku do stosowanej nawierzchni bez kompozytu [6].

Badania wykazały również, że nawierzchnię z kompozytem tłuczniowym charakteryzują mniejsze syntetyczne wskaźniki stanu toru w porównaniu z torrem konwencjonalnym, co potwierdzają również wyniki oceny odkształceń pionowych i poziomych.

## Podsumowanie

Coraz częstsze stosowanie mat wibroizolacyjnych w konstrukcjach kolejowych, zwłaszcza w nawierzchniach podsypkowych, które wykonuje się z kruszyw produkowanych w procesie kruszenia twardych skał typu bazalt, sjenit lub dolomit, stawia dodatkowe wymogi w zakresie ochrony mat przed destrukcyjnym działaniem ostrych krawędzi tłucznia.

Na skutek działania cyklicznych obciążeń dynamicznych, ziarna tłucznia przemieszczają się i obracają powodując uszkodzenia mat podtłuczniowych mogące prowadzić do ich całkowitej degradacji. Zastosowanie stabilizacji podsypki tłuczniowej georusztem wielokierunkowym wpływa na znaczące ograniczenie przemieszczeń tłucznia, a przez to na wydłużenie trwałości nawierzchni oraz wbudowanych w nią mat

wibroizolacyjnych. Wyniki badań modelowych oraz pomiary w skali naturalnej potwierdziły, że zastosowanie georusztów o równomiernej sztywności radialnej w konstrukcji podtorza wpływa na zwiększenie nośności podłoża, wydłużenie trwałości podsypki oraz zapewnienie wymaganych parametrów eksploatacyjnych podsypki układanej na matach wibroizolacyjnych. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] Braja M. Das, Use of geogrid in the construction of railroads, Innovative Infrastructure Solutions, June 2016.
- [2] Brown SF, Kwan J, Thom NH (2007) Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast. Geotext Geomembr 25(6):326–335
- [3] Duszyński R., Gołos M., Georuszty heksagonalne w stabilizacji podtorza, Inżynier budownictwa (marzec 2021).
- [4] European Organisation for Technical Approval, Report TR 41 2012
- [5] Gołos M., Wolaniecki A., Stabilizacja podtorza kolejowego przy użyciu georusztu heksagonalnego (trójosiowego) na przykładzie realizacji przebudowy linii kolejowej E65 na odcinku Warszawa-Gdynia-LCS

Gdańsk. Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP, O. w Krakowie Nr 3 (10), 2013.

- [6] Kukulski J., Towpik K., Basiewicz T., Gołaszewski A., Odkształcenie nawierzchni kolejowej z kompozytem tłuczniowym. Wydział Transportu, Politechnika Warszawska. Problemy Kolejnictwa – Zeszyt 166 (marzec 2015).
- [7] Lees AS; Clausen J; 2019. The strength envelope of granular soil stabilised by multi-axial geogrid in large triaxial tests. Canadian Geotechnical Journal
- [8] Lima A., Dersch M. S., Qian Y, Tutumluer E., Edwards J.R, Laboratory mechanical fatigue performance of under-ballast mats subjected to North American loading conditions. Proceedings of the 11th International Heavy Haul Association Conference (IHHA 2017), Cape Town, South Africa, 2–6 September 2017. pp 336 – 341.
- [9] Liu S, Huang H, Qiu T, Kwon J; Effect of geogrid on railroad ballast studied by "Smartrock", Transportation Research Board Annual Meeting, January 10-14, 2016 Washington, D.C.
- [10] PN-EN ISO 10318-1:2015-12/A1:2018-09. Geosyntetyki - Część 1: Terminy i definicje