

ZASTOSOWANIE GEORUSZTÓW O RÓWNOMIERNEJ SZTYWNOŚCI RADIALNEJ W BUDOWIE I MODERNIZACJI PODTORZA

Remigiusz Duszyński

dr inż., Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, tel.: +48 58 342 27 01, email: rdusz@pg.edu.pl

***Streszczenie.** W artykule przedstawiono zastosowanie georusztów o równomiernej sztywności radialnej w konstrukcjach podtorza. 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, podtorze*

1. Wprowadzenie

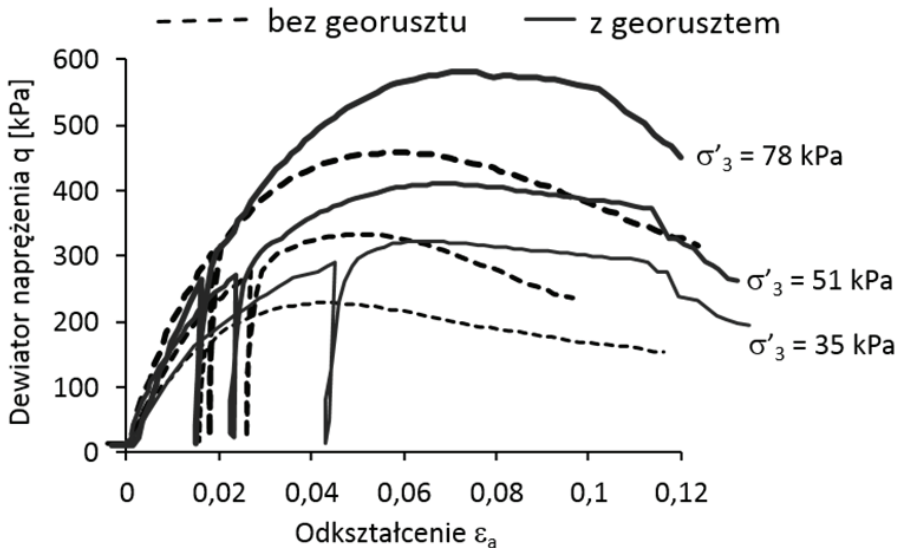
Wykorzystanie geosyntetyków w budownictwie infrastrukturalnym stało się powszechne ze względu na korzyści wynikające z ich użycia. Szerokie spektrum zastosowań obejmuje funkcje: drenażową, filtracyjną, przeciwoerozyjną, zbrojenia oraz stabilizacji. Funkcja stabilizacji, zdefiniowana w raporcie EOTA (Europejskiej Organizacji ds. Aprobat Technicznych) [5], oznacza poprawę parametrów wytrzymałościowych kruszywa poprzez ograniczenie przemieszczeń pod obciążeniem [2]. 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 [4].

Dzięki zazębieniu się ziaren kruszywa w oczkach georusztu oraz klinowaniu się kolejnych ziaren w skrępowanej 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 zapewnieniu właściwych parametrów pracy posypki tłuczniowej układanej na matach wibroizolacyjnych.

2. 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 [6] 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 tłuczni, którego wskaźnik różnoziarnistości wynosił $C_u=23$, średnice miarodajne $d_{60}=8$ mm i $d_{100}=40$ 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 ε_a przedstawione na rys. 1 pokazują zwiększoną maksymalną wytrzymałość na ścinanie w gruncie stabilizowanym georusztem dla każdej z trzech wielkości przyłożonego naprężenia ściskającego.



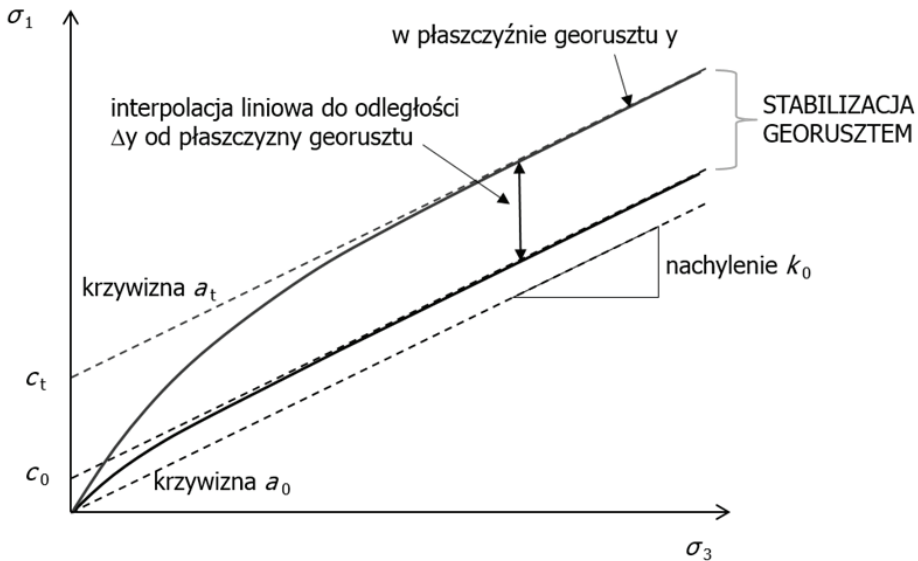
Rys. 1. Efekt stabilizacji mechanicznej [6]

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 obwódnicznica zniszczenia zmienia się liniowo od wartości maksymalnej w płaszczyźnie georusztu do wartości minimalnej w odległości Δy , 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.



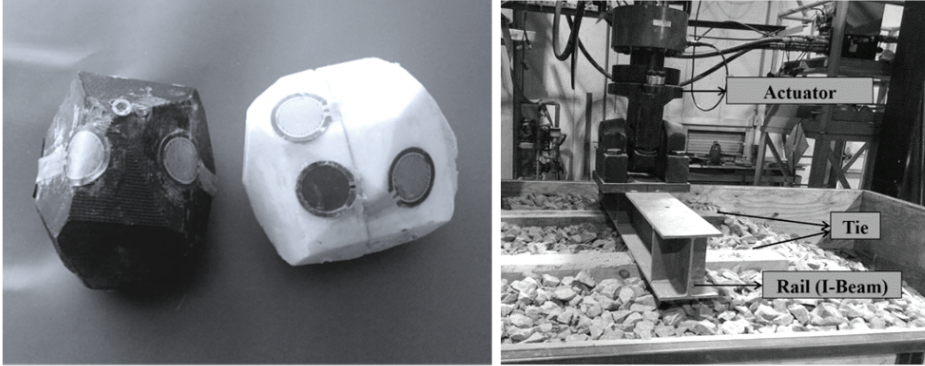
Rys. 2. Obwódnicznica zniszczenia kruszywa stabilizowanego georusztem trójosiowym [6]

3. 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 [7]. Na stanowisku modelowym badano wpływ oddziaływania cyklicznych obciążeń dynamicznych od przejazdu pociągów na zachowanie się kruszywa bez stabilizacji oraz ze stabilizacją za pomocą georusztu dwuosiowego oraz trójosiowego, ułożonego 25 cm poniżej górnej warstwy podsypki tłuczniowej.

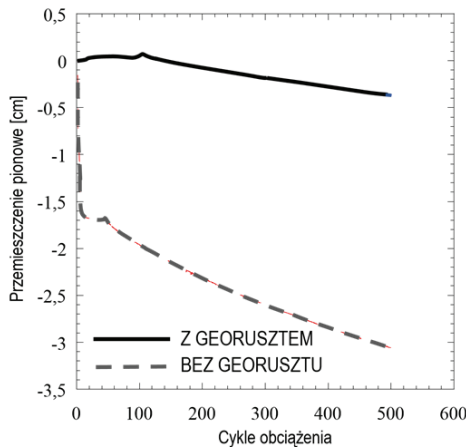
Do monitorowania ruchu ziaren kruszywa wykorzystano „SmartRock” (rys. 3) – bryłki kruszywa uformowane techniką druku 3D, wyposażone w bezprzewodowe czujniki rejestrujące położenie, obrót oraz przesunięcie elementu w przestrzeni. Mierzone parametry były rejestrowane z częstotliwością 500 Hz.

„SmartRock” zainstalowano na stanowisku badawczym w konstrukcji symulującej nawierzchnię kolejową. Konstrukcja składająca się z warstwy tłuczniwa 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.



Rys. 3. Badania „SmartRock” (po lewej bryłki SmartRock, po prawej stanowisko badawcze) {7}

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

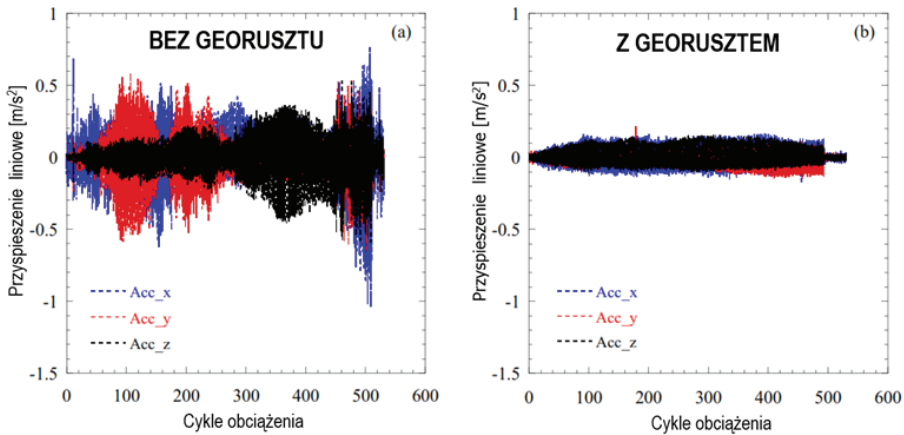


Rys. 4. Przemieszczenie pionowe w zależności od liczby cykli obciążenia {7}

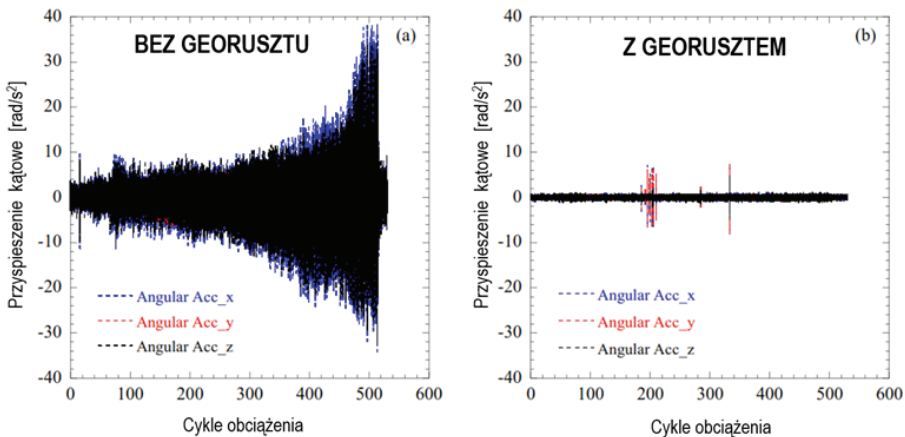
Analiza wyników potwierdziła wpływ stabilizacji mechanicznej georusztem heksagonalnym na znaczące ograniczenie przemieszczeń i obrotu ziaren kruszywa w warstwie podsypki tłuczniowej. Na rys. 5 zestawiono wielkość przemieszczeń i obrotów bryłek SmartRock w badaniu bez georusztu i z georusztem trójosiowym.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

Na rys. 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.

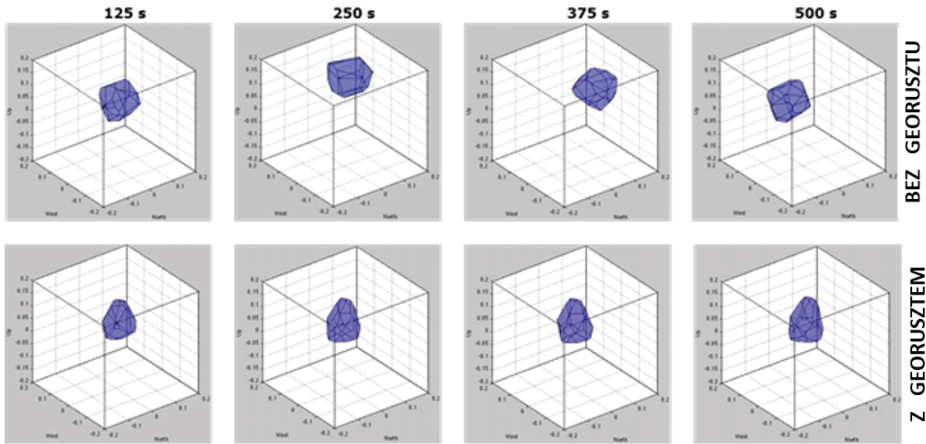
Przemieszczenia ziaren kruszywa



Obroty ziaren kruszywa



Rys. 5. Przemieszczenia i obroty ziaren SmartRock na skutek działania obciążeń cyklicznych (7)



Rys. 6. Przemieszczenia ziaren SmartRock w warstwie podsypki tłuczniowej (górne bez stabilizacji, dolne ze stabilizacją georusztem TriAx) (7)

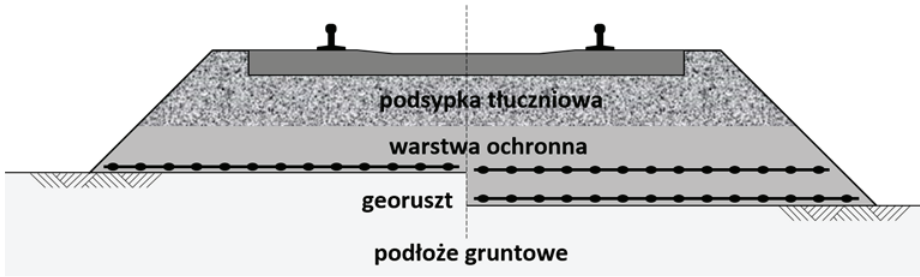
4. Zastosowanie georusztów do stabilizacji kruszywa w inżynierii kolejowej

Funkcja stabilizacji kruszywa za pomocą geosiatek o równomiernej sztywności radialnej może być wykorzystana w konstrukcji podtorza na trzy możliwe sposoby:

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

4.1. 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 rys. 7.



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

4.2. 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 nieregularnym 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 [8] wykazuje wzrost ilości cykli obciążeniowych o współczynnik 2,5 po zastosowaniu georusztu. Przykład zastosowania georusztu do stabilizacji podsypki tłuczniowej przedstawiono na rys. 8.

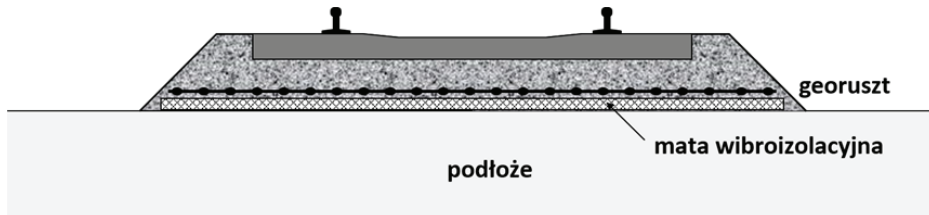


Rys. 8. Zastosowanie georusztu do stabilizacji podsypki tłuczniowej

4.3. Stabilizacja podsypki tłuczniowej na matach wibroizolacyjnych

Coraz częściej w inwestycjach kolejowych istotnym zagadnieniem staje się uzyskanie właściwych parametrów pracy podsypki 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 [9], wskazują na znaczące ograniczenie deformacji warstwy podsypki oraz przemieszczeń toru na odcinkach, gdzie w podłożu zastosowane zostały maty wibroizolacyjne.



Rys. 9. Zastosowanie georusztu do stabilizacji podsypki tłuczniowej na matach wibroizolacyjnych

5. 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.

5.1. LK E65 Gdynia Warszawa

Modernizacja linii E65 zrealizowana została w latach 2012 – 2014 [1]. 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 podsypki 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.



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

5.2. LK 273 Zielona Góra - Niedoradz

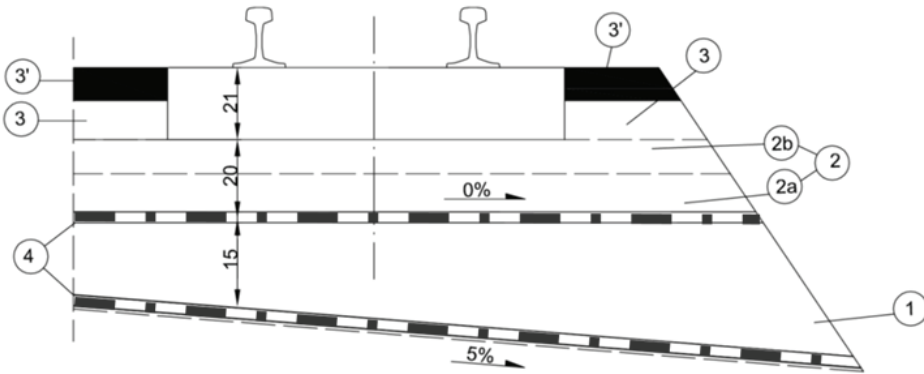


Rys. 11. Stabilizacja warstwy ochronnej w trakcie modernizacji linii LK 273

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 pylistych i piasków gliniastych w stanie plastycznym i miękkoplastycznym. Zastosowanie georusztu heksagonalnego do stabilizacji górnej warstwy ochronnej wykonanej z niesortu kamiennego o grubości warstwy 35 cm pozwoliło uzyskać wymagane wartości nośności określone modułem odkształcenia $E2 \geq 110$ MPa i zagęszczenie $E2/E1 \leq 2,2$ [1].

5.3. 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 rys. 12. Składała się ona z kompozytu w postaci warstwy tłucznia stabilizowanego georusztami i miejscowo stabilizowanej specjalnym spoiwem wykonanym na bazie żywicy poliuretanowych (rozwiązanie autorskie opracowane w Zakładzie Infrastruktury Transportu Wydziału Transportu PW [3]). Było to nowatorskie rozwiązanie polegające na zwiększeniu odporności na dekonsolidację warstwy podsypki w obszarach narażonych na intensywne drgania. Prace wykonano przy użyciu maszyny AHM (rys. 13).



Rys. 12. Nawierzchnia testowa z kompozytem tłuczniovym {3}

- 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

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 tłuczniovym jest większa o około 30% w stosunku do stosowanej nawierzchni bez kompozytu [3].

Badania wykazały również, że nawierzchnię z kompozytem tłuczniovym charakteryzują mniejsze syntetyczne wskaźniki stanu toru w porównaniu z torem

konwencjonalnym, co potwierdzają również wyniki oceny odkształceń pionowych i poziomych.



Rys. 13. Układanie georusztu Tensar TriAx za pomocą maszyny AHM

6. Podsumowanie

Wymogi stawiane warstwie podsypki tłuczniowej sprawiają, że wykonuje się ją z kruszyw produkowanych w procesie kruszenia twardych skał typu bazalt, sjenit lub dolomit. Duże, kanciaste kruszywo o względnie jednolitym uziarnieniu ma zapewnić właściwy rozkład obciążeń oraz ułatwić odprowadzenie wody z warstwy podsypki. Na skutek działania cyklicznych obciążeń dynamicznych ziarna tłucznia przemieszczają się i obracają powodując osiadanie podkładów, stopniową erozję tłucznia, zwiększając liczbę cząstek drobnoziarnistych i pogarszając stabilność tłucznia poprzez ścieranie ostrych krawędzi (wierzchołków) ziaren. Rozpad tłucznia powoduje większe odkształcenia, słabe odwadnianie (częściowo z powodu zanieczyszczenia tłucznia przez erodowane wierzchołki cząstek) oraz utratę podparcia strukturalnego. Przemieszczanie się i degradacja podsypki stanowi poważny problem w kolejnictwie, wpływając na koszty związane z utrzymaniem torów i ich trwałością.

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.

Bibliografia

- [1] Duszyński R., Gołos M., Georuszty heksagonalne w stabilizacji podtorza, Inżynier budownictwa (marzec 2021).
- [2] Gołos M., Wolaniecki A., Stabilizacja podtorza kolejowego przy użyciu georuszty 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.
- [3] Kukulski J., Towpik K., Basiewicz T., Gołaszewski A., Odkształcenie nawierzchni kolejowej z kompozytem tłuczniowym. Wydział Transportu, Politechnika Warszawska. Problemy Kolejnictwa – Zeszyt 166 (marzec 2015).
- [4] PN-EN ISO 10318-1:2015-12/A1:2018-09. Geosyntetyki - Część 1: Terminy i definicje.
- [5] European Organisation for Technical Approval, Report TR 41 2012.
- [6] Lees AS; Clausen J; 2019. The strength envelope of granular soil stabilised by multi-axial geogrid in large triaxial tests. Canadian Geotechnical Journal.
- [7] 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.
- [8] Brown SF, Kwan J, Thom NH (2007) Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast. Geotext Geomembr 25(6):326–335
- [9] Braja M. Das, Use of geogrid in the construction of railroads, Innovative Infrastructure Solutions, June 2016.