

STABILIZACJA PODTORZA KOLEJOWEGO PRZY UŻYCIU GEORUSZTU HEKSAGONALNEGO (TRÓJOSIOWEGO) NA PRZYKŁADZIE REALIZACJI PRZEBUDOWY LINII KOLEJOWEJ E65 NA ODCINKU WARSZAWA – GDYNIA - LCS GDAŃSK¹

Michał Gołoś

mgr inż., Drotest Sp. z o.o., Nowy Tuchom 2a, 80-209
Chwaszczyno k. Gdańska

Artur Wolaniecki

inż., Drotest Sp. z o.o., Nowy Tuchom 2a, 80-209
Chwaszczyno k. Gdańska

Streszczenie. Zagadnienia przedstawione w niniejszym artykule dotyczą określenia i wymagań związanych z funkcją stabilizacji warstwy kruszywa georusztem, która została zdefiniowana i szczegółowo opisana w raporcie Europejskiej Organizacji ds. Aprobata Technicznych (EOTA). Wyjaśnione zostały także różnice funkcji stabilizacyjnej i zbrojeniowej geosyntetyków. W celu dokładnego omówienia powyższego zagadnienia, autorzy artykułu podali mechanizmy występujące w przypadku prawidłowej interakcji kruszywa z georusztem, kluczowe parametry georusztu pełniącego funkcję stabilizacyjną (zupełnie różne od wymagań stawianych w funkcji zbrojeniowej) oraz możliwy zakres stosowania georusztów do stabilizacji warstw kruszywa w nawierzchniach kolejowych. Praktycznym odzwierciedleniem opisanych zagadnień teoretycznych jest omówiony szczegółowo przykład realizacji, dotyczący zastosowania georusztów heksagonalnych (trójosiowych) do stabilizacji warstwy kruszywa w konstrukcji nawierzchni kolejowej linii kolejowej E-65 Gdynia-Warszawa na obszarze LCS Gdańsk.

Słowa kluczowe: georuszt, stabilizacja kruszywa, wzmocnienie podłoża, warstwa ochronna, podsypka tłuczniowa, zazębianie kruszywa, skrępowanie boczne kruszywa

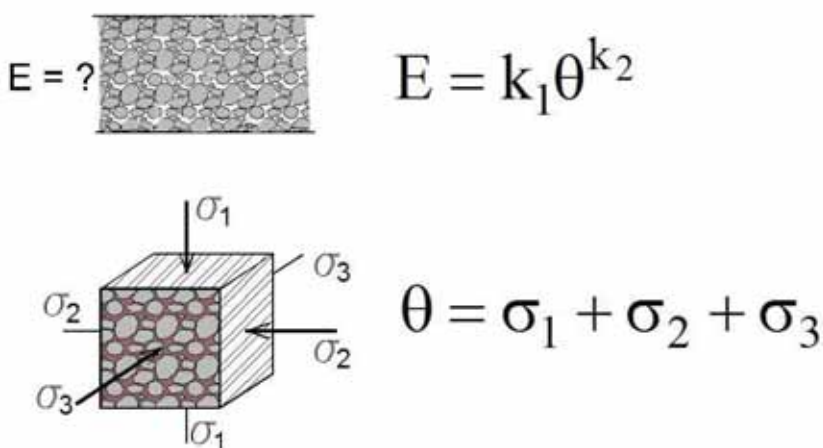
1. Funkcja stabilizacji. Kruszywo stabilizowane georusztem

Stabilizacja kruszywa georusztem oznacza poprawę parametrów warstwy mieszanki niezwiązanej (głównie nośności i zagęszczenia), dzięki ograniczeniu możliwości przemieszczeń ziaren kruszywa pod działaniem obciążenia, wynikającemu z mechanizmu zazębiania (zaklinowania) tych ziaren w sztywnym georuszcie. Zazębianie (ang. *interlocking*) to z kolei mechanizm współpracy kruszywa i georusztu, poddanych działaniu przyłożonego obciążenia, który wynika z unieruchomienia ziaren kruszywa w sztywnych oczkach georusztu, tzn. podczas układania i zagęszczania warstwy mieszanki niezwiązanej ziarna kruszywa częściowo penetrują w oczka i opierają się o żebra georusztu [1].

1 Wkład procentowy poszczególnych autorów: Gołoś M. 50%, Wolaniecki A. 50%

Mechanizm zążeńienia to kluczowy mechanizm, mający miejsce w warstwach mieszanki niezwiązanej stabilizowanej georusztem (warstwy podbudów drogowych i warstwy ochronne nawierzchni kolejowych) niezależnie od parametrów geotechnicznych podłoża gruntowego [2]. Mając jednak do czynienia ze słabym podłożem gruntowym, na którym układana jest warstwa kruszywa, to w przypadku braku jakiegokolwiek podparcia tej warstwy (np. stabilizacja georusztem lub spoiwem hydraulicznym) pod działającym obciążeniem od kół pojazdów (na etapie budowy lub późniejszej eksploatacji), nastąpi znaczne ugięcie warstwy z naturalną tendencją ziaren kruszywa w jej dolnej części do rozsuwania się na boki. W takim przypadku jakość, wytrzymałość i pozostałe parametry kruszywa mają niewielki wpływ na nośność warstwy, która ostatecznie będzie niska. Wprowadzenie georusztu o sztywnej strukturze, spowoduje, że będziemy mieli do czynienia ze zjawiskiem skrępowania lub utwierdzenia bocznego ziaren kruszywa (ang. *lateral confinement*) [3].

Wpływ zjawiska skrępowania bocznego ziaren kruszywa na wzrost modułu sprężystości warstwy kruszywa opisał Judycki w [3]. Zwraca tam uwagę na zależność modułu sprężystości kruszywa E od sumy naprężeń głównych ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$), zgodnie ze wzorem i schematem podanym na rys.1. Zależność ta przebiega w sposób następujący: wzrost wartości poziomych naprężeń utwierdzających kruszywo σ_2 oraz σ_3 , powoduje wzrost modułu E . Oznacza to, że w kruszywie ściskanym lub krępowanym bocznie (wysokie wartości σ_2 oraz σ_3), zjawisko rozsuwania się ziaren nie występuje, albo występuje w minimalnym zakresie, co powoduje wysoką odporność na powstawanie deformacji pionowych (odkształcenia pionowe maleją), a tym samym w konsekwencji uzyskiwanie wysokich wartości modułu kruszywa E . Wysokie wartości σ_2 oraz σ_3 powstają jednak tylko wtedy, gdy warstwa kruszywa jest odpowiednio podparta, tj. leży na stabilnym podłożu, uzyskanym w efekcie jego stabilizacji – czy to chemicznej czy mechanicznej z udziałem georusztu.

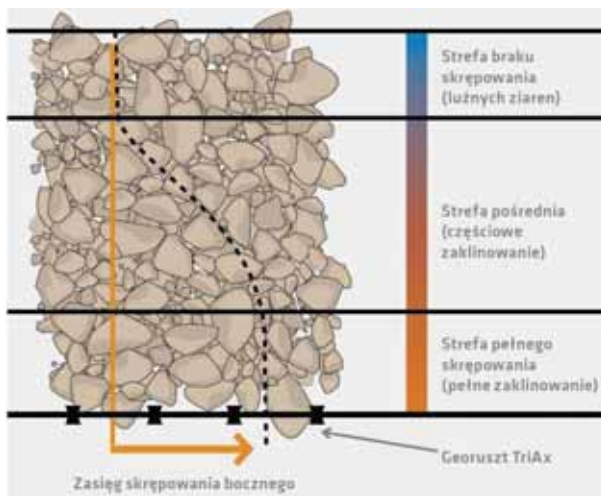


Rys. 1. Moduł sprężystości warstwy kruszywa niezwiązanego zależy od sumy naprężeń głównych $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$

Powyższe działanie georusztu zostało potwierdzone także przez Gryczmańskiego i Kawalca w [4], gdzie zdaniem autorów zadaniem układu kompozytowego kruszywo+georuszt, czyli tzw. geomateraca, jest m.in. redukcja poziomych odkształceń stabilizowanej warstwy kruszywa lub nasypu zbrojonego. Aby to osiągnąć wymagana jest przede wszystkim duża sztywność wielokierunkowa elementu kompozytowego (ang. *multi-directional stiffness*). Efekt takiego usztywnienia uzyskuje się z kolei dzięki wszechstronnemu skrępowaniu bocznemu wzajemnie zazębionych ziaren kruszywa w oczkach georusztu. Sprzyja temu duża liczba powierzchni kontaktu ziaren, a także wysoki procentowy udział otwartej powierzchni matrycy georusztu, wynoszący ponad 85% [5].

Skuteczność stabilizacji warstwy kruszywa związana jest ze sztywnością georusztu w płaszczyźnie kontaktu z ziarnami kruszywa. Efekt klinowania jest widoczny jednak nie tylko w płaszczyźnie georusztu, lecz zmienność jego wpływu daje się zaobserwować także wraz z odległością od płaszczyzny ułożenia georusztu. Można zatem wydzielić 3 strefy wpływu georusztu, czyli skrępowania bocznego kruszywa (rys. 2) [2], [6]:

- Strefa pełnego skrępowania, gdzie zaklinowanie ziaren jest pełne, a wzajemne przemieszczenia ziaren praktycznie nie występują. Mamy do czynienia ze wzajemnym powiązaniem ziaren na zasadzie pozornej kohezji.
- Strefa przejściowa, czy pośrednia, gdzie skrępowanie ziaren stopniowo zanika, a ich zdolność do przemieszczenia względem siebie zmienia się nieliniowo od zera do wartości maksymalnej.
- Strefa braku skrępowania, w której wpływ zazębienia ziaren w płaszczyźnie georusztu jest już nieodczuwalny, a przemieszczenia ziaren względem siebie są maksymalne i zależne już wyłącznie od wartości kąta tarcia wewnętrznego kruszywa. Jest to strefa, w której, w celu uzyskania pełnej efektywności funkcji stabilizacji, konieczne jest wprowadzenie kolejnej warstwy georusztu.



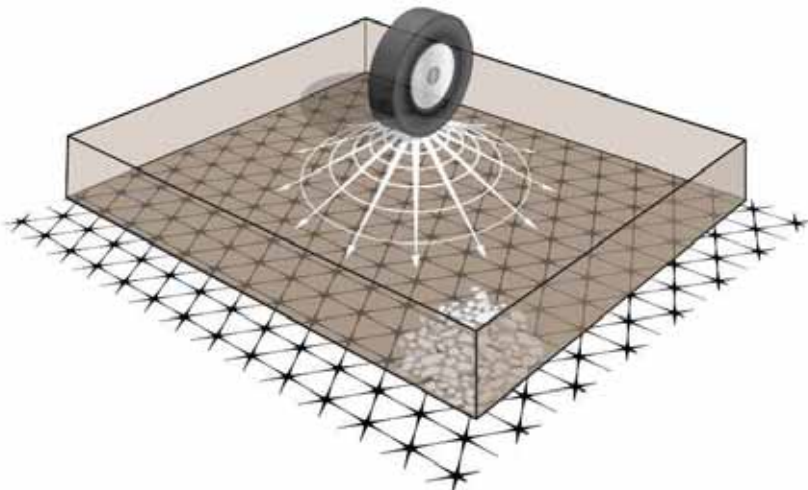
Rys. 2. Strefy skrępowania bocznego kruszywa poprzez zaklinowanie ziaren w oczkach georusztu

Głównym efektem wynikającym ze stabilizacji warstwy kruszywa niezwiązanego georusztem jest:

- 1) wzrost modułu sprężystości warstwy kruszywa,
- 2) zwiększenie nośności warstwy stabilizowanej,
- 3) uzyskanie wyższego wskaźnika zagęszczenia,
- 4) większa odporność na powstawanie trwałych deformacji warstw,
- 5) wydłużenie okresu trwałości tej warstwy, która dając właściwe podparcie warstwom wyżej leżącym, pozwala wydłużyć pracę całej konstrukcji nawierzchni.

2. Georuszt trójosiowy (heksagonalny) w funkcji stabilizacyjnej

Na uzyskanie wyższej efektywności stabilizacji kruszywa georusztem wpływa jeszcze jeden czynnik, niezmiernie istotny w przypadku analizy rozkładu naprężeń wynikających z przyłożonego obciążenia, jakim w naszym przypadku jest koło pojazdu. Ponieważ rozkład obciążenia od koła pojazdu jest wielokierunkowy, efektywność warstwy podbudowy/warstwy ochronnej, na którą przekazywane są naciski, będzie zleżała w dużej mierze od zdolności przenoszenia tych obciążeń w każdym z kierunków w pełnym zakresie kąta, tj. 360 stopni. Dlatego też efektywna warstwa stabilizowana georusztem, to warstwa stabilizowana georusztem wielokierunkowym. Oczywiście jest, że ilość kierunków przenoszenia naprężeń przez georuszt jest ze względów produkcyjnych, czy też technologicznych ograniczona, niemniej zastosowanie w takim przypadku georusztu trójosiowego, jest obecnie rozwiązaniem najbardziej odpowiadającym idealnemu modelowi współpracy (rys. 3).



Rys. 3. Równomierny i wielokierunkowy rozkład obciążeń w warstwie kruszywa stabilizowanej georusztem trójosiowym

Georuszt trójosiowy lub inaczej heksagonalny jest złożony z układu sześcioboków, utworzonych przez oczka w kształcie trójkąta równobocznego. Wytwarzany jest z polipropylenowej płyty (arkusza), w którym wybija się otwory i rozciąga materiał w trzech kierunkach, w taki sposób, że w rezultacie zarówno żebra tworzące trójkątne oczka, jak i integralne węzły charakteryzują się wysokim stopniem orientacji molekularnej.

Kluczowe parametry georusztu trójosiowego pełniącego funkcję stabilizacyjną to (1) sztywność radialna i (2) współczynnik izotropii sztywności [15].

- (1) Sztywność radialna (ang. *radial stiffness*) to stosunek naprężenia uzyskiwanego przy bardzo małym odkształceniu, równym zaledwie 0,5% i wyznaczanym we wszystkich kierunkach naprężeń. Podawana jest jako minimalna wartość ze wszystkich pomierzonych wartości w zakresie od 0 do 360° [6]. Istotą tego parametru jest określenie sztywności (siły przejmowanej przez georuszt) w zakresie małych, zbliżonych do występujących w realnych warunkach, wartości odkształceń. Metoda badawcza do określenia tego parametru została opracowana na bazie normy EN ISO 10319 [14].
- (2) Współczynnik izotropii sztywności (ang. *isotropic stiffness ratio*) określa z kolei zdolność do uzyskiwania zbliżonych wartości sztywności we wszystkich kierunkach badania. Określenie wartości tego współczynnika wykonuje się w oparciu o wyniki badań sztywności radialnej, jako iloraz wartości minimalnej i maksymalnej sztywności, wyznaczonej dla odpowiedniej liczby wykonanych pomiarów [2], [15]. Dla trójosiowych georusztów heksagonalnych osiągnięte wartości wynoszą pomiędzy 0,75 a 0,80.

Istotnym i często podnoszonym problemem w przypadku stabilizacji kruszywa georusztem heksagonalnym jest kwestia długoterminowości parametrów mechanicznych georusztu, w tym przypadku sztywności radialnej. Należy zwrócić uwagę, że funkcja stabilizacji dotyczy zawsze krótkotrwałego i cyklicznie powtarzalnego impulsu obciążenia, przekazywanego na warstwę kruszywa. Obciążenie to pojawia się zarówno w czasie wykonywania i zagęszczania warstwy ulepszanego podłoża, podbudowy lub warstwy ochronnej, jak i w czasie eksploatacji nawierzchni. W tym krótkim okresie czasu warstwa poddawana jest naprężeniu w kierunku pionowym i poziomym. Jednak zawsze następuje relaksacja materiału, co sprawia, że reologiczne zjawiska, takie jak pełzanie (ang. *creep*) nie pogarszają parametrów georusztów w czasie [2]. Należy pamiętać, że zjawisko pełzania występuje tylko w polimerach przy ciągłym działaniu obciążenia o dużej wartości, w długim i stałym okresie czasu [3]. W związku z tym, zjawisko pełzania i w konsekwencji wyznaczanie parametrów mechanicznych długoterminowych (w okresie 60, 100 czy 120 lat pracy konstrukcji), tak charakterystyczne dla funkcji zbrojeniowej (ang. *reinforcement*), w przypadku funkcji stabilizacyjnej nie ma miejsca.

3. Zastosowanie georusztów do stabilizacji warstw kruszywa w nawierzchniach kolejowych

Zastosowania georusztów w nawierzchniach kolejowych opierają się w zasadzie na wykorzystywaniu dwóch przypadków:

- zastosowaniu do stabilizacji warstwy ochronnej,
- zastosowaniu do stabilizacji podsypki tłuczniowej.

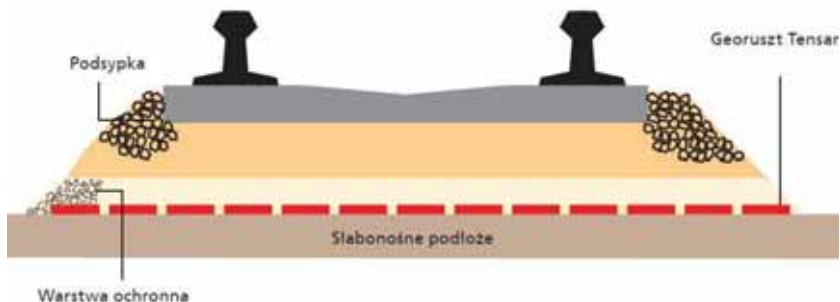
3.1. Stabilizacja warstwy ochronnej z kruszywa niezwiązanego

Jest to typowe zastosowanie georusztów, w ramach którego należy zapewnić wymaganą nośność warstwy kruszywa niezwiązanego, potrzebną do przejścia potarzalnych obciążeń dynamicznych przekazywanych przez koła taboru kolejowego w warunkach słabego podłoża gruntowego (o niskiej nośności). Zastosowanie georusztów w tym przypadku pozwala z jednej strony na zwiększenie nośności warstwy ochronnej lub na zmniejszenie grubości warstwy kruszywa w stosunku do wariantu bez georusztu (przy uzyskaniu tych samych wartości nośności na górze warstwy) z drugiej strony.

Jak wykazano w przykładzie przedstawionym w artykule Gołosa i Urbańskiego [7], redukcja grubości warstwy ochronnej zabudowanej na słabym podłożu ($E_2 \geq 25$ MPa) stabilizowanej georusztem może wynieść ok. 30% w stosunku do warstwy niestabilizowanej, przy zachowaniu tych samych modułów sprężystości warstw kruszywa oraz nośności na górze układu stabilizowanego. Redukcja ta może osiągnąć nawet wartość 50% grubości wyjściowej, chociaż wymaga to zawsze indywidualnej analizy i podejścia projektowego [8].

Z kolei w wariancie z identycznymi grubościami i modułami sprężystości kruszywa warstwy ochronnej, warstwa stabilizowana pozwala osiągnąć moduł zastępczy na górze układu o ok. 20-30% wyższy, niż w układzie bez georusztu [7].

Typowy układ konstrukcji nawierzchni kolejowej z zastosowaniem georusztu do stabilizacji warstwy ochronnej pokazano na rys. 4. Warto zwrócić uwagę, że użycie georusztu do stabilizacji warstwy ochronnej może wiązać się również z zastosowaniem układów wielo-warstwowych, najczęściej dwuwarstwowych, tak jak w przykładzie opisanym w dalszej części artykułu.



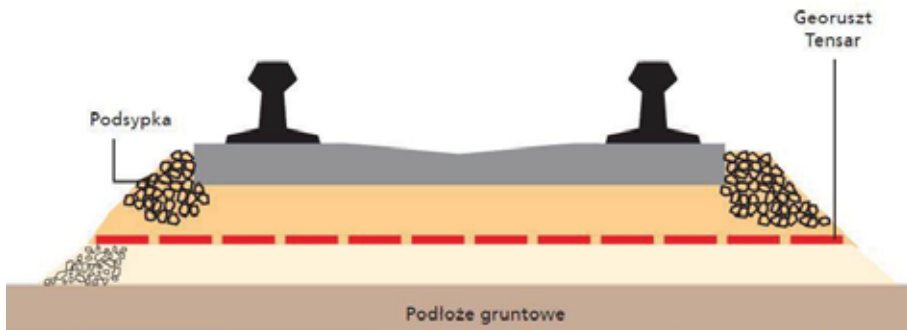
Rys. 4. Stabilizacja warstwy ochronnej w celu zwiększenia nośności słabonośnego podłoża gruntowego [9]

3.2. Stabilizacja podsypki tłuczniowej

Zastosowanie georusztów w tym przypadku dotyczyć może nie tylko linii wykonanych w warunkach słabego podłoża gruntowego, ale także – a może przede wszystkim – na gruntach stabilnych. Związane jest ono ze zmniejszeniem przysrostów deformacji powstającej w warstwie ochronnej w efekcie oddziaływania powtarzalnych obciążeń dynamicznych przekazywanych przez koła taboru kolejowego [8].

Badania zagraniczne wykonywane zarówno w testach laboratoryjnych, jak i na torach próbnych z zastosowaniem georusztów, wykazały możliwość uzyskania zwiększonego odstępu czasowego pomiędzy kolejnymi zabiegami utrzymaniowymi. Pierwsze badania laboratoryjne w pełnej skali wykonane w Kanadzie w roku 1986 pokazały, że zarówno w warunkach słabego, jak i nośnego podłoża, zastosowanie georusztu do stabilizacji warstwy podsypki spowodowało ograniczenie osiadania i nakładów na prace utrzymaniowe poprzez ponad 4-krotne wydłużenie okresu pomiędzy remontami toru [10]. Badania przeprowadzone 20 lat później na stanowisku do testowania szyn RTF w skali naturalnej na Uniwersytecie w Nottingham (UK) [11], wykazały z kolei możliwość 2,5-krotnego wydłużenia odstępu pomiędzy zabiegami utrzymaniowymi (ilości cykli obciążeniowych). Wyniki przeprowadzonych wtedy badań pozwoliły na ustalenie optymalnego rozstawu żeber i wielkości oczka, w celu uzyskania najbardziej efektywnego zaklinowania ziaren podsypki w oczkach georusztu. Wykonane przez koleje brytyjskie Network Rail odcinki doświadczalne na linii West Coast Main Line, potwierdziły wnioski z badań przeprowadzonych w Nottingham w roku 2006. Analiza danych uzyskanych i zebranych w roku 2008 w oparciu o badania wykonane na 800-metrowym odcinku toru potwierdziła, że zastosowanie georusztu do stabilizacji podsypki, powoduje wydłużenie okresu między remontowego o 2,4 razy w stosunku do tradycyjnego rozwiązania konstrukcji nawierzchni bez georusztu w warstwie podsypki.

Typowy schemat konstrukcji nawierzchni kolejowej z zastosowaniem georusztu do stabilizacji warstwy podsypki kolejowej pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Stabilizacja warstwy podsypki tłuczniowej w celu zmniejszenia osiadania toru i wydłużenia okresu pomiędzy kolejnymi zabiegami utrzymaniowymi [9]

4. Zastosowanie georusztów heksagonalnych (trójosiowych), jako stabilizacja warstwy niesortu w konstrukcji nawierzchni kolejowej, przy przebudowie linii kolejowej E-65 Gdynia-Warszawa, szlak Pruszcz Gdański – Gdańsk Południowy, obszar LCS Gdańsk

Linia kolejowa E - 65 należy do paneuropejskiego korytarza transportowego łączącego regiony nadbałtyckie z obszarami położonymi nad morzem Adriatyckim i na Bałkanach. Na terenie Polski linie kolejowe korytarza VI o długości 1,355 km stanowią połączenie Gdyni i Gdańska przez Warszawę z Katowicami i południową granicą kraju. Rozpatrywany odcinek znajduje się na obszarze LCS Gdańsk na szlaku Pruszcz Gdański – Gdańsk Południowy od km 315+200 do km 322+200, o całkowitej długości 7 000 m.

Investorem jest firma PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Jednostką odpowiedzialną za tą inwestycję jest Centrum Realizacji Inwestycji, Zespół Kontraktu Unijnego do spraw Modernizacji Linii Kolejowej E65 na obszarze LCS Gdańsk. Przebudowa odcinka linii kolejowej została zaprojektowana przez Biuro Projektów Kolejowych w Gdańsku. Wykonawcą robót jest firma Torpol S. A. z siedzibą w Poznaniu. Prace zostały rozpoczęte wiosną 2012 roku. Planowany termin zakończenia robót na rozpatrywanym odcinku to wiosna 2014 roku.

Zagadnienie, które związane jest z przedmiotem niniejszego artykułu dotyczy przebudowy dwóch torów linii E-65, oraz toru linii nr 226. Obszar, który obejmuje zakres stabilizacji słabego podłoża gruntowego, znajduje się na odcinkach:

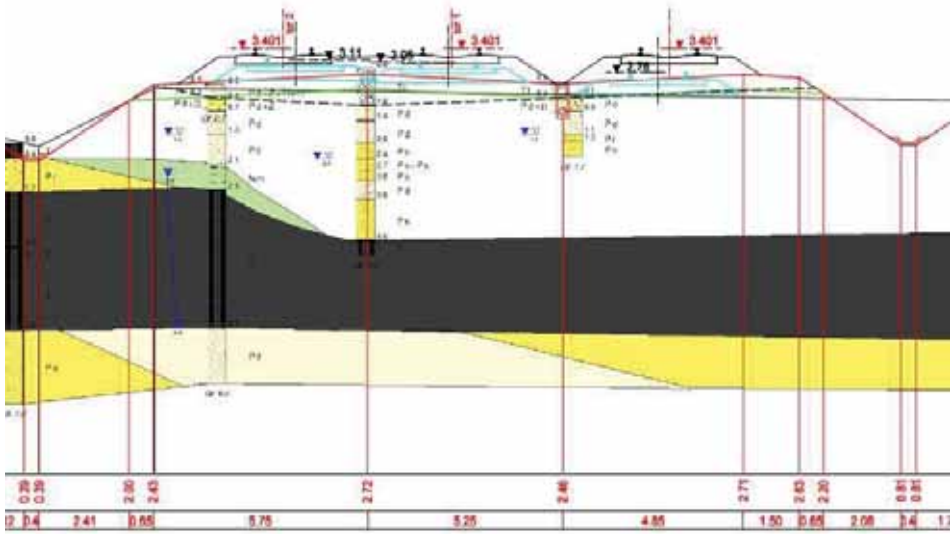
- linia kolejowa E-65, tor 1 i tor 2 na odcinku od km 319+900 do km 320+600,
- linia kolejowa nr 226, tor 201 na odcinku od km 319+900 do km 320+120.

4.1. *Ogólne warunki gruntowo-wodne*

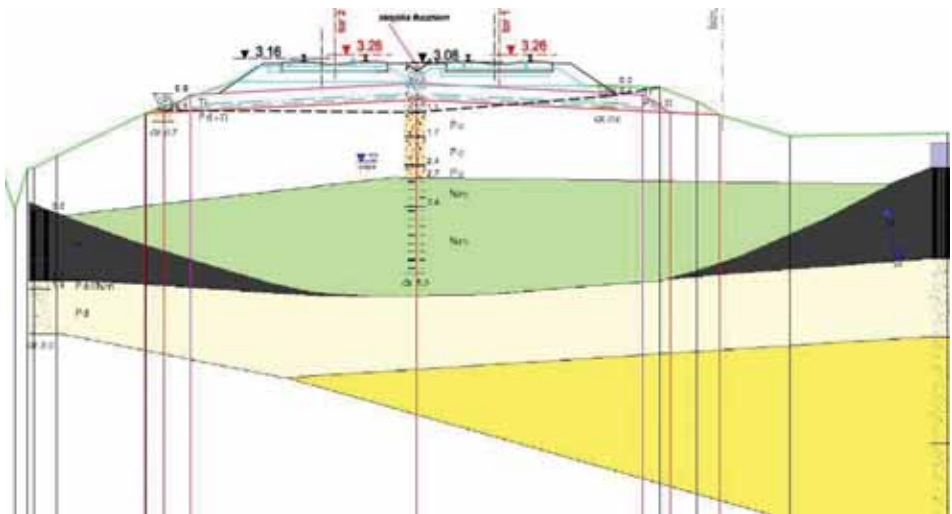
Na podstawie ekspertyzy sporządzonej przez firmę Geostab Sp. z o. o. [13] ustalono, iż na omawianym odcinku linii kolejowej występują złe warunki gruntowe. W podłożu nasypów występują słabonośne grunty organiczne – torfy, które charakteryzują się niekorzystnymi parametrami fizyko-mechanicznymi.

Budowę geotechniczną przedstawiają poniższe przekroje geotechniczne (rys. 6 i 7), które zostały pokazane na tle poprzecznych przekrojów projektowych, na których zaznaczono zarówno stan istniejący, jak też wstępnie projektowany, tj.:

- torowisko istniejące,
- stwierdzony w badaniach spąg zalegania istniejącego tłucznia,
- torowisko projektowane,
- projektowany spąg warstwy podsypki tłuczniowej,
- projektowany wstępnie spąg projektowanej warstwy ochronnej, tj. warstwy o grubości 40 cm z kruszywa łamanego, ułożonej na georuszcie i geowłókninie separacyjno-filtracyjnej.



Rys. 6. Przekrój geotechniczny I-I w km 319+900 {13}



Rys. 7. Przekrój geotechniczny VIII-VIII w km 322+250 {13}

4.2. Budowa geologiczna nasypu

Istniejący nasyp kolejowy w badanych przekrojach zbudowany był generalnie z gruntów piaszczystych o różnej granulacji, lokalnie z domieszką pyłów. Stwierdzono dość znaczne zagłębienie się nasypu w występujących poniżej gruntach organicznych, sięgające lokalnie do 3 m poniżej pierwotnej powierzchni terenu. W niektórych przekrojach (np. w km 322+250, rys. 7) poniżej pierwotnej powierzchni terenu grunt nasypowy uległ wymieszaniu z torfem, tworząc warstwę sklasyfikowaną w dokumentacji jako namuł.

4.3. Budowa geologiczna podłoża nasypu

Poniżej nasypu, już na głębokościach od ok. 3,0 m pod projektowanym poziomem główki szyny, występują grunty organiczne wykształcone jako namuły oraz torfy przewarstwione lub przemieszane z piaskiem, przy czym grunty organiczne występujące ponad torfem i zaliczone do namułów, z uwagi na mniejszą niż w torfach zawartość części organicznych, powstały prawdopodobnie w wyniku penetracji i wymieszania gruntów nasypowych z naturalnym torfem (patrz punkt 4.2.). Dotyczy to szczególnie drugiego odcinka, obejmującego m. in. przekrój VIII-VIII w km 322+250 (rys. 7), gdzie bezpośrednio pod nasypem, tj. na międzytorzu torf w ogóle nie występuje. Z kolei największa miąższość gruntów organicznych (do 4,5 m głębokości) występuje na odcinku pierwszym, gdzie w podłożu nasypu dominuje torf. W przekroju I-I w km 319+900 (rys. 6) stwierdzono najniższe zaleganie gruntów organicznych (do rzędnej – 4,19 m n. p. m.).

Warstwy zalegające poniżej gruntów organicznych stanowią drobne i średnie piaski, występując w stanie zagęszczonym i średniozagęszczonym.

Woda gruntowa w okresie prowadzonych badań układała się w przybliżeniu na rzędnych dna rowów wzdłuż nasypu. Woda występowała w postaci swobodnej w piaszczystych warstwach nasypów i w postaci napiętej w piaskach poniżej układu warstw gruntów organicznych.

4.4. Przyjęta konstrukcja wzmocnienia podtorza

W opracowaniu wykonanym przez firmę Geostab [13] zalecono zastosowanie materaca wykonanego z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 stabilizowanego georusztami heksagonalnymi (trójosiowymi).

Do obliczeń przyjęto, iż na warstwie torfów znajduje się nasyp o miąższości ok. 1,5 m, na którym wartość nośności, określona wtórnym modulem odkształcenia, po dogęszczeniu, powinna być nie mniejsza niż 25 MPa.

Doprowadzenie warstwy ochronnej do wymaganej nośności równej $E2 \geq 120$ MPa bezpośrednio pod warstwą podsypki tłuczniowej, oznaczało wykonanie następującej konstrukcji (rys. 8):

- podłoże gruntowe o wtórnym module odkształcenia $E2 \geq 25$ MPa;
- geowłóknina separacyjno-filtracyjna;
- georuszt heksagonalny (trójosiowy) o min sztywności radialnej 390 kN/m;
- warstwa kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie 0/31,5 o grubości 25 cm;
- georuszt heksagonalny;
- warstwa kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie 0/31,5 o grubości 25 cm;

Całkowita grubość konstrukcji warstwy ochronnej wyniosła 50 cm.

4.5. Obliczenia dla wymaganej konstrukcji warstwy ochronnej dla analizowanego odcinka

W celu sprawdzenia przyjętej konstrukcji ulepszenia warstwy ochronnej, przedstawionej w punkcie 4.4, wykonano analizę obliczeniową według teorii wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej, przy wykorzystaniu programu komputerowego ELSYM 5M. Projektując konstrukcję obliczono ugięcia, a następnie ze wzoru Boussinesq'a obliczono moduł zastępczy. Grubość warstwy kruszywa przyjęto do obliczeń z uwzględnieniem współczynników ze względu na zbrojenie warstw kruszywa georusztami heksagonalnymi.

Zastosowanie ulepszenia słabego podłoża gruntowego w postaci warstwy kruszywa stabilizowanego georusztami heksagonalnymi, wiąże się ze znaczącym poprawieniem właściwości funkcjonalnych pod konstrukcją podtorza linii kolejowej na analizowanym odcinku, tj.:

- osiągnięciem wymaganej nośności pod konstrukcyjną podtorza – $E_2 \geq 120$ MPa,
- stworzeniem platformy o jednorodnych właściwościach pod konstrukcją podtorza,
- osiągnięciem wyższego wskaźnika zagęszczenia warstwy kruszywa,
- jednorodnością i równomiernością ewentualnych osiadań całej konstrukcji.

Moduł zastępczy wzmacnianego podłoża obliczano ze wzoru:

$$E_{zast} = q \times D \times \frac{1 - \nu^2}{w} \quad (1)$$

gdzie:

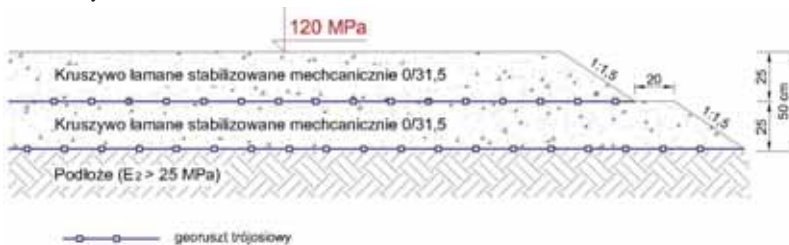
q - ciśnienie kontaktowe na styku płyta-kruszywo, $q = 715$ kPa,

D - powierzchnia styku, $D = 0,32$ m,

w - ugięcie całego układu, $w = 1,42$ mm,

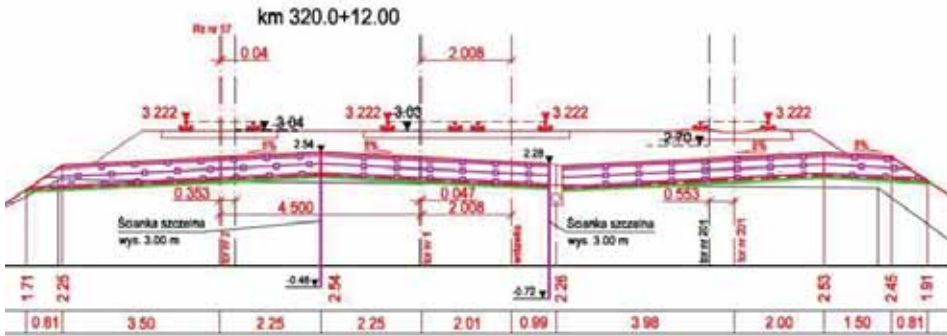
ν - współczynnik Poissona, $\nu = 0,35$.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, iż konstrukcja zaproponowana w [1] została dobrana prawidłowo i w sposób najbardziej optymalny zapewnia osiągnięcie wymaganej nośności określonej wtórnym modułem odkształcenia większym lub równym 120 MPa. Zaprojektowana konstrukcja została pokazana na rys. 8:



Rys. 8. Przekrój przez konstrukcję warstwy ochronnej na analizowanym odcinku LCS Gdańsk w km 319+900 do km 320+600

W efekcie prac projektowych wykonanych przez Biuro Projektów Kolejowych w Gdańsku przy wsparciu firmy Drottest Sp. z o.o., zaprojektowano również stabilizację górnej warstwy podsypki tłuczniowej georusztem trójosiowym, zgodnie z wymaganiami podanymi w punkcie 3.2. Poniżej przedstawiony został przekrój przez konstrukcję nawierzchni kolejowej wg projektu [16].



Rys. 9. Przekrój przez konstrukcję z projektu wyjściowego z uwzględnieniem stabilizacji warstwy podsypki tłuczniowej georusztami trójosiowymi w km 320+012 [16]



Fot. 1. Rozłożony georuszt trójosiowy na geowłókninie



Fot. 2. Układanie kruszywa na warstwie georusztu trójosiowego



Fot. 3. Wykonana nawierzchnia kolejowa



Fot. 4. Wykonana nawierzchnia kolejowa

4.6. Wyniki badań nośności warstwy ochronnej

Prace rozpoczęto wiosną 2012 roku. Fotografie 1 i 2 dokumentują roboty związane z instalacją geosyntetyków i wbudowywaniem warstwy ochronnej. Zgodnie z wymaganiami Zamawiającego na analizowanym odcinku szlaku kolejowego wykonano badania nośności i zagęszczenia płytą VSS. Wykonano badania standardowe, tj.: badanie pierwotnego modułu odkształcenia E_1 , wtórnego modułu odkształcenia E_2 i wskaźnika odkształcenia I_0 . Dzięki uprzejmości Wykonawcy robót – firmy Torpol S. A., wybrane wyniki badań zostały udostępnione autorom niniejszego artykułu.

Poniżej w tabeli 1 przedstawiono wybrane wyniki badań nośności podłoża gruntowego, oraz nośności uzyskanej na warstwie niesortu, stabilizowanego georusztami heksagonalnymi (trójosiowymi).

Tabela 1. Wyniki badań płytą VSS na odcinku od km 319+600, do km 320+300

Kilometraż	E_1 na podtorzu	E_2 na podtorzu	$I_0=E_2/E_1$	E_1 na niesorcie	E_2 na niesorcie	$I_0=E_2/E_1$
319+600	34,09	68,18	2,0			
319+650				63,68	125,0	2,0
319+700	34,09	68,18	2,0	62,5	125,0	2,0
319+750				61,36	129,81	2,1
319+800	33,58	70,31	2,1	61,36	125,0	2,0
319+850				61,36	125,0	2,0

319+900	33,58	68,18	2,0	62,5	125,0	2,0
320+000	34,62	72,58	2,1			
320+100	31,25	66,18	2,1			
320+150				57,2	125,0	2,2
320+200	32,14	70,31	2,2	58,19	129,81	2,2
320+250				58,19	125,0	2,1
320+300	36,89	75	2,0	53,68	129,81	2,0

Jak widać z powyższego zestawienia, w każdym z rozpatrywanych miejsc zostały spełnione wymagania dotyczące nośności wyrażonej wtórnym modulem odkształcenia E_2 . Wartości zbadanych modułów E_2 osiągnęły minimalny poziom 125 MPa, co oznacza wartości wyższe od wymaganej nośności 120 MPa. Uzyskano również wymagane wielkości wskaźnika odkształcenia dla warstwy niesortu, na poziomie $I_0 < 2,5$ (co oznacza wartość $I_s = 1,0$ zgodnie z [17]). Uzyskane wyniki pokazują, że konstrukcja jest zaprojektowana i wykonana zgodnie z założonymi wymaganiami, podanymi w [12]. Wyniki badań są znacznie wyższe niż przewidziano w ekspertyzie sporządzonej przez firmę Geostab Sp z o. o [13].

Można wnioskować, że uzyskanie korzystnych wyników badań spowodowane jest z jednej strony długoletnim procesem konsolidacji gruntów organicznych, znajdujących się w podłożu istniejącej linii kolejowej, który skutkowało osiągnięciem wyższych parametrów, niż pierwotnie zakładano, jak również - z drugiej strony - skutecznością przyjętej technologii stabilizacji warstwy ochronnej georusztem.

Efekt wykonanych robót na analizowanym odcinku szlaku linii kolejowej pokazano na fotografiach 3 i 4.

5. Podsumowanie

Głównym przesłaniem, który przyświecał autorom niniejszego artykułu było przybliżenie zagadnień dotyczących funkcji stabilizacji warstwy kruszywa georusztem. Funkcja stabilizacji została wprowadzona i opracowana przez Wspólną Wykładnię Procedur Oceny (CUAP), natomiast szczegółowo opisana i zdefiniowana została przez Europejską Organizację ds. Aprobata Technicznych (EOTA) [15]. Należy pamiętać, że jest to zupełnie odmienna funkcja od funkcji zbrojeniowej. Niestety obecnie obie funkcje są wciąż bardzo często mylone ze sobą. W efekcie mamy do czynienia z niewłaściwym opisem wymagań dla georusztów przewidzianych i stosowanych w funkcji stabilizacji.

W celu przybliżenia zagadnienia autorzy artykułu podali mechanizmy mające miejsce w przypadku prawidłowej interakcji kruszywa z georusztem, kluczowe parametry georusztu pełniącego funkcję stabilizacyjną (zupełnie różne od wymagań stawianych w funkcji zbrojeniowej) oraz możliwy zakres stosowania georusztów do stabilizacji warstw kruszywa w nawierzchniach kolejowych. Wydaje się, że skutecznym potwierdzeniem przedstawionych założeń teoretycznych w projektach kolejowych jest przykład realizacji, dotyczący zastosowania georusztów heksago-

nalnych (trójosiowych) do stabilizacji warstwy kruszywa w konstrukcji nawierzchni kolejowej linii E-65 Gdynia-Warszawa na obszarze LCS Gdańsk.

Warto zauważyć, że georuszty heksagonalne stosowane do stabilizacji warstwy kruszywa ugruntowały sobie istotną pozycję w budownictwie drogowym w Polsce na przestrzeni ostatnich sześciu lat realizacji. Można mieć zatem nadzieję na ich coraz częstsze skuteczne zastosowanie także w ramach realizacji projektów nawierzchni kolejowych w naszym kraju.

Bibliografia

- [1] SST Ulepszone podłoże z mieszanki niezwiązanej stabilizowanej georusztem. Drottest Sp. z o.o. 2013 r.
- [2] Kawalec J., Georuszty w geotechnice XXI wieku. XXVIII Ogólnopolskie warsztaty pracy projektanta konstrukcji, Wisła, 5-8.03.2013 r.
- [3] Judycki J., Rola geosiatek Tensar przy wzmacnianiu słabych pod nawierzchniami ulepszonymi. Magazyn AUTOSTRADY 1-2/2005.
- [4] Gryczmański M., Kawalec J., Analiza skuteczności geosyntetyków w materacach zabezpieczających nasypy na szkodach górniczych. Prace naukowe GIG: Bezpieczeństwo obiektów budowlanych na terenach górniczych – szkody górnicze, Górnictwo i Środowisko, Katowice 2006.
- [5] Specyfikacja produktowa georusztu Tensar TriAx TX 130S, 150, TX 160, TX 170 i 190L.
- [6] Gołos M., 5 lat stosowania georusztów trójosiowych Tensar TriAx w Polsce. Funkcja stabilizacji i efektywność współpracy z kruszywem niezwiązanym. Magazyn Autostrady, kwiecień 2013.
- [7] Gołos M., Urbański P., Wzmacnianie podtorza kolejowego georuszatkami. Metoda wymiarowania i przykłady obliczeniowe, Konferencja Kolejowa, Kliczków, 2007 r.
- [8] Kawalec J., Możliwości wykorzystania georusztów dla celów racjonalizacji kosztów budowy i utrzymania infrastruktury kolejowej. Konferencja Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w transporcie szynowym, Zeszyty Naukowo – Techniczne SITK RP Oddział Kraków, nr 3(99), Zakopane 2012 r.
- [9] Koleje. Zbrojenie podsypki tłuczniowej i podtorza kolejowego. Broszura techniczna Tensar, tłumaczenie Drottest, wrzesień 2011 r.
- [10] Bathurst R.J., Raymond G.P., Geogrid reinforcement of ballasted track. Transportation Research Record 1153, National Research Council, Washington D.C., 1987.
- [11] Brown S., Geogrids Reinforcement of Railway Ballast. University of Nottingham, 2006 r.
- [12] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe

- i ich usytuowanie, na podstawie art. 7 ust. 2 pkt 2 ustawy z dnia 7 lipca 1994r. - Prawo budowlane (Dz. U. Nr 89, poz. 414, z 1996r. Nr 100, poz. 465, Nr 106, poz. 496 i Nr 146, poz. 680, z 1997r. Nr 88, poz. 554 i Nr 111, poz. 726 oraz z 1998r. Nr 22, poz. 118 i Nr 106, poz. 668).
- [13] Ekspertyza dotycząca koncepcji wzmocnienia podtorza nasypu kolejowego dla zadania „Modernizacja linii kolejowej E65, na odcinku Warszawa-Gdynia – LCS Gdańsk”, Geostab Sp. z o. o., Gdańsk 2008.
- [14] PN-EN ISO 10319:2010 Geosyntetyki. Badanie wytrzymałości na rozciąganie metodą szerokich próbek.
- [15] CUAP 01.02/10 Non-reinforcing hexagonal geogrid for the stabilization of unbound granular layers by way of interlock with the aggregate. EOTA Technical Report 041, October 2012.
- [16] Projekt “Modernizacja linii kolejowej E-65/CE-65 na odcinku Warszawa – Gdynia, obszar LCS Gdańsk”. Biuro projektów Kolejowych, Gdańsk 2008.
- [17] Instrukcja ID-3 – Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego, PKP Polskie Linie Kolejowe S. A., Warszawa 2009.