

Krzysztof TROJNAR, dr hab. inż. prof. PRz
Politechnika Rzeszowska
ktrojnar@prz.edu.pl
ORCID: 0000-0002-4550-4670

BEZPIECZEŃSTWO NASYPÓW Z ANTROPOGENICZNYM WYPEŁNIENIEM GUMOWYM Z RECYKLINGU OPON

Streszczenie

W artykule wskazano problemy recyklingu zużytych opon samochodowych i przedstawiono propozycje wykorzystania gumy z opon do budowy lekkich nasypów zawierających antropogeniczną zasypkę gumową. Przeprowadzono własne analizy na modelach numerycznych nasypu drogowego podpartego ścianami oporowymi, a uzyskane wyniki porównano z wariantem zasypki z piasku. Obliczenia różnych zasypek zawierających rozdrobnione opony pozwoliły wskazać optymalny sposób wykonania nasypu zawierającego gumę z opon, spełniającego te same wymagania jak rozwiązanie tradycyjne. Pomimo, że zaproponowana antropogeniczna zasypka gumowa jest obecnie droższa od tradycyjnej zasypki z piasku, można wykazać jej przydatność, szczególnie w przypadku słabego podłoża. Przeprowadzona analiza ekonomiczna pokazała korzystną z punktu widzenia ochrony środowiska strukturę kosztów materiałowych lekkich nasypów z gumą w porównaniu z rozwiązaniem tradycyjnym z piasku. Wyniki obliczeń odniesiono do budowy przykładowego nasypu na dojeździe do wiaduktu w ciągu drogi DK9 k/Rzeszowa.

Słowa kluczowe: ściana oporowa, nasyp drogowy, zużyte opony.

SAFETY OF EMBANKMENTS WITH ANTHROPOGENIC A RUBBER FILLING MADE OF RECYCLED TYRES

Summary

The article indicates current problems of recycling of used car tyres and presents proposals of using rubber from tyres to build light embankments containing anthropogenic rubber backfill. Our own analyses were carried out on numerical models of road embankment supported by retaining walls, and the obtained results were compared with the variant of sand backfill. Calculations of various backfills containing shredded tires allowed us to indicate the optimal method of making the embankment containing rubber from tires, meeting the same requirements as the traditional solution. Although the proposed anthropogenic rubber backfill is currently more expensive than traditional sand backfill, its usefulness can be demonstrated, especially in the case of weak soil, due to the low settlement of the embankment and high stability, without the need to reinforce the native soil. The economic analysis showed the structure of material costs of light rubber embankments in comparison with the traditional sand solution. The results were related to the construction of an exemplary embankment at the access road to the viaduct along the DK9 road near Rzeszów, Poland.

Key words: retaining wall, road embankment, used tires.

1. Wprowadzenie

Według prowadzonych statystyk rocznie w krajach Unii Europejskiej potrzebna jest utylizacja lub zagospodarowanie około 3,5 mln ton zużytych opon samochodowych, z czego około 500 tys. ton przypada na Polskę. Biorąc pod uwagę stale rozwijający się przemysł motoryzacyjny, można przewidywać, że w kolejnych latach liczba zużytych opon będzie rosła. Utylizacja takich tzw. "trudnych" odpadów stanowi już teraz poważny problem społeczny i techniczny w wielu krajach, ponieważ wpływa negatywnie na stan środowiska naturalnego. Mimo obowiązku utylizacji i zakazu składowania całych opon, spora ich część trafia na nielegalne wysypiska lub jest porzucana np. w lasach. Z punktu widzenia zagospodarowania zużytych opon w krajach europejskich największe znaczenia mają trzy dyrektywy unijne: *Landfill* 1999/31/EC oraz *End-of-Life Vehicle* 2000/53/EC, *Waste Incineration* 2000/73/EC. Dotyczą one zakazu składowania zużytych opon i nakładają na kraje UE obowiązek ich odzysku i recyklingu, docelowo na poziomie 85%. W związku z tym wszystkie stare pojazdy przed złomowaniem muszą mieć zdjęte opony, a cementownie wykorzystujące dotąd zużyte opony jako alternatywne paliwo są zobowiązane do wprowadzenia wyższych limitów ograniczania emisji szkodliwych gazów odlotowych. Aktualnie w Polsce odzysk i recykling opon jest jeszcze na niewystarczającym poziomie. Wprowadzono już w życie zakaz składowania zużytych opon samochodowych (Ustawa o odpadach z 27 kwietnia 2001r.) oraz nałożono na producentów i importerów pojazdów obowiązek zagospodarowania zużytych opon (Ustawa z 11 maja 2001 r.). W celu szybszego osiągnięcia docelowego poziomu recyklingu opon (85%) wprowadzono opłaty produktowe i depozytowe. Obecnie poszukuje się różnych sposobów zagospodarowania zużytych opon w innowacyjnych konstrukcjach (Bielańska 2016, Duda i Trojnar 2016, Duda 2017, Meei-Hoan Ho et al. 2010, 2011). Zużyte opony mogą podlegać wykorzystaniu w jednej z trzech możliwych form recyklingu: produktowego, materiałowego lub energetycznego. Jedną z pro-ekologicznych metod utylizacji opon jest ich powtórne wykorzystanie jako rozdrobnionego składnika antropogenicznych zasypek przy budowie konstrukcji oporowych i nasypów (Hennebert et al. 2014). Rozdrabnianie opon jest już stosowane na skalę przemysłową w krajach zachodnich w celu uzyskania materiału przydatnego do dalszego wtórnego wykorzystania (Gronowicz i Kubiak, 2007, Sybilski 2019). Proces ten polega na cięciu opon w sposób mechaniczny albo na kruszeniu metodą kriogeniczną z zastosowaniem ciekłego azotu. W końcowej fazie oddziela się frakcje gumowe od stalowych i tekstylnych. W efekcie rozdrobnienia opon otrzymuje się mieszkankę składającą się z gumy, tekstyliów oraz (opcjonalnie) części metalowych. Sposób wykorzystania rozdrobnionej gumy w budownictwie zależy w dużej mierze od wielkości cząstek. Klasyfikację materiałów otrzymywanych ze zużytych opon opartą na przepisach europejskich podano w tab. 1 (EN 14243, 2005). Przykładowe formy przetworzonych opon w postaci strzępów gumowych pokazano na rys. 1. Strzępy z opon mogą być z powodzeniem stosowane do budowy nasypów jako lekkie antropogeniczne kruszywo oraz jako zasypka konstrukcji oporowych, ścian tuneli oraz przyczółków mostowych. Ten rodzaj niekonwencjonalnego materiału spełnia też definicję gruntu antropogenicznego (Drażowski, 2010). Przydatność materiałowa części gumowych pochodzących z przetworzenia opon wynika przede wszystkim z korzystnych właściwości fizycznych, ponieważ mają trzykrotnie mniejszy ciężar objętościowy w porównaniu ze standardowymi kruszywami mineralnymi, ośmiokrotnie lepszą izolacyjność cieplną oraz bardzo dobre właściwości drenujące wodę. Wywołują przy tym mniejsze parcie boczne oraz mogą pełnić rolę warstw tłumiących drgania. Te właściwości są szczególnie pożądane w materiałach stosowanych w budownictwie komunikacyjnym (Oikonomou i Mavridou, 2009), Shrestha et al. 2016).

Tabela 1. Europejska klasyfikacja rozdrobnionych opon

Rodzaj rozdrobnionych odpadów gumowych	Rozmiar cząstek [mm]
Opony cięte (połówki i mniejsze fragmenty)	> 300
Strzępy (shreds)	50 ÷ 300
Czipsy (chips)	10 ÷ 50
Granulat (granulate)	1 ÷ 10
Miał (powder)	0 ÷ 1



Rys. 1. Formy rozdrobnionych opon przydatne do wypełnienia nasypów;
a. czipsy, b. strzępy

2. Antropogeniczne zasypki gumowe do budowy nasypów i konstrukcji oporowych

Opis przykładowego nasypu

Analizowanym przykładowym obiektem jest nasyp w ciągu drogi krajowej DK9, stanowiący dojazd do wiaduktu nad drogą wojewódzką nr 869 na północ od Rzeszowa. Skrzyżowanie zaprojektowano jako dwupoziomowe w formie węzła WB typu „karo”. Widok ogólny obiektu pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Nasyp na dojeździe do wiaduktu w ciągu drogi DK9 k/Rzeszowa

Wiadukt ma długość 80 m. Droga na nasypie jest dwujezdniowa o szerokości 8,40 m. Nasyp ma zmienną wysokość 1 - 6 m. Wykonano go w formie konstrukcji oporowej w technologii Optem-BLOK. Po obu stronach dojazdu do wiaduktu na dolnym poziomie są dodatkowe jezdnie drogowe, stąd pionowe ściany nasypu zostały podparte konstrukcjami oporowymi i zwieńczone górą gzymsem żelbetowym, na którym zamontowano bariery energochłonne i oświetlenie drogi. Własne analizy obliczeniowe przeprowadzono dla nasypu w przekroju drogowym o wysokości 5.30 m (w pobliżu przyczółków).

Warunki gruntowo-wodne

Na podstawie danych z badań geologicznych ustalono, że podłoże nasypu ma poziomy układ warstw i jest wystarczająco nośne. Korpus nasypu wraz z podpierającymi ścianami oporowymi jest posadowiony na osadach fluwioglacjalnych, interglacjalnych i glacialnych. Pierwszą 3-metrową warstwę stanowią piaski drobne i pylaste w stanie średniozagęszczonym. Niżej zalegają łyły pylaste w stanie plastycznym o miąższości 2,80 m, oparte na glinach lodowcowych w stanie twaroplastycznym. Poziom zwierciadła wód gruntowych jest na głębokości 1,50 m ppt. Parametry geotechniczne warstw podłoża zestawiono w tab. 2, porządkując je w pakiety warstw obliczeniowych według kryterium stanu gruntu.

Tabela 2. Parametry geotechniczne podłoża

Rodzaj gruntu:	P_{π}	P_d	I_{π}	I_{π}/P_{π}	G_{pz}
Miąższość warstwy, m	3,0		2,8		>10
	0,7	2,3	1,3	1,5	
St. zagęszczenia/plastyczności, -	0,35		0,1		0,2
Gęstość objętościowa, kN/m ³	19,0		19,7		21,5
Moduł ściśliwości, MPa	46		34		29
Kąt tarcia wewnętrznego, °	29		12		14
Spójność, kPa	0		57		16

Parametry zasypek

Do analiz obliczeniowych przyjęto zasypkę antropogeniczną ze strzępów gumowych 50/76 oraz porównawczo, tradycyjną zasypkę z piasku średniego (praktycznie wykorzystywana na budowie tego nasypu). Parametry techniczne strzępów gumowych jako alternatywnego materiału do budowy nasypów przyjęto na podstawie badań innych autorów (Edeskär, 2004, Balunaini et al. 2009) i zestawiono w tab. 3, łącznie z parametrami dla piasku.

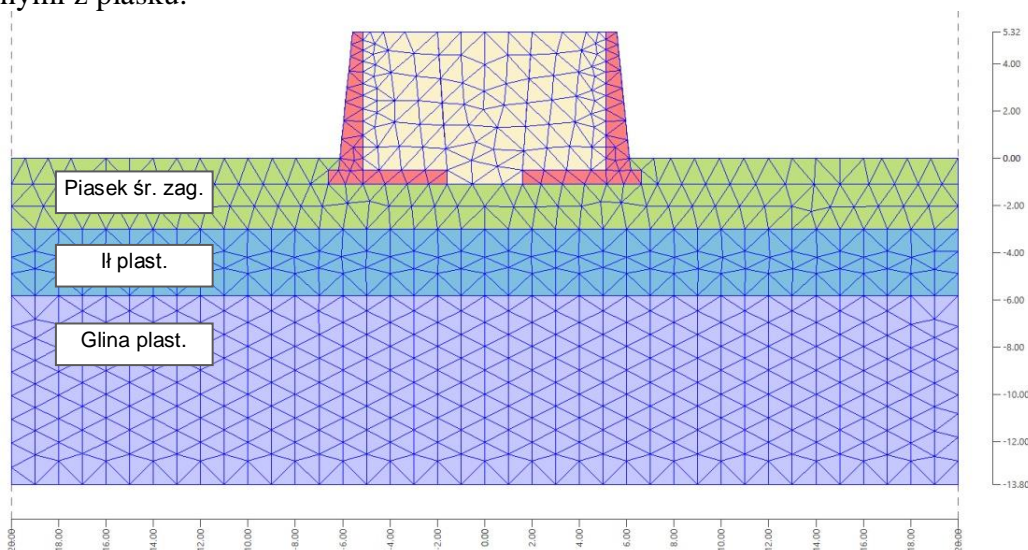
Tabela 3. Parametry techniczne zasypki z piasku oraz ze strzępów gumowych

Materiał zasypki	Piasek średni	Strzępy gumowe 50/76
Wskaźnik zagęszczenia	0.98	0.98
Ciężar objętościowy, kN/m ³	17.8	6.13
Kąt tarcia wewnętrznego, °	37	19

Spójność, kPa	0	11.5
Współczynnik Poissona, -	0.25	0.30
Współczynnik filtracji, cm/s	1.8×10^{-2}	4.8
Moduł sprężystości, MPa	170	1.13

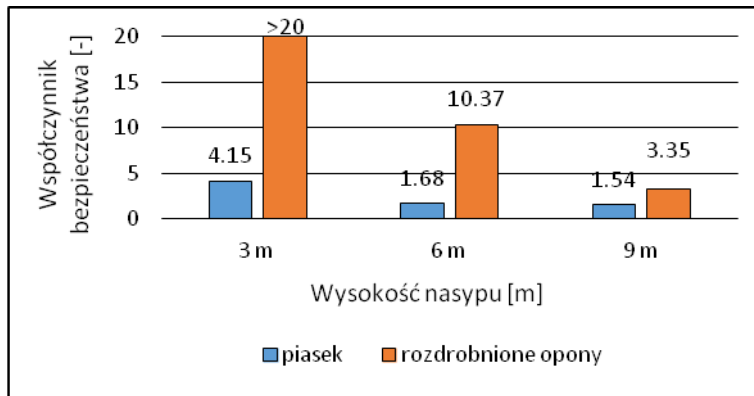
Analiza numeryczna nasypu z wypełnieniem gumowym

Opracowano trzy warianty modelu numerycznego nasypu podpartego ścianami oporowymi o wysokości 3 m, 6 m i 9 m, przyjmując we wszystkich przypadkach standardowo warunki brzegowe oraz dyskretyzację siatki MES. W strefach styku zasypki ze ścianami oporowymi odpowiednio zagęszczono siatkę w celu uzyskania dokładniejszych wyników. Obszar obliczeniowy MES o wymiarach 40 m x 20 m jest pokazany na rys. 3. Przyjęto sprężysto-plastyczny model podłoża oraz zasypki z kryterium plastyczności Coloumba - Mohra. Obliczenia wykonano z uwzględnieniem wymagań normowych nośności podłoża i stateczności budowli (PN-EN 1997-1, 2010). Zgodnie z zaleceniami literaturowymi (Youwai i Bergado, 2004) uwzględniono wymaganie, aby maksymalna miąższość jednolitej warstwy odpadów gumowych w nasypie nie przekraczała 3 m ze względu na ryzyko wystąpienia reakcji termicznych. Wyniki obliczeń pokazały, że niezależnie od wysokości analizowanych nasypów zastosowanie zasypki z rozdrobnionej gumy pozwoliło poprawić ich stateczność. Zestawienie wyników pokazano graficznie na rys. 4 i rys. 5. Obliczone współczynniki bezpieczeństwa na przesuw po gruncie oraz na obrót okazały się wyższe w porównaniu z tradycyjnym wypełnieniem z piasku. Można stąd wysunąć generalny wniosek, że w zakresie wysokości nasypów 3 - 9 m konstrukcje oporowe w których wykorzystano rozdrobnione opony są bardziej stateczne w porównaniu z nasypami wykonanymi z piasku.

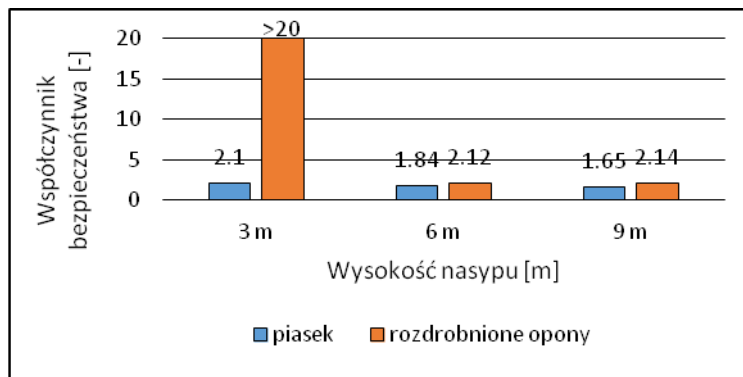


Rys.3. Model numeryczny nasypu

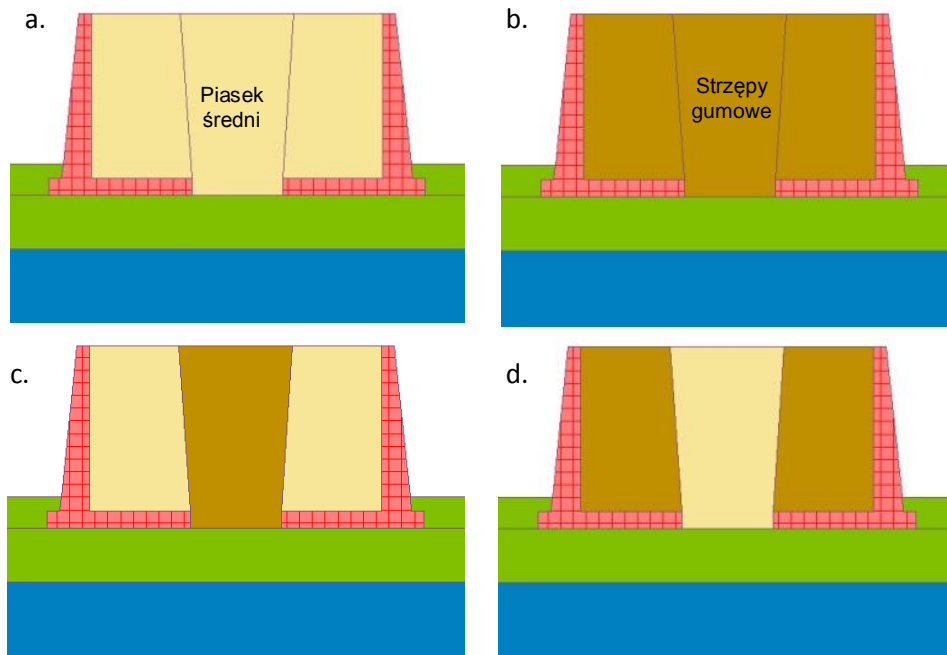
Szczegółowym obliczeniom podano nasyp o wysokości 5.3 m podparty ścianami płytowo-kątowymi. Wymiary przekroju ścian podpierających przyjęto na podstawie wstępnych obliczeń. Celem analiz było poszukiwanie optymalnego sposobu ułożenia zasypki, który pozwoliłby uzyskać maksymalne korzyści wynikające z zalet antropogenicznego materiału z rozdrobnionych opon, przy jednoczesnym zminimalizowaniu zużycia gumy. Wyniki analiz porównano z rozwiązaniem tradycyjnym z użyciem piasku. Rozpatrzono cztery warianty zasypek, różniące się sposobem ich wbudowania w nasyp za konstrukcją oporową. Schematy ułożenia zasypek pokazano na rys. 6 i opisano w tab. 4.



Rys.4. Stateczność na przesuw nasypu o różnej wysokości



Rys. 5. Stateczność na obrót nasypu o różnej wysokości

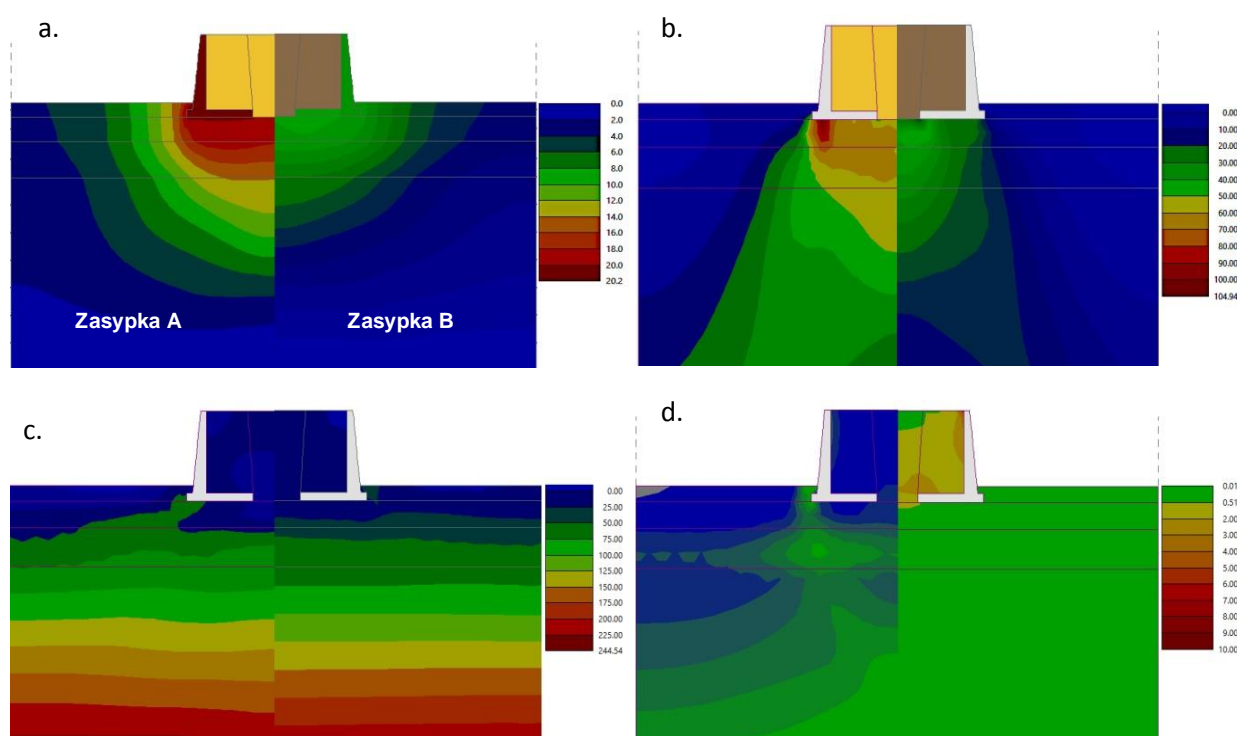


Rys. 6. Analizowane warianty wypełnienia nasypu (A, B, C, D)

Tabela 4. Analizowane warianty wypełnienia nasypu

Wariant	Sposób wypełnienia
Zasyпка A	piasek w całym nasypie (wariant porównawczy, rozwiązanie tradycyjne)
Zasyпка B	strzępy gumowe w całym nasypie
Zasyпка C	piasek nad odsadzkami, środek nasypu wypełniony strzępami gumowymi
Zasyпка D	strzępy nad odsadzkami, środek wypełniony piaskiem (odwrotnie do C)

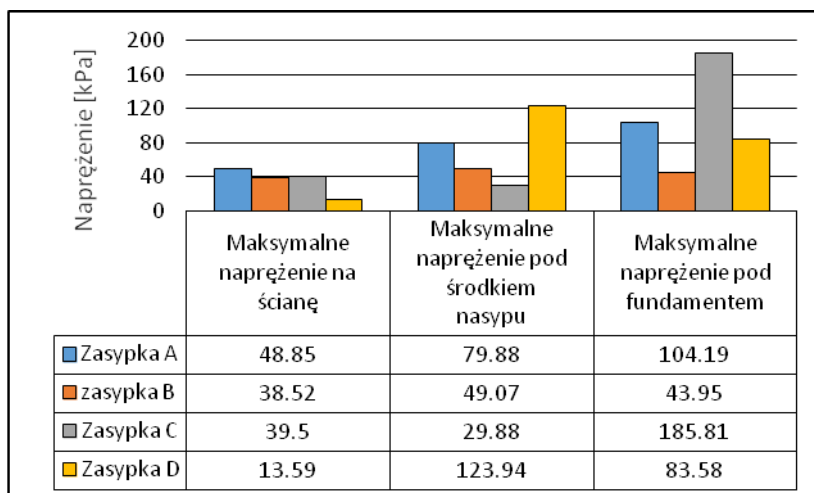
Efektom o analiz obliczeniowych MES są wartości naprężeń i odkształceń w podłożu oraz w zasypce pokazane na rys. 7. Przy wyborze najkorzystniejszego wariantu wypełnienia nasypu z użyciem zasypek z gumą brano pod uwagę: maksymalne naprężenie poziome na ścianę oporową, maksymalne osiadanie nasypu oraz odkształcenie podłoża i naprężenia w strefach pod fundamentem ścian podpierających nasyp. Jako wariant porównawczy przyjęto nasyp z tradycyjnym wypełnieniem z piasku (zasyпка A). Wariant z zasypką B (strzępy gumowe na całej szerokości nasypu) okazał się najbardziej korzystny spośród analizowanych wariantów ze względu na znaczące zmniejszenie naprężeń pionowych i prawie dwukrotne zmniejszenie osiadań nasypu. Za pewną wadę tego rozwiązania można uznać stosunkowo duży koszt użycia rozdrobnionej gumy z opon w porównaniu z tą samą objętością piasku w rozwiązaniu tradycyjnym (zasyпка A).



Rys. 7. Porównanie wyników analiz numerycznych nasypu z wypełnieniem tradycyjnym (zasyпка A) i gumowym (zasyпка B); a. osiadanie, b. naprężenia pionowe, c. naprężenia poziome, d. odkształcenia.

Stwierdzono też, że odkształcenia gumowego wypełnienia nasypu są o 2% większe niż w przypadku zasypki z piasku. Można to wyeliminować w sposób technologiczny, stosując dodatkowo przewarstwienia z piasku i zagęszczanie warstw strzępów gumowych (Edeskär,

2004, Glinicka, 2010). Obliczenia pozostałych wariantów pokazały, że w przypadku zasypek C i D wystąpił dość niekorzystny rozkład nacisku na podłoże pod nasypem. Dotyczyło to szczególnie strefy pod fundamentami ścian oporowych (zasyпка C) i pod środkiem nasypu (zasyпка D). W przypadku nasypu z gumą naprężenia pod krawędzią fundamentu ściany oporowej są o 2/3 mniejsze, a pod środkiem nasypu o 1/3 mniejsze w porównaniu z nasypem z piasku. Zbiorcze zestawienie wybranych wyników obliczeń dla zasypek A i B przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Wyniki obliczeń dla różnych wariantów wypełnienia nasypów

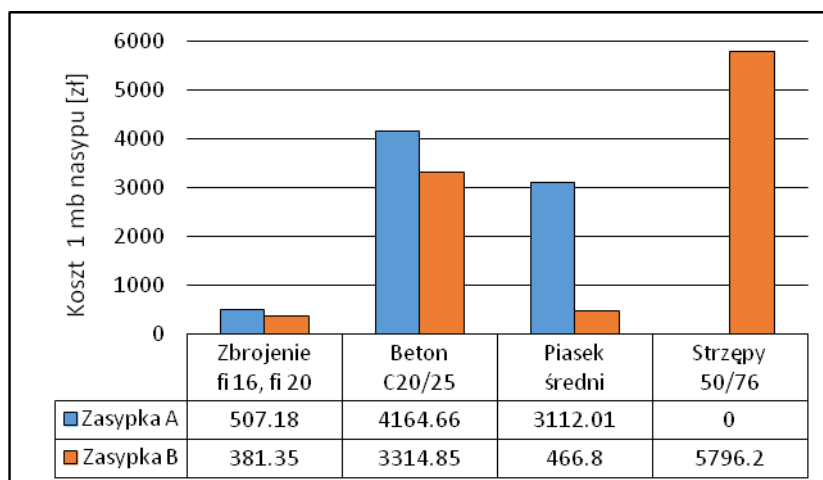
3. Analiza ekonomiczna

W celach porównawczych zestawiono koszty materiałów potrzebnych do budowy nasypu według wariantu tradycyjnego (zasyпка A) oraz wariantu alternatywnego z zasypką antropogeniczną ze strzępów gumowych (zasyпка B). Przy bezpośrednich porównaniach dwóch różnych rozwiązań materiałowych stosowano znormalizowane wymiary ścian oporowych, przyjęte odpowiednio do obliczonych wartości naprężeń. W obliczeniach przyjęto aktualne ceny brutto materiałów budowlanych, a łączne koszty budowy uśredniono w przeliczeniu na 1mb długości nasypu. Cenę strzępów opon przyjęto na podstawie danych uzyskanych od polskiego producenta z firmy J&B Recykling (J&B, 2016). W tab. 5 zestawiono ilości materiałów obliczone dla obu wariantów nasypów i ich koszty. Porównanie kosztów przedstawiono graficznie na rys. 9 i 10.

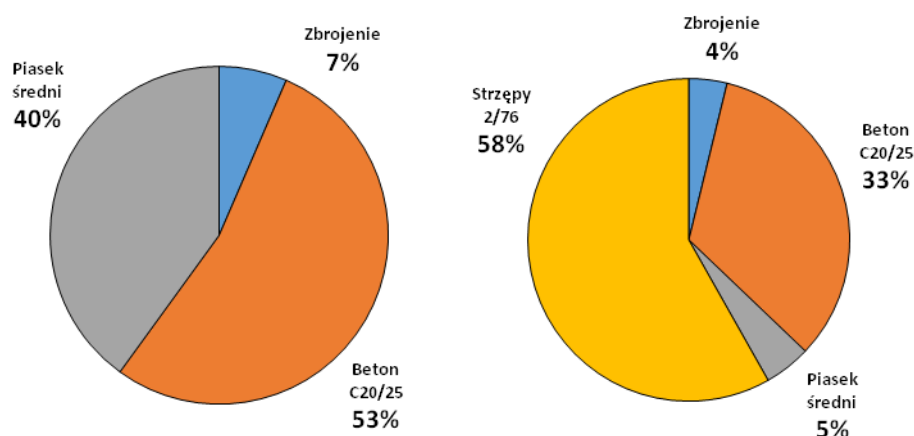
Tabela 5. Koszty materiałowe nasypu tradycyjnego z piasku i z alternatywnego z gumą

Materiał	Ilość	Cena jedn.	Koszty materiałowe [zł]	Łączny koszt 1 mb nasypu [tys. zł]
Zasyпка A - nasyp tradycyjny z piasku				
Zbrojenie	10 szt. ϕ 20	7,90 zł/mb	$6,42 \cdot 10 \cdot 7,90 = 507,20$	7.80
Beton	13.8 m^3	301.40 zł/t	$13,8 \cdot 301,40 = 4164,70$	
Piasek	$61,8 \text{ m}^3$	28,30 zł/t	$61,8 \cdot 1,78 \cdot 28,30 = 3112,10$	
Zasyпка B - nasyp alternatywny z gumą z opon				
Zbrojenie	12 szt. ϕ 16	4,95 zł/mb	$6,42 \cdot 12 \cdot 4,95 = 381,40$	9.96
Beton	11.0 m^3	301.40 zł/t	$11,0 \cdot 301,40 = 3314,90$	
Piasek	9.3 m^3	28.30 zł/t	$9,3 \cdot 1,78 \cdot 28,30 = 466,80$	

Strzępy gum.	52.5 m ³	180 zł/t	52,5·0,613·180,00=5796,20	
--------------	---------------------	----------	---------------------------	--



Rys. 9. Porównanie kosztów materiałowych nasypu z zasypką A i B.



Rys.10. Udział materiałów w całkowitym koszcie nasypu z zasypką A i B.

4. Podsumowanie i wnioski

Z przeprowadzonych analiz wynika, że zastosowanie antropogenicznej zasyпки z rozdrobnionych opon wpływa na zmniejszenie naprężeń w podłożu oraz pozwala ograniczyć wymiary konstrukcji oporowych. W efekcie daje to możliwość budowy lżejszych nasypów, które mogą być posadawione nawet na słabym podłożu. Aspekt ekonomiczny analizy obejmujący wyłącznie same konstrukcje oporowe okazał się w tym przypadku mało korzystny. Uznany za optymalny, wariant zasyпки ze strzępami gumowymi (zasyпка B) jest bowiem droższy o 28 % od tradycyjnego rozwiązania z piasku (zasyпка A). W przypadku występowania słabego podłoża, budowa lekkiego nasypu będzie jednak zawsze korzystniejsza zarówno technicznie i ekonomicznie ze względu na brak konieczności wzmacniania gruntu pod nasypem. Bezpośrednie porównanie oszczędności betonu i stali zbrojeniowej w konstrukcjach oporowych podpierających lekkie nasypy wskazuje, że w przypadku zasyпки

z gumą możliwe jest zapewnienie stateczności całej budowli przy zmniejszeniu kosztu betonu o 38%, a zbrojenia o 43 %. Pokazuje to, że świadome podjęta i uzasadniona środowiskowo decyzja o zastąpieniu tradycyjnej zasyпки z piasku antropogeniczną zasypką ze strzępów gumowych może przynieść sumaryczne oszczędności materiałowe na poziomie 40 %. Uwzględniając przy tym potrzebę coraz większej dbałości o ochronę środowiska, ponowne wykorzystanie gumy ze zużytych opon może mieć w tym aspekcie szczególne znaczenie. Należy się spodziewać, że w najbliższych latach zainteresowanie alternatywnymi sposobami budowy nasypów i konstrukcji oporowych z użyciem lekkich antropogenicznych zasypek gumowych będzie coraz większe. Konieczność stosowania się do obowiązujących dyrektyw unijnych może wymusić sytuację, w której w niedalekiej przyszłości wykorzystanie materiału ze zużytych opon będzie zjawiskiem nie tylko pożądanym, ale również opłacalnym, szczególnie w przypadku budowy lekkich nasypów na słabym podłożu.

Literatura

- [1] Balunaini U., Yoon S., Prezzi M., Salgado R. Tire shred backfill in mechanically stabilized earth wall applications. Purdue Univ. West Lafayette, Indiana, 2009
- [2] Bielańska J. Zastosowanie geokompozytów gumowych w budownictwie komunikacyjnym
Praca dyplomowa mgr pod kierunkiem K. Trojnar, Politechnika Rzeszowska, 2016
- [3] Duda A. Wybrane sposoby wykorzystania zużytych opon samochodowych. Journal of civil engineering, environment and architecture, 64 (4/17), 2017, 381-396
- [4] Duda A. Trojnar K., Wykorzystanie zużytych opon samochodowych w budownictwie komunikacyjnym. Materiały Budowlane, 527, 2016, 80-82
- [5] Drągowski A. Charakterystyka i klasyfikacja gruntów antropogenicznych. Przegląd Geologiczny, 9, 2010, 868-872
- [6] Edeskär T. Technical and environmental properties of tyre shreds focusing on ground engineering applications. Luleå Univ. of Technology, Luleå, 2004
- [7] EN 14243:2005. End-Of-Life Tyre, Recycling Materials. CEN Workshop Agreement, Brussels, 2005
- [8] Glinicka M. Właściwości mechaniczne mieszaniny gruntu i odpadów z opon.
Budownictwo i Inż. Środowiska, 4, 2010, 99-104
- [9] Gronowicz J., Kubiak T. Recycling zużytych opon samochodowych. Politechnika Poznańska. Problemy Eksploatacji, 2, 2007
- [10] Hennebert P., Lambert S., Fouillen F., Charrasse B. Assessing the environmental impact of shredded tires as embankment fill material. Can. Geotech. Jour. 51, 2014, 469-478
- [11] J&B Recykling, www.jbrecykling.pl/, www.jbrecycling.co.uk/, 20016
- [12] Meei-Hoan Ho, Ahmad Tarmizi, Chee-Ming Chan, Ismail Bakar, Leachability and strength of kaolin stabilized with cement and rubber. International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology, vol. 2, 1, 2011, 89-104

- [13] Meei-Hoan Ho, Chee-Ming Chan, Ismail Bakar, One Dimensional Compressibility Characteristics of Clay Stabilised with Cement-Rubber Chips. *International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology*, vol. 1, 2, 2010, 91-104
- [14] Oikonomou N., Mavridou S., The use of waste tyre rubber in civil engineering works. In: Khatib J. Ed. *Sustainability of construction material*. 2009, 213–238
- [15] PN-EN 1997-1 Projektowanie geotechniczne. Zasady ogólne. PKN, 2010
- [16] Shrestha S., Ravichandran N., Raveendra M., Attenhofer J. A. Design and analysis of retaining wall backfilled with shredded tire. *Soil Dyn Earthq Eng.* 90, 2016, 227–239
- [17] Sybilski D., Zastosowanie odpadów gumowych w budownictwie drogowym, *Przegląd Budowlany* 2009, 5, 37-44.
- [18] Youwai S., Bergado D. Numerical analysis of reinforced wall using rubber tire chips-sand mixtures as backfill material. *Comp. and Geotech.*, 31, 2004, 103–114.
- [19] Ustawa o odpadach z dnia 27 kwietnia 2001 r. (Dz. U. 2001, Nr 62, poz. 628)
- [20] Ustawa z dnia 11 maja 2001 r. o obowiązkach producentów niektórych wyrobów oraz o opłacie produktowej i depozytowej (Dz. U. Nr 63, poz. 639 z późn. zm.)

Zestawienie podpisów:

Tabela 1. Europejska klasyfikacja rozdrobnionych opon

Table 1: European Classification of Shredded Tyres

Tabela 2. Parametry geotechniczne podłoża

Table 2: Geotechnical parameters of subsoil

Tabela 3. Parametry techniczne zasypki z piasku oraz ze strzępów gumowych

Table 3: Technical characteristics of filling materials; sand and rubber shreds

Tabela 4. Analizowane warianty wypełnienia nasypu

Table 4: Analysed variants of the embankment filling

Tabela 5. Koszty materiałowe nasypu tradycyjnego z piasku i alternatywnego z gumą

Table 5: Material costs of conventional sand and alternative rubber embankments

Rys. 1. Formy rozdrobnionych opon przydatne do wypełnienia nasypów; a. chipsy, b. strzępy.

Fig. 1. shredded tyre forms useful for filling embankments; a. chips, b. shreds

Rys. 2. Nasyp na dojeździe do wiaduktu w ciągu DK9 k/Rzeszowa

Fig. 2. Embankment on the access road to the DK9 viaduct near Rzeszów

Rys.3. Model numeryczny nasypu

Fig. 3 Numerical model of the embankment

Rys. 4. Stateczność na przesuw nasypu o różnej wysokości

Fig. 4: Stability on embankment movement of different heights

Rys. 5. Stateczność na obrót nasypu o różnej wysokości

Fig. 5: Stability per rotation of embankment of different heights

Rys. 6. Analizowane warianty wypełnienia nasypu (A, B, C, D)

Fig. 6: Analyzed filling variants of the embankment (A, B, C, D)

Rys. 7. Porównanie wyników analiz numerycznych nasypu z wypełnieniem tradycyjnym (zasyпка A) i gumowym (zasyпка B); a. osiadanie, b. naprężenia pionowe, c. naprężenia poziome, d. odkształcenia

Fig. 7: A comparison of numerical analyses of the embankment with traditional (backfill A) and rubber (backfill B) fills; a. settlement, b. vertical stress, c. horizontal stress, d. deformations.

Rys. 8. Wyniki obliczeń dla różnych wariantów wypełnienia nasypów

Fig. 8: Calculation results for the various variants of embankment fill

Rys. 9. Porównanie kosztów materiałowych nasypu z zasypką A i B.

Fig. 9: Comparison of material costs of embankment with backfill A and B

Rys. 10. Udział materiałów w całkowitym koszcie nasypu z zasypką A i B.

Fig. 10. Percentage of materials in the total cost of embankment with backfill A and B