

dr inż. Aleksander Duda^{1*)}

ORCID: 0000-0002-5549-3098

dr inż. Grzegorz Piątkowski¹⁾

ORCID: 0000-0002-8229-6196

Field tests the vibration damping ability of tire bales

Badania polowe zdolności pakietów z opon do tłumienia drgań

DOI: 10.15199/33.2025.08.09

Abstract. The aim of the study was to investigate the effect of tire bales on vibration reduction in the near-surface soil layer along a road section. Acceleration measurements were carried out in three sections with varying numbers of tire bale layers under different vibration sources. The addition of a vertical tire bale barrier further reduced vibration propagation. The results confirmed the effectiveness of using tire bales to limit vibrations.

Keywords: tyre bales; dumping; tests; impact zone.

Streszczenie. W artykule omówiono badanie wpływu pakietów z opon na redukcję drgań w przypowierzchniowej warstwie gruntu na odcinku drogowym. Przeprowadzono pomiary przyspieszenia w trzech sekcjach różniących się liczbą warstw opon, przy różnych źródłach drgań. Dodanie pionowego ekranu z opon dodatkowo zmniejszyło propagację drgań. Wyniki potwierdziły skuteczność zastosowania pakietów opon w ograniczaniu drgań.

Słowa kluczowe: pakiety opon; tłumienie; testy; strefa oddziaływania.

An important aspect of environmental protection is shielding the surroundings and people from the negative effects of noise and vibrations. This issue primarily concerns densely developed urban areas located near road and rail infrastructure [1]. The intensity of perceived vibrations and noise levels in buildings depends mainly on the distance from the source of impact – typically, the road or rail line – but also on soil conditions, including soil stiffness and density, the types of soil and rock layers present, and the presence of groundwater. The most commonly used protections against vibrations and noise include various types of vibration mats embedded in the subsoil as well as vertical underground or aboveground barriers. The use of waste tyre bales, or shredded tyres, in road or railway construction is beneficial due to their unique properties, such as a bulk density three times lower than conventional soils, excellent drainage characteristics, and high frictional resistance [2 ÷ 8]. Tyre bales weigh less than traditional fill materials, resulting in reduced subgrade settlement and lower lateral earth pressure on structures such as retaining walls and bridge abutments. Due to their high permeability, tyre bales allow for effective drainage similar to gravel. A lightweight tyre bale fill acts as a self-supporting block (similar to gabion baskets), and its high frictional resistance along the tyre-soil interface helps reduce earth pressure on the structure. These characteristics contribute to favorable damping properties and reduce the harmful environmental impact of road construction.

Experimental Research

The compaction (baling) of pre-cleaned waste tyres into rectangular, lightweight, water-permeable bales for testing purposes represents the most effective tyre recycling method. A total of 74 tyre bales were embedded in the test road section. The reference bale measured approximately 195 x 133 x 72 cm

Ważnym aspektem ochrony środowiska jest ochrona otoczenia i ludzi przed negatywnym wpływem hałasu i wibracji. Problem ten dotyczy przede wszystkim gęstej zabudowy miejskiej zlokalizowanej w sąsiedztwie dróg kołowych i szynowych [1]. Intensywność odczuwalnych drgań oraz poziom hałasu w budynkach zależy głównie od odległości źródła oddziaływania, po którym odbywa się ruch, ale także od warunków gruntowych: sztywności i gęstości gruntu; rodzaju warstwy gleb i skał, z których się składa oraz obecności wód gruntowych. Najczęściej stosowaną ochroną przed drganiami i hałasem są wszelkiego rodzaju maty wibracyjne w podłożu oraz pionowe ekrany podziemne lub nadziemne. Wykorzystanie pakietów zużytych opon lub opon w formie rozdrobnionej w budownictwie drogowym lub kolejowym jest korzystne ze względu na ich unikatowe właściwości, takie jak: trzykrotnie mniejszy ciężar objętościowy niż tradycyjne grunty; dobre właściwości drenażowe; duży opór tarcia [2 ÷ 8]. Pakiety z opon ważą mniej niż konwencjonalne materiały wypełniające, dlatego też powodują mniejsze osiadanie podłoża i mniejsze naciski boczne (parcie) na konstrukcje, takie jak ściany oporowe lub przyczółki mostów. Ze względu na dużą przepuszczalność wody pakiety opon pozwalają na dobry drenaż analogicznie jak w przypadku zastosowania żwirów. Lekka zasypka z pakietów opon działa jak samonośny blok (analogia do koszy gabionowych), a ich duży opór tarcia wzdłuż powierzchni na styku opony i gruntu pozwala na zmniejszenie parcia gruntu w konstrukcji. Wymienione cechy wpływają na dobre właściwości tłumiące i zmniejszają szkodliwy wpływ budowy dróg na otoczenie.

Badania

Prasowanie (belowanie) wstępnie oczyszczonych zużytych opon w celu wytworzenia prostopadłościennych, lekkich, wodoprzepuszczalnych pakietów do badań, to najbardziej efektywny recykling opon. W badanym doświadczalnym odcinku drogi wbudowano 74 sztuki pakietów z opon. Pakiet referencyjny miał wymiary ok. 195 x 133 x 72 cm (fotografia 1), składał

¹⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury

^{*)} Correspondence address: aduda@prz.edu.pl

(photo 1), contained about 135 used tyres, and weighed around 1000 kg. Gaps between the tyre bales were filled with granular materials (medium or coarse sand).

Test Setup. The experimental road section, serving as an access route to a bridge abutment, was approximately 22 m long (photo 2, figure 1). It was divided into three sections: 4 m (reference without tyre bales), 8 m (with one layer of tyre bales), and 10 m (with two layers). The road was 3.0 m wide and comprised a single lane. On both sides, 0.75 m wide compacted soil shoulders were constructed. The road surface was made of 8 cm thick concrete pavers laid on a 10 cm sand-cement bedding. Below that, a transmission layer covering the tyre bales was designed using a mix of aggregates: natural sand (40%), sandy gravel (40%), and crushed stone (20%), with a total thickness of about 80 cm. The vibration influence zone was assumed to be 7 m wide adjacent to the test section's embankment. Soils within the influence zone to a depth of approx. 4 m included medium sands, silty sands, and silty clays.



Photo 1. An exemplary tyre bale used for research

Fot. 1 Przykładowy pakiet z opon wykorzystany do badań



Photo 2. Experimental road section for carrying out vibration damping tests

Fot. 2 Doświadczalny odcinek drogowy do przeprowadzenia badań tłumienia drgań

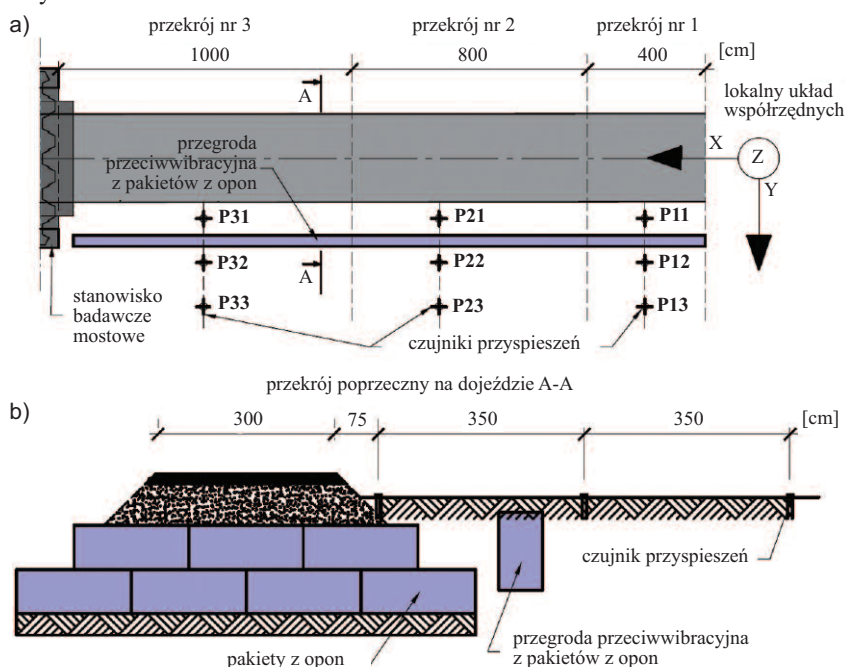


Fig. 1. Scheme arrangement of measurement cross-sections (a) and acceleration sensors (b)
Rys. 1. Schemat rozmieszczenia przekrojów pomiarowych (a) oraz czujników do pomiarów przyspieszenia (b)

Testing Program and Procedure. Piezoelectric sensors were used to record vibrations. Nine sensors of two models were available: 393A03 and 393B12. These are low-frequency seismic sensors operating in an ICP configuration, capable of converting mechanical quantities into electrical signals. The sensors had high sensitivities – 1000 mV/g and 10,000 mV/g,

się z ok. 135 zużytych opon i ważył ok. 1000 kg. Wypełnienie szczelin między pakietami z opon przewidziano z materiałów sypkich (piaski średnie lub grube).

Stanowisko badawcze. Doświadczalny odcinek drogi, stanowiący dojazd do przyczółka mostowego, miał długość całkowitą ok. 22 m (fotografia 2, rysunek 1). Podzielony był na sekcje o długości: 4 m (referencyjny bez pakietów z opon); 8 m (z jedną warstwą pakietów z opon); 10 m (z dwiema warstwami pakietów z opon). Jeźdnia odcinka badawczego miała 3,0 m szerokości i stanowiła jeden pas ruchu. Z każdej jej strony wykonano pobocze gruntowe, utwardzone o szerokości 0,75 m. Nawierzchnię jezdni stanowiła betonowa kostka o grubości 8 cm, ułożona na podsypce piaskowo-cementowej o grubości 10 cm. Niżej zaprojektowano warstwę transmisyjną przykrywającą pakiety opon w formie mieszanki z kruszyw: piasek naturalny (40%); pospółka (40%); kruszywo łamane (20%), o łącznej grubości ok. 80 cm. Za strefę wpływu drgań przyjęto obszar o szerokości 7 m przylegający do korony nasypu odcinka doświadczalnego. W podłożu, do głębokości ok. 4 m w obrębie strefy wpływu drgań, znajdują się grunty: piaski średnie; piaski pyłaste oraz gliny pyłaste.

Program i przebieg badań. Do rejestracji drgań użyto czujników piezoelektrycznych. Dysponowano dziewięcioma czujnikami, dwóch różnych modeli: 393A03 oraz 393B12. Są to niskoczęstotliwościowe czujniki sejsmiczne, pracujące w układzie typu ICP, pozwalające na przekształcenie odbieranych wielkości mechanicznych na sygnał elektryczny. Użyte do badań czujniki charakteryzują się dużą czułością, która w zależności od modelu wynosi 1000 mV/g oraz 10 000 mV/g. Do rejestracji danych pomiarowych wykorzystano wielokanałowy rejestrator, który służy do bezpośredniego zapisu przebiegów czasowych przyspieszeń drgań w pamięci komputera. Rejestrator zapisywał sygnały przyspieszeń ze wszystkich akcelometrów z częstotliwością próbkowania 512 Hz. Pojedynczy pomiar trwał 12 s. Wykorzystano także analizator sygnałów, w tym przypadku w postaci komputera z wgranym specjalistycznym

oprogramowaniem, pozwalającym na sterowanie pomiarem. Analizator umożliwia kontrolę nad parametrami pomiaru, kalibrację czujników, a także analizę danych pomiarowych. Akcelerometry zostały zamocowane w podstawach stalowych (fotografia 3a) i odpowiednio opisane (nr przekroju pomiarowego, nr czujnika, kierunek pomiaru przyspieszeń). Łącznie

respectively. A multichannel recorder was used to record acceleration time histories directly to a computer, with a sampling frequency of 512 Hz. Each measurement lasted 12 seconds. A signal analyzer – essentially a computer with dedicated software – controlled measurements, sensor calibration, and data analysis. Accelerometers were mounted in steel bases (photo 3a) and labeled accordingly (measurement section number, sensor number, and acceleration direction). A total of 313 acceleration time histories were recorded (table 1), resulting in 2817 vibrograms. Measurements were carried out in each section. Vibrations were initially induced by a truck driving over a flat surface. The truck, including cargo, weighed approx. 32,000 kg. It moved forward (target speed ~ 15 km/h ± 2 km/h) and backward (target speed ~ 5 km/h ± 1 km/h), with each full pass counted as a repetition. Additional vibration excitations included a 3 cm high wooden speed bump (photo 3b), mounted to anchors embedded in the road structure to prevent displacement. For point excitation, a 15 cm drop-off was used, where the truck's rear axle descended from a raised platform (photo 3c). A construction plate compactor (photo 3d) was also used, maneuvered in various directions across the road section.

Statistical Analysis. Maximum acceleration values were extracted from each recorded time history (figure 2) and tabulated for each sensor and measurement direction based on the excitation method (table 2).

During dynamic measurements, disturbances or equipment failures could result in gross measurement errors. Such errors may also stem from operator mistakes or hardware

w ramach badań zarejestrowano 313 przebiegów czasowych przyspieszeń (tabela 1), co przełożyło się na 2817 wibrogramów. Pomiary przyspieszeń przeprowadzano kolejno w przypadku każdego przekroju w danej sekcji. W pierwszej kolejności, drgania wzbudzano przez przejazd samochodem ciężarowym po równej nawierzchni. Samochód ciężarowy wraz z ładunkiem miał masę ok. 32 000 kg. Pojazd poruszał się w przód (założona prędkość przejazdu ok. 15 km/h $\pm$ 2 km/h) oraz w tył (założona prędkość przejazdu ok. 5 km/h $\pm$ 1 km/h), przy czym każde pokonanie całego odcinka dojazdowego to jedno powtórzenie. Kolejny sposób wzbudzenia drgań podczas pomiarów wykonano z zastosowaniem drewnianego progu o wysokości 3 cm (fotografia 3b). Został on umieszczony na specjalnych kotwach wbudowanych w konstrukcję jezdni. Uniemożliwiły one przesuwanie się progu podczas przejazdów. W celu punkowego wzbudzenia drgań, w programie badań przewidziano wymuszanie przez zjazd tylnej osi pojazdu obciążeniowego z progu o wysokości 15 cm (fotografia 3c). Jako źródło wymuszenia drgań, podczas badań została użyta także zagęszczarka budowlana (fotografia 3d). Była ona przemieszczana przez operatora po nawierzchni odcinka dojazdowego w różnych kierunkach.

Analiza statystyczna. Z każdego zarejestrowanego przebiegu czasowego przyspieszeń odczytano maksymalne przyspieszenie (rysunek 2) i zestawiono w formie tabelarycznej w przypadku każdego czujnika oraz każdego kierunku w zależności od wymuszenia drgań (tabela 2).

Podczas pomiarów dynamicznych mogły wystąpić różnego rodzaju zakłócenia oraz nieoczekiwane zaburzenia układu



Photo 3. Acceleration sensors installed in the steel base (a); passing over a low threshold (b); descending from a high threshold (c); forced by construction compactor (d)

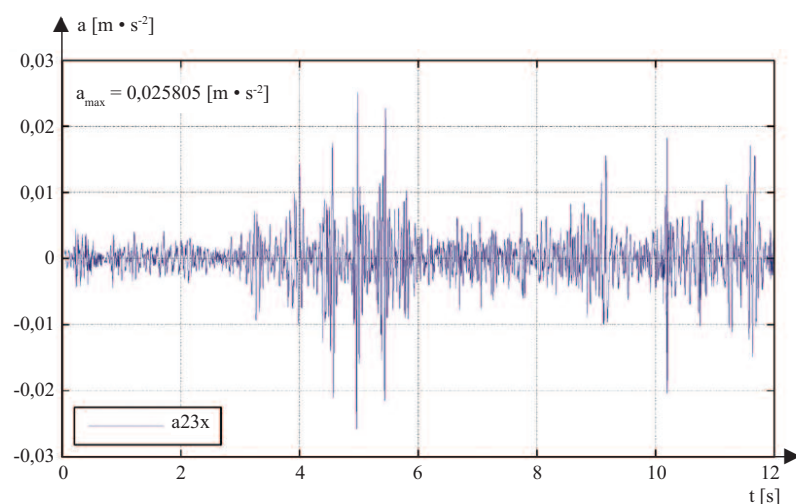
Fot. 3. Zamontowane czujniki przyspieszenia w podstawie stalowej (a); przejazd przez niski próg (b); zjazd z wysokiego progu (c); wymuszenie zagęszczarką budowlaną (d)

Table 1. Number of recorded time histories for forcing

Tabela 1. Zestawienie liczby zarejestrowanych przebiegów czasowych w przypadku wszystkich wymuszeń drgań

Impact Load Type/Wymuszenie	Number of Recorded Time Histories/Liczba zarejestrowanych przebiegów czasowych			Stage*/Etap*
	cross-section P1/ przekrój P1	cross-section P2/ przekrój P2	cross-section P3/ przekrój P3	
Vehicle passing forward/Przejazd pojazdu do przodu	10	10	10	1
Vehicle passing backward/Przejazd pojazdu do tyłu	9	9	10	1
Passing over over a low threshold forward/Przejazd przez niski próg do przodu	10	10	10	1
Passing over a low threshold backward/Przejazd przez niski próg do tyłu	8	10	10	1
Heavy axle descending from high threshold/Zjazd ciężkiej osi z wysokiego progu	9	10	10	1
Operation of construction compactor/Praca zagęszczarki budowlanej	3	8	11	1
Vehicle passing forward/Przejazd pojazdu do przodu	10	7	6	2
Vehicle passing backward/Przejazd pojazdu do tyłu	11	7	6	2
Passing over over a low threshold forward/Przejazd przez niski próg do przodu	9	8	8	2
Passing over a low threshold backward/Przejazd przez niski próg do tyłu	9	8	8	2
Heavy axle descending from high threshold/Zjazd ciężkiej osi z wysokiego progu	7	8	7	2
Operation of construction compactor/Praca zagęszczarki budowlanej	6	10	11	2

* stage 1 – without partition made of tire packages/etap 1 bez przegrody z pakietów; stage 2 – with partition made of tire packages in the impact zone/etap 2 z przegrodą z pakietów opon w strefie oddziaływań

**Fig. 2. Example of recorded vibrogram from time histories No. 87. Vibration forced: driving a truck forward in cross-section P2, for sensor No. 3 in direction X**

Rys. 2. Przykładowy zarejestrowany wibrogram z pomiaru nr 87. Wymuszenie drgań: przejazd pojazdu ciężarowego do przodu w przekroju P2, w przypadku czujnika nr 3 na kierunku X

pomiarowego prowadzące do zarejestrowania mierzonych wielkości obciążonych grubym błędem. Takie grube błędy mogły również wynikać z niedbałości lub ewidentnej pomyłki osoby nadzorującej pomiary lub wyraźnej niesprawności sprzętu. Zbiór danych pomiarowych przeanalizowano dodatkowo, wykonując statystyczny test Q Deana Dixona [9]. Wynik wątpliwy należy odrzucić, jeżeli obliczony parametr Q jest większy od krytycznej wartości odczytanej z tabeli 2 dotyczącej wybranego poziomu ufności. Należy pamiętać, że w teście Q można odrzucić tylko jedną wartość ze sprawdzanego zbioru, obciążoną grubym błędem. Przeprowadzono statystyczną analizę wyznaczonych wartości maksymalnych przyspieszenia w przypadku poszczególnych zarejestrowanych sygnałów. Zdecydowano się na zastosowanie testu Q z poziomem ufności 90% (tabela 3). W każdym pomiarze

Table 2. Summary of maximum accelerations [m·s⁻²] in cross-section no 2 while the vehicle moves forwardTabela 2. Zestawienie maksymalnych przyspieszeń [m·s⁻²] w przekroju nr 2 podczas przejazdu pojazdu do przodu

Measurement/Pomiar	P21X	P21Y	P21Z	P22X	P22Y	P22Z	P23X	P23Y	P23Z
69	0,1239	0,3629	0,2207	0,0466	0,0492	0,0890	0,0345	0,0373	0,0588
71	0,0988	0,2846	0,1875	0,0371	0,0402	0,0679	0,0276	0,0280	0,0540
73	0,1065	0,2625	0,1743	0,0416	0,0395	0,0702	0,0262	0,0297	0,0506
75	0,1082	0,2924	0,1834	0,0437	0,0392	0,0621	0,0267	0,0307	0,0431
77	0,1180	0,2594	0,1696	0,0397	0,0377	0,0596	0,0268	0,0230	0,0489
79	0,1085	0,3201	0,1971	0,0448	0,0383	0,0672	0,0264	0,0282	0,0513
81	0,1122	0,2823	0,1872	0,0367	0,0339	0,0605	0,0222	0,0222	0,0494
83	0,1232	0,2636	0,1679	0,0382	0,0418	0,0669	0,0261	0,0291	0,0490
85	0,1246	0,2348	0,1929	0,0407	0,0412	0,0677	0,0298	0,0309	0,0469
87	0,1083	0,2048	0,1865	0,0355	0,0480	0,0799	0,0258	0,0383	0,0412

malfunctions. The data set was further analyzed using Dean-Dixon's Q test [9]. A suspect value was rejected if the calculated Q exceeded the critical value corresponding to the chosen confidence level (90%). Only one outlier can be rejected per test. A statistical analysis of maximum acceleration values from the recorded signals was conducted using the 90% confidence level (table 3). Nine acceleration signals were recorded per time history – three measurement points (1, 2, 3), each with three measurement directions (X, Y, Z). The verification sequence in the Q test was as follows: 2Y; 3Y; 2Z; 3Z; 2X; 3X; 1Y; 1Z; 1X. If the calculated Q value exceeded the threshold for a given sample size, one outlier was rejected, and the test was terminated. The Q test showed a low number of gross errors (table 3). A total of 20 outliers were removed from 2817 acceleration readings, e.g., section P2, measurement no. 69, direction 1Z (population 10), and section P2, measurement no. 85, direction 1X (population 10). Complete statistical data are available in the research report [10].

Table 3. Limit values for the Q test with a 90% confidence level [9]

Tabela 3. Wartości graniczne w przypadku testu Q z poziomem ufności 90% [9]

Q _{90%}	Number of measurements/Liczba pomiarów							
	3	4	5	6	7	8	9	10
	0,941	0,765	0,642	0,560	0,507	0,468	0,437	0,412

czasowym zarejestrowano 9 sygnałów przyspieszenia – 3 punkty pomiarowe (1, 2, 3) i w każdym trzy kierunki pomiarowe (X, Y, Z). Przyjęto, że w pierwszej kolejności sprawdzane będą kierunki pomiarowe Y i Z w drugim i trzecim punkcie pomiarowym, dlatego też kolejność sprawdzania poszczególnych serii pomiarowych w przeprowadzonym teście Q Deana Dixona była następująca: 2Y; 3Y; 2Z; 3Z; 2X; 3X; 1Y; 1Z; 1X. W przypadku, gdy w danej serii pomiarowej obliczona wartość parametru Q była większa od wartości granicznej odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów, to odrzucano jeden odstający pomiar jako obarczony błędem grubym, a test był przerywany.

Na podstawie przeprowadzonego testu Q stwierdzono, że w poszczególnych seriach pomiarowych występowała niewielka liczba pomiarów obarczonych grubym błędem z pewnością 90% (tabela 3). Łącznie odrzucono 20 z wszystkich 2817 wyników przyspieszenia, np. w przekroju P2, pomiar nr 69, kierunek 1Z (populacja 10) oraz w przekroju P2, pomiar nr 85, kierunek 1X (populacja 10). Pełne dane statystyczne wszystkich zarejestrowanych oraz odrzuconych wyników przyspieszenia wraz z liczebnością populacji zebrano w raporcie z badań [10].

Vibration Reduction Results

Tables 4 ÷ 15 present corrected, averaged maximum acceleration values for different excitation types for the test setup with and without the damping barrier made of tyre bales. These tables also show the calculated vibration reduction or indicate no reduction (NR). The damping effectiveness of the tyre bales was determined by calculating the reduction in vibration levels in sections P2 (one tyre bale layer) and P3 (two layers) compared to section P1 (reference section without bales) using Equation (1).

$$\text{reduction for } P_i = \left(1 - \frac{\text{average acceleration in section } P_1}{\text{average acceleration in section } P_i}\right) \times 100\%$$

where:

i = 2, 3; P1, P2, P3 – denote the test measurement sections (1)

Wyniki redukcji drgań

W tabelach 4 ÷ 15 przedstawiono skorygowane, uśrednione wartości maksymalnego przyspieszenia uzyskanego podczas różnych wymuszeń w przypadku konfiguracji stanowiska badawczego z i bez dodatkowej przegrody tłumiącej z pakietów opon. W tabelach 4 ÷ 15 przedstawiono również redukcję drgań lub oznaczono brak redukcji drgań (brd). Skuteczność pakietów z opon w redukcji drgań ustalono, obliczając redukcję poziomu drgań w przekrojach drugim P2 (z jedną warstwą pakietów) i trzecim P3 (z dwiema warstwami pakietów) w odniesieniu do drgań zarejestrowanych w przekroju pierwszym P1 (odcinek referencyjny bez pakietów) wg wzoru (1).

$$\text{redukcja dla } P_i = \left(1 - \frac{\text{uśrednione przyspieszenie w przekroju } P_1}{\text{uśrednione przyspieszenie w przekroju } P_i}\right) \times 100\%$$

gdzie:

i = 2, 3; P1, P2, P3 – oznaczenia przekrojów badawczych (1)

Discussion and Summary

In both test configurations (with and without the damping barrier), higher vibration reduction was generally observed in section P3 (two layers of tyre bales) compared to section P2 (one layer). The calculated vibration reduction during truck passages in forward and backward directions on flat pavement ranged from 30% to 70%, with greater reduction typically observed for forward movements at higher speeds. Since this excitation mode closely resembles actual traffic-induced vibrations, the obtained reduction is considered satisfactory. Due to the significant time gap (spring – autumn) between measurements for configurations with and without the barrier, a direct comparison of vibration reductions is not feasible. The second configuration measurements occurred in autumn following

Dyskusja i podsumowanie

W przypadku obu konfiguracji stanowiska badawczego, z przegrodą lub bez przegrody tłumiącej, z pakietów opon w większości wymuszeń stwierdzono większy poziom redukcji drgań w przekroju pomiarowym nr P3 (dwie warstwy pakietów) niż w przekroju pomiarowym nr P2 (jedna warstwa pakietów). Obliczona redukcja drgań w przypadku wymuszenia drgań przejazdami samochodu ciężarowego do przodu i do tyłu po równej nawierzchni, są na poziomie 30 – 70%, przy czym w większości kierunków pomiarowych stwierdzono większą redukcję w przypadku przejazdów do przodu realizowanych z większą prędkością. Z racji tego, że taki sposób wymuszenia drgań jest najbardziej zbliżony do rzeczywistych źródeł drgań komunikacyjnych, należy uznać osiągniętą redukcję drgań za zadowalającą. Ze względu na du-

Table 4. Summary of averaged maximum accelerations with vibration reduction for forward vehicle runs without a barrier along the test stand

Tabela 4. Zestawienie uśrednionych maksymalnych przyspieszeń wraz z redukcją drgań w przypadku przejazdów pojazdu do przodu bez przegrody wzdłuż stanowiska badawczego

Cross-section/Vibration reduction/Przekrój/ redukcja drgań	Accelerations in sensors [m • s ⁻²]/Vibration reduction/Przyspieszenie w czujnikach [m • s ⁻²]/redukcja drgań								
	P1X	P1Y	P1Z	P2X	P2Y	P2Z	P3X	P3Y	P3Z
P1	0,2672	0,2064	0,3101	0,1174	0,1042	0,1291	0,0702	0,0573	0,0838
P2	0,1120	0,2672	0,1829	0,0398	0,0400	0,0669	0,0264	0,0289	0,0483
P3	0,0741	0,1009	0,1726	0,0237	0,0370	0,0336	0,0250	0,0320	0,0268
P1 vs P2 [%]	58	brd	41	66	62	48	62	50	42
P1 vs P3 [%]	72	51	44	80	64	74	64	44	68

Table 5. Summary of averaged maximum accelerations with vibration reduction for forward vehicle runs with a barrier along the test stand

Tabela 5. Zestawienie uśrednionych maksymalnych przyspieszeń wraz z redukcją drgań w przypadku przejazdów pojazdu do przodu z przegrodą wzdłuż stanowiska badawczego

Cross-section/Vibration reduction/Przekrój/ redukcja drgań	Accelerations in sensors [m • s ⁻²]/Vibration reduction/Przyspieszenie w czujnikach [m • s ⁻²]/redukcja drgań								
	P1X	P1Y	P1Z	P2X	P2Y	P2Z	P3X	P3Y	P3Z
P1	0,2672	0,2064	0,3101	0,1174	0,1042	0,1291	0,0702	0,0573	0,0560
P2	0,1120	0,2672	0,1829	0,0398	0,0400	0,0669	0,0264	0,0289	0,0507
P3	0,0741	0,1009	0,1726	0,0237	0,0370	0,0336	0,0250	0,0320	0,0209
P1 vs P2 [%]	brd	brd	brd	37	30	4	52	42	9
P1 vs P3 [%]	60	42	56	56	51	64	61	64	63

Table 6. Summary of averaged maximum accelerations with vibration reduction for backward vehicle runs without a barrier along the test stand

Tabela 6. Zestawienie uśrednionych maksymalnych przyspieszeń wraz z redukcją drgań w przypadku przejazdów pojazdu do tyłu bez przegrody wzdłuż stanowiska badawczego

Cross-section/Vibration reduction/Przekrój/ redukcja drgań	Accelerations in sensors [m • s ⁻²]/Vibration reduction/Przyspieszenie w czujnikach [m • s ⁻²]/redukcja drgań								
	P1X	P1Y	P1Z	P2X	P2Y	P2Z	P3X	P3Y	P3Z
P1	0,0873	0,0789	0,1262	0,0336	0,0374	0,0496	0,0224	0,0256	0,0251
P2	0,0370	0,0386	0,0849	0,0187	0,0220	0,0276	0,0138	0,0137	0,0196
P3	0,0295	0,0397	0,0758	0,0110	0,0192	0,0164	0,0096	0,0106	0,0106
P1 vs P2 [%]	58	51	33	44	41	44	38	46	22
P1 vs P3 [%]	66	50	40	67	49	67	57	59	58

Table 7. Summary of averaged maximum accelerations with vibration reduction for backward vehicle runs with a barrier along the test stand

Tabela 7. Zestawienie uśrednionych maksymalnych przyspieszeń wraz z redukcją drgań w przypadku przejazdów pojazdu do tyłu z przegrodą wzdłuż stanowiska badawczego

Cross-section/Vibration reduction/Przekrój/ redukcja drgań	Accelerations in sensors [m • s ⁻²]/Vibration reduction/Przyspieszenie w czujnikach [m • s ⁻²]/redukcja drgań								
	P1X	P1Y	P1Z	P2X	P2Y	P2Z	P3X	P3Y	P3Z
P1	0,0802	0,0510	0,0993	0,0325	0,0272	0,0403	0,0228	0,0210	0,0265
P2	0,0636	0,0887	0,0768	0,0261	0,0198	0,0304	0,0144	0,0152	0,0214
P3	0,0385	0,0452	0,0688	0,0211	0,0194	0,0109	0,0091	0,0159	0,0077
P1 vs P2 [%]	21	brd	23	20	27	25	37	28	19
P1 vs P3 [%]	52	11	31	35	29	73	60	24	71

Table 8. Summary of averaged maximum accelerations with vibration reduction for forward vehicle run over a low threshold without a barrier along the test stand

Tabela 8. Zestawienie uśrednionych maksymalnych przyspieszeń wraz z redukcją drgań w przypadku przejazdów pojazdu do przodu przez niski próg bez przegrody wzdłuż stanowiska badawczego

Cross-section/Vibration reduction/Przekrój/redukcja drgań	Accelerations in sensors [m • s ⁻²]/Vibration reduction/Przyspieszenie w czujnikach [m • s ⁻²]/redukcja drgań								
	P1X	P1Y	P1Z	P2X	P2Y	P2Z	P3X	P3Y	P3Z
P1	0,2783	0,2277	0,3334	0,1216	0,1041	0,1324	0,0739	0,0620	0,0970
P2	0,2935	0,3578	0,5074	0,0739	0,1191	0,0851	0,0379	0,0724	0,0788
P3	0,2058	0,5343	0,9835	0,0516	0,1847	0,1216	0,0406	0,0919	0,0650
P1 vs P2 [%]	brd	brd	brd	39	brd	36	49	brd	19
P1 vs P3 [%]	26	brd	brd	58	brd	8	45	brd	33

Table 9. Summary of averaged maximum accelerations with vibration reduction for forward vehicle run over a low threshold with a barrier along the test stand

Tabela 9. Zestawienie uśrednionych maksymalnych przyspieszeń wraz z redukcją drgań w przypadku przejazdów pojazdu do przodu przez niski próg z przegrodą wzdłuż stanowiska badawczego

Cross-section/Vibration reduction/Przekrój/redukcja drgań	Accelerations in sensors [m • s ⁻²]/Vibration reduction/Przyspieszenie w czujnikach [m • s ⁻²]/redukcja drgań								
	P1X	P1Y	P1Z	P2X	P2Y	P2Z	P3X	P3Y	P3Z
P1	0,3017	0,2479	0,4672	0,1124	0,1481	0,2220	0,0677	0,0759	0,0991
P2	0,3892	0,3275	0,5992	0,0562	0,1052	0,0804	0,0300	0,0732	0,0546
P3	0,2884	0,4865	0,8245	0,0787	0,1612	0,0983	0,0360	0,0747	0,0526
P1 vs P2 [%]	brd	brd	brd	50	29	64	56	4%	45
P1 vs P3 [%]	4	brd	brd	30	brd	56	47	2	47

Table 10. Summary of averaged maximum accelerations with vibration reduction for backward vehicle run over a low threshold without a barrier along the test stand

Tabela 10. Zestawienie uśrednionych maksymalnych przyspieszeń wraz z redukcją drgań w przypadku przejazdów pojazdu do tyłu przez niski próg bez przegrody wzdłuż stanowiska badawczego

Cross-section/Vibration reduction/Przekrój/redukcja drgań	Accelerations in sensors [m • s ⁻²]/Vibration reduction/Przyspieszenie w czujnikach [m • s ⁻²]/redukcja drgań								
	P1X	P1Y	P1Z	P2X	P2Y	P2Z	P3X	P3Y	P3Z
P1	0,0863	0,1902	0,2266	0,0386	0,0726	0,0666	0,0273	0,0529	0,0368
P2	0,0635	0,1415	0,2093	0,0222	0,0501	0,0398	0,0156	0,0270	0,0308
P3	0,0798	0,1243	0,2351	0,0291	0,0519	0,0512	0,0173	0,0317	0,0302
P1 vs P2 [%]	26	26	8	42	31	40	43	49	16
P1 vs P3 [%]	8	35	brd	25	29	23	37	40	18

Table 11. Summary of averaged maximum accelerations with vibration reduction for backward vehicle run over a low threshold with a barrier along the test stand

Tabela 11. Zestawienie uśrednionych maksymalnych przyspieszeń wraz z redukcją drgań w przypadku przejazdów pojazdu do tyłu przez niski próg z przegrodą wzdłuż stanowiska badawczego

Cross-section/Vibration reduction/Przekrój/redukcja drgań	Accelerations in sensors [m • s ⁻²]/Vibration reduction/Przyspieszenie w czujnikach [m • s ⁻²]/redukcja drgań								
	P1X	P1Y	P1Z	P2X	P2Y	P2Z	P3X	P3Y	P3Z
P1	0,1066	0,0977	0,1439	0,0385	0,0468	0,0467	0,0272	0,0398	0,0363
P2	0,1084	0,1384	0,2199	0,0230	0,0503	0,0462	0,0140	0,0384	0,0331
P3	0,1073	0,1419	0,2437	0,0306	0,0695	0,0485	0,0185	0,0381	0,0265
P1 vs P2 [%]	brd	brd	brd	40	brd	1	49	4	9
P1 vs P3 [%]	brd	brd	brd	21	brd	brd	32	4	27

Table 12. Summary of averaged maximum accelerations with vibration reduction for a descent from high threshold without a barrier along the test stand

Tabela 12. Zestawienie uśrednionych maksymalnych przyspieszeń wraz z redukcją drgań w przypadku zjazdu z wysokiego progu bez przegrody wzdłuż stanowiska badawczego

Cross-section/Vibration reduction/Przekrój/ redukcja drgań	Accelerations in sensors [m • s ⁻²]/Vibration reduction/Przyspieszenie w czujnikach [m • s ⁻²]/redukcja drgań								
	P1X	P1Y	P1Z	P2X	P2Y	P2Z	P3X	P3Y	P3Z
P1	0,1101	0,1299	0,1420	0,0352	0,0554	0,0563	0,0278	0,0417	0,0331
P2	0,1438	0,2491	0,2659	0,0396	0,0617	0,0506	0,0173	0,0331	0,0357
P3	0,1416	0,3733	0,5756	0,0394	0,1350	0,0914	0,0263	0,0618	0,0478
P1 vs P2 [%]	brd	brd	brd	brd	brd	10	38	21	0
P1 vs P3 [%]	brd	brd	brd	brd	brd	brd	5	brd	0

Table 13. Summary of averaged maximum accelerations with vibration reduction for a descent from high threshold with a barrier along the test stand

Tabela 13. Zestawienie uśrednionych maksymalnych przyspieszeń wraz z redukcją drgań w przypadku zjazdu z wysokiego progu z przegrodą wzdłuż stanowiska badawczego

Cross-section/Vibration reduction/Przekrój/ redukcja drgań	Accelerations in sensors [m • s ⁻²]/Vibration reduction/Przyspieszenie w czujnikach [m • s ⁻²]/redukcja drgań								
	P1X	P1Y	P1Z	P2X	P2Y	P2Z	P3X	P3Y	P3Z
P1	0,1214	0,1540	0,2061	0,0381	0,0706	0,0647	0,0298	0,0468	0,0450
P2	0,1141	0,2397	0,2633	0,0184	0,0550	0,0581	0,0146	0,0388	0,0326
P3	0,1826	0,4221	0,6294	0,0730	0,1682	0,0943	0,0271	0,0761	0,0470
P1 vs P2 [%]	6%	brd	brd	52	22	10	51	17	28
P1 vs P3 [%]	brd	brd	brd	brd	brd	brd	9	brd	brd

Table 14. Summary of averaged maximum accelerations with vibration reduction for operation of the compactor without a barrier along the test stand

Tabela 14. Zestawienie uśrednionych maksymalnych przyspieszeń wraz z redukcją drgań w przypadku pracy zagęszczarki bez przegrody wzdłuż stanowiska badawczego

Cross-section/Vibration reduction/Przekrój/ redukcja drgań	Accelerations in sensors [m • s ⁻²]/Vibration reduction/Przyspieszenie w czujnikach [m • s ⁻²]/redukcja drgań								
	P1X	P1Y	P1Z	P2X	P2Y	P2Z	P3X	P3Y	P3Z
P1	0,4713	2,8255	1,0637	0,1357	0,3676	0,5095	0,0461	0,1600	0,3041
P2	0,9572	2,4503	1,7965	0,0885	0,2218	0,2620	0,0363	0,0566	0,1023
P3	0,6797	2,4895	1,6967	0,0992	0,2132	0,2950	0,0659	0,0767	0,1022
P1 vs P2 [%]	brd	13	brd	35	40	49	21	65	66
P1 vs P3 [%]	brd	12	brd	27	42	42	brd	52	66

Table 15. Summary of averaged maximum accelerations with vibration reduction for operation of the compactor with a barrier along the test stand

Tabela 15. Zestawienie uśrednionych maksymalnych przyspieszeń wraz z redukcją drgań w przypadku pracy zagęszczarki z przegrodą wzdłuż stanowiska badawczego

Cross-section/Vibration reduction/Przekrój/ redukcja drgań	Accelerations in sensors [m • s ⁻²]/Vibration reduction/Przyspieszenie w czujnikach [m • s ⁻²]/redukcja drgań								
	P1X	P1Y	P1Z	P2X	P2Y	P2Z	P3X	P3Y	P3Z
P1	1,0801	3,6610	1,1886	0,1222	0,2014	0,1940	0,0604	0,0888	0,1074
P2	1,0486	3,1316	1,9523	0,0736	0,1666	0,1349	0,0214	0,0565	0,0701
P3	0,7034	2,5388	1,3457	0,2668	0,2165	0,1455	0,0335	0,0710	0,0669
P1 vs P2 [%]	3	14	brd	40	17	30	65	36	35
P1 vs P3 [%]	35	31	brd	brd	brd	25	45	20	38

prolonged rainfall, significantly altering subsoil properties in the test zone. The backward driving speed proved more consistent than the forward driving speed. For impulse-type excitation (crossing a low bump and descending from a high one), repeatability was lower than for continuous-type excitation (flat driving and compactor operation).

The field measurements confirmed the high suitability of tyre bales used in the road foundation for damping vibrations propagated through the ground. This is most evident in the significant reduction observed during truck passes on a flat surface. Continued research on longer test sections with tyre bales in the foundation and higher-speed vehicle tests is recommended.

Badania wykonano w ramach projektu współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego pt. „ReUse – Innowacyjne materiały z recyklingu, zwiększające trwałość obiektów mostowych” (Innotech nr K3/IN3/38/228116/NCBiR/15), realizowanego przez konsorcjum złożone z firm Remost Dębica sp. z o.o., Promost Consulting sp. z o.o. sp. k. (lider konsorcjum), Geotech Rzeszów sp. z o.o. oraz Politechnikę Rzeszowską.

Received: 27.01.2025

Revised: 31.03.2025

Published: 21.08.2025

ży odstęp czasowy (wiosna – jesień), pomiędzy pomiarami pierwszej i drugiej konfiguracji (z dodatkową przegrodą) nie jest możliwe porównanie uzyskanych poziomów redukcji drgań. Pomiary w przypadku drugiej konfiguracji wykonywania pakietów opon przeprowadzono jesienią po długotrwałych i intensywnych opadach deszczu, które doprowadziły do istotnych zmian w ośrodku gruntowym w badanej strefie oddziaływań. Wydaje się, że założona prędkość przejazdów do tyłu była w większym stopniu powtarzalna, niż założona prędkość przejazdów do przodu. W przypadku wymuszeń drgań typu impulsowego (przejazd przez niski próg i zjazd z wysokiego progu) osiągnięto mniejszą powtarzalność, niż przy wymuszeniach drgań typu ciągłego (przejazdy po równej nawierzchni i praca zagęszczarki).

Przeprowadzone pomiary drgań w ramach badań polowych wykazały dużą przydatność pakietów z opon, stosowanych w podbudowie badawczego odcinka dojazdowego, do redukcji drgań propagowanych w gruncie. Świadczy o tym w największym stopniu obliczona redukcja drgań w przypadku przejazdów samochodu ciężarowego po równej nawierzchni. Wskazane jest kontynuowanie takich badań w przyszłości na dłuższych odcinkach badawczych, w podbudowie których wykorzystane zostaną pakiety z opon i będzie można na nich przeprowadzić testy przejazdów z większą prędkością.

Badania wykonano w ramach projektu współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego pt. „ReUse – Innowacyjne materiały z recyklingu, zwiększające trwałość obiektów mostowych” (Innotech nr K3/IN3/38/228116/NCBiR/15), realizowanego przez konsorcjum złożone z firm Remost Dębica sp. z o.o., Promost Consulting sp. z o.o. sp. k. (lider konsorcjum), Geotech Rzeszów sp. z o.o. oraz Politechnikę Rzeszowską.

Artykuł wpłynął do redakcji: 27.01.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 31.03.2025 r.

Opublikowano: 21.08.2025 r.

Literature

- [1] Engel Z. Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem. PWN, Warszawa 1993.
- [2] Zornberg JG, Christopher BR, and Oosterbaan MD. Tire Bales in Highway Applications: Feasibility and Properties Evaluation. Colorado Department of Transportation. Report No. CDOT-DTD-R-2005-2. 2005.
- [3] Winter MG, Watts GRA, and Johnson PE. Tyre bales in construction. TRL PPR 080. 2006. Crowthorne: TRL Limited.
- [4] Simm JD, Winter MG, Waite S. Design and specification of tyre bales in construction. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Waste and Resource Management. 2008; <https://doi.org/10.1680/warm.2008.161.2.67>.
- [5] Edeskär T. Technical and environmental properties of tyre shreds focusing on ground engineering applications. Luleå University of Technology. Technical report, ISSN 1402-1536; 2004, p. 88.

- [6] Meles D, Yi Y, Bayat A. Performance Evaluation of Highway Embankment Constructed from Tire-Derived Aggregate Using Falling Weight Deflectometer Tests, Transportation Infrastructure Geotechnology. 2016; <https://doi.org/10.1007/s40515-016-0035-1>.
- [7] Duda A, Siwowski T. Pressure evaluation of bridge abutment backfill made of waste tyre bales and shreds: Experimental and numerical study. Transportation Geotechnics. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100366>.
- [8] Duda A, Siwowski T. Waste tyre bales in road engineering: an overview of applications. Archives of Civil Engineering. 2021; <https://doi.org/10.24425/ace.2021.138052>.
- [9] Dixon WJ. Analysis of extreme values. The Annals of Mathematical Statistics. 1950, 21 (4), 488-506.
- [10] Duda A, Piątkowski G. Raport z badań drgań (wyniki, analiza). TOM 2. Z7-7 Ocena możliwości wykorzystania pakietów SZOS do tłumienia drgań propagowanych w gruncie. 2018. Politechnika Rzeszowska, materiał niepublikowany.