

LABORATORIUM BADAŃ MATERIAŁÓW I ELEMENTÓW KONSTRUKCJI

MATERIAŁY KOMPOZYTOWE NA PODKŁADY KOLEJOWE

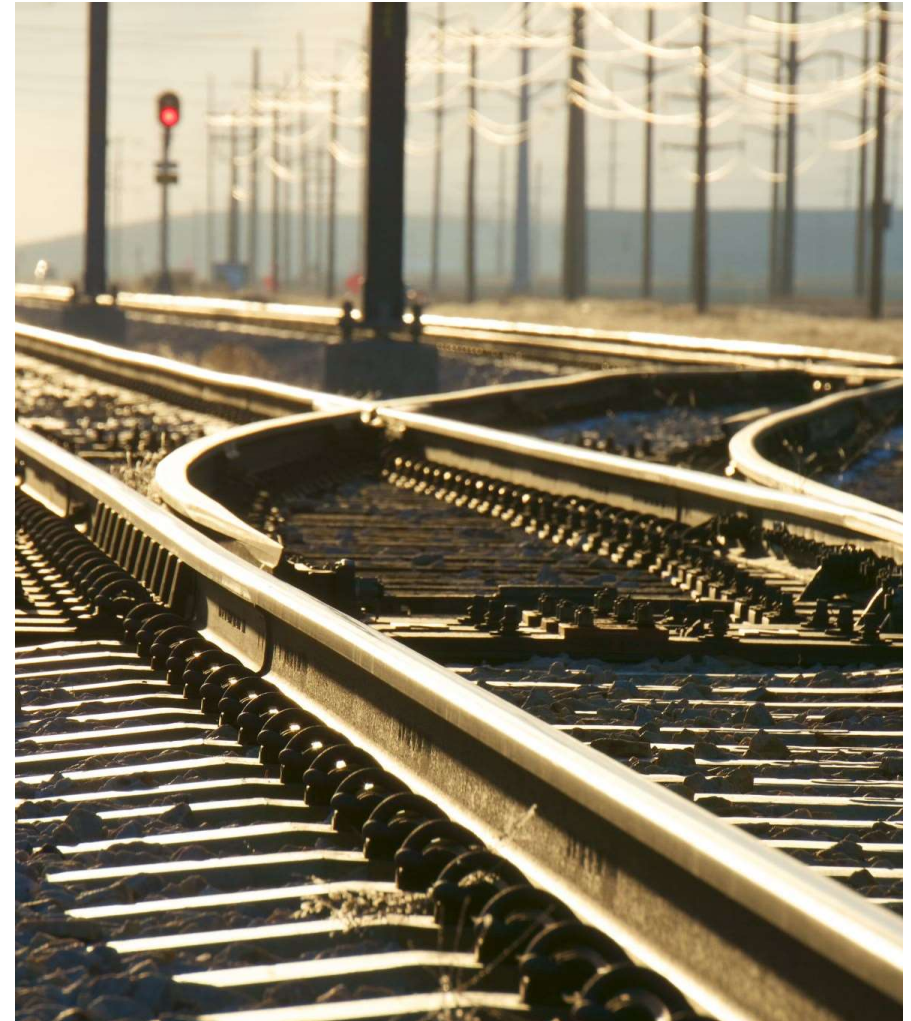
Małgorzata Ostromęcka

22.10.2024



Program seminarium

- Krótkie wprowadzenie
- Podkłady kolejowe stosowane dziś
- Co wpływa na mechaniczne zachowanie kompozytowych podkładów kolejowych
- Główne różnice funkcjonalne pomiędzy materiałami na podkłady kolejowe
- Aktualne normy stosowane do badania podkładów
- Jak tworzyć wytyczne i kryteria oceny dla kompozytowych podkładów kolejowych
- Instytut kolejnictwa a podkłady kompozytowe



PODKŁADY KOLEJOWE POPRZECZNE

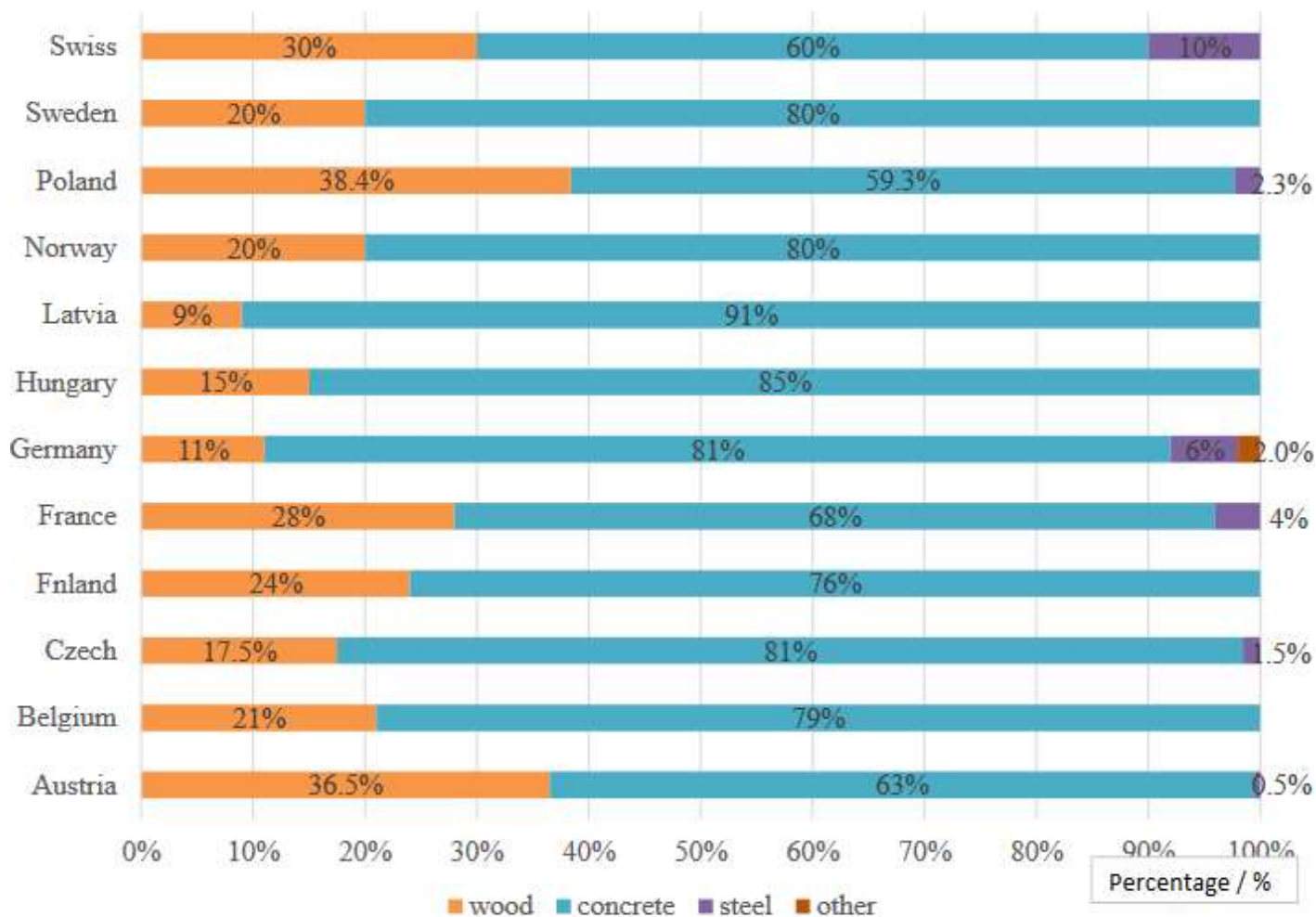
W nawierzchni podsypkowej stosowane są podkłady poprzeczne, przy których uzyskuje się najbardziej równomierny rozkład nacisku dolnej części podkładu na górną powierzchnię podsypki.

Rolą tych podkładów jest:

- zapewnienie utrzymania odpowiedniej szerokości toru;
- przejmowanie z szyn i przekazywanie na podsypkę sił pionowych, poziomych poprzecznych do osi toru oraz poziomych działających wzdłuż osi toru;
- podkłady betonowe zapewniają właściwe pochylenie poprzeczne szyn.



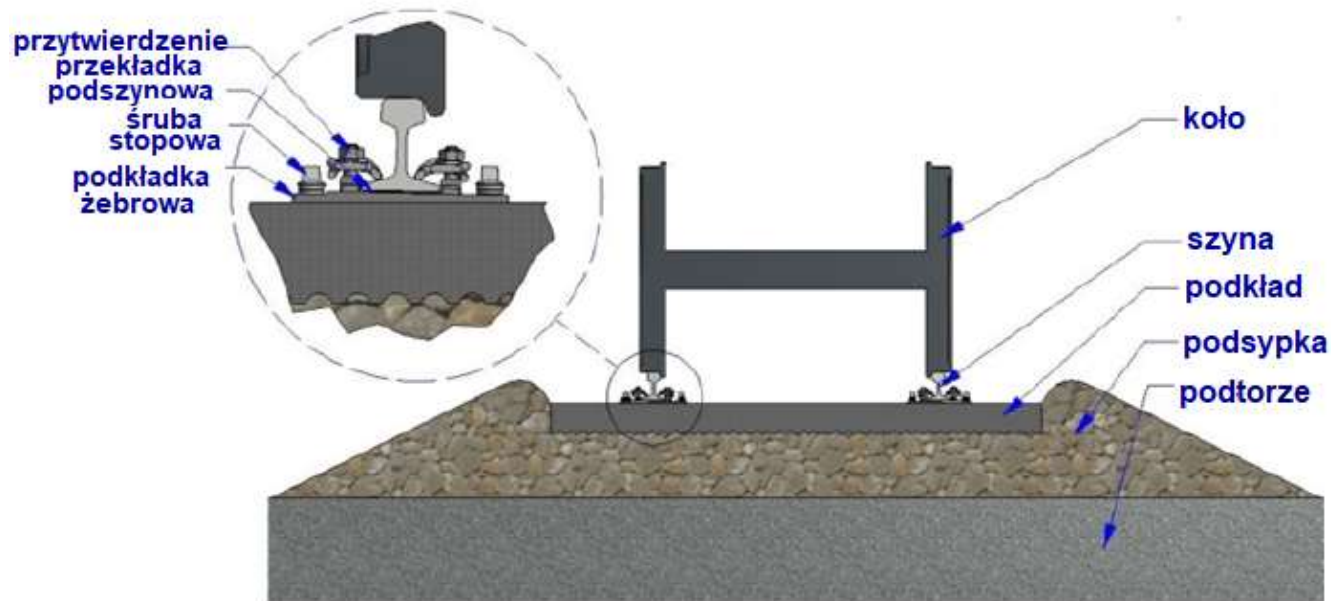
PODKŁADY KOLEJOWE STATYSTYKI [8]



Rodzaje podkładów na szlakach kolejowych europejskich (UIC 2013)



PODKŁADY KOLEJOWE - PRACA W TORZE



zadania

wymagania

- podeprzeć szyny i rozłożyć obciążenie kół na podsypkę,
- utrzymywać szyny we właściwej odległości - szerokości toru,
- przeciwdziałać ruchom poprzecznym i wzdłużnym systemu szynowego,
- być odporne na działanie tnące i ściernie materiału podsypki,
- utrzymać stabilność toru zapobiegając osiadaniu toru,
- zapewnić odpowiednią izolację elektryczną szyn,
- zminimalizować rozprzestrzenianie się hałasu i wibracji.

Rozstaw podkładów zależy od wymaganych parametrów eksploatacyjnych (nacisków osiowych, natężenia przewozów i maksymalnej szybkości pociągów) i w PKP waha się w granicach 0,60–0,80 m, jeśli pomiaru dokonuje się między osiami podkładów.

Liczba podkładów na 1 km toru jest funkcją rozstawu podkładów oraz konstrukcji toru kolejowego i w warunkach polskich wynosi [1]:

od 1233 do 1720 sztuk

(w zależności od konstrukcji toru i jego klasy technicznej).



Ze względu na materiał, z jakiego wykonane są podkłady, rozróżnia się: podkłady drewniane, podkłady betonowe żelbetowe lub strunobetonowe oraz podkłady stalowe.

W Polsce stosuje się powszechnie dwa pierwsze rodzaje podkładów.



Podkłady drewniane i betonowe.
Fotografie pochodzą ze zbiorów IK



PODKŁADY KOLEJOWE DREWNIANE

- Drewno posiada pożądane właściwości mechaniczne dla podkładów; łączy stosunkowo wysoką sztywność przy zginaniu z niską sztywnością przy ściskaniu oraz łagodnym oddziaływaniem pomiędzy podkładem a tłuczniem.
- Chociaż drewno może mieć pożądane właściwości mechaniczne, w praktyce właściwości te mogą się znacznie różnić. W konsekwencji charakterystyki przenoszenia obciążeń mogą się różnić, powodując różnice w obciążeniach podkładów i osiadaniu wzdłuż długości toru.

Tab.I Właściwości gatunków drewna stosowanych do produkcji podkładów w Polsce [1]

Właściwości	Jednostka miary	Gatunek drewna			
		sosna	dąb	buk	azobe
Twardość metodą Janki	[MPa]	30	67	78	155
Twardość wg Brunella HB \perp	[MPa]	11	34	34	53
Wytrzymałość na zginanie statyczne	[MPa]	71	117	210	316
Moduł sprężystości przy zginaniu	[MPa]	12 000	13 500	18 000	24 000
Gęstość przy wilgotności 15%	[kg/m ³]	550	710	730	1 140

PODKŁADY KOLEJOWE DREWNIANE

O trwałości podkładów drewnianych decydują: rodzaj drewna, sposób nasycania i użyte do tego środki, typ szyn, rodzaj przytwierdzeń, rodzaj podsypki i podtorza, stan utrzymania nawierzchni (zwłaszcza stan podsypki), obciążenie linii i wielkość oddziaływań dynamicznych, warunki atmosferyczne oraz klimatyczne. Poszczególne zarządy kolejowe przyjmują różne wielkości graniczne czasu pracy podkładów drewnianych, ustalając je na podstawie własnych, wieloletnich obserwacji i doświadczeń.

Na **kolejach francuskich** ocenia się, że trwałość podkładów drewnianych wynosi **20–25 lat**.

Na **kolejach rosyjskich** trwałość tę szacuje się na **16 lat**.

Koleje brytyjskie różnicują trwałość w zależności od gatunku drewna: trwałość podkładów z drewna miękkiego ocenia się **na 12–25 lat**, a z drewna twardego – **na 30–35 lat**.

W Polsce przyjmuje się, że trwałość podkładów drewnianych wynosi:

18–21 lat dla podkładów z drewna miękkiego zaimpregnowanego;

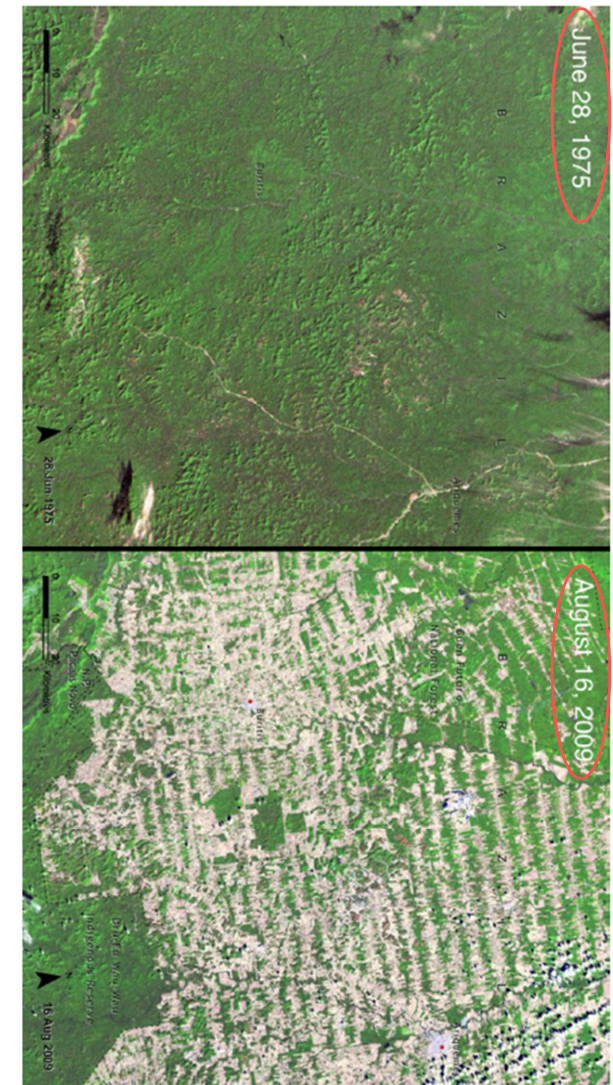
25–30 lat dla podkładów z drewna twardego zaimpregnowanego;

40–50 lat dla podkładów z drewna azobe.



PODKŁADY KOLEJOWE DREWNIANE

- Drewno występuje w dwóch podstawowych rodzajach: drewno iglaste i drewno liściaste, przy czym to pierwsze ma przeważnie niższą sztywność przy zginaniu i krótszą żywotność. Podkłady z drewna iglastego można impregnować kreozotem w celu wydłużenia żywotności. Żywotność podkładów z drewna iglastego bez dodatku kreozotu jest zwykle ograniczona do 8-12 lat, w zależności od gatunku drewna i warunków klimatycznych.
- Drewno liściaste ma dłuższą oczekiwaną żywotność, ale drewno liściaste staje się mniej dostępne i coraz gorszej jakości. Głównym problemem środowiskowym związanym z wykorzystaniem drewna liściastego jest wylesianie.



Zdjęcie satelitarne obszaru Rondônia
w zachodniej Brazylii

PODKŁADY KOLEJOWE DREWNIANE

Kreozot został sklasyfikowany jako substancja rakotwórcza kategorii 1B zgodnie z rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1272/2008 i spełnia kryteria pozwalające uznać go za substancję trwałą, wykazującą zdolność do bioakumulacji i toksyczną oraz substancję bardzo trwałą i wykazującą bardzo dużą zdolność do bioakumulacji zgodnie z załącznikiem XIII do rozporządzenia (WE) nr 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady, spełnia on kryteria wyłączenia określone w art. 5 ust. 1 lit. a) i e) rozporządzenia (UE) nr 528/2012 [9].

ROZPORZĄDZENIE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY (UE) NR 528/2012

z dnia 22 maja 2012 r.

w sprawie udostępniania na rynku i stosowania produktów biobójczych

L 167/12

PL

Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej

27.6.2012

3. Na wniosek jednego z państw członkowskich Komisja może zdecydować – w drodze aktów wykonawczych – czy dana substancja jest nanomateriałem, uwzględniając w szczególności zalecenie Komisji 2011/696/UE z dnia 18 października 2011 r. w sprawie definicji nanomateriałów⁽¹⁾, oraz czy dany produkt lub grupa produktów są produktami biobójczymi lub wyrobami poddanymi ich działaniu, lub też żadnym z nich. Te akty wykonawcze przyjmuje się zgodnie z procedurą sprawdzającą, o której mowa w art. 82 ust. 3.

4. Komisja jest uprawniona do przyjęcia aktów delegowanych zgodnie z art. 83 w celu dostosowania definicji nanomateriałów określonej w ust. 1 lit. z) niniejszego artykułu do postępu naukowo-technicznego i przy uwzględnieniu zalecenia 2011/696/UE.

ROZDZIAŁ II

ZATWIERDZANIE SUBSTANCJI CZYNNYCH

Artykuł 4

Warunki zatwierdzenia

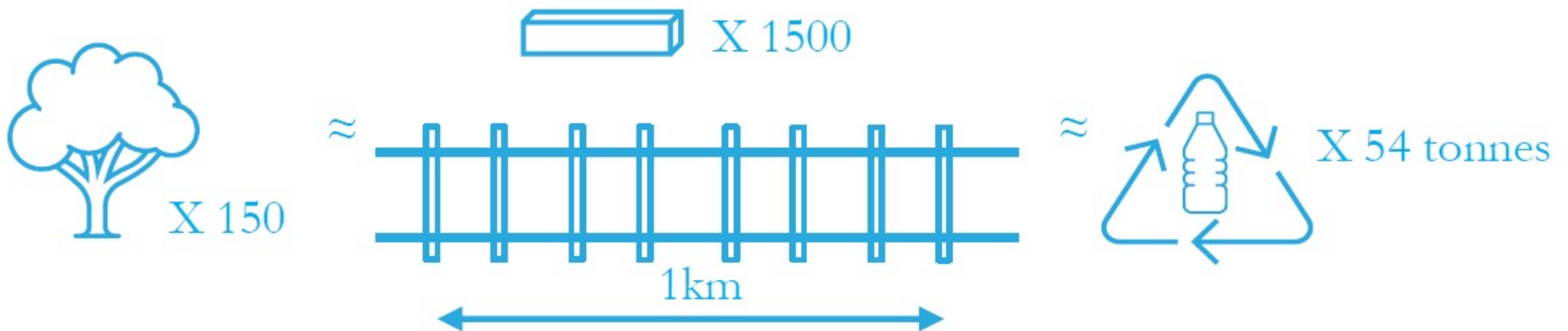
1. Substancja czynna zostaje zatwierdzona na początkowy okres nie dłuższy niż 10 lat, jeśli można oczekiwać, że przynajmniej jeden z zawierających ją produktów biobójczych spełnia kryteria określone w art. 19 ust. 1 lit. b) z uwzględnieniem czynników, o których mowa w art. 19 ust. 2 i 5. Substancja czynna wchodząca w zakres art. 5 może zostać zatwierdzona jedynie na początkowy okres nieprzekraczający 5 lat.
2. Zatwierdzenie substancji czynnej ograniczone jest do grup produktowych, dla których dostarczone odpowiednie dane zgodnie z art. 6.
3. Wraz z zatwierdzeniem substancji czynnej określa się, w odpowiednich przypadkach, następujące warunki:

Artykuł 5

Kryteria wyłączenia

1. Z zastrzeżeniem ust. 2 nie zatwierdza się następujących substancji czynnych:
 - a) substancje czynne, które zgodnie z rozporządzeniem (WE) nr 1272/2008 zostały sklasyfikowane jako rakotwórcze kategorii 1A lub 1B lub spełniają odpowiednie kryteria, by być tak sklasyfikowane;
 - b) substancje czynne, które zgodnie z rozporządzeniem (WE) nr 1272/2008 zostały sklasyfikowane jako mutagenne kategorii 1A lub 1B lub spełniają odpowiednie kryteria, by być tak sklasyfikowane;
 - c) substancje czynne, które zgodnie z rozporządzeniem (WE) nr 1272/2008 zostały sklasyfikowane jako szkodliwe dla rozrodczości kategorii 1A lub 1B lub spełniają odpowiednie kryteria, by być tak sklasyfikowane;
 - d) substancje czynne, które na podstawie kryteriów określonych zgodnie z ust. 3 akapit pierwszy, lub w oczekiwaniu na przyjęcie tych kryteriów – na podstawie ust. 3 akapit drugi i trzeci, uznano za mające właściwości zaburzające gospodarkę hormonalną, które mogą spowodować niepożądane skutki u ludzi, lub które zostały określone zgodnie z art. 57 lit. f) i art. 59 ust. 1 rozporządzenia (WE) nr 1907/2006 jako zaburzające gospodarkę hormonalną;
 - e) substancje czynne, które spełniają kryteria pozwalające je uznać za PBT lub vPvB zgodnie z załącznikiem XIII do rozporządzenia (WE) nr 1907/2006.

PODKŁADY KOLEJOWE DREWNIANE – ASPEKTY EKOLOGICZNE [2]



PODKŁADY KOLEJOWE BETONOWE

Budulec podkładów betonowych (beton i zbrojenie) jest narażony na korozję. Intensywność tego zjawiska zależy m.in. od materiałów wysypujących się z nieszczelnych wagonów i od prądów błędzących. W miarę upływu czasu maleje też mrozoodporność podkładów (po 10 latach eksploatacji zmniejsza się ona o 25–30%).

Podanie ścisłych wartości trwałości jest niemożliwe ze względu na różnorodność typów i odmian tych podkładów, zmienność warunków eksploatacyjnych oraz bardzo duży wpływ, jaki na trwałość podkładów betonowych wywiera utrzymanie nawierzchni. Specjaliści szacują trwałość podkładów betonowych na 40–50 lat.

W Polsce graniczny czas pracy podkładów betonowych określa się na [1]:

35 lat na liniach o natężeniu przewozów większym od 15 Tg/rok;

40 lat na liniach, na których natężenie przewozów nie przekracza 15 Tg/rok.



PODKŁADY KOLEJOWE BETONOWE

Do zalet podkładów betonowych należy zaliczyć:

- niską cenę,
- możliwość doboru konstrukcji podkładu do konkretnych wymagań,
- duży opór przeciwko przesunięciom toru,
- łatwość wytwarzania oraz długi okres eksploatacji w torze.

Podczas produkcji podkładów betonowych są w nich montowane elementy przytwierdzeń szynowych (dyble na wkręty lub kotwy do łapki SB), z tego powodu ich wytwarzanie wymaga ścisłego przestrzegania reżimów technologicznych.

Wady to przede wszystkim:

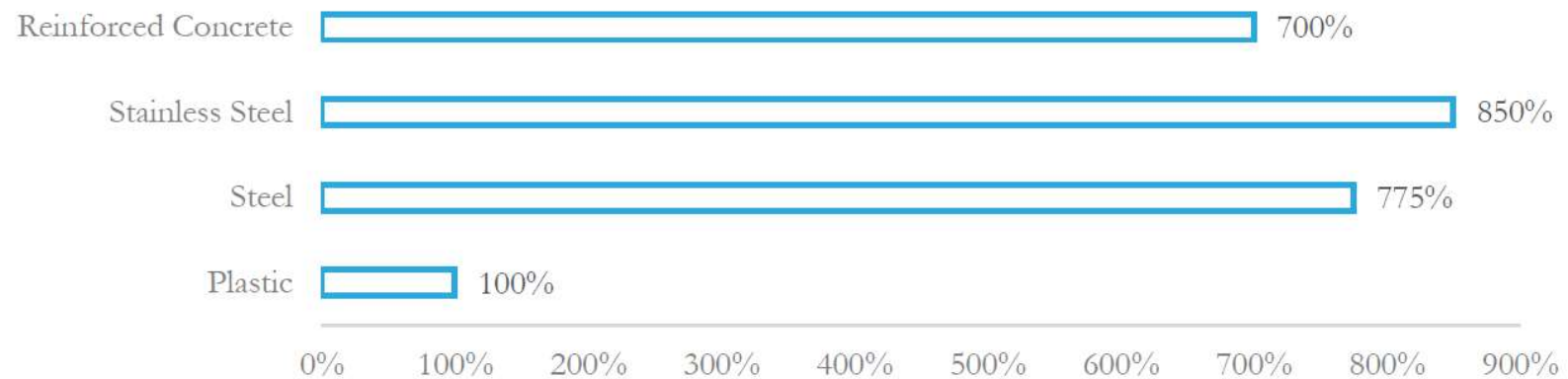
- destrukcyjny wpływ podkładów na podsypkę (rozkruszanie ziaren podsypki pod stopą podkładu na skutek oddziaływań dynamicznych)
- mała odporność uderowa powodująca ich masowe niszczenie w wypadku wykolejenia pociągu

PODKŁADY KOLEJOWE BETONOWE

- Podkłady betonowe mają znacznie większą sztywność przy zginaniu i twardość powierzchni w porównaniu z podkładami drewnianymi lub polimerowymi. Te cechy powodują stosunkowo wysokie momenty zginające, obciążenia części podszynowej i lokalne wysokie naprężenia kontaktowe z tłuczniem.
- Tłumienie musi być zamiast tego zapewnione przez podsypkę tłuczniową i podkładkę podszynową. Wszystko, co zmniejsza zdolność tłucznia do tłumienia, na przykład zanieczyszczenie pyłem węglowym lub piaskiem, może powodować większe obciążenia udarowe i przedwczesne uszkodzenia podkładów betonowych.
- Duża waga podkładów betonowych wspomaga stabilność boczną toru, ale zwiększa koszty transportu i instalacji.



PORÓWNANIE ZUŻYCIA ENERGII PRZY PRODUKCJI PODKŁADÓW KOLEJOWYCH [2]



KOMPOZYTY

Materiał kompozytowy (lub kompozyt) - jest materiałem monolitycznym, ale o wyraźnej mikrostrukturze z widocznymi granicami między składnikami. Właściwości kompozytów nigdy nie są sumą, czy średnią właściwości jego składników. Najczęściej jeden z komponentów stanowi osnowę, która gwarantuje jego spójność, twardość, elastyczność i odporność na ściskanie, a drugi, tzw. komponent konstrukcyjny (wzmocnienie, zbrojenie) zapewnia większość pozostałych własności mechanicznych kompozytu.



KLASYFIKACJA KOMPOZYTÓW

PODZIAŁ KOMPOZYTÓW ZE WZGLĘDU NA OSNOWĘ:

- metalowe
- ceramiczne
- polimerowe

PODZIAŁ KOMPOZYTÓW ZE WZGLĘDU NA WZMOCNIENIE:

- wzmacniane dyspersyjnie małymi cząstkami o rozmiarach 10-250 nm lub większymi
- wzmacniane płatkami
- wzmacniane włóknami nieciągłymi
- wzmacniane włóknami ciągłymi
- wzmacniane szkieletowo
- wzmacniane warstwowo

KOMPOZYTY POLIMEROWE

Kompozyty polimerowe o osnowie z żywic termoutwardzalnych lub termoplastów, zaś włóknach np.: szklanych.

Kompozyty hybrydowe łączące kilka materiałów, np. osnowę polimerową zbrojoną włóknami szklanymi i jednocześnie cienkimi warstwami metalu (np. Al.). Kompozyty te łączą cechy wysokiej wytrzymałości z dużą ciągliwością.



PODKŁADY KOLEJOWE POLIMEROWE

Typ I

Podkłady z krótkimi włóknami lub bez wzmocnienia włóknami – w skład tej grupy wchodzi podkłady, do których produkcji użyto np. przetworzonych przemysłowych tworzyw sztucznych, kauczuku naturalnego oraz przetworzonej gumy.

Podkłady składające się z tworzyw sztucznych pochodzących z recyklingu (torby plastikowe, zużyte opony samochodowe, plastikowe kubki do kawy, butelki na mleko, butelki po detergentach itp.) lub masy bitumicznej z wypełniaczami (piasek, żwir, lub krótkie włókna szklane < 20 mm) zalicza się do kategorii podkładów typu I.

Producenci podkładów kolejowych zaliczanych do typu I: TieTek, Axion, IntegriCo, I-Plas, Tufflex, Natural rubber, Kunststof Lankhorst Product (KLP), Mixed Plastic Waste (MPW) i Wood-core.



Kompozytowe podkłady kolejowe ECOTRAX™ zainstalowane na moście kolejowym w Fort Eustis w stanie Wirginia [broszura AXION]



PODKŁADY KOLEJOWE POLIMEROWE

Typ II

Podkłady z długimi włóknami wzmocniającymi w kierunku wzdłużnym.

Do tej kategorii podkładów zalicza się podkład syntetyczny FFU (wzmocniona włóknem pianka poliuretanowa). Do kluczowych cech tego materiału zalicza się lekkość, dobra odporność na wchłanianie wody, ciepło i korozję, łatwość wiercenia oraz ponad 50-letnia żywotność.

Do chwili obecnej materiał ten został zainstalowany na ponad 1300 km torów (około 2 miliony podkładów). Oprócz Japonii podkłady Sekisui FFU zostały zainstalowane w Niemczech, Austrii, Tajwanie, Holandii, USA i Australii.



Budowa kompozytu FFU firmy Sekisui.
(Materiały promocyjne Sekisui)



Fotografie pobrane ze strony Sekisui
<https://sekisui-rail.com/ffu.html#flatsleepers>

PODKŁADY KOLEJOWE POLIMEROWE

Typ III

Podkłady te wzmocnione są włóknem w kierunku podłużnym i poprzecznym, w związku z czym zarówno właściwości przy zginaniu, jak i ścinaniu są zdominowane przez włókna.

Właściwości konstrukcyjne tego podkładu można określić poprzez ustawienie kierunku włókien, zgodnie z określonymi wymaganiami eksploatacyjnymi. Do tej kategorii zaliczają się wielowarstwowe podkłady polimerowe typu laminowanego lub sandwich.



Podkład z laminatu kompozytowego [7]

**PODKŁADY KOLEJOWE POLIMEROWE
W PORÓWNANIU DO DREWNA**

Performance measurement	AREMA specification				
	Oak	Softwood	Type-1	Type-2	Type-3
Density, (kg/m ³)	1096	855	850-1150	740	1040-2000
Modulus of elasticity, (GPa)	8.4	7.4	1.5-1.8	8.1	5.0-8.0
Modulus of rupture, (MPa)	57.9	49.3	17.2-20.6	142	70-120
Shear strength, (MPa)	5	4	4	10	15-20
Rail seat compression, (MPa)	4.6	3	15.2-20.6	28	40
Screw withdrawal, (kN)	22.2	13.3	31.6-35.6	65	> 60



**PORÓWNANIE MATERIAŁÓW
NA PODKŁADY KOLEJOWE [13]**

Właściwości	Drewno	Beton	Stal	Polimer	Polimero - beton
Obsługa i instalacja	łatwa	Trudna	Trudna	łatwa	łatwa
Konserwacja	Częsta	Rzadka	Częsta	Bardzo rzadka	Bardzo rzadka
Wymiana	łatwa	Trudna	Trudna	łatwa	łatwa
Koszt początkowy	Wysoki	Bardzo wysoki	Bardzo wysoki	Bardzo wysoki	Bardzo wysoki
Recykling	Niemożliwy	Niemożliwy	Możliwy	Możliwy	Niemożliwy
koszt wymiany	448 zł/km	650 zł/km	20 - 30 % wartości pierwotnej	przez producenta - tylko koszty transportu	710 zł/km
Żywotność (lata)	15	25	35	60	60
Koszt za podkład wraz z wyposażeniem	210	275	545	650	730

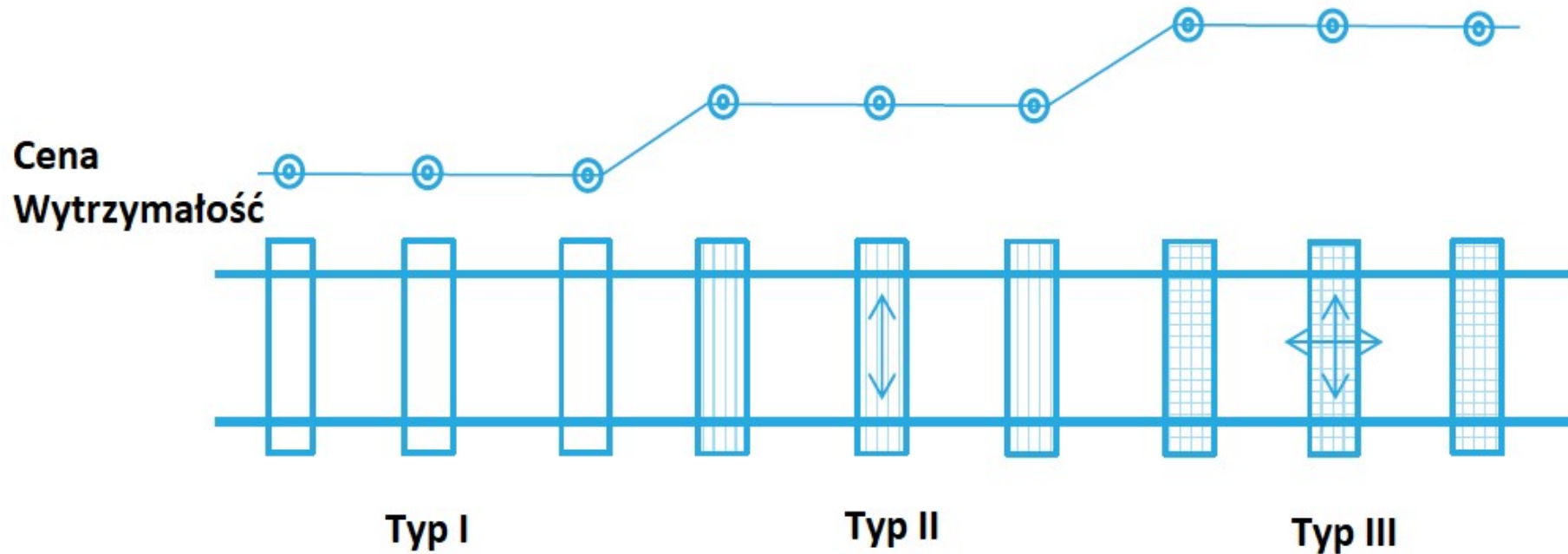


**PORÓWNANIE MATERIAŁÓW
NA PODKŁADY KOLEJOWE [13]**

Właściwości	Drewno	Beton	Stal	Polimer	Polimero- beton
Waga (kg)	60-70	285	70-80	60-70	60-70
Trwałość	Niska	Wysoka	Niska	Wysoka	Wysoka
Odształcalność	Duża	Mała	Mała	Duża	Mała
Plastyczność	Duża	Mała	Mała	Duża	Mała
Przewodność elektryczna	Mała	Duża	Bardzo duża	Mała	Mała
Wytrzymałość mechaniczna	Wysoka	Niska	Średnia	Wysoka	Wysoka
LCC w skali 100 lat (zł/rok)	24,5	22,25	13,15	7,3	8,1



PODKŁADY KOLEJOWE POLIMEROWE



Typy podkładów polimerowych [2]



PODKŁADY KOLEJOWE POLIMEROWE

Potencjalnie korzystne zastosowania podkładów polimerowych:

- sytuacje, w których ciężar ma kluczowe znaczenie,
- sytuacje ze słabym odwodnieniem, takie jak tor osadzony w nawierzchni drogi,
- obszary o ograniczonej dostępności w celu konserwacji, takie jak tunele i mosty,
- obszary, w których występuje duże zanieczyszczenie tłuszczem,
- obszary z problemami hałasu lub wibracji podłoża,
- obszary, w których wymagana jest punktowa wymiana podkładów drewnianych.



PODKŁADY KOLEJOWE POLIMEROWE

Wybór polimeru, który ma zostać użyty do podkładu, jest podyktowany głównie właściwościami mechanicznymi i ceną.

Analiza porównawcza LCC (life cycle cost) została przeprowadzona w ramach pracy A. Butor [11] dla 1 km torów w skali 150 lat

MONTAŻ					
Rodzaj podkładu	Cena za zakup pierwszego podkładu (za sztukę)	Koszt pierwszego zakupu podkładów na 1km toru	Koszt montażu za 1 sztukę	Koszt montażu na 1km toru	Suma kosztów montażu (materiał + usługa)
Drewno	436 zł	654 000 zł	170 zł	255 000 zł	909 000 zł
Beton	330 zł	495 000 zł	170 zł	255 000 zł	750 000 zł
Poliuretan	1 660,75 zł	2 491 125 zł	170 zł	255 000 zł	2 746 125 zł
Polietylen	951,41 zł	1 427 115 zł	170 zł	255 000 zł	1 682 115 zł

WYMIANA							
Rodzaj podkładu	Cena za zakup kolejnych podkładów (za sztukę)	Koszt za zakup kolejnych podkładów (na 1km toru)	Koszt poniesiony na wymianę podkładu (za 1 sztukę)	Koszt poniesiony na wymianę podkładów (na 1km toru)	Suma kosztów poniesionych na zakup wymienianych podkładów w analizie	Suma kosztów poniesionych na wymianę podkładów w analizie	Suma kosztów wymian (materiał + usługa)
Drewno	436 zł	654 000 zł	170 zł	255 000 zł	3 270 000 zł	1 275 000 zł	4 545 000 zł
Beton	330 zł	495 000 zł	170 zł	255 000 zł	1 980 000 zł	1 020 000 zł	3 000 000 zł
Poliuretan	1 660,75 zł	2 491 125 zł	170 zł	255 000 zł	4 982 250 zł	510 000 zł	5 492 250 zł
Polietylen	475,71 zł	713 558 zł	170 zł	255 000 zł	1 427 115 zł	510 000 zł	1 937 115 zł

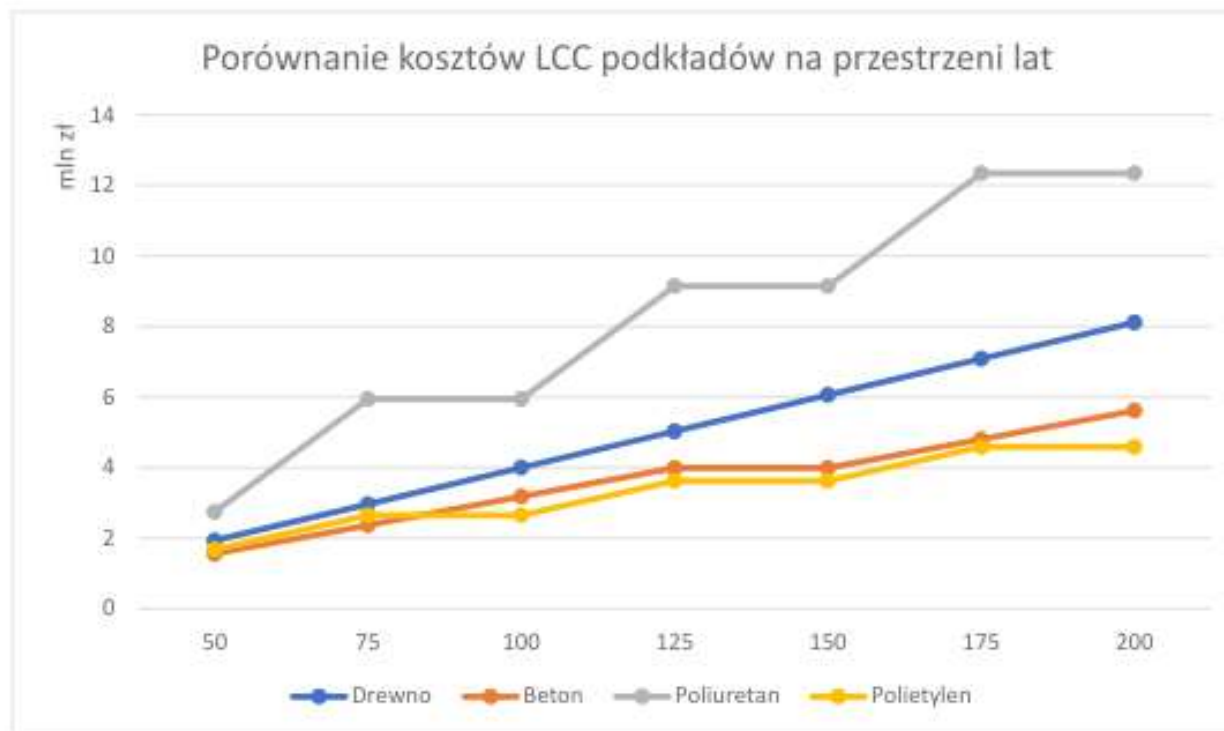
UTYLIZACJA				
Rodzaj podkładu	Ilość utylizacji w czasie analizy	Koszt utylizacji za sztukę	Koszt utylizacji podkładów (na 1km)	Koszt utylizacji w ciągu 150 lat
Drewno	5	80 zł	120 000 zł	600 000 zł
Beton	4	40 zł	60 000 zł	240 000 zł
Poliuretan	2	300 zł	450 000 zł	900 000 zł
Polietylen	0	0 zł	0 zł	0 zł

Koszt życia produktu w zł	
Drewno	6 054 000 zł
Beton	3 990 000 zł
Poliuretan	9 138 375 zł
Polietylen	3 619 230 zł



PODKŁADY KOLEJOWE POLIMEROWE [11]

	50	75	100	125	150	175	200
Drewno	1,94	2,97	4,00	5,03	6,05	7,08	8,11
Beton	1,56	2,37	3,18	3,99	3,99	4,80	5,61
Poliuretan	2,75	5,94	5,94	9,14	9,14	12,33	12,33
Polietylen	1,68	2,65	2,65	3,62	3,62	4,59	4,59



PODKŁADY KOLEJOWE POLIMEROWE ASPEKTY EKOLOGICZNE

Okolo 50% wszystkich produkowanych polimerów należy do kategorii poliolefin, składającej się głównie z:

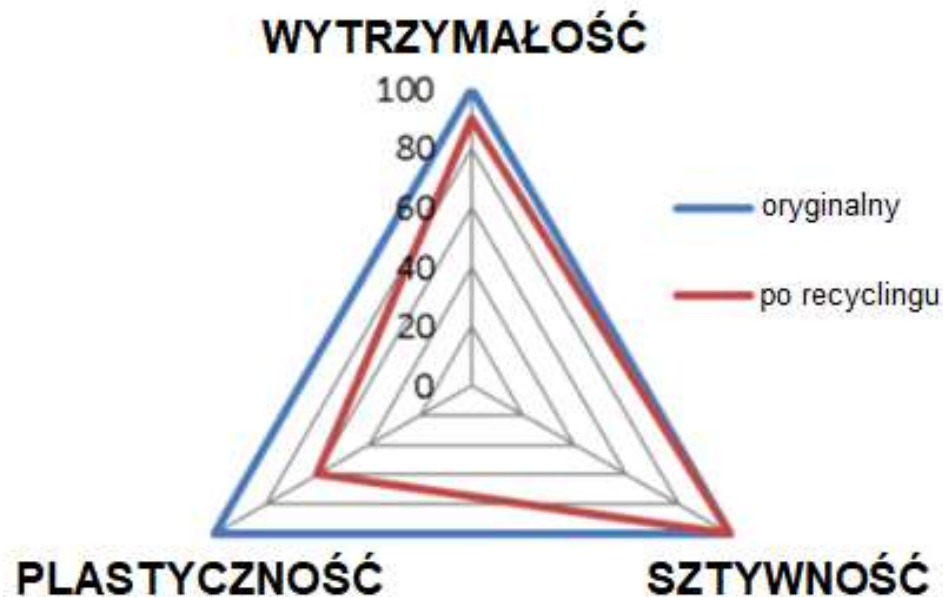
- polietylenu o dużej gęstości (HDPE),
- polietylenu o małej gęstości (LDPE),
- polipropylenu (PP).

Poliolefiny to grupa polimerów termoplastycznych, których podstawowym składnikiem są olefiny – nienasycone węglowodory o podwójnym wiązaniu między atomami węgla. Są to materiały o niskiej gęstości, wykazują doskonałą odporność na działanie chemikaliów, co pozwala na ich stosowanie w agresywnych środowiskach, są również odporne na działanie promieniowania UV, co sprawia, że nie ulegają degradacji pod wpływem słońca.



PODKŁADY KOLEJOWE POLIMEROWE ASPEKTY EKOLOGICZNE

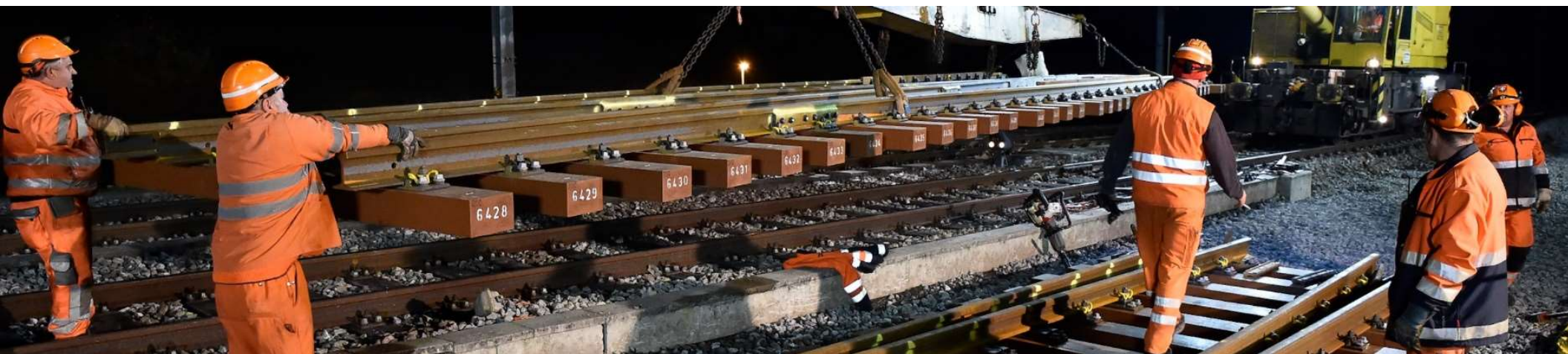
Poliolefiny mają właściwości mechaniczne zależne od czasu i temperatury. W przypadku produktów o dużej objętości, takich jak podkłady, preferowane jest stosowanie materiałów pochodzących z recyklingu [3].



PODKŁADY KOLEJOWE POLIMEROWE Z POLIURETANU

Podkłady z drewna syntetycznego wykonane z FFU® stosowane są na skalę światową od lat 80-tych.

Syntetyczne podkłady Sekisui produkowane są w procesie „pultruzji”, podczas którego włókna szklane są namaczane i mieszane z poliuretanem, następnie utwardzane w podwyższonej temperaturze, formowane i przycinane na odpowiednią długość. Jedynymi odpadami powstałymi w tym procesie są pyły odpadowe i wióry powstałe podczas wiercenia, frezowania i piaskowania, a 100% tych odpadów jest poddawanych recyklingowi.



Fotografia pobrana ze strony internetowej SEKISUI CHEMICAL GmbH
(dostęp z dnia 07.10.2024)

PODKŁADY KOLEJOWE POLIMEROWE Z POLIURETANU

Wszystkie podkłady drewniane z drewna syntetycznego pod koniec swojego życia poddawane są recyklingowi i powstają z nich nowe produkty. Pod koniec ich życia na torze można ponownie wykorzystać FFU na wiele sposobów: na przykład przyciąć na potrzeby innych projektów i zastosować jako chodnik na kładkach dla pieszych lub zwrócić do Sekisui, który wykorzysta go do produkcji dalszych produktów. Firma produkuje już wiele produktów z odpadów produkcyjnych.

<https://www.railengineer.co.uk/ffu-sleepers-simply-working-and-sustainable/>

Opracowaliśmy także technologię recyklingu. Przy użyciu FFU jako surowców wytwarza się różne produkty, które wykorzystuje się w różnych miejscach do różnych celów. Na przykład zbieramy odpady FFU powstałe podczas produkcji i rozdrabniamy je. Rozdrobnione materiały miesza się ze specjalną żywicą i wykorzystuje do produkcji syntetycznego podkładu kolejowego FFU pochodzącego z recyklingu (R-FFU). Tysiące podkładów pochodzących z recyklingu zainstalowano na prywatnych kolejach w Japonii.

<https://www.linkedin.com/posts/sekisui-ffu-railway-technology-recycle-reuse-sustainable-activity-7226149997828792320-HtYP/>
post sprzed 2 miesięcy

PODKŁADY KOLEJOWE POLIMEROWE EPS

Vossloh Engineered Polymer Sleeper (EPS) made of *amalentic*





Fields of application	Direct fastening Track sleepers, tunnels, slab track	Indirect fastening	Turnout sleepers	Bridge beams
Axle loads	up to 35.5 t	up to 35.5 t	up to 25 t	up to 25 t
Electrical resistance	> 150 kΩ	> 150 kΩ	> 150 kΩ	> 150 kΩ
Density	~ 1.55 g/cm ³	~ 1.55 g/cm ³	~ 1.55 g/cm ³	~ 1.55 g/cm ³
Coefficient of thermal expansion	22,3 x 10 ⁻⁶ 1/K	17,5 x 10 ⁻⁶ 1/K	17,5 x 10 ⁻⁶ 1/K	23,9 x 10 ⁻⁶ 1/K
Modulus of elasticity	2.300 – 7.300 MPa	2.300 – 7.300 MPa	2.300 – 7.300 MPa	up to 8.500 MPa
Anchoring pull-out forces for standard sleeper screws	> 85 kN	> 70 kN (drilled screw hole) > 85 kN (prefabricated screw hole)	> 70 kN (drilled screw hole)	> 70 kN (drilled screw hole) > 85 kN (prefabricated screw hole)
Water absorption	~ 0.1%	~ 0.1%	~ 0.1%	~ 0.1%
Fire behaviour	Difficult to ignite, low smoke development			
Dimensions	160 x 260 x 2.600 [mm] 150 x 250 x 2.600 [mm]	160 x 260 x 2.600 [mm] 150 x 250 x 2.600 [mm]	160 x 260 x 2.200-5.000 [mm] 150 x 250 x 2.200-5.000 [mm]	Basic bridge beam 160 x 240 x 2,600 [mm] Height adjustment elements up to 160 mm Total height from 160 mm up to 320 mm
Weight	170 kg	175 kg	74 kg/m	170 - 200 kg



Materiały ze strony [www.firma Vossloh](http://www.firma.vossloh.com)



PORÓWNANIA WYBRANYCH WŁASNOŚCI PODKŁADÓW [3]

Property	Standard	Unit	Value			
			Lankhorst sleeper type 201	Lankhorst sleeper type 206	Lankhorst sleeper type 202	Lankhorst sleeper type 102
Width	-	mm	250	250	250	250
Depth	-	mm	150	150	150	160
Length	-	mm	2,600	2,600	2,600	2,600
Matrix material	-	-	KLP-PE	KLP-HS	KLP-HS	KLP-HS
Reinforcement	-	-	 4 x \varnothing 16 mm	 4 x \varnothing 16 mm	 4 x \varnothing 25 mm	 2 x \varnothing 25 mm
Sleeper strength in bending	EN 13230-2	kNm	43	48	65	29
Sleeper yield point in bending	EN 13230-2	kNm	18	20	35	18
Sleeper dynamic stiffness	ISO 12856	kN/mm	9.7	14.5	25	8.7
Sleeper dynamic bending stiffness EI ¹⁾	-	kNm ²	580	870	1,450	520
Dynamic bending modulus ²⁾	-	GPa	8.2	12.3	20.6	6.1
Compression strength	ISO 604	MPa	14	26	26	26
Dynamic compression modulus	ISO 12856	MPa	180	810	810	810

Lankhorst sleeper type 201, 206 & 202



Lankhorst sleeper type 102



¹⁾ Calculated from sleeper dynamic bending stiffness

²⁾ Calculated on the basis of outer dimensions from sleeper dynamic bending stiffness



PODKŁADY KOLEJOWE POLIMEROWE

Polimery są czasami łączone z innymi materiałami i mogą być podklasyfikowane w zależności od kombinacji materiałów.

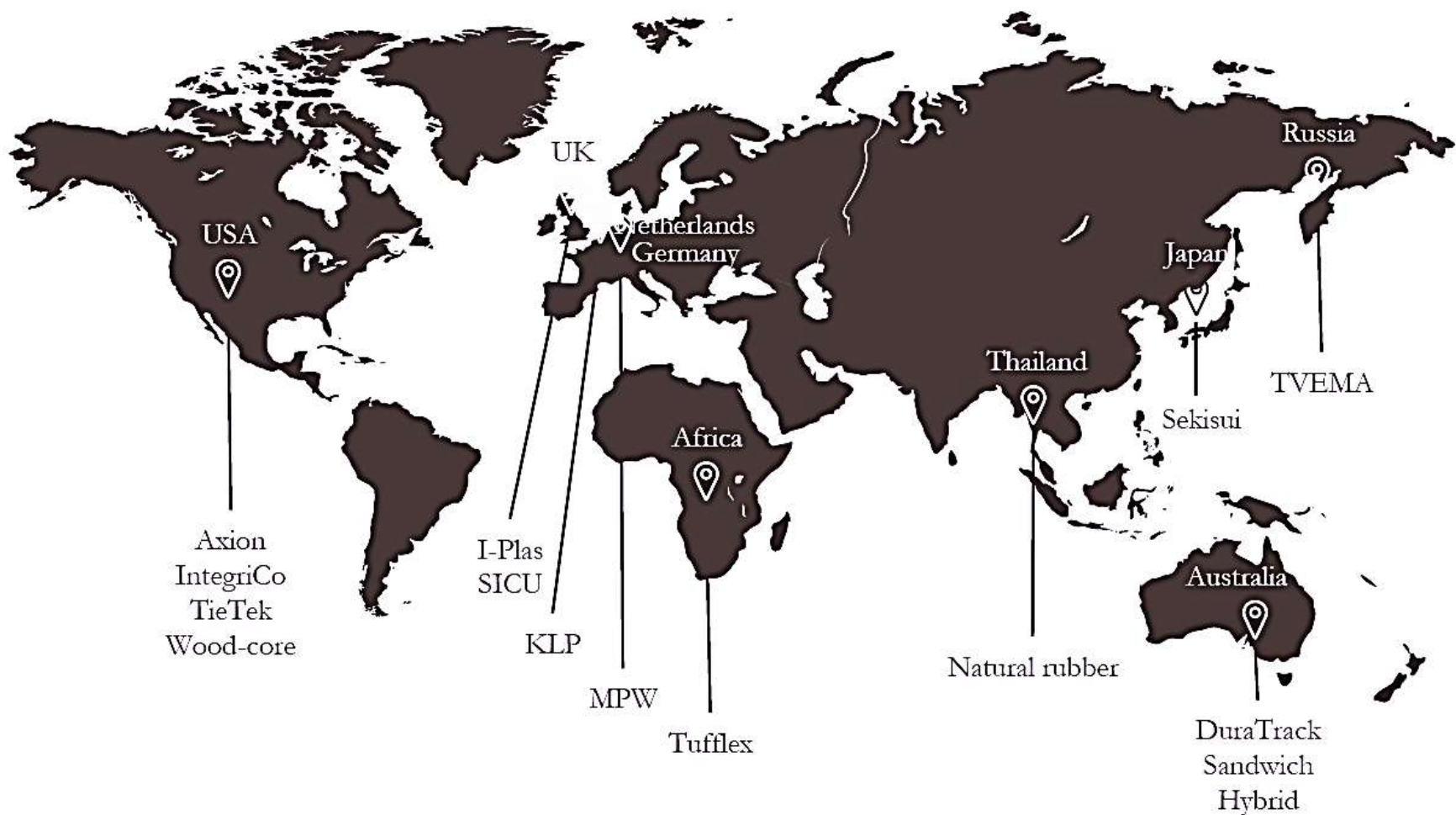
Polimery wzmocnione włóknami to takie, w których włókna szklane są mieszane z roztopionym polimerem [FRP].

Termin **kompozyt** - czasami ma węższe znaczenie, tj. polimery wzmocniane włóknami.

Podkłady hybrydowe mają osnowę polimerową i zawierają wzmocnienia, które są ciągłe na całej długości podkładu, np. włókno szklane lub pręty stalowe. Ten typ wzmocnienia zapewnia większą wytrzymałość i sztywność zginania.



PODKŁADY KOLEJOWE POLIMEROWE NA ŚWIECIE [2]



PODKŁADY KOLEJOWE POLIMEROWE NA ŚWIECIE

Type	Technology	Country	Material
I	TVEMA	Russia	Recycled high-density polyethylene
I	DuraTrack	Australia	Recycled waste plastics (pipes and drums, agricultural films, boxes, etc.)
I	Tie Tek	USA	85% recycled plastics+ waste fibreglass
I	Axion	USA	100% recycled plastics (bag, bottles, etc.)
I	IntegriCo	USA	100% recycled plastic materials
I	Tufflex	South Africa	Recycled polypropylene and high-density polymer
I	Natural rubber	Thailand	Natural rubber
I	KLP	Netherlands	100% recycled plastic materials
I	Fraunhofer-ICT	Germany	Mixed plastics and glass fibre waste
I	Wood-core	USA	Polyethylene-based plastic mixture around wood core
II	Sekisui	Japan	Fibre reinforced foamed urethane (FFU) (100% recyclable)
III	SICUT	UK	Recycled plastics, reinforced with glass fibre
III	Sandwich	Australia	Glue laminated sandwich composite
III	Hybrid	Australia	Geopolymer concrete filled pultruded composite

Tab.II Podkłady kolejowe polimerowe stosowane w różnych krajach świata [2]

PODKŁADY KOLEJOWE POLIMEROWE

Podkłady polimerowe można naprawiać!



Materialy ze strony [www.firmy Vossloh](http://www.firmy.vossloh)

CO WPŁYWA NA MECHANICZNE ZACHOWANIE KOMPOZYTOWYCH PODKŁADÓW KOLEJOWYCH?

Zachowanie mechaniczne polimerów zależy od czasu trwania obciążenia (i temperatury). Zależność tę należy uwzględnić podczas projektowania badań podkładów polimerowych.

Stal, drewno i beton można uznać za materiały sprężyste (przy małych odkształceniach). Materiały sprężyste odkształcają się pod wpływem obciążenia i szybko powracają do stanu pierwotnego po usunięciu naprężenia. Zachowanie materiału można modelować jako sprężynę.

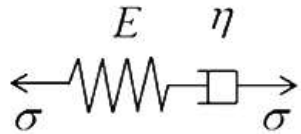
W przypadku lepkich cieczy naprężenie jest proporcjonalne do szybkości odkształcenia i niezależne od samego odkształcenia. Materiały te można modelować jako tłumik drgań.

Polimery są materiałami **lepkosprężystymi**, mającymi elementy obu tych właściwości i można je modelować za pomocą kombinacji sprężyn i tłumików drgań. **Oznacza to, że właściwości mechaniczne polimerów są funkcją czasu.**

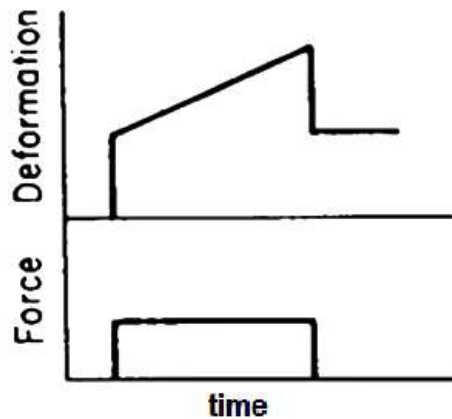


**CO WPŁYWA NA MECHANICZNE ZACHOWANIE
KOMPOZYTOWYCH PODKŁADÓW KOLEJOWYCH [15]?**

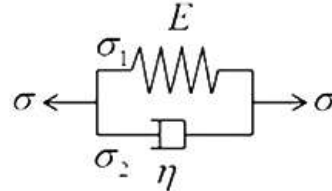
MAXWELL



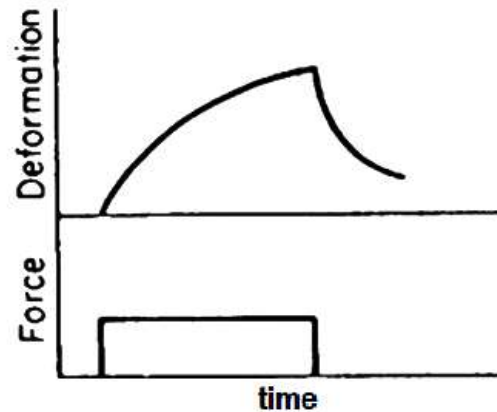
$$\sigma + \frac{\eta}{E} \dot{\sigma} = \eta \dot{\epsilon}$$



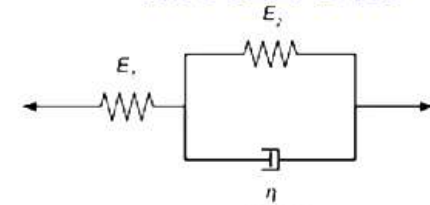
KELVIN - VOIGT



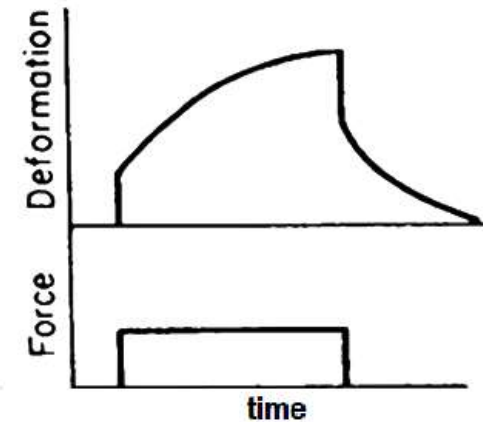
$$\sigma = E\epsilon + \eta \dot{\epsilon}$$



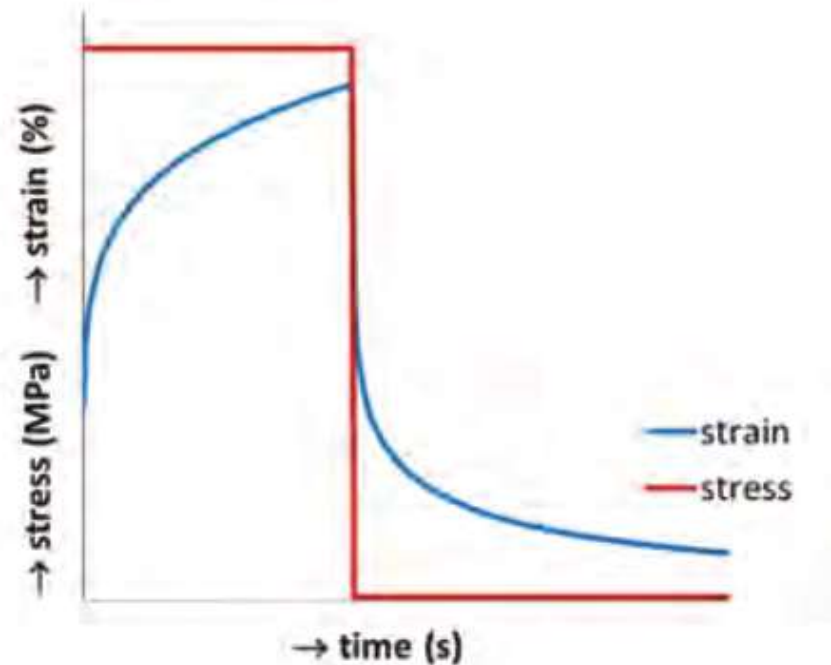
**STANDARD LINEAR
VISCOELASTIC**



$$\sigma + \frac{\eta}{E_1 + E_2} \dot{\sigma} - \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \epsilon + \frac{E_1 \eta}{E_1 + E_2} \dot{\epsilon}$$



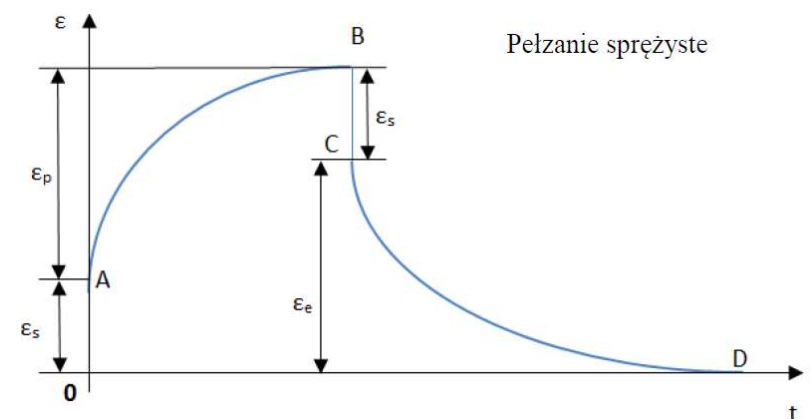
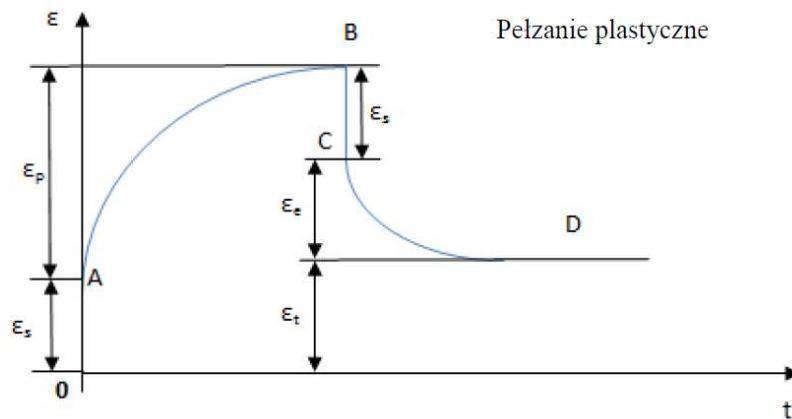
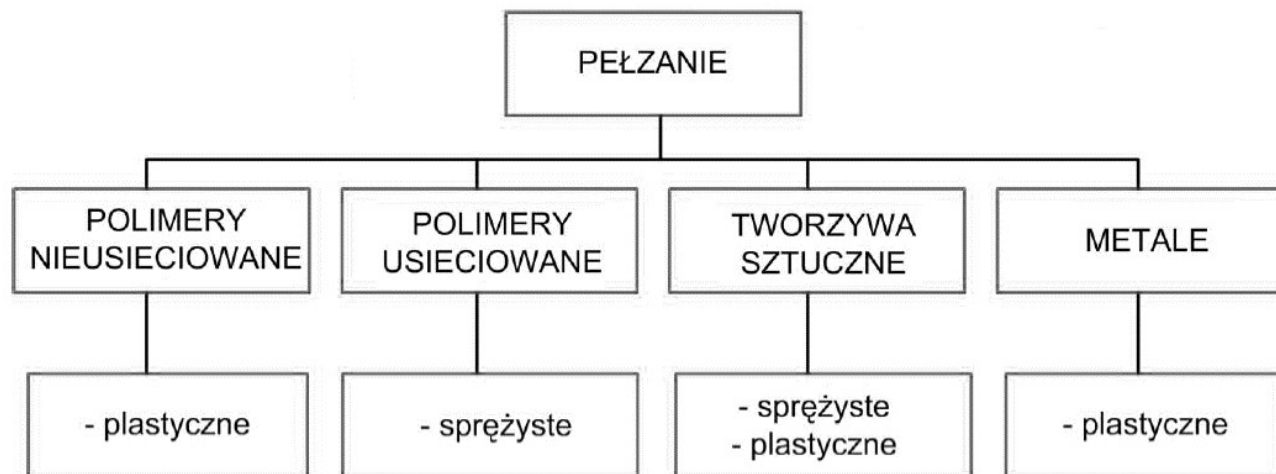
**CO WPŁYWA NA MECHANICZNE ZACHOWANIE
KOMPOZYTOWYCH PODKŁADÓW KOLEJOWYCH?**



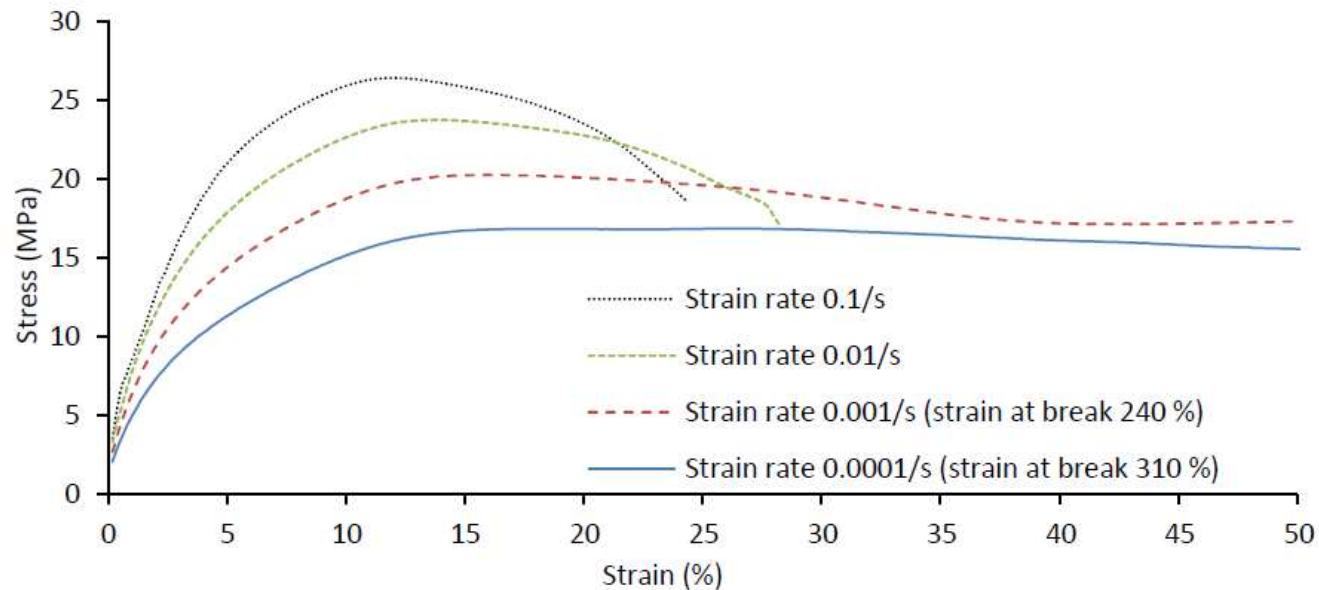
Napężenie i odkształcenie w czasie dla polimerów

Gdy polimer jest obciążony stałym obciążeniem, odkształcenie będzie rosło w czasie, ze spadkiem szybkości (pełzanie). Gdy napężenie zostanie usunięte, część lepka początkowo pozostanie, zanikając z czasem [3].

**CO WPŁYWA NA MECHANICZNE ZACHOWANIE
KOMPOZYTOWYCH PODKŁADÓW KOLEJOWYCH [16]?**



CO WPŁYWA NA MECHANICZNE ZACHOWANIE KOMPOZYTOWYCH PODKŁADÓW KOLEJOWYCH?

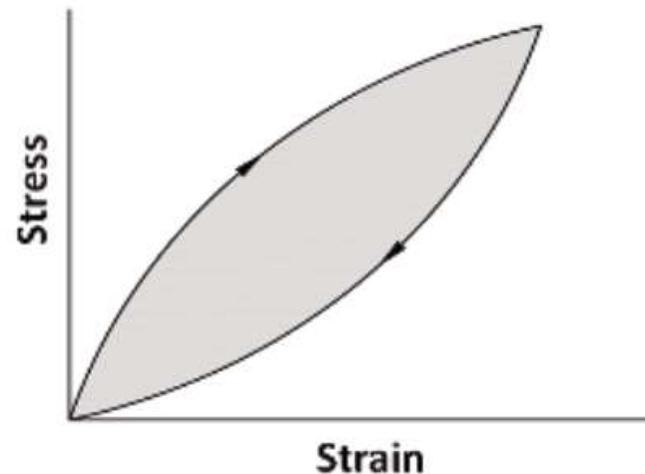


Zależność szybkości odkształcania HDPE, badana próbkach rozciąganych zgodnie z ISO 527 [3]

Wpływ prędkości odkształcania na przebieg zależności naprężenie – odkształcenie

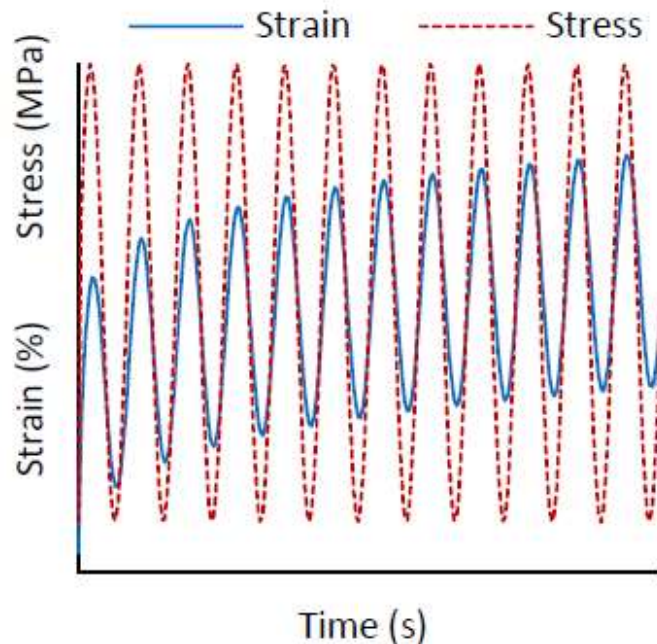
Materiał będzie wykazywał wyższy moduł Younga i wytrzymałość przy obciążaniu z wyższą prędkością. Właściwości polimerów muszą być zatem określane przy prędkościach obciążania porównywalnych z rzeczywistą pracą elementu.

**CO WPŁYWA NA MECHANICZNE ZACHOWANIE
KOMPOZYTOWYCH PODKŁADÓW KOLEJOWYCH?**

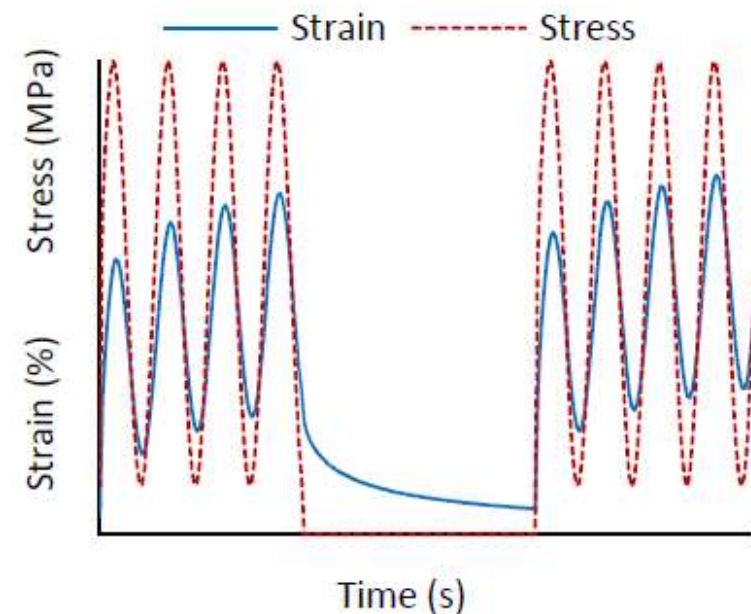


Górna linia histerezy przedstawia zachowanie materiału podczas obciążenia, natomiast dolna obrazuje przebieg odciążania. Obszar pomiędzy tymi liniami (kolor szary) wskazuje energię utraconą podczas tłumienia związanego z własnościami lepкими materiału. Energia ta jest rozpraszana przez materiał. Przy powtarzaniu cyklu może to prowadzić do nagrzewania się materiału. Ponieważ właściwości polimeru zmieniają się w podwyższonych temperaturach, należy unikać tego efektu [3].

**CO WPŁYWA NA MECHANICZNE ZACHOWANIE
KOMPOZYTOWYCH PODKŁADÓW KOLEJOWYCH?**

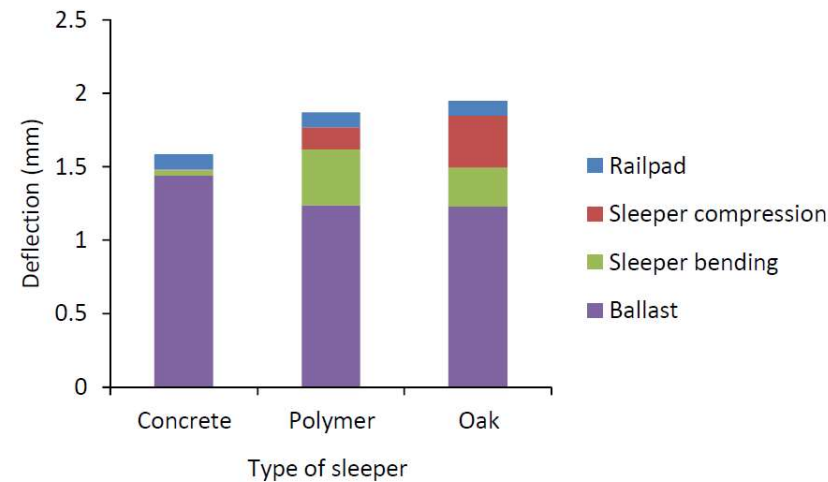


Gdy w badaniu obciążenie sinusoidalne jest przykładane w sposób ciągły, powoduje to większe odkształcenia niż w praktyce, gdy między pociągami występują przerwy, co daje materiałowi czas na regenerację.



W pracy [3] opracowano laboratoryjną procedurę obciążania podkładu kompozytowego, która odzwierciedla rzeczywisty charakter cyklicznego obciążenia na czynnej linii kolejowej, zapewniając skuteczny kompromis pomiędzy lepkosprężystym zachowaniem polimeru a czasem trwania badań laboratoryjnych.

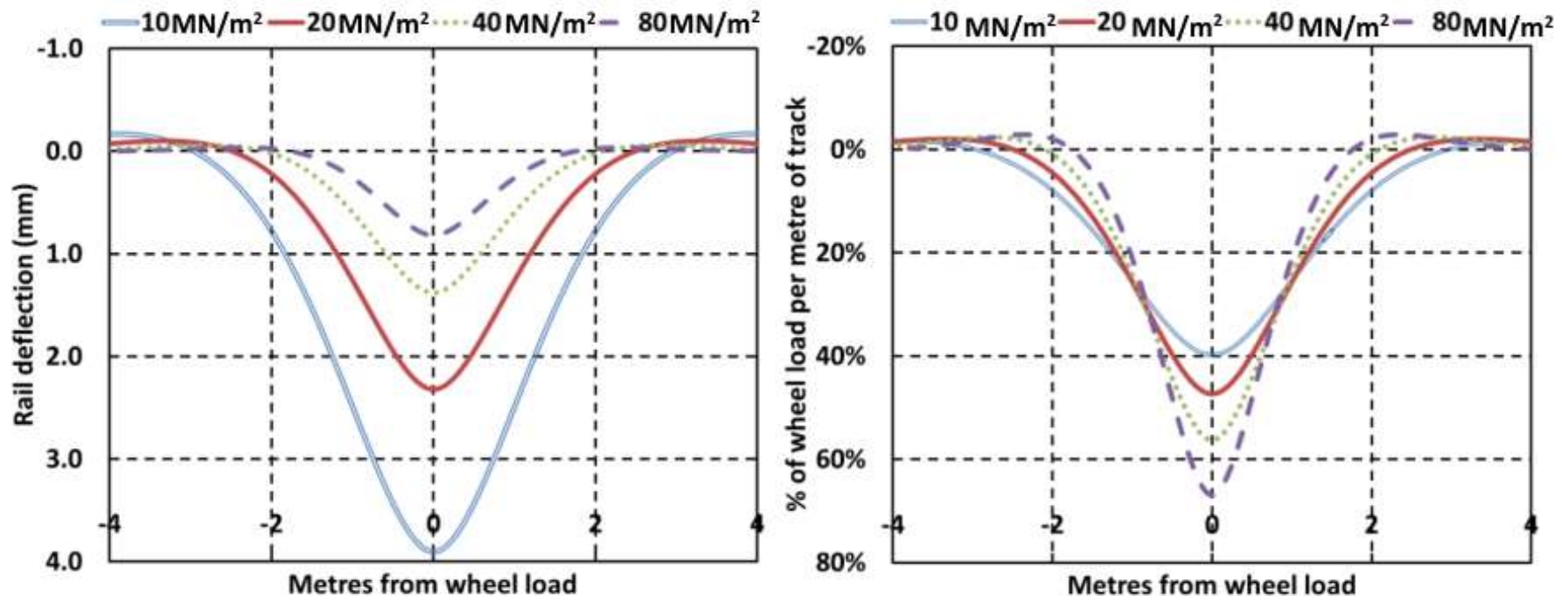
PORÓWNANIA WYBRANYCH WŁASNOŚCI PODKŁADÓW



Rysunek przedstawia wartość ugięcia toru dla typowych podkładów betonowych, polimerowych i drewnianych [4]. W przypadku podkładu betonowego ścisnienie przekładki i podsypki powoduje 95–98% całkowitego ugięcia toru. W przypadku podkładu polimerowego lub drewnianego występuje dodatkowe ugięcie w miejscu gniazda szyny w wyniku zgięcia podkładu. Ścisnienie podkładu powoduje dalsze ugięcie, które w połączeniu z uginaniem podkładu odpowiada za około 30% ugięcia toru [3].

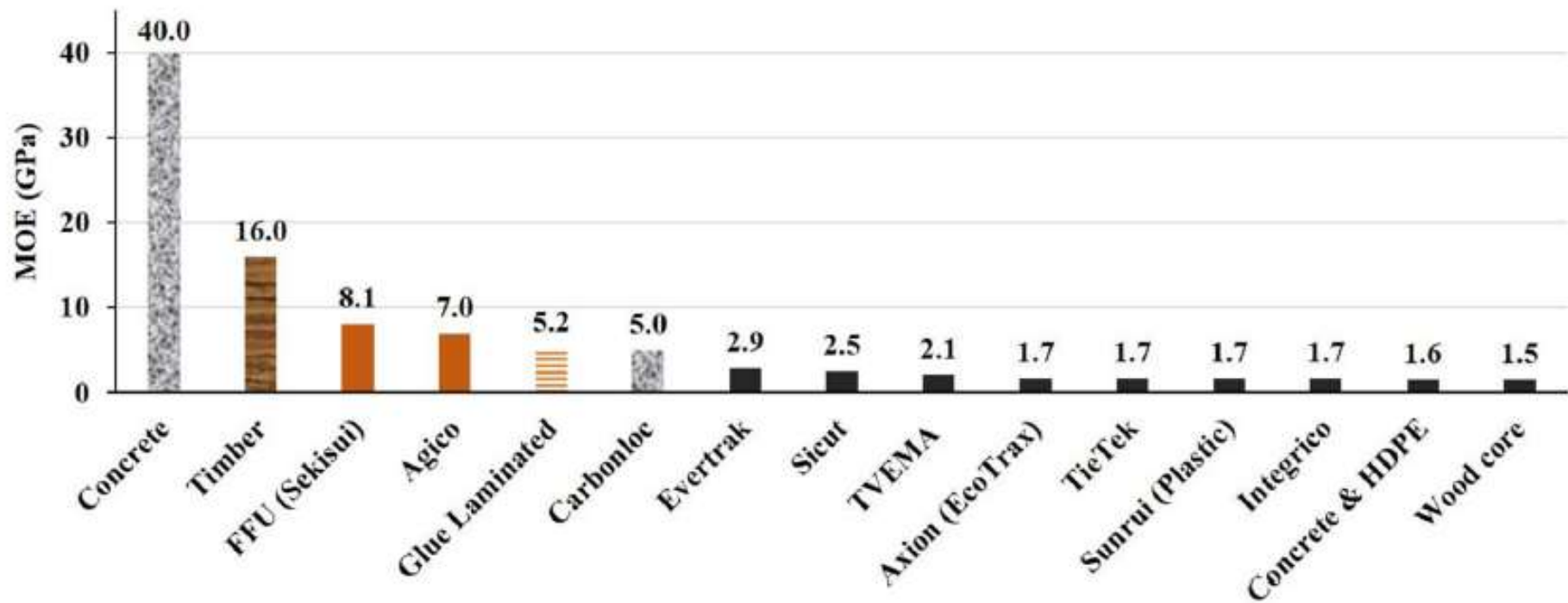


PORÓWNANIA WYBRANYCH WŁASNOŚCI PODKŁADÓW

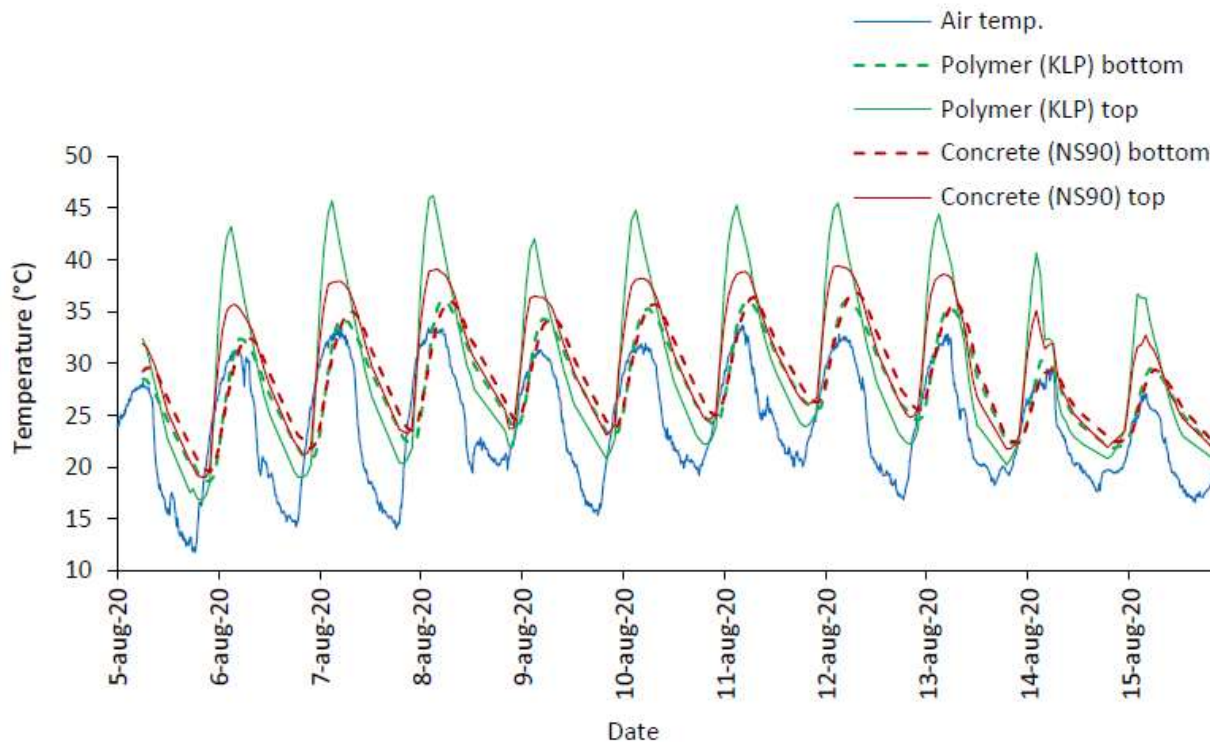


Niższa sztywność podparcia skutkuje szerszą misą ugięcia, rozprowadzając obciążenie i zmniejszając naprężenia kontaktowe między podkładami a tłuczniem [14].

PORÓWNANIA WYBRANYCH WŁASNOŚCI PODKŁADÓW [4]



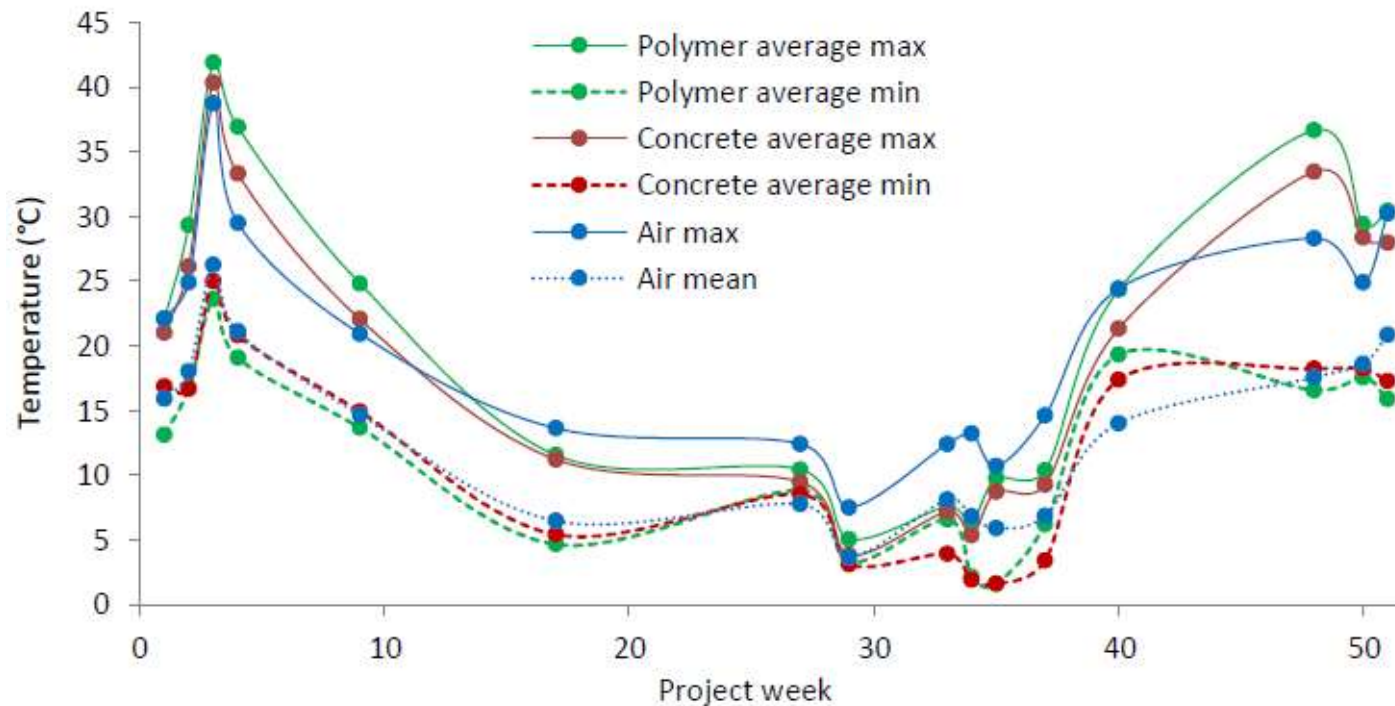
INTERESUJĄCE BADANIA WŁASNOŚCI PODKŁADÓW



		KLP sleeper	NS90 sleeper
T_{top}	(°C)	16.7-46.2	19.0-39.4
T_{bottom}	(°C)	18.6-36.1	19.5-36.9
$T_{top}-T_{bottom}$	(°C)	-4.7-15.5	-3.1-9.3

Interesującą właściwością podkładów kolejowych kompozytowych jest fakt, że różnica temperatur pomiędzy górną i dolną częścią podkładu, powoduje podniesienie środka podkładu przy przejeździe pociągu. Podniesienie to może być duże w przypadku podkładów o wysokim współczynniku liniowej rozszerzalności cieplnej, takich jak podkłady polimerowe wzmocnione włóknem szklanym [3].

INTERESUJĄCE BADANIA WŁASNOŚCI PODKŁADÓW



Temperatura rdzenia podkładu ma wpływ na właściwości mechaniczne, szczególnie w przypadku podkładów polimerowych.

Z przywołanych badań wynikało, że temperatury rdzenia podkładu wahają się mniej więcej pomiędzy średnią tygodniową a maksymalną temperaturą powietrza [3].

Air temperature range (°C)	Polymer sleeper (KLP) core temperature range (°C)	Concrete sleeper (NS90) core temperature range (°C)
-0.9-38.7	1.6-41.9	1.6-40.3

AKTUALNE NORMY STOSOWANE DO BADANIA PODKŁADÓW

Normy dotyczące podkładów niepolimerowych

EN13145, norma dotycząca podkładów i belek drewnianych, określa tolerancje wymiarowe, dopuszczalne wady, wytyczne dotyczące trwałości/konserwacji oraz gatunków drewna.

Te specyfikacje opierają się na 200-letnim doświadczeniu pokazującym, że podkład drewniany o określonych wymiarach działa akceptowalnie, ale nie ma wyraźnego wyjaśnienia funkcjonalnie skwantyfikowanych charakterystyk mechanicznych. Ten brak utrudnia wprowadzanie nowych typów materiałów podkładów.



AKTUALNE NORMY STOSOWANE DO BADANIA PODKŁADÓW

Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru podkładów, podrozjazdnic i mostownic drewnianych – wymagania i badania Id-113 [10]

Załącznik do uchwały 742/2019 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 19 listopada 2019.r

Pomimo rozporządzenia UE [9] dotyczącego szkodliwości oleju krezotowego dla zdrowia ludzkiego i konieczności zakwalifikowania zużytych podkładów kolejowych jako odpad niebezpieczny (kod 17 02 04) w dokumencie tym zawarty jest opis impregnacji podkładów olejem krezotowym.



AKTUALNE NORMY STOSOWANE DO BADANIA PODKŁADÓW

Normy dotyczące podkładów niepolimerowych

W przypadku podkładów betonowych wymagania dotyczące produktu i metody badań są opisane w normach **EN 13230** i **ISO 22480**.

Metodologia obliczania momentu zginającego podkładu przedstawiona w załączniku A do normy EN 13230-6 jest najbliższa uwzględnieniu wymagań funkcjonalnych. Jednak obliczenia te zakładają, że podkład jest nieodkształcalny, co jest być może możliwe do obrony w przypadku betonu, ale nie w przypadku polimerów lub drewna.



AKTUALNE NORMY STOSOWANE DO BADANIA PODKŁADÓW

Inne normy dotyczące analizowanego zagadnienia skupiają się na systemach przytwierdzeń: EN 13146 i EN 13481. Wyszła też nowa norma **PN-EN ISO 22074-1:2024-08** Infrastruktura kolejowa -- Systemy przytwierdzeń szyn -- Część 1: Słownictwo -- wersja angielska

PN-EN 13146 Kolejnictwo - Tor - Metody badań systemów przytwierdzeń

Część 1: Określenie oporu podłużnego szyny

Część 2: Określenie oporu na skręcanie

Część 3: Określenie tłumienia obciążeń dynamicznych

Część 4: Skutki obciążeń powtarzalnych

Część 5: Określenie rezystancji elektrycznej

Część 6: Skutki trudnych warunków środowiska

Część 7: Określenie siły docisku

Część 8: Badania eksploatacyjne

Część 9: Określenie sztywności

Część 10: Próbny test obciążenia w celu potwierdzenia odporności na wyciąganie

PN-EN 13481-1:2012 Kolejnictwo -- Tor -- Wymagania eksploatacyjne systemów przytwierdzeń

Część 1: Definicje

Część 2: Systemy przytwierdzeń do podkładów betonowych

Część 3: Systemy przytwierdzeń do podkładów drewnianych

Część 4: Systemy przytwierdzeń do podkładów stalowych

Część 5: Systemy przytwierdzeń w torze o nawierzchni bezpodsypkowej z szyną zamocowaną na płycie lub z szyną zamocowaną w kanale szynowym

Część 7: Systemy przytwierdzeń w rozjazdach i skrzyżowaniach, kierownicach, izolowanych złączach szynowych oraz przyrządach wyrównawczych

Część 8: Systemy przytwierdzeń w torach do dużych nacisków osi

AKTUALNE NORMY DOTYCZĄCE PODKŁADÓW KOMPOZYTOWYCH

Większość wcześniej opisanych norm dotyczących podkładów przewiduje badania statyczne. Zachowanie polimeru zależy od czasu i temperatury, a ponieważ obciążenie toru jest bardzo dynamiczne, badania powinny to uwzględnić.

JIS E1203

Japońska norma JIS E1203 opisuje wymagania eksploatacyjne dla podkładów poliuretanowych wzmocnionych ciągłym włóknem szklanym. Celem jest naśladowanie właściwości drewna w oparciu o założenie, że jeśli ich właściwości materiałowe są podobne, podkłady będą zachowywać się podobnie.

Niemożliwe jest jednak dokładne naśladowanie wszystkich cech drewna i wydaje się, że norma ta wyklucza możliwość poprawy właściwości użytkowych, którą można osiągnąć poprzez zastosowanie alternatywnych materiałów podkładów.



AKTUALNE NORMY STOSOWANE DO BADANIA PODKŁADÓW

Wytyczne amerykańskie

AREMA i CTA

	Unit	AREMA Requirement [5]		CTA Requirement [6]	
		Requirement	Test method	Requirement	Test method
Modulus of elasticity (in bending - centre negative)	MPa	≥ 1,170	Static three-point bending test span 1500 mm, sleeper 178 x 229 mm	≥ 1,380	Static four-point bending test acc. to ASTM D6109-97 L/h=16
Bending strength (in bending - centre negative)	MPa	≥ 13.8	Static three-point bending test span 1,500 mm, sleeper 178 x 229 mm	≥ 17.2	Static four-point bending test acc. to ASTM D6109-97 L/h=16
Rail seat compression	MPa	≥ 6.2	Static compression test	≥ 6.2	ASTM D6108-97
Compressive strength (parallel to grain)	MPa	-	-	≥ 20.7	ASTM D6108-97
Permanent deformation under load (perpendicular to grain)	%	-	-	≤ 0.2	ASTM D6108-97 (loaded to 1.8% strain)
Modulus of elasticity in compression	MPa	-	-	≥ 1,170	ASTM D6108-97
Shear strength	MPa	-	-	≥ 6.9	ASTM D6109-97
Single tie lateral push, after 100,000 gross tons of traffic	kN	≥ 11.1	On track	-	-
Spike/screw spike pull out	kN	≥ 8.5/22.2	25 mm/min	≥ n.a./11.1	ASTM D6117-97
Coefficient of thermal expansion	$\times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	≤ 135	ASTM D6431/	≤ 126	ASTM D696-98
Electrical impedance	Ω	≥ 20,000	Between rails on wet sleeper	-	-

AKTUALNE NORMY DOTYCZĄCE PODKŁADÓW KOMPOZYTOWYCH

Wytyczne amerykańskie AREMA i CTA

Amerykańskie Towarzystwo Inżynierii Kolejowej i Utrzymania Drogi (AREMA) opublikowało normę dotyczącą kolejowych podkładów kompozytowych [5]. Wytyczne AREMA są stosowane w niektórych krajach jako rozwiązanie z niższej półki (Tabela 4).

Wytyczne CTA (Zarząd Transportu Chicago) wygasły i prawdopodobnie nie były stosowane od 2005 roku. W [3] napisano: „CTA miało wiele problemów z podkładami kolejowymi zakupionymi zgodnie z tą specyfikacją. CTA nie kupuje już podkładów kompozytowych”.

Obie normy opierają się na doświadczeniach zdobytych podczas testów na torze, ale nie wiążą rzeczywistych warunków torowych z wymaganiami [7]. Utrudnia to ocenę, czy wyniki w jednej lokalizacji toru można przekładać na innej lokalizacje.

Ponadto metody badawcze mają charakter statyczny i dlatego nie są reprezentatywne dla dynamicznego środowiska toru.



AKTUALNE NORMY DOTYCZĄCE PODKŁADÓW KOMPOZYTOWYCH

Norma ISO 12856

Norma ISO 12856 dotycząca podkładów z kompozytów polimerowych zapewnia najodpowiedniejsze metody badań, uwzględniając lepkosprężyste zachowanie polimerów. Zawiera także metodologię obliczania momentu zginającego (porównywalną z normą EN 13230-6) rozpatrując podkład jako ciało odkształcalne. Jednakże norma ta nie definiuje wymagań funkcjonalnych – kryteriów akceptacji.

1. ISO 12856-1 Railway applications — Polymeric composite sleepers, bearers and transoms — Part 1: Material characteristics
2. ISO 12856-2 Railway applications — Polymeric composite sleepers, bearers and transoms — Part 2: Product testing
3. ISO 12856-3 Railway applications — Polymeric composite sleepers, bearers and transoms — Part 3: General requirements



AKTUALNE NORMY DOTYCZĄCE PODKŁADÓW KOMPOZYTOWYCH

Norma ISO 12856-1:2022 DOKUMENTY ODNIESIENIA

- [1] ISO 62, *Plastics — Determination of water absorption*
- [2] ISO 178, *Plastics — Determination of flexural properties*
- [3] ISO 179-1, *Plastics — Determination of Charpy impact properties — Part 1: Non-instrumented impact test*
- [4] ISO 291, *Plastics — Standard atmospheres for conditioning and testing*
- [5] ISO 306, *Plastics — Thermoplastic materials — Determination of Vicat softening temperature (VST)*
- [6] ISO 527-2, *Plastics — Determination of tensile properties — Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics*
- [7] ISO 527-4, *Plastics — Determination of tensile properties — Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites*
- [8] ISO 527-5, *Plastics — Determination of tensile properties — Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites*
- [9] ISO 604, *Plastics — Determination of compressive properties*
- [10] ISO 9001, *Quality management systems — Requirements*
- [11] ISO 11357-2, *Plastics — Differential scanning calorimetry (DSC) — Part 2: Determination of glass transition temperature and step height*
- [12] ISO 11359, *Plastics — Thermomechanical analysis (TMA)*
- [13] ISO 14125, *Fibre-reinforced plastic composites — Determination of flexural properties*
- [14] ISO 14126, *Fibre-reinforced plastic composites — Determination of compressive properties in the in-plane direction*
- [15] XP F 51-201, *Railway applications — Track — Polymer composite sleepers and bearers*

AKTUALNE NORMY DOTYCZĄCE PODKŁADÓW KOMPOZYTOWYCH

Norma ISO 12856-2:2020 DOKUMENTY ODNIESIENIA

- [1] ISO 2768 (all parts), *General tolerances*
- [2] ISO 5659-2, *Plastics — Smoke generation — Part 2: Determination of optical density by a single-chamber test*
- [3] ISO 9513:2012/Cor 1:2013, *Metallic materials — Calibration of extensometer systems used in uniaxial testing — Technical Corrigendum 1*
- [4] ISO 11925-2, *Reaction to fire tests — Ignitability of products subjected to direct impingement of flame — Part 2: Single-flame source test*
- [5] ISO 12856-1, *Railway applications — Polymeric composite sleepers, bearers and transoms — Part 1: Material characteristics*
- [6] ISO 21367, *Plastics — Reaction to fire — Test method for flame spread and combustion product release from vertically oriented specimens*
- [7] EN 10027 (all parts), *Designation systems for steels*
- [8] EN 13146-4, *Railway applications — Track — Test methods for fastening systems — Part 4: Effect of repeated loading*
- [9] EN 13146-5, *Railway applications — Track — Test methods for fastening systems — Determination of electrical resistance*
- [10] EN 13146-10, *Railway applications — Track — Test methods for fastening systems — Part 10: Proof load test for pull-out resistance*
- [11] EN 13230-2:2016, *Railway applications — Track — Concrete sleepers and bearers — Part 2: Prestressed monoblock sleepers*
- [12] EN 13481-3, *Railway applications — Track — Performance requirements for fastening systems — Part 3: Fastening systems for wood sleepers*
- [13] EN 13481-5, *Railway applications — Track — Performance requirements for fastening systems — Part 5: Fastening systems for slab track with rail on the surface or rail embedded in a channel*
- [14] EN 13481-7, *Railway applications — Track — Performance requirements for fastening systems — Part 7: Special fastening systems for switches and crossings and check rails*
- [15] XP F 51-201, *Railway applications — Track — Polymer composite sleepers and bearers*
- [16] CEN/TC256/SC1/WG16/PWI 00256727, *Railway applications — Track — Plastic sleepers and bearers — Part 2: Product testing*
- [17] JIS E 1203, *Synthetic Sleepers — Made from fiber reinforced foamed urethane*
- [18] TB/T 3396.5, *Methods for Fastening Systems of High — Speed Railway — Part 5: Determination of Insulation Resistance*
- [19] TB/T 3396.7, *Methods for Fastening Systems of High — Speed Railway — Part 7: Pulling Resistance Test of Embedded Parts*
- [20] *Design Standards for Railway Structures and Commentary (Track structure)*, Editor: Railway Technical Research Institute, Supervisor: Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism in Japan, 2012 (in Japanese)
- [21] *General requirements of fastening systems for mixed traffic railways*, Editor: Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Supervisor: Economic and Planning Research Institute of Ministry of Railways, 2018 (in Chinese)
- [22] *Fastening systems for high-speed railway — Part 1: General requirements*, Editor: Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Supervisor: Economic and Planning Research Institute of Ministry of Railways, 2015 (in Chinese)



AKTUALNE NORMY DOTYCZĄCE PODKŁADÓW KOMPOZYTOWYCH

Norma ISO 12856-3:2022 DOKUMENTY ODNIESIENIA

[1] EN 13146-3, Railway applications — Track — Test methods for fastening systems — Part 3: Determination of impact loads

[2] EN 13230-6:2020, Railway applications — Track — Concrete sleepers, bearers and transoms — Part 6: Design

[3] UIC Report 5-19006E. Lateral Track Resistance “LTR”, First edition, June 2019

[4] UIC Report 713 R, Design of monoblock concrete sleepers, First edition, November 2004



AKTUALNE NORMY DOTYCZĄCE PODKŁADÓW KOMPOZYTOWYCH

IRS 70701

W kwietniu 2024 roku opublikowano pierwsze wydanie wytycznych IRS 70701 „Podkłady z kompozytów polimerowych – Zalecenia dotyczące stosowania” w celu uzupełnienia istniejących norm w tym obszarze, w szczególności serii norm ISO 12856. IRS zastąpi ulotkę UIC 901 „Use of polymeric materials for railway superstructure and infrastructure and in engineering structures”.

Dokument ten zawiera:

- Zalecenia dotyczące stosowania podkładów z kompozytów polimerowych jako alternatywy dla podkładów z twardego drewna
- Wymagania dotyczące procesu kwalifikacji i procedur kontroli jakości
- Ustalenia techniczne i ekonomiczne oparte na aktualnej wiedzy, dotyczące podkładów, mostownic i podrozdnic z kompozytów polimerowych

INTERNATIONAL
RAILWAY SOLUTION

IRS
70701 - Ed. 1

1st edition: April 2024
Version: Original

Way and Works -Track and Structure
Polymeric composite sleepers - Recommendations for use



© International Union of Railways, 2024. All rights reserved.
This document may not be reproduced – even in part – without the written authorisation of UIC.

AKTUALNE NORMY DOTYCZĄCE PODKŁADÓW KOMPOZYTOWYCH

Norma EN 17318 z 2019 roku

1. Railway applications. Infrastructure. Plastic sleepers and bearers Part 1. General requirements
2. Railway applications - Infrastructure - Plastic sleepers and bearers - Part 2: Product testing
3. Railway applications - Infrastructure - Plastic sleepers and bearers - Part 3: Material

Funkcjonuje jako projekt normy. Zawiera wytyczne zbieżne z zapisami normy ISO 12856. W Austrii została wycofana w 2024 i nie jest dostępna w sprzedaży.



AKTUALNE NORMY DOTYCZĄCE PODKŁADÓW KOMPOZYTOWYCH

Norma XP F51-201



Railway applications - Track - Polymer composite sleepers and bearers Part 1. Specification

XP F51-201-1

Applications ferroviaires - Voie - Traverses et supports en matériaux composites à matrice polymère - Partie 1 : spécifications

Railway applications - Track - Polymer composite sleepers and bearers - Part 1 : Specifications

Bahnanwendungen - Oberbau - Schwellen und Weichenschwellen mit Polymermatrixverbundstoff - Teil 1 : Anforderungen

60,67 €

Francés

PDF

Formato digital
Nota: Precios sin IVA ni gastos de envío
Descuentos no acumulables

Añadir a la cesta

Railway applications - Track - Polymer composite sleepers and bearers Part 2: Methodology for assessing material ageing

Resumen: La présente partie de l'XP F 51-201 spécifie les exigences des traverses et des supports en matériaux composites constitués soit d'une matrice thermoplastique avec fibres de renforts soit d'une matrice thermodurcissable avec fibres de renforts, requises pour leur qualification. Elle s'applique aux traverses en matériaux composites pour voie courante ou aux supports en matériaux composites pour appareils de voie ou passages à niveau.

Fecha: 2012-12-12 / ACTIVE

Idiomas Disponibles: Francés

ICS: 45.080 - Rails and railway components

Keywords: railway equipment; railways; rails; sleepers; supports; fixing; polymers; thermoplastic resins; thermosetting resins; ageing; materials; artificial ageing tests; fire tests; reaction to fire; flame propagation; smoke; fire safety; comparison; shape; dimensions; mass; expansion; flexibility; sliding; housings; cyclic loads; displacement; reference to standards; marking; design

Railway applications - Track - Polymer composite sleepers and bearers Part 3. Mechanical test methods



PODSUMOWANIE ZAGADNIENI DOTYCZĄCYCH PODKŁADÓW KOMPOZYTOWYCH

„Technologie podkładów kompozytowych okazały się skuteczną alternatywą w zakresie konserwacji i renowacji torów kolejowych. Badania i rozwój skupiają się obecnie na tych materiałach ze względu na ich doskonałe właściwości użytkowe, takie jak:

- wysoki stosunek wytrzymałości do masy,*
- doskonała odporność na korozję,*
- doskonała odporność na wilgoć, rozwój grzybów, pleśni i atak insektów*
- niska przewodność elektryczna.(...)*

Koszt podkładów o wysokiej zawartości włókien można zminimalizować poprzez optymalizację zużycia materiałów i usprawnienie procesu produkcyjnego. Długoterminowa ocena wydajności i ustalenie wytycznych projektowych dla podkładów kompozytowych są niezbędne do ich powszechnej akceptacji wśród inżynierów kolei i użytkowników końcowych.” [8]



MOŻLIWOŚCI OPTYMALIZACJI WŁASNOŚCI KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH

„ Wstępny dobór komponentów może polegać na przewidywaniu tzw. sumarycznych i wynikowych właściwości kompozytu. Właściwości sumaryczne (addytywne) uzyskuje się przez sumowanie właściwości składników, przyjmując ich udział we właściwościach kompozytu za proporcjonalny do udziału objętościowego lub powierzchniowego w danym przekroju; właściwości wynikowe (synergiczne) są rezultatem przeniesienia efektu wywołanego w jednym komponencie na drugi, wskutek czego powstaje inny efekt przyjmowany jako właściwość kompozytu.”[12]

W kompozytach wzmocnianych włóknem ciągłym w kierunku włókien można wyznaczyć moduł Younga E_1 ze wzoru:

$$E_1 = (1 - p)E_m + pE_w$$

Gdzie p należy $(0,1)$ jest udziałem objętościowym włókien, natomiast E_m i E_w są odpowiednio modułami Younga izotropowej osnowy i włókna.



MOŻLIWOŚCI OPTYMALIZACJI WŁASNOŚCI PODKŁADÓW KOMPOZYTOWYCH [3]

	Description (-)	Sleeper depth (mm)	Bending stiffness EI (kNm ²)	Sleeper flexibility f_w ³⁾ (-)
	Concave	184	197 ⁴⁾	1.319
	Convex	184	197 ⁴⁾	1.319
	Convex centre	200	-	1.203 ⁴⁾
	End plates	150	197 ⁴⁾	1.319

	Description (-)	Sleeper depth (mm)	Bending stiffness EI (kNm ²)	Sleeper flexibility f_w ³⁾ (-)
	Lateral ridges	200	312 (0.2) ²⁾	1.242
	Longitudinal ridges	200	375 (0.6) ²⁾	1.211
	Dog bone	150	-	1.248
		200	-	1.126
	Central recess	150	-	1.264



WYTYCZNE DOTYCZĄCE PODKŁADÓW KOMPOZYTOWYCH

Wytyczne tworzone przez lokalnych zarządców infrastruktury kolejowej zawierają najczęściej wymagania skopiowane z wytycznych dla drewna lub betonu lub opierają się na jednej z norm dotyczących tych materiałów.

Zarówno wymagania dotyczące testowania podkładów drewnianych, jak i betonowych są niespójne w porównaniu z podkładami polimerowymi, gdy bierze się pod uwagę rzeczywiste zachowanie tych materiałów.



PODKŁADY KOLEJOWE POLIMEROWE wg normy ISO 12856-1:2014

- Materiał typu A: odpowiednik podkładów z twardego drewna tropikalnego dla toru bez podsypki, maksymalnym nacisku na oś do 20t dla dopuszczalnej prędkości pociągów 130 km/h i 14 t na oś dla prędkości 300 km/h.
- Materiał typu B: odpowiednik drewnianego podkładu dla kategorii torów UIC 5/6, maksymalnym nacisku do 22,5t na oś, przy dopuszczalnej prędkości pociągów 160 km/h.
- Materiał typu C: odpowiednik podkładu z twardego drewna dla toru o maksymalnym nacisku na oś do 35t dla dopuszczalnej prędkości pociągów 80 km/h.

PODKŁADY KOLEJOWE POLIMEROWE wg normy ISO 12856-1:2022

BRAK WSKAZÓWEK ODNOŚNIE ZAKRESU ZASTOSOWAŃ



TWORZENIE WYTYCZNYCH DLA PODKŁADÓW KOMPOZYTOWYCH

Przed wprowadzeniem podkładów polimerowych, zaleca się:

ROZPATRZENIE PODKŁADU JAKO CIAŁA ODKSZTAŁCALNEGO

Do obliczenia wymagań wytrzymałościowych podkładu należy uwzględnić wpływ sztywności podczas zginania podkładu.

OKREŚLENIE WYMOGÓW DOTYCZĄCYCH WYTRZYMAŁOŚCI I SZTYWNOŚCI PODKŁADU POPRZECZ OBLICZENIA

Zamiast przyjmować wymagania dotyczące podkładów drewnianych lub betonowych, należy przeprowadzić obliczenia oparte na podparciu toru, sztywności zginania szyny i właściwościach podkładu szynowego, aby określić odpowiednią wytrzymałość podkładu i sztywność zginania. W większości sytuacji najlepszym punktem wyjścia będzie pożądana sztywność podparcia toru.

BADANIA KWALIFIKACYJNE PODKŁADÓW POWINNY BYĆ DYNAMICZNE Z UWZGLĘDNIENIEM ODSTĘPÓW MIĘDZY ZDARZENIAMI OBCIĄŻENIA

Testy powinny być wykonywane dynamicznie, przy prędkościach obciążenia, których można się spodziewać na torach w trakcie eksploatacji. Tylko w takich okolicznościach można właściwie ocenić wydajność podkładów polimerowych. W przypadku powtarzających się obciążeń należy monitorować temperaturę podkładu i w razie potrzeby wstrzymać badania, aby zapobiec nierealistycznemu wzrostowi temperatury materiału.



TWORZENIE WYTYCZNYCH DLA PODKŁADÓW KOMPOZYTOWYCH

Te zalecenia w większej części zostały uwzględnione w nowej normie ISO 12856. Badanie podkładów kolejowych jest wykonywane dynamicznie, a metodologia obliczania momentu zginającego, opisana w normie, uwzględnia odkształcalność podkładu. Ta metodologia obliczeniowa pomaga również zauważyć związek między sztywnością toru a charakterystyką podkładu.

Norma nie przedstawia jednak kryteriów akceptacji dotyczących polimerowych podkładów kolejowych. Ten krok muszą wykonać zarządcy infrastruktury kolejowej. Jako pomoc w określeniu wytycznych dla podkładów kolejowych został opracowany w 2016 roku przez Cross Industry Track Stiffness Working Group dokument: „A Guide to Track Stiffness” autorstwa W. Powrie i L. Le Pen [14]



INSTYTUT KOLEJNICTWA A PODKŁADY KOMPOZYTOWE



www.ikolej.pl
ul. Chłopińskiego 50
04-275 Warszawa

KRAJOWA OCENA TECHNICZNA IK-KOT-2018/0026 wydanie 1

Niniejsza Krajowa Ocena Techniczna została wydana zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 17 listopada 2016 r. w sprawie krajowych ocen technicznych (Dz. U. z 2016 r., poz. 1968) przez Instytut Kolejnictwa, na wniosek firmy:

Sekisui Chemical Co. Ltd.
Urban Infrastructure & Environmental Products Company
2-3-17 Toranomon, Minato-ku, Tokio (Japonia)

Krajowa Ocena Techniczna IK-KOT-2018/0026 wydanie 1 stanowi pozytywną ocenę właściwości użytkowych wyrobu budowlanego.

PODKŁADY, MOSTOWNICE, PODROZJAZDNICE KOMPOZYTOWE

w zakresie i na zasadach określonych w niniejszej Krajowej Ocenie Technicznej.

Termin ważności: Pieczęć okrągła Dyrektor IK
3 kwietnia 2023 r.

Warszawa, 4 kwietnia 2018 r.

Krajowa Ocena Techniczna IK-KOT-2018/0026 wydanie 1 zawiera 6 stron.
Tekst tego dokumentu kopiarować można tylko w całości. Publikowanie lub upowszechnianie w każdej innej formie fragmentów tekstu Krajowej Oceny Technicznej, wymaga pisemnego uzgodnienia z Instytutem Kolejnictwa.



www.ikolej.pl
Chłopińskiego 50
04-275 Warszawa

KRAJOWA OCENA TECHNICZNA IK-KOT-2023/0180 wydanie 1

Niniejsza Krajowa Ocena Techniczna została wydana zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 17 listopada 2016 r. w sprawie krajowych ocen technicznych (Dz. U. z 2016 r., poz. 1968) przez Instytut Kolejnictwa, na wniosek:

Railway gft sp. z o.o.
ul. K. Czaplńskiego 3, 30-048 Kraków

Krajowa Ocena Techniczna IK-KOT-2023/0180 wydanie 1 stanowi pozytywną ocenę właściwości użytkowych wyrobu budowlanego.

PODKŁADY, PODROZJAZDNICE, MOSTOWNICE KOMPOZYTOWE P30, P60, P90

w zakresie i na zasadach określonych w niniejszej Krajowej Ocenie Technicznej.

Termin ważności: Pieczęć okrągła Dyrektor IK
06 grudnia 2028

Warszawa, 07 grudnia 2023

Krajowa Ocena Techniczna IK-KOT-2023/0180 wydanie 1 zawiera 13 stron.
Tekst tego dokumentu kopiarować można tylko w całości. Publikowanie lub upowszechnianie w każdej innej formie fragmentów tekstu Krajowej Oceny Technicznej, wymaga pisemnego uzgodnienia z Instytutem Kolejnictwa.



www.ikolej.pl
Chłopińskiego 50
04-275 Warszawa

KRAJOWA OCENA TECHNICZNA IK-KOT-2020/0105 wydanie 2

Niniejsza Krajowa Ocena Techniczna została wydana zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 17 listopada 2016 r. w sprawie krajowych ocen technicznych (Dz. U. z 2016 r., poz. 1968) przez Instytut Kolejnictwa, na wniosek przedstawiciela producenta o nazwie:

LWZ sp. z o.o.
al. Niepodległości 2A, 55-020 Żórawina

Krajowa Ocena Techniczna IK-KOT-2020/0105 wydanie 2 stanowi pozytywną ocenę właściwości użytkowych wyrobu budowlanego.

PODKŁADY, PODROZJAZDNICE, MOSTOWNICE STRAILway ORAZ STRAILway 30

w zakresie i na zasadach określonych w niniejszej Krajowej Ocenie Technicznej.

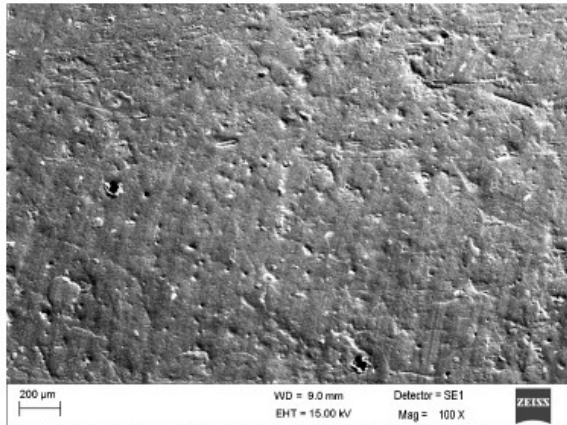
Termin ważności: Pieczęć okrągła Dyrektor IK
5 września 2029 r.

Warszawa, 6 września 2024 r.

Krajowa Ocena Techniczna IK-KOT-2020/0105 wydanie 2 zawiera 15 stron. Krajowa Ocena Techniczna IK-KOT-2020/0105 wydanie 2 zastępuje Krajową Ocena Techniczną IK-KOT-2020/0105 wydanie 1.
Tekst tego dokumentu kopiarować można tylko w całości. Publikowanie lub upowszechnianie w każdej innej formie fragmentów tekstu Krajowej Oceny Technicznej, wymaga pisemnego uzgodnienia z Instytutem Kolejnictwa.

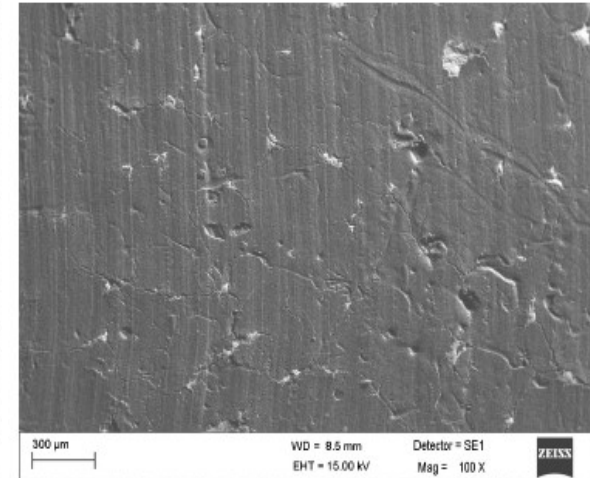
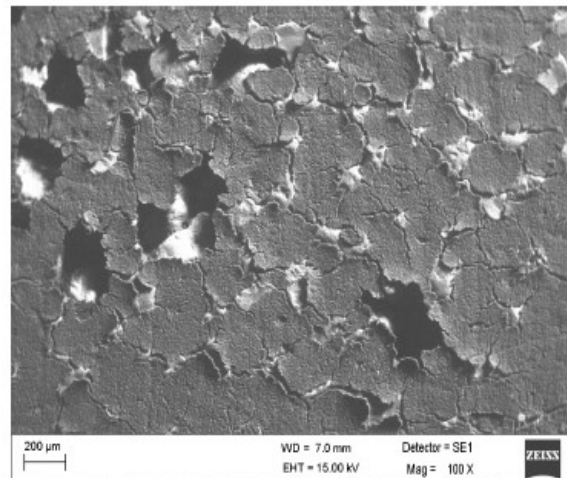
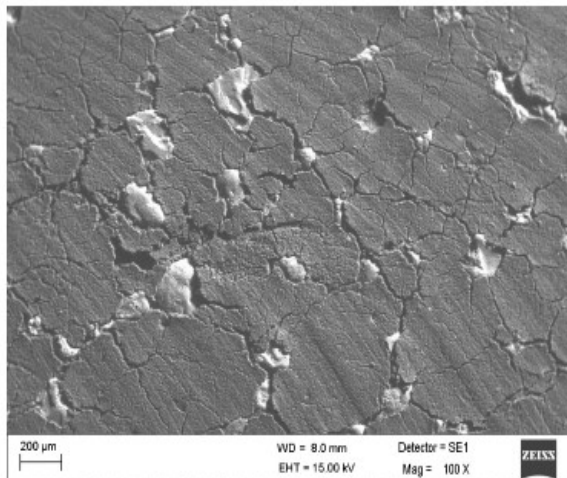


INSTYTUT KOLEJNICTWA A PODKŁADY KOMPOZYTOWE



Próbka w stanie dostawy

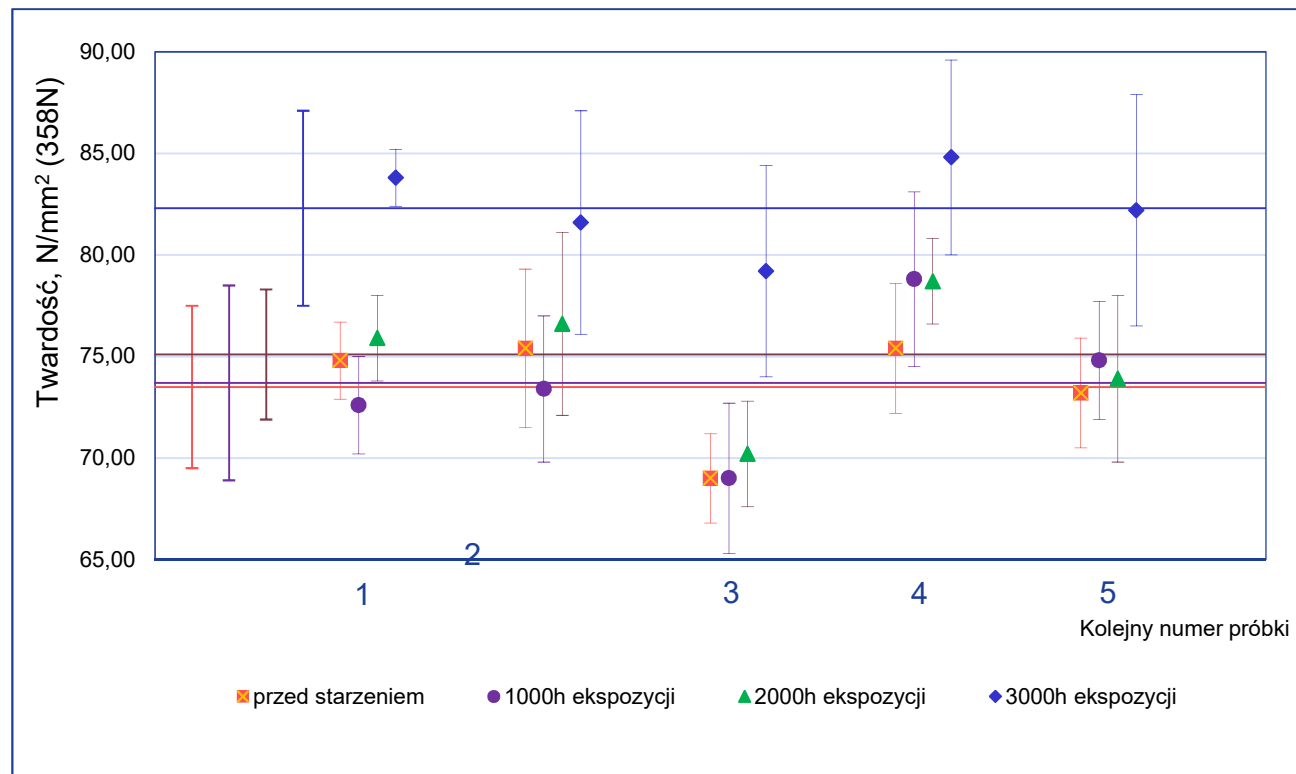
Analiza SEM morfologii powierzchni wyrobów po starzeniu 1000h wykazała liczne mikropęknięcia i rozwarstwienia materiału, tworzenie się odrębnych fragmentów struktur



Próbki poddane starzeniu 1000h według normy PN-EN ISO 4892-2

INSTYTUT KOLEJNICTWA A PODKŁADY KOMPOZYTOWE

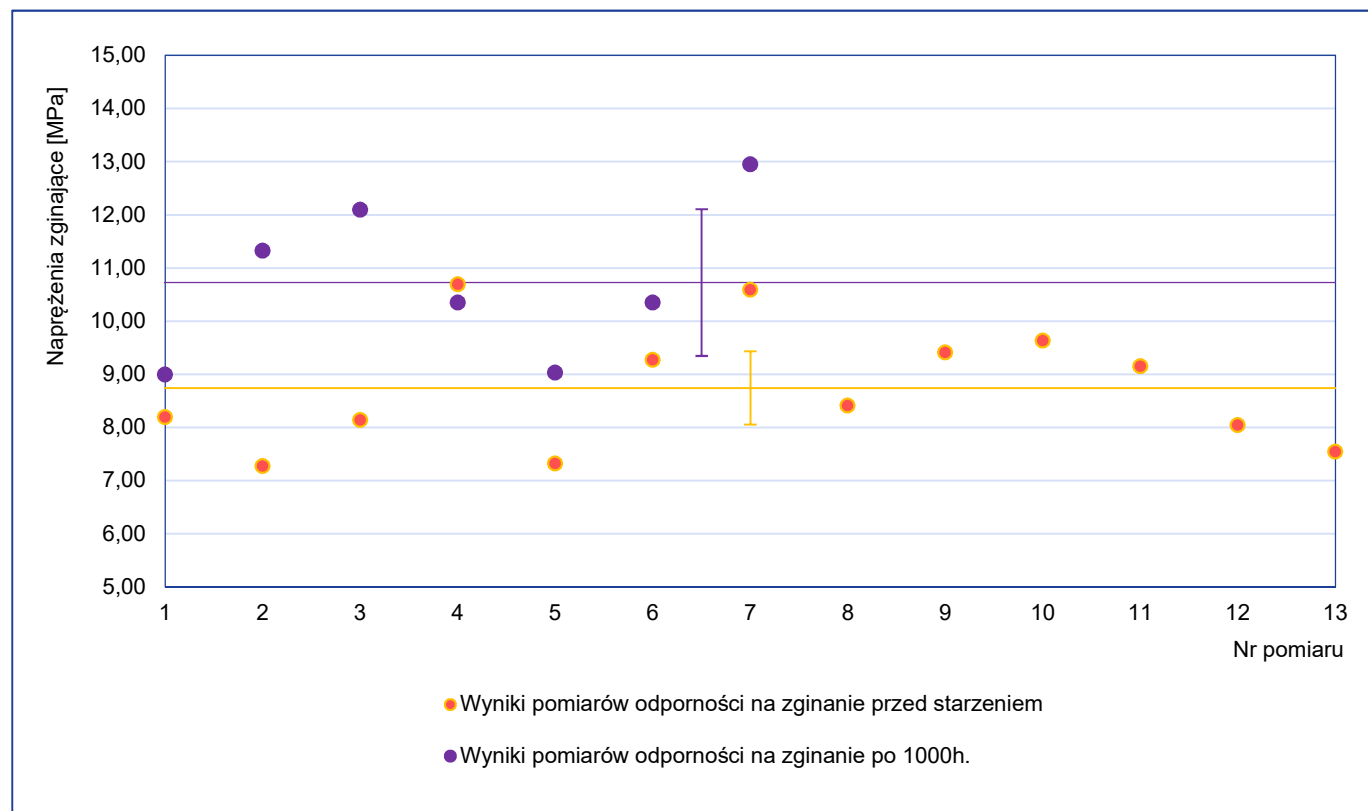
Metoda badania: PN-EN ISO 2039-1:2004 (metoda wciskania kulki)



Wraz z czasem starzenia twardość próbek rośnie

INSTYTUT KOLEJNICTWA A PODKŁADY KOMPOZYTOWE

Metoda badania: PN-EN ISO 178:2019-06

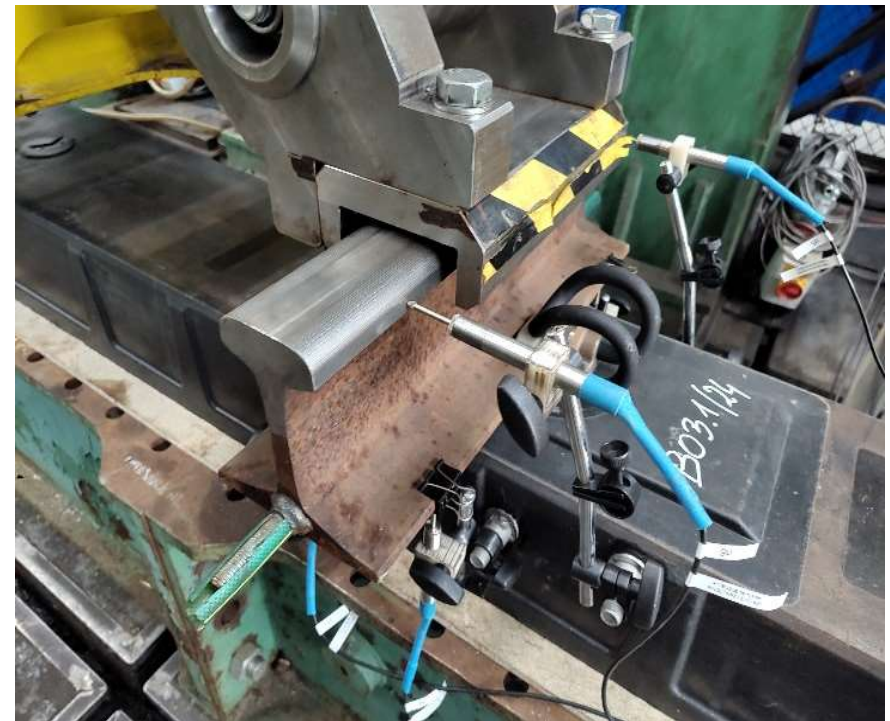


Wraz z czasem starzenia wytrzymałość na zginanie rośnie

INSTYTUT KOLEJNICTWA A PODKŁADY KOMPOZYTOWE

zgodność w zakresie wszystkich ocenionych parametrów fizyko-mechanicznych z PN-EN 13481-2:2022-12 dla kategorii D

1. podkład EPS-SB4-60E1-40-1436-2600/267/160-16;
 2. kotwa SB3/P;
 3. łapka sprężysta SB-4;
 4. podkładka podszynowa PAK 6094;
 5. wkładka elektroizolacyjna WKW60;
 6. szyna o profilu 60E1.
-
- sprawdzenie siły docisku PN-EN 13146-7:2019-05;
 - sprawdzenie oporu podłużnego PN-EN 13146-1:2019-04;
 - sprawdzenie sztywności pionowej PN-EN 13146-9:2020-09;
 - sprawdzenie efektu obciążeń powtarzalnych PN-EN 13146-4:2020-09;
 - sprawdzenie rezystancji elektrycznej PN-EN 13146-5:2012;
 - sprawdzenie zakotwionych elementów przytwierdzenia PN-EN 13146-10:2017-04.



Widok stanowiska w czasie realizacji obciążeń i pomiaru przemieszczeń [fot. D.Ostrowski].



WNIOSKI

1. Podkłady kompozytowe stanowią poważną alternatywę zamiennika nie tylko dla podkładów drewnianych, ale również i betonowych.
2. Ostatnie trendy związane z ochroną środowiska podkreślają znaczenie wykorzystania podkładów pochodzących z recyklingu i ten kierunek powinniśmy uwzględnić.
3. Posiadamy większość narzędzi, które powinny umożliwić stworzenie wytycznych dla podkładów kompozytowych w Polsce.



Dziękuję za uwagę



Bibliografia

- [1] S.Grulkowski, Z. Kędra, M. J. Nowakowski, W. Koc „Drogi szynowe”, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2013
- [2] „Composite Sleeper: Circular Economy in Rail”, Research Report 079006-88, Arup University 2022
- [3] A. v. Belkom „The Influence of Viscoelasticity, Anisotropy and Geometry on the Stiffness Performance of Polymer Railway Sleepers”, Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, University of Southampton 2023
- [4] A. v. Belkom, "Recycled plastic railway sleepers, analysis and comparison of sleeper parameters and the influence on track stiffness and performance," Presented at Railway Engineering Conference, Edinburgh, June 2015.
- [5] Arema, Manual for Railway Engineering, Chapter 30, Part 5, 2009.
- [6] "Chicago Transit Authority detail specification for composite (plastic) railroad tie," Specification no. CTA 1137-05A, Chicago Transit Authority, Chicago, 2005. [za 3]
- [7] W. Ferdous, A. Manalo et al. „Recent Developments And Applications Of Composite Railway Sleepers”,CORE 2016, Melbourne Australia
- [8] Silva, É. A., Pokropski, D., You, R., & Kaewunruen, S. (2017). Comparison of structural design methods for railway composites and plastic sleepers and bearers. *Australian Journal of Structural Engineering*, 18(3), 160–177. <https://doi.org/10.1080/13287982.2017.1382045>
- [9] ROZPORZĄDZENIE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY (UE) NR 528/2012 z dnia 22 maja 2012 r. w sprawie udostępniania na rynku i stosowania produktów biobójczych

Bibliografia

- [10] Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru podkładów, podrozdnic i mostownic drewnianych – wymagania i badania Id-113, PKP PLK 2019
- [11] A. Butor Analiza celowości zastosowania recyklingu materiałów stosowanych dla nowo opracowanych polimerowych, rozprawa doktorska, Katowice 2023 podkładów kolejowych w oparciu o LCC
- [12] S. Jemiolo Modele konstytutywne kompozytowych materiałów z włóknami i modele siatek do zbrojenia nawierzchni, https://www.archiwum.gddkia.gov.pl/userfiles/articles/p/prace-naukowo-badawcze-zrealizow_3435//documents/spr3_mes_czi_sj-pop.pdf
- [13] T. Kubiński, J. Dzobinski, Ł. Sobczak et al. „Możliwości zastosowania podkładów polimerowych w Polsce”, Ogólnopolska Konferencja Naukowo – Techniczna, Transport Kolejowy 2017, przeszłość – Terazniejszość – Przyszłość
- [14] W. Powrie & L. Le Pen „A Guide to Track Stiffness”, Cross Industry Track Stiffness Working Group, 2016
- [15] A. Gupta, R Kamat „Polimer Viscoelasticity” <https://www.youtube.com/watch?v=Cd4m5qmNZP0>
- [16] M. Bartkowiak-Jowska „Pełzanie wybranych elementów konstrukcyjnych”, Mechanika i wytrzymałość materiałów - instrukcja do ćwiczenia laboratoryjnego

