

Zastosowanie destruktu asfaltowego w recyklowanych nawierzchniach drogowych

Application of reclaimed asphalt in recycled road pavements



Łukasz Skotnicki

Dr inż.

Politechnika Wrocławska, Katedra
Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk

lukasz.skotnicki@pwr.edu.pl



Jarosław Kuźniewski

Dr inż.

Politechnika Wrocławska, Katedra
Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk

jaroslaw.kuzniewski@pwr.edu.pl

Streszczenie: W niniejszym referacie przedstawiono możliwości powtórnego zastosowania materiałów pochodzących z recyklingu w konstrukcjach nawierzchni drogowych. Materiały odpadowe pochodziły ze starych i zniszczonych warstw nawierzchni. Destrukt asfaltowy został wykorzystany do wytworzenia nowych warstw nawierzchni drogowych – warstw podbudowy. Warstwy podbudowy wykonano z mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). Głównym celem była ocena wpływu destruktu asfaltowego w mieszankach MCE na właściwości fizyczne, mechaniczne i reologiczne recyklowanej podbudowy. Zastosowanie destruktu asfaltowego w mieszankach MCE redukuje koszty budowy dróg oraz pozwala na ekologiczne współistnienie inwestycji ze środowiskiem. Wyniki badań opracowano w ramach projektu pt. „Innowacyjna technologia wykorzystująca optymalizację środka wiążącego przeznaczonego do recyklingu głębokiego na zimno konstrukcji nawierzchni zapewniająca jej trwałość eksploatacyjną” (TECHMATSTRATEG1/349326/9/NCBR/2017) w ramach przedsięwzięcia naukowego Badań Strategicznych oraz Programu Rozwojowego „Nowoczesne technologie materiałowe” (TECHMATSTRATEG I), który był finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR).

Słowa kluczowe: Mieszanka MCE; Recykling nawierzchni drogowych; Destrukt asfaltowy; Cementowe pyłaste produkty uboczne

Abstract: This paper presents the possibilities of reusing recycled materials in road pavement constructions. Waste materials came from old and damaged pavement layers. The reclaimed asphalt pavement (RAP) was used to create new layers of road surfaces - the base layers. The base layers were made of mineral-cement-emulsion mixtures (MCE). The main issue was to assess the impact of the RAP in MCE mixes on the physical, mechanical and rheological properties of the recycled base layer. The use of reclaimed asphalt in MCE mixes reduces road construction costs and allows for the ecological coexistence of the investment with the environment. The research results were developed as part of the project entitled "The innovative technology used the binding agent optimization that provides the long service life of the recycled base layer" (TECHMATSTRATEG1/349326/9/NCBR/2017) within the scientific undertaking of Strategic Research and Development Program entitled "Modern Materials Technology" (TECHMATSTRATEG I), which is financed by the National Center for Research and Development (Polish NCBiR).

Keywords: MCE mixture; Road pavement recycling; Reclaimed asphalt pavement (RAP); Cement dusty by-products

Wstęp

W ramach realizacji grantu badawczego „Nowoczesne technologie materiałowe” Katedra Dróg i Lotnisk Politechniki Wrocławskiej w latach 2018-2021 brała udział w projekcie: „Innowacyjna technologia wykorzystująca optymalizację środka wiążącego przeznaczonego do technologii recyklingu głębokiego na zimno konstrukcji nawierzchni zapewniająca jej trwałość eksploatacyjną”. Zakres tematu badawczego obejmował ocenę wpływu innowacyjnego środka wiążącego na

właściwości fizyczne, mechaniczne i reologiczne recyklowanej podbudowy wykonanej z mieszanki mineralno-spoiwowej z emulsją asfaltową i asfaltem spienionym.

Opracowano procedury badań i oceny właściwości mieszanek drogowych zawierających: destruktu asfaltowy, różne składniki mineralne, spoiwo dedykowane (składające się z cementu, wapna i ubocznych produktów pylistych) pochodzące z cementowni oraz lepiszcze asfaltowe w postaci emulsji asfaltowej bądź asfaltu spienionego. Przygotowano także wytycz-

ne technologii recyklingu głębokiego na zimno z emulsją asfaltową oraz dedykowanym spoiwem.

Jednym z materiałów służącym do wykonania warstw podbudowy drogowej są mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjne. Innowacyjne podejście w temacie badawczym polegało na zastosowaniu w składzie tych mieszanek innowacyjnego spoiwa w zastępstwie cementu w połączeniu z destruktem asfaltowym i lepiszczem asfaltowym. Podstawą analiz było określenie wpływu spoiwa dedykowanego na parametry wytrzy-

małościowe mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). Zakres badań przedstawionych w tym artykule obejmował: wytrzymałość mieszanek MCE na rozciąganie pośrednie określone metodą ITS oraz odporności na działanie czynników atmosferycznych określonych metodami: TSR, ITSR oraz AASHTO.

Materiały recyklowane w drogownictwie

Zagadnienie ochrony środowiska jest bardzo istotne, szczególnie z uwagi na postępującą degradację i eksploatację otaczającej nas natury. Wobec zmniejszających się naturalnych zasobów materiałowych pojawił się problem powtórnego wykorzystania materiałów z już istniejących, ale wyeksploatowanych obiektów budowlanych. Powtórne wykorzystanie zużytych materiałów (recykling) obserwowane jest także w budownictwie drogowym.

Do budowy nawierzchni drogowych, jak i lotniskowych można zastosować nie tylko nowe, nieprzetworzone jeszcze materiały, ale także te pochodzące z recyklingu. Recykling nawierzchni drogowych umożliwia powtórne wykorzystanie materiałów drogowych, które po odpowiednim doziarnieniu i wymieszaniu ze spoiwami typu asfalt lub cement przy ich odpowiedniej zawartości procentowej, tworzą pełnowartościowe produkty materiałowe.

Recykling stosowany w budownictwie drogowym dostarcza bardzo wiele wymiernych korzyści: zmniejsza zapotrzebowanie na surowce mineralne, obniża koszty transportu kruszywa, wpływa na znaczne obniżenie liczby składowisk odpadów pochodzących ze zniszczonych nawierzchni drogowych.

W pracach naukowych z zakresu budownictwa publikowanych w najlepszych czasopismach branżowych wykazano, że warstwy konstrukcji

drogowych z zawartością różnego rodzaju dodatków oraz tzw. destruktu asfaltowego uzyskują bardzo dobre właściwości mechaniczne, niejednokrotnie lepsze niż mieszanki składające się tylko ze składników naturalnych [29]. Ponadto doświadczenia chińskie potwierdziły możliwość zastosowania żużla betonowego i cegły do konstrukcji nawierzchni nasypów autostrad [12, 13]. W nasypach drogowych można zastosować odpady budowlane pochodzące z rozbiórki obiektów budowlanych [5, 26, 27]. Ten sam materiał można wykorzystać do stosowania w niezwiązanych warstwach podbudowy [3, 18, 30]. Materiały odpadowe w zastępstwie surowców naturalnych można także zastosować do budowy poboczy dróg lub dróg nieutwardzonych [8]. Parametrami monitorowanymi były gęstość, nośność i mrozoodporność. Mieszanki recyklowane zawierające odpady aluminium uzyskały lepsze wartości mechaniczne (wytrzymałość na ściskanie, parametr CBR) niż mieszanki recyklowane bez zawartości tego odpadu [15].

Udowodniono także możliwość zastosowania materiałów mineralnych pochodzących z recyklingu nawierzchni betonowych. Zamiast grubych naturalnych kruszyw – do 20%, można zastosować wysokiej jakości materiały pochodzące z recyklingu kruszyw betonowych [10]. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie pośrednie oraz modułów sprężystości wykazały, że do mieszanek asfaltowych dodatek recyklowanego kruszywa betonowego w ilości 40% mieszanki mineralnej jest optymalny i zalecany [17].

Zastosowanie zużytych opon do mieszanek z modyfikowanym asfaltem w konstrukcji nawierzchni powoduje dużą oszczędność energii i redukcję emisji dwutlenku węgla, poprzez zużycie dużo mniejszej ilości węgla [16, 32]. Guma samochodowa w postaci okruszków jako modyfikator poprawia właściwości reologiczne i

mechaniczne mieszanin gumowo-asfaltowych [16].

W badaniach wykazano, że destruktu asfaltowy wraz z odzyskanym podłożem stabilizowanym cementem może być wykorzystany jako surowiec wtórny kruszywa do przygotowania mieszanek stabilizowanych cementem w technologii recyklingu na zimno [23]. Mieszanki z zawartością materiałów recyklowanych charakteryzowały się wystarczającą trwałością i dobrą wytrzymałością.

Spojwa asfaltowe wpływają na parametry fizyko-mechaniczne, takie jak wytrzymałość na rozciąganie pośrednie, moduł sztywności pełzania czy zawartość wolnej przestrzeni, mieszanek recyklowanych metodą na zimno [4, 25]. Rodzaj spoiwa miał znaczący wpływ na zagęszczalność badanych mieszanin, co spowodowało uzyskanie różnych wartości parametrów mechanicznych. Otrzymane wyniki potwierdziły możliwość zastosowania do warstw konstrukcji nawierzchni mieszanek poddanych recyklingowi na zimno ze spienionym asfaltem.

Ponadto destruktu asfaltowy może być składnikiem mieszanki mineralno-cementowej wymieszanej z asfaltem spienionym (MCAS). Mieszanka ta, wykonana metodą przetworzenia na miejscu, wg. technologii na zimno, swoje szerokie zastosowanie znalazła w warstwie podbudowy zasadniczej [14, 20, 31], na której bezpośrednio wbudowana zostanie warstwa wiążąca z betonu asfaltowego w technologii na gorąco.

Kolejną mieszanką, w której można wykorzystać materiał recyklowany, jest tzw. asfalt kompaktowy. Powstaje on przy jednoczesnym układaniu dwóch warstw nawierzchni asfaltowej, zwykle wiążącej i ścieralnej. Badania nawierzchni wykonanej na autostradzie A-2 w Polsce potwierdziły jej właściwości w zakresie trwałości, odporności na deformacje i połączenia między warstwami [28].

Niemieckie laboratoria oraz firmy

wykonawcze dosyć często stosują destrukta asfaltowy do mieszanek dla górnych warstw konstrukcyjnych [24]. Ponadto destrukta asfaltowy jest wykorzystywany do utwardzania poboczy lub do budowy dróg serwisowych lub zakładowych.

Mieszanki zawierające destrukta asfaltowy wykazywały wyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie pośrednie (ITS) oraz zmniejszone odkształcenie niż tradycyjne mieszanki mineralno-asfaltowe [19].

Jako środek odmładzający można stosować imidazolinę, zarówno rzepakowe, jak i oleinowe do przywracania właściwości postarzałego asfaltu zawartego w RAP [33]. Dodanie imidazolinę do „starego” asfaltu spowodowało wzrost penetracji i spadek temperatury mięknięcia i lepkości.

Ponadto, zastąpienie kruszywa grubego przez destrukta asfaltowy daje znaczną poprawę właściwości mechanicznych (m.in. stabilność Marshalla, wytrzymałość na rozciąganie pośrednie) i wydajności mieszanek mineralno-asfaltowych wytworzonych technologią na gorąco w porównaniu do tradycyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych [2].

Jednym ze sposobów utylizacji odpadów budowlanych w nawierzchniach drogowych może być zastosowanie mieszanek mineralno-cementowo-emulsiyjnych (MCE). Mieszanki MCE składają się z destrukta lub destrukta i kruszywa mineralnego, wymieszanego na zimno z cementem i emulcją asfaltową w określonych proporcjach, w warunkach optymalnej wilgotności. Mieszanki te charakteryzują się ciągłym uziarnieniem [6, 23].

Mieszanki typu MCE mogą być wykorzystywane w konstrukcjach nawierzchni drogowych jako warstwy podbudowy. Podbudowa z MCE może być stosowana w następujących przypadkach:

- przy przebudowie istniejących nawierzchni,
- przy poszerzeniu lub remoncie

Tab. 1. Wymagania uziarnienia do mieszanki mineralnej (MM) dla warstw MCE [7]

Sito # [mm]	Mieszanka MCE dla KR 1+2	Mieszanka MCE dla KR 3+4
63,0	100	100
31,5	80 – 100	80 – 100
16,0	55 – 100	55 – 93
8,0	35 – 90	35 – 80
4,0	25 – 75	25 – 67
2,0	16 – 60	16 – 55
1,0	9 – 45	9 – 43
0,5	5 – 35	5 – 33
0,125	2 – 18	2 – 15
0,063	0 – 12	0 – 12

poboczy,

- przy budowie nowych nawierzchni (warstwa podbudowy) w ramach remontów i przebudów [8].

Podstawowymi materiałami składowymi mieszanek mineralno-cementowo-emulsiyjnych są: destrukta, kruszywo doziarniające, spoiwo hydrauliczne, emulsja asfaltowa i woda.

Najbardziej rozpowszechniona jest metoda stosowania destrukta asfaltowego, powstałego z frezowania zdegradowanych nawierzchni podatnych.

Przy recyklingu z użyciem asfaltu i cementu wykonane warstwy nawierzchni charakteryzują się nośnością i wytrzymałością, przenosząc spękania skurczowe [9, 11].

Zastosowanie tych składników, szczególnie cementu, może powodować pojawienie się skurczu i spękań w warstwach drogowych. Autorzy pracy skoncentrowali się na redukcji zjawiska pęknięcia w mieszankach typu MCE, poprzez zastosowanie innowacyjnego spoiwa cementowego wraz z materiałami pochodzącymi z recyklingu. Innowacyjne spoiwo cementowe skomponowane na bazie ubocznych produktów pylistych pochodzących z cementowni przyczynia się również do optymalizacji procesu recyklingu w nawierzchniach drogowych. Badania prowadzone były w zakresie analiz wytrzymałościowych oraz odporności na działanie czynników atmosferycznych. W efekcie prac wykazano, że innowacyjne spoiwa mają znaczący wpływ na otrzymywane wyniki ba-

dań. Zastosowanie innowacyjnych spoiw jako alternatywne rozwiązanie dla cementu, wpłynie pozytywnie na trwałość konstrukcji nawierzchni drogowych.

Dobór składników mieszanek MCE

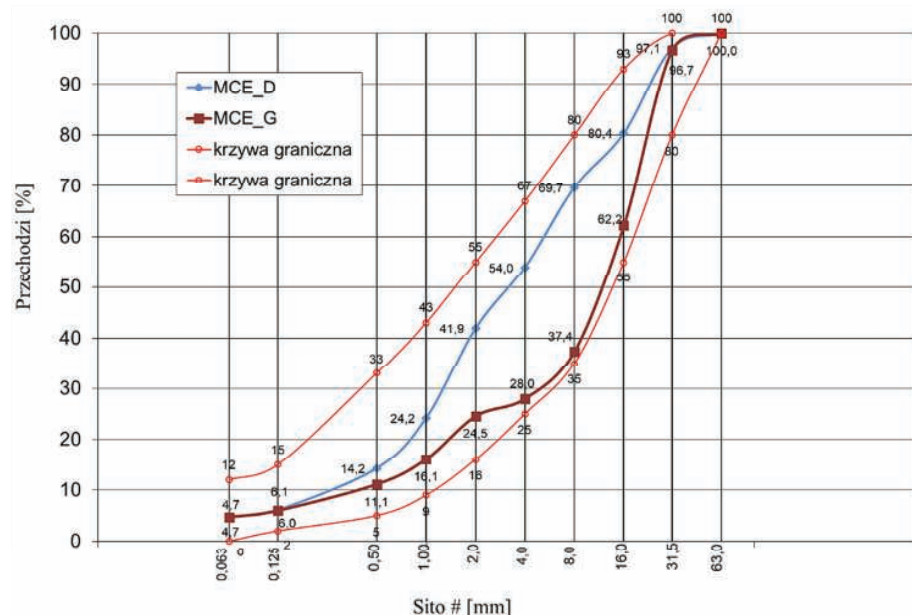
Projektowanie mieszanki MCE powinno być skorelowane z projektowaniem konstrukcji nawierzchni i organizacją robót, w zależności od metody jej wykonywania. Do wytworzenia mieszanek mineralno-cementowo-emulsiyjnych należy zastosować następujące materiały: destrukta asfaltowy, kruszywo doziarniające, spoiwo hydrauliczne, emulcję asfaltową oraz wodę.

Składy mieszanek mineralnych (MM) określono zgodnie z przyjętymi założeniami, tzn. dla dwóch typów mieszanek: drobnoziarnistej (oznaczonej symbolem D) i gruboziarnistej (oznaczonej symbolem G). Mieszanka drobnoziarnista składała się z kruszywa łamanego doziarniającego o ciągłym uziarnieniu 0/31,5 mm, kruszywa naturalnego doziarniającego o ciągłym uziarnieniu 0/2 mm oraz kruszywa recyklowanego – (destrukta asfaltowy) 0/10 mm. Z kolei mieszanka gruboziarnista w swym składzie zawierała kruszywo łamane doziarniające o ciągłym uziarnieniu 0/31,5 mm, kruszywo naturalne doziarniające o ciągłym uziarnieniu 0/2 mm oraz kruszywo recyklowane – (destrukta asfaltowy) 0/31,5 mm.

Na właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe mieszanek MCE w istotnym stopniu wpływa sam skład

Tab. 2. Składy mieszanek mineralnych (MM)

Składniki mieszanki drobnoziarnistej (D)	Składniki mieszanki gruboziarnistej (G)	Zawartość [%]
0/10mm destruktu asfaltowy	0/31,5mm destruktu asfaltowy	40
0/31,5mm kruszywo doziarniające, łamane	0/31,5mm kruszywo doziarniające, łamane	50
0/2mm kruszywo doziarniające, naturalne	0/2mm kruszywo doziarniające, naturalne	10



1. Krzywe uziarnienia mieszanek mineralnych (MM)

granulometryczny mieszanki mineralnej. Zgodnie z wymaganiami [7], jej uziarnienie mieszanki mineralnej powinno mieścić się w określonym przedziale podanym w tab. 1. Uziarnienie takiej mieszanki mineralnej określa się bez uwzględniania cementu.

Z przeprowadzonych analiz wynika, żeby krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej drobnoziarnistej i gruboziarnistej spełniała warunki krzywych granicznych MCE oraz żeby zawartość procentowa poszczególnych jej składników (kruszywa naturalne oraz destruktu) w obu typach mieszanek była taka sama, w projekcie mieszanek mineralnych założono udział pro-

Tab. 3. Oznaczenie i składu skomponowanych spoiw

Oznaczenie spoiw	Składnik		
	Cement	Wapno	Pyły
1V	0,20	0,20	0,60
2V	0,20	0,60	0,20
3V	0,60	0,20	0,20
4C	0,20	0,40	0,40
5C	0,40	0,20	0,40
6C	0,40	0,40	0,20
7C	0,33	0,33	0,33
Ref	1	0	0

centowy destruktu asfaltowego na poziomie 40%, kruszywa naturalnego 0/31,5 mm w ilości 50% oraz kruszywa naturalnego 0/2 mm wynoszącego 10%.

Uziarnienie uzyskanych mieszanek mineralnych drobnoziarnistych i gruboziarnistych przedstawiono odpowiednio w tab. 2 oraz na rys. 1.

Obie mieszanki, zarówno drobnoziarnista jak i gruboziarnista charakteryzują się ciągłością uziarnienia i mieszczą się w krzywych granicznych uziarnienia określonych dla mieszanek MCE przeznaczonych do podbudów.

Kolejnym krokiem było określenie składów mieszanek mineralnych (MM), które w swym składzie zamiast cementu zawierały innowacyjny środek wiążący (spoiwo). Jako mieszanki referencyjne przyjęto mieszanki gruboziarniste i drobnoziarniste, zawierające spoiwo cementowe oznaczone odpowiednio: MM_G_Ref i MM_D_Ref. Następnie zamiast cementu zastosowano innowacyjne spoiwa drogowe, zawierające w swym składzie cement, wapno i uboczne cemento-

we produkty pylaste (UCPP). Spoiw takich wykorzystano siedem, a różniły się one inną zawartością trzech składników: cementu, wapna i pyłów.

Spoivo to miało za zadanie ograniczyć sztywność oraz zapewnić trwałość eksploatacyjną dla mieszanki MCE. Składy poszczególnych spoiw przedstawiono w tab. 3.

W badaniach zastosowano siedem spoiw skomponowanych według planu eksperymentu z etapu I Programu „Nowoczesne technologie materiałowe” Techmatstrateg.

Na etapie projektowania składów wszystkich mieszanek mineralnych (MM) drobnoziarnistych i gruboziarnistych (16 mieszanek) określono dla nich następujące cechy: maksymalną gęstość objętościową, maksymalną gęstość objętościową szkieletu oraz wilgotność optymalną. Wyniki tych badań przedstawiono w tab. 4.

Nieznaczne różnice w wartościach wilgotności optymalnych, gęstości objętościowych pomiędzy poszczególnymi składami, wynikają z niewielkich różnic, jakie występują w składzie spoiwa innowacyjnego.

Dla tak określonych składów mieszanek mineralnych (MM) wraz z innowacyjnymi spoiwami, wg tab. 4, wykonano mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjne (MCE). Zastosowano emulsję asfaltową C60B10ZM/R. Wyniki składów mieszanek drobnoziarnistych i gruboziarnistych ze spoiwem innowacyjnym przedstawiono w tab. 5.

W kolejnym etapie prac przystąpiono do analiz cech wytrzymałościowych przedmiotowych mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych.

Program badawczy

Badania wykonano dla mieszanek MCE gruboziarnistych z różnymi spoiwami hydraulicznymi o oznaczeniach: MCE_G_Ref, MCE_G_1V, MCE_G_2V, MCE_G_3V, MCE_G_4C, MCE_G_5C, MCE_G_6C, MCE_G_7C oraz drobno-

Tab. 4. Wilgotność optymalna mieszanek MM ze spoiwami innowacyjnymi

Mieszanka mineralna	MM_G_1V	MM_G_2V	MM_G_3V	MM_G_4C	MM_G_5C	MM_G_6C	MM_G_7C
Wilgotność optymalna	7,77 %	7,74 %	7,62 %	7,69 %	7,64 %	7,63 %	7,76 %
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu	2,172 g/cm ³	2,190 g/cm ³	2,176 g/cm ³	2,186 g/cm ³	2,190 g/cm ³	2,197 g/cm ³	2,185 g/cm ³
Maksymalna gęstość objętościowa	2,341 g/cm ³	2,359 g/cm ³	2,342 g/cm ³	2,354 g/cm ³	2,357 g/cm ³	2,365 g/cm ³	2,355 g/cm ³
Mieszanka mineralna	MM_D_1V	MM_D_2V	MM_D_3V	MM_D_4C	MM_D_5C	MM_D_6C	MM_D_7C
Wilgotność optymalna	7,98 %	7,94 %	7,83 %	7,91 %	7,86 %	7,85 %	7,95 %
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu	2,139 g/cm ³	2,153 g/cm ³	2,146 g/cm ³	2,148 g/cm ³	2,149 g/cm ³	2,156 g/cm ³	2,147 g/cm ³
Maksymalna gęstość objętościowa	2,310 g/cm ³	2,324 g/cm ³	2,314 g/cm ³	2,318 g/cm ³	2,318 g/cm ³	2,325 g/cm ³	2,318 g/cm ³

ziarnistych: MCE_D_Ref, MCE_D_1V, MCE_D_2V, MCE_D_3V, MCE_D_4C, MCE_D_5C, MCE_D_6C, MCE_D_7C.

Dla realizacji zadania kluczowe było przeprowadzenie badań: gęstości i gęstości objętościowej, zawartości wolnej przestrzeni, nasiąkliwości, wytrzymałości na ściskanie osiowe, wytrzymałości na rozciąganie pośrednie ITS, odporności na działanie czynników atmosferycznych AASHTO i PANK, TSR, ITSR, modułu sztywności w rozciąganiu pośrednim IT-CY.

W niniejszym opracowaniu szczegółowej analizie poddano odporność badanych mieszanek na czynniki atmosferyczne. W zależności od zastosowanej metody badania próbek uzyskano różne poziomy wytrzymałości, służące do oceny przydatności danego materiału do zastosowania w warstwach podbudowy nawierzchni drogowych. Porównano trzy stosowa-

ne metody badawcze: AASHTO, TSR i ITSR.

Idea badań odporności na działanie czynników atmosferycznych metodami TSR, ITSR i AASHTO jest analogiczna a różnica polega na sposobie kondycjonowania próbek. We wszystkich metodach do porównania odporności na działanie wody i mrozu służą próbki świadki tzw. "próbki suche - DRY". Oznacza się dla nich wytrzymałość na rozciąganie pośrednie ITS (indirect tensile strength) – ITSDRY. Badanie wytrzymałości na rozciąganie pośrednie ITS wykonano wg [22]. Do analiz wykorzystano po trzy próbki cylindryczne (Marshalla) o nominalnej średnicy 101,5 mm i wysokości 63,5 mm, dla każdego zarobu i temperatury charakterystycznej wynoszącej +25°C. Probki zagęszczano po 75 uderzeń na stronę w automatycznym ubijaku Marshalla. Z uwagi na obecność w składzie mie-

szanek cementu i spoiw hydraulicznych okres dojrzewania próbek wynosił 28 dni.

W trakcie badań dokonano szczegółowej rejestracji obciążającej siły potrzebnej do zniszczenia próbki. Wartość siły niszczącej wykorzystano do określenia wytrzymałości na rozciąganie pośrednie próbek suchych ITSDRY.

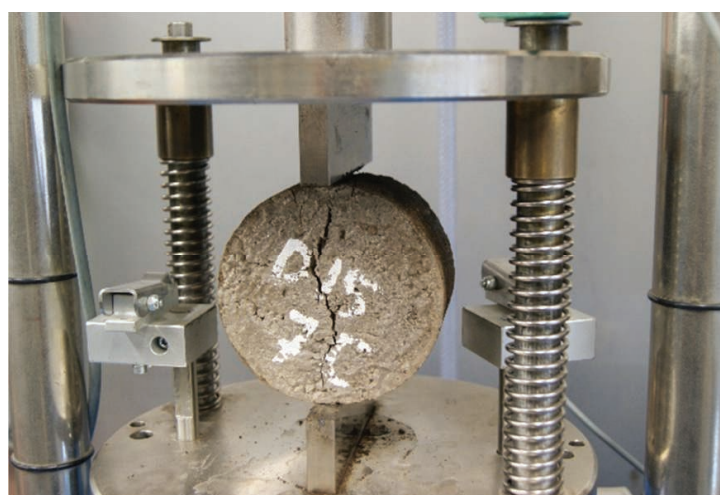
Przykładowy widok wykonywanego testu i próbek Marshalla pokazano na rys. 2. Wytrzymałości na rozciąganie ITS obliczono z zależności (1):

$$ITS = (2P)/(\pi D h) \quad (1)$$

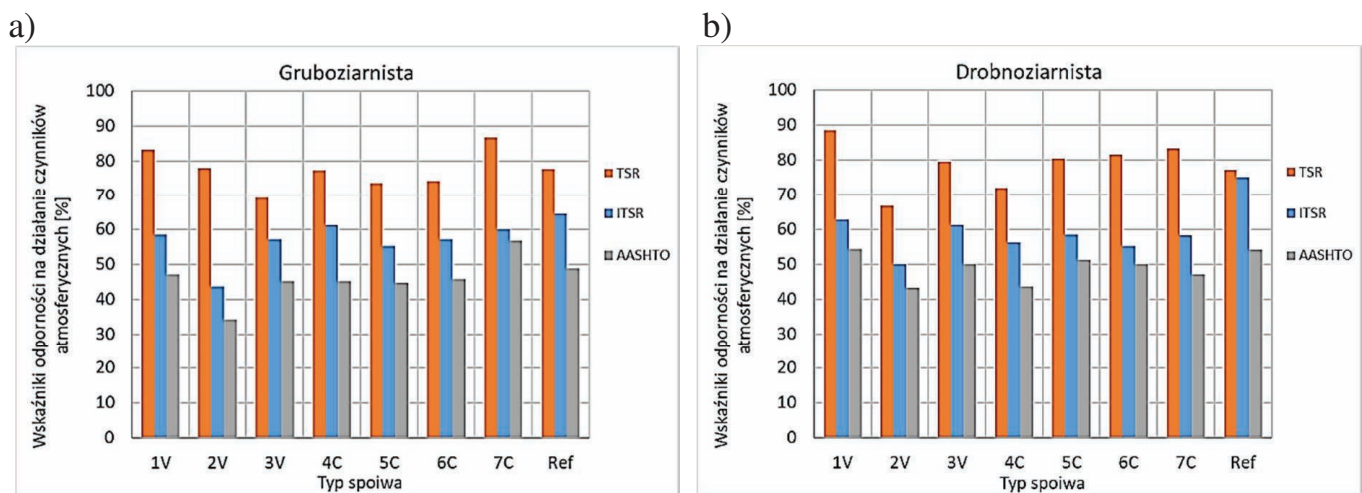
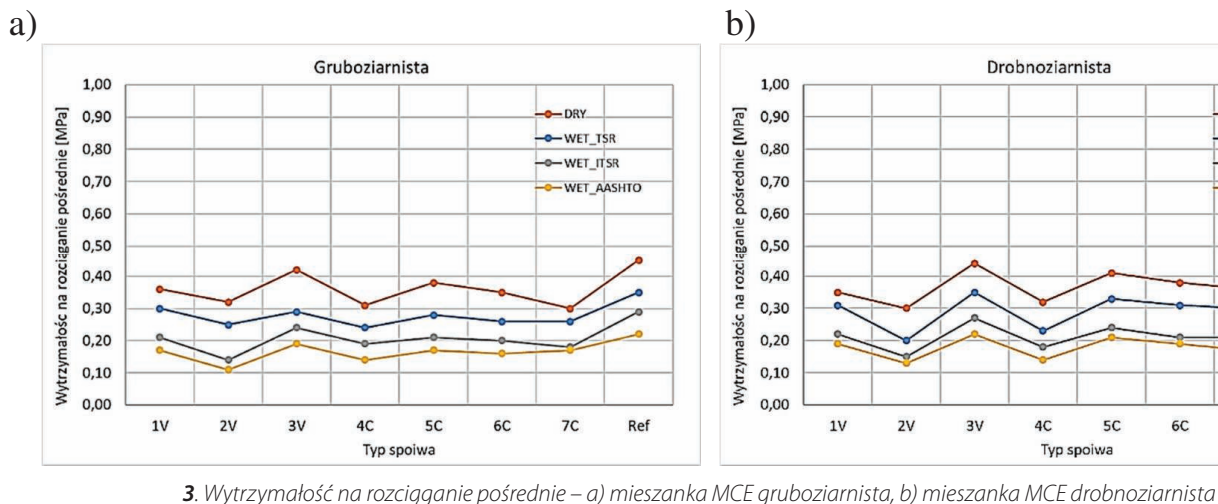
gdzie: *ITS* – wytrzymałość na rozciąganie pośrednie [MPa], *P* – wartość siły niszczącej [N], *D* – średnica próbki [mm], *h* – wysokość próbki [mm].

W metodzie TSR (odporność na działanie wody) wytrzymałość próbek suchych ITSDRY porównywana jest do wytrzymałości próbek nasączonych wodą ITSWET przez 24 h w temperaturze +25°C. Do analiz wykorzystano po trzy próbki cylindryczne (Marshalla) o nominalnej średnicy 101,5 mm i wysokości 63,5 mm, dla każdego zarobu i temperatury charakterystycznej.

W metodzie ITSR wg normy [21] i wytycznych technicznych [34] wytrzymałość próbek suchych ITSDRY porównywana jest do wytrzymałości próbek nasączonych wodą przez 72 h



2. Probki do badań wytrzymałości na rozciąganie pośrednie ITS i schemat badania



Tab. 5. Skład mieszanek MCE

Składniki	Skład roboczy MM [%]	Skład MCE_D [%]	Skład MCE_G [%]
Destrukt asfaltowy 0/10mm (D) lub 0/31,5mm (G)	40	34,4	34,5
0/31,5mm kruszywo doziarniające, łamane	50	43,0	43,1
0/2mm kruszywo doziarniające, naturalne	10	8,6	8,6
Cement lub spoiwo (1V,2V,3V,4C,5C,6C,7C)	-	3,0	3,0
Emulsja asfaltowa C60B10ZM/R	-	5,0	5,0
Woda	-	6,0	5,8

i poddanych jednemu cyklowi zamrażania ITSRWET w temp. -18°C przez min. 16 h. Do analiz wykorzystano trzy próbki cylindryczne (Marshalla) o nominalnej średnicy 101,5 mm i wysokości 63,5 mm, dla każdej mieszanki MCE.

W metodzie AASHTO wytrzymałość próbek suchych ITSDRY porównywana jest do wytrzymałości próbek nasączonych wodą w podciśnieniu 200 hPa przez 25 min. i poddanych 18 cyklom zamrażania i odmrażania w wodzie (-18°C przez 4 godziny i $+20^{\circ}\text{C}$ przez 4 godziny) - AASHTOWET [1]. Do określenia wytrzymałości AASH-

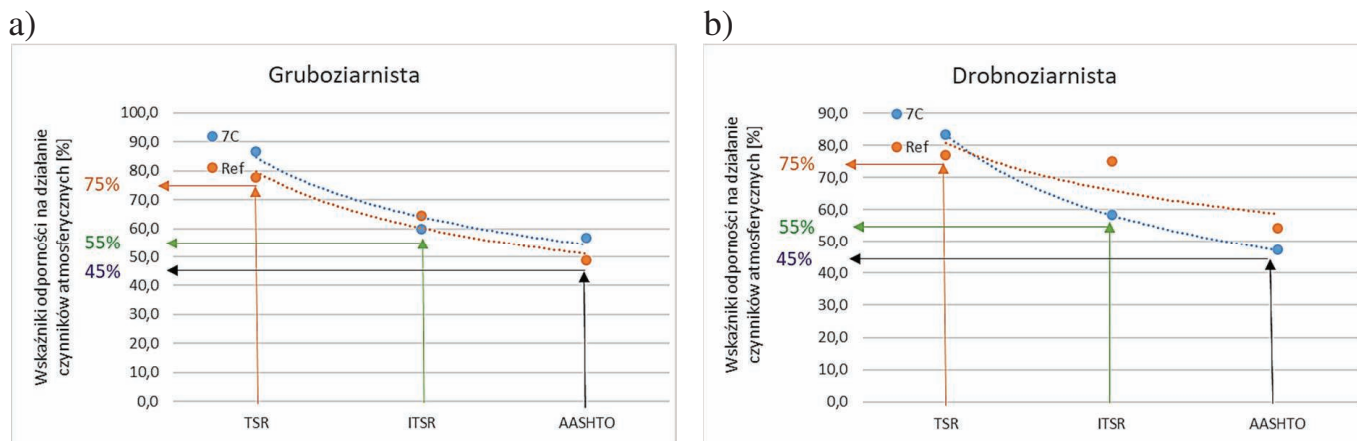
TOWET wykorzystano trzy próbki cylindryczne (Marshalla) o nominalnej średnicy 101,5 mm i wysokości 63,5 mm, dla każdej mieszanki MCE.

Na podstawie uzyskanych wyników szczegółowych określono wartości średnie wytrzymałości na rozciąganie pośrednie ITSDRY, ITSWET, ITSRWET, AASHTOWET, dla wszystkich badanych mieszanek MCE z podziałem na mieszanki gruboziarniste i drobnoziarniste – rys. 3.

Uzyskane wytrzymałości na rozciąganie pośrednie dla próbek „suchych” ITSDRY oraz próbek „mokrych” ITSWET,

ITSRWET, AASHTOWET, posłużyły do wyznaczenia odporności na działanie czynników atmosferycznych TSR, ITSR, AASHTO dla wszystkich badanych mieszanek MCE z podziałem na mieszanki gruboziarniste i drobnoziarniste – rys. 4. Wskaźniki odporności na działanie czynników atmosferycznych TSR, ITSR, AASHTO wyrażone są w procentach i wskazują na to jaka część wytrzymałości na rozciąganie pośrednie pozostała po procesie kondycjonowania próbek w porównaniu do próbek świadków tzw. „suchych”.

Na podstawie przeprowadzonych analiz wyników badań stwierdzono, że najmniejsze spadki wytrzymałości na rozciąganie pośrednie – największa procentowa pozostałość wytrzymałości po kondycjonowaniu próbek w porównaniu do próbek „suchych”, występuje w badaniu TSR. Jednokrotne nasączenie próbek wodą obniża ich



5. Odporność na działanie czynników atmosferycznych (TSR, ITSr, AASHTO) – a) mieszanka MCE gruboziarnista, b) mieszanka MCE droboziarnista

wytrzymałość na rozciąganie pośrednie w granicach 10-30%. W przypadku jednokrotnego nasączenia i zamrażania (metoda ITSr) spadek wytrzymałości sięga 30-55%, w zależności od zastosowanego spoiwa. Natomiast w przypadku jednokrotnego nasączenia i 18-krotnego zamrażania i rozmrażania (metoda AASHTO) spadki wytrzymałości sięgają nawet 65% w stosunku do próbek „suchych”. W badaniu TSR najniższe spadki wytrzymałości zaobserwowano dla mieszanek z zawartością spoiw 1V i 7C, zarówno dla droboziarnistej jak i gruboziarnistej. W przypadku badań ITSr najmniejsze spadki wytrzymałości dotyczą mieszanek gruboziarnistych z zawartością spoiw Ref, 4C i 7C oraz droboziarnistych Ref, 1V i 3V. Spadki wytrzymałości w badaniu metodą AASHTO w najmniejszym stopniu wykazywane były w mieszankach gruboziarnistych z zawartością spoiw 7C i Ref, natomiast w droboziarnistych Ref, 1V i 5C.

Obecnie do oceny wrażliwości na działanie wody i mrozu konwencjonalnych mieszanek MCE stosowane jest kryterium odpowiadające badaniu ITSr. Wg [7] pozostała wytrzymałość na rozciąganie pośrednie dla próbek kondycjonowanych w wodzie nie może być niższa od 70% lub 80% w zależności od aktualnej kategorii ruchu KR – tab. 6.

W badaniu tym stosuje się jednak tylko nasączenie wodą bez zamrażania oraz temperaturę badawczą +5°C. W opinii autorów niniejszej pracy bar-

Tab. 6. Wymagania w odniesieniu do próbek z mieszanki MCE [7]

Cecha	Ruch KR1-KR2	Ruch KR3-KR4
Odporność na działanie wody (pozostała wytrzymałość na pośrednie rozciąganie po przechowywaniu próbek w wodzie), T=+5°C po 28 dniach, [%]	nie mniej niż 70	nie mniej niż 80

Tab. 7. Wymagania dla próbek z mieszanki MCE z destruktem asfaltowym

TSR [%] 25°C	ITSr [%] 25°C	AASHTO T283 [%] 25°C
min. 75	min. 55	min. 45

dziej adekwatne jest zastosowanie metody pielęgnacji próbek z zamrażaniem oraz temperatury badawczej +25°C. W ten sposób uzyska się ujednolicenie badań odporności na wodę i mroź dla mieszanek MCE i mieszanek MMA oraz adaptację do możliwych rzeczywistych warunków pracy warstwy MCE w nawierzchni. Przykładowe zależności wskaźnika odporności na działanie czynników atmosferycznych dla mieszanek z zawartością spoiw 7C i Ref, zarówno gruboziarnistych i droboziarnistych pokazano na rys. 5. Mieszanki te wytypowano z uwagi na najlepsze, korzystne właściwości wytrzymałościowe wykazywane w całym procesie badawczym. Jednocześnie ukazano proponowane dopuszczalne minimalne kryteria oceny przydatności mieszanek MCE z destruktem asfaltowym, do zastosowania w warstwach podbudowy nawierzchni drogowych.

W wyniku przeprowadzonych prac badawczych zaproponowano wprowadzenie nowych kryteriów oceny przydatności dla MCE z destruktem asfaltowym, w zależności od stosowanej metody pielęgnacji próbek – tab. 7.

Podsumowanie

Na podstawie wykonanych analiz wytrzymałości na rozciąganie pośrednie zauważono, że istnieje wpływ warunków atmosferycznych na mieszanki MCE z zawartością dedykowanego spoiwa. Największą odporność na czynniki atmosferyczne wykazują próbki w badaniu metodą TSR, w którym wytrzymałość na rozciąganie pośrednie obniża się w zakresie 10÷30%, zarówno dla mieszanek gruboziarnistych, jak i droboziarnistych, w stosunku do wytrzymałości uzyskanej metodą ITS dla próbek suchych. Przy określaniu odporności metodą ITSr próbki obniżały swoją wytrzymałość w zakresie 30÷55% a przy określaniu metodą AASHTO próbki obniżały swoją wytrzymałość w zakresie 45÷65%.

W badaniu TSR najmniejsze spadki wytrzymałości występują w mieszankach z zawartością spoiw 1V i 7C, zarówno droboziarnistej jak i gruboziarnistej. W przypadku badań ITSr najmniejsze spadki wytrzymałości dotyczą mieszanek gruboziarnistych z zawartością spoiw Ref, 4C i 7C oraz droboziarnistych Ref, 1V i 3V. Spad-

ki wytrzymałości w badaniu metodą AASHTO w najmniejszym stopniu wykazywane były w mieszankach gruboziarnistych z zawartością spoiw 7C i Ref, natomiast w drobnoziarnistych Ref, 1V i 5C.

W ramach projektu zastosowano destrukta asfaltowy do wytworzenia nowych warstw nawierzchni drogowych, warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). Zastosowanie destrukta asfaltowego jako materiału odpadowego w mieszankach MCE pozwoli na redukcję kosztów budowy dróg oraz pozytywnie wpłynie na aspekty ochrony środowiska i ekologiczne współistnienie inwestycji ze środowiskiem.

W wyniku przeprowadzonych prac badawczych opracowano nowe kryteria oceny przydatności dla MCE z destruktem asfaltowym do zastosowania w warstwach podbudowy nawierzchni drogowych, pod względem odporności na działanie czynników atmosferycznych, w zależności od stosowanej metody pielęgnacji próbek (metody TSR, ITR, AASHTO T283).

Przeprowadzone badania i analizy potwierdziły jednocześnie możliwość zastosowania spoiwa dedykowanego do wytworzenia mieszanki MCE. Mieszanki spełniają wymagania projektowania do zastosowania w warstwach konstrukcyjnych nowych nawierzchni drogowych. Mieszanki MCE zawierające innowacyjne spoiwo dedykowane mogą zostać wykorzystane do konstrukcji warstw podbudowy nawierzchni obciążonych ruchem do kategorii ruchu KR7.

Uzyskane wyniki badań posłużyły do opracowania wytycznych dotyczących procedur projektowania składu innowacyjnego środka wiążącego (trójskładnikowego) zwanego spoiwem dedykowanym do technologii wykonania warstwy z mieszanki mineralno-spoiwowej z emulsją asfaltową.

Niniejszy artykuł powstał w związku z realizacją zadań badawczych w

projekcie pt. „Innowacyjna technologia wykorzystująca optymalizację środka wiążącego przeznaczonego do technologii recyklingu głębokiego na zimno konstrukcji nawierzchni zapewniająca jej trwałość eksploatacyjną”, w ramach wspólnego przedsięwzięcia „Nowoczesne technologie materiałowe” współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. ◀

Materiały źródłowe

- [1] AASHTO T283. Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage. 2011.
- [2] AL-Ghurabi S. B., Al-Humeidawi B. H.: Evaluation of performance of hot mix asphalt contained various sizes of Reclaim asphalt pavement and polymer modified Bitumen. *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.063>.
- [3] Arulrajah A., Disfani M. M., Horpibulsuk S., Suksiripattanapong C., Prongmanee N. Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications. *Construction and Building Materials*, 58, 245–57, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.025>.
- [4] Chomicz-Kowalska, A., Maciejewski K. Performance and viscoelastic assessment of high-recycle rate cold foamed bitumen mixtures produced with different penetration binders for rehabilitation of deteriorated pavements. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120517, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120517>.
- [5] Cristelo N., Vieira C. S., de Lurdes Lopes M. Geotechnical and geo-environmental assessment of recycled construction and demolition waste for road embankments. *Procedia Engineering*, 143, 51–58, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.007>.

- [6] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad - Szczegółowe specyfikacje techniczne D-04.10.01 - Wykonanie podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE), 2001.
- [7] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad - Instrukcja projektowania i wbudowania mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE), Warszawa, 2019.
- [8] Huber S., Henzinger C., Heyer D. Influence of water and frost on the performance of natural and recycled materials used in unpaved roads and road shoulders. *Transportation Geotechnics*, 22, 100305, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100305>.
- [9] Issa R., Zaman M. M., Miller G. A., Senkowski L. J. Characteristics of Cold Processed Asphalt Millings and Cement-Emulsion Mix. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, Asphalt Mixtures, Materials and Construction*, no. 1767, 2001.
- [10] Kox S., Vanroelen G., Van Herck J., de Krem H., Vandoren B. Experimental evaluation of the high-grade properties of recycled concrete aggregates and their application in concrete road pavement construction. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00282, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00282>.
- [11] Li G., Zhao Y., Pang S., Huang W. Experimental study of cement-asphalt emulsion composite. *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 5, 1998.
- [12] Liu L., Li Z., Cai G., Liu X., Yan S. Humidity field characteristics in road embankment constructed with recycled construction wastes. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120977, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120977>.
- [13] Liu L., Li Z., Congress S. S. C., Liu

- X., Dai B. Evaluating the influence of moisture on settling velocity of road embankment constructed with recycled construction wastes. *Construction and Building Materials*, 241, 117988, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117988>.
- [14] Löffler K., Schäfer V. Fundationsschichten aus Asphalt mit Schaumbitumen. *Bitumen* nr 2, 1998.
- [15] López-Alonso M., Martínez-Echevarría, Garach L., Galán A., Ordoñez J., Agrela F. Feasible use of recycled alumina combined with recycled aggregates in road construction. *Construction and Building Materials*, 195, 249-257, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.084>.
- [16] Nanjagowda V. H., Biligiri K. P. Recyclability of rubber in asphalt roadway systems: A review of applied research and advancement in technology. *Resources, Conservation & Recycling*, 155, 104655, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104655>.
- [17] Nwakaire C. M., Yap S. P., Yuen C. W., Onn C. C., Koting S., Babalghaith A. M. Laboratory study on recycled concrete aggregate based asphalt mixtures for sustainable flexible pavement surfacing. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121462, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121462>.
- [18] O'Mahony M. M., Milligan G. W. E. Use of recycled materials in subbase layers. *Transportation Research Record* No. 130, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., 73-80, 1991.
- [19] Oreto C., Veropalumbo R., Viscione N., Biancardo S. A., Russo F. Investigating the environmental impacts and engineering performance of road asphalt pavement mixtures made up of jet grouting waste and reclaimed asphalt pavement. *Environmental Research*, Volume 198, July 2021, 111277.
- [20] OST D-04.10.01a. Szczegółowa Specyfikacja Techniczna: Podbudowa z mieszanki mineralno-cementowej z asfaltem spienionym (MCAS) wykonana w technologii recyklingu głębokiego na zimno. GDDKiA, Warszawa, 2013.
- [21] PN-EN 12697-12. Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań - Część 12: Określanie wrażliwości na wodę próbek mineralno-asfaltowych.
- [22] PN-EN 12697-23. Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 23: Oznaczanie wytrzymałości mieszanki mineralno-asfaltowej na rozciąganie pośrednie.
- [23] Ren J., Wang S., Zang G. Effects of recycled aggregate composition on the mechanical characteristics and material design of cement stabilized cold recycling mixtures using road milling materials. *Construction and Building Materials*, 244, 118329, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118329>.
- [24] Ruttmar I. Destrukt asfaltowy: bogactwo niedostatecznie wykorzystane, edroga.pl.
- [25] Skotnicki Z. Ł., Kuźniewski J., Szydło A. Research on the properties of mineral-cement emulsion mixtures using recycled road pavement materials. *Materials*, vol. 14, nr 3, art. 563, s. 1-23, 2021, <https://doi.org/10.3390/ma14030563>.
- [26] Soleimanbeigi A., Edil T. B. Compressibility of recycled materials for use as highway embankment fill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141, 5, 2015, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001285](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001285).
- [27] Soleimanbeigi A., Edil T. B., Benson C. H. Engineering properties of recycled materials for use as embankment fill. *Geo-Congress* 2014 Technical Papers: Geo-Characterization and Modeling for Sustainability, Atlanta, 2014, 3645-3657, doi:10.1061/9780784413272.353.
- [28] Sybilski D., Maliszewski M., Mularzuk R., Bańkowski W. Pierwsze zastosowanie asfaltu kompaktowego w Polsce. *Drogownictwo* nr 4, 2006.
- [29] Távira J., Jiménez J. R., Ledesma E. F., López-Uceda A., Ayuso J. Real-scale study of a heavy traffic road built with in situ recycled demolition waste. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119219, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119219>.
- [30] Vegas I., Ibañez J.A., Lisbona A., de Cortazar A. S., Frías M. Pro-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections. *Construction and Building Materials*, 25, 5, 2674-2682, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.018>.
- [31] Veith G. Kaltrecycling mit Schaumbitumen. *Strassen und Autobahnen* nr 7-8, 2001.
- [32] Wang Q-Z., Wang N-N., Tseng M-L., Huang Y-M., Li N-I. Waste tire recycling assessment: Road application potential and carbon emissions reduction analysis of crumb rubber modified asphalt in China. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119411, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119411>.
- [33] Wróbel M., Woszek A., Ratajczak M., Franus W. Properties of reclaimed asphalt pavement mixture with organic rejuvenator. *Construction and Building Materials*, 271, 121514, 2021.
- [34] WT-2 – cz. I. Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania techniczne. Warszawa, 2014.