



MATEUSZ MAREK IWAŃSKI¹⁾
 MAŁGORZATA LINEK²⁾
 PIOTR NITA³⁾
 PATRYCJA PIOTROWSKA⁴⁾
 EVA REMIŠOVÁ⁵⁾

ASSESSMENT OF SUITABILITY OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT MATERIAL FOR USE IN CEMENT CONCRETE PAVEMENTS⁶⁾

OCENA PRZYDATNOŚCI DESTRUKTU ASFALTOWEGO DO DROGOWYCH NAWIERZCHNI BETONOWYCH⁶⁾

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono ocenę przydatności destruktu asfaltowego do zastosowania w składzie nawierzchniowej mieszanki betonowej. Omówiono wyniki parametrów 6 destruktyw asfaltowych pozyskanych z nawierzchni komunikacyjnych i oceniono pod względem możliwości zastosowania do mieszanek przeznaczonych na nawierzchnie betonowe. Czynniki zewnętrzne, które w czasie użytkowania oddziaływały na nawierzchnię, mogą wpływać na starzenie spoiwa i powodować zmiany proporcji związków chemicznych w jego budowie wewnętrznej. Z uwagi na powyższe konieczne było analizowanie parametrów kruszywa pochodzącego z recyklingu nawierzchni i mieszanek mineralno-asfaltowych, szczególnie pod kątem tekstury, absorpcji wody, właściwości lepiszcza, a także charakterystyki powierzchni cząstek pokrytych lepiszczem asfaltowym. W artykule zaproponowano ponowne wykorzystanie destruktu asfaltowego pochodzącego z eksploatowanych nawierzchni komunikacyjnych w składzie mieszanek betonowych przeznaczonych do wbudowania w nawierzchnie drogowe. Omówiono wyniki podstawowych parametrów betonów z dodatkiem wytypowanych destruktyw.

SŁOWA KLUCZOWE: destruktu asfaltowy, nawierzchnie betonowe, nawierzchnie drogowe.

ABSTRACT. The article presents an assessment of suitability of reclaimed asphalt pavement (RAP) material for use in cement concrete mixtures dedicated for road structures. The analysis encompassed determination and evaluation of six parameters of RAP material in terms of its usability in concrete pavement construction. Since the external conditions acting on an asphalt pavement during its service life may cause aging of the binder and changes in proportions of its chemical composition, it was necessary to analyze the parameters of the obtained RAP aggregate, with particular focus on texture, water absorption, binder properties and surface characteristics of particles covered with bituminous binder. Reuse of RAP material in cement concrete mixtures dedicated for pavement structures is proposed in the article. Basic parameters of cement concretes containing chosen RAP aggregates were determined and discussed.

DOI: 10.7409/rabdim.023.004

KEYWORDS: concrete pavements, reclaimed asphalt pavement, road pavements.

¹⁾ Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce; matiwanski@tu.kielce.pl

²⁾ Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej; linekm@tu.kielce.pl (✉)

³⁾ Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, al. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa; p.nita@itwl.pl

⁴⁾ Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej; patrycja@piotrowska.me

⁵⁾ University of Žilina, Faculty of Civil Engineering, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina; eva.remisova@uniza.sk

⁶⁾ article co-edited by Prof. Wojciech Bańkowski and Prof. Jorge Pais, from the series of works under the common title: "Use of RAP in Road Engineering" as part of the Ministry of Education and Science project No. RCN/SP/0569/2021/1 artykuł współredagowany przez dr. hab. inż. Wojciecha Bańkowskiego, prof. IBDiM, oraz dr. inż. Jorge Paisa, prof. Uniwersytetu w Minho, z cyklu prac pod wspólnym tytułem „Wykorzystanie destruktu asfaltowego w budownictwie drogowym” w ramach projektu MEiN Nr RCN/SP/0569/2021/1

1. WPROWADZENIE

Trwała nawierzchnia betonowa powinna charakteryzować się zdolnością do przenoszenia założonych obciążeń w przewidzianym czasie eksploatacji [1-4]. Wyznacznikiem trwałości użytkowej takich konstrukcji jest wytrzymałość na zginanie betonu, utożsamiana z wielkością i częstotliwością generowanego wielokrotnego obciążenia nawierzchni. Selekcja materiałów składowych mieszanki betonowej – w tym odpowiednie różnicowanie składu kruszywa – w zależności od warunków agresywnego oddziaływania środowiska zewnętrznego na konstrukcję nawierzchni jest jednym z najważniejszych czynników modelowania trwałej nawierzchni betonowej. Możliwość wykorzystania betonu cementowego do nawierzchni komunikacyjnych i osiągnięcia wydłużonego okresu bezawaryjnej eksploatacji została przedstawiona m.in. w pracach [5-7]. Aspekty materiałowe poruszane były w pracach dotyczących rodzaju kruszyw [8-9], reaktywności alkalicznej kruszyw [10-11], uszkodzeń ziarn kruszywa [12], rodzaju cementu [13-15] czy kompatybilności cementu z domieszkami [16-17]. Aspekty związane z modyfikowaniem składu mieszanki przeznaczonej na nawierzchnie drogowe analizowane były m.in. w pracach [18-21], a możliwość zastosowania innowacyjnych podejść diagnostycznych w [22]. Celem badań doświadczalnych było wstępne określenie parametrów destrukcji i wyekstrahowanego asfaltu oraz określenie ich przydatności do zastosowania w składzie betonu cementowego. W artykule wykazano możliwość zastosowania destruktu asfaltowego jako zamiennika kruszywa w składzie mieszanki betonowej.

2. DESTRUKT ASFALTOWY I JEGO ZASTOSOWANIE

Złoża kruszyw naturalnych stanowią nieodnawialne źródło surowca mineralnego, co przy dynamicznym rozwoju gospodarczym, szczególnie w sektorze budownictwa infrastrukturalnego, wznaga konieczność produkowania kruszyw także z surowców alternatywnych. Do tej grupy można zaliczyć kruszywa sztuczne oraz kruszywa z recyklingu, które cechują się porównywalnymi właściwościami fizyko-mechanicznymi względem kruszyw naturalnych i mogą być stosowane jako ich zamienniki. Dotychczas destruktu asfaltowy według Rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie katalogu odpadów [23] kwalifikował się do odpadów oznaczonych kodem 17 (odpady z budowy, remontów i demontażu obiektów budowlanych oraz infrastruktury drogowej), gdzie wyszczególniono mieszanki bitumiczne (kod 17 03). Zapisy ustawy o odpadach [24], w szczególności rozdział 4, artykuł 10, mówiący o uznaniu przedmiotu lub substancji za produkt uboczny, pozwalają jednak na zakwalifikowanie destruktu asfaltowego

1. INTRODUCTION

A durable concrete pavement should have the capacity to carry the predicted loading in the assumed service period [1-4]. Service life of concrete pavements is determined by flexural strength of concrete, identified as the value and frequency of repeated pavement loads. Selection of components of the concrete mixture – including appropriate adjustments in aggregate composition – depending on the aggression of the environment is one of the most important factors in the design of durable concrete pavements. The possibility of application of cement concrete in road pavements in order to obtain extended service life without pavement distress was described in various works, including [5-7]. Material aspects were discussed in works on aggregate types [8-9], alkali reactivity of aggregates [10-11], aggregate particle damage [12], cement types [13-15] and cement-admixture compatibility [16-17]. Aspects related to adjustments in composition of mixtures dedicated for road pavements were analyzed in [18-21], and the possibility of application of innovative diagnostic approach was discussed in [22]. The aim of the research was to perform preliminary evaluation of the parameters of RAP and bitumen extracted from RAP in terms of their suitability for use in road cement concrete. The investigation indicated that RAP material may be used as replacement of aggregate in concrete mixtures.

2. RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT MATERIAL AND ITS APPLICATIONS

Mineral aggregate deposits are a depletable source of mineral material; taking into account the dynamic economic growth – especially in infrastructural construction – it is necessary to produce aggregates from alternative resources. This group includes artificial and recycled aggregates, which display similar physical-mechanical properties to those of natural aggregates and may be used as their replacement. Until recently, Ordinance of the Minister of Environment on the catalog of waste materials [23] classified RAP as waste designated with code 17 (waste from construction, repairs and demolition of engineering structures and road infrastructure), under which bituminous mixtures were listed (code 17 03). However, the Act on waste materials [24], particularly the provisions of Article 10 on recognition of substance as by-product, enable qualification of RAP material as by-product and not as waste, since all the conditions specified in Article 10 are fulfilled. New regulations provided in [25] specify the conditions to be met if a given material is not to be treated as waste. Reclaimed asphalt material shall not be contaminated with substances other than those typically used in mineral-asphalt

jako produktu ubocznego, nie zaś odpadu, gdyż wszystkie wymienione w artykule 10 przesłanki są spełnione. Nowo wprowadzone przepisy [25] wskazują na warunki, jakie materiał musi spełniać, aby nastąpiła utrata statusu odpadu. Destrukt asfaltowy nie może być zanieczyszczony substancjami innymi niż te, które są stosowane w procesie produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych, musi być przetwarzany w procesach odzysku oznaczonych R5 i R12, a łączna zawartość wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych nie może przekroczyć maksymalnego dopuszczalnego stężenia. Pojawia się również wymóg, aby destrukt asfaltowy spełnił co najmniej wymagania normy PN-EN 13108-8 [26]. Oceny i potwierdzenia spełnienia przez materiał kryteriów ustawowych może dokonać laboratorium posiadające akredytację w tym zakresie lub certyfikowana jednostka badawcza. Destrukt asfaltowy otrzymany w procesie odzysku może zostać wykorzystany do budowy, przebudowy lub remontu dróg, w tym utwardzania placów i poboczy, lub infrastruktury lotniskowej, w tym dróg startowych, dróg kołowania, pasów lotniskowych i płyt postojowych. Kruszywo z recyklingu, które powstaje jako przekruszony materiał z istniejących i eksploatowanych obiektów, charakteryzuje się zróżnicowanym składem, który będzie pochodną stosowanych materiałów i ich wzajemnych proporcji.

Destrukt asfaltowy od dawna jest stosowany w drogownictwie do wytwarzania asfaltowych warstw konstrukcyjnych nawierzchni drogowych. Pod koniec XX wieku zaczęto wykorzystywać ten materiał do produkcji recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych na zimno, w których jako lepiszcze stosowano emulsję asfaltową [27-29]. Natomiast na początku XXI wieku, w wyniku prac badawczych Jenkinsa, jako lepiszcze zastosowano asfalt spieniony wodą [30]. Technologia recyklingu głębokiego na zimno na przestrzeni ostatnich lat bardzo rozpowszechniła się na całym świecie, w tym również i w Polsce [31-33]. Realizowane są zaawansowane badania dotyczące zapewnienia wysokiego poziomu jakościowego asfaltu spienionego wodą w wyniku stosowania różnego rodzaju dodatków i modyfikatorów [34-38]. Recykling głęboki na zimno z asfaltem spienionym pozwala na stosowanie słabszych jakościowo materiałów mineralnych niż technologie, w których wykorzystuje się emulsję asfaltową, przy zapewnieniu jednocześnie wysokich parametrów fizyko-mechanicznych recyklowanej mieszanki mineralno-asfaltowej [39-41]. Zaletą jest możliwość skrócenia okresu pielęgnacji podbudowy wykonanej w tej technologii [32, 40]. Szczególne znaczenie w kontekście szerokiego wykorzystania destrukt asfaltowego w wykonawstwie recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych miało uwzględnienie ich w konstrukcjach nawierzchni przedstawionych w Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych [42]. Wykonane

mixture production; it must be processed under recovery operations R5 and R12; the total content of polycyclic aromatic hydrocarbons may not exceed the maximum allowable concentration. A requirement is also established that RAP material shall conform to the provisions of the PN-EN 13108-8 standard [26]. Fulfilment of the above requirements may be evaluated and confirmed by an accredited laboratory or certified research unit. RAP material obtained in recovery operations may be used in construction, reconstruction or repairs of roads – including mechanical stabilization of trafficked areas and road shoulders – or airfields, including runways, taxiways, and aprons. Recycled aggregate, produced from crushed material reclaimed from existing structures, is characterized by variable composition, resulting from the combination and proportions of the materials used in the source structures.

RAP material has long been used in road construction as a component of bituminous structural layers. Since the late 20th century, RAP has been used in production of cold-recycled asphalt mixtures with bituminous emulsion [27-29]. In the early 21st century, research by Jenkins resulted in the introduction of cold recycling with water-foamed bitumen as well [30]. In the recent years, the deep cold recycling technology has been gaining increasing popularity internationally and in Poland [31-33]. Advanced research works are performed to ensure high quality of foamed bitumen through application of various additives and modifiers [34-38]. Deep cold recycling with foamed bitumen enables usage of mineral materials of lower quality than in the case of technologies based on bituminous emulsion, while maintaining the same high physical and mechanical parameters of the recycled mixture [39-41]. Another advantage of this technology lies in the reduced curing time of the obtained base course [32, 40]. The fact that cold-recycled mixtures were incorporated in selected solutions presented in the Catalog of Typical Flexible and Semi-Rigid Pavement Structures [42] was of particular significance in terms of wide application of RAP material in road pavements. Various research projects have confirmed suitability of RAP for production of recycled asphalt mixtures [43-45]. Necessary criteria include obtaining the quality parameters required in the documents [31, 39]. Research has also indicated that selection of appropriate binder type enables usage of RAP material of variable quality [41, 45, 46]. Another factor of major importance is the selection of hydraulic binders to provide the required mechanical and rheological parameters [47-48].

badania pokazują, że destruktu asfaltowy może być stosowany do produkcji tego rodzaju mieszanki mineralno-asfaltowych [43-45]. Jednym z kryteriów jest uzyskanie wymaganych parametrów jakościowych mieszanki określonych w dokumentach normatywnych [31, 39]. Realizowane badania wskazują również, że zastosowanie odpowiedniego rodzaju lepiszcza umożliwia stosowanie zróżnicowanego pod względem jakościowym destruktu asfaltowego [41, 45, 46]. Szczególne znaczenie ma też odpowiedni dobór zastosowanych spoiw, który zapewnia uzyskanie wymaganych parametrów mechanicznych oraz reologicznych [47-48].

Wdrażanie zasady zrównoważonego rozwoju w gospodarce światowej przyczyniło się do rozpowszechniania technologii stosowania destruktu asfaltowego również w mieszankach mineralno-asfaltowych przeznaczonych na górne warstwy konstrukcji nawierzchni. W warunkach krajowych wymagania ilościowe i jakościowe w tym zakresie reguluje dokument WT-2 2014 wydany przez GDDKiA [49]. Możliwości stosowania granulatu asfaltowego ograniczają się do 20% zawartości w mieszance w metodzie dozowania na zimno i do 30% w dozowaniu na gorąco. Dokument nie dopuszcza stosowania granulatu asfaltowego w warstwach ścieralnych. W kraju i na świecie realizowane są badania, których zadaniem jest opracowanie możliwości zwiększenia ilości stosowanego destruktu [50-54]. W przemyśle krajowym istotnym ograniczeniem dla pełnego wykorzystania tej technologii jest jednak obecnie konieczność posiadania specjalistycznych wytwórni mieszanki mineralno-asfaltowych. Sformułowano też wymagania dotyczące parametrów asfaltu odzyskanego, takie jak penetracja (której wartość średnia nie powinna być mniejsza niż 15 [0,1 mm]) czy średnia wartość temperatury mięknięcia (nie większa niż 70°C) [49]. Kryteria te umożliwiają ocenę przydatności destruktu jako składnika mieszanki mineralno-asfaltowych, służą do ogólnej oceny destruktu, ale nie są kryteriami przydatności w zastosowaniu jako składnika betonu cementowego.

Alternatywnym sposobem wykorzystania przekruszonego materiału może być użycie go w składzie mieszanki betonowych. Pierwsze wzmianki o możliwości wykorzystania takiego rozwiązania pojawiły się już w latach 90. [55] i dotyczyły oceny możliwości zastosowania destruktu asfaltowego oraz jego wpływu na parametry betonu cementowego. Ocenę wpływu zróżnicowania uziarnienia destruktu na parametry betonu przeprowadzono m.in. w pracy [56]. Wpływ na kruche pękanie betonu omówiono w opracowaniu [57], a analizę MES naprężeń płyty betonowej wykonanej z dodatkiem destruktu przedstawiono w pracy [58]. W literaturze poza oceną wpływu destruktu asfaltowego na zmianę podstawowych parametrów mieszanki betonowej [58-61] i betonu [61-63] omawiano również

The principles of sustainable development, which are increasingly important in the world economy, contributed to popularization of technologies enabling usage of RAP also in the upper pavement courses. In Poland the quantitative and qualitative requirements in this regard are governed by the provisions of the WT-2 2014 document issued by the General Directorate for National Roads and Highways [49]. The possibility of usage of RAP are limited to 20% content in mixtures produced in cold-mix technology and 30% content in mixtures produced in hot-mix technology. The document does not permit usage of RAP in wearing courses. Research works have been performed in Poland and internationally with the aim of increasing the acceptable content of RAP in pavement courses [50-54]. Popularity of this technology in Poland is considerably limited by the fact that it requires specialized asphalt mixture plants. Requirements considering the parameters of reclaimed bitumen have also been formulated, encompassing penetration (whose average value shall not be lesser than 15 [0.1 mm]) or the average softening point (no greater than 70°C) [49]. These criteria enable general assessment of RAP material and evaluation of its suitability for use in asphalt mixtures; however, they may not be used as criteria of suitability of RAP for use in cement concrete.

Adding crushed reclaimed material to concrete mixtures may serve as an alternative method of its reuse. Such potential applications were first mentioned in the 90s [55] in works pertaining to the possible use of RAP in cement concrete and its influence. The impact of variability in RAP particle size distribution on the parameters of concrete was assessed in [56]. Influence of RAP on brittle fracture of concrete was discussed in [57]; a FEM analysis of stresses in a concrete slab incorporating RAP was presented in [58]. Apart from the influence of RAP on the basic parameters of concrete mixtures [58-61] and concrete [61-63], the literature also includes analyses of its impact on elastic modulus [64-66] or internal structure of concrete [67]. Extensive research on the subject has also been conducted at the Department of Transportation of the Kielce University of Technology.

3. REQUIREMENTS PERTAINING TO CONCRETE PAVEMENT DURABILITY

Composition of cement concrete dedicated for road pavement construction is based mostly on aggregate, which comprises about 70-75% of its volume. Cement acts as the binding material (hydraulic binder) and it is selected primarily based on the exposure class, i.e. the conditions to

wpływ m.in. na moduł sprężystości betonu [64- 66] czy ocenę struktury wewnętrznej betonu [67]. Szeroko zakrojone prace w tym zakresie prowadzone są również w Katedrze Inżynierii Komunikacyjnej Politechniki Świętokrzyskiej.

3. WYMAGANIA TRWAŁOŚCIOWE DLA BETONOWYCH NAWIERZCHNI DROGOWYCH

Skład betonu cementowego przeznaczonego do budowy nawierzchni drogowych opiera się głównie na kruszywach, stanowiących około 70-75% jego objętości. Materiałem wiążącym (spoiwem) jest cement, który dobierany jest przede wszystkim z uwagi na klasę ekspozycji, czyli warunki w jakich finalny produkt będzie eksploatowany. Oprócz kruszywa oraz spoiwa do produkcji betonu wykorzystywana jest także woda zarobowa oraz dodatki i różnego rodzaju domieszki chemiczne. Norma PN-EN 206+A2 [68] stanowi kompendium z zakresu wymagań, właściwości, a także procesu produkcji oraz oceny zgodności betonu. Wymagania zdefiniowane bezpośrednio dla nawierzchni betonowych zestawiono w normach serii PN-EN 13877 [69-70], a także w specyfikacji technicznej D-05.03.04 [71].

Kruszywa zwykle do produkcji betonu cementowego przeznaczonego na nawierzchnie drogowe powinny spełniać wymagania, które zawarto w normach PN-EN 12620 [72] oraz PN-EN 13043 [73]. Z uwagi na uziarnienie kruszywu przypisuje się kategorię uziarnienia oznaczaną na podstawie procentowego udziału ziaren poszczególnych rozmiarów (według PN-EN 933-1 [74]). Dla kruszyw grubych wymagana kategoria to $G_{C90/15}$, natomiast dla kruszyw drobnych – G_{F85} . Dodatkowym kryterium jest zawartość pyłów, której przypisuje się kategorie w zależności od zawartości ziaren poniżej 0,063 mm. Dla kruszyw grubych kategoria powinna być nie wyższa niż $f_{1,5}$, a dla kruszyw drobnych – f_3 . Konieczne jest również oznaczenie zawartości zanieczyszczeń lekkich (według PN-EN 1744-1 [75]); dla kruszyw grubych procentowa zawartość zanieczyszczeń nie powinna być wyższa niż 0,1%, a dla kruszyw drobnych niż 0,5%. W odniesieniu do kruszyw grubych istotne jest określenie kształtu kruszywa, który opisuje się za pomocą maksymalnej wartości wskaźnika płaskości (kategorie Fl według PN-EN 933-3 [76]) lub maksymalnej wartości wskaźnika kształtu (kategorie Sl według PN-EN 933-4 [77]). Wymagana kategoria zależna jest od kategorii obciążenia ruchem i typu konstrukcji. Dla nawierzchni jednowarstwowych niedyblowanych i niekotwionych oraz nawierzchni dwuwarstwowych i jednowarstwowych dyblowanych i kotwionych dla kategorii ruchu KR 3-4 wymagana kategoria kształtu kruszywa nie może być wyższa niż Fl_{35} lub Sl_{40} . Z kolei w przypadku warstw konstrukcyjnych nawierzchni dyblowanych

which the obtained concrete will be subjected during its service. Apart from aggregate and hydraulic binder, concrete also contains mixing water, additives and admixtures. The PN-EN 206+A2 standard [68] serves as a compendium on requirements, properties, production and conformity assessment of concrete. Requirements established specifically for concrete pavements are given in the standard series PN-EN 13877 [69-70] and in the technical specification D-05.03.04 [71].

Natural aggregates for concrete production should meet the requirements given in PN-EN 12620 [72] and PN-EN 13043 [73]. Aggregate is assigned a grading category based on its particle size distribution (according to PN-EN 933-1 [74]). The required category is $G_{C90/15}$ for coarse aggregates and G_{F85} for fine aggregates. Silt content is an additional criterion, expressed using categories based on the content of grains smaller than 0.063 mm. For coarse aggregates this category should not exceed $f_{1,5}$; for fine aggregates it should not exceed f_3 . It is also necessary to determine the content of light contaminants (according to PN-EN 1744-1 [75]); their contents shall not exceed 0.1% in coarse aggregates and 0.5% in fine aggregates. In the case of coarse aggregates it is important to determine the shape of particles, expressed using the maximum flakiness index (Fl categories according to PN-EN 933-3 [76]) or the maximum shape index (Sl categories according to PN-EN 933-4 [77]). The required category depends on traffic loading and the type of the structure. In the case of single-layer pavements without dowel/tie bars and double-layer/single-layer pavements with dowels and tie bars for traffic categories KR 3-4, the flakiness/shape categories shall not exceed Fl_{35} or Sl_{40} . In the case of structural layers of doweled and tied pavements for traffic categories KR 5-7, the flakiness/shape categories shall not exceed Fl_{20} or Sl_{20} for the aggregate used in the lower pavement courses or Fl_{15} or Sl_{15} for the aggregate used in the upper pavement courses. Coarse aggregates should also display adequate strength and toughness parameters in order to provide road pavement service without failure. These parameters include Los Angeles resistance to fragmentation, polishing resistance, normal freeze-thaw resistance and freeze-thaw resistance in 1% solution of NaCl. The required categories due to pavement structure type and traffic category are given in Table 1.

Taking into account the dangers resulting from the possible chemical reaction between reactive phases of aggregate and alkalis from cement paste, it is also necessary to analyze the alkali reactivity of aggregates. Two test methods are accepted – accelerated and long-term tests – and

i kotwionych obciążonych ruchem kategorii KR 5-7 dla dolnych warstw nawierzchni kategoria kształtu kruszywa nie powinna być wyższa niż Fl_{20} lub Sl_{20} , natomiast górne warstwy nawierzchni powinny zawierać w składzie kruszywo charakteryzujące się maksymalną kategorią Fl_{15} lub Sl_{15} . Kruszywa grube powinny posiadać również odpowiednie parametry wytrzymałościowe, dzięki którym zapewnią bezawaryjną eksploatację nawierzchni drogowych. Należą do nich przede wszystkim odporność kruszywa na rozdrabnianie oznaczana metodą bębna Los Angeles, odporność kruszywa na polerowanie, mrozoodporność zwykła oraz mrozoodporność oznaczana w 1% roztworze NaCl. Wymagane kategorie z uwagi na rodzaj konstrukcji nawierzchni oraz kategorię obciążenia ruchem zestawiono w Tabl. 1.

the evaluation consists in determination of relative elongation of test specimens after 14 days [82] and 365 days [83], respectively. Four alkali reactivity categories are distinguished: R0 – lack of reactivity; R1 – moderate reactivity; R2 – high reactivity; R3 – very high reactivity. Reactivity assessments may be facilitated by microscopic identification of the products of chemical reactions. It is also recommended to analyze the chemical composition of aggregates due to the possible presence of compounds that may have destructive effect on concrete (e.g. sulfate corrosion). The total maximum permissible content of sulfur is 1% (both for coarse and fine aggregates); the maximum content of water-soluble chlorides is 0.02%. Additionally, the maximum permissible category of acid-soluble sulfate content was established as $AS_{0.8}$.

Table 1. The required properties and categories for coarse aggregate used in road pavements according to D-05.03.04

Tablica 1. Wymagane właściwości i kategorie dla kruszywa grubego z przeznaczeniem do nawierzchni drogowych według D-05.03.04

Aggregate property Właściwość kruszywa	Concrete for road pavements / Przeznaczenie betonu do nawierzchni drogowej			
	Undoweled, untied Niedyblowana i niekotwiona	Doweled and tied, reinforced with longitudinal joints, continuously reinforced, combined (concrete/asphalt) pavements Dyblowana i kotwiona, nawierzchnia zbrojona ze szczelinami podłużnymi, nawierzchnia ze zbrojeniem ciągłym, nawierzchnia złożona		
		Layers of the same mixture Warstwy wykonane z tej samej mieszanki	Layers of different mixtures Warstwy wykonane z różnych mieszanek	
	Single-layer pavement Nawierzchnia jednowarstwowa	Top and bottom layer, single-layer pavement, KR 3-4 Górna i dolna warstwa nawierzchni, nawierzchnia jednowarstwowa KR 3-4	Bottom pavement layer KR 5-7 Dolna warstwa nawierzchni KR 5-7	Top pavement layer with exposed aggregate KR 5-7 Górna warstwa nawierzchni z odkrytym kruszywem KR 5-7
Resistance to fragmentation, acc. to PN-EN 1097-2 [72], category no greater than Odporność kruszywa na rozdrabnianie wg PN-EN 1097-2 [72], kategoria nie wyższa niż	LA_{40}	LA_{35}	LA_{35}	LA_{25}
Polished stone value, acc. to PN-EN 1097-8 [73] Odporność kruszywa na polerowanie wg PN-EN 1097-8 [73]	PSV_{declared} $PSV_{\text{deklarowane}}$	PSV_{declared} $PSV_{\text{deklarowane}}$	–	PSV_{50}
Freeze/thaw resistance, acc. to PN-EN 1367-1 [74], category no greater than Mrozoodporność zwykła wg PN-EN 1367-1 [74], kategoria nie wyższa niż	F_2	F_1	–	–
Freeze/thaw resistance in NaCl, acc. to PN-EN 1367-6 [75], category no greater than Mrozoodporność w NaCl wg PN-EN 1367-6 [75], kategoria nie wyższa niż	–	F_{NaCl6}	F_{NaCl6}	F_{NaCl6}

Biorąc pod uwagę zagrożenia wynikające z możliwej reakcji chemicznej pomiędzy reaktywnymi fazami kruszyw mineralnych oraz alkaliami znajdującymi się w zaczynie cementowym, konieczne jest także przeanalizowanie ich reaktywności alkalicznej. Dopuszcza się stosowanie dwóch metod – przyspieszonej oraz długoterminowej – a ocena polega na określeniu procentowego wydłużenia próbek badawczych odpowiednio po 14 dniach [82] lub 365 dniach [83]. Wyróżnia się cztery kategorie reaktywności kruszywa, gdzie R0 oznacza brak reaktywności, R1 – umiarkowaną reaktywność, R2 – silną reaktywność, zaś R3 – bardzo silną reaktywność. W ocenie reaktywności pomocne jest także rozpoznanie produktów reakcji chemicznych z wykorzystaniem metod mikroskopowych. Dodatkowo zaleca się wykonywanie analiz chemicznych składu kruszyw z uwagi na występujące w ich składzie związki mogące mieć destrukcyjny wpływ na beton (między innymi korozja siarczanowa). Dopuszcza się zawartość siarki całkowitej w ilości nie większej niż 1% dla kruszyw grubych i drobnych oraz zawartość chlorków rozpuszczalnych w wodzie w ilości nieprzekraczającej 0,02%. Ponadto określono dopuszczalną kategorię zawartości siarczanów rozpuszczalnych w kwasie jako nie wyższą niż AS_{0,8}

Norma PN-EN 206+A2 [68] przewiduje stosowanie kruszyw grubych z recyklingu o uziarnieniu $d \geq 4$ mm, jednak z pewnymi ograniczeniami w odniesieniu do klas ekspozycji oraz klas wytrzymałości. W Tabl. 2 zestawiono dopuszczalne masy zastąpienia grubych kruszyw naturalnych kruszywami z recyklingu. Wyróżniono dwa typy kruszyw (typ A oraz typ B), których możliwość stosowania zależy od zawartości procentowej (wg masy) poszczególnych składników kruszyw. W odniesieniu do wymagań normy PN-EN 12620 [72] sklasyfikowano składniki kruszyw grubych z recyklingu oraz wyjaśniono poszczególne typy kruszyw wraz z dopuszczalnymi zawartościami dla danych kategorii w Tabl. 3.

4. BADANIA DOŚWIADCZALNE

4.1. BADANIA DOŚWIADCZALNE – ETAP PIERWSZY

Badania doświadczalne zostały podzielone na trzy etapy. Etap pierwszy stanowiła ocena rozpoznawcza pozyskanych sześciu destruktywów asfaltowych, uzupełniona o określenie właściwości lepszca asfaltowego. W etapie drugim zaprojektowano składki mieszanek betonowych z trzema zawartościami procentowymi destruktu asfaltowego wytypowanego w etapie 1. W etapie trzecim określono wpływ zawartości destruktu asfaltowego na zmianę parametrów stwardniałego betonu cementowego.

The PN-EN 206+A2 standard [68] allows the use of coarse recycled aggregates with particle size of $d \geq 4$ mm; there are, however, certain limitations regarding the exposure and strength classes of the concrete. Table 2 presents the permissible percentage of replacement of natural aggregate with recycled aggregate. Two types of recycled aggregate are distinguished (type A and B), which may be used depending on the proportions (by mass) of individual aggregate components. Referring to the provisions of the PN-EN 12620 standard [72], components of coarse recycled aggregates were classified and aggregate types were listed in Table 3 in combination with their permissible content.

Table 2. Maximum replacement of aggregate (% by mass) according to PN-EN 206-1 [62]

Tablica 2. Maksymalny procent (m/m) zastąpienia kruszyw według PN-EN 206-1 [62]

Recycled aggregate type Typ kruszywa z recyklingu	Exposure class / Klasy ekspozycji			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1	All other exposure classes ^{*)} Wszystkie pozostałe klasy ekspozycji ^{*)}
Type A / Typ A: Rc ₉₀ , Rcu ₉₅ , Rb ₁₀₋ , Ra ₁₋ , FL ₂₋ , XRg ₁₋	50	30	30	0
Type B ^{**) / Typ B^{**) : Rc₅₀, Rcu₇₀, Rb₃₀₋, Ra₅₋, FL₂₋, XRg₂₋}}	50	20	0	0

^{*)} Recycled aggregates of the type A of known origin may be used at exposure classes for which the original concrete was designed, at the maximum aggregate replacement level of 30%.
Kruszywa z recyklingu typu A znanego pochodzenia można stosować przy klasach ekspozycji, na które zaprojektowano beton pierwotny, przy maksymalnym procencie zastąpienia wynoszącym 30%

^{**)} It is not recommended to use type B recycled aggregates in concretes of compressive strength classes > C30/37
Nie zaleca się stosowania kruszyw z recyklingu typu B do betonu klas wytrzymałości na ściskanie > C30/37

4. EXPERIMENTAL RESEARCH

4.1. EXPERIMENTAL RESEARCH – FIRST STAGE

The experimental research was divided into three stages, with the first stage consisting in preliminary evaluation of the obtained six RAP materials and determination of the properties of the extracted bitumen. The second stage encompassed the design of concrete mixtures with three different percentages of one RAP material selected in the

Table 3. Classification of components of recycled coarse aggregates according to PN-EN 12620 [66] combined with recommendations from PN-EN 206 [62]

Tablica 3. Klasyfikacja składników kruszyw grubych z recyklingu według PN-EN 12620 [66] w odniesieniu do zaleceń PN-EN 206 [62]

first stage. The third stage consisted in identification of the influence of RAP content on the parameters of hardened concrete.

Type of recycled aggregate Typ kruszywa z recyklingu	Component Składnik	Description Opis	Content [% by mass] Zawartość [% (m/m)]	Category Kategoria
A	Rc	Concrete, concrete products, mortar, concrete bricks Beton, wyroby betonowe, zaprawa, betonowe elementy murowe	≥ 90	Rc ₉₀
B			≥ 50	Rc ₅₀
A	Rcu (Rc+Ru)	Concrete, concrete products, mortar, concrete bricks. Unbound aggregate, natural stone, hydraulically-bound aggregate Beton, wyroby betonowe, zaprawa, betonowe elementy murowe. Kruszywo niezwiązane, kamień naturalny, kruszywo związane hydraulicznie	≥ 95	Rcu ₉₅
B			≥ 70	Rcu ₇₀
A	Rb	Ceramic construction products (bricks and shingles), silicate construction products, air-entrained non-buoyant concrete Ceramiczne elementy murowe (tj. cegły i dachówki), silikatowe elementy murowe, beton napowietrzony niepływający w wodzie	≤ 10	Rb ₁₀₋
B			≤ 30	Rb ₃₀₋
A	Ra	Bituminous materials Materiały bitumiczne	≤ 1	Ra ₁₋
B			≤ 5	Ra ₅₋
A	FL	Water-buoyant material, by volume Materiał pływający w wodzie, objętościowo	≤ 0.2 ^{*)} (≤ 2 cm ³ /kg)	FL ₂₋
B			≤ 0.2 a (2 cm ³ /kg)	FL ₂₋
A	Xrg (X+Rg)	Other: cohesive (clay, soil), various metals (ferrous and non-ferrous), non-buoyant wood, plastic, rubber, gypsum plaster. Glass. Inne: spoiste (np. glina, grunt), metale różne (żelazne i nieżelazne), niepływające w wodzie drewno, plastik i guma, tynk gipsowy. Szkło.	≤ 1	Xrg ₁₋
B			≤ 2	Xrg ₂₋

^{*)} The ≤ 0.2 category is dedicated for special applications, requiring high quality of surface finish
Kategoria ≤ 0,2 przeznaczona jest tylko do specjalnych zastosowań, wymagających wysokiej jakości wykończenia powierzchni

W ramach badań laboratoryjnych określono wybrane właściwości 6 destruktyw asfaltowych, zestawione szczegółowo w Tabl. 4. Destrukty przeznaczone do badań pozyskane były w sposób selektywny, pochodziły z różnych odcinków dróg, każdorazowo z warstw wiążących, w których wykorzystywany był beton asfaltowy. Pierwszym krokiem badawczym była ocena właściwości destruktu i jego przydatności wg wytycznych normy PN-EN 13108-8 [84].

Destrukt asfaltowy został oceniony pod względem składu ziarnowego, a następnie poddano go procesowi ekstrakcji według normy PN-EN 12697-1 [92]. Po procesie ekstrakcji odzyskano lepniejsze asfaltowe metodą wyparki obrotowej według PN-EN 12697-3 [93], co umożliwiło wykonanie badań asfaltu. Na tym etapie wykorzystano wytyczne oceny zgodności według Wytycznych Technicznych WT-2 2014 [49], a odzyskany asfalt podlegał ocenie penetracji w 25°C oraz temperatury

Laboratory testing encompassed determination of chosen properties of 6 different reclaimed asphalt pavement materials. The results are given in Table 4. The RAP materials were obtained in a selective manner; they originated from various road sections, but exclusively from AC binder courses. The properties and suitability of RAP material was evaluated according to the guidelines of PN-EN 13108-8 [84].

After determination of its particle size distribution, RAP was subjected to extraction in accordance with PN-EN 12697-1 [92]. Bituminous binder was recovered using rotary evaporator in accordance with PN-EN 12697-3 [93], which enabled its further testing. Assessment was based on the guidelines given in the document WT-2 2014 [49]; the recovered bitumen was evaluated based on penetration at 25°C and softening point. Elastic recovery was also

temperatury mięknięcia. Oznaczono także nawrót sprężysty – parametr charakteryzujący lepizzcze z uwagi na jego modyfikację. Dla 6 destruktyw asfaltowych maksymalny wymiar U wynosił 22,4 mm i nie stwierdzono w nich materiałów obcych z grupy 1 i 2, co pozwoliło na zakwalifikowanie ich do kategorii $FM_{1/0,1}$. Uziarnienie badanych destruktyw asfaltowych przedstawiono w Tabl. 5.

determined to characterize the binder in terms of its modification. The maximum dimension U for the 6 RAP materials equaled 22.4 mm and presence of foreign matter from groups 1 and 2 was not observed; therefore, the RAP materials were classified as category $FM_{1/0,1}$. Particle size distribution of the tested RAP is presented in Table 5.

Table 4. Scope of laboratory tests performed on the evaluated RAP materials
Tablica 4. Zakres badań laboratoryjnych ocenianych destruktyw asfaltowych

Evaluated material Oceniany materiał	Laboratory test Badania laboratoryjne	Test procedure Procedura badawcza	RAP designation / Oznaczenie destruktu					
			DA-1	DA-2	DA-3	DA-4	DA-5	DA-6
RAP Destrukt	Particle size distribution Skład ziarnowy	PN-EN 12697-2 [79]	+	+	+	+	+	+
	Amount of foreign matter Zawartość materiałów obcych	PN-EN 12697-42:2021-06 [80]	+	+	+	+	+	+
	Density Gęstość	PN-EN 12697-5 [81]	+	+	+	+	+	+
Bituminous binder Lepizzcze asfaltowe	Penetration at 25°C Penetracja asfaltu w 25°C	PN-EN 1426:2015-08 [82]	+	+	+	+	+	+
	Softening point Temperatura mięknięcia	PN-EN 1427:2015-08 [83]	+	+	+	+	+	+
	Elastic recovery Nawrót sprężysty	PN-EN 13398 [84]	+	+	+	+	+	+
	Tensile force Siła rozciągania	PN-EN 13589 [85]	+	+	+	+	+	+

Gęstość destruktu asfaltowego każdorazowo oznaczona była na dwóch seriach próbek, a ostateczną wartość stanowiła średnia arytmetyczna z obu oznaczeń. Na podstawie uzyskanych wyników (Tabl. 6) stwierdzono, że najwyższą gęstością (na poziomie $2,556 \text{ Mg/m}^3$) charakteryzował się destruktu asfaltowy DA-2, a najniższą ($2,523 \text{ Mg/m}^3$) destruktu asfaltowy DA-5.

Table 6. Mean density of the analyzed RAP materials
Tablica 6. Średnia gęstość badanych destruktyw asfaltowych

Test Badanie	RAP designation / Oznaczenie destruktu					
	DA-1	DA-2	DA-3	DA-4	DA-5	DA-6
Mean density [Mg/m^3] Średnia gęstość	2.549	2.556	2.537	2.552	2.523	2.554

Na podstawie badań lepizcza odzyskanego (Tabl. 7 i 8) stwierdzono, że lepizzcze z destruktu asfaltowego 1 jest twardsze od asfaltów z pozostałych destruktyw z uwagi na najniższy wynik penetracji oraz najwyższą temperaturę mięknięcia. W zakresie nawrotu sprężystego uzyskano wyniki poniżej

Table 5. Grading of the tested RAP materials
Tablica 5. Uziarnienie badanych destruktyw asfaltowych

Sieve Sito # [mm]	Grading of the tested RAP materials [%] Udział uziarnienia w badanych destruktach asfaltowych					
	DA-1	DA-2	DA-3	DA-4	DA-5	DA-6
22.4	100	100	100	100	100	100
16	98	89	93	97	98	91
8	83	63	76	81	70	78
2	48	37	38	45	47	41
1	36	19	25	28	26	32
0.063	13	9	12	10	8	11

Density of RAP was determined on two series of specimens, with the final value for each RAP type calculated as arithmetic mean from both measurements. Based on the obtained results (Table 6), the highest density (2.556 Mg/m^3) was observed for RAP material labeled as DA-2 and the lowest (2.523 Mg/m^3) for RAP material DA-5.

50%, co jest minimalną wartością oczekiwaną dla polimeroasfaltów. Natomiast wyniki na poziomie 20-30% mogą świadczyć, iż w pierwotnych mieszankach zastosowano asfalt modyfikowany polimerem lub inny sposób modyfikacji.

Na podstawie uzyskanych wyników badań destruktyw i wyekstrahowanego asfaltu zarekomendowano do składu mieszanki betonowej destrukta asfaltowy DA-1. Jako kryterium doboru na tym etapie badań przyjęto twardość lepiszcza. Wybrano destrukta o największej twardości asfaltu, tak aby zmniejszyć różnicę w sztywności między destruktem asfaltowym a mieszanką betonową i zmniejszyć zróżnicowanie poziomu odkształceń skurczowych w kompozycie betonowym. Odkształcenia tego typu, szczególnie we wczesnym etapie dojrzewania betonu, mogą skutkować zmianą trwałości eksploatacyjnej konstrukcji nawierzchni.

Table 7. Binder content in the analyzed RAP materials
Tablica 7. Zawartość lepiszcza w badanych destruktach asfaltowych

Test Badanie	RAP designation / Oznaczenie destruktu					
	DA-1	DA-2	DA-3	DA-4	DA-5	DA-6
Binder content [%] Zawartość lepiszcza	4.9	4.5	5.1	4.6	4.4	5.0

4.2. BADANIA DOŚWIADCZALNE – ETAP DRUGI

W składzie mieszanki betonowej przeznaczonej na nawierzchnie drogowe (bazowej) zastosowano kruszywo grube – grys bazaltowy, cement portlandzki czystoklinkierowy, piasek naturalny, wodę oraz domieszkę napowietrzającą i uplastyczniającą. Zakres przyjętych założeń obejmował klasę ekspozycji projektowanego betonu na poziomie XF4 (silne nasycenie wodą ze środkami odladzającymi lub wodą morską) i XM2 (silne zagrożenie ścieraniem). Założono klasę betonu C30/37 oraz zawartość cementu w ilości 370 kg/m³.

W celu oceny wpływu zawartości destruktu asfaltowego na zmianę parametrów betonu opracowano dwie mieszanki, w których uwzględniono zmniejszenie ilości kruszywa naturalnego i zastąpienie go destruktem asfaltowym. W mieszance B1 destrukta asfaltowy zastąpił 20% kruszywa, a w mieszance B2 – 40% kruszywa. Składy zaprojektowanych mieszanek zestawiono w Tabl. 9.

Dla zaprojektowanych mieszanek określono podstawowe parametry dotyczące zawartości powietrza w świeżej mieszance wg PN-EN 12350-7 [94], gęstości objętościowej wg PN-EN 12350-6 [95] i klasy konsystencji wg PN-EN 12350-2 [96] – wyniki zestawiono w Tabl. 10.

Based on the tests performed on recovered binders (Tables 7 and 8) it was noted that binder from RAP DA-1 was harder than the remaining binders, as indicated by the lowest penetration and the highest softening point. The measured elastic recovery values were less than 50%, which is the minimum value expected of polymer-modified bitumen. However, the results of 20-30% may indicate that binders in the original mixtures were modified with polymers or other agents.

Upon analysis of the values obtained for RAP and extracted bitumen, RAP labeled as DA-1 was recommended for use in the designed concrete mixture. Hardness of the binder was the criterion that prevailed at this stage of the research. RAP material containing the hardest binder was chosen in order to minimize the difference in stiffness between RAP and cement mixture and, consequently, reduce uneven shrinkage strain within the concrete composite. Such strains, especially at the early stages of curing, may cause a reduction in the service life of the pavement structure.

Table 8. Chosen properties of binders reclaimed from the analyzed RAP

Tablica 8. Wybrane cechy odzyskanego lepiszcza w badanych destruktach asfaltowych

Property Cecha	RAP designation Oznaczenie destruktu					
	DA-1	DA-2	DA-3	DA-4	DA-5	DA-6
Penetration at 25°C [0.1 mm] Penetracja w 25°C	30	45	40	48	35	39
Softening point [°C] Temperatura mięknięcia	64.7	58.9	60.2	56.4	61.8	59.7
Elastic recovery [%] Nawrót sprężysty	8	16	22	13	34	31

4.2. EXPERIMENTAL RESEARCH – SECOND STAGE

The reference concrete mixture used in the research contained coarse aggregate (basalt gravel), CEM I Portland cement, natural sand, water, air-entraining admixture and plasticizer. The adopted assumptions encompassed exposure classes of the designed concrete at the level XF4 (high water saturation with de-icing agent or seawater) and XM2 (high risk of wear). Concrete class C30/37 and cement content of 370 kg/m³ were adopted.

In order to evaluate the influence of RAP content on concrete properties, two additional mixtures were designed, each with different level of replacement of natural aggregate with RAP – 20% and 40% of aggregate was replaced

Table 9. Composition of the concrete mixtures
Tablica 9. Składy mieszanek betonowych

with RAP in mixtures B1 and B2, respectively. The designed mixture compositions are presented in Table 9.

Component / Składnik	Mass of components in 1 m ³ of mixture / Masa składników w 1 m ³ mieszanki [kg/m ³]		
	B0	B1	B2
Cement CEM I 42.5 N	370	370	370
Mixing water / Woda zarobowa	148	148	148
Natural sand 0/2 / Piasek naturalny 0/2	598	598	598
Basalt aggregate 2/8 / Kruszywo bazaltowe 2/8	864	691	518
Basalt aggregate 8/16 / Kruszywo bazaltowe 8/16	753	603	452
RAP material (DA-1) / Destrukt asfaltowy (DA-1)	0	324	647
Air-entraining admixture / Domieszka napowietrzająca	1.7	1.7	1.7
Plasticizer / Domieszka uplastyczniająca	2.6	2.6	2.6

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że zastosowanie destruktu asfaltowego wpływa na obniżenie zawartości powietrza w mieszance betonowej, jednakże parametr ten nie spadł poniżej wartości granicznej (4,5%). Zaobserwowany wzrost gęstości mieszanek z destruktem asfaltowym wiąże się ze zmniejszoną zawartością powietrza w tych mieszankach. Nie stwierdzono istotnego wpływu dodatku destruktu na zmianę klasy konsystencji mieszanek. Wszystkie mieszanki sklasyfikowano w klasie S1.

4.3. BADANIA DOŚWIADCZALNE – ETAP TRZECI

W celu określenia przydatności zastosowanego destruktu do wykorzystania w betonie nawierzchniowym wykonano badania, które zestawiono w Tabl. 11. Za poziom istotności testów statystycznych w niniejszym projekcie uznano 0,05. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem ilości destruktu asfaltowego w składzie betonu spada średnia wytrzymałość betonu na ściskanie. W przypadku betonów z zawartością destruktu asfaltowego 20% nie stwierdzono istotnego wpływu na badaną cechę. Beton ten charakteryzował się wytrzymałością niższą o 6% w stosunku do betonu kontrolnego. Beton z zawartością destruktu 40% charakteryzowało obniżenie średniej wytrzymałości o około 15% (Rys. 1). Beton z zawartością destruktu asfaltowego 20% spełnia wymagania stawiane nawierzchniom betonowym o klasie wytrzymałości minimum C30/37. Beton cementowy z dodatkiem destruktu asfaltowego w ilości 20% spełnia wymagania dla kategorii obciążenia ruchem KR5-7, a beton z zawartością 40% destruktu asfaltowego dla nawierzchni obciążonych ruchem KR1-4. Wytrzymałość betonu na zginanie spada wraz ze wzrostem ilości granulatu w mieszance betonowej. Wartość tego parametru w stosunku do betonu kontrolnego była niższa o odpowiednio 32% i 39% dla mieszanek z 20% i 40% granulatu asfaltowego.

The basic parameters determined for the designed mixtures – air content in fresh concrete according to PN-EN 12350-7 [94], density according to PN-EN 12350-6 [95] and consistency class according to PN-EN 12350-2 [96] – are given in Table 10.

Table 10. Basic parameters of the concrete mixtures
Tablica 10. Podstawowe parametry mieszanek betonowych

Parameters Parametry	Concrete mixtures designation Oznaczenie mieszanek betonowych		
	B0	B1	B2
Air content [%] Zawartość powietrza	5.5	4.9	4.7
Density [kg/m ³] Gęstość objętościowa	2490	2502	2512

4.3. EXPERIMENTAL RESEARCH – THIRD STAGE

In order to investigate suitability of the RAP material for usage in road pavement concrete, tests listed in Table 11 were performed. The statistical significance level of 0.05 was adopted in this project. It was observed that the mean compressive strength of concrete decreased with an increase in RAP content. In the case of concrete with 20% of aggregate replaced with RAP, the influence of RAP on strength was not considered significant. The strength of the concrete was lower by 6% than that of the reference concrete. Concrete with 40% of RAP displayed compressive strength lower by 15% (Fig. 1). Concrete with 20% of RAP meets the requirements pertaining to concrete pavements with minimum strength class C30/37. Cement concrete with 20% of RAP meets the requirements for traffic categories KR5-7, and concrete with 40% of RAP meets the requirements for traffic categories KR1-4. Flexural strength of concrete decreased with an increase in RAP

Table 11. Listing of tests performed on the paving cement concrete
 Tablica 11. Zestawienie badań betonu cementowego przeznaczonego do nawierzchni

content in the mixture. In comparison with the reference concrete, concretes with 20% and 40% of RAP displayed flexural strength lower by 32% and 39%, respectively.

Concrete parameters Parametry betonu	Test procedure Procedura badawcza	Concrete mixtures designation Oznaczenie mieszanek betonowych		
		B0	B1	B2
Compressive strength / Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	PN-EN 12390-3 [94]	+	+	+
Flexural strength / Wytrzymałość na zginanie [MPa]	PN-EN 12390-5 [95]	+	+	+
Water absorption / Nasiąkliwość [%]	PN-88/B-06250 [96]	+	+	+
Density / Gęstość objętościowa [kg/m ³]	PN-EN 12390-1 [97]	+	+	+
Pull-out resistance / Odporność na odrywanie [MPa]	PN-EN 12504-3 [98]	+	+	+
Freeze/thaw resistance / Mrozoodporność	PN-88/B-06250 [96]	+	+	+

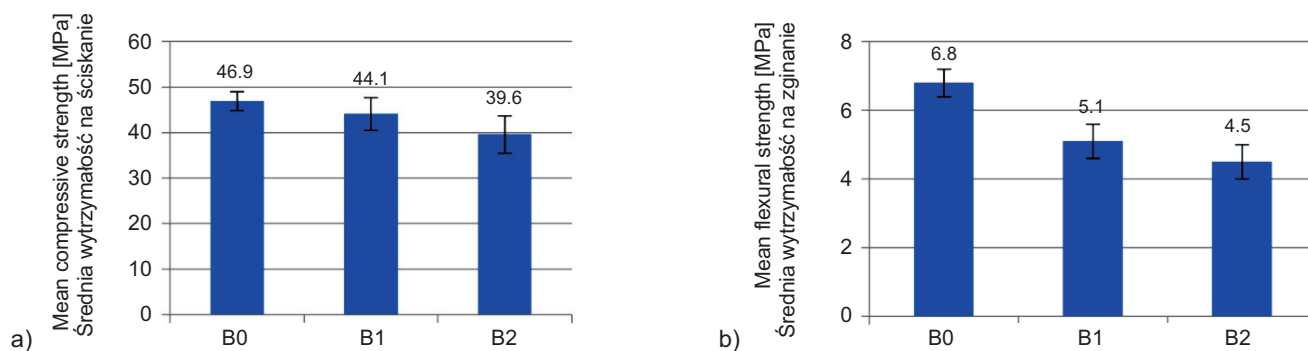


Fig. 1. Mean values obtained for concretes B0, B1 and B2: a) compressive strength, b) flexural strength after 28 days of standard curing

Rys. 1. Średnie wartości uzyskane dla betonów serii B0, B1 i B2 w zakresie: a) wytrzymałości na ściskanie, b) wytrzymałości na zginanie po 28 dniach pielęgnacji normowej

W ujęciu oceny trwałości betonu z destruktem asfaltowym określono jego odporność na odrywanie z wykorzystaniem metody pull-out. Uzyskane wyniki pozwoliły sformułować wniosek o istotnym wpływie dodatku destruktu asfaltowego w betonie ($p = 0,006$) na jego odporność na odrywanie – Rys. 2. Ponadto na etapie oceny wpływu dodatku destruktu na zmianę mrozoodporności betonu stwierdzono istotny wpływ na badany parametr ($p = 0,032$) w przypadku zmiany średniej wytrzymałości na ściskanie i nieistotny ($p = 0,145$) w przypadku średniego ubytku masy – Rys. 3. Nie wykazano istotnego wpływu dodatku destruktu na zmianę średniej gęstości objętościowej ($p = 0,331$) i nasiąkliwości betonu ($p = 0,568$) – Rys. 4. Ocena przydatności zastosowania destruktu asfaltowego do nawierzchni betonowych określono w zależności od wytycznych i przedstawiono w Tabl. 12.

In order to further analyze the concrete incorporating RAP, pull-out force of hardened concrete was determined. The results indicated that the influence of RAP on the parameter was significant ($p = 0.006$) – Fig. 2. In the context of water/frost resistance testing, significant influence of RAP content was noted for the change in the mean compressive strength ($p = 0.032$); it was insignificant ($p = 0.145$) for the mean loss of mass – Fig. 3. No significant influence of RAP content was observed for the mean density ($p = 0.331$) or water absorption ($p = 0.568$) – Fig. 4. Evaluation of suitability of RAP for use in concrete pavements was performed in accordance with the guidelines; it is presented in Table 12.

Table 12. Evaluation based on the criteria for pavement concrete

Tablica 12. Ocena spełnienia kryteriów (OSK) betonu nawierzchniowego

Property Cecha	Criterion Kryterium	Concrete / Beton B0		Concrete / Beton B1		Concrete / Beton B2	
		Obtained value Uzyskana wartość	Eval. OSK	Obtained value Uzyskana wartość	Eval. OSK	Obtained value Uzyskana wartość	Eval. OSK
Designed mixture / Projektowana mieszanka							
Air content [%] Zawartość powietrza [%]	> 4.0	5.5	+	4.9	+	4.7	+
Designed concrete / Projektowany beton							
Strength class Klasa wytrzymałości betonu	At least C30/37 Co najmniej C30/37	C35/45	+	C35/45	+	C30/37	+
Flexural strength [MPa] Wytrzymałość na zginanie	At least 4.5 Co najmniej 4,5	6.8	+	5.1	+	4.5	+
Freeze/thaw resistance Mrozoodporność	Loss of mass [%] Ubytek masy	0.04	+	0.14	+	0.16	+
	Loss of strength [%] Ubytek wytrzymałości	2.1	+	2.4	+	3.1	+
Water absorption [%] Nasiąkliwość	Less then 5 Poniżej 5	3.1	+	3.3	+	3.4	+

The adopted abbreviations: Eval. – evaluation of the given criterion; “+” - the criterion has been fulfilled; “-” - the criterion has not been fulfilled (in performed analysis there was no such case)

Przyjęte oznaczenia skrótowe: OSK – ocena spełnienia kryterium; znak „+” - spełnienie kryterium, znak „-” - kryterium nie zostało spełnione (w przeprowadzonej analizie nie było takiego przypadku)

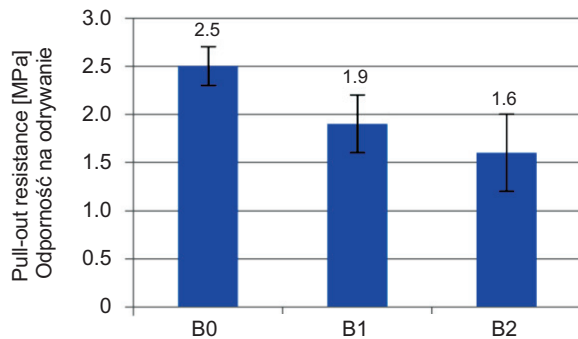


Fig. 2. Mean values of pull-out resistance obtained for concretes B0, B1 and B2 after 28 days of standard curing
Rys. 2. Średnie wartości uzyskane dla betonów serii B0, B1 i B2 w zakresie odporności na odrywanie, po 28 dniach pielęgnacji normalnej

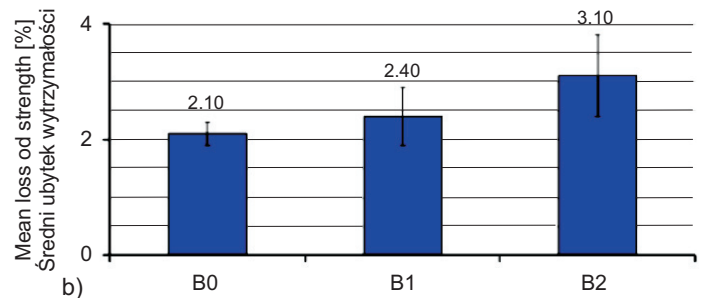
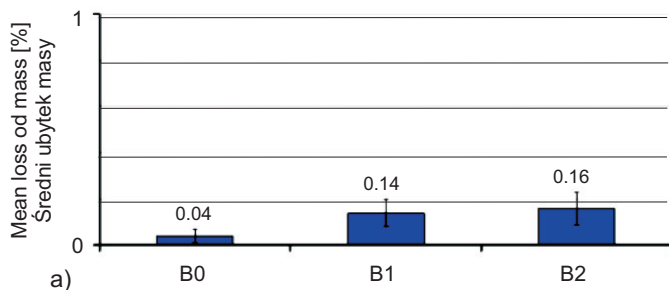


Fig. 3. Mean values obtained for concretes B0, B1 and B2: a) loss of mass, b) loss of compressive strength after 200 freeze-thaw cycles

Rys. 3. Średnie wartości uzyskane dla betonów serii B0, B1 i B2 w zakresie: a) ubytku masy, b) ubytku wytrzymałości na ściskanie po 200 cyklach badania mrozoodporności

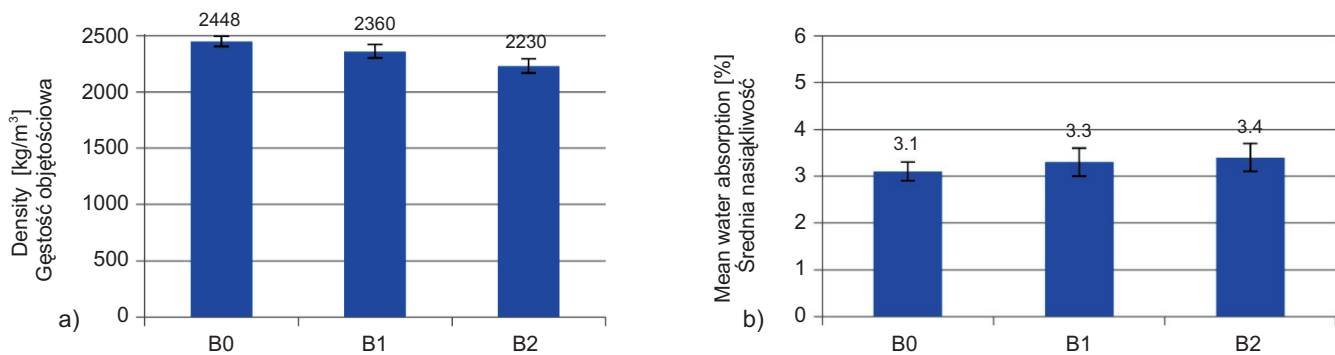


Fig. 4. Mean values obtained for concretes B0, B1 and B2: a) density, b) water absorption after 28 days of curing

Rys. 4. Średnie wartości uzyskane dla betonów serii B0, B1 i B2 w zakresie: a) gęstości objętościowej, b) nasiąkliwości po 28 dniach dojrzewania

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że oceniane w pierwszym etapie badań destrukty asfaltowe spełniają wymagania i mogą zostać zastosowane w składzie betonu nawierzchniowego. Wytypowany do badań szczegółowych destrukty asfaltowe DA-1 przyczynia się do zmniejszenia klasy betonu w przypadku zastosowania go jako zamiennika kruszywa w ilości 40%, jednakże nie wyklucza to zastosowania tego materiału w składzie mieszanki przeznaczonej na nawierzchnie komunikacyjne. Istotnym czynnikiem jest natomiast uzyskanie średniej wytrzymałości na zginanie w granicach dolnego przedziału dopuszczalnego, co z uwagi na rolę tego parametru wymaga dalszych badań, szczególnie w zakresie możliwości wpływu różnorodności cech destruktyw. Zaobserwowany wzrost nasiąkliwości betonu przekłada się na obniżenie mrozoodporności betonu, jednak uzyskane wartości mieszczą się w granicach rekomendowanych. Beton z dodatkiem destrukty asfaltowego w ilości 20% i 40% może być stosowany w przypadku nawierzchni komunikacyjnych, jednakże zastosowanie go w konstrukcjach obciążonych znacznym ruchem powinno być poprzedzone oceną wpływu tego dodatku na zmiany w budowie wewnętrznej kompozytu betonowego oraz oceną zmian parametrów w wydłużonym czasie i przy oddziaływaniu czynników chemicznych, np. mediów eksploatacyjnych czy środków wykorzystywanych w procesie zimowego utrzymania dróg.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Glinicki M.A.*: Inżynieria betonowych nawierzchni drogowych. PWN, Warszawa, 2019
- [2] *Nita P.*: Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych. WKiŁ, Warszawa, 2008
- [3] *Nita P., Linek M., Wesolowski M.*: Betonowe i specjalne nawierzchnie lotniskowe. Teoria i wymiarowanie konstrukcyjne. ITWL, Warszawa, 2021

5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The obtained results indicated that the six RAP materials evaluated in the first stage met the requirements for use in pavement concrete. Use of the DA-1 material that was chosen for detailed testing resulted in a decrease in concrete class when it was used as 40% replacement of aggregate. However, this fact does not exclude the material from applications in concrete dedicated for road pavements. It is important to obtain mean flexural strength of concrete within the allowable lower range, which requires further research, especially in terms of the impact of variability in RAP properties. The observed increase in water absorption results in reduced freeze/thaw resistance of concrete; however, the obtained values still lie within the recommended limits. Concrete in which aggregate is replaced with RAP at the levels of 20% and 40% may be used in pavement structures, but its use on roads subjected to considerable traffic should be preceded with assessment of the influence of RAP on the internal structure of concrete composite and evaluation of long-term changes in concrete parameters, taking into account the impact of chemical factors, such as maintenance and de-icing agents.

- [4] *Szydło A.*: Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego. Teoria, wymiarowanie, realizacja, PC, Kraków, 2004
- [5] *Delatte, N.J.*: Concrete pavement design, Construction and performance. CRC Press, London, 2017, DOI: 10.1201/9781482288483, <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781482288483/concrete-pavement-design-construction-performance-norbert-delatte> (20.03.2023)

- [6] *Solonenko I.*: The use of cement concrete pavements for roads, depending on climatic conditions. *Tehnicki Glasnik*, **13**, 3, 2019, 235-240, DOI: 0.31803/tg-20190518181647
- [7] *Watts B., Graczyk M., Gáspár L., Wistuba M., Pospisil K., Górski M., Bueche N., de Larrad F.*: Making Best Use of Long-Life Pavements in Europe Phase 3: A Guide to the use of Long-Life Rigid Pavements, 2019, https://www.researchgate.net/publication/331224543_Making_Best_Use_of_Long-Life_Pavements_in_Europe_Phase_3_A_Guide_to_the_use_of_Long-Life_Rigid_Pavements (21.03.2023)
- [8] *Linek M., Nita P., Żebrowski W., Wolka P.*: Assessment of granite, quartz and syenite aggregate suitability intended for the application in case of transport pavement concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **471**, 2019, ID article: 032076, DOI: 10.1088/1757-899X/471/3/032076.
- [9] *Linek M., Nita P., Wolka P., Żebrowski W.*: Usefulness of porphyry and amphibolites as a component of concrete for airfield pavements. *MATEC Web of Conferences*, **163**, 2018, ID article: 07002, DOI: 10.1051/mateconf/201816307002.
- [10] *Babińska J., Bobrowicz J.*: Durability of concrete in the context of alkaline reactivity of aggregates, 9th Conference Dni Betonu, Wisła, Poland, 2016, 539-552
- [11] *Jóźwiak-Niedźwiedzka D., Antolik A., Dziejic K., Gliński M.A., Gibas K.*: Resistance of selected aggregates from igneous rocks to alkali-silica reaction: verification. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **18**, 1, 2019, 67-83, DOI: 10.7409/rabdim.019.005
- [12] *Gruszczyński M.*: Damage to concrete surfaces caused by defective aggregate quality, 8th Conference Dni Betonu, Wisła, Poland, 2014, 39-50
- [13] *Giergiczyński Z., Pużak T., Sokołowski M.*: Selection of cement for particular exposition classes described in standard PN-EN 206-1 Concrete. Part 1: requirements, properties, production and conformity, 1-13, https://www.dnibetonu.com/wp-content/pdfs/2004/giergiczyzny_puzak_sokolowski.pdf (21.03.2023)
- [14] *Kurdowski W.*: Cement and Concrete Chemistry. Polish Cement Association, Cracow, 2010
- [15] *Rudnicki T.*: The influence of the type of cement on the properties of surface cement concrete. *Materials*, **15**, 14, 2022, ID article: 4998, DOI: 10.3390/ma15144998
- [16] *Gołaszewski J.*: Cooperation of cements with admixtures. 15. Konferencja „Reologia w Technologii Betonu”, Gliwice, 2013, 73-88, <https://spchb.pl/download/files/1442.pdf> (21.03.2023)
- [17] *Jasieczak J., Mikołajczak P.*: Technology of concrete modified with admixtures and additives. *Proceedings of Poznan University of Technology*, 2003
- [18] *Amirov T., Aripov X., Qurbonov B., Tuxtayev M., Rakhmatov S.*: Designing the composition of Road concrete with chemical additives. *E3S Web of Conferences*, **264**, 2021, ID article: 02049, DOI: 10.1051/e3sconf/202126402049
- [19] *Botsman L.N., Ageeva M.S., Botsman A.N., Shapovalov S.M.*: Modified pavement cement concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **327**, 2018, ID article: 032011, DOI: 10.1088/1757-899X/327/3/032011
- [20] *Linek M.*: Airport cement concrete with ceramic dust of increased thermal resistance. *Materials*, **15**, 10, 2022, ID article: 3673, DOI: 10.3390/ma15103673
- [21] *Mishutin A.V., Zavaloka M.V., Kintia L.*: Management of cement-concrete road pavement structure. *Journal of Engineering Science, Architecture, Civil and Environmental Engineering, Architecture, Urbanism and Cadaster*, **26**, 1, 2019, 91-95, DOI: 10.5281/zenodo.2649980
- [22] *Linek M., Nita P.*: Neural networks in diagnostics of concrete airfield pavements. *Road and Bridges - Drogi i Mosty*, **21**, 1, 2022, 81-97, DOI: 10.7409/rabdim.022.005
- [23] Dziennik Ustaw poz. 1923 Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów
- [24] Dziennik Ustaw 2013 poz. 21, USTAWA z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach
- [25] Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 8 listopada 2021 r. w sprawie określenia szczegółowych kryteriów stosowania warunków utraty statusu odpadów dla odpadów destruktu asfaltowego
- [26] PN-EN 13108-8: 2016-07 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Wymagania – Część 8: Destrukt asfaltowy
- [27] *Zawadzki J., Klos M.*: Zasady projektowania betonu asfaltowego o zwiększonej odporności na odkształcenia trwałe. Wytyczne oznaczania odkształcenia i modułu sztywności mieszanek mineralno-bitumicznych metodą pełzania pod obciążeniem statycznym. *IBDiM, Seria „I”*, 48, Warszawa 1995
- [28] *Stimilli A., Ferrotti G., Graziani A., Canestrari F.*: Performance evaluation of a coldrecycled mixture containing high percentage of reclaimed asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, **14**, 2013, 149-161, DOI: 10.1080/14680629.2013.774752.
- [29] *Sybilski D., Matras J., Mechowski T., Zawadzki J.*: Warunki techniczne wykonywania warstw podbudowy z mieszanki mineralno cementowo-emulsyjnej (MCE). *IBDiM, Seria „I”*, 61, Warszawa, 1999
- [30] *Jenkins K.J.*: Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen. *University of Stellenbosch, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, PhD Dissertation*, 2000

- [36] Mazurek G., Iwański M., Buczyński P., Horodecka R.: Influence of innovative threeelement binder on permanent deformations in recycled mixtures with emulsion and foamed bitumen. *Archives of Civil. Mechanical Engineering*, **21**, 55, 2021, DOI: 10.1007/s43452-021-00192-9
- [37] Mazurek G., Buczyński P., Iwański M., Horodecka R.: Influence of a three-component hydraulic binder on the properties of recycled base course with foamed bitumen and bituminous emulsion: a field investigation. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **21**, 4, 2022, 309-329, DOI: 10.7409/rabdim.022.018
- [38] Iwański M., Chomicz-Kowalska A., Maciejewski K.: Impact of additives on the foamability of road paving bitumen. 4th World WMCAUS 2019 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, **603**, 2019, ID article: 042040, DOI: 10.1088/1757-899X/603/4/042040
- [39] Wirtgen Group, Cold Recycling Technology, First edition, Wirtgen GmbH, Windhagen, 2012
- [40] Iwański M., Chomicz-Kowalska A.: Moisture and frost resistance of the recycled base rehabilitated with the foamed bitumen technology. *Archives of Civil Mechanical Engineering*, **58**, 2, 2012, 185-198, DOI: 10.2478/v.10169-012-0011-2
- [41] Raport z projektu TECHMATSTRATEGI/349326/9/NCBR/2017, Innowacyjna technologia wykorzystująca optymalizację środka wiążącego przeznaczonego do recyklingu głębokiego na zimno konstrukcji nawierzchni zapewniająca jej trwałość eksploatacyjną, NCBR, 2018
- [42] Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. GDDKiA, Warszawa, 2014
- [43] Iwański M., Buczyński P., Mazurek G.: Optimization of the road binder in the layer the road construction. *Construction and Building Materials*, **125**, 2016, 1044-1054, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.112
- [44] Gandi A., Carter A., Singh D.: Rheological behavior of cold recycled asphalt materials with different contents of recycled asphalt pavements. *Innovative Infrastructure Solutions*, **2**, 45, 2017, DOI: 10.1007/s41062-017-0094-3
- [45] Kavussi A., Modarres A.: Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement. *Construction and Building Materials*, **24**, 10, 2010, 1920-1927, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.009
- [46] Iwański M., Chomicz-Kowalska A., Mazurek G., Buczyński P., Cholewińska M., Iwański M.M., Maciejewski K., Ramiączek P.: Effects of the water-based foaming process on the basic and rheological properties of bitumen 70/100, *Materials*, **14**, 11, 2021, ID article: 2803, DOI: 10.3390/ma14112803
- [47] Niazi Y., Jalili M.: Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion. *Construction and Building Materials*, **23**, 3, 2009, 1338-1343, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.07.020
- [48] Iwański M., Mazurek G., Buczyński P., Iwański M.M.: Effects of hydraulic binder composition on the rheological characteristics of recycled mixtures with foamed bitumen for full depth reclamation. *Construction and Building Materials*, **330**, 2022, ID article: 127274, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127274
- [49] WT-2, Technical Guidelines 2: Asphalt pavements for national roads. Part I: Asphalt mixes General Directorate for National Roads and Motorways, Warsaw, 2014
- [50] Rathore M., Haritonovs V., Zaujanis M.: Performance evaluation of warm asphalt mixtures containing chemical additive and effect of incorporating high reclaimed asphalt content. *Materials*, **14**, 14, 2021, ID article: 3793, DOI: 10.3390/ma14143793
- [51] Bańkowski W., Król J., Gałzka K., Liphardt A., Horodecka R.: Design and verification of bituminous mixtures with the increased content of reclaimed asphalt pavement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **356**, 2018, ID article: 012009, DOI: 10.1088/1757-899X/356/1/012009
- [52] Bańkowski W.: Evaluation of fatigue life of asphalt concrete mixtures with reclaimed asphalt pavement. *Applied Sciences*, **8**, 3, 2018, ID article: 469, DOI: 10.3390/app8030469
- [53] Szyller A., Król J., Bańkowski W.: Współczesne doświadczenia ze stosowania recyklingu na gorąco w wytwórni mieszanek mineralno-asfaltowych w Polsce. *Nawierzchnie Asfaltowe*, **1**, 2017, 12-19
- [54] Kowalski K.J., Król J.B., Bańkowski W., Radziszewski P., Sarnowski M.: Thermal and fatigue evaluation of asphalt mixtures containing RAP treated with a bio-agent. *Applied Sciences*, **7**, 3, 2017, ID article: 216, DOI: 10.3390/app7030216
- [55] Delwar M., Fahmy M., Taha R.: Use of reclaimed asphalt pavement as an aggregate in portland cement concrete. *ACI Materials Journal*, **94**, 3, 1997, 251-256
- [56] Hassan M., Brooks K.E., Erdman J.J.: The use of reclaimed asphalt pavement aggregates in concrete. *Waste Management, Series 1*, 2000, 121-128, DOI: 10.1016/S0713-2743(00)80024-0
- [57] Huang B., Shu X., Li G.: Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements. *Cement and Concrete Research*, **35**, 10, 2005, 2008-2013, DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.05.002
- [58] Hossiney N., Tia M., Bergin M.J.: Concrete containing RAP for use in concrete pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **3**, 5, 2010, 251-258
- [59] Debbarma S., Selvam M., Singh S.: Can flexible pavements' waste (RAP) be utilized in cement concrete pavements? – A critical review. *Construction and Building Materials*, **259**, 1, 2020, ID article: 120417, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120417

- [60] *Fakhri M., Amoosoltani E.*: The effect of reclaimed asphalt pavement and crumb rubber on mechanical properties of roller compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, **137**, 2017, 470-484, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.136
- [61] *Huang B., Shu X., Burdette E.G.*: Mechanical properties of concrete containing recycled asphalt pavements. *Magazine of Concrete Research*, **58**, 5, 2006, 313-320, DOI: 10.1680/mac.2006.58.5.313
- [62] *Okafor F.O.*: Performance of recycled asphalt pavement as coarse aggregate in concrete. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, **9**, 17, 2010, 47-58
- [63] *Shi X., Mukhopadhyay A., Liu K.W.*: Mix design formulation and evaluation of portland cement concrete paving mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, **152**, 2017, 756-768
- [64] *Al-Oraimi S., Hassan H.F., Hago A.*: Recycling of reclaimed asphalt pavement in Portland cement concrete. *The Journal of Engineering Research*, **6**, 1, 2009, 37-45, DOI: 10.24200/tjer.vol6iss1pp37-45
- [65] *Aurangzeb Q., Al-Qadi I. L., Ozer H., Yang R.*: Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. *Resources, Conservation & Recycling*, **83**, 2014, 77-86, DOI: 10.1016/j.resconrec.2013.12.004
- [66] *Brand A.S., Roesler J.R.*: Ternary concrete with fractionated reclaimed asphalt pavement. *ACI Materials Journal*, **112**, 1, 2015, 155-163, DOI: 10.14359/51687176
- [68] PN-EN 206+A2:2021-08 Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność
- [69] PN-EN 13877-1:2013-08 Nawierzchnie betonowe – Część 1: Materiały
- [70] PN-EN 13877-2:2013-08 Nawierzchnie betonowe – Część 2: Wymagania funkcjonalne dla nawierzchni betonowych
- [71] D-05.03.04 Warunki wykonania i odbioru robót budowlanych – Nawierzchnie z betonu cementowego
- [72] PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu
- [73] PN-EN 13043:2004 Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utrwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu
- [74] PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego – Metoda przesiewania
- [75] PN-EN 1744-1+A1:2013-05 Badania chemicznych właściwości kruszyw – Część 1: Analiza chemiczna
- [76] PN-EN 933-3:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 3: Oznaczanie kształtu ziarn za pomocą wskaźnika płaskości
- [77] PN-EN 933-4:2008 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 4: Oznaczanie kształtu ziarn – Wskaźnik kształtu
- [78] PN-EN 1097-2:2020-09 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 2: Metody oznaczania odporności na rozdrabnianie
- [79] PN-EN 1097-8:2020-09 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 8: Oznaczanie polerowalności kamienia
- [80] PN-EN 1367-1:2007 Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych – Część 1: Oznaczanie mrozoodporności
- [81] PN-EN 1367-6:2008 Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych – Część 6: Mrozoodporność w obecności soli
- [82] Procedura Badawcza GDDKiA PB/1/18 – Instrukcja badania reaktywności kruszyw metodą przyspieszoną w 1M roztworze NaOH w temperaturze 80°C
- [83] Procedura Badawcza GDDKiA PB/2/18 – Instrukcja badania reaktywności kruszyw w temperaturze 38°C według ASTM C1293/RILEM AAR-3
- [84] PN-EN 13108-8: 2016-07 Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania – Część 8: Destrukt asfaltowy
- [85] PN-EN 12697-2+A1: 2019-12 Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań – Część 2: Oznaczenie uziarnienia
- [86] PN-EN 12697-42: 2021-06 Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań – Część 42: Zawartość części obcych w destrukcie asfaltowym
- [87] PN-EN 12697-5: 2019-01 Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań – Część 5: Oznaczenie gęstości
- [88] PN-EN 1426:2015-08 Asfalty i lepiszcza asfaltowe: Oznaczenie penetracji igłą
- [89] PN-EN 1427:2015-08 Asfalty i lepiszcza asfaltowe: Oznaczenie temperatury pięknienia – Metoda Pierścieni i Kula
- [90] PN-EN 13398: 2017-12 Asfalty i lepiszcza asfaltowe: Oznaczenie nawrotu sprężystego asfaltów modyfikowanych
- [91] PN-EN 13589: 2018-08 Asfalty i lepiszcza asfaltowe: Oznaczenie siły rozciągania asfaltów modyfikowanych, metoda z duktylometrem
- [92] PN-EN 12697-1: 2020-08 Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań – Część 1: Zawartość lepiszcza rozpuszczonego
- [93] PN-EN 12697-3+A1:2019-01 Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań – Część 3: Odzyskiwanie asfaltu: wyparka obrotowa
- [94] PN-EN 12350-7: 2019-08 Badania mieszanki betonowej – Część 7: Badanie zawartości powietrza – Metody ciśnieniowe
- [95] PN-EN 12350-6: 2019-08 Badania mieszanki betonowej – Część 6: Gęstość
- [96] PN-EN 12350-2: 2019-07 Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka

- [97] PN-EN 12390-3: 2019-07 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [98] PN-EN 12390-5:2019-08 Badania betonu – Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań
- [99] PN 88-B-06250 Beton zwykły

- [100] PN-EN 12390-1: 2021-12 Badania betonu – Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badań i form
- [101] PN-EN 12504-3: 2006 Badania betonu w konstrukcjach – Część 3: Oznaczanie siły wyrywającej