

Andrzej Duszyński, PhD Eng.^{1*)}

ORCID: 0000-0002-8842-5630

Wiktor Jasiński, PhD¹⁾

ORCID: 0000-0001-6612-4207

Remigiusz Gut, Msc. Eng.¹⁾

ORCID: 0000-0002-3327-4142

The effect of compaction of typical recycled concrete aggregates on meeting WT-4 requirements

Wpływ zagęszczenia typowych kruszyw z recyklingu betonu na spełnienie wymagań WT-4

DOI: 10.15199/33.2025.04.02

Abstract. Unbound aggregates from recycled concrete as weak (crushable) aggregates are subject to intensive changes in grading as a result of compaction. The tests of grading and grading after 5-fold compaction using the Proctor method according to PN-EN 13286-2:2010 [1] were referred to the requirements included in WT-4 2010 [2]. In the analysis of aggregates from recycled concrete, the results of water absorption, frost resistance and load-bearing index tests were also used to assess the changes in grading. The obtained results of the analyses of aggregates from recycled concrete as weak aggregates confirm the dependence of the change in grading on the type of components and grading continuity.

Keywords: aggregate from recycled concrete; grading; grading after 5-fold Proctor compaction; grading change.

Streszczenie. Kruszywa niezwiązane pochodzące z recyklingu betonu jako kruszywa słabe podlegają intensywnym zmianom uziarnienia w wyniku zagęszczania. Badania uziarnienia i uziarnienia po 5-krotnym zagęszczeniu metodą Proctora wg PN-EN 13286-2:2010 [1] odniesiono do wymagań zawartych w WT-4 2010 [2]. W analizie kruszyw z recyklingu betonu do oceny zmiany uziarnienia wykorzystano również wyniki badań nasiąkliwości, mrozoodporności i wskaźnik nośności. Uzyskane wyniki analiz kruszyw z recyklingu betonu jako kruszyw słabych potwierdzają zależność zmiany uziarnienia od rodzaju składników i ciągłości uziarnienia.

Słowa kluczowe: kruszywo z recyklingu betonu; uziarnienie; uziarnienie po 5-krotnym zagęszczeniu metodą Proctora; zmiana uziarnienia.

A subject of particular interest in road construction may be construction wastes with the code 17 01 01 according to [3], which comprise: concrete waste from construction, repair and dismantling of buildings and road infrastructure. According to analyses and forecasts, in 2014 **concrete waste and concrete rubble** reached the amount of 294,000 Mg in Poland for recovered raw material and 33,000 Mg for non-recovered raw material [4]. It results from [5] that waste recovery or recycling procedure can be carried out. In the case of concrete waste, recovery outside installations or facilities is possible [6].

Recycled concrete aggregates for use in road construction for the purpose of substructures and improved subgrades can be applied in the technology of unbound, improved materials or materials stabilised with hydraulic binders. Their specific property is the ability to release unhydrated portions of cement by crushing waste raw material from recycled concrete and compacting it in situ or through Proctor compaction at a laboratory. It is also possible to release hydraulic and pozzolanic properties [7] after improvement with hydraulic binders.

In 2005, the Road and Bridge Research Institute [8] conducted a study of the effect of compaction technology on the properties of coarse-grained materials used for frost-resistant layers, including the grading of concrete rubble aggregate by the Proctor method, modified Proctor method, after 5-fold com-

Przedmiotem szczególnego zainteresowania w budownictwie drogowym mogą być odpady budowlane o kodzie 17 01 01 wg [3], wśród których są: odpady betonu z budowy, remontów i demontażu obiektów budowlanych oraz infrastruktury drogowej. Zgodnie z analizami i prognozami w 2014 r. **odpady betonowe i gruz betonowy** osiągnęły w Polsce 294 tys. Mg w przypadku surowca odzyskanego i 33 tys. Mg surowca nieodzyskanego [4]. Z [5] wynika, że może być prowadzony proces odzysku odpadów lub recyklingu. W przypadku odpadów z betonu możliwy jest odzysk poza instalacjami lub urządzeniami [6].

Kruszywa z recyklingu betonu do zastosowania w budownictwie drogowym do podbudów i ulepszonego podłoża mogą być stosowane w technologii materiałów niezwiązanych, ulepszonych lub stabilizowanych spoiwami hydraulicznymi. Specyficzną ich właściwością jest możliwość wyzwolenia niezhydrytowanych części cementu w wyniku rozkruszenia surowca odpadowego z recyklingu betonu oraz zagęszczenia in situ lub metodą Proctora w laboratorium. Możliwe jest również wyzwolenie właściwości hydraulicznych i pucolanowych [7] po ulepszeniu spoiwami hydraulicznymi.

W 2005 r. w IBDiM [8] przeprowadzono badania wpływu technologii zagęszczania na właściwości materiałów gruboziarnistych stosowanych do warstw mrozochronnych, w tym uziarnienia kruszywa z gruzu betonowego metodą Proctora, zmodyfikowaną metodą Proctora, po 5-krotnym zagęszczeniu oraz po zamrażaniu. Zmianę uziarnienia obliczano w przypadku frakcji piaskowo-iłowej, piaskowej, żwirowej

¹⁾ Road and Bridge Research Institute

*) Correspondence address: andrzej.duszyński@ibdim.edu.pl

paction, and after freezing. Grading change was calculated for the sand-silt, sand, gravel, and stone fractions. Based on this research, the term weak aggregate defined by maximum grading change was introduced according to WT-4 2010 [2].

The following standardisation documents are used to evaluate aggregates and mixtures: PN-EN 13242+A1:2010 [9]; PN-EN 13285:2018-08 [10] and WT-4 2010 [2], which cover aggregates from recycled concrete. As can be seen from the notation in EN 13242+A1:2010 [9], paragraph 1, aggregates from recycled construction waste are included in this standard, although not to the full extent of their identification, test methods, and evaluation. In the case of weak aggregates defined in WT-4 2010 [2], the essential characteristics included in PN-EN 13242+A1:2010 [9] have been expanded in the National Technical Assessments of aggregates from recycled concrete to include:

- stability of grading – defined by the maximum change in grading;

- bearing stability – determined by the bearing capacity index after 4, 7, 15 and 30 days of water absorption.

Loadbearing stability as an essential characteristics is a deterministic property, especially of recycled concrete aggregates, due to the binding properties revealed by the unhydrated parts of the cement or binders [11] found in them. In the literature, the following are used for the purpose of assessing the concrete raw material:

- compressive strength tests on cut concrete specimens [12, 13];

- stoichiometric analyses of the residual potential of unhydrated concrete components, carried out by XRD and TGA methods [11];

- image analyses on ground slabs by means of assessing the amount of mortar [14, 15].

Some of these methods allow the evaluation of the finished aggregate from recycled concrete, but a more suitable method for its analysis is included in the National Technical Assessments for loadbearing stability. The release of binding properties in the raw material and recycled concrete aggregate is made possible by the processes of: crushing which yields aggregate from recycled concrete or compacting a layer of aggregate from recycled concrete in the constructed layer of a road structure.

Grading stability is an essential characteristics that comprehensively captures aggregate changes as a possible failure of weak aggregates or those containing weak components. According to WT-4 2010 [2], the measure of damage after 5-fold Proctor compaction is the maximum grading change. For a manufacturer of recycled concrete aggregate, this is not an easy task and requires the implementation of appropriate technology, as the final grading in the GB or GV category according to PN-EN 13285:2018-08 [10] or according to WT-4 2010 [2] must be taken into account already at the production stage.

According to research, the greater the fineness of the recycled concrete aggregate, the greater the release of unhydrated portions of the binder [11]. This leads to an increase in the stiffness moduli of the subgrade/substructure layers

i kamienistej. Na podstawie tych badań wprowadzono zgodnie z WT-4 2010 [2] termin *kruszywo słabe* definiowane za pomocą maksymalnej zmiany uziarnienia.

Do oceny kruszyw i mieszanek stosuje się następujące dokumenty normalizacyjne: PN-EN 13242+A1:2010 [9]; PN-EN 13285:2018-08 [10] i WT-4 2010 [2], które obejmują kruszywa z recyklingu betonu. Jak wynika z zapisu w PN-EN 13242+A1:2010 [9], pkt 1 kruszywa z recyklingu budowlanego są włączone do tej normy, chociaż nie w pełnym zakresie ich identyfikacji, metod badawczych i oceny. W przypadku kruszyw słabych zdefiniowanych w WT-4 2010 [2] zasadnicze charakterystyki, ujęte w PN-EN 13242+A1:2010 [9], rozszerzono w Krajowych Ocenach Technicznych kruszyw z recyklingu betonu o:

- stabilność uziarnienia – określoną przez maksymalną zmianę uziarnienia;

- stabilność nośności – określoną przez wskaźnik nośności po 4, 7, 15 i 30 dobach nasączenia.

Stabilność nośności jako zasadnicza charakterystyka jest deterministyczną właściwością, szczególnie kruszyw z recyklingu betonu, z uwagi na właściwości wiążące, które ujawniają się w wyniku niezhydryzowanych części cementu czy spoiw [11] w nich zawartych. W literaturze do oceny surowca betonowego stosuje się:

- badania wytrzymałości na ściskanie na wyciętych próbkach z betonu [12, 13];

- analizy stechiometryczne metodami XRD i TGA potencjału resztkowego nieuwodnionych składników betonu [11];

- analizy obrazu na wyszlifowanych płytach przez określenie ilości zaprawy [14, 15].

Niektóre z tych metod pozwalają na ocenę gotowego kruszywa z recyklingu betonu, ale bardziej odpowiednią metodą jego analizy jest ujęta w Krajowych Ocenach Technicznych stabilność nośności. Uwolnienie właściwości wiążących w surowcu i kruszywie z recyklingu betonu umożliwiają procesy: kruszenia prowadzące do uzyskania kruszywa z recyklingu betonu lub zagęszczania warstwy kruszywa z recyklingu betonu w budowanej warstwie konstrukcji drogowej.

Stabilność uziarnienia jest zasadniczą charakterystyką ujmującą w sposób kompleksowy zmiany kruszywa jako możliwe uszkodzenie kruszyw słabych lub zawierających słabe składniki. Zgodnie z WT-4 2010 [2] miarą uszkodzenia po 5-krotnym zagęszczeniu metodą Proctora jest maksymalna zmiana uziarnienia. Dla producenta kruszywa z recyklingu betonu nie jest to zadanie łatwe i wymaga wdrożenia odpowiedniej technologii, gdyż już na etapie produkcji trzeba wziąć pod uwagę końcowe uziarnienie w kategorii GB lub GV wg PN-EN 13285:2018-08 [10] lub wg WT-4 2010 [2].

Jak wynika z badań, im większe rozdrobnienie kruszywa z recyklingu betonu, tym większe uwolnienie niezhydryzowanych części spoiwa [11]. Prowadzi to do zwiększenia modułów sztywności warstw podłoża/podbudowy bez spękań skurczowych typowych dla konwencjonalnych podbudów stabilizowanych cementem [16]. Inny ważny aspekt stabilności

without the shrinkage cracking typical of conventional cement-stabilised substructures [16]. Another important aspect of the grading stability of recycled concrete aggregates is such components as natural aggregates; brick; glass; asphalts; metals, plastics, etc. Pure recycled concrete aggregate consists of 60-75% of natural aggregates [12]. Aggregate performance is highly dependent on processing, grading and/or mortar residue. Depending on the ratio of aggregate to mortar and the type of ingredients and compared to natural aggregates, an aggregate from recycled concrete is characterised by:

- increased water absorption of 0.5 to 7% [17] and even up to 17% for fine aggregates [18] with possible self-cementing [8];
- abrasion, measured by the Los Angeles method, of above 25% [19].

An important aspect is the possibility of improving the properties of recycled concrete aggregates by adding other aggregates, pozzolanic materials (active ash, recycled cement dust) [20 ÷ 24], chemicals [25 ÷ 27] or mineral additives [22], including binders and cement [28]. However, this requires specialised equipment, additional energy or quantities of water. Some of the methods are currently not fully known or perceived as uneconomical.

By crushing the surface concrete slabs *in situ*, a flexible substructure was obtained [29]. Laboratory tests of compressive strength and frost resistance of recycled concrete aggregates for cement stabilisation have met the requirements of WT-4 2010 [2] for roadbase layers [13]. Tests of concrete aggregate for cement-bonded substructure layer have confirmed the possibility of their use with the amount of cement of 6 ÷ 10% [30]. It is very important that the unhydrated cement grains present in the concrete, especially the crushed and finished aggregate, are not exposed to water from precipitation or groundwater [31,29].

Tests

Tests were conducted on three selected recycled concrete aggregates (Table 1), which included determining:

- grain composition according to PN-EN 933-1:2012 [32];
- content of ingredients after testing the grain composition on a fractionated test sample (see section 2.3.1.);
- grain composition after 5-fold Proctor compaction (according to [1]) according to PN-EN 933-1:2012 [32];
- water absorption according to PN-EN 10976:2022-07 [33];
- frost resistance according to PN-EN 13671:2007 [34] (on fractions);
- loadbearing index after Proctor compaction [1] after 4, 7, 15 and 30 days of water saturation with load according to PN-EN 13286-47:2022-04 [35].

Tests of grading and grading after 5-fold Proctor compaction according to [1]. Grading $f(d)$ of the aggregate is tested according to PN-EN 933-1:2012 [32]

uziarnienia kruszyw z recyklingu betonu stanowią składniki takie, jak: kruszywa naturalne; cegła; szkło; asfalty; metale, tworzywa sztuczne itd. Czyste kruszywo z recyklingu betonu RCA składa się w 60 – 75% z kruszyw naturalnych [12]. Właściwości użytkowe kruszywa w dużym stopniu zależą od sposobu przetwarzania, uziarnienia i/lub pozostałości zaprawy. W zależności od proporcji kruszywa do zaprawy i rodzaju składników kruszywo RCA w porównaniu z kruszywami naturalnymi charakteryzuje się:

- zwiększoną nasiąkliwością od 0,5 do 7% [17], a w przypadku kruszyw drobnych nawet do 17 % [18] z możliwym samocementowaniem [8];
- ścieralnością metodą Los Angeles powyżej 25% [19].

Istotnym aspektem jest możliwość poprawy właściwości kruszyw z recyklingu betonu przez dodatek innych kruszyw, materiałów pucolanowych (aktywnych popiołów, pyłów cementowych z recyklingu) [20 ÷ 24], środków chemicznych [25 ÷ 27] lub dodatków mineralnych [22], łącznie ze spoiwami i cementem [28]. Wymaga to jednak stosowania specjalistycznego sprzętu, dodatkowej energii lub ilości wody. Niektóre z metod są obecnie nie do końca rozpoznane lub nieekonomiczne.

Przez rozkruszenie nawierzchniowych płyt betonowych *in situ* uzyskano podbudowę podatną [29]. Prowadzone w laboratorium badania wytrzymałości na ściskanie i mrozoodporności kruszyw z recyklingu betonu do stabilizacji cementem spełniły wymagania WT-4 2010 [2] dotyczące warstw podbudowy zasadniczej [13]. Badania kruszywa betonowego do warstwy podbudowy związanej cementem potwierdziły możliwość ich wykorzystania przy ilości cementu 6 ÷ 10% [30]. Bardzo ważne jest, aby nieuwodnione ziarna cementu obecne w betonie, szczególnie tym rozkruszonym i gotowym kruszywie nie były wystawione na działanie wody pochodzącej z opadów atmosferycznych lub wód gruntowych [31, 29].

Badania

Przeprowadzono badania trzech wybranych kruszyw z recyklingu betonu (tabela 1), które obejmowały określenie:

- składu ziarnowego wg normy PN-EN 933-1:2012 [32];
- zawartości składników po badaniu składu ziarnowego na rozfrakcjonowanej próbce badawczej;
- składu ziarnowego po 5-krotnym zagęszczeniu metodą Proctora (wg [1]) wg PN-EN 933-1:2012 [32];
- nasiąkliwości wg PN-EN 10976:2022-07 [33];
- mrozoodporności wg PN-EN 13671:2007 [34] (na frakcjach);
- wskaźnika nośności po zagęszczeniu metodą Proctora [1] po 4, 7, 15 i 30 dobach nasycenia wodą z obciążeniem wg PN-EN 13286-47:2022-04 [35].

Badania uziarnienia i uziarnienia po 5-krotnym zagęszczeniu metodą Proctora wg [1]. Uziarnienie $f(d)$ kruszywa bada się wg PN-EN 933-1:2012 [32]

Table 1. Aggregates from recycled concrete selected for testing

Tabela 1. Wybrane do badań kruszywa z recyklingu betonu

Aggregate designation/Oznaczenie kruszywa	Maximum grain size D_{0max} [mm]/Maksymalny wymiar ziarna D_{0max} [mm]	Aggregate condition/Kruszywo	
		aggregate/uziarnienie	raw material/surowiec
K1	90	coarse-grained without fine fractions/gruboziarniste bez frakcji drobnych	concrete/beton
K2	90	coarse-grained with a small proportion of finer fractions/gruboziarniste z niewielkim udziałem frakcji drobniejszych	concrete, brick/beton, cegła
K3	90	multifractional/wielofrakcyjne	concrete/beton

on dry basic sieves plus set 1 according to PN-EN 13242+A1:2010 [9]. The content of the components is then determined on the spread sample, and after mixing, following 5-fold Proctor compaction according to [1], grading $f_5(d_i)$ was determined by means of a dry method according to PN-EN 933-1:2012 [32], selecting the upper sieve size D_5 in line with PN-EN 13242+A1:2010 [9]. Subsequently, the sieves d_i are established for determining the limit curves of the good grading field for the roadbase according to WT-4 2010 [2] or according to PN-EN 13285:2010 [10].

Grading change and maximum grading change after 5-fold Proctor compaction according to [1]. WT-4 2010 [2] define the term ‘maximum grading change’ when defining *weak aggregate*. The change in grading $Z_f(d_i)$ is calculated on each sieve d_i as the difference between the $f(d_i)$ grading and the $f_5(d_i)$ grading obtained after 5-fold Proctor compaction according to [1]. $Z_f(d_i)$ grading change values allow for the determination of grading stability as the $Z_{fmax}(d_m)$ maximum grading change on a specific sieve d_m .

Loadbearing stability. The loadbearing index test should be performed after 4, 7, 15 and 30 days of soaking along with load, according to PN-EN 13286-47:2022-04 [35]. The guaranteed load capacity index after soaking along with load is the average of the loadbearing indices after 4, 7, 15 and 30 days of soaking in water or the average of these loadbearing indices after stabilisation of the load index (e.g. due to chemical transformations) after 7, 15 and 30 days of soaking. The loadbearing stability is determined by the guaranteed loadbearing index and reinforcement index $ww = w_g / CBR_4$.

Figure 1 shows the grading curves $f(d_i)$, grading $f_5(d_i)$ after 5-fold Proctor compaction according to [1], the corresponding grading changes $Z_f(d_i)$ along with the maximum grading change $Z_{fmax}(d_m)$ of recycled concrete aggregates marked as: K1, K2 and K3. For each grain size $f_5(d_i)$ after 5-fold Proctor compaction according to [1], the upper sieve dimensions D_5 in accordance with PN-EN 13242+A1:2010 [9], and the limit curves (according to Section 2.2.1.) (general and of the supplier) were determined for the use of aggregate for the roadbase. The boundary curves determining good grading fields are shown in Figure 1, and the results for the recycled concrete aggregates are shown in Tables 2, 3 and Figures 1 and 2.

na sucho na sitach podstawowych plus zestaw 1 wg PN-EN 13242+A1:2010 [9]. Następnie na rozsianej próbce określa się zawartość składników, a po jej zmieszaniu, po 5-krotnym zagęszczeniu metodą Proctora wg [1] oznaczono uziarnienie $f_5(d_i)$ metodą na sucho wg PN-EN 933-1:2012 [32], dobierając górny wymiar sita D_5 zgodnie z normą PN-EN 13242+A1:2010 [9]. W dalszej kolejności ustala się sita d_i do wyznaczenia krzywych granicznych pola dobrego uziarnienia do podbudowy zasadniczej wg WT-4 2010 [2] lub wg PN-EN 13285:2010 [10].

Zmiana uziarnienia i maksymalna zmiana uziarnienia po 5-krotnym zagęszczeniu metodą Proctora wg [1]. WT-4 2010 [2] określają termin maksymalna zmiana uziarnienia przy definicji *kruszywa słabego*. Zmiana uziarnienia $Z_f(d_i)$ jest obliczana na każdym sicie d_i jako różnica uziarnienia $f(d_i)$ i uziarnienia $f_5(d_i)$ uzyskanego po 5-krotnym zagęszczeniu metodą Proctora wg [1]. Wartości zmiany uziarnienia $Z_f(d_i)$ pozwalają na wyznaczenie stabilności uziarnienia jako maksymalnej zmiany uziarnienia $Z_{fmax}(d_m)$ na określonym sicie d_m .

Stabilność nośności. Badanie wskaźnika nośności należy wykonać po 4, 7, 15 i 30 dobach nasączenia z obciążeniem wg PN-EN 13286-47:2022-04 [35]. Gwarantowany wskaźnik nośności w_g po nasączeniu z obciążeniem jest średnią wskaźników nośności po 4, 7, 15 i 30 dobach nasączenia w wodzie lub przy ustabilizowaniu się wskaźnika nośności (np. w wyniku przemian chemicznych) po 7, 15 i 30 dobach nasączenia średnią tych wskaźników nośności. Stabilność nośności określa gwarantowany wskaźnik nośności i wskaźnik wzmocnienia $ww = w_g / CBR_4$.

Na rysunku 1 przedstawiono krzywe uziarnienia $f(d_i)$, uziarnienia $f_5(d_i)$ po 5-krotnym zagęszczeniu metodą Proctora wg [1], odpowiadające im zmiany uziarnienia $Z_f(d_i)$ wraz z maksymalną zmianą uziarnienia $Z_{fmax}(d_m)$ kruszyw z recyklingu betonowego oznaczonych jako: K1, K2 i K3. W przypadku każdego uziarnienia $f_5(d_i)$ po 5-krotnym zagęszczeniu metodą Proctora wg [1] dobrano górne wymiary sita D_5 zgodnie z PN-EN 13242+A1:2010 [9] i określono krzywe graniczne (ogólne i dostawcy) w przypadku zastosowania kruszywa do podbudowy zasadniczej. Krzywe graniczne wyznaczające pola dobrego uziarnienia przedstawiono na rysunku 1, a wyniki badań kruszyw z recyklingu betonu w tabelach 2, 3 i na rysunkach 1 i 2.

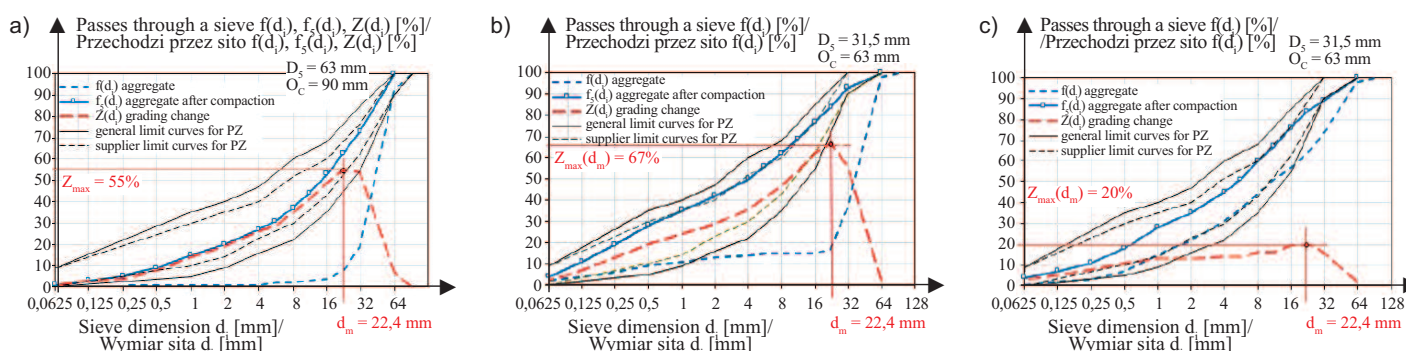


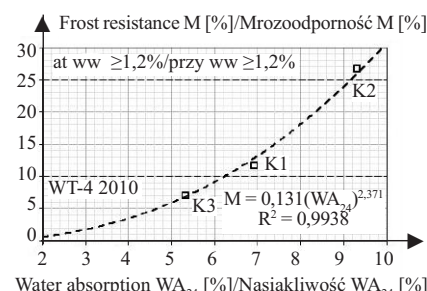
Fig. 1. Grading curves $f(d_i)$ and grading curves $f_5(d_i)$ after 5-fold compaction and the corresponding grading changes $Z_f(d_i)$ together with the determination of the maximum grading change $Z_{fmax}(d_m)$ of recycled concrete aggregates marked as: a) K1; b) K2; c) K3

Rys. 1. Krzywe uziarnienia $f(d_i)$ i uziarnienia $f_5(d_i)$ po 5-krotnym zagęszczeniu oraz odpowiadające im zmiany uziarnienia $Z_f(d_i)$ wraz z określeniem maksymalnej zmiany uziarnienia $Z_{fmax}(d_m)$ kruszyw z recyklingu betonowego oznaczonych jako: a) K1; b) K2; c) K3

Table 2. Results of the analysis of the content of components

Tabela 2. Wyniki badania zawartości składników

Aggregate designation/ Oznaczenie kruszywa	Contents [%]/Składniki [%]		
	concrete/ beton	brick/ cegła	natural aggregate/kruszywo naturalne
K1	98,5	0,2	0,8
K2	37,6	37,4	15,0
K3	100,0	–	–

**Fig. 2. Frost resistance of recycled concrete aggregates depending on water absorption, taking into account the upper levels for the improved subgrade**

Rys. 2. Mrozoodporność kruszyw z recyklingu betonowego w zależności od nasiąkliwości z uwzględnieniem górnych poziomów ulepszonego podłoża

Table 3. Test results and determinations

Tabela 3. Wyniki badania kruszywa z recyklingu betonu

Property/Właściwość	Recycled concrete aggregate/Kruszywo z recyklingu betonu		
	K1	K2	K3
Grain size/Wymiar ziarna			
Maximum grading D_{0max} [mm]/Maksymalny wymiar ziarna D_{0max} [mm]	90	90	90
Maximum grain size after 5-fold compaction D_{5max} [mm]/Maksymalny wymiar ziarna po 5-krotnym zagęszczeniu D_{5max} [mm]	63	63	63
Upper dimension of grading after 5-fold compaction D_5 [mm]/Górny wymiar uziarnienia po 5-krotnym zagęszczeniu D_5 [mm]	63	31,5	31,5
Maximum grading change/Maksymalna zmiana uziarnienia			
Grading stability $Z_{fmax}(d_m)$ [%]/Stabilność uziarnienia $Z_{fmax}(d_m)$ [%]	55	67	20
On a d_{5m} sieve [mm]/Na sicie d_{5m} [mm]	22,4	22,4	22,4
Water absorption WA_{24} [%]/Nasiąkliwość WA_{24} [%]	6,9	9,3	5,3
Frost resistance F [%]/Mrozoodporność F [%]	11,8	26,8	7,1
Loadbearing index/Wskaźnik nośności			
After 4 days of soaking, CBR_4 [%]/Po 4 dobach nasączenia CBR_4 [%]	127	72	118
Guaranteed w_g [%]/Gwarantowany w_g [%]	158	70	128
Reinforcement index $ww = w_g/CBR_4$ /Współczynnik wzmocnienia $ww = w_g/CBR_4$	1,24	0,98	1,09

Analysis of the results and conclusions

The compaction of recycled concrete aggregates is directly affected by their material composition and grading. According to WT-4 2010 [2], 5-fold Proctor compaction in terms of damage and wearability of aggregates also captures durability factors such as frost resistance and loadbearing.

Three typical recycled concrete aggregates varying in grain size (monofractional, multifractional) and raw material were selected for the study. Their maximum grain size was $D_{0max} = 90$ mm, and after 5-fold Proctor compaction according to [1] $D_{5max} = 63$ mm. The primary component of the recycled concrete aggregates tested is concrete. The K2 aggregate also contains brick in a proportion of 37.4%.

The following results obtained after 5-fold Proctor compaction according to [1] of the tested recycled concrete aggregates were taken into account when evaluating **grading stability**: grading $f_5(d_i)$; upper dimension D_5 ; maximum grading change $Z_{fmax}(d_m)$.

The maximum change in grain size $Z_{fmax}(d_m)$ of K1 and K2 aggregates exceeds 50%. This shows that they are subject to extensive crushing during compaction. The tests also indicate that the grain size after 5-fold Proctor compaction according to [1] of all three aggregate types falls within the good grading field defined by the general grading curves (Figure 1) according to WT-4 2010 in cases of substructures, regardless of the grading before compaction. K1 and K3 aggregates fall within the good grading field determined by the supplier's limit curves. The K2 aggregate exceeded the supplier's limit

Analiza wyników i wnioski

Bezpośredni wpływ na zagęszczenie kruszyw z recyklingu betonu mają ich skład materiałowy i uziarnienie. Zgodnie z WT-4 2010 [2], 5-krotne zagęszczenie metodą Proctora pod względem uszkodzenia i ścieralności kruszyw ujmuje również czynniki związane z trwałością, takie jak mrozoodporność oraz nośność.

Do badań wybrano trzy typowe kruszywa z recyklingu betonu zróżnicowane pod względem uziarnienia (monofrakcyjne, wielofrakcyjne) i surowca. Ich maksymalny wymiar wynosił $D_{0max} = 90$ mm, a po 5-krotnym zagęszczeniu metodą Proctora wg [1] $D_{5max} = 63$ mm. Podstawowym składnikiem badanych kruszyw z recyklingu betonu jest beton. Kruszywo K2 zawiera również cegłę o udziale 37,4%.

Przy ocenie **stabilności uziarnienia** uwzględniono następujące wyniki uzyskane po 5-krotnym zagęszczeniu metodą Proctora wg [1] badanych kruszyw z recyklingu betonu: uziarnienie $f_5(d_i)$; górny wymiar D_5 ; maksymalną zmianę uziarnienia $Z_{fmax}(d_m)$.

Maksymalna zmiana uziarnienia $Z_{fmax}(d_m)$ kruszyw K1 i K2 przekracza wartość 50%. Świadczy to o bardzo dużym ich rozkruszaniu podczas zagęszczania. Badania wskazują również, że uziarnienie po 5-krotnym zagęszczeniu metodą Proctora wg [1] wszystkich trzech typów kruszyw wpisuje się w pole dobrego uziarnienia określonego przez ogólne krzywe uziarnienia (rysunek 1) wg WT-4 2010 w przypadkach podbudów niezależnie od uziarnienia przed zagęszczeniem. Kruszywa K1 i K3 wpisują się w pole dobrego uziarnienia wyznaczonego przez krzywe graniczne dostawcy. W przypadku kruszywa K2 przekroczo-

curves by only 2%. In terms of grading, the tested aggregates meet the requirements of WT-4 2010 [2].

Another property related to the type of recycled concrete aggregate raw material is the **loadbearing stability** as determined by a loadbearing index test carried out after Proctor compaction according to [1] after 4, 7, 15 and 30 days of water absorption according to PN-EN 13286-47:2022-04 [35]. The result was the average guaranteed loadbearing index, an essential characteristics of recycled concrete aggregates that have bonding properties, related to the release during compaction from the unhydrated parts of cement contained in the concrete and containing harmful components that affect the loadbearing stability over time.

The change in the loadbearing index over time is determined by the reinforcement index w_w . For K1 and K3 aggregates, it is > 1.00 , and for K3 aggregate < 1.00 . The K1 aggregate has the highest reinforcement index $w_w = 1.24$, which means that it increases by 24% compared to the loadbearing index after 4 days of soaking in water. The high fineness of this aggregate, defined by the maximum grading change $Z_{\max}(d_m)$, has a favourable effect on loadbearing.

The use of K2 aggregate for improved subgrades or substructures prevents its frost resistance, an essential characteristics directly related to its water absorption (Figure 2). Although the K1 aggregate has a frost resistance of more than 10%, it can be classified as an improved subgrade due to its reinforcement index $w_w = 1.24\%$.

WT-4 2010 [2] should be supplemented with the essential characteristics of recycled concrete aggregates and their performance properties based on the specific characteristics of these aggregates, including the loadbearing index after 4, 7, 15 and 30 days of soaking in water and the reinforcement index. Both the maximum grading change and loadbearing require changes in terms of procedure and classification, while frost resistance requires changes in terms of classification. The classification of recycled concrete aggregates should take into account the bonding properties associated with the unhydrated portions of the cement present in these aggregates. Similarly, other ingredients such as brick, asphalt waste and plastics present in recycled aggregates have a significant impact on their properties.

In cases of aggregates from recycled waste materials, including recycled concrete, National Technical Assessments are issued by the Road and Bridge Research Institute. There is a need for broader inclusion of non-recycled concrete aggregates as aggregates with specific properties in WT-4 and in national regulations.

Received: 09.12.2024
Revised: 29.01.2025
Published: 25.04.2025

no krzywe graniczne dostawcy jedynie o 2%. Pod względem uziarnienia badane kruszywa spełniają wymagania WT-4 2010 [2].

Inną właściwością związaną z rodzajem surowca do produkcji kruszyw z recyklingu betonu jest **stabilność nośności** określona za pomocą badania wskaźnika nośności przeprowadzonego po zagęszczeniu metodą Proctora wg [1] po 4, 7, 15 i 30 dobach nasycania wodą wg normy PN-EN 13286-47:2022-04 [35]. Wynikiem był średni gwarantowany wskaźnik nośności, stanowiący zasadniczą charakterystykę kruszyw z recyklingu betonu posiadających właściwości wiążące, związane z uwolnieniem podczas zagęszczania z nieuwodnionych części cementu zawartych w betonie oraz zawierających składniki szkodliwe wpływające na stabilność nośności w czasie.

Zmianę wskaźnika nośności w czasie określa współczynnik wzmocnienia w_w . W przypadku kruszyw K1 i K3 jest on $> 1,00$, a kruszywa K3 $< 1,00$. Kruszywo K1 charakteryzuje się największym współczynnikiem wzmocnienia $w_w = 1,24$, co oznacza, że w stosunku do wskaźnika nośności po 4 dobach nasączenia wzrasta on o 24%. Duże rozdrobnienie tego kruszywa określone przez maksymalną zmianę uziarnienia $Z_{\max}(d_m)$ wpływa korzystnie na nośność.

Zastosowanie kruszywa K2 do ulepszonego podłoża czy do podbudów uniemożliwia jego mrozoodporność, będąca zasadniczą charakterystyką związaną bezpośrednio z nasiąkliwością (rysunek 2). Chociaż kruszywo K1 wykazuje mrozoodporność powyżej 10%, to ze względu na współczynnik wzmocnienia $w_w = 1,24\%$ może być zaklasyfikowane do ulepszonego podłoża.

WT-4 2010 [2] powinny być uzupełnione o zasadnicze charakterystyki kruszyw z recyklingu betonu i ich właściwości użytkowe wynikające ze specyfiki tych kruszyw, m.in. o wskaźnik nośności po 4, 7, 15 i 30 dobach nasycania wodą i współczynnik wzmocnienia. Zarówno maksymalna zmiana uziarnienia, jak i nośność wymagają wprowadzenia zmian pod względem proceduralnym i klasyfikacyjnym, natomiast mrozoodporność pod względem klasyfikacyjnym. W klasyfikacji kruszyw z recyklingu betonu powinny być uwzględnione właściwości wiążące związane z niezhydrytowanymi częściami cementu obecnymi w tych kruszywach. Podobnie inne składniki jak cegła, destrukta asfaltowy czy tworzywa sztuczne obecne w kruszywach z recyklingu mają istotny wpływ na ich właściwości.

W przypadkach kruszyw z recyklingu surowców odpadowych, w tym z recyklingu betonu, w IBDiM wydawane są Krajowe Oceny Techniczne. Istnieje potrzeba szerszego ujęcia w WT-4 i w przepisach krajowych kruszyw nie tylko z recyklingu betonu jako kruszyw o specyficznych właściwościach.

Artykuł wpłynął do redakcji: 09.12.2024 r.
Otrzymało poprawiony po recenzjach: 29.01.2025 r.
Opublikowano: 25.04.2025 r.

Literature

- [1] PN-EN 13286-2:2010 Mieszanki niezwiązane i związane hydraulicznie – Część 2: Metody badań laboratoryjnych gęstości na sucho i zawartości wody – Zagęszczanie metodą Proctora.
- [2] WT-4 2010 Wymagania Techniczne. Mieszanki niezwiązane do dróg krajowych.
- [3] Rozporządzenie Ministra Klimatu z 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów. Dz.U. z 3 stycznia 2020 r. poz. 10.

- [4] Ajdukiewicz A, Kliszczewicz A. Recykling betonu konstrukcyjnego – cz. I. Inżynier Budownictwa, luty 2009.
- [5] Ustawa z 14 grudnia 2012 r. o odpadach. Dz. U. z 8 stycznia 2013 r., poz. 21.
- [6] Rozporządzenie Ministra Środowiska z 11 maja 2015 r. w sprawie odzysku odpadów poza instalacjami i urządzeniami. Dz. U. z 12 czerwca 2015 r., poz. 796.
- [7] Raport z projektu nr RID 06: „Wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu. Rozwój Innowacji Drogowych, niepublikowany, <https://www.gov.pl/web/gddkia/wytyczne-projektow-rid>. [Dostęp: 13 lutego 2025].

- [8] Pachowski J, Kraszewski C, Dąbrowski M, Dreger M, Przygoda M, Szpikowski M, Wileński P. Wpływ technologii zagęszczania na właściwości materiałów gruboziarnistych stosowanych do warstw mrozochronnych. IBDiM, Laboratorium Geotechniki, Raport nr TG-153, 2005, Warszawa, listopad 2005, [Online]. Dostępne: https://www.archiwum.gddkia.gov.pl/userfiles/articles/p/prace-naukowo-badawcze-zrealizow_3435/documents/tg-153.pdf. [Dostęp: 13. lutego 2025].
- [9] PN-EN 13242+A1:2010 Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym.
- [10] PN-EN 13285:2018-08 Mieszanki niezwiązane – Specyfikacja.
- [11] Kulisch D, Katz A, Zhutovsky S. Quantification of residual unhydrated cement content in cement pastes as a potential for recovery. Sustainability. 2023; <https://doi.org/10.3390/su15010263>.
- [12] Abbas A, Fathifazl B, Fournier B, Isgord OB, Zavadile R, Razaqpur AG, Foog S. Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis. Materials Characterization. 2009; doi: 10.1016/j.matchar. 2009.01.010.
- [13] Krawczyk B, Szydło A, Mackiewicz P, Dobrucki D. Przydatność kruszyw z recyklingu nawierzchni betonowych do warstw z mieszanek niezwiązanych i związanych cementem. Roads and Bridges – Drogii Mosty. 2018; doi: 10.7409/rabdim.018.003.
- [14] Abbas A, Fathifazl B, Isgor O.B, Razaqpur AG, Fournier B, Foo S. Proposed method for determining the residual mortar content of recycled concrete aggregates. Journal of ASTM International. 2007; 5, 1: 1 – 12.
- [15] Pacheco-Torgal F, Ding Y. Handbook of recycled concrete and demolition waste. Elsevier, 2013.
- [16] Chai L, Monismith CL, Harvey J. Re-Cementation of Crushed Material in Pavement Bases. Pavement Research Center, University of California: Berkeley and Davis, CA, USA, 2009.
- [17] Edil TE, Benson C, Tinjum JM, Gregory J, Scheartle GJ, Bozyurt O, Nokaew K, Chen J, Bradshaw S. Engineering properties of recycled materials for unbound applications. Recycled Materials Resource Center, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI 53706 USA, 2011.
- [18] Pereira PM, Vieira CS. A Literature Review on the Use of Recycled Construction and Demolition Materials in Unbound Pavement Applications. Sustainability. 2022; doi.org/10.3390/su142113918.
- [19] Duszyński A. Ocena jakości kruszyw stosowanych w budownictwie komunikacyjnym po rozdrobnieniu w bębnie Los Angeles. Magazyn Autostrady. 2012; 5: 54 – 56.
- [20] Liu Y, Lu Ch, Zhang H, Li J. Experimental study on chemical activation of recycled powder as a cementitious material in mine paste backfilling. Environ. Eng. Res. 2016; doi: org/10.4491/eer. 2015.129.
- [21] Macedo R. dos S., Ulsen C., Mueller A.: Quantification of residual cement paste on recycled concrete aggregates containing limestone by selective dissolution. Construction and Building Materials. 2019; doi: org/10.1016/j. conbuildmat. 2019.116875
- [22] Nedeljković M, Ghiassib B, Sieger van der Laan, Lia Z, Yea G. Effect of curing conditions on the pore solution and carbonation resistance of alkali-activated fly ash and slag pastes. Cement and Concrete Research. 2019; doi.org/10.1016/j.cemconres. 2018.11.011.
- [23] Vashistha P, Park S, Pyo S. A review on sustainable fabrication of futuristic cementitious binders based on application of waste concrete powder, steel slags, and coal bottom ash. Int J Concr Struct Mater. 2022; doi: org/10.1186/s40069-022-00541-9.
- [24] Wan X, Li H, Che X, Xu P, Li Ch, Yu Q.: A study on the application of recycled concrete powder in an alkali-activated cementitious system. Processes. 2023; doi: org/10.3390/pr11010203.
- [25] Barbudo A, Agrela F, Ayuso J, Jiménez JR, Poon CS. Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. Construction and Building Materials. 2012; 28: 129 – 138.
- [26] Arshad M. Development of a Correlation between the Resilient Modulus and CBR Value for Granular Blends Containing Natural Aggregates and RAP/RCA Materials. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, doi: org/10.1155/2019/8238904.
- [27] Kalinowska-Wichrowska K, Pawluczuk E. Nowoczesna metoda recyklingu betonu. budownictwo • technologie • architektura październik – grudzień 2019.
- [28] Krivenko P, Drochytka R, Gelevera A, Kavalerova E. Mechanism of preventing the alkali–aggregate reaction in alkali activated cement concretes. Cement & Concrete Composites. 2014; doi: org/10.1016/j.cemconcomp. 2013.10.003.
- [29] RID 06, Załącznik nr 9.6 Wytyczne wykorzystania materiałów pochodzących z recyklingu nawierzchni betonowych. Projekt realizowany w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia RID „Wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu”, finansowany ze środków NCBiR oraz GDDKiA. Warszawa 2018, <https://www.gov.pl/web/gddkia/recykling>. [Dostęp: 13. lutego 2025].
- [30] Krawczyk B, Szydło A, Mackiewicz P, Dobrucki D. Kryteria oceny podbudów związanych cementem zawierających kruszywa pochodzące z recyklingu. Roads and Bridges – Drogii Mosty. 2019; doi: 10.7409/rabdim.019.007.
- [31] Phan TH. Laboratory and field investigations of recycled portland cement concrete subbase aggregates. Dissertation. Iowa State University, Ames, Iowa, 2010.
- [32] PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego – Metoda przesiewania.
- [33] PN-EN 1097-6:2022-07 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 6: Oznaczanie gęstości ziarn i nasiąkliwości.
- [34] PN-EN 1367-1:2007 Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych – Część 1: Oznaczanie mrozoodporności.
- [35] PN-EN 13286-47: 2022-04 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym – Część 47: Metoda badania do określenia kalifornijskiego wskaźnika nośności, natychmiastowego wskaźnika nośności i pęcznienia liniowego.