

## Niemielony żużel granulowany jako zamiennik kruszywa naturalnego w produkcji betonu

## Unground granulated slag as a substitute for natural aggregate during concrete production

**Stefan Krispel\*, Helga Zeitlhofer, Martin Peyerl**

Smart Minerals GmbH, TU Wien Science Center

\*corresponding author: S. Krispel, e-mail: [Krispel@smartminerals.at](mailto:Krispel@smartminerals.at)

### Streszczenie

W celu oceny przydatności niemielonego żużla granulowanego do produkcji betonu, jako częściowego zamiennika kruszywa drobnego, zastępującego piasek, przeprowadzono szczegółowe badania wpływu tego dodatku na właściwości świeżego i stwardniałego betonu. Badania te objęły wytrzymałość na ściskanie, oznaczenie modułu sprężystości, ocenę trwałości przez oznaczenie odporności na zamrażanie i rozmrażanie, wpływ na właściwości betonów, dojrzewających w warunkach zimowych, to jest przechowywanie w temperaturze +10°C i letnich, w temperaturze 20°C. Następnie zbadanie odporności na działanie chlorków i na karbonatyzację, w końcu ocena odporności na ługowanie przy użyciu metody kwasowej. Długotrwałymi badaniami objęto także reakcję krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu. W końcu przeprowadzono badania na dużą skalę, w rzeczywistych warunkach konstrukcyjnych, w austriackiej fabryce prefabrykatów. W tych warunkach doświadczenia dotyczyły głównie długotrwałych pomiarów rozwoju wytrzymałości elementów prefabrykowanych. W celu oceny przydatności niemielonego żużla granulowanego, jako częściowego zamiennika kruszywa drobnego, wyprodukowano i oceniono betony z dwoma różnymi zawartościami żużla granulowanego – 10% i 15% masowych. Do badań stosowano niemielone żużle granulowane, pochodzące z dwóch austriackich zakładów produkcyjnych – w Górnej Austrii i Styrii. Wykorzystano świeże i stare żużle granulowane z obu lokalizacji, ponieważ już składowane żużle mogą być również wykorzystywane, jako surowiec do produkcji betonu. Przedstawione w pracy wyniki wskazują na możliwość zastąpienia kruszywa naturalnego o frakcji < 4 mm, niemielonym żużlem granulowanym, bez negatywnego wpływu na właściwości betonu

**Słowa kluczowe:** niemielony żużel, żużel jako zamiennik piasku, właściwości betonu z niemielonym żużlem, odporność betonu na niskie temperatury

### Summary

In order to evaluate the usefulness of unground granulated slag for the concrete production, as the partial replacement of fine aggregate – namely sand, the detailed studies of the influence of this addition on the properties of the fresh and hardened concrete were conducted. These studies included the compression strength and the modulus of elasticity determination, as well as the evaluation of durability by the determination of frost resistance. The evaluation of the properties of concretes hardened under winter conditions, at +10°C and summer conditions at +20°C. These studies also covered the resistance to chloride attack and carbonization. The long-lasting examination covered also the ASR. At the end, under real construction conditions in the Austrian prefabrication plant, the unground granulated slag was examined. Under these conditions especially the long-lasting measurements of the strength development of the precast elements were verified. In order to evaluate the usefulness of the unground granulated slag, as partial replacement of fine aggregate, the concretes with the additions of slag of 10% and 15% were produced and examined. For this evaluation, the slags of two Austrian plants from Upper Austria and Styria were used. The old and fresh slags from these two plants were used because the old slags can also be adopted for concrete production. Presented in the paper results are confirming that the natural aggregate of the fraction < 4 mm can be successfully replaced by unground granulated slag, without any negative influence on the properties of concrete.

**Keywords:** unground granulated slag, fine aggregate, concrete properties, concrete frost resistance with slag addition

## 1. Wprowadzenie

Na całym świecie zapotrzebowanie na piasek budowlany wynosi od 10 do 15 miliardów ton (1). Całkowite zużycie piasku, w tym piasku przemysłowego, wynosi od 2 do 8 ton na osobę, rocznie. Oznacza to, że w celu zaspokojenia całego zapotrzebowania należy wydobyć od 40 do 50 miliardów ton piasku i żwiru (2). To sprawia, że piasek jest drugim po wodzie najlepiej sprzedającym się zasobem naturalnym (3).

Piasek jest niezbędny dla przemysłu budowlanego, a w szczególności dla przemysłu betonowego, jak również dla betonu towarowego i prefabrykatów. Pozytywny rozwój budownictwa, zwłaszcza ze względu na rozrost przestrzeni miejskich, prowadzi z jednej strony do zwiększonego zapotrzebowania, a z drugiej do częściowego niedoboru zasobów naturalnych do produkcji betonu. Zapotrzebowanie na piasek rośnie coraz szybciej, w miarę jak udaje się odkryć odpowiednie zasoby piasku. Prowadzi to do sytuacji, w której piasek jest wytwarzany z grubego kruszywa – żwiru, lub transportowany na duże odległości (2).

Większość budynków jest zbudowana z betonu, który składa się w 50-60% z piasku. Na każdy średniej wielkości dom potrzeba 200 ton piasku; na każdy kilometr autostrady potrzeba 30.000 ton piasku (2). W związku z tym zapotrzebowanie na piasek jest duże. Z geologicznego punktu widzenia kruszywo jest dostępne na wystarczającą skalę. Większość potencjalnych miejsc wydobycia konkuruje z różnego rodzaju obszarami ochronnymi, terenami zamieszkałymi i rolniczymi. Procedury zatwierdzania kopalń w celu zabezpieczenia dostaw surowców stają się coraz bardziej złożone, trwają dłużej i nie zawsze przynoszą pozytywne rezultaty (4). Dlatego sensowne byłoby korzystanie z alternatywnych źródeł, aby zmniejszyć wpływ na środowisko, np. ze względu na transport, zwłaszcza jeżeli są one dostępne w regionie. Innym źródłem surowców mogą być na przykład przemysłowe produkty uboczne.

Wykorzystanie niezmielonego żużla granulowanego w obszarze handlu do produkcji surowego żelaza, jest dobrą alternatywą dla wykorzystania naturalnego kruszywa drobnego, czyli piasków. W wyniku gaszenia ciekłego żużla wielkopieczowego uzyskuje się dobrze zestalony, drobnoziarnisty piasek (5). Do produkcji betonu i spoiw żużel granulowany jest drobno mielony. Na właściwości cementu szczególny wpływ ma skład chemiczny i fazowy oraz reaktywność użytych składników, a także stopień rozdrobnienia i skład ziarnowy kruszywa (5).

Wykorzystanie niezmielonego żużla granulowanego do produkcji cementu było w przeszłości wymieniane w wielu publikacjach (6 – 11). Na jakość niezmielonego żużla granulowanego mają wpływ warunki prowadzenia procesu, chłodzenia i granulacji, oraz stosowane surowce w postaci rudy. Celem projektu badawczego zainicjowanego przez Smart Minerals GmbH w Wiedniu (12) jest podstawowa ocena przydatności dostępnego w Austrii niezmielonego żużla granulowanego, do produkcji betonu zgodnie z krajowymi przepisami i dyrektywami normatywnymi.

## 1. Introduction

10 to 15 billion tons of construction sand are needed worldwide (1). The total consumption of sand, including industrial sand, amounts to 2 to 8 tons per capita, per year. This means that 40 to 50 billion tons of sand and gravel need to be mined in order to meet the entire demand (2). This makes sand the second bestselling natural resource after water (3).

The material sand is essential for the construction industry and more specifically for the concrete industry, as well as for the ready-mix concrete, as for the prefabricated component field. The positive development of the construction industry, not least especially because of the growth of urban spaces, on the one hand leads to an increased demand and on the other hand to a partial shortage of natural resources for concrete production. The demand for sand is growing faster as appropriate sand resources can be identified. This leads to the situation that sand is manufactured from coarse aggregate (gravel) or transported over long distances (2).

Most buildings are built of concrete, which consists of 50 to 60 % sand. For every average-sized house, 200 tons of sand are necessary; for every kilometre of a highway, 30.000 tons of sand are needed (2). The demand for sand is consequently high. From a geological point of view, aggregate is available on a sufficient scale. The majority of potential extraction sites are in competition with protected areas of various sorts, inhabited and agricultural areas. Mining approval procedures for securing raw material supply are becoming increasingly complex, take longer and do not always have a positive outcome (4). Therefore, it would make sense to use alternative sources, in order to decrease the ecological influence e.g. due to transport, especially if these are available within the region. Other sources for raw materials could, for example, be industrial by-products.

The usage of unground granulated slag within the trading area for raw iron production is a good alternative to the usage of natural, fine aggregate [sands]. The quenching of the liquid blastfurnace slag produces a virtuously solidified, fine granulated sand (5). For the production of concrete and binders, granulated slag is finely grounded. Cement characteristics are especially influenced by the chemical and phase composition as well as the reactivity of the components used, and also grinding fineness and grain size distribution (5).

The usage of unground granulated slag for cement production was mentioned in many publications in the past (6 – 11). The quality of unground granulated slag is influenced by the process conditions [cooling, granulation] and the used raw materials [ores]. The goal of the research project initiated by the Smart Minerals GmbH [Vienna] (12), is the basic assessment of the suitability of the unground granulated slag that is available in Austria, for concrete production within the national regulations respectively normative directives.

## 2. Warunki brzegowe dla produkcji betonu

Istnieją obszerne dyrektywy krajowe, które mają na celu spełnienie wymagań budownictwa i przemysłu przetwórczego, takich jak urabialność świeżego betonu, wytrzymałość na ściskanie stwardniałego betonu i trwałość wznoszonego budynku. Te kryteria jakościowe dla betonu reguluje austriacka norma ÖNORM B 4710-1 (13), będąca krajową transpozycją normy ÖNORM EN 206 (14). Normy te zawierają również wytyczne dotyczące stosowania betonowych materiałów źródłowych, a także odniesienia do kolejnych niezbędnych norm i dyrektyw. Wymagania dotyczące kruszyw do produkcji betonu określono w normach ÖNORM EN 12620 (15) i ÖNORM B 3131 (16). Wymagania i metody badań świeżego i stwardniałego betonu są częścią normy ONR 23303 (17). Ogólnie rzecz biorąc, nie ma różnic w przepisach dotyczących betonu stosowanego w przemyśle prefabrykacji lub w wytwórniach betonu towarowego.

Oznacza to, że z jednej strony żużle granulowane, stosowane jako kruszywo, spełniają wymagania stawiane surowcowi betonowemu – czyli kruszywom, a z drugiej strony beton produkowany z żużli granulowanych musi spełniać przepisy określone w różnych normach, dotyczących betonu. Dodatkowo należy uwzględnić specyficzne przepisy, a mianowicie RVS 08.17.02 (18) dla specjalnych zastosowań, takich jak produkcja nawierzchni betonowych.

## 3. Treść projektu

Aby ocenić przydatność niezmielonego żużla granulowanego do produkcji betonu, do szeroko zakrojonych badań wybrano materiał z dwóch różnych zakładów produkcyjnych – Górnej Austrii i Styrii. Ze względu na oszczędność zasobów, interesujące jest również wykorzystanie magazynowanych w zakładach żużli. Dlatego do programu badań włączono oprócz świeżego, niezmielonego żużla granulowanego, również starszy niezmielony żużel granulowany, z obu zakładów.

Aby wyprodukować odpowiednio klasyczny beton, konieczna jest maksymalna spójność, odpowiednio minimalny poziom fluktuacji właściwości surowców betonowych. Niezmielone żużle granulowane zostały sprawdzone pod względem właściwości fizycznych i technicznych, zgodnie z obowiązującymi zasadami i porównane z uprzednio zdefiniowanymi wymaganiami.

Na dowód uzyskania właściwości fizycznych, chemicznych i innych właściwości technicznych, przeprowadzono następujące oceny kruszywa dla uzyskanych, niezmielonych żużli granulowanych:

Oznaczenie:

- gęstości ziarna zgodnie z normą ÖNORM EN 1097-6 (19),
- składu ziarnowego zgodnie z normą ÖNORM EN 933-1 (20),
- zawartości CO<sub>2</sub> badaną absorpcją w podczerwieni (ELTRA CW 800),
- mrozoodporności zgodnie z normą ONR 23303 (17),
- zawartości chlorków zgodnie z normą ÖNORM EN 1744-1 (21),

## 2. Boundary conditions for concrete production

There are comprehensive national directives to reach the builder's respectively the processing industry's specifications, such as the workability of fresh concrete, the compressive strength of the hardened concrete and the durability of the erect building. These quality criteria for concrete are regulated in the Austrian standard ÖNORM B 4710-1 (13), the national transposition of ÖNORM EN 206 (14). This framework also offers directives for the usage of concrete source materials respectively, also consists of references to subsequent necessary norms and directives. The requirements for aggregates for concrete are determined in ÖNORM EN 12620 (15) and ÖNORM B 3131 (16). Requirements and testing procedures for fresh concrete as well as hardened concrete are part of ONR 23303 (17). In general, there are no differences in the regulations for concrete used in prefabrication industry, or ready mixed concrete plants.

This means, on one hand granulated slags, used as aggregate, fulfill the requirements for the raw material of concrete – i.e. aggregates, and on the other hand, concrete produced of granulated slags, needs to fulfill the regulations prescribed in various concrete standards. Additionally, specific regulations such as the RVS 08.17.02 (18) for special applications like the production of concrete pavements, have to be taken into account.

## 3. Project content

To assess the suitability of unground granulated slag for concrete production, materials from two different production sites – Upper Austria and Styria, were selected for extensive investigations. For reasons of saving resources, the usage of already deposited materials, is also of interest. Therefore, additionally to fresh unground granulated slag, older unground granulated slag from both sites, were included in the research program.

In order to produce accordingly regular concrete, a maximum consistency, respectively a minimum fluctuation level of the characteristics of the concrete raw components is necessary.

The unground granulated slags have been checked for their physical and technical properties according to the underlying set of rules and juxtaposed to the pre-defined requirements.

In proof of the delivery of the physical, chemical and other technical properties, the following aggregate assessments have been conducted to the extracted, unground granulated slags:

Determination of the

- particle density according to ÖNORM EN 1097-6 (19),
- particle size distribution according to ÖNORM EN 933-1 (20),
- CO<sub>2</sub> content by IR Absorption (ELTRA CW 800),
- freeze-thaw resistance according to ONR 23303 (17),
- chloride content according to ÖNORM EN 1744-1 (21),

- zawartości siarczanów rozpuszczalnych w kwasie zgodnie z normą ÖNORM EN, 1744-1 (21),
- odporności na ścieranie  $D \leq 4$  mm zgodnie z normą RVS 11.06.23 (22).

Na podstawie tych badań dokonano oceny wpływu na jakość betonu, przy częściowym uzupełnieniu kruszywa drobnego, niezmielonym żużlem granulowanym. Zazwyczaj w Austrii, podobnie jak w innych krajach europejskich, produkcja betonu odbywa się według koncepcji opisowej. Oznacza to, że należy przestrzegać kryteriów historycznych i empirycznych, opartych na krajowym wpływie na środowisko. Oprócz wpływu granicznych warunków klimatycznych, w koncepcji tej uwzględnia się również wahania techniczne produkcji, na przykład dokładność dozowania i tolerancje dla pojedynczych parametrów (13).

Kryteria podstawowe są następujące:

- minimalna masa cementu, odpowiednio minimalna zawartość spoiwa,
- maksymalny stosunek wody do cementu, ewentualnie stosunek wody do spoiwa,
- zawartość powietrza w świeżym betonie,
- zawartość pustek powietrznych, a struktura stwardniałego betonu,
- zdefiniowane wymagania dla stosowanych surowców, tj. kruszywa i cementu.

Oceniono wpływ na właściwości świeżego i stwardniałego betonu oraz wytrzymałość w celu oceny przydatności niezmielonego żużla granulowanego, jako częściowego zamiennika kruszywa drobnego. Wyżej wymienione badania zostały przeprowadzone w laboratoriach Smart Minerals GmbH w Wiedniu.

Ocena właściwości świeżego betonu pozwala na zaklasyfikowanie go do odpowiednich danych technologicznych na placu budowy, tj. plastyczność, wydzielanie mlecza cementowego i skłonność do sedymentacji. Ocena trwałości materiałów ma ogromne znaczenie, jako jedna z głównych zalet budynków betonowych. Dokładnie wyprodukowany i prawidłowo użyty beton ma długi cykl życia i odporność na wpływy wszelkiego rodzaju czynników środowiskowych.

W zależności od obszaru zastosowania, beton w każdym przypadku musi być odporny na wpływy środowiska, a przede wszystkim na mróz i wpływy chemiczne, lub musi oferować odpowiednią odporność na penetrację chlorków, aby chronić zbrojenie.

Jeżeli wyprodukowany beton, ze względu na wybrane surowce, wykazuje niewystarczającą odporność na jakiegokolwiek narażenie, wówczas zastosowanie dla danego oddziaływania jest niedopuszczalne. Praktyczne względy budowlane i odpowiednie ograniczenia, a przede wszystkim czas rozebrania szalunków, muszą być również brane pod uwagę przy ewentualnym stosowaniu nowych mieszanek betonowych. Wydłużenie czasu szalowania, wynikające z mniejszej szybkości twardnienia betonu, należałoby ocenić jako wysoce negatywne, ze względu na wynikający

- acid-soluble sulphate content according to ÖNORM EN 1744-1 (21),
- resistance against polishing  $D \leq 4$  mm according to RVS 11.06.23 (22).

Based on these investigations an evaluation of the impact of the concrete quality during partial supplementation of the fine aggregate with the unground granulated slag, was conducted. Usually, in Austria, as in the other European countries, the production of concrete follows a descriptive concept. Meaning, that historical and empirical criteria, based on the national environmental impact, have to be followed. Additionally, to the impact of climatic boundary conditions, production technical fluctuations, like e.g. dosing accuracy and allowance of tolerances for singular parameters (13), are considered in this concept.

The essential criteria are:

- minimal cement mass respectively minimal binder content,
- maximal water-cement ratio respectively water binder ratio,
- air content of fresh concrete,
- air void content and structure of hardened concrete,
- defined requirements for the used raw materials, i.e. aggregate and cement.

The impacts of fresh and hardened concrete properties as well as durability parameters were evaluated to assess the usability of unground granulated slag, as the partial replacement for fine aggregate. The tests mentioned above were conducted in the laboratories of the Smart Minerals GmbH – Vienna.

Evaluation of fresh concrete properties helps to classify the concrete into relevant processing data at the building site, i.e. plasticity, bleeding, and sedimentation tendency. The assessment of the materials durability is of greatest importance, as one of the main advantages of concrete buildings, in general. Exactly produced and correctly used concrete has a long live cycle and resistance against impacts of all sorts of the environmental influences.

According to the application area, concrete, in all cases, has to be resistant against the environmental impact such as frost and chemical attack or has to offer an appropriate resistance against chloride penetration, to protect the reinforcement.

If the concrete produced, i.e. due to the chosen raw materials, shows an insufficient resistance against any exposure, then the usage for the respective exposition is not admissible. Construction practical considerations and respective constraints, as the stripping time, have to be considered for the possible usage of new concrete compositions as well. An extension of the shuttering times, based on the lower hardening speed of the concrete, would need to be assessed as highly negative, due to the resulting increase in expenses – principally provision of formwork material and extension of the construction time. Therefore, the assessment of the strength development was included in the testing program. Because of natural differences in the temperature of fresh concrete and environmental differences between summer and winter, compressive

z tego wzrost wydatków – głównie na zapewnienie materiału szalunkowego i wydłużenie czasu budowy. Dlatego też ocena rozwoju wytrzymałości została włączona do programu badań. Ze względu na naturalne różnice w temperaturze świeżego betonu oraz różnice środowiskowe pomiędzy latem i zimą, badania wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości przeprowadzono w temperaturze 20°C, dla przechowywania letniego i 10°C dla przechowywania zimowego.

W celu oceny wpływu częściowego zastąpienia kruszywa drobnego żużlem granulowanym, na uzyskane właściwości świeżego betonu, uwzględniono metody badawcze, które obejmują następujące oznaczenia:

- badanie konsystencji metodą rozplywu zgodnie z normą ONR 23303 (17) – krajowa transpozycja normy ÖNORM EN 12350-5 (23); 10, 30, 60 i 90 minut po dodaniu wody,
- zawartość powietrza w świeżym betonie zgodnie z normą ONR23303 – krajowa transpozycja normy ÖNORM EN 12350-7 (24),
- gęstość świeżego betonu zgodnie z normą ONR 23303 (17) – krajowa transpozycja normy ÖNORM EN 12350-6 (25),
- stopień zagęszczalności zgodnie z normą ONR 23303 (17) – krajowa transpozycja normy ÖNORM EN 12350-4 (34); 60 minut po dodaniu wody.

Dla każdego rodzaju betonu odnotowywano użycie superplastyfikatora oraz temperaturę świeżego betonu w °C.

Do oceny wpływu częściowego zastąpienia kruszywa drobnego żużlem granulowanym, na uzyskane właściwości stwardniałego betonu i odpowiednie parametry wytrzymałościowe, zastosowano następujące metody badawcze:

- oznaczenie wytrzymałości na ściskanie analogicznie do normy ONR 23303 (17) – krajowa transpozycja normy ÖNORM EN 12390-3 (26), po upływie 1, 2, 14, 28 i 56 dni,
- symulacja warunków zimowych, to jest przechowywanie w temperaturze 10°C,
- symulacja warunków letnich, a więc przechowywanie w temperaturze 20°C,
- oznaczenie statycznego modułu sprężystości zgodnie z normą ONR 23303 (17), po upływie 1, 2, 14, 28 i 56 dni,
- oznaczenie głębokości penetracji wody zgodnie z normą ONR 23303 (17) – krajowa transpozycja normy ÖNORM EN 12390-8 (27),
- ocena jednakowej trwałości dla klasy ekspozycji XF2 – odporność na zamrażanie – rozmrażanie z solami odladzającymi, zgodnie z normą ONR 23303 (17) – krajowa transpozycja normy ONR CEN/TS 12390-9 (28),
- ocena jednakowej trwałości dla klasy ekspozycji XF4 – odporność na zamrażanie-rozmrażanie z solami odladzającymi, zgodnie z normą ONR 23303 (17) – krajowa transpozycja normy ONR CEN/TS 12390-9 (28),

strength and modulus of elasticity were conducted at 20°C, for the summer storage and 10°C for the winter storage.

Following examination procedures were taken into consideration in order to assess the impact of the partial replacement of fine aggregate with granulated slag, on the resulting fresh concrete properties. It covers the following determinations:

- the flow table test according to ONR 23303 (17) – national transposition of ÖNORM EN 12350-5 (23); 10, 30, 60 and 90 minutes after adding water,
- the air content of the fresh concrete according to ONR23303 – the national transposition of ÖNORM EN 12350-7 (24),
- the density of the fresh concrete according to ONR 23303 (17) – the national transposition of ÖNORM EN 12350-6 (25),
- the degree of compactibility according to ONR 23303 (17) – the national transposition of ÖNORM EN 12350-4 (34); 60 minutes after adding water,

For each kind of concrete, the use of superplasticizer and concrete mix temperature in °C, were recorded.

The following test methods were used to assess the impact of the partial replacement of fine aggregate with granulated slag on the resulting hardened concrete properties and the respective durability parameters:

- determination of compressive strength analogue to ONR 23303 (17) – national transposition of ÖNORM EN 12390-3 (26), during the age of 1, 2, 14, 28 and 56 days,
- simulation of winter conditions i.e. storage at 10°C,
- simulation of summer conditions i.e. storage at 20°C,
- determination of the static modulus of elasticity according to ONR 23303 (17), during the age of 1, 2, 14, 28 and 56 days,
- determination of water penetration depth according to ONR 23303 (17) – national transposition of ÖNORM EN 12390-8 (27),
- assessment of an equal durability for the exposure class XF2 – freeze-thaw resistance with de-icer salts, according to ONR 23303 (17) – national transposition of ONR CEN/TS 12390-9 (28),
- assessment of an equal durability for the exposure class XF4 – freeze-thaw resistance with de-icer salts, according to ONR 23303 (17) – national transposition of ONR CEN/TS 12390-9 (28),
- assessment of chloride resistance – unidirectional diffusion according to ÖNORM EN 12390-11 (29),
- assessment of carbonation resistance – accelerated carbonation method analogue to ÖNORM EN 12390-12 (30),
- assessment of the resistance to dissolving attack with acid test facility (31),
- assessment of alkali-silica reaction according to ÖNORM B 3100 (32),
- the rapid prism test,
- the long-term test of concrete.

- ocena odporności na działanie chlorków – jednokierunkowa dyfuzja zgodnie z normą ÖNORM EN 12390-11 (29), ÖNORM EN 12390-11 (29),
- ocena odporności na karbonizację – metoda przyspieszonej karbonizacji, analogiczna do normy ÖNORM EN 12390-12 (30),
- ocena odporności na działanie rozpuszczające przy użyciu metody kwasowej (31),
- ocena reaktywności krzemionkowej z wodorotlenkami Na i K zgodnie z normą ÖNORM B 3100 (32),
- szybkie badanie beleczek,
- długoterminowe badanie betonu.

W celu oceny zastosowania niezmielonego żużla granulowanego, jako zamiennika kruszywa, przeprowadzono badania na dużej skalę w rzeczywistych warunkach konstrukcyjnych, w austriackiej fabryce prefabrykatów<sup>1)</sup>. Skład betonu, po odjęciu niezmielonego żużla granulowanego, przyjęto zgodnie z podanym projektem mieszanki betonowej producenta prefabrykatów – z wykorzystaniem istniejących na miejscu dalszych surowców, a mianowicie cementu, superplastyfikatorów i kruszywa. W ten sposób możliwa była realistyczna ocena potencjalnego wpływu wymiany kruszywa, w porównaniu z normalnymi wyrobami producenta.

## 4. Wyniki

### 4.1. Fizyczne, chemiczne i inne techniczne właściwości niezmielonych żużli granulowanych

Na rysunku 1 pokazano przegląd najważniejszych wyników badań, fizycznych i chemicznych. Do oceny wykorzystano świeże i stare żużle granulowane, z obu austriackich zakładów produkcyjnych. Jako wartości porównawcze do wartości żądanych stosuje się przepisy dotyczące agregatów, z odpowiednich norm austriackich.

Przedstawione wyniki wyraźnie pokazują, że wszystkie wymagania – dla świeżych i starych żużli granulowanych – zostały spełnione. Jedynym wyjątkiem są wymagania dotyczące odporności na ścieranie [PWS-F], przy budowie nawierzchni betonowych. Należy zaznaczyć, że niezmielony żużel granulowany ma zastąpić tylko część frakcji piaskowej – np. 10% masy, lub odpowiednio 15% masy całego kruszywa. Do badań odporności na polerowanie użyto kruszywa o frakcji 0,2/0,4 mm, z niezmielonych żużli granulowanych. W praktyce nie jest to możliwe ze względu na wymagania dotyczące krzywej uziarnienia betonu – zapewnienie urabialności betonu, co oznacza, że podczas produkcji betonu stosuje się mieszankę piasku naturalnego i niezmielonego żużla granulowanego. Przy zastosowaniu tej mieszanki, z odpowiednim piaskiem naturalnym, można było osiągnąć wymagania dotyczące odporności na polerowanie PWS-F.

W celu wyprodukowania zwykłego betonu konieczna jest maksymalna stałość, lub minimalny poziom wahań właściwości, składników betonu. W związku z tym przeprowadzono ocenę krzywej uziarnienia niezmielonego żużla granulowanego, ponieważ rozkład

In order to assess the use of unground granulated slag as the aggregate replacement, large-scale testing was conducted under realistic constructive conditions in an Austrian precast factory<sup>1)</sup>. The concrete composition, minus the unground granulated slag, was assumed following the given concrete mix design of the precast manufacturer – using the existing further raw materials such as cement, superplasticizers, and aggregates on site. Doing so, a realistic assessment of the potentially given impact of the aggregate replacement in contrast to the usual production of the manufacturer was made possible.

## 4. Project outcomes

### 4.1. Physical, chemical and further technical properties of unground granulated slags

Following chart 1 concludes the overview of the most relevant outcomes of the physical and chemical testing. Fresh and old granulated slags of both Austrian production sites were used for the assessment. The regulations for the aggregates of the relevant Austrian standards are used as comparative, respectively to the demanded values.

The presented results show clearly, that all demands – for fresh and old granulated slags, have been met. The only exception is the requirement for the polishing resistance [PWS-F] for the construction of concrete pavements. It should be noted, that the unground granulated slag is supposed to replace only a part of the sand fraction – e.g. 10% by mass respectively 15% by mass of the total aggregates. The aggregate fraction 0,2/0,4 mm of the unground granulated slags was used for testing the polishing resistance. In practice, this is not possible due to the demands for the grading curve of the concrete (securing workability of the concrete); meaning that during concrete production a mix of natural sand and unground granulated slag is used. When using this mixture, with suitable natural sand, the demands on the polishing resistance PWS-F could be achieved.

In order to produce regular concrete, the maximum consistency, respectively a minimum fluctuation level of the properties of the concrete constituents, is necessary. Therefore, an assessment of the grading curve of the unground granulated slag was conducted, since the grain size distribution of the aggregates is one of the main influences of fresh concrete properties. The production consistency was tested by conducting sieve tests of the ungrounded slag. 16 single samples per location were taken directly from the manufacturing at different times and tests of the particle size distribution (sieve test) according to ÖNORM EN 933-1 [20] were performed. Fig. 1 displays the results of the sieve tests, during an observation period of two months, at the production location 1, for the fresh unground, granulated slag. The minimal fluctuation of the tested samples is clearly visible.

<sup>1)</sup> Precast manufacturer Micheldorf, MABA Fertigteilindustrie GmbH

Properties / Właściwości	Unit Jednostka	Granulated slag fresh, location 1 Żużel granulowany świeży, zakład 1	Granulated slag old, location 1 Żużel granulowany stary, zakład 1	Granulated slag fresh, location 1 Żużel granulowany świeży, zakład 1	Granulated slag old, location 1 Żużel granulowany stary, zakład 1	ÖNORM EN 12620 (15)	ÖNORM B 4710-1 (13)	RVS 08.17.02 (18)
Particle density Gęstość ziaren kruszywa	g/cm <sup>3</sup>	2.70	2.74	2.81	2.83	-	-	-
CO <sub>2</sub>	%	0.09	0.12	0.06	0.06	-	≤ 15 (XA2L) <sup>3)</sup> ≤ 5 (XA3L) <sup>3)</sup>	-
Freeze-thaw-resistance <sup>1</sup> Odporność na zamrażanie i rozmarzanie <sup>1</sup>	g/m <sup>2</sup>	79	87	51	53	-	225 <sup>2)</sup> (= FS <sub>1</sub> )	-
Chloride content Zawartość chlorków	%	0.003	0.004	0.005	0.006	≤ 0.01	≤ 0.01	-
Sulphate content acid-soluble Zawartość siarczanów rozpuszczalnych w kwasie	%	0.06	0.10	0.07	0.08	≤ 0.8	≤ 0.8	-
Polishing resistance PWS-F Odporność na ściskanie PWS-F	-	0.44	0.35	0.43	0.42	-	-	≥ 0.5

<sup>1)</sup> Testing according to ONR 23303 (17) of concrete – assessment of the scaling amount, as testing according to ÖNORM EN 12620 (15) following ÖNORM EN 1367-1 (33) is not conductible due to the necessary aggregate fraction = 8/16 in Austria (16) with unground granulated slags. / Badanie według normy ONR 23303 (17) betonu - ocena ilości zgorzeliny, ponieważ badanie według normy ÖNORM EN 12620 (15) zgodnie z normą ÖNORM EN 1367-1 (33) nie jest możliwe, ze względu na wymaganą frakcję kruszywa = 8/16 w Austrii (16) z niezmielonymi żużlami granulowanymi.

<sup>2)</sup> Demand value according to ONR 23303 (17): reference concrete – 25 g/m<sup>2</sup> + 200 g/m<sup>2</sup> / Wartość zapotrzebowania zgodnie z ONR 23303 (17): beton wzorcowy – 25 g/m<sup>2</sup> + 200 g/m<sup>2</sup>

<sup>3)</sup> Exposure class for resistance to chemical attacks / Klasa ekspozycji dla odporności na ataki chemiczne

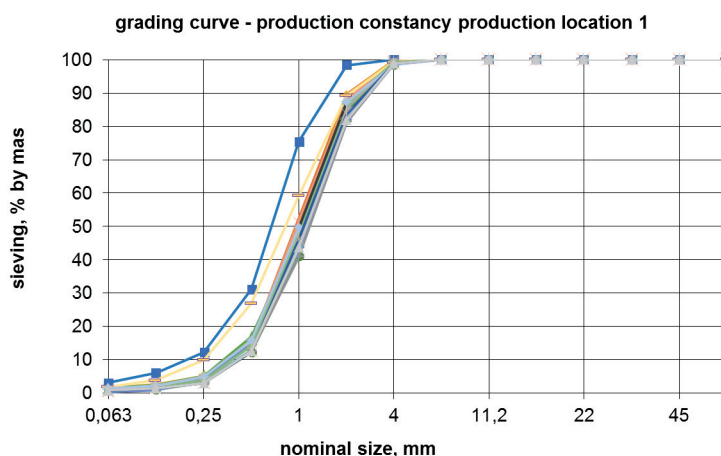
uziarnienia kruszywa jest jednym z głównych czynników wpływających na właściwości świeżego betonu. Stałość produkcji została sprawdzona przez przeprowadzenie badań składu uziarnienia niezmielonego żużla, na sitach. Z każdej lokalizacji pobrano 16 pojedynczych próbek, bezpośrednio z produkcji w różnym czasie i przeprowadzono badania rozkładu wielkości cząstek na sitach, zgodnie z normą ÖNORM EN 933-1 (20). Rysunek 1 przedstawia wyniki badań na sitach, podczas dwumiesięcznego okresu obserwacji, w zakładzie produkcyjnym 1, dla świeżego, niezmielonego żużla granulowanego. Wyraźnie widoczne są minimalne fluktuacje badanych próbek.

#### 4.2. Wyniki badań betonu

Zbadano 5 rodzajów betonów z 5 różnymi projektami mieszanek, w celu oceny wpływu zastąpienia części kruszywa – zastąpienie 10% masy i 15% całkowitej masy kruszywa, niezmielonym żużlem granulowanym.

Oznacza to, że dla każdego rodzaju betonu zbadano następujące warianty:

- beton wzorcowy – czyste kruszywo – bez dodatku żużla,
- zastąpienie kruszywa niezmielonym żużlem granulowanym:
  - 10% masowo – zakład produkcyjny 1,



Rys. 1. Rozkład wielkości cząstek świeżego, niezmielonego żużla granulowanego; miejsce produkcji 1. Okres obserwacji 2 miesiące; 16 próbek

Fig. 1. Particle size distribution of fresh unground granulated slag; production location 1. Observation period two months; 16 samples.

#### 4.2. Results of concrete tests

Five types of concrete with 5 different mix designs were tested, in order to assess the influence of the replacement of parts of the aggregate – replacement rate 10% of the mass and 15% of the total mass of aggregate, by unground granulated slag.

Tablica 2 / Table 2

ZBADANE ODMIANY BETONU

EXAMINED CONCRETE VARIETIES

Concrete / Betony	Concrete 1 (B-1-X <sup>1</sup> /X <sup>2</sup> ) Beton 1 (B-1-X <sup>1</sup> /X <sup>2</sup> )	Concrete 2 (B-2- X <sup>1</sup> /X <sup>2</sup> ) Beton 2 (B-2- X <sup>1</sup> /X <sup>2</sup> )	Concrete 3 (B-3- X <sup>1</sup> /X <sup>2</sup> ) Beton 3 (B-3- X <sup>1</sup> /X <sup>2</sup> )	Concrete 4 (B-4- X <sup>1</sup> /X <sup>2</sup> ) Beton 4 (B-4- X <sup>1</sup> /X <sup>2</sup> )	Concrete 5 (B-5- X <sup>1</sup> /X <sup>2</sup> ) Beton 5 (B-5- X <sup>1</sup> /X <sup>2</sup> )
Application Zastosowanie	Prefabrication plant	Ready-mix concrete. external application	Transport concrete. exterior component with freeze-thaw resistance with de-icing salts	Upper course concrete. concrete pavement for road construction	Lower course concrete. concrete pavement for road construction
Exposition Klasy ekspozycji	XC4/XW1/XD2/ XF1/XA1L	XC4/XW1/XD2/XF1/ XA1L	XC4/XW2/XD2/XF2/XF3/ XA1L	XC4/XW2/XD3/XF4/ XA1L	XC4/XW2/XD3/XF4/ XA1L
Technical code Norma	ÖNORM B 4710-1	ÖNORM B 4710-1	ÖNORM B 4710-1	RVS 08.17.02	RVS 08.17.02
Cement type Rodzaj cementu	CEM II/A-M (S-L) 42.5 R	CEM II/A-S 42.5 R	CEM II/A-S 42.5 R	CEM II/B-S 42.5 N (DZ <sup>3</sup> )	CEM II/B-S 42.5 N (DZ <sup>3</sup> )
Cement content Zawartość cementu, kg/m <sup>3</sup>	420	260	340	450	350
Content of additive Zawartość dodatków, kg/m <sup>3</sup>	-	50	-	-	-
Water content Zawartość wody, kg/m <sup>3</sup>	160	150	160	170	150
W/C-ratio Stosunek W/C	0.38	0.50	0.47	0.38	0.43
Type of aggregate Rodzaj kruszywa	Rotund grain, carbonatic Ziarno okrągłe, węglanowe	Rotund grain, carbonatic Ziarno okrągłe, węglanowe	Rotund grain, carbonatic Ziarno okrągłe, węglanowe	Crushed, siliceous Kruszone, krzemionkowe	Rotund grain, carbonatic Ziarno okrągłe, węglanowe
Replacement-rate natural aggregate, % by mass Wskaźnik zastąpienia kruszywa naturalnego, % masowy	10 and 15	10 and 15	10 and 15	10 and 15	10 and 15

<sup>1</sup>) Production location 0: only natural aggregate; 1: location 1; 2: location 2 / Zakład produkcyjny 0: tylko kruszywo naturalne; 1: zakład 1; 2: zakład 2

<sup>2</sup>) replacement-rate of natural aggregate with unground granulated slag in % / wskaźnik zastąpienia kruszywa naturalnego niezmielonym żużlem granulowanym w %

<sup>3</sup>) DZ = "cement for concrete pavement" / DZ = „cement do nawierzchni betonowej”

- 15% masowo – zakład produkcyjny 1,
- 10% masowo – zakład produkcyjny 2,
- 15% masowo – zakład produkcyjny 2.

Do produkcji tych betonów użyto wyłącznie świeżego żużla granulowanego z obu zakładów.

W celu osiągnięcia maksymalnej przydatności praktycznej, mieszanki betonowe zostały sporządzone według receptur producentów elementów prefabrykowanych, to znaczy producentów betonu towarowego. W tablicy 2 zestawiono skład mieszanki oraz ekspozycję produkowanych i badanych betonów.

W tablicy 3 przedstawiono przykładowe zestawienie wyników badań świeżego betonu.

Nie stwierdzono większych wahań właściwości świeżego betonu, w przypadku częściowej wymiany na niezmielony żużel granulowany. Rozbieżności, np. w odniesieniu do zdolności technologicz-

It means, that for every concrete type the following variations were tested:

- reference concrete – pure aggregate – no slag was added,
- replacement of aggregate by unground granulated slag:
  - 10% by mass – production location 1,
  - 15% by mass – production location 1,
  - 10% by mass – production location 2,
  - 15% by mass – production location 2,

Only fresh granulated slag from both locations was used for the production of these concretes.

With the goal to reach maximum practical relevance, the concrete mixtures were created according to the recipes of the prefabrication part manufacturer – ready-mix concrete producers. Table 2 summarises mix design and exposure of the produced and tested concretes.



Tablica 3 / Table 3

## WYNIKI WŁAŚCIWOŚCI ŚWIEŻEGO BETONU

## RESULTS OF FRESH CONCRETE PARAMETERS

<b>Concrete 1 / Beton 1</b>					
Properties / Właściwości	B-1-0/0	B-1-1/10	B-1-1/15	B-1-2/10	B-1-2/15
Flow rate after 10 minutes / Rozpływ po 10 minutach, cm	31	32	40	33	36
Air content of fresh concrete after 10 minutes Zawartość powietrza w mieszance po 10 minutach, %	2,9	2,9	3,1	3,2	3,1
Density of fresh concrete after 10 minutes Gęstość mieszanki po 10 minutach, kg/m <sup>3</sup>	2452	2442	2440	2441	2440
Superplasticizer content in relation to the cement content Zawartość superplastyfikatora w stosunku do masy cementu, %	2,53	2,50	2,50	2,51	2,60
<b>Concrete 2 / Beton 2</b>					
Properties / Właściwości	B-2-0/0	B-2-1/10	B-2-1/15	B-2-2/10	B-2-2/15
Flow rate after 10 minutes / Rozpływ po 10 minutach, cm	51	51	53	48	49
Air content of fresh concrete after 10 minutes Zawartość powietrza w mieszance po 10 minutach, %	2,0	2,0	2,1	2,8	2,0
Density of fresh concrete after 10 minutes Gęstość mieszanki po 10 minutach, kg/m <sup>3</sup>	2461	2448	2446	2436	2442
Superplasticizer content in relation to the cement content Zawartość superplastyfikatora w stosunku do masy cementu, %	0,84	0,93	0,94	0,76	0,81
<b>Concrete 3 / Beton 3</b>					
Properties / Właściwości	B-3-0/0	B-3-1/10	B-3-1/15	B-3-2/10	B-3-2/15
Flow rate after 10 minutes / Rozpływ po 10 minutach, cm	46	52	52	54	54
Air content of fresh concrete after 10 minutes Zawartość powietrza w mieszance po 10 minutach, %	6,0	2,7	2,7	2,7	2,5
Density of fresh concrete after 10 minutes Gęstość mieszanki po 10 minutach, kg/m <sup>3</sup>	2334	2418	2428	2447	2451
Superplasticizer content in relation to the cement content Zawartość superplastyfikatora w stosunku do masy cementu, %	0,58	0,61	0,73	0,64	0,64
Properties / Właściwości	0,35	0,25	0,20	0,30	0,74
<b>Concrete 4 / Beton 4</b>					
Properties / Właściwości	B-4-0/0	B-4-1/10	B-4-1/15	B-4-2/10	B-4-2/15
Flow rate after 10 minutes / Rozpływ po 10 minutach, cm	5,5	5,5	5,0	5,5	5,8
Air content of fresh concrete after 10 minutes Zawartość powietrza w mieszance po 10 minutach, %	2382	2383	2384	2327	2312
Density of fresh concrete after 10 minutes Gęstość mieszanki po 10 minutach, kg/m <sup>3</sup>	1,35	1,26	1,20	1,20	1,20
Superplasticizer content in relation to the cement content Zawartość superplastyfikatora w stosunku do masy cementu, %	0,20	0,05	0,01	0,08	0,16
Properties / Właściwości	0,10	0,20	0,03	0,15	0,20
<b>Concrete 5 / Beton 5</b>					
Properties / Właściwości	B-5-0/0	B-5-1/10	B-5-1/15	B-5-2/10	B-5-2/15
Flow rate after 10 minutes / Rozpływ po 10 minutach, cm	4,5	5,1	5,4	5,5	5,8
Air content of fresh concrete after 10 minutes Zawartość powietrza w mieszance po 10 minutach, %	2309	2304	2291	2219	2294
Density of fresh concrete after 10 minutes Gęstość mieszanki po 10 minutach, kg/m <sup>3</sup>	1,26	1,25	1,30	1,20	1,20
Superplasticizer content in relation to the cement content Zawartość superplastyfikatora w stosunku do masy cementu, %	0,15	0,04	0,18	0,01	0,01
Properties / Właściwości	0,20	0,17	0,15	0,10	0,12

nej – stałości, można zrównoważyć dostosowując zawartość superplastyfikatora. W celu ilościowego określenia wpływu niezmielonego żużla granulowanego na konsystencję świeżego betonu oraz wyjaśnienia potrzeby dodatku superplastyfikatora, przeprowadzono dodatkowe badania, ze stałą zawartością superplastyfikatora. Do badań wykorzystano projekt mieszanki betonu 1 [B 1/X/X].

Porównanie wyników właściwości świeżego betonu wykazuje jedynie niewielkie wahania. Betony wyprodukowane z użyciem niezmielonego żużla granulowanego mają tendencję do nieznacznego zwiększania stałości właściwości, przy jednakowej zawartości superplastyfikatora.

Właściwością, która ma duże znaczenie dla praktyki budowlanej, jest wytrzymałość na ściskanie i jej rozwój, co jest bardzo ważne dla określenia czasu usunięcia szalunków. Na rysunkach 2, 3 i 4 przedstawiono przykłady zmian wytrzymałości na ściskanie dla obu metod przechowywania – letniego przechowywania w temperaturze +20°C i zimowego przechowywania w temperaturze +10°C.

Tablica 4 / Table 4

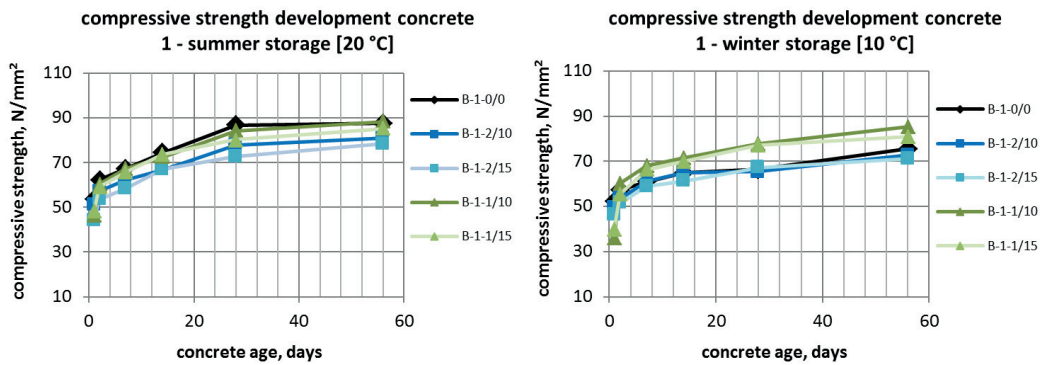
WYNIKI BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI ŚWIEŻEGO BETONU PRZY STAŁYM DODATKU SUPERPLASTYFIKATORA

RESULTS OF FRESH CONCRETE PARAMETERS DURING CONSTANT SUPERPLASTICIZER APPLICATION

Concrete 1 / Beton 1			
Properties / Właściwości	B-1-0/0	B-1-2/10	B-1-2/15
Water content / Zawartość wody, kg/m <sup>3</sup>	160	160	160
Superplasticizer content in relation to the cement Zawartość superplastyfikatora w stosunku do cementu, %	2,90	2,90	2,90
Flow after 10 minutes / Rozplływ po 10 minutach, cm	44	50	46
Flow after 30 minutes / Rozplływ po 30 minutach, cm	36	50	45
Flow rate after 60 minutes / Rozplływ po 60 minutach, cm	32	40	34
Flow after 90 minutes / Rozplływ po 90 minutach, cm	27	36	30

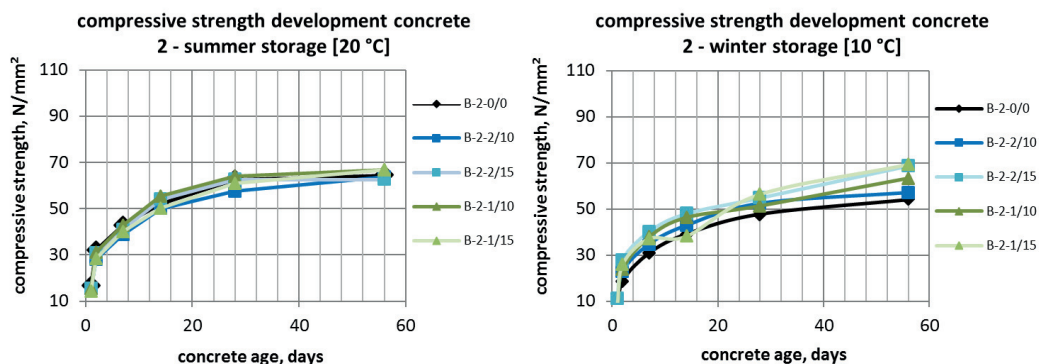
Table 3 gives an exemplary presentation of the overview of the results of the fresh concrete tests.

The fresh concrete properties show no significant fluctuations in the fresh concrete parameters, concerning the partial replacement with unground granulated slag. Discrepancies, e.g. in relation to the processability – consistency, can be balanced by adapting the superplasticizer content. To quantify the impact of unground granulated slag on the consistency of fresh concrete and clarify the superplasticizer demands, additional tests with constant su-



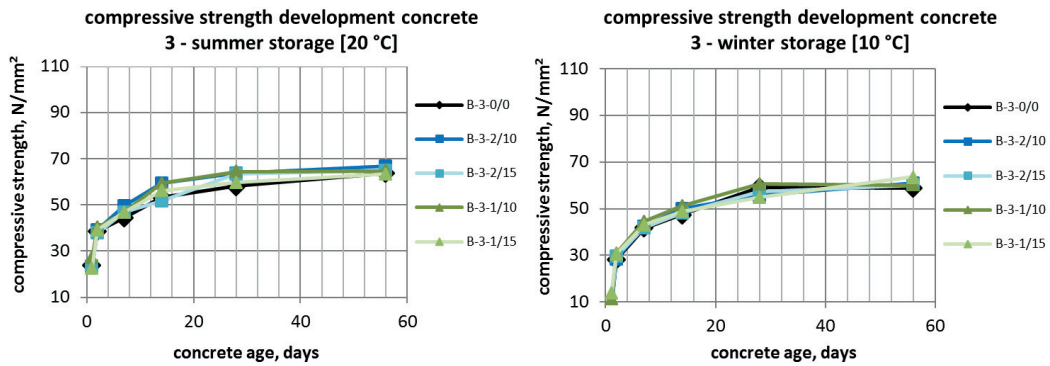
Rys. 2. Rozwój wytrzymałości na ściskanie betonu 1; po lewej przechowywanie letnie, po prawej przechowywanie zimowe

Fig. 2. Compressive strength development for concrete 1; left summer storage, right winter storage



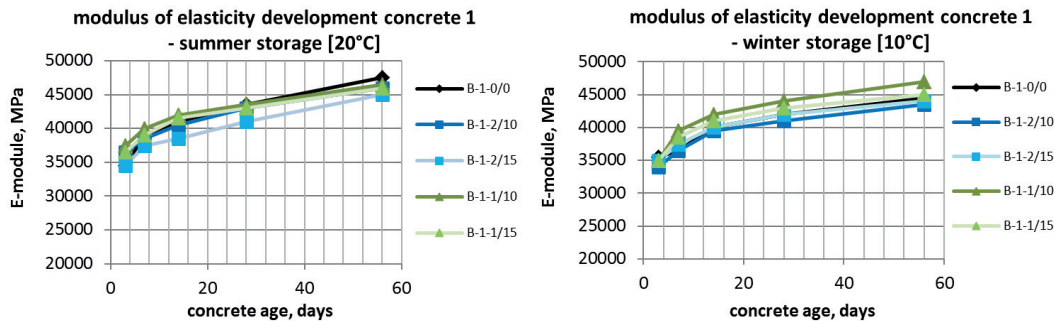
Rys. 3. Rozwój wytrzymałości na ściskanie betonu 2 – po lewej przechowywanie letnie, po prawej przechowywanie zimowe

Fig. 3. Compressive strength development of concrete 2 – left summer storage, right winter storage



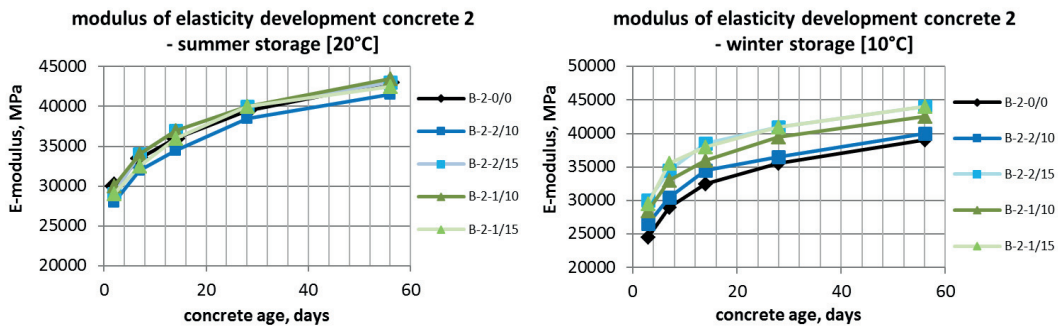
Rys. 4. Rozwój wytrzymałości na ściskanie betonu 3, po lewej przechowywanie letnie, po prawej przechowywanie zimowe

Fig. 4. Compressive strength development of concrete 3, left summer storage, right winter storage



Rys. 5. Wzrost modułu sprężystości dla betonu 1; po lewej przechowywanie letnie, po prawej przechowywanie zimowe

Fig. 5. E-module development concrete 1, left summer storage, right winter storage



Rys. 6. Wzrost modułu sprężystości dla betonu 2; po lewej przechowywanie letnie, po prawej przechowywanie zimowe

Fig. 6. E-module development concrete 2, left summer storage, right winter storage

W zależności od rodzaju betonu – wpływu zawartości cementu, rodzaju cementu i wskaźnika wodno/spoiwowego = wodno/cementowego – stwierdza się częściowo minimalne zmniejszenie wytrzymałości, przy stosowaniu niezmielonego żużla granulowanego, jako częściowego zamiennika kruszywa drobnego. Wahania te są zauważalne prawie wyłącznie podczas symulacji warunków letnich – temperatura składowania 20°C. W temperaturze składowania 10°C – symulacja zimowa betonu, który został uzupełniony niezmielonym żużlem granulowanym, wykazuje większą wytrzymałość w porównaniu z betonem wzorcowym, w którym zastosowano wyłącznie kruszywo naturalne. Stąd można wnioskować

perplasticizer content were conducted. The mix design of concrete 1 (B 1/X/X) was used for this investigation.

The comparison of the fresh concrete parameter results shows only small fluctuations of the consistencies. Concrete, which was produced with the unground granulated slag, tends to increase consistency slightly, under the uniform content of the superplasticizer.

The property, that is highly relevant for the construction practice, is compressive strength and its development, which is very important for the determination of the shuttering times. The following figures display examples for the compressive strength development for

o pozytywnym wpływie niezmielonego żużla granulowanego na rozwój wytrzymałości na ściskanie, w niższych temperaturach.

Ważną cechą – szczególnie dla konstruktorów budynków – jest moduł sprężystości betonu. Dla tego kryterium oceny przeprowadzono również symulację budowy letniej i zimowej – temperatury przechowywania 10°C i 20°C.

Na rysunkach 5-7 przedstawiono przykładowo kształtowanie się modułu sprężystości dla obu metod przechowywania – przechowywanie letnie +20°C i przechowywanie zimowe +10°C.

W zależności od rodzaju betonu – wpływu zawartości cementu, rodzaju cementu i współczynnika wodno/spoiwowego lub wodno/cementowego – w przypadku zastosowania niezmielonego żużla granulowanego, jako częściowego zamiennika kruszywa drobnego, stwierdza się częściowo minimalne zmniejszenia wzrostu modułu sprężystości – zarówno wzrosty, jak i spadki. Podczas przechowywania w temperaturze 10°C – symulacja zimy, beton z niezmielonym żużlem granulowanym osiąga większy moduł sprężystości w porównaniu z betonem wzorcowym, produkowanym wyłącznie z kruszywem naturalnym. Pozytywny wpływ niezmielonego żużla granulowanego może być uwzględniony w module sprężystości, w niższej temperaturze.

Główną zaletą konstrukcji betonowej jest jej trwałość, czyli cykl życia betonu. Budowle infrastrukturalne, takie jak mosty czy tunele, mają systematyczny okres eksploatacji, wynoszący 80 lat i więcej. W związku z tym, bazowy projekt badawczy głównie odnosi się do zagadnienia trwałości.

Poniżej przedstawiono wyniki wpływu częściowego zastąpienia kruszywa drobnego niezmielonym żużlem granulowanym, na uzyskaną wytrzymałość.

Odporność na zamrażanie i rozmrażanie w Europie Środkowej, szczególnie w regionach alpejskich, jest ogólnym wymogiem, dla betonu przeznaczonego do budowy infrastruktury. W tabelicy 5 przedstawiono wyniki badań odporności na zamrażanie i rozmrażanie zgodnie z normą ONR 23303 (17).

Wszystkie betony wyprodukowane z niezmielonego żużla granulowanego jako częściowego zamiennika kruszywa, spełniają wymagania normatywne. Należy również zauważyć, że w pewnym zakresie uzyskano znaczną poprawę w porównaniu z betonem wzorcowym.

both storage methods – summer storage at +20°C and winter storage at +10°C.

Depending on the kind of concrete – impact of cement content, cement type and W/B [W/C]-ratio partially minimal strength reductions are detected, when using unground granulated slag as partial replacement for fine aggregate. These fluctuations are almost exclusively noticeable during the simulation of summer conditions – storage temperature 20°C. At the storage temperature of 10°C – winter simulation of concrete, that was supplemented with unground granulated slag shows higher strength, in comparison to reference concrete with exclusively natural aggregate. Hence, a positive effect of the unground granulated slag on the compressive strength development during lower temperatures, is deductible.

A relevant characteristic – especially for the engineers of the building – is the modulus of elasticity of the concrete. A summer and winter construction simulation – storage temperatures at 10°C and 20°C, was conducted also for this evaluation criterion.

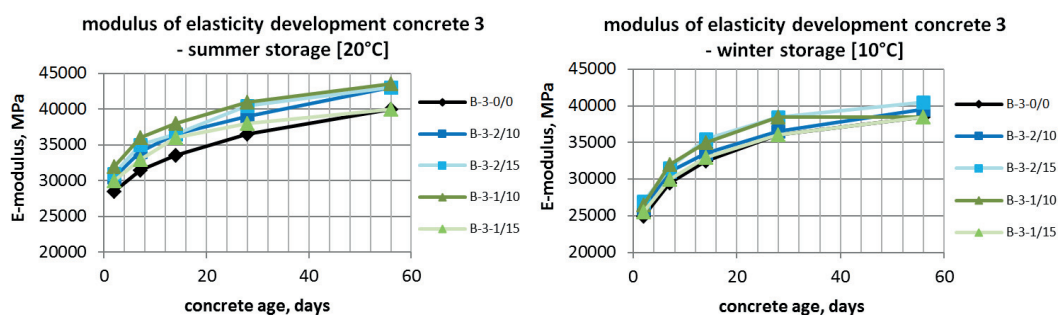
Figs 5, 6 and 7 exemplary show the modulus of elasticity development for both storage methods – summer storage +20°C and winter storage +10°C.

Depending on the kind of concrete e.g. impact of cement content, cement type and W/B or W/C ratio, partially minimal reductions in the modulus of elasticity development – increases as well as decreases, are detected, when using unground granulated slag, as a partial supplement for fine aggregate. During the storage temperature at 10°C – winter simulation, concrete with unground granulated slag develops higher moduli of elasticity in comparison to the reference concrete, produced exclusively with natural aggregate. The positive effect of unground granulated slag can be deducted on the E-module, at a lower temperature.

The major advantage of concrete construction is durability, meaning the life cycle of concrete. Infrastructure buildings, such as bridges or tunnels, have a systematic operating life of 80 years and more.

Therefore, the underlying research project addresses the topic of durability strongly.

The results of the impact of partial replacement of fine aggregate with unground granulated slag, on the resulting durability parameters are presented below.



Rys. 7. Wzrost modułu sprężystości dla betonu 3; po lewej przechowywanie letnie, po prawej przechowywanie zimowe

Fig 7. Modulus of elasticity development concrete 3, left summer storage, right winter storage

Tablica 5 / Table 5

WYNIKI BADAŃ ODPORNOŚCI NA ZAMRAŻANIE I ROZMRAŻANIE, Z UŻYCIEM SOLI ODLADZAJĄCYCH

RESULTS OF TESTS TO DETERMINE THE FREEZE-THAW RESISTANCE WITH THE DE-ICING SALTS

<b>Concrete 3 / Beton 3</b>					
<b>Exposure class XF2 / Klasa ekspozycji XF2</b>					
	B-3-0/0	B-3-1/10	B-3-1/15	B-3-2/10	B-3-2/15
Scaling / Złuszczenie, g/m <sup>2</sup>	151	36	66	48	68
Allowed scaling / Złuszczenie dopuszczalne, g/m <sup>2</sup>	343 <sup>1)</sup>				
<b>Concrete 4 / Beton 4.</b>					
<b>Exposure class XF4 / Klasa ekspozycji XF4</b>					
	B-4-0/0	B-4-1/10	B-4-1/15	B-4-2/10	B-4-2/15
Scaling / Złuszczenie, g/m <sup>2</sup>	12	7	29	74	5
Allowed scaling / Złuszczenie dopuszczalne, g/m <sup>2</sup>	276 <sup>2)</sup>				
<b>Concrete 5 / Beton 5</b>					
<b>Exposure class XF4 / Klasa ekspozycji XF4</b>					
	B-5-0/0	B-5-1/10	B-5-1/15	B-5-2/10	B-5-2/15
Scaling / Złuszczenie, g/m <sup>2</sup>	83	60	53	35	35
Allowed scaling / Złuszczenie dopuszczalne, g/m <sup>2</sup>	276 <sup>2)</sup>				

<sup>1)</sup> Specification value according to ONR 23303 (17): reference concrete [143 g/m<sup>2</sup>] + 200 g/m<sup>2</sup> / Wartość specyfikacji zgodnie z ONR 23303 (17): beton wzorcowy [143 g/m<sup>2</sup>] + 200 g/m<sup>2</sup>

<sup>2)</sup> Specification value according to ONR 23303 (17): reference concrete [76 g/m<sup>2</sup>] + 200 g/m<sup>2</sup> / Wartość specyfikacji zgodnie z ONR 23303 (17): beton wzorcowy [76 g/m<sup>2</sup>] + 200 g/m<sup>2</sup>

Ochrona zbrojenia przed korozją, powodowaną przez karbonizację i inwazyjne chlorki, jest bardzo ważna dla trwałości konstrukcji betonowych. Ochronę zbrojenia zapewnia z jednej strony odpowiednia otulina betonowa, a z drugiej strony odpowiedni skład materiałowy – mikrostruktura betonu gęstego. Od pewnego czasu istnieją znormalizowane metody badawcze (29, 30), pozwalające na ocenę właściwości betonu w odniesieniu do odporności na karbonizację i penetrację chlorków, do wnętrza stwardniałego betonu.

W tablicy 6 przedstawiono przykładowe wyniki przyspieszonych badań karbonizacji zgodnie z normą ÖNORM EN 12390 Teil 12 (30) dwóch rodzajów betonu. Są one zwykle stosowane w konstrukcjach, w których występuje ryzyko korozji zbrojenia, w wyniku karbonizacji.

Ze względu na brak wartości granicznych odporności na karbonizację w krajowych (13) i europejskich normach dotyczących betonu (14), wyniki głębokości karbonizacji są porównywane relatywnie. Beton 2 wykazuje większą głębokość karbonizacji, w przypadku zastosowania niemielonego żużla granulowanego, natomiast beton 3 osiąga jednakowe wyniki, z wyjątkiem jednego składu.

W tablicy 7 zestawiono wyniki badań odporności na działanie chlorków w jednokierunkowej dyfuzji (29) betonów, spełniających klasę ekspozycji XD2.

Na rys. 8 zestawiono zawartość chlorków zmierzoną w betonie 2 na różnych głębokościach.

Do dnia dzisiejszego nie ma określonych wartości granicznych dla wyników odporności na działanie chlorków (13, 14). Z tablicy 7 wynika, że częściowa wymiana kruszywa drobnego na żużel

The freeze-thaw resistance in Central Europe, especially in Alpine regions, is a general requirement for concrete with the intended purpose of infrastructure. Table 5 shows the results of the freeze-thaw tests according to ONR 23303 (17).

All concretes produced with unground granulated slag as a partial aggregate replacement, comply the normative requirements. It should also be noted that to some extent, a significant enhancement in comparison to the reference concrete was achieved.

The protection of the reinforcement against corrosion caused by carbonation and invasive chlorides is very important for the durability of concrete constructions. On the one hand, the protection of the reinforcement is secured by an appropriate concrete cover and on the other hand, by an adequate material composition – dense concrete microstructure. For some time now, there are standardised test procedures (29, 30) to assess the concrete properties in relation to the resistance against carbonation and penetration of chlorides, into the hardened concrete.

Table 6 exemplary presents the results of the accelerated carbonation tests following ÖNORM EN 12390 Teil 12 (30) of two types of concrete, that are usually used for constructions with the risk of corrosion of the reinforcement, by carbonation.

As there are no limits for the resistance against carbonation in national (13) nor European concrete standards (14), the results of the carbonation depths are compared relatively. Concrete 2 shows higher carbonisation depth when using unground granulated slag, while concrete 3 illustrates equal results, except for one composition.

Tablica 6 / Table 6

WYNIKI BADAŃ DOTYCZĄCYCH OKREŚLENIA ODPORNOŚCI NA KARBONIZACJĘ, METODA PRZYSPIESZONA  
RESULTS OF TESTS FOR THE DETERMINATION OF THE CARBONATION RESISTANCE, ACCELERATED METHOD

<b>Concrete 2 / Beton 2</b> <b>Exposure class XC4 / Klasa ekspozycji XC4</b>					
	B-2-0/0	B-2-1/10	B-2-1/15	B-2-2/10	B-2-2/15
Carbonation depth after 28 days Głębokość karbonatyzacji po 28 dniach, mm	3.3	6.7	7.4	3.6	5.9
Carbonation depth after 56 days Głębokość karbonatyzacji po 56 dniach, mm	4.0	8.5	8.4	4.3	6.9
Carbonation depth after 70 days Głębokość karbonatyzacji po 70 dniach, mm	4.1	9.1	8.7	5.1	7.4
<b>Concrete 3 / Beton 3</b> <b>Exposure class XC4 / Klasa ekspozycji XC4</b>					
	B-3-0/0	B-3-1/10	B-3-1/15	B-3-2/10	B-3-2/15
Carbonation depth after 28 days Głębokość karbonatyzacji po 28 dniach, mm	6.2	4.7	5.1	2.6	4.4
Carbonation depth after 56 days Głębokość karbonatyzacji po 56 dniach, mm	6.9	4.8	5.1	3.3	8.9
Carbonation depth after 70 days Głębokość karbonatyzacji po 70 dniach, mm	7.0	7.1	6.1	3.5	9.6

Tablica 7 / Table 7

WYNIKI BADAŃ ODPORNOŚCI NA DZIAŁANIE CHLORKÓW, JEDNOKIERUNKOWA DYFUZJA  
TEST RESULTS OF THE CHLORIDE RESISTANCE [UNIDIRECTIONAL DIFFUSION]

<b>Concrete 1 / Beton 1</b> <b>Exposure class XD2 / Klasa ekspozycji XD2</b>					
	B-1-0/0	B-1-1/10	B-1-1/15	B-1-2/10	B-1-2/15
Chloride diffusion coefficient / $D_{nss}$ Współczynnik dyfuzji chlorków $D_{nss}$ , m <sup>2</sup> /s	5.88E-12	3.91E-12	4.23E-12	5.19E-12	5.85E-12
<b>Concrete 2 / Beton 2</b> <b>Exposure class XD2 / Klasa ekspozycji XD2</b>					
	B-2-0/0	B-2-1/10	B-2-1/15	B-2-2/10	B-2-2/15
Chloride diffusion coefficient / $D_{nss}$ Współczynnik dyfuzji chlorków $D_{nss}$ , m <sup>2</sup> /s	1.22E-11	2.81E-12	2.68E-12	2.66E-12	3.42E-12
<b>Concrete 3 / Beton 3</b> <b>Exposure class XD2 / Klasa ekspozycji XD2</b>					
	B-3-0/0	B-3-1/10	B-3-1/15	B-3-2/10	B-3-2/15
Chloride diffusion coefficient / $D_{nss}$ Współczynnik dyfuzji chlorków $D_{nss}$ , m <sup>2</sup> /s	5.36E-12	3.74E-12	4.43E-12	3.78E-12	3.17E-12

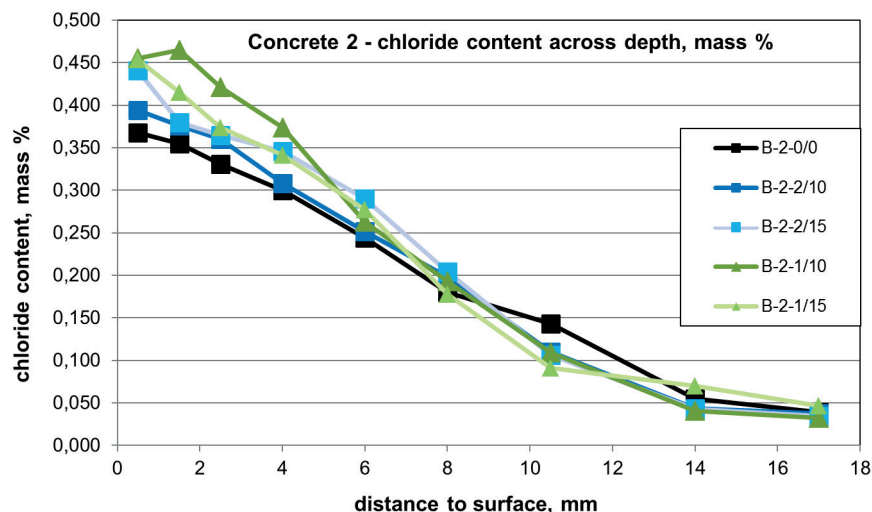
niezmielony, ma bardzo duży wpływ na penetrację chlorków w betonie. Częściowo znajduje to odzwierciedlenie w znacznym zwiększeniu współczynnika dyfuzji chlorków [ $D_{nss}$ ], w porównaniu z betonem referencyjnym.

W Austrii niektóre obszary zastosowań – np. ruch drogowy i obszary magazynowe – wymagają oceny kruszywa pod kątem możliwej reakcji krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu. Często w tym celu przeprowadza się badanie długoterminowe, trwające 1 rok, zgodnie z normą ÖNORM B 3100 (32). Dla tych warunków badań przygotowuje się beleccki betonowe o maksymalnym wymiarze ziarna kruszywa 22 mm i domyślnej krzywej uziarnienia oraz

Table 7 displays the results of the tests of the chloride resistance in unidirectional diffusion (29), of concretes that fulfil exposure class XD2.

Fig. 8 summarises the chloride content measured in concrete 2, over different depths.

Until this date, there are no limit values for the results of the chloride resistance (13, 14). Table 7 shows, that the partial replacement of fine aggregate with unground granulated slag has a very high impact on chloride penetration in concrete. This is partially reflected by significant enhancements of the chloride diffusion coefficient ( $D_{nss}$ ), in comparison to the reference concrete.



Rys. 8. Profil wnikań chlorków, beton 2

Fig. 8. Chloride content depending on the depth level, concrete 2

stałym wskaźniku wodno-cementowym. Ponadto normalizuje się zawartość cementu, jego rodzaj oraz warunki przechowywania –  $38 \pm 2^\circ\text{C}$  w jedno molowym roztworze NaOH. Rozszerzalność beleczek betonowych po rocznym przechowywaniu jest wynikiem końcowym, przy czym próg dla dwukrotnego oznaczenia wynosi  $0,5\text{‰} - 0,7\text{‰}$ . W celu określenia odporności na niszczącą reakcję krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu w betonach zawierających niezmieszany żużel, przeprowadzono badania długoterminowe z użyciem 6% masowo i 15% masowo, w stosunku do kruszywa, niezmieszane żużla granulowanego. Dwa różne kruszywa, w których krzemionka reaguje z wodorotlenkami sodu i potasu oraz niekrytyczne węglanowe, w których krzemionka nie reaguje,

In Austria, some areas of application – e.g. traffic and storage areas, demand an assessment of the aggregate, regarding a possible alkali-silica reaction [ASR]. Often, a long-term test, with the duration of 1 year according to ÖNORM B 3100 (32), is conducted for this purpose. For this test setting, concrete prisms with the maximum aggregate size of 22 mm and a default grading curve, as well as constant W/C-ratio, were produced. Furthermore, cement content, cement type and storage conditions –  $38 \pm 2^\circ\text{C}$  in 1-molar NaOH-solution, are standardised. The expansion of the concrete prisms after one year of storage is the final result, with a threshold of  $0,5\text{‰} - 0,7\text{‰}$  for double determination. In order to detect the resistance against a damaging ASR of concrete containing unground slag, long-term tests using 6% of mass and 15% of mass, in relation to the aggregate, unground granulated slag were assessed. Two different aggregates, the siliceous – alkali critical and a carbonatic – alkali uncritical, were mixed with ungrounded slag and tested in the long-term setting, described above. The results were compared with testing results of pure aggregate and summarised in Table 8.

The results presented in Table 8 show, a reduction of expansion of the concrete test specimen, when using an alkali-critical aggregate, e.g. siliceous. The test series with higher substitution rates also show a higher reduction in the expansion. A positive influence on the low expansion level of carbonatic aggregate cannot be detected, but there is also no significant degradation of the system.

Tablica 8 / Table 8

WYNIKI DŁUGOTRWAŁYCH BADAŃ REAKCJI KRZEMIONKI Z WODOROTLENKAMI SODU I POTASU NP. BADANIE BELECZEK BETONOWYCH  
RESULTS OF LONG-TERM ASR TESTS EG. CONCRETE PRISM TEST

Unground granulated slag Niezmieszany żużel granulowany	Content of unground granulated slag Zawartość niezmieszane żużla granulowanego	Aggregate Kruszywo	Expansion after 365 days Rozszerzalność po 365 dniach, ‰	Reference expansion aggregate after 365 days Kruszywo wzorcowe dla rozszerzalności po 365 dniach, ‰	Absolute changes Zmiany bezwzględne	Changes in percentage Zmiany w procentach
location 1 / zakład 1	6	Carbonatic Węglanowe	0,37	0,32	0,05	16
location 1 / zakład 1	6	Siliceous Krzemionkowe	1,39	1,60	-0,21	-13
location 1 / zakład 1	15	Carbonatic Węglanowe	0,39	0,32	0,07	22
location 1 / zakład 1	15	Siliceous Krzemionkowe	1,32	1,60	-0,28	-18
location 2 / zakład 2	6	Carbonatic Węglanowe	0,35	0,32	0,03	9
location 2 / zakład 2	6	Siliceous Krzemionkowe	1,69	1,60	0,09	6
location 2 / zakład 2	15	Carbonatic Węglanowe	0,32	0,32	0	0
location 2 / zakład 2	15	Siliceous Krzemionkowe	1,34	1,60	-0,26	-16

## SKŁAD BADANEGO BETONU I WYNIKAJĄCE Z NIEGO WŁAŚCIWOŚCI ŚWIEŻEGO BETONU

## COMPOSITION OF EXAMINED CONCRETE AND RESULTING FRESH CONCRETE VALUES

	Unit Jednostka	Reference concrete Beton wzorcowy	Concrete A Beton A	Concrete B Beton B
Rate of unground granulated slag, location 2 Udział niezmielonego żużla granulowanego, zakład 2	%	0	10	15
Water content, determined by microwave drying Zawartość wody, wyznaczona metodą suszenia mikrofalowego	kg/m <sup>3</sup>	166	164	172
W/B [W/C]-ratio according to batch protocol Wskaźnik wodno-spoiwowy, wskaźnik wodno-cementowy zgodnie z protokołem wsadowym	kg/m <sup>3</sup>	0.40	0.39	0.41
Superplasticizer according to batch protocol Superplastyfikator zgodnie z protokołem wsadowym	kg/m <sup>3</sup>	6.40	5.80	5.55
Flow after 10 minutes / Rozpływ po 10 minutach	cm	59	53	45
Flow after 30 minutes / Rozpływ po 30 minutach	cm	59	40	40
Fresh mix temperature / Temperatura mieszanki	°C	25	26	27
Fresh mix density / Gęstość mieszanki	kg/m <sup>3</sup>	2480	2460	2450
Air content / Zawartość powietrza	%	1.1	2.6	2.8

zostały zmieszane z niezmielonym żużlem i poddane badaniom, w warunkach długoterminowych, opisanych wcześniej. Uzyskane wyniki porównano z wynikami badań czystego kruszywa i zestawiono w tablicy 8.

Wyniki przedstawione w tablicy 8 wskazują na zmniejszenie rozszerzalności badanej próbki betonu, w przypadku zastosowania kruszywa o krytycznej zawartości K i Na oraz krzemionki. Serie próbne z większymi wskaźnikami zastąpienia, wykazują również większe zmniejszenie rozszerzalności. Nie można stwierdzić pozytywnego wpływu na niski poziom rozszerzalności kruszywa węglanowego, ale nie występuje również znaczna degradacja układu.

#### 4.3. Badania praktyczne

W celu oceny zastosowania niezmielonego żużla granulowanego jako zamiennika kruszywa, przeprowadzono badania na dużą skalę, w przemysłowych warunkach konstrukcyjnych, w austriackiej fabryce prefabrykatów. Skład betonu został wykonany zgodnie z podanym projektem mieszanki betonowej, przez producenta prefabrykatów. Również surowce do produkcji betonu wykorzystywano na miejscu i częściowo zastępowano niezmielonym żużlem wielkopiecowym. W sumie wyprodukowano trzy betony o różnym składzie – beton wzorcowy i dwa warianty z wykorzystaniem niezmielonego żużla granulowanego. Projekt mieszanki i wyniki badań świeżego betonu przedstawiono w tablicy 9.

Składy betonu, które przedstawiono w tablicy 9, są wykorzystywane do wytwarzania małych prefabrykatów – tzw. „quick blocks” i planuje się monitorowanie tych elementów konstrukcyjnych przez okres trzech lat i poza magazynowaniem.

Rysunek 9 przedstawia wyniki rozwoju wytrzymałości na ściskanie.

Wyniki oceny wytrzymałości na ściskanie wykazują, że wszystkie badane kompozycje betonowe osiągają wartości mieszczące

#### 4.3. Practical testing

In order to assess the use of unground granulated slag as an aggregate replacement, large-scale testing was conducted, under realistic constructive conditions in an Austrian precast factory. The concrete composition was performed according to the given concrete mix design of the precast manufacturer. Also, raw materials for the concrete production were used on site and partially replaced by unground blast slag. In total, three different concrete compositions – reference concrete & two different replacement rates of unground granulated slag, were produced. Mix design and fresh concrete results are concluded in Table 9.

The concrete compositions, that are presented in table 9, are used for the construction of small prefabricated elements – „quick blocks”, and it is planned to monitor these construction elements over the period of three years and outside storage.

Figure 9 displays the results of the compressive strength development.

The results of the compressive strength evaluation show, that all tested concrete compositions deliver values within the same compressive strength class. Slightly lower compressive strength of concrete A and B – replacement of 10% by mass and 15% by mass with unground granulated slag, can be traced back to the higher air content [see Table 9]. The application in the prefabrication plant showed, that a partial replacement of the fine aggregate with unground granulated slag, is possible. Generally, no negative influence of concrete properties could be found by the use of unground slag, as a partial replacement of fine aggregate. Furthermore, no impact in practical implementations of unground slag containing mix-designs was established.



się w tej samej klasie wytrzymałości na ściskanie. Nieco niższa wytrzymałość na ściskanie betonu A i B – zastąpienie 10% udziałem masowym i 15% udziałem masowym niezmielonego żużla granulowanego, może wynikać z większej zawartości powietrza [patrz tab. 9]. Zastosowanie betonu w zakładzie prefabrykacji wykazało, że możliwe jest częściowe zastąpienie kruszywa drobnego niezmielonym żużlem granulowanym. Generalnie nie stwierdzono negatywnego wpływu zastosowania żużla niezmielonego jako częściowego zamiennika kruszywa drobnego, na właściwości betonu. Ponadto nie stwierdzono wpływu na praktyczne zastosowanie mieszanek, zawierających żużel niezmielony.

## 5. Podsumowanie

Przedstawione w pracy wyniki wskazują na możliwość zastąpienia kruszywa naturalnego o frakcji < 4 mm, niezmielonym żużlem granulowanym, bez negatywnego wpływu na właściwości betonu.

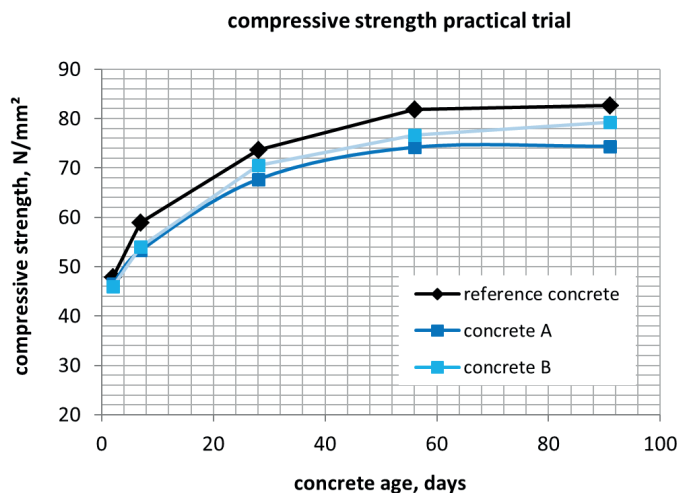
Właściwości niezmielonego żużla granulowanego spełniają podstawowe wymagania dotyczące jego stosowania jako kruszywa do produkcji betonu, zgodnie z normą ÖNORM EN 12620 (15) oraz normą krajową ÖNORM B 3131 (16).

W celu oceny przydatności niezmielonego żużla granulowanego, jako częściowego zamiennika kruszywa drobnego, wyprodukowano i oceniono betony z dwoma różnymi zawartościami żużla granulowanego – 10%mas. i 15%mas. Do badań stosowano niezmielone żużle granulowane, pochodzące z dwóch austriackich zakładów produkcyjnych – w Górnej Austrii i Styrii. Wykorzystano świeże i stare żużle granulowane z obu lokalizacji, ponieważ już składowane żużle mogą być również wykorzystywane, jako surowiec do produkcji betonu.

Nie stwierdzono większych wahań parametrów świeżego betonu, w przypadku częściowej zamiany niezmielonym żużlem granulowanym. Różnice, np. w odniesieniu do zdolności technologicznej – stałości, można zrównoważyć poprzez dostosowanie zawartości superplastyfikatora.

Nie stwierdza się negatywnego wpływu na urabialność, jako przyczyny częściowego zastąpienia kruszywa drobnego niezmielonym żużlem granulowanym.

Badania odpowiednich właściwości betonu, zwłaszcza wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości, potwierdzają dobrą przydatność niezmielonego żużla granulowanego w matrycy betonowej. W zależności od rodzaju betonu wpływ zawartości cementu i stosunku wodno/spoiwowego = wodno/cementowy stwierdzono minimalne zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie. Występują one jednak prawie wyłącznie podczas symulacji warunków letnich, to znaczy temperatury dojrzewania 20°C. Podczas symulacji temperatury przechowywania 10°C – symulacja zimowa, betony zawierające żużel wykazują większą wytrzymałość na ściskanie, w porównaniu z betonem wzorcowym. Podobne wyniki stwierdzono, podczas oceny modułu sprężystości. Minimalne wahania – zarówno wzrost, jak i spadek, wystąpiły w przypadku modułu



Rys. 9. Rozwój wytrzymałości elementów prefabrykowanych

Fig. 9. Strength development of the prefabricated elements

## 5. Summary

The results presented in the paper demonstrate the possibility of replacing natural aggregate of the fraction < 4 mm with unground granulated slag, without negative impacts on concrete properties.

The properties of unground granulated slag fulfil the basic demands for the usage as aggregate according to ÖNORM EN 12620 (15) and those of the national standard ÖNORM B 3131 (16), for the production of concrete.

In order to assess the suitability of unground granulated slag as a partial replacement for the fine aggregate, concretes with two different granulated slag contents – 10% and 15% – were produced and evaluated. Unground granulated slags from two Austrian production sites – Upper Austria and Styria, were used for the examination. Fresh and old granulated slags from both locations were used for the investigations because already deposited slags could also be utilized as raw material in concrete.

The fresh concrete properties show no significant fluctuations in fresh concrete parameters, concerning the partial replacement with unground granulated slag. Discrepancies, e.g. in relation to the process ability – consistency, can be balanced by adapting the superplasticizer content.

A negative impact on the workability is not detected, as a cause of the partial replacement of fine aggregate with unground granulated slag.

The testing of the relevant concrete properties, especially the compressive strength and modulus of elasticity, confirm the good performance of the unground granulated slag, in the structural matrix of concrete. Depending on the concrete type – impact of cement content, type of concrete and W/B [W/C]-ratio, minimal reductions of compressive strength were detectable. However, these occur almost exclusively during the simulation of summer conditions e.g. storage temperature 20°C. During the storage

sprężystości. Betony zawierające żużel mają większe wartościami modułu sprężystości, w porównaniu z betonem wzorcowym podczas przechowywania w temperaturze 10°C, czyli podczas symulacji zimowej.

Podsumowując, można stwierdzić korzystny wpływ niezmielonego żużla granulowanego, w niższej temperaturze. Potwierdza to, że niezmielony żużel granulowany wykazuje nie tylko właściwości obojętnego wypełniacza. Ponadto, wyniki badań przemysłowych dowodzą, że przy wznoszeniu budynków nie trzeba stosować innych zasad projektowania, ponieważ betony z niezmielonym żużlem granulowanym są równe betonom, z samym kruszywem naturalnym.

Trwałość konstrukcji betonowych jest ważnym wymaganiem stawianym przez budowniczych i zarządców infrastruktury. Od wybudowanych budynków oczekuje się maksymalnego cyklu eksploatacji, bez konieczności czasochłonnej i kosztownej konserwacji. Dlatego też alternatywne składy betonu powinny być starannie oceniane, co było głównym celem tego projektu badawczego. Do oceny trwałości betonów wyprodukowanych z żużli niegranulowanych, zastosowano następujące badania:

- odporność na zamrażanie i rozmrażanie z użyciem soli odładzających,
- odporność na chlorki - dyfuzja jednokierunkowa,
- odporność na karbonizację – metoda przyspieszonej karbonizacji,
- potencjał reakcji wodorotlenków Na i K z krzemionką.

Wszystkie badane betony zawierające żużel, uzyskały pozytywne wyniki. Jeszcze lepsze wyniki można osiągnąć w przypadku wytrzymałości i odporności na chlorki oraz zamrażanie-rozmrażanie.

Podsumowując, wyniki badań potwierdzają, że możliwe jest zastosowanie niezmielonego żużla granulowanego, jako częściowego zamiennika kruszywa w betonie. Ponadto wiele właściwości, zwłaszcza dotyczące wytrzymałości, ulegają korzystnym zmianom.

## Literatura / References

1. J. Harder, Rohstoff Sand – Eine Mangelware, [www.onestone.consulting.de](http://www.onestone.consulting.de), 2020.
2. S. Schütz, Sandgewinnung durch semistationäre Aufbereitungsanlagen. BFT International 06-2020.
3. J. Ritter, Warum Diebe einen Strand klauen, Frankfurter Allgemeine Zeitung. 2019.
4. S. Janssen, Konsequenzen aus der Sicht der Gesteinskörnungsindustrie. Beton 9/2019.
5. K.-Ch. Thienel, Eisenhüttenschlacken und Hüttensand. Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München. 2017.
6. S.T. Ramesh, R. Gandhimathi, P.V. Nidheesh, S. Rajakumar, S. Praatepkumar, Use of furnace slag and welding slag as replacement for sand in concrete. IJEEE 4:3 (2013).

temperature at 10°C – winter simulation, slag-containing concretes show higher compressive strength, in comparison to the reference concrete. Similar effects are detected during the assessment of the modulus of elasticity. Minimal fluctuations – increases as well as decreases, occurred in the results of the modulus of elasticity. Slag-containing concretes deliver higher E-moduli in comparison to the reference concrete during the storage temperature at 10°C e.g. winter simulation.

Summarising, a positive effect of unground granulated slag during lower temperature could be established. This confirms that unground granulated slag does not only show the properties of an inert filler. Furthermore, the practical findings prove that the construction of buildings does not have to follow any other design rules, because concretes with unground granulated slag are statically equal to those with natural aggregate only.

Durability of concrete constructions is a relevant demand of builder's and infrastructure managers. Constructed buildings are expected to offer a maximal life cycle, without the need for time and cost-intensive maintenance. Thus, alternative concrete compositions should be evaluated carefully which was a main target in this research project. Following procedures were used for the assessment of the durability for concrete produced with unground granulated slags:

- freeze-thaw resistance with de-icing salts,
- chloride resistance - unidirectional diffusion,
- carbonation resistance - accelerated carbonation method,
- potential for an Alkali Silica Reaction [ASR].

All of the investigated slag containing concretes provided positive results. Still better, for some durability properties e.g. chloride and freeze-thaw resistance, an improvement could be achieved.

Summarising, the results conform, that the use of unground granulated slag, as partial replacement of the aggregate in concrete, is possible. Furthermore, many properties, especially durability parameters are influenced in a positive way.

7. M. Nadeem, A.D. Pofale, Replacement of natural fine Aggregate with granular slag - A waste industrial by-product in cement mortar applications as an alternative construction material. *Int. J. Eng. Res. Appl.* **2**(5), 1258-1264 (2012).
8. M.S. Rao, U. Bhandare, Application of blast furnace slag sand in cement concrete—A case study. *Int. J. Civ. Eng. Res.* **5**(4), 453-458 (2014).
9. I. Yüksel, O. Demirtaş, Effect of NGBFS and CBA as fine aggregate on the chloride permeability of concrete. *AJER* **2**(9), 171-189 (2013).
10. P.R. Kumar, P. Kumar, Use of blast furnace slag as an alternative of natural sand in mortar and concrete. *IJRSE* **4**(2), 252-257 (2015).
11. C. Kurz, P. Bilgeri, Untersuchungen zum Einsatz von Hüttensand als Zuschlag für Beton. *Beton-Informationen*. 1997.
12. FFG Abschlussbericht „SlagCrete - Erforschung der Einsatzmöglichkeiten granulierter Hochofenschlacke als Ersatz der feinen Gesteinskörnung im Beton“, Projektnummer 874546. 2020
13. ÖNORM B 4710 Teil 1 „Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität; Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton“. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2018.
14. ÖNORM EN 206 „Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2017.
15. ÖNORM EN 12620 „Gesteinskörnungen für Beton“. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2014.
16. ÖNORM B 3131 „Gesteinskörnungen für Beton – Regelungen zur Umsetzung der ÖNORM EN 12620“. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2016.
17. ONR 23303 „Prüfverfahren Beton (PVB), Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe“. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2010.
18. RVS 08.17.02 „Technische Vertragsbedingungen Betondecken“. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien, 2011.
19. ÖNORM EN 1097 Teil 6 „Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme“. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2013.
20. ÖNORM EN 933 Teil 1 „Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren“. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2012.
21. ÖNORM EN 1744 Teil 1 „Prüfverfahren für chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Chemische Analyse“. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2013.
22. RVS 11.06.23 „Bestimmung des Polierwertes von Sand“. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien, 2012.
23. ÖNORM EN 12350 Teil 5 „Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß“. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2019.
24. ÖNORM EN 12350 Teil 7 „Prüfung von Frischbeton - Teil 7: Luftgehalt – Druckverfahren“. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2019.
25. ÖNORM EN 12350 Teil 6 „Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonrohichte“. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2019.
26. ÖNORM EN 12390 Teil 3 „Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern“. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2019.
27. ÖNORM EN 12390 Teil 8 „Prüfung von Festbeton - Teil 8: Wassereindringtiefe unter Druck“. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2019.
28. ONR CEN/TS 12390 Teil 9 „Prüfung von Festbeton - Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand - Abwitterung (CEN/TS 12390-9:2016)“. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2017.
29. ÖNORM EN 12390 Teil 11 „Prüfung von Festbeton - Teil 11: Bestimmung des Chloridwiderstandes von Beton - Einseitig gerichtete Diffusion“. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2015.
30. ÖNORM EN 12390 Teil 12 „Prüfung von Festbeton - Teil 12: Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes von Beton - Beschleunigtes Karbonatisierungsverfahren“. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2020.
31. Dillig, C.; Peyerl, M.; Krispel, St.; Hüngsberg, A.: Lösender Angriff auf Beton. In: *Zement + Beton* (1), 2016.
32. ÖNORM B 3100 „Beurteilung der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität im Beton“. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2008.
33. ÖNORM 1367 Teil 1 „Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung des Widerstands gegen Frost-Tau-Wechsel“. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2007.
34. ÖNORM EN 12350 Teil 4 „Prüfung von Frischbeton - Teil 4: Verdichtungsmaß“. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2019.