

## **Ocena stopnia skorelowania wyników pomiarów konsystencji mieszanki betonowej różnymi metodami**

### **Comparative consistency tests of concrete mix with different methods**

#### **1. Wprowadzenie**

Wycofana w styczniu 2004 r. popularna norma krajowa PN-88/B-06250 (15) nakazywała mierzyć konsystencję mieszanki betonowej dwiema metodami, metodą opadu stożka i metodą Ve-Be, z przyporządkowaniem im zdefiniowanych stopni, które opisała symbolami od K-1 do K-5. Wprowadzona w jej miejsce europejska norma PN-EN 206-1:2003 (8) rozszerzyła możliwość badania konsystencji dwiema kolejnymi metodami (1-4, 6), wprowadzając pojęcia stopnia zagęszczalności oraz średnicy rozplywu (metoda stolika rozplywowego). Ocena konsystencji za pomocą średnicy rozplywu jest szczególnie przydatna do kontroli konsystencji na placu budowy.

Ostatnio znowelizowany przepis PN-EN-206:2014 (9) co prawda pozbawia metodę Vebe statusu badania normowego, ale nie oznacza to, że nie wolno jej stosować. Gdy potrzebne jest oznaczenie konsystencji mieszanek wilgotno-sypkich (przeznaczonych przykładowo na podbudowy drogowe) specyfikacje techniczne narzucają nadal właśnie tę metodę badania.

Urabialność mieszanki betonowej o konsystencji rzadko-plastycznej lub ciekłej, jako swego rodzaju cieczy, precyzyjnie opisują dwa podstawowe parametry reologiczne: granica płynięcia oraz lepkość plastyczna. Badania tych parametrów wymagają warunków laboratoryjnych. Z tego powodu powstała potrzeba zastąpienia ich badaniami technicznymi innymi właściwościami mieszanki związanych z jej urabialnością. W pracy (17) pokazano na przykład, iż dla mieszanek samozagęszczalnych techniczny pomiar średnicy rozplywu dobrze koresponduje z granicą płynięcia, zaś czas rozplywu z lepkością plastyczną mieszanki.

W normie (8) poszczególne klasy konsystencji badane różnymi metodami technicznymi są oznaczone innymi symbolami. W normie pojawia się też zastrzeżenie, że klasy konsystencji określone różnymi metodami nie są bezpośrednio ze sobą powiązane. To między innymi konsekwencja tego, że o wyniku oznaczenia konsystencji półciekłej czy ciekłej różnymi metodami mają większy wpływ albo granica płynięcia, albo lepkość plastyczna.

#### **1. Introduction**

Popular national standard PN-88/B-06250 (15), withdrawn in January 2004, required a testing of consistency of the concrete mix by two methods, i.e. slump test and Vebe test, with specified scale ranges assigned, described by the symbols from K-1 to K-5. Superseding European standard for concrete PN-EN 206-1 (8) has extended a consistency testing introducing two additional methods (1 - 4, 6), i.e. degree of compatibility test and flow table test, the second especially useful for testing the mix at a construction site.

The lastly modified standard PN-EN-206:2014 (9) omitted the Vebe method as a standard test, however it does not mean that it cannot be used. If the consistency test of the moist-loose mixes [for example for road foundation] the technical specification indicate still this method of testing.

The workability of the concrete mix with the thin plastic or fluid consistency, as a some kind of fluid, is defined by two rheological parameters: yield stress value and plastic viscosity. These parameters examination need the laboratory conditions. It is the reason that they were replaced by other technical tests of concrete mix properties, linked with its workability. For example in the work (17) it was shown that for the self – compacting concrete mixes the technical measurement of flow diameter is well correlated with yield stress value and the time of flow with the plastic viscosity.

In the standard PN-EN 206-1 (8) the individual classes of consistency tested with different technical methods are designed by other symbols. In the standard there is also the reservation that the consistency classes determined by different methods are not directly correlated with each other. It is among other the consequence of the that, that the measurement of half-liquid or liquid consistency with different methods are stronger correlated or with yield stress value or with plastic viscosity.

However, are the results of the consistency measurements with different methods not correlated? This problem was analyzed by researchers already more than 10 years ago, after introduction of

Czy jednak same wartości wyników pomiaru konsystencji różnymi metodami nie są ze sobą skorelowane? Problem ten interesował badaczy (5) już ponad 10 lat temu po wprowadzeniu normy PN-EN 206-1:2003 (8). Niniejszy artykuł stanowi kolejną próbę odpowiedzi na postawione pytanie.

Przeprowadzone badania polegały na porównaniu wyników badania konsystencji mieszanki betonowej wszystkimi czterema metodami podanymi w normie PN-EN 206-1:2003 (8) oraz sprawdzeniu, czy i w jakim stopniu są one skorelowane. Badania te obejmowały mieszanki o różnym składzie.

## 2. Opis przeprowadzonych badań

Przeprowadzone pomiary konsystencji dotyczyły 168 mieszanek pochodzących z bieżącej produkcji jednej z wytwórni betonu towarowego w Krakowie. Okres poboru próbek obejmował dwa miesiące (maj, czerwiec). Przedmiotem badań były głównie mieszanki betonów pompowalnych dla budownictwa mieszkaniowego w przedziale klas wytrzymałości od C16/20 do C25/30, a także - reprezentowane mniej licznie - stabilizowane cementem mieszanki żwirowo-piaskowe o konsystencji wilgotno-sypkiej.

Badane mieszanki betonowe były wykonane z kruszywa łamanego lub żwiru o maksymalnym wymiarze ziaren 16 mm lub 32 mm.

Konsystencję każdej z mieszanek badano bezpośrednio po wymieszaniu zarobu jednocześnie czterema metodami: opadu stożka, Vebe, stopnia zagęszczalności i stolika rozpliwowego. Łącznie wykonano 672 pomiary. Czas, jaki mijał od chwili pobrania próbki u wylotu mieszalnika przemysłowego do rozpoczęcia normowych badań, nie przekraczał nigdy 15 minut. Badania konsystencji prowadzono w temperaturze normalnej w zakresie od 15°C do 25°C.

Wszystkie pomiary przeprowadzono zachowując warunki podane w poszczególnych normach (10-13), stosując profesjonalny i zgodny z normami sprzęt pomiarowy.

Ponieważ metoda rozpliwu [F], obok metody opadu stożka [S], jest obecnie najczęściej stosowaną metodą na placu budowy, zdecydowano, iż poszukiwać się będzie głównie korelacji wyników uzyskanych za pomocą metody stolika rozpliwowego z wynikami trzech pozostałych metod. Chodziło zatem o ocenę stopnia skorelowania wyników badań średnicy rozpliwu i opadu stożka [F-S], średnicy rozpliwu i stopnia zagęszczalności [F-C] oraz średnicy rozpliwu i czasu Vebe. Dodatkowo oceniono także stopień skorelowania wyników pomiaru czasu Vebe i stopnia zagęszczalności (V-C).

## 3. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań przedstawiono w postaci graficznej na kolejnych rysunkach 1-4. Oprócz wyników, przedstawiono na nich także wykresy aproksymujących je funkcji regresji oraz charakteryzujące je współczynniki determinacji.

the standard PN-EN 206-1:2003 (8). For example it was examined by Kon, Mierzwa and Nowak-Michta (5). This work is another trial to find the answer to this question.

The carry out tests consisted in the comparison of the results of concrete mix consistency measurements, simultaneously by four methods according to PN-EN 206-1:2003 (8) - and checking if they are and to which degree correlated. These tests embraced the mixes of different compositions.

## 2. The experiments

The consistency measurements embraced 168 samples of the concrete mixes from the current production of the one ready-mix concrete plant in Krakow. Sampling period covered two months: May and June of 2013. The examined samples were chiefly to be pumped mixes in the range of classes C16/20 to C25/30 for housing construction and sometimes also cement stabilized gravel-sand mixes, with moist-loose consistency.

The tested mixes were composed of crushed aggregate or seeding gravel with a grain size of up to 16 mm or 32 mm.

The consistency of each mix, taken directly at site after mixing of the concrete bath, was tested simultaneously by four methods: slump, Vebe, degree of compatibility and flow table. All together the 672 measurements were carried out. At the same time a temperature of a sample just before consistency testing and an ambient temperature were registered. Time which has elapsed since the sampling of the mix from its release of industrial mixer up to the start of the standard testing procedure has never exceeded 15 minutes. The consistency was measured at normal temperature, in the range from 15°C to 25°C.

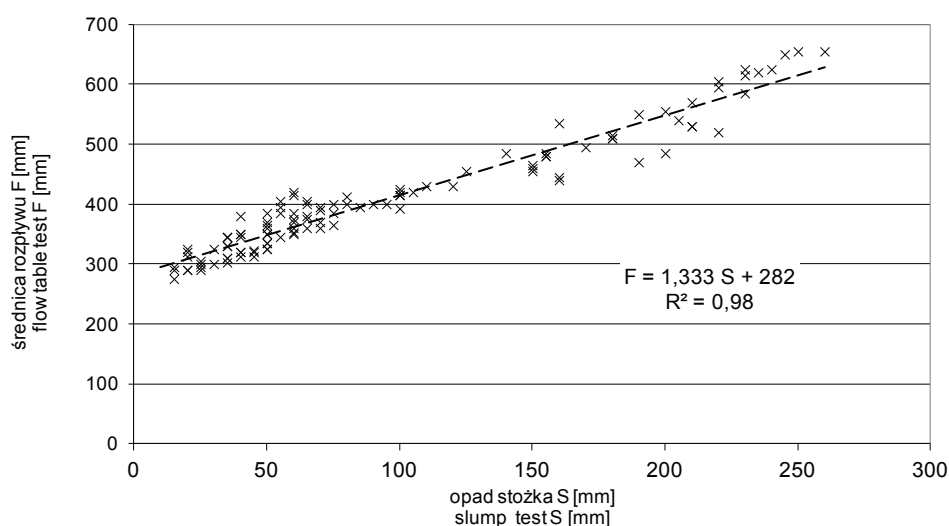
All tests was performed according to the standard requirement (10-13), using the professional equipment and fulfilling all standard requirements.

As the flow method [F], beside of the slump [S] is nowadays the most frequently methods used on site, it was decided that the analyzed correlation will be chiefly concerning the results obtained with the flow table, in comparison to the three remaining methods. Thus the degree of correlation of the results of the flow diameter and Vebe tests [F-S], the flow diameter and degree of compatibility [F-C] as well as flow diameter and Vebe time. Additionally the degree of correlation of the Vebe time tests and degree of compatibility [V-C] waqs examined.

## 3. Results and their analysis

The tests results are shown in the Figs. 1-4. Beside the results, the diagrams of regression functions and determination coefficients are also presented in these Figs.

A relationship between the results of flow table F and slump S is presented in Fig. 1.



Rys. 1. Zależność między średnicą rozptywu F i opadem stożka S

Fig. 1. Flow diameter F vis slump S tests

Zależność między średnicą rozptywu i opadem stożka opisać można funkcją liniową  $F = 1,333S + 282$ . Korelacja wyników okazała się w tym przypadku bardzo mocna, o czym świadczy duża wartość współczynnika determinacji  $R^2 = 0,98$  (liniowy opis zależności tłumaczy aż 98% wyników). Należy wspomnieć, iż bardzo podobną zależność uzyskali wspomniani już Kon, Mierzwa i Nowak-Michta (5). O liniowym związku między rozplywem a opadem stożka pisze też Neville w swoim dziele (7). Wyniki badań pokazały, że za pomocą wielkości opadu stożka można rozróżnić konsystencje mieszanek, które wykazują rozplyw nie mniejszy niż około 300 mm, czyli w zakresie klas od F1 do F6 i od S1 do S5.

Następna zależność dotyczyła średnicy napływu i stopnia zagęszczalności. Także i w tym przypadku stwierdzono silny związek między obydwoima badanymi parametrami [ $R^2 = 0,95$ ]. Im większa jest średnica rozptywu, tym bardziej stopień zagęszczalności zbliża się do wartości granicznej, czyli do jedności. Zależność opisuje funkcja wykładnicza. Na wykresie na rysunku 2 można też zauważyć, że mieszanki, których rozplyw wynosi co najmniej 500 mm charakteryzują się stopniem zagęszczalności w okolicach jedności, a więc mogą być potencjalnie (przy spełnieniu innych wymagań) uznawane za zdolne do samozagęszczenia się.

Stopień skorelowania średnicy rozptywu i czasu Vebe okazał się wyraźnie słabszy ( $R^2 = 0,64$ ). Wynika to z faktu, iż każda z dwóch analizowanych metod jest przydatna do oceny konsystencji mieszanek istotnie różnych. Metoda Vebe pozwala na rozróżnienie konsystencji mieszanek bardziej zwartych (sztywnych), zaś metoda rozplywu - mieszanek bardziej ciekłych. Potwierdzają to wyniki pokazane na rysunek 3. Im większa jest

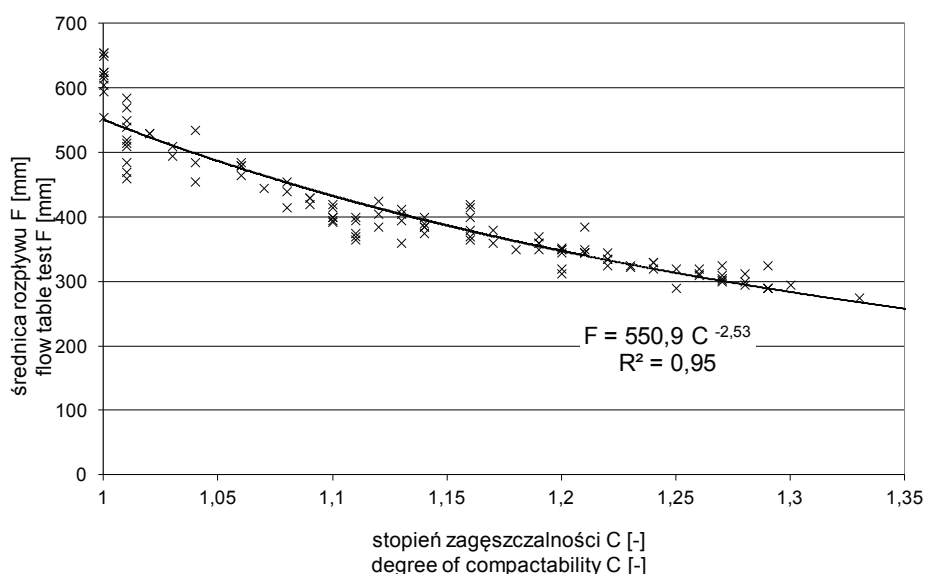
The relationship of flow diameter and slump can be described as a linear function:

$$F = 1.3327 S + 282.14.$$

The results correlation is in this case very good, which is confirmed by the high value of determination coefficient  $R^2 = 0.9833$ . It means that the linear function presents till 98% of results. It should be mentioned that the very similar results were reported by aforementioned Kon, Mierzwa and Nowak-Michta (5). About the linear correlation of the flow and the slump is writing Neville (7) in his wonderful book. The results are showing that the tests of slump the mixes consistency can be differentiated, which show flow not lower that about 300 mm, thus in the range of classes from F1 to F6 and from S1 to S5.

The second relation was the flow diameter and degree of compactibility. Also in this case the strong correlation is found of these two tested parameters [ $R^2 = 0.95$ ]. The higher the flow diameter the degree of compactibility is approaching closer to the threshold value, it means to one. These correlation is described by the exponential function. It is also evident from the diagram in Fig. 2 that the mixes, in which the flow diameter is at list 500 mm have the degree of compactibility approaching one, thus they can be potentially recognized as selfcompacting, if other requirements are fulfilled.

The correlation degree of the flow diameter with Vebe has showed to be much lower [ $R^2 = 0.64$ ]. It is logic because each of two considered method is adequate to assess the significantly different mixes. The Vebe test is allowing to differentiate the consistency of the mixes which are more cohesive (Fig. 3). The higher the flow

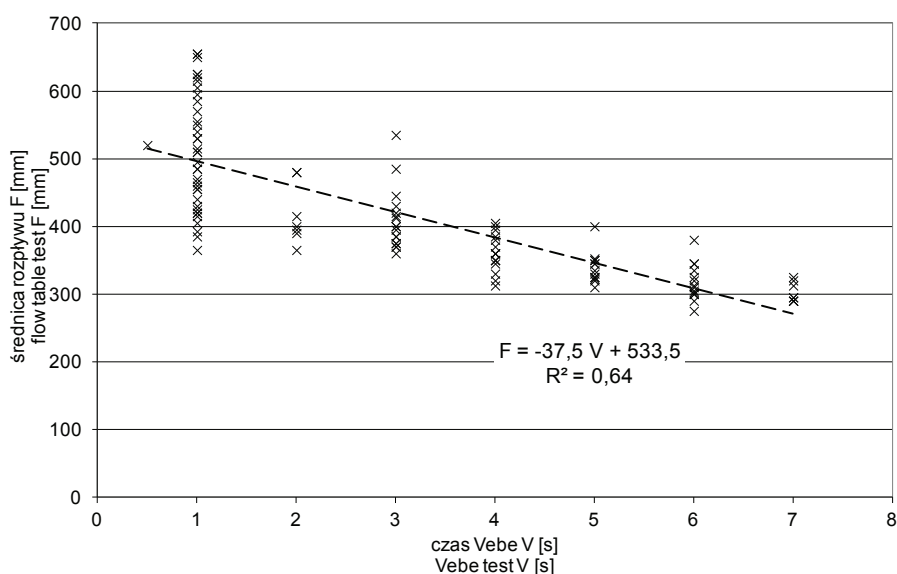


Rys. 2. Zależność między średnicą rozptywu F i stopniem zagęszczalności C

Fig. 2. The flow diameter F vis degree of compatibility C

średnica rozplywu, tym metoda Vebe słabiej rozróżnia stopień ciekłości. Przedstawiona liniowa funkcja regresji pozwala więc jedynie na orientacyjne szacowanie średnicy rozplywu na podstawie czasu Vebe (i vice versa) w zakresie klas V3 i V4.

Ostatnia seria badań wykazała, że zależność między czasem Vebe i stopniem zagęszczalności jest silnie skorelowana. Współczynnik determinacji ( $R^2 = 0,95$ ) ma dużą wartość. Zależność tą opisuje funkcja wykładnicza  $V = 0,915C^{8,097}$  (rysunek 4). Dodać należy, że zależność ta opisuje wyniki badań mieszanek, dla których czas Vebe nie przekracza około 20 s (klasy V2 do V4).



Rys. 3. Zależność między średnicą rozplywu F a czasem Vebe V

Fig. 3. The flow diameter F vis Vebe test V

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania dotyczyły mieszanek popularnie stosowanych betonów zwykłych klas wytrzymałości od C16/20 do C25/30. Mieszanki te charakteryzowały się następującymi zakresami wartości parametrów określających konsystencję:

- opad stożka od 10 do 250 mm;
- średnica rozplywu od 300 do 650 mm;
- stopień zagęszczalności od 1,45 do około 1,0;
- czas Vebe od około 20 s do 1 s.

Uzyskane wyniki pokazują, iż dla tej grupy mieszanek, między parametrami opisującymi ich konsystencję określaną różnymi metodami, istnieje korelacja, i tak:

- zależność między średnicą rozplywu (F) i opadem stożka (S) opisać można funkcją  $F = 1,333S + 282$ ; korelację uznać można za bardzo mocną, gdyż  $R^2 = 0,98$ ;
- zależność między średnicą rozplywu i stopniem zagęszczalności opisuje funkcja  $F = 550,9 C^{-2,53}$ ; podobnie jak w przypadku opadu stożka, także i stopień zagęszczalności jest bardzo mocno skorelowany ze średnicą rozplywu ( $R^2 = 0,95$ );
- zależność między czasem Vebe i stopniem zagęszczalności opisać można funkcją wykładniczą  $V = 0,915 C^{8,097}$ ; wartość współczynnika determinacji  $R^2 = 0,95$  wskazuje, że także i w tym przypadku stopień skorelowania analizowanych parametrów jest bardzo duży;
- najsłabszym ( $R^2 = 0,65$ ) okazał się, co było do przewidzenia, związek między średnicą rozplywu i czasem Vebe; używaną zależność liniową  $F = -37,5V +$

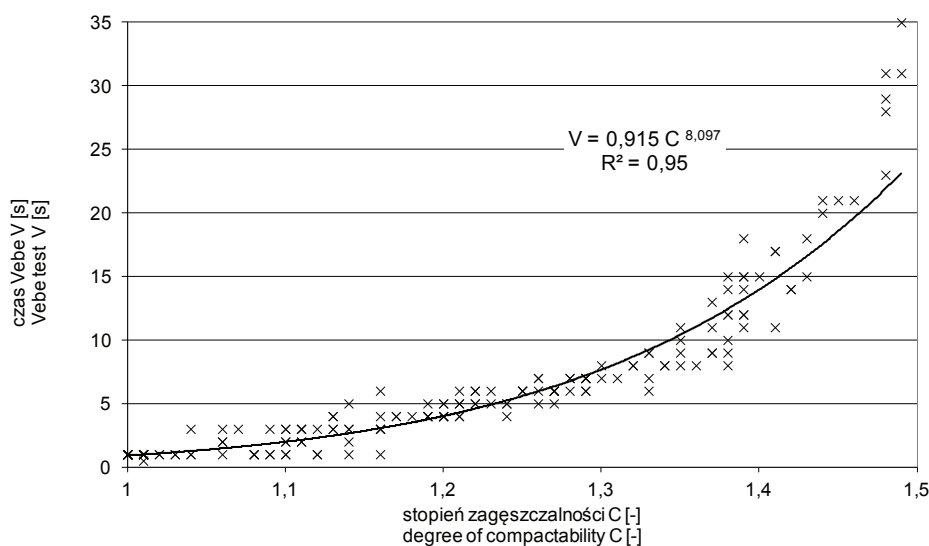
diameter the worse assessment of fluidity degree with Vebe test is.

The presented linear regression function give only the possibility of approximate assessing of flow diameter on Vebe time and inversely, in the range of classes V3 and V4.

The last series of tests show that the relationship between the results of Vebe time and the degree of compactibility shows high correlation and  $R^2$  equals 0.95 [Fig. 4]. The relationship can be presented by an exponential function:

$$V = 0.915 C^{8.0979}$$

It should be added that this relation describes the results of mixes tests for which Vebe time does not exceed 20 s, i.e. the classes V2 to V4.



Rys. 4. Zależność między czasem Vebe V i stopniem zagęszczalności C

Fig. 4. The relation between Vebe test V and degree of compactibility



533,5 traktować należy jedynie jako opisującą występującą tendencję.

Trzeba podkreślić, że przedstawione zależności zachowują swoją ważność w podanych wcześniej zakresach wartości opadu stożka, średnicy rozprylu, wskaźnika zagęszczalności i czasu Vebe.

## Literatura / References

1. Betontechnische Daten – Enthält die Regelungen der neuen Normengeneration im Betonbau. Sika Addiment GmbH, Leimen – Januar 2004, s. 214
2. Hanke V., Beton in Form mit neuer Norm EN 206. Readymix AG, Ratingen – Januar 2001, s. 20
3. Kohutek Z., Kryteria dla betonu według normy europejskiej EN 206-1. Sympozjum Naukowo-Techniczne „Beton i jego składniki – normalizacja, właściwości oraz zastosowanie” (Poznań, 27.02.2003.), Wyd.: Górażdże Cement S.A. & Sika Poland Sp. z o.o. & Instytut Konstrukcji Budowlanych Politechniki Poznańskiej. Poznań – 2003, s. 23-40
4. Kohutek Z., Konsystencja mieszanki betonowej - w kontekście normy PN-EN 206-1 oraz PN-88/B-06250. Materiały szkoleniowe „Norma PN-EN 206-1 „Beton ...” – bez tajemnic”. Wyd.: Stowarzyszenie Producentów Betonu Towarowego w Polsce, Kraków – 2006, s. 79-91
5. Kon E., Mierzwa J., Nowak-Michta A., Korelacje w normowych pomiarach konsystencji mieszanek betonowych oznaczanych według PN-EN 206-1. XIX Konferencja Naukowo-Techniczna „Jadwisin 2004”, s. 301-309
6. Moczko A., Badanie mieszanki betonowej i stwardniałego betonu w świetle unormowań europejskich. II Konferencja „Dni Betonu” (Wisła, 11-13.10.2004.). Wyd.: Polski Cement sp. z o.o., Kraków – 2004, s. 1065-1079
7. Neville A.M., Właściwości betonu (edycja V). Wyd.: Polski Cement, Kraków – 2012, s. 931
8. PN-EN 206-1:2003 - Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
9. PN-EN 206:2014 - Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
10. PN-EN 12350-2:2011 - Badania mieszanki betonowej. Część 2: Badania konsystencji metodą opadu stożka
11. PN-EN 12350-3:2011 - Badania mieszanki betonowej. Część 3: Badanie konsystencji metodą Vebe
12. PN-EN 12350-4:2011 - Badania mieszanki betonowej. Część 4: Badanie konsystencji metodą oznaczania stopnia zagęszczalności
13. PN-EN 12350-5:2011 - Badania mieszanki betonowej. Część 5: Badanie konsystencji metodą stolika rozprylowego
14. PN-EN 12350-8:2012 – Badania mieszanki betonowej. Część 8: Beton samozagęszczalny – Badanie metodą rozprylu stożka
15. PN-88/B-06250 - Beton zwykły
16. Szwabowski J.: Reologia betonów nowej generacji. V Sympozjum Naukowo-Techniczne „Reologia w technologii betonu” (Gliwice, 11.06.2003.), Wyd.: Górażdże Cement S.A. & Katedra Procesów Budowlanych Politechniki Śląskiej, Gliwice – 2003, s. 73-87
17. Szwabowski J., Gołaszewski J.: Technologia betonu samozagęszczalnego. Wyd.: Polski Cement, Kraków - 2010, s. 159

## 4. Conclusions

The examination of consistency was concerning the mixes of commonly used ordinary concrete, belonging to classes from C16/20 to C25/30. These mixes had the following parameters defining consistency:

- slump from 10 to 250 mm,
- flow diameter from 300 to 650 mm,
- degree of compactibility from 1.45 to 1.0,
- Vebe from about 20 to 1 s.

The obtained results are showing that to these mixes group, the parameters which describe the consistency defined by the following correlation was found:

- the relationship between flow diameter [F] and slump [S] can be described as the function  $F = 1.333S + 282$ ; the correlation is very high and  $R^2 = 0.98$ ,
- the relationship between flow diameter and degree of compactibility is described as a function  $F = 550.9C^{-2.53}$ ; similarly as in the case of slump also the degree of compactibility shows high correlation with the flow diameter and  $R^2 = 0.95$ ,
- the relationship between Vebe time and degree of compactibility is linked with the exponential function  $V = 0.915C^{0.97}$ ; the determination coefficient  $R^2 = 0.95$  is showing that also in this case the correlation is high,
- the lowest, with  $R^2 = 0.65$ , was the correlation between flow diameter and Vebe test, which can be expected; the linear function  $F = -37.5V + 533.5$  should be evaluated as describing only the assessing trend.

It should be underlined that the presented relationships are valid in the given ranges of slump, flow diameter, degree of compactibility and Vebe test.