

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2018), 27 (2), 236–248  
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2018), 27 (2)  
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2018), 27 (2), 236–248  
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2018), 27 (2)  
<http://iks.pn.sggw.pl>  
DOI 10.22630/PNIKS.2018.27.2.23

**Wojciech SAS, Justyna DZIĘCIOŁ**

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie  
Faculty of Civil and Environmental Engineering, Warsaw University of Life Sciences – SGGW

## **Wyznaczanie prędkości filtracji w gruncie antropogenicznym pochodzącym z recyklingu destruktu betonowego z wykorzystaniem metod analitycznych**

### **Determination of the filtration rate for anthropogenic soil from the recycled concrete aggregate by analytical methods**

**Słowa kluczowe:** filtracja, prędkość przepływu, współczynnik filtracji, grunt antropogeniczny, destruktu betonowy z recyklingu, regresja liniowa

**Key words:** filtration, flux velocity, coefficient of permeability, anthropogenic soil, recycled concrete aggregate, linear regression

## **Wprowadzenie**

Parametryzacja za pomocą pomiarów liczbowych od dawna towarzyszy opisywaniu zarówno operacji gospodarczych, jak i technicznych. Pozwala ona na ocenę zjawisk i ich porównywanie zarówno ilościowe, jak i jakościowe. W geotechnice właściwa ocena parametrów gruntu jest niezmiernie istotna w formułowaniu wniosków o zachodzących zjawiskach czy w ocenie podłoża

gruntowego i jego przydatności dla celów urbanistycznych.

Podstawą wnioskowania są badania właściwości gruntu, które stają się bazą do wyciągnięcia wniosków o wartościach jego parametrów. Ta zależność jest szeroko stosowana w statystyce, gdzie badania nad wielkością próby stają się podstawą wnioskowania o cechach populacji. Stosuje się tu teorię wnioskowania statystycznego Neymana-Pearsona (Neyman, 1938; Rao, 2005).

Rosnące znaczenie błędów nielosowych wpłynęło na postrzeganie badań losowych jako niewystarczających, szczególnie, że gromadzi się coraz więcej danych, które są stale aktualizowane i poprawiane. Wpływa to na postrzeganie projektowania badania jako kluczowe dla osiągnięcia zamierzonych

rezultatów. Dobór próby do badania, a następnie analiza statystyczna powinna opierać się na znajomości zjawiska i dotychczas przeprowadzonych badań (Kish, 1965, 1996).

Konstruowanie i nadpisywanie takiej bazy wiedzy o zjawisku czy badanym gruncie są istotne z punktu widzenia tworzenia atlasu wiedzy umożliwiającego odtworzenie zachodzących zjawiska w innych próbkach o podobnych parametrach, co pozwala zaoszczędzić czas i pieniądze na kolejną analizę znanych już wcześniej reakcji gruntu o takich samych parametrach, np. składzie granulometrycznym, porowatości, gęstości itp. Tworzenie wytycznych na podstawie analizy wyników badań powinno polegać na wskazaniu ich stosowalności oraz określeniu wskaźników, wzorów i przedziałów opisujących proces oraz zachodzące zmiany możliwe do wykorzystania w teorii estymacji. Wiedza ta może posłużyć do rozbudowywania i aktualizowania norm takich jak Eurokod 7. Dotychczas badaniami i rozpoznawaniem podłoża oraz jego właściwości według Eurokodu zajmowali się m.in.: Garbulewski (2009), Wysokiński, Kotlicki i Godlewski (2011), Lechowicz (2013).

Rachunek prawdopodobieństwa, za pomocą którego obliczana jest statystyka z próby, zakłada jej losowość. Często szczególnie w procesie badań naukowych losowość jest zaburzona ograniczeniami badania lub wręcz jest niemożliwa do uzyskania ze względu na ograniczoną sposobność przebadania materiału. Losowość wynika często z błędów pomiarowych podczas samego badania, np. zniszczenie materiału badawczego. Mówi się wówczas o doborze

próby celowej lub eksperckiej. Prowadzi to do konieczności oszacowania próby reprezentatywnej dla danego badania lub zjawiska (Steczkowski, 1995; Kośny i Peternek, 2011).

Oszacowanie metodą estymacji minimalnej przeciętnej liczby badań potrzebnych dla uzyskania wiarygodnego wyniku jest istotne zarówno z punktu widzenia samej merytoryki ich przeprowadzenie, jak i obniżenia kosztów oraz nakładów czasowych. Ważna jest także ocena parametrów pod kątem możliwości zastąpienia badań laboratoryjnych metodami analitycznej estymacji współczynnika filtracji (Bracha, 1996; Greń, 1970; Kordos, 1988; Wesołowski, 2004).

W niniejszym artykule skupiono się nad zjawiskiem przepływu wody przez ośrodek porowaty, jakim jest grunt antropogeniczny pochodzący z recyklingu betonu. Jako materiału badawczego użyto destruktu betonowego klasy C20/25 według PN-EN 1992-1-1:2008. Kruszywo zostało rozfrakcjonowane, a badania zostały przeprowadzone na mieszance o uziarnieniu 0–31,5 mm. Badany materiał antropogeniczny określono na kruszywo z recyklingu – mieszanka niezwiązana 0–31,5 (PN-EN 13242:2004). Prezentowany materiał jest kruszywem – gruntem o ciągłym uziarnieniu (PN-EN ISO 14688-2:2006, aktualizacja PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012 w listopadzie 2012 r.), o wskaźniku różnoziarnistości  $C_u = 54,55$  – grunt wielofrakcyjny oraz o wskaźniku krzywizny  $C_c = 1,52$ , co świadczy o tym, że jest on dobrze uziarniony pod względem procesu zagęszczania. Materiał badawczy w swojej masie zawierał: 9% frakcji 0,1 mm, 2% frakcji poniżej 0,063 mm, 21% stanowiły ziarna 0,1–1,0 mm. Zde-

cydowaną większość (70%) stanowiły ziarna 1,0–31,5 mm. Tym samym materiał został określony jako gruboziarnisty, o stosunkowo niewielkim zapyleniu.

Destrukt betonowy jest powszechnie stosowany w budownictwie ziemnym, a szczególnie w podbudowach drogowych. Pozwala to na zmniejszenie liczby składowisk i nasypów odpadów gruzu betonowego, który po mechanicznym rozdrobieniu może być ponownie wykorzystywany. Ogranicza to także konieczność pozyskiwania kruszyw naturalnych w budownictwie i drogownictwie. Destrukt betonowy klasyfikowany jest materiałem odpowiednim do konstrukcji podbudów pomocniczych, podbudów zasadniczych, warstw odcinających (Petkovic, Engelsen, Haoya i Breedveld, 2004; Poon i Chan, 2006).

Istotną różnicą przy porównywaniu destruktu betonowego z kruszywem naturalnym są przede wszystkim pozostałości hydratyzowanego cementu na powierzchni ziaren kruszywa będącego składnikiem betonu. W efekcie ta właściwość prowadzi do niższej gęstości właściwej ziaren, zróżnicowania w jakości kruszywa, a także większej zdolności absorpcji (Paranavithana i Mohajerani, 2006; Gee, 2007).

Kruszywa z recyklingu znajdują coraz szersze zastosowanie w budownictwie i budownictwie drogowym. Są zazwyczaj tańsze niż kruszywa naturalne, ponadto ich zastosowanie pozwala na wtórne wykorzystanie odpadów budowlanych, stanowiąc rozwiązanie przyjazne dla środowiska naturalnego. Coraz większa popularność stosowania tego materiału stanowi przyczynek do lepszego poznania właściwości tego materiału oraz ograniczeń i zaleceń jego stoso-

walności już na etapie planowania prac projektowo-budowlanych.

Skład destruktu betonowego zastosowanego w badaniach zaprezentowanych w tabeli 1.

TABELA 1. Skład mieszanki destruktu betonowego

TABLE 1. The composition of a mixture of recycled concrete aggregate

Skład mieszanki* Mixture composition	Zawartość w mieszance destruktu – wagowo Contents of destruct in the mixture – by weight
Kruszywo Crushed stone	75% (70–80%)
Cement	25%
Dodatki (pyły) Additions (dusts)	5%

\*Zawartość wody w mieszance została pominięta ze względu na suszenie destruktu pochodzącego z recyklingu / Water content in the mixture has been omitted due to the recycled water drying.

## Charakterystyka procesu

Wodoprzepuszczalnością nazywa się zdolność gruntu do przepuszczania wody przez kanaliki utworzone z porów. Wartość współczynnika filtracji, zwanego stałą Darcy'ego, opisuje zależność między spadkiem hydraulicznym a prędkością przepływu wody w gruncie (Wiłun, 2001):

$$v = ki \quad (1)$$

gdzie:

$v$  – prędkość przepływu wody w czasie [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],

$k$  – współczynnik wodoprzepuszczalności, równy  $v$  przy  $i = 1$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],

$i$  – spadek hydrauliczny.

Współczynnik filtracji charakteryzuje dany ośrodek, dlatego też zależy od uziarnienia i porowatości gruntu oraz temperatury przepływającej wody.

Pomiar współczynnika filtracji został wykonany przyrządem ITB-ZW-K2, który służy do badania gruntów, których współczynnik filtracji jest większy od  $10\text{--}6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (Kozerski, 1977). Zalicza się do nich żwiry, pospółki oraz piaski (od gruboziarnistych do pylistych). Główną częścią przyrządu stanowią dwa cylindry metalowe (zewnętrzny i wewnętrzny) umożliwiające powstanie różnych poziomów wody oraz pierścieni pomiarowy, w którym umieszcza się próbkę gruntu. Badanie polega na określeniu ilości wody, która przefiltruje się przez próbkę gruntu o danym przekroju w danych czasie i spadku hydraulicznym oraz określonej temperaturze wody. Współczynnik filtracji ( $k$ ) oblicza się ze wzoru:

$$k = \frac{v \cdot l}{A \cdot t \cdot i} \quad (2)$$

gdzie:

$V$  – prędkość przepływającej wody przez próbkę [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],

$l$  – długość próbki [m],

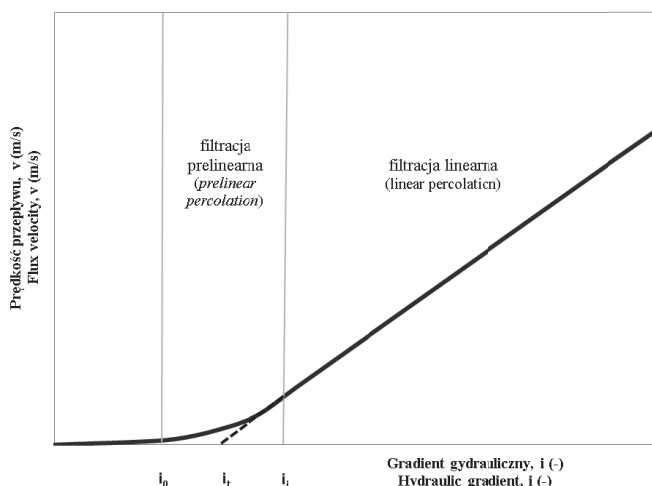
$A$  – powierzchnia przekroju poprzecznego próbki [ $\text{m}^2$ ],

$t$  – czas filtracji wody [s],

$i$  – spadek hydrauliczny [-].

Badania przeprowadza się przede wszystkim dla celów budowlanych, wykorzystując próbki o nienaruszonej strukturze. Dla gruntów nasypowych, takich jak zapory ziemne czy podsypka pod powierzchnie drogowe, bada się próbki o odpowiednim zagęszczeniu (Kozerski, 1977; Pisarczyk i Rymusza, 1993).

W gruntach słabo i bardzo słabo przepuszczalnych zapoczątkowanie filtracji możliwe jest dopiero po wystąpieniu pewnej granicznej wartości gradientu hydraulicznego ( $i_0$ ). Powoduje to, że wykres  $V=f(i)$  nie wychodzi z początku układu, a nawet w początkowym okresie wykazuje krzywoliniowość wywołaną stopniowym narastaniem przepuszczal-



RYSUNEK 1. Zależność między prędkością przepływu a gradientem hydraulicznym  
FIGURE 1. The relationship between the flux velocity and the hydraulic gradient

ności. Taką filtrację nazwano prelinearną. Na rysunku 1 moment rozpoczęcia fazy prelinearnej oznaczono jako  $i_0$ , a jej koniec jako  $i_i$ . Jako  $i_t$  oznaczono przedłużenie fazy linearnej przecinające się z osią X. Aby zapoczątkować ruch wody związanej, naprężenie progowe ( $\tau_0$ ) musi być pokonane przez naprężenie styczne ( $\tau$ ) (Kowalski, 1998; Hansbo, 2001, 2003; Malinowska i Szymański, 2009).

## Teoria estymacji

Teoria estymacji, nazywana również teorią szacowania, zajmuje się wnioskowaniem o właściwych rozkładu prawdopodobieństwa populacji generalnej utworzonej z próby. Posługując się znajomością rozkładu klasowego na podstawie próby, ustala się, do jakiego rozkładu należy odnieść się w badanej próbie generalnej. Estymacja parametryczna występuje wówczas, kiedy elementy klasy możliwych rozkładów populacji generalnej różnią się tylko wartościami parametrów. Estymacja nieparametryczna jest stosowana do bardziej złożonych przypadków, w których różnice dla elementów klasy możliwych rozkładów populacji generalnej dotyczą nie tylko wartości parametrów, ale także postaci funkcji rozkładu (Szulc, 1967; Wywiół, 2001).

Wyróżnia się dwa działy teorii estymacji: punktową i przedziałową. Estymacja punktowa znajduje funkcję próby i jej wartość przyjmuje za najlepsze oszacowanie wartości parametru dla próby generalnej. Estymacja przedziałowa na podstawie próby wyznacza pewien przedział liczbowy, który zawiera w sobie wartość parametru populacji generalnej z uwzględnieniem przyjętego prawdopodobieństwa (Kukiełka, 2002).

## Właściwości dobrego estymatora

W teorii estymacji występują trzy główne cechy, które powinien spełniać każdy dobry estymator, aby jego przydatność w konstrukcji testu była jak najlepsza. Powinien być nieobciążony, zgodny i efektywny (Szulc, 1967; Zasepa, 1972).

Nieobciążoność estymatora charakteryzuje realizacja zmiennej losowej  $X$  składającej się na  $N$ -elementową próbę, która spełnia warunek:

$$E(\widehat{Q}_k) = q_k \quad (3)$$

gdzie:

$\widehat{Q}_k$  – estymator,

$q_k$  – parametr zmiennej losowej  $X$ .

Estymatory spełniające tą zależność nazywamy estymatorami nieobciążonymi, a obciążenie estymatora  $\Delta\widehat{Q}_k = E(\widehat{Q}_k) - q_k$  jest równe zero.

Estymator jest zgodny, jeśli przy nieograniczonym wzroście liczebności próby oszacowanie  $\widehat{Q}_k$  nieznanego parametru  $q_k$  dąży do wartości prawdziwej z prawdopodobieństwem wynoszącym jeden.

$$P(\widehat{Q}_k \rightarrow q_k) = 1 \text{ dla } N \rightarrow \infty \quad (4)$$

Efektywnym estymatorem jest ten, który wykazuje mniejszy rozrzut wartości otrzymanych na podstawie wszystkich możliwych prób. Miara rozrzutu jest wariancja, zatem im mniejsza wariancja, tym lepszy estymator nieobciążony (Zasepa, 1972; Wywiół, 2010).

## Wyniki badań

Wykonano cztery cykle badań, dla których kolejno zwiększano liczbę badanych próbek o pięć. Odpowiednio dla

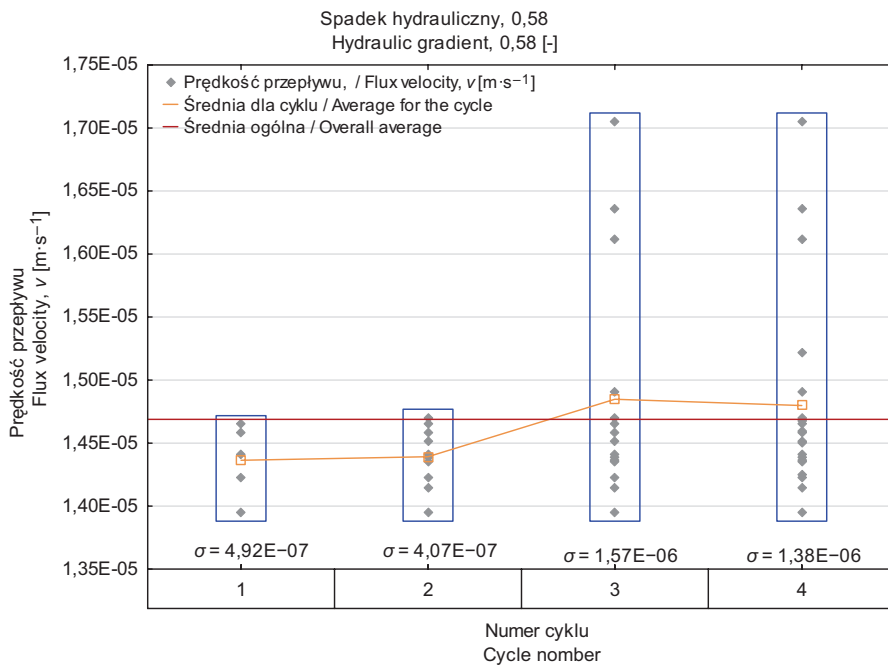
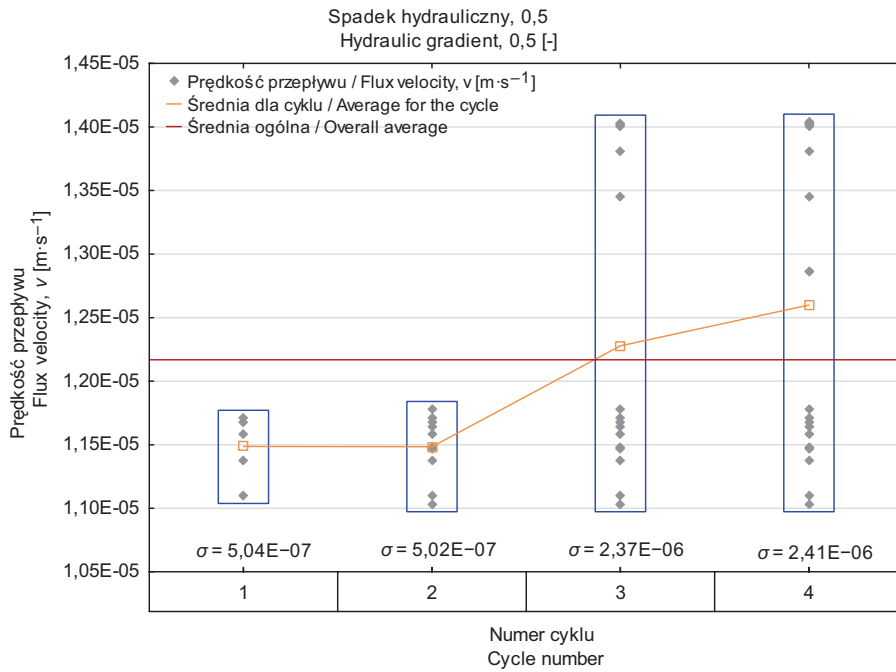
pierwszego cyklu przebadano pięć próbek, dla drugiego 10 próbek, dla trzeciego 15 próbek i dla czwartego 20 próbek. Wszystkie badania były wykonywane przy zagęszczeniu próbek z energią odpowiadającą energii normalnej Proctora, a materiał odpowiadał charakterystyką filtracji piasków pylastych. Każdy kolejny cykl był zwiększany o kolejne pięć próbek, każda próbka przy następujących spadkach hydraulicznych: 0,5, 0,58, 0,67, 0,75 i 0,83. Następnie zestawiono wyniki współczynników przepływu (przepływ w badanych próbkach zachodził od dołu do góry). Na ich podstawie zgodnie z prawem Darcy'ego obliczono prędkości przepływów przy zadanych gradientach. Wyniki badań dla poszczególnych gradientów w kolejnych cyklach przedstawiono na rysunku 2. Zaobserwowano odchylenia standardowe w wynikach dla poszczególnych badań wykonanych w ramach danego cyklu między  $2,95E-07$  a  $2,41E-06$ . Dla lepszego zobrazowania wielkości tych wahań zamieszczono wielkości odchylenia standardowego dla poszczególnych cykli w ramach zadanego gradientu na rysunku 2.

Po przeanalizowaniu wykresów na rysunku 2 można stwierdzić, że badania przeprowadzone w ramach dwóch ostatnich cykli (3 oraz 4) zawierają się w większej amplitudzie wahań niż dla dwóch pierwszych cykli, o czym świadczy znacząca różnica w parametrze odchylenia standardowego dla tych cykli. W tabeli 2 zaprezentowano podstawowe parametry statystyczne dla poszczególnych gradientów w każdym z cykli. Analiza parametrów miar położenia pozwala potwierdzić wnioski, które nasuwają się po analizie rysunku 2.

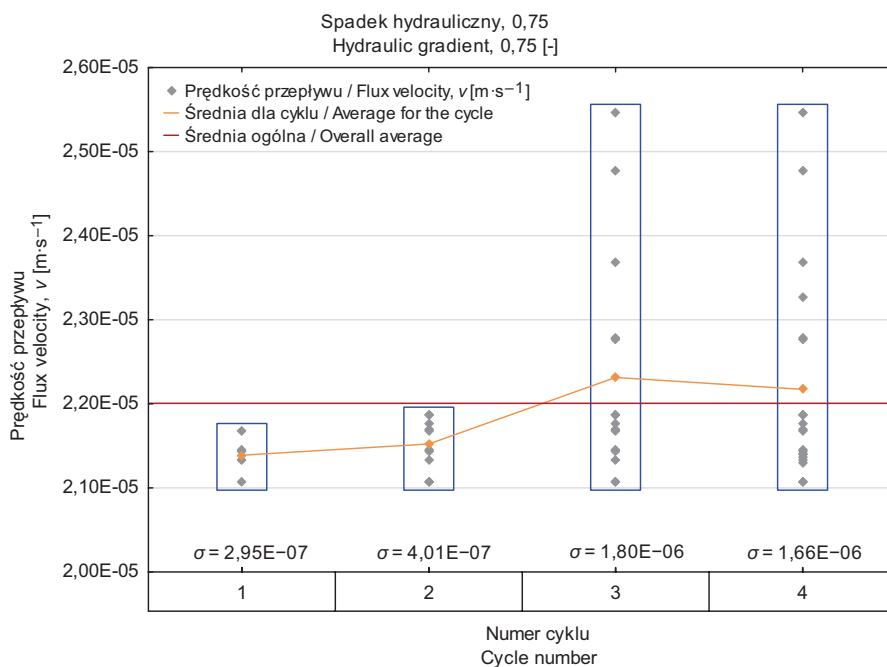
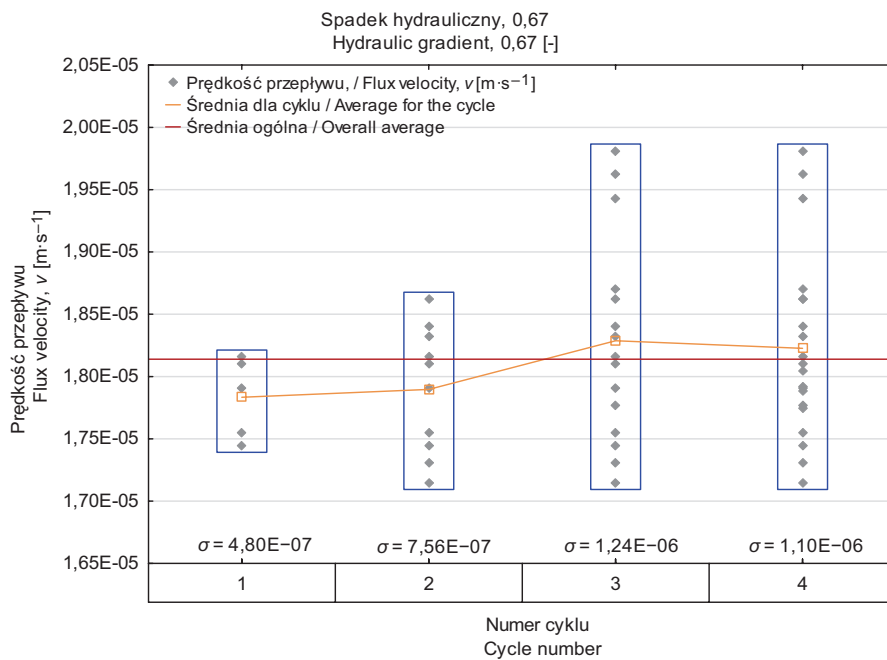
Właściwości gruntu takie jak jego uziarnienie mają znaczenie dla prędkości filtracji wody w gruncie. Zakresy prędkości przepływu przy poszczególnych gradientach w fazie linearnej są charakterystyczne dla danego gruntu i jego uziarnienia, a także mają swoje odzwierciedlenie w kącie nachylenia fazy linearnej względem osi X. Wyniki zależności prędkości przepływu od gradientu hydraulicznego zaprezentowano na rysunku 3.

Rozkład otrzymanych wyników cechuje rozkład o charakterze liniowym zależności między poszczególnymi badaniami przy poszczególnych gradientach. Zależność ta została zinterpretowana jako regresja liniowa oraz opisana równaniem liniowym na każdym z wykresów prezentujących kolejne cykle. Linia regresji na wykresach została przedłużona w taki sposób, aby stykała się i przecinała z osią X. Pozwoliło to na utworzenie kąta nachylenia rozkładu wyników badań przy wzroście gradientu hydraulicznego. Punkty przecięcia oznaczono jako  $i_t$ , a ich wartości podano w tabeli 3.

Ustalono, że wskaźnik procentowej zmienności gradientu ( $i_t$ ) wyznaczonego przez styczną dla poszczególnych cykli zmniejszał się znacząco. Między pierwszym a drugim cyklem wskaźnik procentowej zmiany wynosił 50%, między drugim a trzecim cyklem zmniejszył się o 40% i wyniósł 10,5%. Wynik dla trzeciego i czwartego cyklu mieścił się w granicach powszechnie akceptowalnego odchylenia wyników badań i wynosił 5%. Wyniki te świadczą również o tym, że większe wskaźniki odchylenia standardowego dla zbadanych wskaźników filtracji w trzecim i czwar-

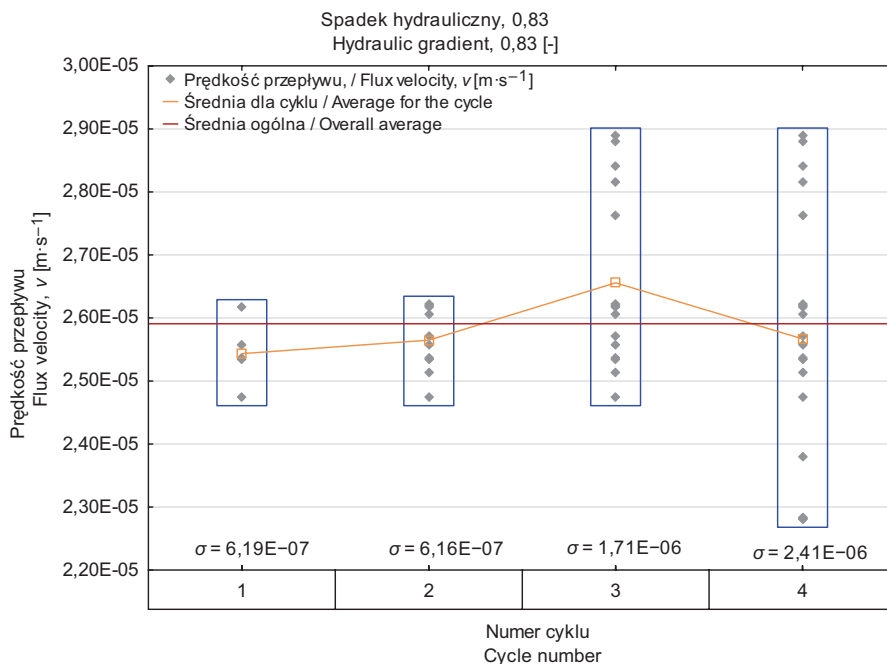


RYSUNEK 2  
FIGURE 2



RYSUNEK 2  
FIGURE 2





RYSUNEK 2. Wyniki współczynnika filtracji dla poszczególnych cykli badań wraz z analizą statystyczną

FIGURE 2. The results of permeability coefficient for each of the test cycles with a statistical analysis

TABELA 2. Opisowa analiza statystyczna otrzymanych wyników współczynnika filtracji

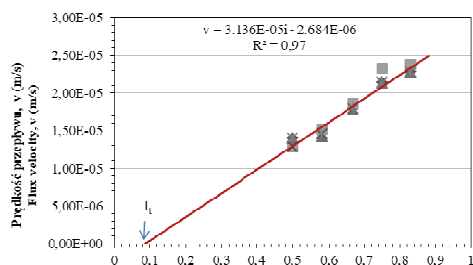
TABLE 2. The descriptive statistical analysis of the results of permeability coefficient

$i$	Cykl Cycle	Licz- ność Quan- tity ( $n$ )	$x$	Mediana Median	Min. Min	Maks. Max	Warian- cja Variance	$SD$	$CV$	$SE$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,5	1	5	2.30E-05	2.32E-05	2.22E-05	2.34E-05	2.54E-13	5.04E-07	2.19	2.25E-07
0,58		5	2.48E-05	2.49E-05	2.40E-05	2.53E-05	2.42E-13	4.92E-07	1.99	2.20E-07
0,67		5	2.66E-05	2.67E-05	2.60E-05	2.71E-05	2.30E-13	4.80E-07	1.80	2.15E-07
0,75		5	2.85E-05	2.86E-05	2.81E-05	2.89E-05	8.70E-14	2.95E-07	1.03	1.32E-07
0,83		5	3.06E-05	3.06E-05	2.98E-05	3.15E-05	3.83E-13	6.19E-07	2.02	2.77E-07
0,5	2	10	2.30E-05	2.31E-05	2.21E-05	2.36E-05	2.52E-13	5.02E-07	2.19	1.59E-07
0,58		10	2.48E-05	2.48E-05	2.40E-05	2.54E-05	1.66E-13	4.07E-07	1.64	1.29E-07
0,67		10	2.67E-05	2.69E-05	2.56E-05	2.78E-05	5.72E-13	7.56E-07	2.83	2.39E-07
0,75		10	2.87E-05	2.88E-05	2.81E-05	2.92E-05	1.61E-13	4.01E-07	1.40	1.27E-07
0,83		10	3.09E-05	3.09E-05	2.98E-05	3.16E-05	3.79E-13	6.16E-07	1.99	1.95E-07

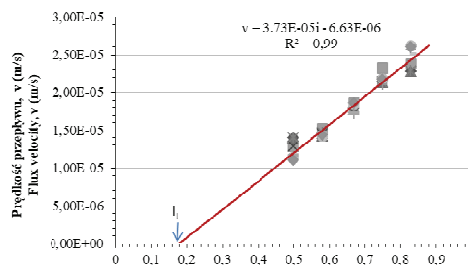
TABELA 2 cd.

TABLE 2 cont.

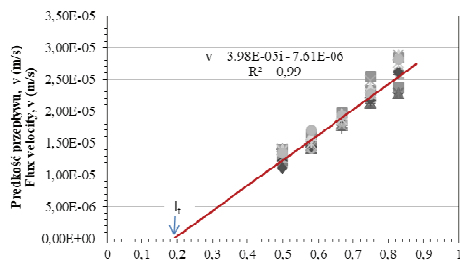
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,5	3	15	2.46E-05	2.33E-05	2.21E-05	2.81E-05	5.62E-12	2.37E-06	9.66	6.12E-07
0,58		15	2.56E-05	2.50E-05	2.40E-05	2.94E-05	2.46E-12	1.57E-06	6.12	4.05E-07
0,67		15	2.73E-05	2.71E-05	2.56E-05	2.96E-05	1.54E-12	1.24E-06	4.55	3.21E-07
0,75		15	2.98E-05	2.90E-05	2.81E-05	3.40E-05	3.22E-12	1.80E-06	6.04	4.64E-07
0,83		15	3.20E-05	3.15E-05	2.98E-05	3.48E-05	2.92E-12	1.71E-06	5.34	4.41E-07
0,5	4	20	2.52E-05	2.46E-05	2.21E-05	2.81E-05	5.79E-12	2.41E-06	9.55	5.38E-07
0,58		20	2.55E-05	2.51E-05	2.40E-05	2.94E-05	1.91E-12	1.38E-06	5.42	3.09E-07
0,67		20	2.72E-05	2.70E-05	2.56E-05	2.96E-05	1.22E-12	1.10E-06	4.05	2.47E-07
0,75		20	2.96E-05	2.89E-05	2.81E-05	3.40E-05	2.76E-12	1.66E-06	5.62	3.71E-07
0,83		20	3.09E-05	3.09E-05	2.75E-05	3.48E-05	5.81E-12	2.41E-06	7.79	5.39E-07



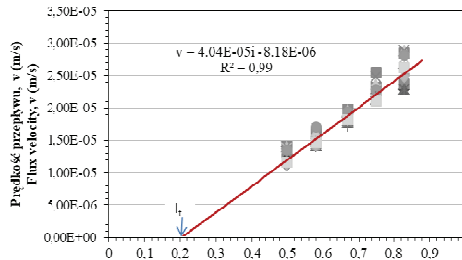
CYKL 1

Gradient hydrauliczny, i (-)  
Hydraulic gradient, i (-)

CYKL 2

Gradient hydrauliczny, i (-)  
Hydraulic gradient, i (-)

CYKL 3

Gradient hydrauliczny, i (-)  
Hydraulic gradient, i (-)

CYKL 4

Gradient hydrauliczny, i (-)  
Hydraulic gradient, i (-)

RYSUNEK 3. Zależność prędkości przepływu od gradientu hydraulicznego

FIGURE 3. The dependence of the flow velocity to the hydraulic gradient

tym cyklu badań nie wpłynęły na przeprowadzoną analizę.

W związku z powyższym można wysnuć wniosek o osiągnięciu stabilności wyników po przeprowadzeniu 20 badań dla pięciu gradientów. Linią regresji dla tych wyników opisuje równanie:

$$v = 4,04E-05 i - 8,18E-06 \quad (5)$$

Pozwala to na szacowanie prędkości przepływów przy kolejnych gradientach hydraulicznych. Należy jednak zwrócić uwagę, że równanie jest prawdziwe dla destruktu betonowego o określonych wcześniej parametrach i danym uziarnieniu, wykazane jest także uwzględnienie wystąpienia fazy prelinearnej.

TABELA 3. Granica przecięcia funkcji liniowej z osią X ( $i_t$ )TABLE 3. The border crossing tangent linear function at the intersection with X axis ( $i_t$ )

$i_t$	Cykl 1 Cycle 1	Cykl 2 Cycle 2	Cykl 3 Cycle 3	Cykl 4 Cycle 4
		0,085	0,170	0,190
Zmiana [%]	50,0		10,5	5,0

## Podsumowanie

Przeprowadzona analiza pozwoliła na analityczne oszacowanie ilości badań niezbędnych do wyznaczenia równania empirycznego pozwalającego wyznaczyć prędkość przepływu dla badanego gruntu antropogenicznego. Ocena zgodności oszacowanej funkcji regresji z danymi empirycznymi pozwoliła na określenie błędu względnego współczynnika filtracji dla gruntu antropogenicznego, o określonych w artykule parametrach i uziarnieniu, na poziomie 3%. Wzór pozwala na wyznaczenie prędkości przepływu na podstawie wyznaczonych gradientów. Należy jednak zaznaczyć, że wzór ten ma określone granice stosowności. Trzeba wziąć pod uwagę między innymi parametry fizyczne i granulometryczne gruntu antropogenicznego oraz możliwość wystąpienia fazy prelinearnej przy gradientach poniżej 0,5. Szersze zastosowanie metod statystycznych i analitycznych jest uzasadnione ekonomicznie, a także z punktu widzenia oszczędności czasu. Niedoszacowanie współczynnika filtracji, i co za tym idzie prędkości przepływu, może w rezultacie dać fałszywy obraz objętości filtrującej wody i związanych z tym kosztów jej odprowadzenia poza obszar budowli. Ponadto wiedza o występowaniu gradientu początkowe-

go może dać informacje o tzw. szczelności gruntu oraz występowaniu ruchu ustalonego, w zakresie którego obowiązuje prawo Darcy'ego.

## Literatura

- Bracha, C. (1996). *Teoretyczne podstawy metody reprezentacyjnej*. Warszawa: PWN.
- Garbulewski, K. (2009). Wykonanie i interpretacja badań laboratoryjnych wg PN-EN 1997-2. W *XXIV WPPK, Wisła, 1*, 47-66.
- Gee, K. (2007). *Use of recycled concrete pavement as aggregate in hydraulic-cement*. 42 Concrete Pavement, FHWA Publication-T 5040.37. Washington, DC: FRP US Department of Transportation.
- Greń, J. (1970). Wielowymiarowy estymator regresyjny średniej dla skończonej populacji. *Przegląd Statystyczny, 1*, 73-78.
- Hansbo, S. (2001). Consolidation equation valid for both Darcian and non-Darcian flow. *Géotechnique, 51*(1), 51-54.
- Hansbo, S. (2003). Deviation from Darcy's law observed in one-dimensional consolidation. *Géotechnique, 53*(6), 601-605.
- Kish, L. (1965). *Survey Sampling*. New York: John Wiley & Sons.
- Kish, L. (1996). Stuletnie zmagania o badania reprezentacyjne. *Wiadomości Statystyczne, 8*, 3-16.
- Kordos, J. (1988). *Jakość danych statystycznych*. Warszawa: PWE.
- Kośny, M., Peternek, P. (2011). Wielkość próby a istotność wnioskowania statystycznego. *Didactics of Mathematics, 8*(12), 71-80.

- Kowalski, J. (1998). *Hydrogeologia z podstawami geologii*. Wrocław: Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu.
- Kozerski, B. (1977). *Zasady obliczeń hydrogeologicznych ujęć wód podziemnych. Wytyczne określenia współczynnika filtracji metodami pośrednimi i laboratoryjnymi*. Warszawa: Wydawnictwa Geologiczne.
- Kukielka, L. (2002). *Podstawy badań inżynierskich*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Lechowicz, Z. (2013). Ustalanie geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych. *Geoinżynieria Drogi Mosty Tunele, 1*, 24-27.
- Malinowska, E. i Szymański, A. (2009). Analiza zmian gradientu hydraulicznego w charakterystykach przepływu słabonośnego podłoża. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 4*(18), 35-47.
- Neyman, J. (1938). Contribution to the Theory of Sampling Human Population. *Journal of American Statistical Association, 33*, 101-116.
- Paranavithana, S. i Mohajerani, A. (2006). Effects of Recycled Concrete Aggregates on Properties of Asphalt Concrete. *Resource Conservation and Recycling, 48*, 1-12.
- Petkovic, G., Engelsen, C.J., Haoya, A.O. i Breedveld, G. (2004). Environmental impact from the use of recycled materials in road construction: method for decision making in Norway. *Resources Conservation and Recycling, 42*, 249-264.
- Pisarczyk, S. i Rymśa, B. (1993). *Badania laboratoryjne i polowe gruntów*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- PN-EN 13242:2004. Kruszywa do niezwiązanych i hydraulicznie związanych materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym.
- PN-EN 1992-1-1:2008. Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- PN-EN ISO 14688-2:2006. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania.
- PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania.
- Poon, C.S. i Chan, D. (2006). Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. *Construction and Building Materials, 20*(8), 578-585.
- Rao, J.N.K. (2005). Interplay between sample survey theory and practice: An appraisal. *Survey Methodology, 31*(2), 117-138.
- Steczkowski, J. (1995). *Metoda reprezentacyjna w badaniach zjawisk ekonomiczno-społecznych*. Warszawa – Kraków: PWN.
- Szulc, S. (1967). *Metody statystyczne*. Warszawa: PWE.
- Wesołowski, J. (2004). Problemy estymacji dla małych obszarów. *Wiadomości Statystyczne, 3*, 9-14.
- Wiłun, Z. (2001). *Zarys geotechniki*. Warszawa: WKŁ.
- Wysokiński, L., Kotlicki, W. i Godlewski, T. (2011). *Projektowanie geotechniczne według Eurokodu 7*. Warszawa: Wydawnictwo Instytutu Techniki Budowlanej.
- Wywił, J. (2001). Estimation of population mean on the basis of non-simple sample when nonresponse error is present. *Statistics in Transition, 5*(3), 443-450.
- Wywił, J. (2010). *Wprowadzenie do metody reprezentacyjnej*. Katowice: Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Katowicach.
- Zasępa, R. (1972). *Metoda reprezentacyjna*. Warszawa: PWE.

## Streszczenie

**Wyznaczanie prędkości filtracji dla gruntu antropogenicznego pochodzącego z recyklingu destruktu betonowego z wykorzystaniem metod analitycznych.** W artykule zaprezentowano metody szacowania doboru wielkości próby dla wybranych parametrów geotechnicznych. Autorzy skupili się na zjawisku filtracji i doborze wielkości próby potrzebnej do prawidłowego oszacowania współczynnika filtracji dla zadanego gradientu hydraulicznego. Analizie poddano różne wielkości prób, a ocena procentowej amplitudy rozbieżności pozwoliła na oszacowanie optymalnej ilości przeprowadzonych badań dla uzgodnienia właściwego średniego współczynnika filtracji. Zastoso-

wane metody statystyczne poddano analizie i oceniono je pod kątem jak najlepszego dopasowania do badanego zjawiska. Posłużyło to do stworzenia równania pozwalającego na wyznaczenie prędkości przepływu przy kolejnych gradientach niepoddanych badaniu oraz dzięki temu określono granice stosowalności wzoru.

## Summary

### **Determination of the filtration rate for anthropogenic soil from the recycled concrete aggregate by analytical methods.**

The article presents methods for estimating the selection of sample size for selected geotechnical parameters. The authors focused on the filtration process and the selection of the sample size needed to correctly estimate the filtration coefficient for a given hydrau-

lic gradient. Various sample sizes were analyzed, and the assessment of the percentage amplitude of the discrepancy allowed to estimate the optimal number of tests performed to agree on the appropriate average filtration coefficient. The applied statistical methods were analyzed and evaluated in terms of the best fit to the studied process. It was used to build an equation allowing to determine the flow velocity at successive gradients not tested and the limits of the applicability of the formula were determined.

### **Authors' address:**

Wojciech Sas, Justyna Dzieciół  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
w Warszawie  
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska  
Laboratorium – Centrum Wodne  
02-767 Warszawa, ul. Ciszewskiego 6  
e-mail: wojciech\_sas@sggw.pl  
justyna\_dzieciol@sggw.pl