



MIKOŁAJ BARTKOWIAK

mikolaj.bartkowiak@put.poznan.pl



MIECZYSLAW SŁOWIK

mieczyslaw.slowik@put.poznan.pl

Politechnika Poznańska

Niepewność pomiaru gęstości objętościowej mieszanki mineralno-asfaltowej

Niepewność pomiarowa jest istotnym wskaźnikiem pozwalającym ocenić wiarygodność i użyteczność pomiaru [1]. Według [1] wynik pomiaru jest tylko przybliżeniem (estymatą) wartości wielkości mierzonej i dlatego każdemu wynikowi pomiaru powinna towarzyszyć niepewność wynikająca z jego losowości. Wynik należy podawać nie za pomocą jednej liczby, ale tak jak zmienną losową ciągłą w postaci przedziału, nazywanego przedziałem ufności. Wtedy z określonym prawdopodobieństwem,

przypisanym temu przedziałowi, można przyjąć, że wartość wielkości mierzonej jest w nim zawarta, oczywiście pod warunkiem, że pomiar i analiza dokładności zostały wykonane poprawnie. Pojęciami związanymi z niepewnością pomiaru są: tolerancja i wymagana zdolność pomiarowa. Tolerancja to liczba mianowana określająca różnicę między największą i najmniejszą akceptowalną wartością danej cechy. Określa ona przedział, w którym powinny się zawierać rzeczywiste wartości określonej cechy w poszczególnych egzemplarzach wytwarzanych wyrobów [1]. Jeśli wynik pomiaru ma być użyteczny, należy określić dopuszczalną niepewność pomiaru rozumianą jako graniczna wartość, przy której wynik pomiaru może być jeszcze podstawą do oceny lub podjęcia decyzji [1]. Zrozumiałe jest więc działanie mające na celu zmniejszenie niepewności pomiarowej, jednak pociąga to za sobą wzrost kosztów, rozumianych na przykład jako nakłady finansowe, względnie czas poświęcony na wykonanie badań. Z tego powodu należy w racjonalny sposób określić wymaganą (dopuszczalną) niepewność pomiaru i stosunek tej niepewności do tolerancji badanej cechy, który w literaturze określany jest zdolnością pomiarową. Wymaganą zdolność pomiarową należy określić przed przystąpieniem do oznaczenia wartości badanej wielkości. Arendarski [1] podaje, że jeżeli mierzone są elementy maszyn, najczęściej przyjmuje się, że wymagana zdolność pomiarowa powinna wynosić $0,1 T$, gdzie T to tolerancja wymiaru. Jednak nie jest to reguła obowiązująca wszystkie pomiary. W budownictwie, a w szczególności w budownictwie drogowym, osiągnięcie takiej zdolności pomiarowej w przypadku pojedynczego pomiaru jest bardzo trudne, a niekiedy wręcz niemożliwe. Wynika to z faktu, iż materiał taki jak mieszanka mineralno-asfaltowa cechuje się dużo większą zmiennością właściwości fizycznych niż np. stal. Taka teza znajduje potwierdzenie w literaturze [15], według

której, ze względu na wielofrakcyjność materiału mineralnego, jego zróżnicowany skład mineralogiczny oraz zmienność właściwości lepiszcza asfaltowego, mieszanka mineralno-asfaltowa jest jednym z najbardziej złożonych materiałów budowlanych.

Istotnym pytaniem, na które należy odpowiedzieć przed rozpoczęciem badań jest liczebność próby n danego badania. Według [14] próbę można uznać za:

- bardzo małą, gdy $n \leq 10$,
- małą, gdy $10 < n \leq 30$,
- dużą, gdy $n > 30$.

Większa liczebność próby pozwala uzyskać lepsze oszacowanie danego parametru, a w szczególności odchylenia standardowego wyników oznaczenia, ale powoduje wzrost kosztów wykonania oznaczenia. Według [1] odchylenie standardowe to parametr teoretyczny, którego wiarygodną wartość można oszacować na podstawie odpowiednio dużej ($n > 30$) serii pomiarów tej samej wartości wielkości mierzonej. Zakłada się [1], że wykonanie dużych serii pomiarów, można zalecać głównie wtedy, gdy celem badania jest wyznaczenie tzw. połączonego odchylenia standardowego (ang. pooled experimental standard deviation (PESD)), które w dalszych analizach będzie uznawane za znaną niepewność standardową pojedynczej obserwacji przy prowadzeniu podobnych pomiarów w takich samych warunkach. Wyznaczenie połączonego odchylenia standardowego PESD w każdej stosowanej procedurze badawczej, można uznać za kompromis pomiędzy koniecznością dokładnego oszacowania parametru, a czasem i kosztami wykonywania badań. Pozwala także na dokonanie oceny zdolności pomiarowej konkretnej procedury badawczej.

Przy obliczaniu niepewności rozszerzonej (ang. expanded uncertainty) dla średniej z n pomiarów mogą występować dwa przypadki [1]:

- zmienność rozkładu obserwacji jest znana, równa połączoneму odchyleniu standardowemu (PESD), wyznaczoneму na podstawie dużej serii wcześniejszych pomiarów,
- zmienność rozkładu obserwacji nie jest znana, wtedy współczynnik rozszerzenia (ang. coverage factor) wyznacza się za pomocą rozkładu t-Studenta.

Jeżeli połączone odchylenie standardowe jest znane to przy pomiarach prowadzonych tą samą metodą, w tych samych warunkach, ale dla innego materiału, wykonując serię n_1 nowych pomiarów, można wyznaczyć niepewność standardową z tej serii ze wzoru:

$$u(\bar{X}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n_1}} = \frac{u_p(X)}{\sqrt{n_1}}$$

w którym:

$u(\bar{X})$ – niepewność standardowa średniej z nowej serii pomiarów,

$u_p(x)$ – niepewność standardowa połączona,

σ – połączone odchylenie standardowe,

n_1 – liczba nowych pomiarów.

Zależność ta pozwala na obliczenie niepewności standardowej z wykorzystaniem uprzednio wyznaczonej wartości połączonego odchylenia standardowego. Należy zwrócić też uwagę, iż Arendarski [1] wyraźnie zaznacza, że powinny być to nowe oznaczenia, wykluczając możliwość używania tych samych wyników do oznaczenia niepewności standardowej i zmniejszania tej niepewności, jak ma to miejsce w przypadku stosowania obliczenia niepewności pomiaru przy wykorzystaniu zmiennych t-Studenta [3].

Gęstość objętościowa i metody jej oznaczania

Gęstość objętościowa próbki mieszanki mineralno-asfaltowej jest to według [9] stosunek masy próbki do objętości z wolnymi przestrzeniami, w określonej temperaturze badania. Gęstość objętościowa wraz z gęstością służy do obliczenia zawartości wolnych przestrzeni w próbce mieszanki mineralno-asfaltowej. Zawartość wolnych przestrzeni, do której określenia wymagane jest oznaczenie gęstości objętościowej, jest jednym z podstawowych kryteriów oceny mieszanki mineralno-asfaltowej. Według [12] *prawidłowo zaprojektowana mieszanka mineralno-asfaltowa powinna zapewniać dostateczną rezerwę wolnej przestrzeni w zagęszczonej nawierzchni, aby w okresie maksymalnego nagrzania jej przez słońce nie wystąpiło „pocenie się” warstwy ścieralnej*, czyli wypływanie lepiszczka asfaltowego na powierzchnię. W publikacji tej podkreśla się również, iż poszczególne metody oznaczania gęstości objętościowej mają wpływ na zawartość wolnych przestrzeni w próbce zagęszczonej mieszanki mineralno-asfaltowej, która według ówczesnych metod oznaczania zdaniem autorów była zawyżana, a różnice pomiędzy średnimi wartościami wolnej przestrzeni wynosiły nawet 2%.

Aktualnie gęstość objętościową oznacza się według normy PN-EN 12697-6 [9]. Do czasu opracowania powyższej normy korzystano również z procedur badań do projektowania składu i kontroli mieszanek mineralno-asfaltowych opracowanych przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów [18]. W obowiązującej obecnie normie [9] dopuszczono stosowanie czterech metod oznaczania gęstości objętościowej:

- metoda A: oznaczenie próbki w stanie suchym, nazywana także metodą australijską,
- metoda B: oznaczenie próbki w stanie nasyconym powierzchniowo-suchym – SSD, nazywana także metodą hydrostatyczną,
- metoda C: oznaczenie próbki w stanie uszczelnienia powierzchniowego,
- metoda D: oznaczenie na podstawie wymiarów geometrycznych.

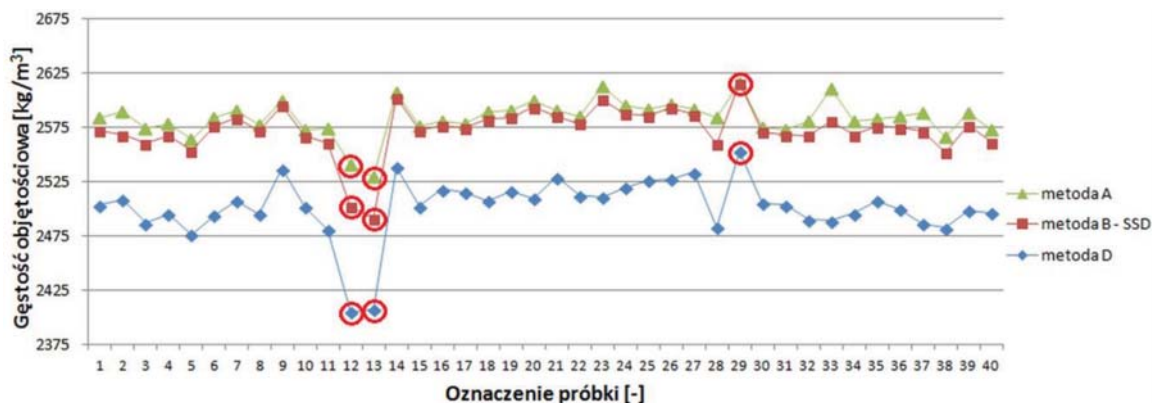
W normie [9] wskazano, jaką metodę należy stosować w zależności od właściwości próbki mieszanki mineralno-asfaltowej. Możliwość stosowania danej metody zależy głównie od struktury mieszanki mineralno-asfaltowej i kształtu próbki. Metoda A jest odpowiednia w przypadku oznaczania gęsto-

ści objętościowej mieszanek bardzo zwartych takich jak np. asfalt lany [9]. Metodę B, która jest najczęściej używana, należy stosować w przypadku mieszanek o ciągłym uziarnieniu o zawartości wolnych przestrzeni do 5% (v/v). Metodę C stosuje się do badania próbek z zawartością wolnych przestrzeni do 15% [9], jednak utrudniony sposób przeprowadzania oznaczenia powoduje, że ta metoda jest rzadko stosowana. Metoda D jest odpowiednia do pomiaru gęstości objętościowej próbek o dowolnej zawartości wolnych przestrzeni. Zaleca się stosowanie metody D do próbek o zawartości wolnych przestrzeni większej niż 15%. Badane próbki powinny mieć regularną powierzchnię i geometryczny kształt [9]. Można domniemywać [17], że poszczególne metody oznaczania gęstości objętościowej będą powodowały różnice w otrzymywanych wynikach a ponadto niepewność pomiaru będzie zróżnicowana w zależności od zastosowanej metody.

Niepewność pomiaru wielu próbek Marshalla

W Laboratorium Drogowym Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej wykonano badania mające na celu określenie zdolności pomiarowej różnych metod badawczych według wymagań określonych w [1], [11] oraz porównanie wyznaczonej niepewności z wartościami podanymi w normach, o ile niepewność pomiaru została w nich określona. W ramach tych badań wykonano 2 próbki wstępne oraz 40 próbek zagęszczonych przez ubijanie metodą Marshalla według normy PN-EN 12697-30 [10]. Mieszaną, którą wykorzystano do wykonania próbek był beton asfaltowy o wysokim module sztywności AC WMS 16 PMB 25/55-60 przeznaczony do warstwy wiążącej oraz podbudowy nawierzchni obciążonej ruchem KR 5-6. Temperatura mieszanki w chwili rozpoczęcia zagęszczania wynosiła $145 \pm 5^\circ\text{C}$. Próbkę zagęszczono wykonując 2×75 uderzeń, zgodnie z wymaganiami określonymi w [16]. Wysokość ubitych próbek mieściła się w zakresie od 62,12 do 65,90 mm, a wartość średnia wyniosła 63,45 mm. Zawartość wolnych przestrzeni według recepty wynosi 3,0% (v/v). Dla próbek oznaczono gęstość objętościową trzema metodami: metodą A, metodą B – SSD, czyli tzw. metodą hydrostatyczną oraz metodą D, tzw. geometryczną (rys. 1).

Jak podano w [1] *przy prowadzeniu długich serii pomiarów trzeba się liczyć z możliwością zmiany warunków pomiaru i wystąpieniem zakłóceń o charakterze systematycznym*. Wyznaczenie P_{ESD} wymaga przeprowadzenia długiej serii pomiarów, dlatego zwrócono szczególną uwagę na kontrolę warunków badania i odnotowywano wszelkie zmiany w warunkach wykonywania próbek. Na podstawie obserwacji warunków badania stwierdzono, że próbki o oznaczeniach 12, 13, 29 wykonane zostały niezgodnie z założonymi warunkami (nieodpowiednia ilość uderzeń ubijająca). Postanowiono, że uzyskane wartości gęstości objętościowej w przypadku wymienionych próbek nie będą uwzględniane przy wyznaczaniu połączonego odchylenia standardowego. Odrzucenie tych rezultatów próbowano także potwierdzić za pomocą typowych testów eliminujących wartości odbiegające (ang. *outliers test*) [2] [11] [13] [14]. Wyniki tych testów zestawiono w tabeli 1. W przypadku testu Hampela wszystkie trzy warto-



Rys. 1. Wartości gęstości objętościowej próbek AC WMS 16 uzyskane trzema metodami

Tabela 1. Rezultaty testów eliminujących wartości odbiegające

Rodzaj testu	Rozkład, prawdopodobieństwo	Oznaczenie próbki oraz odrzucona wartość gęstości objętościowej (metoda A) [kg/m ³]	Oznaczenie próbki oraz odrzucona wartość gęstości objętościowej (metoda B – SSD) [kg/m ³]	Oznaczenie próbki oraz odrzucona wartość gęstości objętościowej (metoda D) [kg/m ³]
Test Grubbsa	rozkład t-Studenta, P = 99,87%	12 – 2541 13 – 2529	12 – 2502 13 – 2492	12 – 2405 13 – 2407
Test Rosnera	rozkład t-Studenta, P = 99,87%	12 – 2541 13 – 2529	12 – 2502 13 – 2492	12 – 2405 13 – 2407
Test Hampela	—	12 – 2541 13 – 2529 29 – 2617	12 – 2502 13 – 2492 29 – 2616	12 – 2405 13 – 2407 29 – 2553
Kryterium Chauveneta	rozkład normalny, P = 98,65%	12 – 2541 13 – 2529	12 – 2502 13 – 2492 29 – 2616	12 – 2405 13 – 2407 29 – 2553
Test Grafa	—	brak	12 – 2502 13 – 2492	12 – 2405 13 – 2407
Reguła trzysigmowa	rozkład normalny, P = 99,73%	13 – 2529	12 – 2502 13 – 2492	12 – 2405 13 – 2407

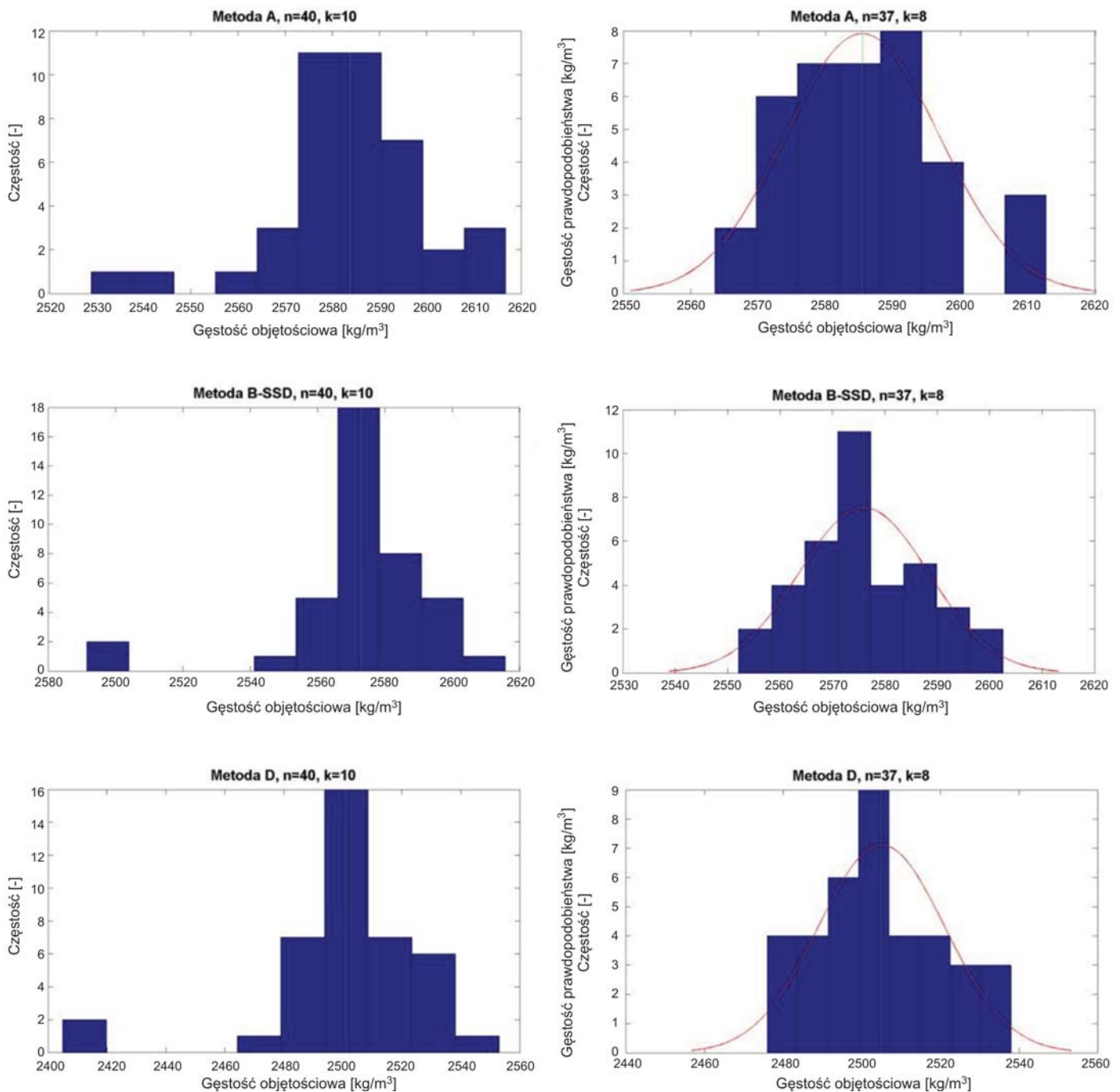
Tabela 2. Rezultaty testów normalności rozkładu

Wartości statystyczne	Metoda A		Metoda B – SSD		Metoda D	
Liczność próby [-]	40	37	40	37	40	37
Średnia [kg/m ³]	2584	2585	2573	2576	2501	2505
Odchylenie standardowe [kg/m ³]	16,7	11,5	22,3	12,4	28,0	16,1
Normalność rozkładu według testu Lillieforsa	Nie	TAK	nie	TAK	nie	TAK
Normalność rozkładu według testu Shapiro-Wilka	W=0,922 P=0,89% Nie	W=0,971 P=43,9% TAK	W=0,826 P=0,00% nie	W=0,981 P=75,8% TAK	W=0,833 P=0,00% nie	W=0,974 P=51,9% TAK

ści uzyskane dla nieodpowiednich warunków pomiaru zostały odrzucone. W tabeli dla niektórych testów zostały podane rozkłady prawdopodobieństwa używane w teście oraz wartości prawdopodobieństwa dla wartości krytycznych.

W tabeli 2 podano wartości statystyczne dla próbek badanych trzema metodami. W przypadku każdej z metod analizowano dwa zbiory wartości: z wartościami odbiegającymi (n=40) i bez wartości odbiegających (n=37). Wszystkie zbiory poddano testom na normalność rozkładu. W analizowanym przykładzie oba użyte testy potwierdziły normalność

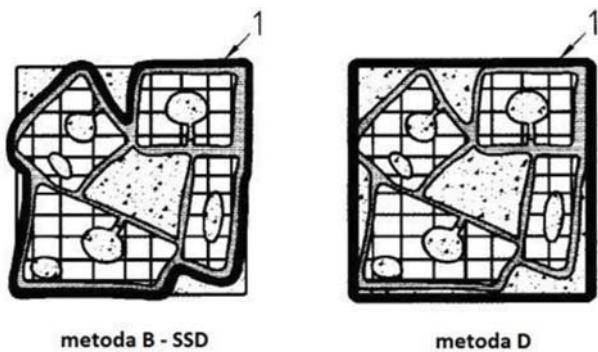
rozkładu w przypadku próbek bez wartości odbiegających i nie potwierdziły normalności rozkładu w przypadku próbek z wartościami odbiegającymi. Do wykonania testu Lillieforsa wykorzystano algorytm wbudowany w program statystyczny, natomiast test Shapiro-Wilka wykonano według skryptu własnego autorstwa napisanego według wskazówek zawartych w [8]. W teście Shapiro-Wilka uznaje się, że rozkład prawdopodobieństwa analizowanej próbki jest rozkładem normalnym, gdy uzyskana w teście wartość statystyki $P > 5\%$ [8]. Wyniki zaprezentowane na rysunku 1 i wartości podane w ta-



Rys. 2. Histogramy analizowanych wyników badań

beli 2 wskazują, że metoda A oznaczania gęstości objętościowej daje największe wartości. Nieco mniejsze wartości uzyskano w wyniku oznaczenia gęstości objętościowej metodą B – SSD. Wartości uzyskane w przypadku metody D są znacznie niższe od wyników uzyskanych dwoma pozostałymi metodami. W załączniku A do normy wyjaśniono, że różnica wynika z faktu, iż przy oznaczaniu gęstości objętościowej metodą D wolne przestrzenie na powierzchni próbek są brane pod uwagę jako część objętości próbki, zaś w przypadku metody B – SSD woda pozostaje tylko w wolnych przestrzeniach, które są wewnątrz próbki (rys. 3).

Odchylenia standardowe podane w tabeli 2 z uwagi na dużą liczebność próby można uznać za połączone odchylenia standardowe. Test porównujący wariancje [3] wykazał, że połączone odchylenia standardowe w przypadku metod A i B – SSD są sobie równe, natomiast połączone odchylenie standardowe dla metody D jest od nich większe. Z tego powodu metody A oraz B – SSD uznaje się za metody o większej zdolności pomiarowej. Wyniki oznaczenia gęstości objętościowej badanej mieszanki mineralno-asfaltowej, do przyjętego współczynnika rozszerzenia $k = 2$ ($P = 95\%$) podano w tabeli 3.



Objaśnienia

1 — : Granice pomierzonej objętości

Rys. 3. Idea pomiaru gęstości objętościowej różnymi metodami [9]

Tabela 3. Wyniki oznaczania gęstości objętościowej

Rodzaj metody	Wynik badań
A (australijska)	$\rho_{b,dry} = 2585 \pm 23 \text{ kg/m}^3$ $U(\rho_{b,dry}) = 23 \text{ kg/m}^3 (0,89\%)$
B – SSD (hydrostatyczna)	$\rho_{b,ssd} = 2576 \pm 25 \text{ kg/m}^3$ $U(\rho_{b,ssd}) = 25 \text{ kg/m}^3 (0,97\%)$
D (geometryczna)	$\rho_{b,dim} = 2505 \pm 32 \text{ kg/m}^3$ $U(\rho_{b,dim}) = 32 \text{ kg/m}^3 (1,28\%)$

Dopuszczalna różnica między wynikami równoległych oznaczeń gęstości objętościowej nie powinna przekraczać wyznaczonej niepewności pomiarowej. Test dla dwóch średnich [3] wykazał, że wyników oznaczania gęstości objętościowej uzyskanych za pomocą różnych metod nie można uważać za równoważne.

Korzystając z możliwości zmniejszania niepewności pomiaru gęstości objętościowej, wyrażonej za pomocą połączonego odchylenia standardowego, poprzez wykonanie większej liczby oznaczeń dla kolejnych badanych mieszanek, uzyskano wartości niepewności pomiarowej w zależności od liczby wykonanych oznaczeń, które zamieszczono w tabeli 4.

Norma PN-EN 12697-6 [9] określa niepewności oznaczania gęstości objętościowej tylko metodą B – SSD podając, że są to dane o charakterze informacyjnym uzyskane z norm niemieckich. Wartość niepewności oblicza się według podanych wzorów, uwzględniając procent masy kruszywa większego niż 11,2 mm w mieszance mineralno-asfaltowej. W przypadku badanej mieszanki mineralno-asfaltowej zawartość (m/m) kruszywa większego niż 11,2 mm wynosiła $A = 19,5\%$. Zakładając wartość współczynnika rozszerzenia $k = 2$, niepewność rozszerzona w przypadku pomiarów wykonywanych przez tego samego laboranta i na tej samej aparaturze (powtarzalność) wynosi $U(\rho_{b,ssd}) = 16 \text{ kg/m}^3$, natomiast niepewność rozszerzona w przypadku pomia-

Tabela 4. Wartość niepewności pomiaru w zależności od liczby oznaczeń

Liczba oznaczeń [-]	$U(\rho_{b,dry})$ [kg/m ³]	$U(\rho_{b,ssd})$ [kg/m ³]	$U(\rho_{b,dim})$ [kg/m ³]
2	16	18	23
3	13	14	19
4	12	12	16
6	9	10	13
9	8	8	11

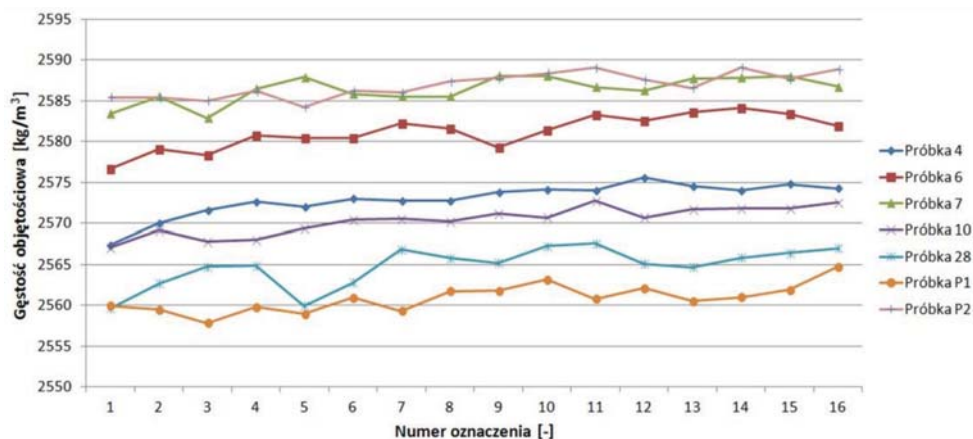
rów wykonywanych przez różnych laborantów na różnej aparaturze (odtwarzalność) wynosi $U(\rho_{b,ssd}) = 24 \text{ kg/m}^3$. Niepewności obliczone według normy [9] mają mniejsze wartości od wyznaczonych w przypadku pomiarów laboratoryjnych. Powodem tego może być kilka czynników takich jak: większa zmienność warunków przeprowadzania badania, mniejsza dokładność użytej wagi, jak również inne, np. temperatura otoczenia, wilgotność, ciśnienie atmosferyczne.

Niepewność pomiaru jednej próbki badanej wielokrotnie

Wykonano wielokrotne ($n = 16$) oznaczenia gęstości objętościowej metodą B – SSD siedmiu wybranych próbek. Wyniki badań zamieszczone na wykresie (rys. 4) potwierdzają, że niepewność oznaczania gęstości objętościowej wynikająca ze zróżnicowanej struktury próbek oraz odchyłek w składzie mieszanki mineralno-asfaltowej jest większa od niepewności wynikającej z dokładności aparatury pomiarowej użytej do wykonania oznaczenia.

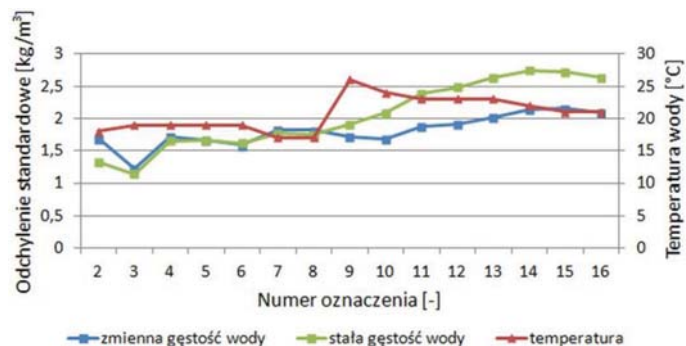
W wyniku przeprowadzonej analizy statystycznej określono, że połączone odchylenie standardowe uzyskane w przypadku pojedynczej próbki (próbka nr 6) badanej wielokrotnie wynosi $PESD = 2,1 \text{ kg/m}^3$. Jest to największa wartość z uzyskanych dla siedmiu badanych próbek.

Według wskazań zawartych w [17] dołożono wszelkich starań, aby zachować standardowe warunki środowiskowe podczas wykonywania badań. W przypadku nieuniknionych zmian tych warunków, zgodnie z zaleceniami notowano ich zmienność. Oznaczenia wykonywano według procedury



Rys. 4. Wykres otrzymanych wartości gęstości objętościowej próbek badanych wielokrotnie

określonej w normie [9], dokonując pomiaru temperatury wody, w której zanurzana była próbka, w celu dokładnego określenia gęstości wody. Na rysunku 5 można zauważyć wzrost odchylenia standardowego wartości gęstości objętościowych, obliczonych dla stałej gęstości objętościowej wody równej $\rho_w = 0,988 \text{ kg/m}^3$, który jest spowodowany zmianą temperatury wody.



Rys. 5. Wykres odchylenia standardowego dla uzyskanych wartości gęstości objętościowej (oś pionowa główna) i temperatury wykonania oznaczeń (oś pionowa pomocnicza) – wyniki dla próbki nr 6

Przyrost wartości niepewności, spowodowany zwiększeniem wartości odchylenia standardowego jest niewielki. Każde działanie zapewniające zmniejszenie niepewności, które jednocześnie nie jest zbyt czasochłonne, jest działaniem niezbędnym.

Niepewność standardowa złożona

Do wyznaczenia niepewności standardowej złożonej pomiaru gęstości objętościowej metodą hydrostatyczną konieczne jest określenie niepewności pomiaru masy. Pomiar masy próbek mieszanki mineralno-asfaltowej dokonywano na wadze o III klasie dokładności. W celu określenia niepewności pomiaru masy wykonano długoterminowe pomiary tego parametru dla oznaczenia precyzji pośredniej [6]. Niepewność obliczono według zasad omówionych w [7]. Pomiary wykonywano dla masy bliskiej maksymalnemu możliwemu obciążeniu wagi. Na podstawie pomiarów przyjęto, że niepewność pomiaru masy ma rozkład prostokątny o rozstępie $R = 0,8 \text{ g}$. Niepewność standardowa pomiaru masy wynosi:

$$u(x) = \frac{0,5R}{\sqrt{3}} = \frac{0,5 \cdot 0,8}{\sqrt{3}} = 0,23 \text{ g}$$

Niepewność standardowa złożona pomiaru gęstości objętościowej metodą B – SSD:

$$\frac{u(\rho_{b,ssd})}{\rho_{b,ssd}} = \sqrt{\left(\frac{u(m_1)}{m_1}\right)^2 + \left(\frac{u(m_2)}{m_2}\right)^2 + \left(\frac{u(m_3)}{m_3}\right)^2 + \left(\frac{u(\rho_w)}{\rho_w}\right)^2}$$

$$\frac{u(\rho_{b,ssd})}{\rho_{b,ssd}} = \sqrt{\left(\frac{0,23}{1282,8}\right)^2 + \left(\frac{0,23}{790,0}\right)^2 + \left(\frac{0,23}{1283,8}\right)^2 + \left(\frac{0,000,2}{998,5}\right)^2}$$

$$\frac{u(\rho_{b,ssd})}{\rho_{b,ssd}} = \sqrt{0,02^2 + 0,03^2 + 0,02^2 + 0,00^2} = 0,04\%$$

Zatem niepewność rozszerzona $U(\rho_{b,ssd})$ wynosi:

$$U(\rho_{b,ssd}) = 0,04 \cdot 2594 \cdot 2 = 2,1 \text{ kg/m}^3$$

$$U(\rho_{b,ssd}) = 2,1 \text{ kg/m}^3 (0,08\%)$$

W przypadku oznaczeń o większym stopniu skomplikowania, np. takich, w których zastosowano więcej niż jedno urządzenie pomiarowe, należy stosować złożony model obliczeniowy, który zaleca się w [1] [4] [17].

Obliczona niepewność standardowa złożona jest dwukrotnie mniejsza od *PESD* uzyskanego dla jednej próbki badanej wielokrotnie. Wynika to z faktu, iż ten model obliczeniowy uwzględnia tylko błędy instrumentalne. Potwierdza to, że niepewności pomiarowe wyznaczone metodą statystyczną są większe od niepewności wyznaczanych obliczeniowo, co jest zgodne z dotychczasowym doświadczeniem autorów.

Podsumowanie

Rozkład wartości uzyskiwanych z oznaczeń gęstości objętościowej, zgodnie z założeniem opartym na centralnym twierdzeniu granicznym [1] i po odrzuceniu wartości odbiegających ma rozkład normalny. Rozkład uzyskany dla metody B – SSD uzyskał największą zgodność z rozkładem normalnym ($P = 75,8\%$), ponieważ zgodnie z centralnym twierdzeniem granicznym dla większej ilości zmiennych, które nie mają zróżnicowanych rozkładów (w tym przypadku pomiarów masy), uzyskuje się większą zgodność z rozkładem normalnym. Połączone odchylenie standardowe (metoda B) wyznaczone dla wielu próbek wykonanych z tej samej mieszanki mineralno-asfaltowej ($PESD = 16,1 \text{ kg/m}^3$) jest znacznie większe od połączonego odchylenia standardowego uzyskanego dla jednej próbki badanej wielokrotnie ($PESD = 2,1 \text{ kg/m}^3$). Potwierdza to, że na wyniki tego parametru istotny wpływ ma proces zagęszczenia próbki oraz odchyłki składu mieszanki.

Wyniki oznaczenia gęstości objętościowej tych samych próbek, uzyskane za pomocą różnych metod, różnią się między sobą, co potwierdzono testem dla dwóch średnich. Uzyskane wyniki potwierdzają wnioski z [12], że najmniejsze wartości gęstości objętościowej otrzymuje się, wykonując oznaczenia metodą D (tzw. metodą geometryczną), gdyż w tej metodzie uwzględniane są także tzw. zewnętrzne wolne przestrzenie. Największe wartości otrzymuje się wykonując oznaczenia metodą australijską, nieuwzględniającą wolnych przestrzeni. Z metody B – SSD (tzw. metoda hydrostatyczna) otrzymuje się natomiast wartości pośrednie. *PESD* otrzymane dla metod A oraz B – SSD są sobie równe i mniejsze od odchylenia uzyskanego dla metody D, przez co metody A oraz B – SSD (tzw. metoda hydrostatyczna) uznaje się za metody o większej zdolności pomiarowej.

Oszacowana niepewność pomiaru została wyznaczona do próbek wykonanych z analizowanej mieszanki AC WMS. Na podstawie danych dotyczących powtarzalności dla tej meto-

dy określonych w [9] można stwierdzić, iż mieszanki mineralno-asfaltowe o porównywalnym uziarnieniu będą cechowały się zbliżoną wartością niepewności pomiaru. Należy jednak zaznaczyć, że wyznaczona metodą statystyczną niepewność pomiaru dla analizowanej mieszanki jest istotnie większa od niepewności określonej według wzoru zawartego w normie [9] pomimo zachowania zwiększonej staranności wykonywania badań.

Przeprowadzone badania potwierdzają, że zawsze należy podawać według jakiej metody gęstość objętościowa została oznaczona, szczególnie jeśli jej wartość będzie dalej wykorzystywana w innych wzorach (np. kryteria zmęczenia). Najbardziej rozpowszechnioną metodą jest metoda B, jednak w różnych krajach używa się również innych metod, np. we Francji oznacza się gęstość objętościową przy pomocy promieni gamma [5].

Analizy zamieszczone w artykule potwierdzają tezę zawartą w [1] oraz [4], że *obliczanie niepewności nie jest ani zadaniem rutynowym, ani zadaniem czysto matematycznym, zależy ono od szczegółowej wiedzy o naturze wielkości mierzonej i procedurze pomiaru oraz od właściwego zdefiniowania wielkości mierzonej (mezurandu)*.

Bibliografia

- [1] J. Arendarski, *Niepewność pomiarów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013
- [2] J. Firlej, *Wykorzystanie kryterium Chauveneta do oceny wyników badań*, Drogownictwo 6-7/2008, s. 201-204, Warszawa 2008
- [3] J. Greń, *Statystyka matematyczna. Modele i zadania*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1984
- [4] *Guide to the expression of uncertainty in measurement*, Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), 2008
- [5] J. Judycki, M. Jaczewski, *Badanie wpływu zastosowania warstw betonu asfaltowego o wysokim module sztywności (AC-WMS) w konstrukcjach nawierzchni na spękania niskotemperaturowe i na zmniejszenie powstawania deformacji trwałych, Etap 1*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2011, <https://www.gddkia.gov.pl/userfiles/articles>
- [6] P. Konieczka, J. Namieśnik, *Ocena i kontrola jakości wyników pomiarów analitycznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007
- [7] *Niepewność pomiaru masy w praktyce*, Radwag, Radom 2011, <http://www.radwag.pl/pl/Publikacje,11,5,0>
- [8] M.R. Nornadiah, B.W. Yap, *Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling test*, Journal of Statistical Modeling and Analytics Vol. 2, No.1, p. 21-33, 2011
- [9] PN-EN 12697-6:2008, *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 6: Oznaczenie gęstości objętościowej próbek mieszanki mineralno-asfaltowej*
- [10] PN-EN 12697-30:2008, *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 30: Przygotowanie próbek zagęszczonych przez ubijanie*
- [11] PN-ISO 5725-2:2002, *Dokładność (poprawność i precyzja) metod pomiarowych i wyników pomiarów. – Część 2: Podstawowa metoda określania powtarzalności i odtwarzalności standardowej metody pomiarowej*
- [12] A. Sadowski, M. Ruder, J. Boratyński, *Zawartość wolnych przestrzeni w mieszankach mineralno-bitumicznych*, Drogownictwo 2/1999, s.42-48, Warszawa 1999
- [13] M. Słowik, *Analiza niepewności pomiarowych przy ocenie właściwości asfaltów drogowych*, Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej 7/2010, s.129-144, Poznań 2010
- [14] M. Słowik, *Wybrane zagadnienia lepkosprężystości drogowych asfaltów modyfikowanych zawierających elastomer SBS*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013
- [15] B. Stefańczyk, P. Mieczkowski, *Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wykonawstwo i badania*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2009
- [16] *Wymagania techniczne WT-2, Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych*, Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2014
- [17] *Wytyczne EA dotyczące wyrażania niepewności w badaniach ilościowych*, EA-04/16, Polskie Centrum Akredytacji, Warszawa 2003, https://www.pca.gov.pl/?page=dokumenty_ea
- [18] J. Zawadzki i inni, *Procedury badań do projektowania składu i kontroli mieszanek mineralno-asfaltowych, informacje, instrukcje – Zeszyt 64*, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 2002

Katalog typowych konstrukcji nawierzchni w świetle norm i wymagań technicznych

List Czytelnika

Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych, zwany dalej Katalogiem, opracowano w Katedrze Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad. Stanowi on załącznik do zarządzenia nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.

Według paragrafu 152 ust. 1 warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz.U. nr 43 z 1999 r. poz. 430 z późniejszymi zmianami), Katalog może być stosowany do projektowania konstrukcji nawierzchni jezdni dróg publicznych.

Niektóre wymagania Katalogu są niższe albo różne niż w niektórych polskich normach i wymaganiach technicznych opracowanych przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów na zlecenie GDDKiA, a przywołanych w Katalogu.

1. Wtórne moduły odkształcenia

Według PN-S-02205 punkt 2. 10. 1 oraz rysunków 3 i 4 wymagany wtórny moduł odkształcenia E_2 na powierzchni robót ziemnych wynosi od 100 MPa w przypadku ruchu lekkiego i średniego do 120 MPa w przypadku ruchu ciężkiego i autostrad. Wymaganie to obejmuje również warstwy doprowadzające podłoże gruntowe nawierzchni do grupy nośności G1, tj. warstwę mrozoochronną oraz warstwę ulepszonego podłoża, jeżeli warstwa mrozoochronna nie występuje.

Według tego samego punktu, pod warstwą ulepszonego podłoża w strefie obliczeniowej głębokości przemarzania wymagane jest uzyskanie wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,97$.

Tymczasem Katalog określa na warstwie mrozoochronnej E_2 od 80 MPa (tablica 8.4) dla KR1 – KR2 do $E_2 = 50$ MPa (tablica 8.2) dla KR5 – KR7 na warstwie ulepszonego podłoża. Nie określono wymaganego E_2 na warstwie mrozoochronnej, który według tablicy 8.2 będzie pośredni pomiędzy 50 i 120 MPa.

Wszystkie E_2 na powierzchni robót ziemnych według Katalogu są niższe od wymaganych przez PN-S-02205.

PN-S-02205 rys. 4 najniższe E_2 na głębokości 0,5 m od powierzchni robót ziemnych określa na 30 MPa w przypadku ruchu lekkiego i średniego oraz 45 MPa w przypadku ruchu ciężkiego i autostrad.

W tabelicy 8.4 Katalogu dla KR1 i G4 na spodzie najniższej warstwy na głębokości od 0,30 do 0,65 m zapisano $E_2 = 25$ MPa, tj. mniejszy od wymaganego przez PN-S-02205 30 MPa.

W tabelicy 8.2 dla KR5 – KR7 oraz G3 i G4 na spodzie najniższej warstwy na głębokości od 0,25 do 0,50 m zapisano $E_2 = 25$ i 35 MPa, tj. mniejsze od wymaganych przez normę 45 MPa.

2. Mrozoodporność kruszywa

W tabelicy 11.3 zapisano wymagane kategorie mrozoodporności kruszywa F_4 , F_7 i F_{10} . Tymczasem PN-EN13 242 w tabelicy 18 specyfikuje tylko: F_1 , F_2 , F_4 , $F_{\text{Deklarowana}}$ i F_{NR} .

Załącznik B tej normy w tabelicy B1 określa jako właściwe dla klimatu atlantyckiego i kontynentalnego w warunkach nasycenia kategorie F_1 , F_2 i F_4 .

Ustawa Prawo zamówień publicznych art. 30 ust. 1 wymaga opisywania przedmiotu zamówienia za pomocą cech technicznych i jakościowych z zachowaniem Polskich Norm przenoszących normy europejskie.

3. Wskaźnik CBR

W tabelicy 11.3 Katalogu zapisano wskaźniki 25 i 20%.

W WT- 4 2010 tabl. 6 takie wskaźniki nie występują. Najniższy to 35%.

Niezrozumiały jest brak w WT-4 wymaganego CBR wobec mieszanki do nawierzchni.

WT-4 2010 przewiduje w tab. 6 nawierzchnię z kruszywa niezwiązanego zaś w Katalogu tab. 11.1 zapisano, że nie stosuje się go do warstw ścieralnych i wiążących.

4. Mieszanki związane cementem

Według Katalogu tab. 11. 1 nie stosuje się mieszanek związanych cementem do warstw ulepszonego podłoża, zaś według WT-5 2010 pkt. 1.3.2 stosuje się.

WT-5 2010 pkt. 1.3.3. przewiduje podbudowy pomocnicze z mieszanki związanej cementem dla KR1 – KR2, zaś w Katalogu takie podbudowy nie występują.

5. Wnioski

5.1. Konieczne wydaje się wyeliminowanie sprzeczności w zakresie wtórnych modułów odkształcenia pomiędzy Katalogiem a PN-S-02205 poprzez skorygowanie jednego z tych dokumentów, albo obu, w taki sposób, by wymagania nie różniły się.

5.2. Konieczne jest usunięcie z Katalogu niewystępujących w PN-EN 13242 kategorii mrozoodporności kruszywa F_7 i F_{10} oraz zapisanie właściwych.

5.3. Wskaźniki CBR mieszanek kruszywa zarówno w Katalogu, jak i WT-4 winny być jednakowe.

Celowe jest określenie wskaźnika CBR dla mieszanek kruszywa przeznaczonych do nawierzchni, tj. do warstwy ścieralnej.

5.4. Wskazane jest wyeliminowanie różnic pomiędzy Katalogiem i WT-5 co do stosowania mieszanek związanych z cementem do warstw ulepszonego podłoża oraz do warstw podbudowy pomocniczej dla KR1 – KR2.

6. Przepisy związane

1. PN-S-02205: 1998 Drogi Samochodowe – Roboty Ziemne – Wymagania i badania.

2. PN-EN-13242 + A1:2010 Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym.

3. Mieszanki niezwiązane do dróg krajowych WT-4 2010 Wymagania Techniczne.

4. Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym do dróg krajowych WT-5 2010. Wymagania Techniczne.

Zbigniew Mocek

Ad. p. 1 i wniosku 5.1.

Różnice w wymaganych wartościach wtórnego modułu odkształcenia na powierzchni robót ziemnych wynikają przede wszystkim z odmiennego określenia granicy między konstrukcją nawierzchni i korpusem ziemnym w Katalogu i normie PN-S-02205.

Według definicji konstrukcji nawierzchni przyjętej w Katalogu, warstwa ulepszonego podłoża gruntowego należy do konstrukcji nawierzchni, a nie do robót ziemnych, jak to jest w normie PN-S-02205. Razem z podbudową pomocniczą i warstwą mrozoochronną warstwa ulepszonego podłoża gruntowego należy do „dolnych warstw konstrukcji nawierzchni”. Dlatego wymagania na poziomie określonym jako „powierzchnia robót ziemnych” (tj. spodzie konstrukcji nawierzchni) muszą być inne w Katalogu niż w normie PN-S-02205. Według katalogu nośność podłoża gruntowego na poziomie spodu nawierzchni jest określona wartością wtórnego modułu odkształcenia i dotyczy gruntu nasypowego lub rodzimego w wykopie (grunt nieulepszony). Wartość wtórnego modułu odkształcenia jest ściśle związana z klasyfikacją grup nośności podłoża.

Konsekwencją przyjętego w Katalogu układu warstw konstrukcji nawierzchni i ich definicji jest również to, że warstwa mrozoochronna nie jest elementem podbudowy pomocniczej, a są to dwie odrębne warstwy. W przypadku ruchu KR1 i KR2 podbudowa pomocnicza nie występuje i dlatego wymaganie dotyczące minimalnej wartości wtórnego modułu odkształcenia (dla KR1 i KR2 jest to 80 MPa) jest określone na powierzchni warstwy mrozoochronnej. Dla pozostałych kategorii ruchu wymaganie dotyczące minimalnej wartości wtórnego modułu odkształcenia (100 MPa lub 120 MPa) jest określone na powierzchni warstwy mrozoochronnej lub warstwy podbudowy pomocniczej, zależnie od konkretnego rozwiązania dolnych warstw konstrukcji nawierzchni.

Ad. p. 2

Tak, zgadza się. Autorzy katalogu przyjmowali w tym przypadku właściwości podane w WT-4 2010. Nie sprawdziliśmy zgodności z normą PN-EN. W tej chwili zapisy F_7 i F_{10} w Katalogu są niezgodne z normą PN-EN. Trzeba nawiązać kontakt z IBDiM (p. Kraszewski) i zapytać jaka jest geneza zapisów F_7 i F_{10} .

Ad. p. 3

W Katalogu obniżono wartości wybranych wskaźników CBR ze względu na obniżenie nośności układu tych warstw do $E > 80$ MPa w przypadku KR1 i KR2. WT-4 2010 w kolejnej edycji musi być dostosowane do Katalogu w zakresie nazewnictwa i wymagań, gdyż w tym zakresie nie jest do końca spójne z Katalogiem. Na przykład ulepszone podłoże w Katalogu nie jest warstwą mrozoochronną jak jest zapisane w WT-4 2010.

Nawierzchnie z kruszywa nie są w zakresie Katalogu z 2014 r.

Ad. p. 4

Tak, nie występują w Katalogu mieszanki związane cementem do warstw ulepszonego podłoża, gdyż są za drogie. Nie występują w Katalogu warstwa podbudowy pomocniczej w przypadku KR1-2, gdyż nie są potrzebne. Nośność dolnych warstw konstrukcji KR1-2 w Katalogu została obniżona do $E > 80$ MPa.

Ad. p. 5

Ad. p. 5.1 Wniosek dotyczący potrzeby wprowadzenia korekt jest słuszny. Wydaje się, że wskazana jest korekta normy PN-S-02205, uwzględniająca zmianę w definicji położenia spodu nawierzchni (powierzchni robót ziemnych) oraz wymagania według Katalogu

Ad. p. 5.2 Konieczne jest sprawdzenie genezy pojawienia się kategorii F_7 i F_{10} w WT-4 2010

Ad. p. 5.3 Aktualizacja WT-4 2010 powinna wprowadzić takie zmiany w zakresie słownictwa spójnego z Katalogiem.

Ad. p. 5.3 Aktualizacja WT-5 2010 zapewne wprowadzi takie zmiany w zakresie wymagań i nazewnictwa spójnego z Katalogiem.

odpowiedzi na pytanie Czytelnika
udzielił zespół pracowników
Katedry Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej