

Instytut Badawczy Dróg i Mostów
Zakład Technologii Nawierzchni
Pracownia Technologii Nawierzchni

Sprawozdanie częściowe z pracy:

**Analiza wpływu warunków badania i stanu próbki na wyniki badań
właściwości objętościowych mieszanek mineralno-asfaltowych
według nowych norm PN-EN 12697-5, PN-EN 12697-6
i PN-EN 12697-8**

Temat TN-246

Opracowali:

**Zespół Zakładu
Technologii Nawierzchni**

mgr inż. Dominika Maliszewska
mgr inż. Maciej Maliszewski

Zatwierdził:

**Kierownik Zakładu
Technologii Nawierzchni**

prof. dr hab. inż. Dariusz Sybilski

Warszawa, grudzień 2009

SPIS TREŚCI

1) Podstawa pracy.....	5
2) Cel pracy.....	5
3) Program pracy.....	6
4) Metody badawcze cech objętościowych.....	8
4.1) Ogólnie	8
4.2) Gęstość objętościowa według PN-EN 12697-6+A1:2008.....	9
4.3) Gęstość objętościowa metodą CoreLok.....	16
4.4) Gęstość według PN-EN 12697-5+A1:2008	17
4.5) Zawartość wolnych przestrzeni.....	19
5) Przegląd literatury światowej.....	20
5.1) WSDOT: Urządzenie CoreLok.....	20
5.2) NCAT Report No. 02-11, 2002	20
5.3) K.D. Hall, TRR1761, Uniwersytet Arkansas	26
5.4) WSDOT, Washington State Department of Transportation.....	28
5.5) F. Pratico, A. Moro, R. Ammendola – DIMET Department	31
6) Badania laboratoryjne	32
6.1) Metodyka badań.....	32
6.2) Próbki do badań.....	33
6.3) Oznaczenie próbek do badań	34
6.4) Laboratoryjne sposoby zagęszczania próbek do badań.....	34
6.4.1) Zagęszczanie ubijakiem Marshalla	34
6.4.2) Zagęszczanie prasą żyratorową	35
6.4.3) Zagęszczanie walcem laboratoryjnym.....	35
6.4.4) Zagęszczanie w terenie walcami drogowymi	36
6.4.5) Stopień zagęszczenia próbek.....	36
7) Mieszanki mineralno-asfaltowe przeznaczone do badań	36
7.1) Ogólnie	36
7.2) ACWMS20W (TN246W.).....	36
7.3) AC16W (TN246Y.).....	38
7.4) SMA11 (TN246S.)	39
7.5) AC25P (TN246N.)	41
8) Badania mieszanek mineralno-asfaltowych	42
9) Wyniki badań mieszanek mineralno-asfaltowych	43
10) Analiza wyników badań mieszanek mineralno-asfaltowych	52
10.1) Wpływ metody badawczej	52
10.2) Wpływ sposobu zagęszczania.....	55
10.3) Wpływ zawartości wolnych przestrzeni na wyniki różnych metod	59

10.4) Wpływ stopnia zagęszczenia.....	69
10.5) Porównanie gęstości objętościowych różnymi metodami względem gęstości objętościowej metodą B	80
10.6) Porównanie zawartości próżni uzyskanej różnymi metodami	85
10.7) Porównanie wskaźników zagęszczenia z różnych metod.....	89
10.8) Wpływ stanu próbki z drogi.....	92
11) Podsumowanie.....	94
12) Bibliografia	97

1) Podstawa pracy

Niniejsze sprawozdanie jest podsumowaniem prac przeprowadzonych w dwóch etapach w okresie od sierpnia 2008 do grudnia 2009 w ramach dwuletniej pracy zleconej przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad w Warszawie. Praca nosiła tytuł „Analiza wpływu warunków badania i stanu próbki na wyniki badań właściwości objętościowych mieszanek mineralno-asfaltowych według nowych norm PN-EN 12697-5, PN-EN 12697-6 i PN-EN 12697-8”. Została wykonana na podstawie umowy nr 2189/2008 z dnia 11.08.2008 r. zawartej pomiędzy Generalną Dyрекcją Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA) a Instytutem Badawczym Dróg i Mostów (IBDiM). Pracy nadano symbol IBDiM „TN-246”.

2) Cel pracy

Jednymi z podstawowych parametrów oceny właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej (mma) są zawartość wolnych przestrzeni oraz stopień zagęszczenia, tak na etapie projektowania składu jak i oceny wbudowanych warstw. Oba te parametry obliczane są na podstawie gęstości i gęstości objętościowej, a te z kolei określane z oznaczania objętości próbek. Szereg właściwości, takich jak zawartość wolnych przestrzeni w mieszance mineralno-asfaltowej (mma) i mieszance mineralnej (mm), czy wypełnienie wolnych przestrzeni lepiszczem, a więc związanych z zagęszczeniem i proporcjami podstawowych składników mma: szkieletu mineralnego, lepiszcza i wolnych przestrzeni nazwano na potrzeby niniejszej pracy właściwościami objętościowymi.

Dotychczas obowiązujące i powszechnie stosowane w Polsce metody badań nie precyzowały jednoznacznie rodzaju i stanu próbek badawczych służących do jednoznacznej oceny jakości wykonania warstwy asfaltowej. Decydująca, i często dyskwalifikująca, jest ocena zagęszczenia warstwy. Na uzyskaną wartość właściwości objętościowych wpływa m.in. stan próbki. Przykładowo, badając próbki o różnych wymiarach kolejno wycinane z jednej dużej próbki, uzyskiwane są inne wartości oznaczeń gęstości objętościowej. Występują również różnice ze względu na rodzaj powierzchni: uzyskanej na skutek zagęszczenia w formie lub wycięcia z zagęszczonej próbki (przecięte ziarna, gładza powierzchnia). Skala tych różnic zależy od rodzaju mma, tzn. wielkości najgrubszego ziarna, zawartości lepiszcza i stopnia zagęszczenia. Dowodzi to m.in., że dotychczasowy sposób oceny wbudowania mieszanki mineralno-asfaltowej w nawierzchnię może być obarczony

błędami. Poza tym istnieje kilka metod oznaczania „tej samej” właściwości objętościowej, co zostało ujęte w nowych normach serii PN-EN 12697. Ważne jest ustalenie ewentualnych zależności pomiędzy różnymi metodami oznaczania, z uwzględnieniem stanu/rodzaju próbki, wraz z ewentualnym określeniem ograniczeń w stosowaniu poszczególnych metod. W normach serii PN-EN 12697 zawarto wskazówki wyboru rodzaju metody oznaczania, lecz należy to ujednolicić w polskich warunkach oraz należy w wymaganiach technicznych uszczegółowić opisy dotyczące stanu i rodzaju próbek do badań, aby w jak największym stopniu zharmonizować wymagania i kryteria oceny wykonanych warstw asfaltowych, eliminując możliwość dowolności takiej oceny.

Efektem pracy będzie porównanie stosowanych metod badawczych w powiązaniu ze stanem próbki, w tym sposobem uzyskania i wpływem wymiarów oraz typem mieszanki mineralno-asfaltowej. Zakłada się, że główną korzyścią pracy będzie możliwość sformułowania/uzupełnienia jednoznacznych i nie budzących zastrzeżeń i sporów wymagań technicznych, zawierających opis metod badań oraz rodzaju i stanu próbek, z ewentualnymi zapisami porównywania różnych wyników z uwagi na metodę badania i stan próbki.

Rezultaty niniejszej pracy będą służyły nie tylko potrzebom własnym Zamawiającego, ale również będą bardzo przydatne dla projektantów, nadzoru i wykonawców nawierzchni asfaltowych oraz zwiększą poprawność oceny wykonanych warstw asfaltowych.

3) Program pracy

Program badań stanowiący załącznik 1 do umowy nr 2189/2008 na wykonanie pracy badawczej pt. „Analiza wpływu warunków badania i stanu próbki na wyniki badań właściwości objętościowych mieszanek mineralno-asfaltowych według nowych norm PN-EN 12697-5, PN-EN 12697-6 i PN-EN 12697-8” uwzględniał dwa etapy: pierwszy zrealizowany w 2008 roku i drugi zrealizowany w 2009 roku. Po zaanektowaniu umowy w październiku 2009 r., część badań przełożono jednak na rok 2010. Całą pracę podzielono dodatkowo na 5 zadań. Szczegółowy zakres prac w każdym zadaniu przedstawiono poniżej:

Zadanie 1 Wytypowanie metod badawczych i sposobów przygotowania próbek jako elementy wpływające na uzyskiwane wyniki oznaczenia właściwości objętościowych.

- Przegląd literatury światowej dotyczącej zagadnień metodyki badania wybranych właściwości objętościowych oraz sposobów uzyskania i przygotowania próbek do badań, w tym analiza metod znormalizowanych,
- Analiza metod znormalizowanych oznaczenia właściwości objętościowych oraz uzyskiwania i przygotowania próbek do badań,
- Opracowanie, dostosowanie i/lub uszczegółowienie metod oznaczania właściwości objętościowych oraz uzyskiwania i przygotowania próbek do badań.

Zadanie 2 Przygotowanie materiałów do badań

- Wytypowanie oraz zgromadzenie powszechnie stosowanych w Polsce składników mieszanek mineralno-asfaltowych (mma) z uwzględnieniem podziału składników na charakterystyczne grupy.
- Wytypowanie i zaprojektowanie składów mma z uwzględnieniem dalszej oceny wpływu maksymalnego rozmiaru ziarna, stopnia zagęszczenia, zawartości i rodzaju lepiszcza, przewiduje się badania:
 - betonu asfaltowego
 - mieszanki SMA
 - asfaltu porowatego

Zadanie 3 Badania właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych (mma)

- Przygotowanie próbek do badań; przewiduje się:
 - zagęszczenie ubijakiem próbek o średnicy 100 mm i wysokości 50 i 100 mm,
 - zagęszczenie żyratorem z uwzględnieniem różnych wartości kąta wychylenia; średnica 100 i 150 mm, wysokość 50, 100 i 150 mm,
 - zagęszczenie przez wałowanie; wysokość 50 i 100 mm,
 - odwierty z nawierzchni próbek o średnicy 300 mm,
 - odwierty o średnicy (150, 100, 80 mm) mniejszej niż uzyskanych próbek.
- Oznaczenie gęstości i gęstości objętościowej różnymi metodami oraz obliczenia właściwości objętościowych.

Zadanie 4 c.d. Zadania 3

Zadanie 5 Porównanie i ocena wyników badań

- Porównanie i ocena wyników badań w wielu aspektach:

- wpływ metody oznaczenia w funkcji zróżnicowanych właściwości składników (rodzaj składników, maksymalny rozmiar ziarna w mieszance mineralno-asfaltowej (mma), rodzaj mma, zawartość asfaltu, itd.)
- wpływ sposobu zagęszczania próbek,
- wpływ wymiarów próbek,
- wpływ stanu powierzchni próbek („z formy”, cięta),
ocena dokładności oznaczeń i obliczeń.
- Opracowanie sprawozdania końcowego oraz wytyczne doboru metod badań i stanu próbek mieszanek mineralno-asfaltowych.

Pierwszy etap prac, obejmujący swym zakresem Zadanie 1, 2 i częściowe Zadanie 3, został odebrany w grudniu 2008 r.

4) Metody badawcze cech objętościowych

4.1) Ogólnie

Zasadniczymi metodami badań właściwości objętościowych są metody znormalizowane, czyli procedury zwalidowane, których stosowanie powinno zapewnić oznaczenie wybranej właściwości próbki (materiału o określonej postaci).

Obecnie w Polsce najważniejsze są metody według norm europejskich:

- PN-EN 12697-5+A1:2008 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco -- Część 5: Oznaczanie gęstości,
- PN-EN 12697-6+A1:2008 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco -- Część 6: Oznaczanie gęstości objętościowej próbek mieszanki mineralno-asfaltowej,
- PN-EN 12697-7:2006 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco -- Część 7: Oznaczanie gęstości objętościowej próbek promieniami gamma,
- PN-EN 12697-8:2005 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco -- Część 8: Oznaczanie zawartości wolnej przestrzeni,
- PN-EN 12697-29:2006 Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metoda badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco -- Część 29: Oznaczanie wymiarów próbki z mieszanki mineralno-asfaltowej.

Istotniejszymi metodami badawczymi, związanymi z określaniem właściwości objętościowych, są jeszcze normy:

- ASTM D0070-08 Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method),
- ASTM D1188-07 Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples,
- ASTM D2041-03A Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures,
- ASTM D2726-08 Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures,
- ASTM D2950-05 Test Method for Density of Bituminous Concrete in Place by Nuclear Methods,
- ASTM D3203-05 Test Method for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Bituminous Paving Mixtures,
- ASTM D3289-08 Test Method for Density of Semi-Solid and Solid Bituminous Materials (Nickel Crucible Method),
- ASTM D6752-03E01 Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Automatic Vacuum Sealing Method,
- ASTM D6857-03 Test Method for Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures Using Automatic Vacuum Sealing Method,
- ASTM D7063-05 Test Method for Effective Porosity and Effective Air Voids of Compacted Bituminous Paving Mixture Samples,
- ASTM D7113-05 Test Method for Density of Bituminous Paving Mixtures in Place by the Electromagnetic Surface Contact Methods,
- ASTM D7172-06 Test Method for Determining The Relative Density (Specific Gravity) And Absorption Of Fine Aggregates Using Infrared.

W Polsce badania cech objętościowych wykonywane są również według procedur zawartych w Zeszycie IBDiM.

- Seria „I” Informacje, Instrukcje: Zeszyt 64/2002 „Procedury badań do projektowania składu i kontroli mieszanek mineralno-asfaltowych” Janusz Zawadzki, Ewa Chałaczekiewicz, Marian Pałys, Paweł Skierczyński, wyd. IBDiM 2002.

4.2) Gęstość objętościowa według PN-EN 12697-6+A1:2008

Gęstość objętościową, wcześniej nazywaną gęstością strukturalną lub dawną gęstością pozorną, oznacza się zgodnie z normą PN-EN 12697-6+A1:2008 czterema metodami: A, B, C i D. W dwóch pierwszych metodach, gdy do oznaczania gęstości

Rysunek 1 zaczerpnięty z normy obrazują wpływ metody A i B: Na rysunku a przedstawiono wodę wypełniającą wolne przestrzenie powierzchniowe więc nie są one traktowane jako część objętości próbki. W tym przypadku obliczona zostanie względnie mała objętość przy względnie wysokiej gęstości objętościowej. Jest to sytuacja prawidłowa dla wolnych przestrzeni powierzchniowych występujących z powodu sposobu przygotowania próbki do badań lub w przypadku uszkodzeń powstałych przy pobieraniu próbki. Nie jest to sytuacja prawidłowa w przypadku mieszanek mineralno-asfaltowych gruboziarnistych zawierających dużą ilość próżni. Wolne przestrzenie, będące nieodłączną częścią mieszanki, nie są wówczas uwzględnione przy obliczaniu objętości, a więc uzyskana wartość nie jest prawidłowa. Jeśli pustki powietrzne są duże, wówczas wsiąknięta woda spłynie z

próbki zaraz po wyjęciu jej z kąpieli wodnej i negatywny wpływ nie będzie miał aż tak dużego znaczenia dla wyniku gęstości objętościowej.

Rysunek b przedstawia wpływ metody D, gdy objętość próbki oblicza się z wymiarów próbki. Wszystkie powierzchniowe wolne przestrzenie zostają wówczas włączone do objętości próbki. Powoduje to uzyskanie względnie wysokiej objętości próbki lub względnie niskiej wartości gęstości objętościowej. Można zatem stwierdzić, że metoda D jest poprawna, jeżeli powierzchniowe wolne przestrzenie stanowią nieodłączną część materiału (mieszanki mineralno--asfaltowej). Pośrednie wyniki można uzyskać, gdy próbki są uszczelnione (metoda C), ponieważ część powierzchniowych wolnych przestrzeni jest mierzona jako należąca do objętości próbki, natomiast część jest wyłączona z objętości próbki. Metoda ta teoretycznie dostarcza najbardziej prawidłowych wyników; choć z powodu nieprecyzyjności w wykonaniu oznaczenia, zwiększonej złożoności metody (nie dla wszystkich materiałów) i wyższych kosztów metoda ta nie może być stosowana we wszystkich przypadkach.

Wykaz metod oznaczenia gęstości objętościowej według PN-EN 12697-6+A1:2008:

- **Metoda A:** w stanie suchym (próbki o zamkniętej, jednolitej powierzchni); metoda ta odpowiednia jest dla próbek gładkich oraz o małej zawartości wolnych przestrzeni, np. próbek asfaltu lanego.

Procedura oznaczenia gęstości objętościowej tą metodą polega na zważeniu suchej próbki (m_1), następnie zanurzeniu jej w łaźni wodnej, utrzymywaniu w znanej temperaturze badania i określeniu masy natychmiast gdy woda obcieknie (m_2). Jeżeli jednak bada się wilgotne próbki to czynność tę należy wykonać dopiero po określeniu gęstości wody w temperaturze badania.

Gęstość objętościową próbki na sucho (ρ_{bdry}) oblicza się zgodnie ze wzorem:

$$\rho_{bdry} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_w$$

w którym:

ρ_{bdry}	gęstość objętościowa na sucho, (kg/m^3);
m_1	masą suchej próbki, w gramach (g);
m_2	masa próbki w wodzie, w gramach (g);
ρ_w	gęstość wody w temperaturze badania, (kg/m^3).

– **Metoda B:** w stanie nasyconym, powierzchniowo suchym (SSD) (próbki o zamkniętej powierzchni); metoda ta odpowiednia jest dla próbek betonu asfaltowego z zawartością wolnych przestrzeni do 5 % (v/v) oraz dla próbek mieszanki SMA z zawartością wolnych przestrzeni do 4 % (v/v).

Oznaczenie wykonuje się na nienaruszonych, zagęszczonych próbkach mieszanki mineralno-asfaltowej w następujący sposób. Należy określić masę suchej próbki (m_1), zanurzyć próbkę w łaźni wodnej utrzymującej znaną temperaturę badania, umożliwić nasączenie próbki tak długo, aby masa próbki nie ulegała zmianie (na ogół okres nasączenia wynosi co najmniej 30 min.), następnie określić masę nasączonej próbki po jej zanurzeniu (m_2), dbając, aby żadne pęcherzyki powietrza nie przylegały do powierzchni próbki lub odrywały się od próbki podczas ważenia. Potem wyjąć próbkę z wody, osuszyć powierzchnię z przylegających kropli przez wytarcie wilgotną irchą i natychmiast po osuszeniu określić masę nasączonej, wytartej próbki w powietrzu, (m_3). Gęstość ρ_{bssd} obliczyć z ilorazu masy próbki przez jej objętość według wzoru:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$$

w którym:

ρ_{bssd}	gęstość objętościowa (SSD) próbki, (kg/m ³);
m_1	masa suchej próbki, w gramach (g);
m_2	masa próbki w wodzie, w gramach (g);
m_3	masa próbki nasyconej, powierzchniowo suchej, w gramach (g);
ρ_w	gęstość wody w temperaturze badania, (kg/m ³).

– **Metoda C:** w stanie uszczelnienia powierzchniowego (próbki z otwartą lub chropowatą powierzchnią); metoda ta jest odpowiednia dla próbek z mieszanki mineralno-asfaltowej o zawartości wolnych przestrzeni do 15 % (v/v).

Oznaczenie polega na określeniu masy suchej próbki (m_1), następnie uszczelnieniu jej w taki sposób, aby wewnętrzne wolne przestrzenie wpływające na gęstość objętościową materiału nie były penetrowane przez wodę, i aby żadne dodatkowe wolne przestrzenie pomiędzy uszczelnieniem a próbką nie zostały uwzględnione (po uszczelnieniu próbka nie powinna chłonać wody). Uszczelnienie może polegać np. na zafoliowaniu próbki lub zastosowaniu parafiny. Jeżeli stosuje się parafinę to należy doprowadzić ją do jej temperatury mięknięcia powiększonej o 10 °C, zanurzyć

próbkę częściowo w parafinie na krócej niż 5 s, wstrząsając próbkę aby uwolnić pęcherzyki powietrza. Po wystygnięciu i stężeniu parafiny na tej części próbki, powtarzać tę czynność na pozostałych powierzchniach próbki. Następnie należy określić masę suchej uszczelnionej próbki (m_2), zanurzyć ją w łaźni wodnej i określić masę uszczelnionej próbki w wodzie (m_3).

Gęstość objętościową suchej uszczelnionej próbki (ρ_{bsea}) obliczyć zgodnie ze wzorem:

$$\rho_{bsea} = \frac{m_1}{\left(m_2 - \frac{m_3}{\rho_w}\right) - \left(m_2 - \frac{m_1}{\rho_{sm}}\right)}$$

w którym:

ρ_{bsea}	gęstość objętościowa uszczelnionej próbki, (kg/m^3);
m_1	masa próbki suchej, w gramach (g);
m_2	masa uszczelnionej, suchej próbki, w gramach (g);
m_3	masa uszczelnionej próbki w wodzie, w gramach (g);
ρ_w	gęstość wody w temperaturze badania, (kg/m^3);
ρ_{sm}	gęstość materiału uszczelniającego w temperaturze badania, (kg/m^3).

– **Metoda D:** gęstość objętościowa obliczana jest na podstawie wymiarów geometrycznych (dla próbek o regularnych kształtach i regularnej powierzchni to jest sześciennych, prostopadłościennych, walcowych, itd.); metoda ta odpowiednia jest dla próbek z mieszanki mineralno-asfaltowej o zawartości wolnych przestrzeni większej niż 15 % (v/v), metoda ta jest szczególnie przydatna do badania asfaltu porowatego. Polega na określeniu wymiarów próbki w milimetrach zgodnie z PN-EN 12697-29, a następnie określeniu masy suchej próbki (m_1). Obliczenia wykonuje się w zależności od kształtu próbki, i tak:

Próbka cylindryczna

Gęstość objętościową, na podstawie wymiarów próbki cylindrycznej (ρ_{bdim}), oblicza się zgodnie ze wzorem:

$$\rho_{bdim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \times 10^6$$

w którym:

ρ_{bdim}	gęstość objętościowa próbki, (kg/m^3);
m_1	masa suchej próbki, w gramach (g);

h wysokość próbki, w milimetrach (mm);

d średnica próbki, w milimetrach (mm)

Próbka prostopadłościenna

Gęstość objętościową na podstawie wymiarów prostopadłościenną próbki (ρ_{bdim}) oblicza się zgodnie ze wzorem:

$$\rho_{bdim} = \frac{m_1}{h \times l \times w} \times 10^6$$

w którym:

ρ_{bdim} gęstość objętościowa próbki, (kg/m^3);

m_1 masa suchej próbki, w gramach (g);

h wysokość próbki, w milimetrach (mm);

l długość próbki, w milimetrach (mm);

w szerokość próbki, w milimetrach (mm).

Wybór metody oznaczania gęstości objętościowej

– Metoda A: Gęstość objętościowa – w stanie suchym

Metoda A jest odpowiednia dla próbek mieszanek mineralno-asfaltowych bardzo zwartych, nie- lub bardzo słabo nasiąkliwych. Jest metodą szybką i łatwą, wygodną szczególnie dla próbek zwartych, przygotowanych w laboratorium. Stosowanie metody A odnosi się do tekstury powierzchniowej próbki i dostępnych wewnętrznych wolnych przestrzeni próbki. W celu osiągnięcia prawidłowego wyniku próbka powinna być gładka, a wewnętrzne wolne przestrzenie trudno dostępne. Metodę można stosować na przykład przy próbkach asfaltu lanego, gdy praktycznie brak jest dostępnych wolnych przestrzeni.

– Metoda B: Gęstość objętościowa – próbki w stanie nasyconym, powierzchniowo suchym – SSD

Metoda B jest odpowiednia dla próbek mieszanki mineralno-asfaltowej o strukturze zamkniętej, o niskim stopniu nasiąkliwości lub o swobodnym wypływie nasiąkniętej wody. Ważne jest uważne postępowanie przy osiągnięciu stanu nasyconej, suchej powierzchniowo próbki. Nadmierna warstwa wilgoci na powierzchni będzie bowiem prowadziła do niedoszacowania gęstości, a więc do przeszacowania ilości wolnych przestrzeni w próbce lub do niedoszacowania ilości wolnych przestrzeni wypełnionych lepiszczem. Nadmierny wypływ wody będzie prowadził do przeszacowania gęstości objętościowej, a więc do niedoszacowania wielkości próżni

w próbce. Przy stosowaniu tej metody należy przeanalizować ilość wolnych przestrzeni i średnicą porów. Może być ona stosowana przy badaniu materiałów o ciągłym uziarnieniu, takich jak beton asfaltowy (z względnie małymi porami) i z zawartością wolnych przestrzeni w przybliżeniu do 5 % (v/v). Może być też stosowana przy badaniu materiałów, które mają większą średnicę porów w próbce (np. mieszanka mastyksowo-grysowa), z zawartością wolnych przestrzeni w przybliżeniu do 4 % (v/v).

– **Metoda C: Gęstość objętościowa – próbki w stanie uszczelnionym**

Metoda C jest odpowiednia do pomiaru gęstości objętościowej próbek mma, w których zawartość wolnych przestrzeni nie przekracza 15 % (v/v). Metoda jest jednak dosyć skomplikowana, mało wygodna do przeprowadzenia. Jest więc rzadko stosowana. W przypadku badania próbek zagęszczonych laboratoryjnie z szorstką teksturą powierzchni, niektóre materiały uszczelniające, np. takie jak folia, sprowadzają wolne przestrzenie pochodzące z tekstury próbki jako wewnętrzne. Może to powodować niedoszacowanie gęstości próbki lub przeszacowanie ilości wolnych przestrzeni w próbce. Materiały uszczelniające takie jak parafina mogą penetrować wewnętrzne wolne przestrzenie próbki, powodując przeszacowanie gęstości objętościowej, a zatem niedoszacowanie wolnych przestrzeni w próbce. Metoda C nie jest odpowiednia do odzyskiwanych materiałów z mieszanek mineralno-asfaltowych, ponieważ nie można wykluczyć, że materiały te zawierają wodę.

– **Metoda D: Gęstość objętościowa na podstawie wymiarów geometrycznych**

Metoda D jest odpowiednia do pomiaru gęstości objętościowej próbek, które mogą mieć dowolną zawartość wolnych przestrzeni. Zaleca się jedynie, aby próbki miały regularną powierzchnię i geometryczny kształt, co umożliwi i ułatwi pomiar ich wymiarów. Metoda D jest odpowiednia dla próbek zagęszczonych mieszanek mineralno-asfaltowych o zawartości wolnych przestrzeni większych niż 15 % (v/v). W tej metodzie również wolne przestrzenie tekstury powierzchniowej są traktowane jako część wewnętrznych wolnych przestrzeni, co może powodować niedoszacowanie gęstości próbki lub przeszacowanie zawartości wolnych przestrzeni w próbce. Szczególnie ma to znaczenie, gdy próbki do badań są przygotowane i zagęszczane laboratoryjnie, a nie wycięte lub odwiercone z nawierzchni. Pod

względem przydatności metody D do badania próbek o bardzo wysokiej próżni, zaleca się tą metodę do badania gęstości asfaltu porowatego.

4.3) Gęstość objętościowa metodą CoreLok

Urządzenie badawcze CoreLok [1] może być stosowane do oznaczenia w wodzie gęstości objętościowej próbek zagęszczonej mieszanki mineralno-asfaltowej, gęstości objętościowej mieszanki mineralnej, itd.



Fotografia 1. Urządzenie CoreLok

Urządzenie CoreLok przedstawione na fotografii 2 posiada system próżniowy umożliwiający dokładne uszczelnienie próbki badawczej przed poddaniem jej badaniu gęstości. Próbka jest umieszczana wewnątrz specjalnie zaprojektowanej, odpornej na przebicie polimerowej torebki, a następnie wkładana do komory próżniowej. Pod wpływem próżni torebka kurczy się i zaczyna ściśle przylegać dostosowując się do kształtu próbki. Zapobiega to wnikaniu wody wewnątrz próbkę. Otrzymywane wyniki gęstości wyznaczone metodą Corelok są bardzo dokładne bez względu na rodzaj i skład próbki, np. zawartość procentową wolnych przestrzeni. Nie istotny jest również kształt badanej próbki. Specjalny, dodany do urządzenia program komputerowy oblicza, przechowuje i przetwarza otrzymane wartości. Uszczelnioną próbkę po wyjęciu z urządzenia przedstawiono na fotografii 2 [2].

Prawidłowe oznaczenie gęstości objętościowej próbek zagęszczonej mieszanki mineralno-asfaltowej jest utrudnione, zwłaszcza dla mieszanek porowatych, gdy

duże jest wnikanie wody do wnętrza próbki. Metoda próżniowego pakowania jest więc przydatna ze względu na skuteczne chronienie próbki przed wnikaniem wody poprzez uszczelnienie jej. Objętość próbki jest bowiem wówczas zamknięta wewnątrz foliowej torebki. Procedura badawcza według Corelok jest podobna do procedury według PN-EN 12697-6, metoda C oraz procedury z normy AASHTO T-275 przy użyciu parafiny jako uszczelniacza próbki. Jest jednak łatwiejsza i szybsza do przeprowadzenia.



Fotografia 2. Sposób uszczelnienia próbki w metodzie CoreLok

4.4) Gęstość według PN-EN 12697-5+A1:2008

Gęstość, wcześniej nazywana gęstością objętościową lub dawną gęstością właściwą, oznaczana jest zgodnie z normą PN-EN 12697-5+A1:2008 w rozpuszczalniku i w wodzie metodą objętościową A (bez wolnych przestrzeni). Metoda polega na obliczeniu ilorazu masy próbki i jej objętości, określonej w piknometrze. Gęstość oznacza się na wysuszonej i rozdrobnionej próbce. Objętość próbki jest mierzona objętością wody lub rozpuszczalnika, która wypiera próbkę umieszczoną w piknometrze. Wykonanie oznaczenia składa się z następujących elementów:

- zważenia pustego piknometrze razem z przykryciem (m_1) o znanej objętości (V_p),
- umieszczenie wysuszonej próbki w piknometrze i zważenie razem z nasadką (m_2),

- napełnienie piknometru odpowietrzoną wodą lub rozpuszczalnikiem do wysokości nie większej niż 30 mm poniżej złącza z nasadką (w przypadku badania gęstości w wodzie, należy odciągnąć uwięzione powietrze, stosując próżnię o ciśnieniu do 4 kPa przez (15 ± 1) min – odciąganie powietrza z dostępnych przypowierzchniowych porów jest ważną czynnością; pomocne jest obracanie piknometru; jeżeli została użyta woda, dodać do niej niewielką ilość (tylko dwie krople) rozpuszczalnego środka powierzchniowo-czynnego, który może ułatwić ujście powietrza; zamiast wody odpowietrzonej można zastosować wodę przegotowaną),
- w przypadku badania gęstości w rozpuszczalniku zaleca się obracanie i wibrowanie piknometru bez stosowania podciśnienia,
- założyć nasadkę i ostrożnie napełnić piknometr odpowietrzoną wodą lub rozpuszczalnikiem (uwzględniając, aby nie wprowadzić powietrza) prawie do poziomu kreski pomiarowej na nasadce lub do spodu korka szklanego, jeżeli został on założony na piknometr,
- w przypadku badania gęstości w wodzie umieścić piknometr w łaźni wodnej o znanej, stałej temperaturze (± 1 °C) co najmniej na 30 min i doprowadzić temperaturę próbki i temperaturę wody lub rozpuszczalnika w piknometrze do temperatury wody w łaźni,
- w przypadku badania gęstości w rozpuszczalniku stała temperatura badania powinna być utrzymana z dokładnością $\pm 0,2$ °C; następnie piknometr powinien być umieszczony w łaźni wodnej co najmniej na 60 min, lecz nie dłużej niż 180 min,
- uzupełnić piknometr wodą lub rozpuszczalnikiem do kreski pomiarowej; woda lub rozpuszczalnik powinny być doprowadzone do temperatury wody w łaźni,
- wyjąć piknometr z łaźni wodnej, osuszyć ręcznikiem powierzchniowo i natychmiast zważyć (m_3).
- Obliczenie wykonać według wzoru:

$$\rho_{mw} = \frac{m_2 - m_1}{1000 \times V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w}}$$

w którym:

m_1 masa piknometru z nasadką, w gramach (g);

m_2	masa piknometru z nasadką i z badaną próbką, w gramach (g);
m_3	masa piknometru z nasadką, próbką i wodą lub rozpuszczalnikiem, (g);
V_p	objętość piknometru napełnionego do kreski pomiarowej, (m^3);
ρ_w	gęstość wody lub rozpuszczalnika w temperaturze badania, (kg/m^3).

4.5) Zawartość wolnych przestrzeni

Zawartość wolnej przestrzeni w próbce oblicza się na podstawie gęstości i gęstości objętościowej mieszanki mineralno-asfaltowej według normy PN-EN 12697-8+A1:2008, zgodnie z następującym równaniem:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100$$

w którym:

- V_m zawartość wolnej przestrzeni w próbce mieszanki mineralno-asfaltowej, % (v/v),
 ρ_m gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm^3 ,
 ρ_b gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm^3 .

Zawartość procentową wolnych przestrzeni w mieszance mineralnej wypełnionej lepiszczem bitumicznym oblicza się według następującego równania:

$$VFB = \frac{B \times \frac{\rho_b}{\rho_B}}{VMA} \times 100$$

w którym:

- VFB procentowa zawartość wolnej przestrzeni w mieszance mineralnej wypełnionej lepiszczem bitumicznym, do 0,1 % (v/v);
 B zawartość lepiszcza w próbce (w 100% mieszanki), do 0,1 % (v/v),
 ρ_b gęstość objętościowa próbki, (kg/m^3),
 ρ_B gęstość lepiszcza, (kg/m^3),
 VMA zawartość wolnej przestrzeni w mieszance mineralnej, do 0,1% (v/v), obliczona według wzoru:

$$VMA = V_m + B \times \frac{\rho_b}{\rho_B}$$

w którym:

- VMA zawartość wolnej przestrzeni w mieszance mineralnej, do 0,1 % (v/v),
 V_m zawartość wolnej przestrzeni w próbce, do 0,1 % (v/v),
 B zawartość lepiszcza w próbce (w 100% mieszanki), do 0,1 % (m/m),

ρ_b gęstość objętościowa próbki, (kg/m^3),

ρ_B gęstość lepiszcza, (kg/m^3).

5) Przegląd literatury światowej

5.1) WSDOT: Urządzenie CoreLok

Tytuł: "WSDOT: Device CoreLok – 'tech-notes'" [3]

Streszczenie:

Urządzenie CoreLok może być stosowane do oznaczenia gęstości objętościowej próbek zagęszczonej mieszanki mineralno-asfaltowej G_{mb} , maksymalnej gęstości, gęstości objętościowej mieszanki mineralnej, gęstości pozornej oraz do oznaczania absorpcji wody w próbkę badawczą. Niniejszy artykuł dotyczy jednak głównie badania gęstości objętościowej próbek zagęszczonej mieszanki mineralno-asfaltowej G_{mb} . Badania dotyczące urządzenia CoreLok wciąż trwają. Nie są więc jeszcze dostępne ostateczne wyniki i analizy.

Prawidłowe oznaczenie gęstości objętościowej próbek zagęszczonej mieszanki mineralno-asfaltowej G_{mb} jest utrudnione, zwłaszcza dla mieszanek z betonu asfaltowego i mieszanek porowatych. Gęstość objętościowa stanowi bowiem podstawę do wyznaczania cech objętościowych mieszanki mineralno-asfaltowej podczas projektowania składu, bieżącej kontroli produkcji oraz przy kontrolnych badaniach odbiorczych. Niedokładny pomiar gęstości objętościowej może prowadzić do błędnych obliczeń zawartości wolnych przestrzeni, wolnych przestrzeni w mieszanke mineralnej, wolnych przestrzeniach wypełnionych asfaltem (VFA), itd.

System badawczy CoreLok®

System badawczy CoreLok® posiada system próżniowy umożliwiający uszczelnienie próbki badawczej. Próbka jest umieszczana wewnątrz polimerowej torebki, a następnie wkładana do komory próżniowej. Pod wpływem próżni torebka kurczy się i zaczyna ściśle przylegać dostosowując się do kształtu próbki. Zapobiega to wnikanu wody wewnątrz próbki. Objętość próbki jest więc zamknięta wewnątrz torby i traktowana jako objętość masowa. Procedura ta jest podobna do procedury według PN-EN 12697-6, metoda C oraz procedury z normy AASHTO T-275 przy użyciu parafiny jako uszczelniacza próbki. Jest jednak łatwiejsza i szybsza do przeprowadzenia.

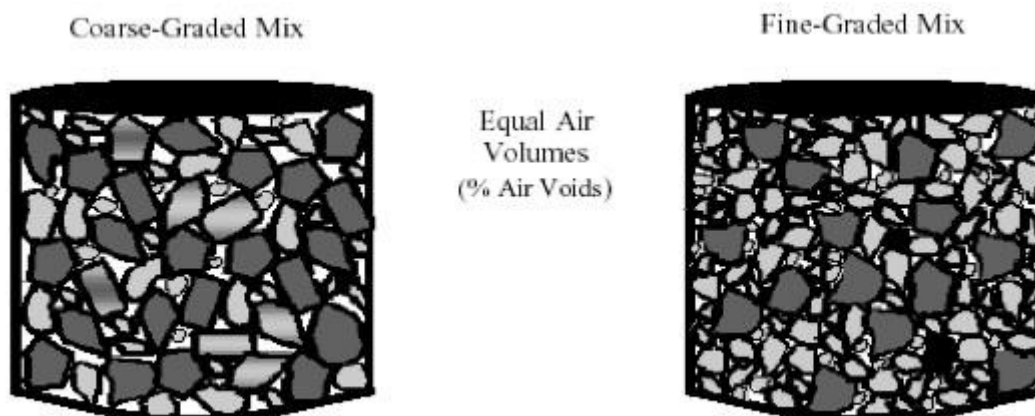
5.2) NCAT Report No. 02-11, 2002

Tytuł artykułu: Bulk Specific Gravity Round Robin Using the CoreLok Vacuum Sealing Device”

Streszczenie:

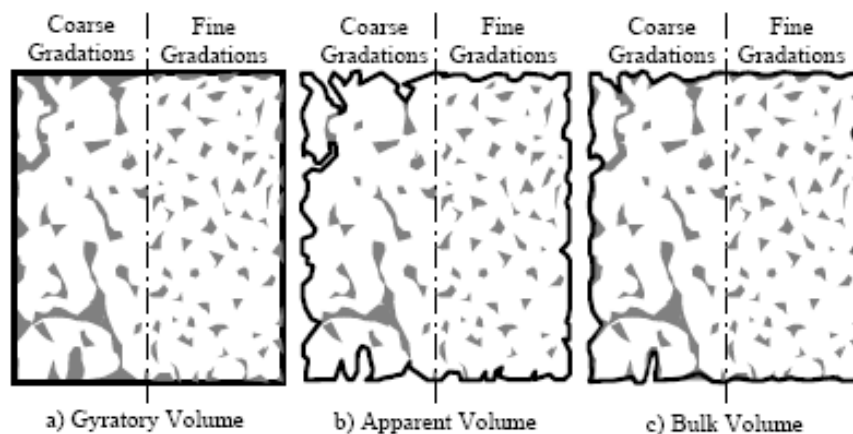
Metody oznaczania gęstości objętościowej

Metoda A z dokumentu AASHTO T-166 dla próbek zagęszczonych laboratoryjnie oraz metoda C dla próbek odwierconych z nawierzchni jest odpowiednia dla mieszanek o drobnoziarnistej strukturze (drobnym uziarnieniu). Błędne wyniki pomiaru gęstości objętościowej uzyskano przy badaniu betonu asfaltowego oraz przy SMA. Przy badaniu betonu asfaltowego używane jest kruszywo gruboziarniste, natomiast mieszanka SMA charakteryzuje się nieciągłym uziarnieniem. W przypadku tych mieszanek, przy oznaczaniu gęstości, podczas procesu nasycania wodą próbki, wewnętrzne wolne przestrzenie mogą łączyć się tworząc większe przestrzenie (Rysunek 2), w które może wnikać woda. Gdy stosujemy metodą SSD według AASHTO T-166 lub PN-EN 12697-6, metoda B, woda wycieka szybko z próbki i nie może być pomierzona. Absorpcja wody, zgodnie z AASHTO T-166, nie powinno przekroczyć 2%, stąd błąd pomiaru gęstości objętościowej (NCAT, 2002). Jeżeli wnikięcie wody przekroczy 2%, należy zastosować metodę z parafiną w celu uszczelnienia próbki.



Rysunek 2. Połączone wolne przestrzenie w próbce

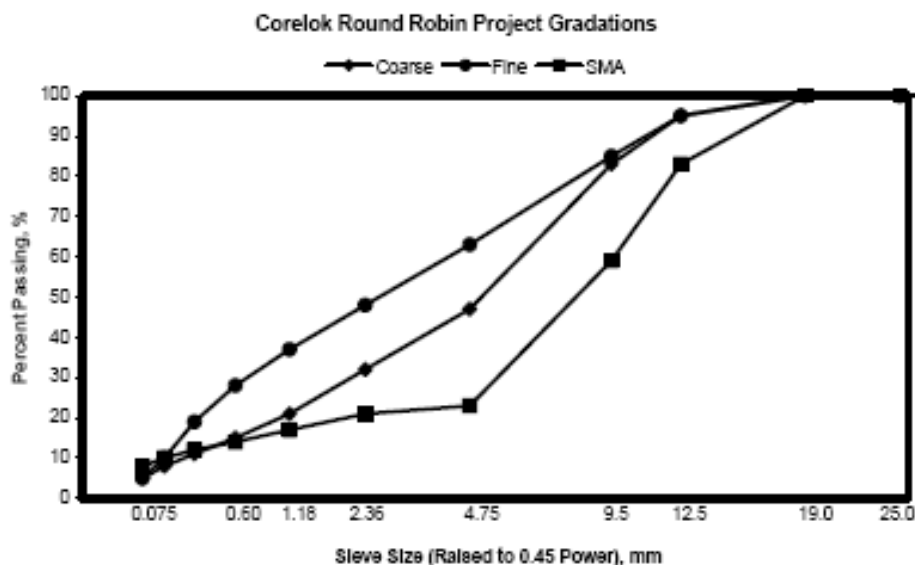
Rysunek 3 przedstawia objętość i wolne przestrzenie w próbce zagęszczonej mieszanki mineralno-asfaltowej.



Rysunek 3. Wolne przestrzenie w zagęszczonej mma

Badania porównawcze w NCAT

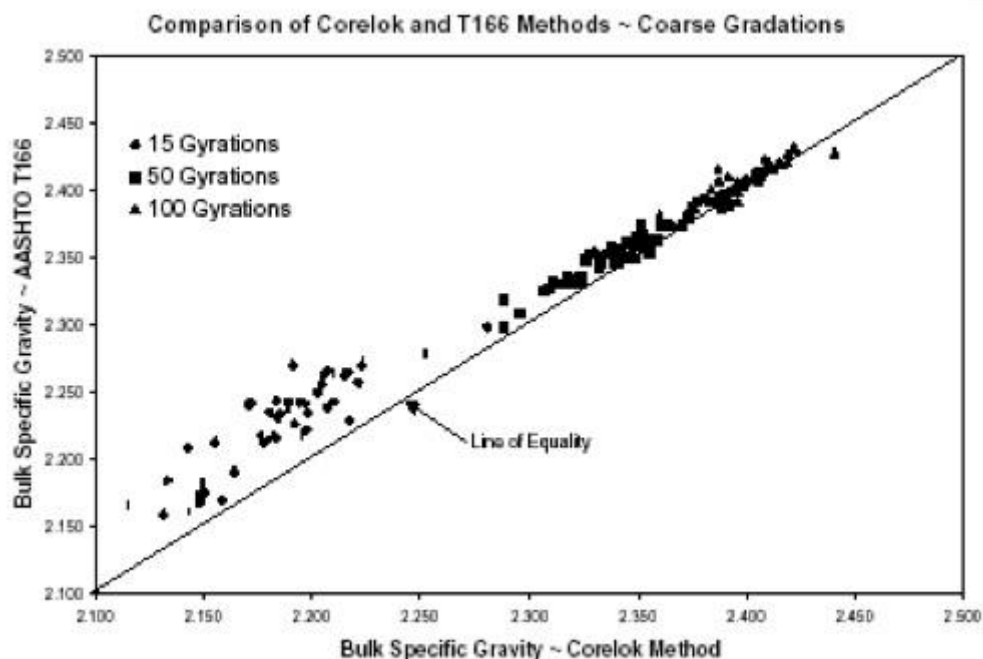
NCAT (The National Center for Asphalt Technology) na Uniwersytecie w Auburn przeprowadził badania porównawcze mające na celu ocenę urządzenia Corelok poprzez zbadanie powtarzalności, odtwarzalności i dokładności przy oznaczaniu gęstości objętościowej [4]. Badania zostały przeprowadzone na trzech rodzajach mieszanek (Rysunek 4): mieszanki o drobnym uziarnieniu (krzywa uziarnienia badanej mieszanki znajduje się blisko lub powyżej górnej krzywej granicznej), mieszanki o grubym uziarnieniu (krzywa uziarnienia badanej mieszanki znajduje się blisko lub poniżej dolnej krzywej granicznej) oraz SMA (nieciągłe uziarnienie wypełnione mastyksem). Próbkę wykonaną z tych mieszanek zagęszczano przy użyciu żyratora. Stosowano trzy ilości obrotów w żyratorze: 15, 50 i 100. Wszystkie mieszanki miały to samo uziarnienie i ten sam rodzaj asfaltu.



Rysunek 4. Krzywe uziarnienia projektowanych mieszanek

Badania wykazały, że dla mieszanek drobnoziarnistych metoda Corelok daje podobne wyniki, zarówno przy oznaczaniu gęstości objętościowej według AASHTO T-166 jak i przy oznaczaniu wchłonięcia. Wszystkie wartości wchłonięcia były dobre, tj. poniżej wartości granicznej 2%, jak tego wymaga norma AASHTO T-166. Rysunek 5 przedstawia wyniki oznaczeń gęstości objętościowej według CoreLok® i AASHTO T-166.

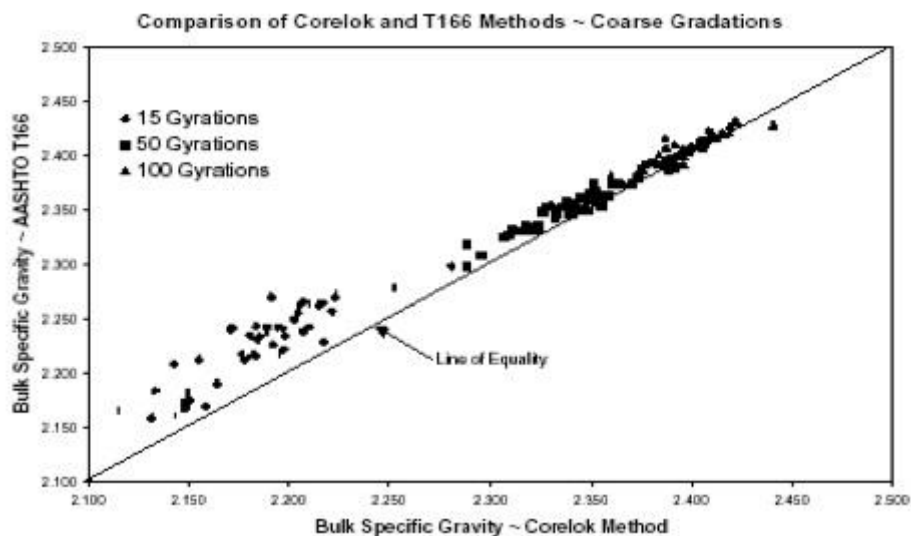
Dla wszystkich trzech zagęszczeń (ilości obrotów w żyrze torze), większość wyników było poniżej linii równości. Oznacza to, że metoda Corelok daje wyniki odrobinę niższe niż według AASHTO T-166.



Rysunek 5. Porównanie wyników gęstości dla mieszanki drobnoziarnistej

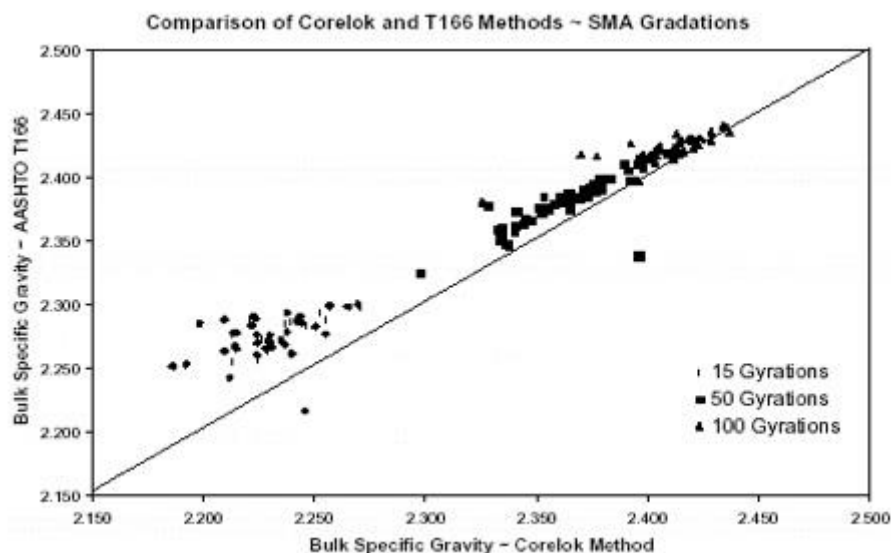
Wyniki przedstawione na Rysunku 5 sugerują, że poprzez metodę CoreLok można uzyskać prawidłowe wartości gęstości, co potwierdziło porównanie z wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu do oznaczenia gęstości metody AASHTO T-166 (dla wchłonięcia poniżej 2%).

Jeżeli chodzi o mieszanki gruboziarniste, pomiary gęstości wskazały znaczące różnice pomiędzy próbkami o różnym zagęszczeniu, tzn. różnej ilości obrotów w żyratorze (czyli ilości wolnych przestrzeni wewnątrz i na powierzchni próbki). Po zagęszczeniu poprzez 15 obrotów różnica w średniej gęstości pomiędzy AASHTO T-166 i CoreLok® wyniosła 0,041, co równa się 1,6% różnicy w wolnych przestrzeniach. Przy 50 obrotach w żyratorze, wyniki były bliższe linii równości, ale wciąż różnica istniała i wynosiła 0,012 (około 0,5% zawartości wolnych przestrzeni). Przy 100 obrotach wyniki były już bardzo bliskie linii różności (różnica średnich gęstości wynosiła 0,008, a różnica wolnych przestrzeni 0,4% (Rysunek 6).



Rysunek 6. Porównanie wyników gęstości dla mieszanek gruboziarnistych

Wyniki oznaczeń gęstości objętościowej w mieszance SMA były podobne do tych uzyskanych dla mieszanek gruboziarnistych (Rysunek 7). Dla przykładu, próbki po zagęszczeniu przez 15 obrotów wykazały różnicę w gęstości na poziomie 0,045, co równa się z 1,8% wolnych przestrzeni. Wyniki przy 100 obrotach były jeszcze podobniejsze do siebie przy różnicy zawartości wolnych przestrzeni na poziomie 0,5%.



Rysunek 7. Porównanie wyników gęstości dla mieszanek SMA

Mieszanki gruboziarniste i SMA miały wyższe wchłanianie wody, szczególnie przy mniejszym zagęszczeniu (mniejszej ilości obrotów żyratora), co wskazało na różne

wyniki otrzymanych gęstości metodą AASHTO T-166 i CoreLok®. Na tej podstawie można stwierdzić, że urządzenie CoreLok dostarcza dokładniejsze wyniki przy wyższym wchłanianiu wody i/lub większej zawartości wolnych przestrzeni. Ocena wsiąkania wody przy mieszance gruboziarnistej i SMA pokazała, że zawartość wolnych przestrzeni rozchodzi się przy 0,4% pochłaniania wody. A zatem NCAT stwierdza, że metoda CoreLok® powinna być stosowana przy projektowaniu i kontroli w trakcie wbudowywania mieszanki SMA oraz mieszanek gruboziarnistych (prawdopodobnie większość próbek przekroczy 0,4% wchłonięcia dla mieszanek przy dolnej krzywej granicznej). Dla mieszanek drobnoziarnistych metoda normowa może być zastosowana, gdy wchłonięcie wody jest mniejsze niż 2%, co spełnia obecne kryteria podane w AASHTO T-166. Na podstawie tych badań dowiedzione zostało, że metoda CoreLok jest właściwa do oznaczania gęstości objętościowej zagęszczonej mieszanki mineralno-asfaltowej. Dodatkowo wykazano, że powtarzalność przy metodzie AASHTO T-166 była nieco lepsza niż przy metodzie CoreLok, chociaż przy badaniach wewnątrz i między-laboratoryjnych odchylenia standardowe osiągały podobne wartości. Nieznaczny wzrost zmienności był prawdopodobnie spowodowany brakiem doświadczenia z metodą CoreLok. Otrzymane wyniki badań wskazują również, że rodzaj mieszanki lub ilość obrotów w żyrotorze wpływa na wyniki oznaczeń według AASHTO T-166 bardziej niż gdy oznaczeń dokonuje się przy zastosowaniu Corelok.(NCAT, 2002).

Podsumowanie

NCAT (NCAT, 2002):

- Metoda według AASHTO T-166 może być stosowana do mieszanek drobnoziarnistych, w których absorpcja wody może być do 2,0%,
- CoreLok ® należy stosować dla mieszanek gruboziarnistych i mieszanki SMA, gdy absorpcja wody przekracza 0,4 proc,
- Powtarzalność dla metody CoreLok i AASHTO T-166 jest podobna, choć dla AASHTO T-166 jest nieco lepsza.

5.3) K.D. Hall, TRR1761, Uniwersytet Arkansas

Tytuł artykułu: "Examination of Operator Variability for Selected Methods for Measuring Bulk Specific Gravity of Hot-Mix Asphalt Concrete"

Streszczenie:

Zależność otrzymanego wyniku oznaczenia gęstości objętościowej od osoby wykonującej badanie

Ustalenie zależności otrzymanego wyniku gęstości objętościowej mieszanki mineralno-asfaltowych od osoby wykonującej badanie zostało przeprowadzone na Uniwersytecie Arkansas [5]. Porównania przeprowadzono pomiędzy normami AASHTO T-166, T AASHTO-269 (Analiza wymiarowa) oraz metodą CoreLok. Przy ustaleniu, że metoda według AASHTO T-166 będzie nadrzędną metodą badań wyznaczającą gęstość mma zauważono, że zwłaszcza w przypadku mieszanek gruboziarnistych istnieje tendencja do uzyskiwania przez laboranta różnych wyników przy wykonywaniu badań na tym samym materiale, przy użyciu tego samego sprzętu i przy wykorzystaniu tej samej procedury badawczej.

Metoda badania gęstości według AASHTO T-166 (lub metoda SSD) staje się w ostatnim czasie coraz trudniejsza do stosowania ze względu na zwiększone zastosowanie SMA i gruboziarnistych mma. W związku z tym Uniwersytet Arkansas przeprowadził badania na 144 laboratoryjnie zagęszczanych próbkach mieszanek mineralno-asfaltowych w celu określenia zależności i zmienności wyniku badania otrzymanego metodą SSD, analizą wymiarową i metodą CoreLok. Wszystkie badania zostały przeprowadzone na 6 różnie zaprojektowanych mieszankach mineralno-asfaltowych: betonie asfaltowym o uziarnieniu do 12,5 mm. Każda zaprojektowana mieszanka miała inny skład, inny rodzaj kruszywa, oraz inną zawartość asfaltu. Zawartość wolnych przestrzeni w mieszankach wynosiła od 2,5% do 9,5%.

Wyniki badań wykazały, że zmiana wykonującego badanie spowodowała zmienność wyników zarówno w metodzie CoreLok, analizie wymiarowej, jak też według AASHTO T-166. Wystarczyła zmiana metody pomiaru gęstości, aby różnice w otrzymanych zawartościach wolnych przestrzeni wyniosły od 0,36 do 0,90%, a różnice w VMA od 0.31 do 0.79%. Taka różnica w zawartości wolnych przestrzeni z perspektywy konstrukcji jest znacząca, nawet jeśli w nie spowodowała zmian we właściwościach fizycznych mieszanki.

Podsumowanie

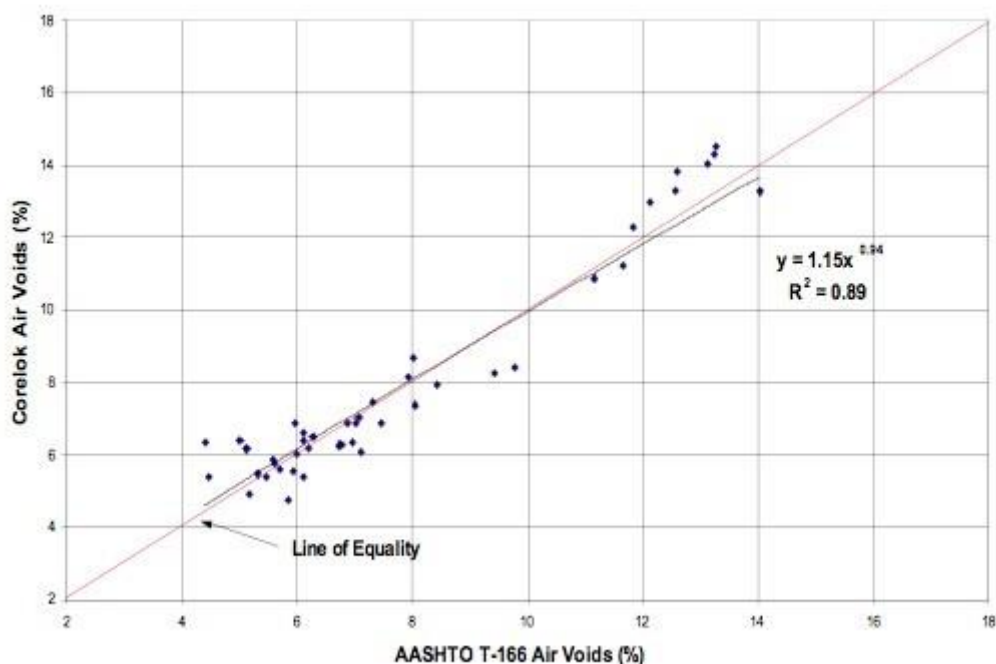
- Metoda CoreLok miała mniejszą zmienność wyników w zależności od wykonującego badanie niż AASHTO T-269 oraz T-166,
- Rodzaj metody badawczej do oznaczania gęstości objętościowej może spowodować różnicę w zawartości wolnych przestrzeni od 0.36 do 0.90%.

5.4) WSDOT, Washington State Department of Transportation

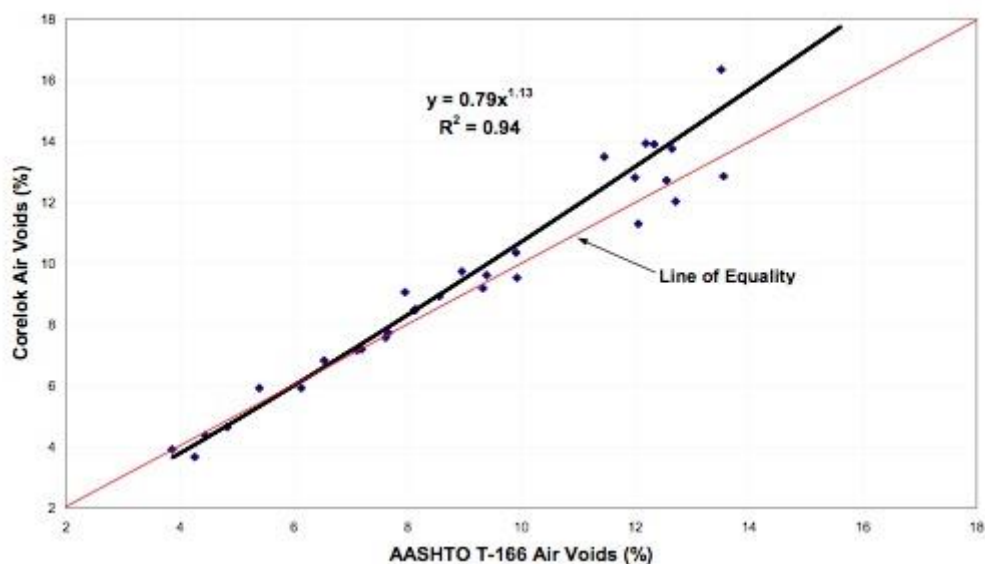
Tytuł artykułu: Zastosowanie urządzenia Corelok przez WSDOT [6], Washington State Department of Transportation, Materials Laboratory, South Second Ave. Tumwater, WA

Streszczenie:

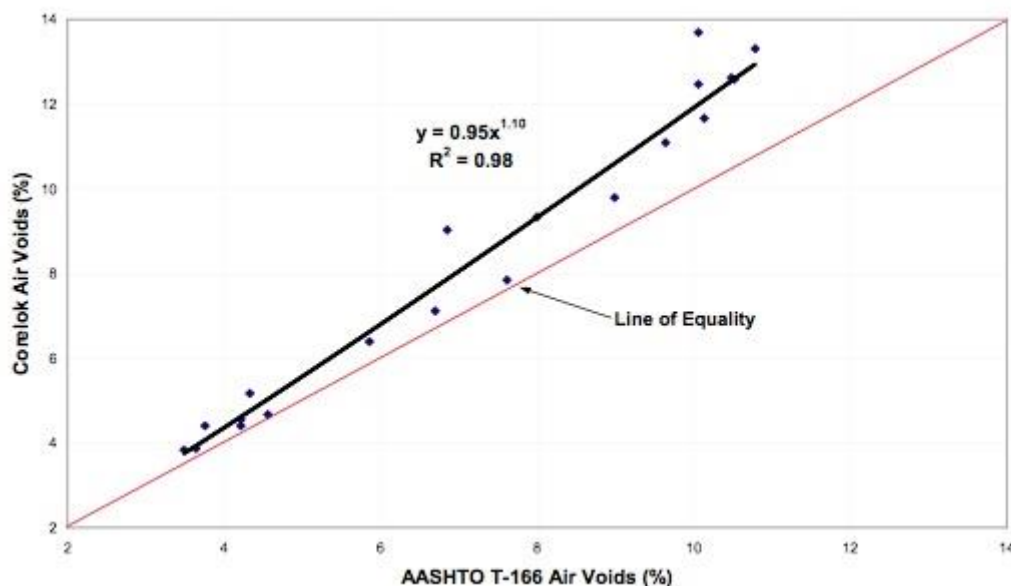
Laboratorium Materiałowe WSDOT przeprowadziło badania na 96 próbkach odwierconych z nawierzchni wykonanych z 7 różnych mieszanek mineralno-asfaltowych. Odwierty były badane przy użyciu urządzenia CoreLok oraz według metody AASHTO T-166. Wyniki badań wykazały, że otrzymane zawartości wolnych przestrzeni w obu metodach znacznie się różnią. Różnice odnotowano w badanych mieszankach klasy A, betonie asfaltowym o uziarnieniu do 12,5 mm (1/2 cala) oraz uziarnieniu do 3/4 cala. Uziarnienie mieszanek klasy A dało krzywą graniczną (mieszanki drobnoziarniste), podczas gdy uziarnienie betonu asfaltowego (1/2 i 3/4 cala) znajdowało się poniżej tej krzywej i obszaru ograniczonego przez krzywe graniczne (mieszanki gruboziarniste). Wyniki gęstości wskazują, że mieszanki klasy A, średnio mieszczą się na linii równości (Rysunek 8), ale w okolicy 12% zawartości wolnych przestrzeni oznaczenia metodą Corelok miały wyższe wyniki niż metodą AASHTO T-166. Wyniki dla betonu asfaltowego o uziarnieniu 1/2 cala, przedstawione na Rysunku 9, zaczynają odbiegać od linii równości przy zawartości 8% wolnej przestrzeni, natomiast wyniki dla betonu asfaltowego 3/4 cala (Rysunek 10) znajdują się powyżej linii równości (oznaczenia wykonane metodą CoreLok są zawsze wyższe niż metodą AASHTO T-166).



Rysunek 8. Zawartości wolnych przestrzeni według AASHTO T-166 i CoreLok® dla mieszanek Klasy A



Rysunek 9. Zawartości wolnych przestrzeni według AASHTO T-166 i CoreLok® dla betonu asfaltowego o uziarnieniu do ½ cala



Rysunek 10. Zawartości wolnych przestrzeni według AASHTO T-166 i CoreLok® dla betonu asfaltowego o uziarnieniu do 3/4 cala

Powyższe trzy wykresy obrazują różnice w zawartości wolnych przestrzeni, która może wystąpić, gdy do oznaczeń stosuje się różne metody badań dla drobno- i gruboziarnistych mieszanek. Wyniki odnoszą się bezpośrednio do ilości połączonych wolnych przestrzeni, występujących w różnych rodzajach mieszanek w szerokim zakresie znajdujących się wolnych przestrzeni. Na przykład, gdy zawartość wolnych przestrzeni jest mniejsza niż 8%, różnica pomiędzy oznaczeniem CoreLok® i według T-166 AASHTO jest bardzo niewielka dla mieszanek klasy A i betonu asfaltowego o uziarnieniu do 1/2 cala, natomiast dla betonu asfaltowego o uziarnieniu do 3/4 cala wynosi około 0,5% (Tablica 1). Gdy zawartość wolnych przestrzeni wynosi 12% lub więcej, wyniki pokazują, że średnio betony asfaltowe o uziarnieniu do 3/4 cala mogą różnić się o 2% w zależności od zastosowanej metody oznaczania. Ilość połączonych wolnych przestrzeni i powierzchniowych przestrzeni znacznie wpływa na wynik badania metodą SSD według AASHTO T-166. Z 96 odwierconych próbek, 46 było poddane nasączeniu wodą i 85% tych próbek (które miały zawartość wolnych przestrzeni od 4,5 do 15,6%) przekroczyło 2% nasączenia.

Tablica 1. Średnia różnica w ilości wolnych przestrzeni otrzymanych metodą CoreLok® i AASHTO T-166

Zawartość wolnych przestrzeni	Klasa mieszanki		
	A	½ cala	¾ cala
<8 %	0.11	0.08	0.55
8 - <12%	-0.37	0.45	0.69
> 12 %	0.79	1.69	1.99

Podsumowanie:

- Dla próbek odwierconych z nawierzchni, większą różnicę między metodami AASHTO T-166 i CoreLok® zaobserwowano wraz ze wzrostem zawartości wolnych przestrzeni w próbce oraz w próbkach z mieszanek gruboziarnistych.
- W porównaniu z metodą AASHTO T-166, dokładniejszą wartość gęstości objętościowej wyznaczyć można przy zastosowaniu CoreLok, szczególnie przy większej zawartości wolnych przestrzeni w badanej próbce. Nieprawidłowym jest stosowanie metody AASHTO T-166, gdy wniknięcie wody przekracza 2%.

5.5) F. Pratico, A. Moro, R. Ammendola – DIMET Department

Tytuł artykułu: Modeling HMA Bulk Specific Gravities: A Theoretical and Experimental Investigation [7]

Streszczenie:

Gęstość objętościowa G_{mb} jest niezwykle ważną właściwością w zagadnieniach mieszanek mineralno-asfaltowych. Wymagania kontraktowe, analiza kosztów oraz procedury kontroli jakości i zapewnienia jakości są mocno zależne od efektywnej gęstości objętościowej otrzymanej poprzez odpowiednie zaprojektowanie, wbudowanie i spełnienie szeregu wymagań. Wiele jest sposobów oznaczenia G_{mb} według odpowiednich norm oraz wiele rozbieżności w zawartych w nich metodach badawczych. „Przeliczanie” gęstości wyznaczonej jedną metodą na wynik który można by uzyskać inną metodą jest niezwykle istotną kwestią. Celem pracy opisaney w niniejszym artykule było przeanalizowanie zależności pomiędzy gęstością objętościową oznaczoną według przyjętej normy a gęstością otrzymaną poprzez wyliczenia według innych norm. Autorzy wyprowadzili pewien model i prowadzili

doświadczenia stosując pięć różnych metod badawczych. Model wyznaczał podstawowe objętości, które mają wpływ na różnice występujące pomiędzy pięcioma przyjętymi metodami. Założono tendencję do wspólnej maksymalnej wartości. Przeanalizowano wyniki badań i stwierdzono pewną koncepcję. Utworzono i przeanalizowano zależność pomiędzy gęstościami otrzymanymi różnymi metodami. Analiza powstałej krzywej dała algorytm dobrze ugruntowany w logice do rozwiązania kwestii przeliczania gęstości objętościowej.

Zakres zagadnienia

Gęstość objętościowa mierzy ciężar właściwy próbki zagęszczonej mieszanki mineralno-asfaltowej (mma). Wymagania kontraktowe, analiza kosztów oraz procedury kontroli jakości i zapewnienia jakości są mocno zależne od efektywnej gęstości objętościowej otrzymanej poprzez odpowiednie zaprojektowanie, wbudowanie i spełnienie odpowiednich wymagań. Chociaż ciężar właściwy jest ważną właściwością, istnieje szereg sposobów oznaczania G_{mb} . Wielu badaczy usiłowało odnaleźć korelacje pomiędzy wynikami uzyskanymi różnymi metodami. W przywołanej pracy autorzy opracowali model do oznaczania różnic pomiędzy procedurami i szukali informacji na temat przeliczania i korelacji pomiędzy wartościami gęstości objętościowej uzyskanymi tymi metodami.

6) Badania laboratoryjne

6.1) Metodyka badań

Podstawami przyjętej metodyki badań w niniejszej pracy było było:

- Porównanie właściwości objętościowych różnych rodzajów próbek mieszanek mineralno-asfaltowych mieszanych i zagęszczonych w laboratorium,
- Porównanie właściwości objętościowych różnych rodzajów próbek mieszanek mineralno-asfaltowych z jednej partii produkcji przemysłowej (w celu wyeliminowania błędów w składzie lub jakości składników) zagęszczonych w laboratorium i w warstwie na drodze,
- Przebadanie różnych typów mieszanek mineralno-asfaltowych:
 - beton asfaltowy,
 - mieszanka SMA,
 - asfalt porowaty,
- Zaprojektowanie składów mma, ich produkcja, zagęszczanie laboratoryjne, wbudowanie na drodze i odwiercanie próbek z drogi i próbek laboratoryjnych,

- Porównywanie wyników badań właściwości objętościowych różnych rodzajów próbek.

6.2) Próbki do badań

Właściwości objętościowe mma określono na dwóch głównych grupach mieszanek mineralno-asfaltowych: mieszanych laboratoryjnie oraz mieszanych przemysłowo w wytwórni. W przypadku mieszanek mieszanych laboratoryjnie jednorazowo sporządzano zarób wielkości ok. od 6 kg do 14 kg. W przypadku luźnych mma pobieranych na drodze w trakcie wbudowywania gorących mieszanek, próbkę ogólną gorącej mma pobierano ze ślimaków rozkładarki i umieszczano w termosach, a następnie przewożono do laboratorium IBDiM. W laboratorium IBDiM, przed ostygnięciem próbki ogólnej, wydzielano z niej próbki laboratoryjne, a z nich próbki analityczne. W przypadku obu grup mma gorące mieszanki natychmiast zagęszczano (bez ponownego rozgrzewania) standardową metodą w ubijaku Marshalla. W przypadku obu grup mma wszystkie rodzaje próbek laboratoryjnych formowano z mieszanki powtórnie rozgrzewanej: standardową metodą w ubijaku Marshalla, prasą żyratorową w formach $\varnothing = 100$ mm i $\varnothing = 150$ mm oraz zagęszczarką płytową w formach prostopadłościennych 180 x 500 mm i wysokości 50 oraz 100 mm.

Zagęszczano dwa rodzaje próbek ubijakiem Marshalla, różniące się wysokością:

- o wysokości 50 ± 5 mm, stosując po 70 uderzeń na każdą powierzchnię czołową – próbki wzorcowe ze względu na gęstość objętościową,
- o wysokości $63,5 \pm 5$ mm, stosując po 75 uderzeń na każdą powierzchnię czołową
- o wysokości 100 ± 5 mm, stosując po 120 uderzeń na każdą powierzchnię czołową.

W przypadku zagęszczania próbek prasą żyratorową stosowano taką liczbę obrotów, aby uzyskać gęstość objętościową określoną geometrycznie równą gęstości objętościowej geometrycznej próbek wzorcowych, zagęszczonych ubijakiem Marshalla 2 x 75 uderzeń.

Posługując się walcem laboratoryjnym stosowano taką liczbę przywałowań, aby uzyskać gęstość objętościową równą gęstości objętościowej określonej geometrycznie próbek wzorcowych.

Z miejsca na drodze, skąd ze ślimaka rozkładarki pobrano mieszankę do zagęszczania sposobami laboratoryjnymi wycinano z zagęszczonej warstwy próbki walcowe o średnicy 100 mm.

6.3) Oznaczenie próbek do badań

W ramach pracy wykonano próbki laboratoryjne o różnej geometrii, przy wykorzystaniu trzech sposobów zagęszczania, tj. w ubijaku Marshalla, w prasie żyratorowej oraz zagęszczarce płytowej. W dalszej części opracowania jeśli przywołano i analizowano geometrię badanej próbki, to w celu uproszczenia opisów i dla większej czytelności pracy zastosowano następujące oznakowanie próbek (skrót):

- **M5** - ubijak Marshalla, średnica formy 101,5 mm, wysokość 50 mm,
- **M6** - ubijak Marshalla, standardowa próbka Marshalla,
- **M10** - ubijak Marshalla, średnica formy 101,5 mm, wysokość 100 mm,
- **Z10.5** - prasa żyratorowa, średnica formy 100 mm, wysokość 50 mm,
- **Z10.10** - prasa żyratorowa, średnica formy 100 mm, wysokość 100 mm,
- **Z15.5** - prasa żyratorowa, średnica formy 150 mm, wysokość 50 mm,
- **Z15.10** - prasa żyratorowa, średnica formy 150 mm, wysokość 100 mm,
- **Z15.15** - prasa żyratorowa, średnica formy 150 mm, wysokość 150 mm,
- **P5** - walec laboratoryjny, płyta o wymiarach 180x500x50 mm,
- **P10** - walec laboratoryjny, płyta o wymiarach 180x500x100 mm,
- **D10** - próbki średnicy 100 mm wycięte z nawierzchni drogi.

6.4) Laboratoryjne sposoby zagęszczania próbek do badań

6.4.1) Zagęszczanie ubijakiem Marshalla

Próbki zagęszczano ubijakiem Marshalla zgodnie z zapisami normy PN-EN 12697-30+A1:2008 „Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 30: Przygotowanie próbek zagęszczonych przez ubijanie”. Zależnie od rodzaju badania, próbki miały różną wysokość. Uległa zmianie energia zagęszczania. W zależności od wysokości próbki stosowano odpowiednią liczbę uderzeń ubijaka Marshalla:

- wysokość 50 mm - 70 uderzeń na stronę,
- wysokość 63 mm - 75 uderzeń na stronę,

- wysokość 100 mm - 120 uderzeń na stronę, przy czym pierwsze 20 uderzeń stosuje się po wypełnieniu formy w 2/3 całkowitej masy mieszanki mineralno-asfaltowej.

6.4.2) Zagęszczanie prasą żyratorową

Próbki zagęszczano prasą żyratorową zgodnie z zapisami normy PN-EN 12697-31:2007 „Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 31: Próbki przygotowane w prasie żyratorowej”. Zagęszczanie było dokonywane przez równoczesne działanie statycznego nacisku oraz ścinania, wynikającego z obrotowego ruchu osi próbki. Ruch ten generował stożkową powierzchnię obrotu, o kącie przy wierzchołku równym 2α . Powierzchnie czołowe próbki pozostawały prostopadłe do osi stożka przez cały czas badania.

Wartość nacisku pionowego (ściskanie) była stała podczas zagęszczania, co wywoływało stałe naprężenie pionowe.

Zagęszczanie mma doprowadzano do wartości wzorcowej gęstości objętościowej otrzymanej z zagęszczania w ubijaku Marshalla i oznaczonej z pomiarów geometrycznych. Zagęszczanie trwało do osiągnięcia założonej gęstości objętościowej oznaczonej geometrycznie.

6.4.3) Zagęszczanie walcem laboratoryjnym

Próbki zagęszczano walcem laboratoryjnym (urządzeniem wałującym) zgodnie z zapisami normy PN-EN 12697-33+A1:2008 „Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 31: Przygotowanie próbek zagęszczanych urządzeniem wałującym”.

Zagęszczanie w walcu laboratoryjnym polegało na wałowaniu mieszanki w formie za pomocą stalowej stopy w kształcie wycinka koła o promieniu $R = 600$ mm. Ruch stalowej stopy ma charakter ugniatający z jednoczesnym obrotem wycinka koła względem jego środka (ruch środka koła jest posuwisto-zwrotny).

Walec będący na wyposażeniu IBDiM wymusza stosowanie wałowania próbki w dwóch warstwach do płyty o grubości 50 mm lub w trzech warstwach do płyty o grubości 100 mm. Wynika to z rozwiązania, na podstawie którego zagęszczenie jest kontrolowane geometrycznie, tzn. przez dobranie odpowiedniej ilości mma w celu

uzyskania żądanej gęstości objętościowej z pomiaru geometrycznego przy stałej wysokości formy.

6.4.4) Zagęszczanie w terenie walcami drogowymi

Zagęszczanie walcami drogowymi w terenie odbywało się zgodnie z zasadami krajowych dokumentów.

6.4.5) Stopień zagęszczenia próbek

W zamierzeniu było uzyskanie próbek o zagęszczeniu w granicach 98-102%, ale uzyskane były również wyniki wykraczające poza tą granicę. Różny stopień zagęszczenia próbek uzyskano poprzez zmianę energii zagęszczania, bądź poprzez zmianę naważki mieszanki zagęszczanej w formie o stałej objętości. W przypadku próbek Marshalla o energii zagęszczania decydowała ilość uderzeń ubijaka Marshalla, a w przypadku prasy żyratorowej ilość żyracji, czyli pełnych obrotów prasy powodujących zagęszczanie. Zagęszczarka walcowa do płyt będąca na wyposażeniu laboratorium dysponuje stałą, znaną objętością, do której „upycha” się mieszankę mineralno-asfaltową, zatem o stopniu zagęszczenia decyduje jej ilość przewidziana do zagęszczania. Dla każdej mieszanki mineralno-asfaltowej uzyskano w ten sposób zbiór próbek o różnym zagęszczeniu oraz różnej gęstości objętościowej.

7) Mieszanki mineralno-asfaltowe przeznaczone do badań

7.1) Ogólnie

Badania laboratoryjne oznaczania właściwości objętościowych zostały przeprowadzone na czterech rodzajach mieszanek mineralno-asfaltowych: trzech mieszanek typu beton asfaltowy (w tym beton asfaltowy o wysokim module sztywności) oraz na mieszance SMA.

7.2) ACWMS20W (TN246W.)

Pierwszą badaną mieszankę mineralno-asfaltową stanowił beton asfaltowy. Wymiar maksymalnego ziarna wynosił w tym przypadku 20 mm. Mieszanka mineralno-asfaltowa przeznaczona była do ruchu kategorii KR3-KR6 do warstwy wiążącej. Mieszanka mineralna składała się z kruszywa wapiennego i otoczków. Uziarnienie mieszanki mineralnej TN246W przedstawiono w tablicy 2. Skład

mieszanki mineralno-asfaltowej przedstawiono w tablicy 3. Właściwości fizyczne mieszanki TN246W przedstawiono w tablicy 4. W dalszej części sprawozdania oznakowanie próbek wykonanych z tej mieszanki rozpoczyna się od przedrostka „TN246W...”.

Tablica 2. Uziarnienie mieszanki mineralnej TN246W

Rozmiar oczka sita #, mm	Pozostaje na sicie, % m/m	Przechodzi przez sito, % m/m	Krzywe graniczne, % m/m	
			Dolna	Górna
25	–	100	100	100
20	2,1	97,9	87	100
16	8,4	89,5	77	100
12,8	12,3	77,2	66	90
9,6	10,6	66,6	56	81
8	4,9	61,6	50	75
6,3	7,5	54,2	45	67
4	16,7	37,5	36	55
2	6,3	31,1	25	41
0,85	11,1	20,0	16	30
0,42	8,6	11,5	9	22
0,30	2,6	8,8	7	19
0,18	2,0	6,8	5	15
0,15	0,3	6,1	5	14
0,075	1,0	5,5	4	7
< 0,075	5,5	–	–	–
Suma	100,0	–		

Tablica 3. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej TN246W

Lp.	Składniki	Udział w MM, % m/m	Udział w MMA, % m/m
1	Mączka wapienna	5,5	5,2
2	Piasek łamany, otoczaki	27,0	25,8
3	Grys 2/6,3 mm, wapień	22,0	21,0
4	Grys 6,3/12,8, wapień	22,0	21,0
5	Grys 12,8/25, wapień	23,5	22,4
6	Asfalt 30B		4,6
Razem		100,0	100,0

Tablica 4. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej TN246W

Lp.	Właściwości	Wyniki	Wymagania
1	Gęstość mieszanki mineralnej, kg/m ³	2671	–
2	Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej, kg/m ³	2515	–

3	Gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej, kg/m ³	2359	
4	Wolna przestrzeń w próbkach Marshalla, 2 × 75 uderzeń, % v/v	6,2	4,0-8,0

7.3) AC20W (TN246Y.)

Kolejną mieszankę mineralno-asfaltową stanowił beton asfaltowy. Wymiar maksymalnego ziarna wynosił w tym przypadku 20 mm. Mieszanka mineralno-asfaltowa przeznaczona była do ruchu kategorii KR3-KR6 do warstwy wiążącej. Mieszanka mineralna w tym przypadku składała się z piasku kwarcytowego i kruszywa granodiorytowego. Uziarnienie mieszanki mineralnej TN246Y przedstawiono w tablicy 5. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej przedstawiono w tablicy 6. Właściwości fizyczne mieszanki TN246Y przedstawiono w tablicy 7. W dalszej części sprawozdania oznakowanie próbek wykonanych z tej mieszanki rozpoczyna się od przedrostka „TN246Y...”.

Tablica 5. Uziarnienie mieszanki mineralnej TN246Y

Rozmiar oczka sita #, mm	Pozostaje na sicie, % m/m	Przechodzi przez sito, % m/m	Krzywe graniczne, % m/m	
			Dolna	Górna
31,5	—	100	100	100
25	1,9	98,2	100	100
20	6,4	91,7	87	100
16	4,2	87,6	77	100
12,8	15,6	71,9	66	90
9,6	12,8	59,1	56	81
8	4,9	54,2	50	75
6,3	4,0	50,2	45	67
4	8,9	41,3	36	55
2	8,0	33,3	25	41
0,85	12,0	21,2	16	30
0,42	6,9	14,4	9	22
0,30	3,3	11,0	7	19
0,18	2,9	8,1	5	15
0,15	1,1	7,0	5	14
0,075	2,3	4,7	4	7
< 0,075	4,7	—	—	—
Suma	100	—		

Tablica 6. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej TN246Y

Lp.	Składniki	Udział w MM, % m/m	Udział w MMA, % m/m
1	Mączka wapienna	3,0	2,9
2	Piasek łamany, kwarcyt	20,0	19,2
3	Mieszanka drogowa 0/4 mm, granodioryt	18,0	17,3
4	Grys 4/8 mm, granodioryt	13,0	12,5
5	Grys 8/12,8 mm, granodioryt	10,0	9,6
6	Grys 11/16 mm, granodioryt	24,0	23,0
7	Grys 16/25 mm, granodioryt	12,0	11,5
8	Asfalt 30B		4,0
Razem		100,0	100,0

Tablica 7. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej TN246Y

Lp.	Właściwości	Wyniki	Wymagania
1	Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej, kg/m ³	2516	–
2	Gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej, kg/m ³	2396	–
3	Wolna przestrzeń w próbkach Marshalla, 2 × 75 uderzeń, % v/v	4,8	4,0-6,0
4	Wypełnienie wolnych przestrzeni lepiszczem	66,0	<75,0

7.4) SMA11 (TN246S.)

Kolejną mieszankę mineralno-asfaltową stanowiła mieszanka SMA. Wymiar maksymalnego ziarna wynosił w tym przypadku 11 mm. Mieszanka mineralno-asfaltowa przeznaczona była do ruchu kategorii KR3-KR6 do warstwy ścieralnej. Mieszanka mineralna w tym przypadku składała się w mieszanki grysów bazaltowych i amfibolitowych oraz piasku łamanego dolomitowego. Uziarnienie mieszanki mineralnej TN246S przedstawiono w tablicy 8. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej przedstawiono w tablicy 9. Właściwości fizyczne mieszanki TN246S przedstawiono w tablicy 10. W dalszej części sprawozdania oznakowanie próbek wykonanych z tej mieszanki rozpoczyna się od przedrostka „TN246S...”.

Tablica 8. Uziarnienie mieszanki mineralnej TN246S

Rozmiar oczka sita #, mm	Pozostaje na sicie, % m/m	Przechodzi przez sito, % m/m	Krzywe graniczne, % m/m	
			Dolna	Górna
20	—	100	100	100
16	—	100	100	100
11,2	9,8	90,2	90,0	100
8	30,8	59,4	45,0	60
5	22,4	37,0	30,0	40
2	15	22,0	20,0	25
0,85	5,7	16,3	12	21
0,42	2,3	14,0	10	20
0,30	0,9	13,1	10	19
0,18	1,1	12,0	9	18
0,15	0,4	11,6	9	17
0,075	2,1	9,5	8	13
< 0,075	9,5	—	—	—
Suma	100,0	—	—	—

Tablica 9. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej TN246S

Lp.	Składniki	Udział w MM, % m/m	Udział w MMA, % m/m
1	Mączka wapienna	9,0	8,4
2	Piasek łamany, dolomit	12,0	11,2
3	Grys 2/5, bazalt	4,0	3,7
4	Grys 5/8, bazalt	16,0	15,0
5	Grys 5/8, amfibolit	16,0	15,0
6	Grys 8/12,8, bazalt	21,0	19,8
7	Grys 8/11, amfibolit	22,0	20,8
8	Asfalt 80B		6,1
Razem		100,0	100,0

Tablica 10. Właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej TN246S

Lp.	Właściwości	Wyniki	Wymagania
1	Gęstość mieszanki mineralnej, g/cm ³	2,881	—
2	Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm ³	2,585	—
3	Gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm ³	2,491	—
4	Wolna przestrzeń w próbkach Marshalla, 2 × 75 uderzeń, % v/v	3,6	3,0 – 4,0
5	Odporność na koleinowanie, duży aparat (60±2 °C, 10 000 cykli), P, %	4,4	≤10,0
6	Odporność na działanie wody, ITSr, %	99,5	≥90,0

7.5) AC25P (TN246N.)

Badaniom poddano również mieszankę mineralno-asfaltową jaką był beton asfaltowy do warstwy podbudowy. Wymiar maksymalnego ziarna wynosił w tym przypadku 25 mm. Mieszanka mineralno-asfaltowa przeznaczona była do ruchu kategorii KR3-KR6 do warstwy podbudowy. Mieszanka mineralna w tym przypadku składała się w całości z kruszywa naturalnie rozdrobnionego. Uziarnienie mieszanki mineralnej TN246N przedstawiono w tablicy 11. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej przedstawiono w tablicy 12. Właściwości fizyczne mieszanki TN246N przedstawiono w tablicy 13. W dalszej części sprawozdania oznakowanie próbek wykonanych z tej mieszanki rozpoczyna się od przedrostka „TN246N...”.

Tablica 11. Uziarnienie mieszanki mineralnej TN246N

Rozmiar oczka sita #, mm	Pozostaje na sicie, % m/m	Przechodzi przez sito, % m/m	Krzywe graniczne, % m/m	
			Dolna	Górna
31,5	—	100,0	100	100
25	0,7	99,3	87	100
20	7,2	92,1	76	100
16	8,4	83,7	66	90
12,8	13,1	70,6	57	81
9,6	13,6	57,0	48	71
8	7,3	49,7	42	65
6,3	7,5	42,2	36	58
4	6,0	36,2	27	47
2	13,1	23,1	19	35
0,85	9,1	14,0	12	24
0,42	3,3	10,7	7	18
0,30	1,4	9,3	6	15
0,18	1,8	7,5	5	12
0,15	0,6	6,9	5	11
0,075	1,7	5,2	4	7
< 0,075	5,2	—	-	-
Suma	100,0	—		

Tablica 12. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej TN246N

Lp.	Składniki	Udział w MM, % m/m	Udział w MMA, % m/m
1	Grys 12,5/25, naturalny łamany	13,5	12,9
2	Grys 12,5/20, naturalny łamany	20,0	19,2
3	Grys 6,3/12,5, naturalny łamany	25,0	23,9
4	Grys 2/6,3, naturalny łamany	25,0	23,9
5	Piasek łamany 0/2, naturalny	11,0	10,5
	Mączka wapienna	5,5	5,3
6	Asfalt 35/50	–	4,3
Razem		100,0	100,0

Tablica 13. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej TN246N

Lp.	Właściwości	Wyniki	Wymagania
1	Gęstość mieszanki mineralnej, kg/m ³	2696	–
2	Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej, kg/m ³	2517	–
3	Gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm ³	2382	–
4	Wolna przestrzeń w próbkach Marshalla, 2 × 75 uderzeń, % v/v	5,4	4,0 – 7,0
5	Moduł sztywności pełzania pod obciążeniem statycznym, MPa	38,8	≥16,0
6	Odporność na koleinowanie wg BS, 60 °C 45 minut		
	- maksymalna koleina, mm	0,9	≤7
	- maksymalna prędkość przyrostu koleiny, mm/h	0,3	≤5
7	Odporność na działanie wody i mrozu, %	81	≥80

8) Badania mieszanek mineralno-asfaltowych

Badania mieszanek mineralno-asfaltowych przeprowadzane były na próbkach mieszanych laboratoryjnie oraz zagęszczanych sposobami laboratoryjnymi. W przypadku badań mma mieszanych przemysłowo badania przeprowadzane zostały na jednej partii produkcyjnej zagęszczanej sposobami laboratoryjnymi i wyciętych z warstwy nawierzchni. Stosowane były następujące sposoby zagęszczania:

- ubijakiem Marshalla, próbki walcowe o średnicy (nominalnej) 100 mm i wysokości (nominalnej) 50, 63 oraz 100 mm,
- prasą żyratorową, próbki walcowe o średnicy 100 mm i wysokości (nominalnej) 63 mm oraz 100 mm, próbki z nich wycięte średnicy (nominalnej) 80 mm,

- prasą żyratorową, próbki walcowe o średnicy 150 mm i wysokości (nominalnej) 63 mm, 100 mm oraz 150 mm, próbki z nich wycięte średnicy (nominalnej) 100 mm oraz 80 mm,
- walcem laboratoryjnym, próbki prostopadłościennne (płyty) o grubości 50 mm oraz 100 mm, próbki z nich wycięte średnicy (nominalnej) 150 mm, 100 mm oraz 80 mm,
- walcami drogowymi ogumionymi i stalowymi (statyczno-wibracyjnymi), wycięte z warstwy asfaltowej próbki o średnicy (nominalnej) 100 mm oraz 80 mm.

W pierwszej kolejności badaniom poddano tzw. „próbki pierwotne”, czyli próbki bezpośrednio po rozformowaniu, bez obróbki powierzchni bocznych. Obróbkę powierzchni bocznych można realizować poprzez wycięcie (odwiercenie, obcięcie) z próbki pierwotnej próbki o mniejszych wymiarach. Uzyskujemy wtedy próbkę o bardziej jednolitej powierzchni, bez tzw. tekstury próbki. Tekstura próbki ma istotny wpływ na wyniki badań gęstości objętościowej, co zostało wyjaśnione w rozdziale opisującym metody badan gęstości.

9) Wyniki badań mieszanek mineralno-asfaltowych

W tablicach od 14 do 29 zestawiono wyniki badań próbek o gęstościach objętościowych bliskich gęstości objętościowej uzyskanej z próbek referencyjnych z ubijaka Marshalla, czyli próbek o wskaźniku zagęszczenia bliskim 100%.

Tablica 14. Mieszanka W – gęstość objętościowa metodą A

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	2417	2406	2413	2413	2412	4,6
M10	2409	2420	2424	2419	2418	6,4
Z10.5	2425	2409	2429	2427	2423	9,1
Z10.10	2418	2418	2417	2418	2418	0,5
Z15.5	2416	2419	2415	2418	2417	1,8
Z15.10	2416	2416	2421	2416	2417	2,5
Z15.15	2420	2414	2421	2422	2419	3,6
P10	2418	2416	2432	2488	2439	33,8

Tablica 15. Mieszanka W – gęstość objętościowa metodą B (metoda referencyjna)

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	2422	2402	2411	2409	2411	8,3
M10	2410	2419	2422	2419	2418	5,2
Z10.5	2423	2402	2422	2424	2418	10,5
Z10.10	2411	2412	2410	2413	2412	1,3
Z15.5	2416	2422	2413	2413	2416	4,2
Z15.10	2413	2411	2416	2409	2412	3,0
Z15.15	2413	2409	2413	2416	2413	2,9
P10	2394	2400	2421	2430	2411	17,0

Tablica 16. Mieszanka W – gęstość objętościowa metodą D

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	2359	2338	2339	2347	2346	9,7
M10	2379	2384	2378	2377	2380	3,1
Z10.5	2347	2338	2357	2370	2353	13,7
Z10.10	2371	2364	2347	2358	2360	10,2
Z15.5	2375	2375	2360	2373	2371	7,2
Z15.10	2372	2373	2372	2371	2372	0,8
Z15.15	2377	2377	2376	2374	2376	1,4
P10	2328	2385	2390	2299	2351	44,4

Tablica 17. Mieszanka Y – gęstość objętościowa metodą A

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	2353	2359	2358	2353	2356	3,2
M10	2368	2359	2372	2380	2370	8,7
Z10.5	2414	2419	2422	2455	2428	18,6
Z10.10	2408	2413	2406	2398	2406	6,2

Z15.5	2402	2385	2406	2378	2393	13,4
Z15.10	2411	2405	2415	2411	2411	4,1
Z15.15	2420	2412	2400	2382	2404	16,5
P10	2399	2411	2414	2408	2408	6,5

Tablica 18. Mieszanka Y – gęstość objętościowa metodą B (metoda referencyjna)

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia	Odchylenie standardowe
M5	2334	2344	2347	2345	2343	5,8
M10	2363	2353	2354	2358	2357	4,5
Z10.5	2360	2372	2358	2367	2364	6,4
Z10.10	2364	2360	2356	2357	2359	3,6
Z15.5	2360	2355	2370	2362	2362	6,2
Z15.10	2374	2361	2369	2350	2364	10,5
Z15.15	2371	2368	2362	2351	2363	8,8
P10	2361	2372	2374	2376	2371	6,7

Tablica 19. Mieszanka Y – gęstość objętościowa metodą D

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	2205	2192	2228	2220	2211	16,0
M10	2287	2284	2259	2264	2274	14,1
Z10.5	2252	2235	2212	2152	2213	43,7
Z10.10	2263	2275	2287	2287	2278	11,5
Z15.5	2278	2282	2296	2305	2290	12,5
Z15.10	2297	2267	2279	2276	2280	12,6
Z15.15	2302	2302	2299	2298	2300	2,1
P10	2219	2224	2267	2260	2243	24,5

Tablica 20. Mieszanka S – gęstość objętościowa metodą A

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	2522	2512	2524	2511	2517	6,7
M10	2501	2508	2498	2513	2505	6,8
Z10.5	2521	2527	2521	2516	2521	4,5
Z10.10	2522	2525	2509	2516	2518	7,1
Z15.5	2495	2506	2512	2515	2507	8,8
Z15.10	2503	2502	2521	2518	2511	9,9
P5	2524	2514	2503	2501	2511	10,7

Tablica 21. Mieszanka S – gęstość objętościowa metodą B (metoda referencyjna)

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	2502	2510	2531	2517	2515	12,3
M10	2520	2512	2504	2514	2513	6,6
Z10.5	2513	2520	2513	2513	2515	3,5
Z10.10	2520	2525	2512	2515	2518	5,7
Z15.5	2491	2507	2513	2510	2505	9,8
Z15.10	2501	2499	2523	2520	2511	12,5
P5	2511	2525	2497	2500	2508	12,7

Tablica 22. Mieszanka S – gęstość objętościowa metodą D

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	2385	2385	2424	2383	2394	19,9
M10	2422	2413	2395	2413	2411	11,3
Z10.5	2382	2385	2391	2387	2386	3,8
Z10.10	2419	2444	2412	2414	2422	14,8
Z15.5	2407	2427	2417	2419	2418	8,2
Z15.10	2415	2415	2443	2436	2427	14,4
P5	2394	2363	2321	2338	2354	31,8

Tablica 23. Mieszanka N – gęstość objętościowa metodą B (metoda referencyjna)

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	2393	2396	2403	2407	2400	6,4
M10	2378	2351	2371	2357	2364	12,4
Z10.10	2391	2395	2389	2371	2387	10,6
Z15.10	2373	2382	2389	2398	2386	10,6
Z15.15	2361	2369	2391	2393	2379	15,9

Tablica 24. Mieszanka N – gęstość objętościowa metodą D

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	2272	2278	2296	2251	2274	18,6
M10	2303	2275	2260	2243	2270	25,4
Z10.10	2305	2311	2287	2249	2288	27,9
Z15.10	2279	2310	2309	2315	2303	16,4
Z15.15	2276	2277	2321	2327	2300	27,5

W tablicach od 25 do 40 zestawiono wyniki badań zawartości wolnych przestrzeni w próbkach.

Tablica 25. Mieszanka W – zawartość wolnych przestrzeni metodą A

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	3,1	3,5	3,2	3,2	3,3	0,17
M10	3,4	3,0	2,8	3,0	3,1	0,25
Z10.5	2,8	3,4	2,6	2,7	2,9	0,36
Z10.10	3,0	3,0	3,1	3,0	3,0	0,05
Z15.5	3,1	3,0	3,2	3,0	3,1	0,10
Z15.10	3,1	3,1	2,9	3,1	3,1	0,10
Z15.15	3,0	3,2	2,9	2,9	3,0	0,14
P10	3,1	2,5	0,2	3	2,2	1,36

Tablica 26. Mieszanka W – zawartość wolnych przestrzeni metodą B
(metoda referencyjna)

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	2,9	3,7	3,3	3,4	3,3	0,33
M10	3,4	3,0	2,9	3,0	3,1	0,22
Z10.5	2,8	3,7	2,9	2,8	3,1	0,44
Z10.10	3,3	3,3	3,4	3,2	3,3	0,08
Z15.5	3,1	2,9	3,2	3,2	3,1	0,14
Z15.10	3,2	3,3	3,1	3,4	3,3	0,13
Z15.15	3,2	3,4	3,2	3,1	3,2	0,13
P10	3,8	2,9	2,6	4	3,3	0,68

Tablica 27. Mieszanka W – zawartość wolnych przestrzeni metodą D

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	5,4	6,3	6,2	5,9	6,0	0,40
M10	4,6	4,4	4,7	4,7	4,6	0,14
Z10.5	5,9	6,3	5,5	5,0	5,7	0,56
Z10.10	4,9	5,2	5,9	5,5	5,4	0,43
Z15.5	4,8	4,8	5,4	4,9	5,0	0,29
Z15.10	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	0,00
Z15.15	4,7	4,7	4,7	4,8	4,7	0,05
P10	6,7	4,4	4,2	7,8	5,8	1,76

Tablica 28. Mieszanka Y – zawartość wolnych przestrzeni metodą A

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	6,3	6,1	6,1	6,3	6,2	0,12
M10	5,7	6,1	5,6	5,3	5,7	0,33
Z10.5	3,9	3,7	3,6	2,3	3,4	0,73
Z10.10	4,1	3,9	4,2	4,5	4,2	0,25
Z15.5	4,4	5,1	4,2	5,3	4,8	0,53
Z15.10	4,0	4,3	3,9	4,0	4,1	0,17
Z15.15	3,7	4,0	4,5	5,2	4,4	0,66
P10	4,5	4	3,9	4,1	4,1	0,26

Tablica 29. Mieszanka Y – zawartość wolnych przestrzeni metodą B (metoda referencyjna)

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	7,1	6,7	6,6	6,6	6,8	0,24
M10	5,9	6,3	6,3	6,1	6,2	0,19
Z10.5	6,1	5,6	6,1	5,8	5,9	0,24
Z10.10	5,9	6,1	6,2	6,2	6,1	0,14
Z15.5	6,1	6,3	5,7	6,0	6,0	0,25
Z15.10	5,5	6,0	5,7	6,4	5,9	0,39
Z15.15	5,6	5,7	6,0	6,4	5,9	0,36
P10	6,0	5,6	5,5	5,4	5,6	0,26

Tablica 30. Mieszanka Y – zawartość wolnych przestrzeni metodą D

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	12,2	12,7	11,3	11,6	12,0	0,62
M10	9,0	9,1	10,1	9,9	9,5	0,56
Z10.5	10,4	11,0	11,9	14,3	11,9	1,71
Z10.10	9,9	9,4	9,0	9,0	9,3	0,43
Z15.5	9,3	9,2	8,6	8,2	8,8	0,52
Z15.10	8,6	9,8	9,3	9,4	9,3	0,50
Z15.15	8,4	8,4	8,5	8,5	8,5	0,06
P10	11,7	11,5	9,8	10	10,8	0,99

Tablica 31. Mieszanka S – zawartość wolnych przestrzeni metodą A

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	2,7	3,1	2,7	3,2	2,9	0,26
M10	3,5	3,3	3,7	3,1	3,4	0,26
Z10.5	2,8	2,5	2,8	3,0	2,8	0,21
Z10.10	2,7	2,6	3,2	3,0	2,9	0,28
Z15.5	3,8	3,4	3,1	3,0	3,3	0,36
Z15.10	3,5	3,5	2,8	2,9	3,2	0,38
P5	2,7	3	3,5	3,5	3,2	0,39

Tablica 32. Mieszanka S – zawartość wolnych przestrzeni metodą B (metoda referencyjna)

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	3,5	3,2	2,4	2,9	3,0	0,47
M10	2,8	3,1	3,4	3,0	3,1	0,25
Z10.5	3,1	2,8	3,1	3,1	3,0	0,15
Z10.10	2,8	2,6	3,1	3,0	2,9	0,22
Z15.5	3,9	3,3	3,1	3,2	3,4	0,36
Z15.10	3,5	3,6	2,7	2,8	3,2	0,47
P5	3,2	2,6	3,7	3,6	3,3	0,50

Tablica 33. Mieszanka S – zawartość wolnych przestrzeni metodą D

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	8,0	8,0	6,5	8,1	7,7	0,77
M10	6,6	6,9	7,6	6,9	7,0	0,42
Z10.5	8,1	8,0	7,8	7,9	8,0	0,13
Z10.10	6,7	5,7	7,0	6,9	6,6	0,60
Z15.5	7,2	6,4	6,8	6,7	6,8	0,33
Z15.10	6,9	6,9	5,8	6,1	6,4	0,56
P5	7,7	8,9	10,5	9,8	9,2	1,21

Tablica 34. Mieszanka N – zawartość wolnych przestrzeni metodą B (metoda referencyjna)

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	4,9	4,8	4,4	4,5	4,7	0,24
M10	5,5	6,6	5,8	6,4	6,1	0,51
Z10.10	4,8	5,0	5,0		4,9	0,12
Z15.10	5,7	5,4	5,1	4,7	5,2	0,43
Z15.15	6,2	5,9	5	4,9	5,5	0,65

Tablica 35. Mieszanka N – zawartość wolnych przestrzeni metodą D

Rodzaj próbki	Próbka 1 kg/m ³	Próbka 2 kg/m ³	Próbka 3 kg/m ³	Próbka 4 kg/m ³	Średnia kg/m ³	Odchylenie standardowe
M5	9,7	9,5	10,6	8,8	9,7	0,74
M10	8,5	9,6	10,2	10,9	9,8	1,02
Z10.10	7,7	8,4	8,2		8,1	0,36
Z15.10	9,5	8,2	8,3	8	8,5	0,68
Z15.15	9,6	9,5	7,8	7,5	8,6	1,1

10) Analiza wyników badań mieszanek mineralno-asfaltowych

10.1) Wpływ metody badawczej

W tym etapie analizy zestawiono wyniki badań gęstości objętościowej uzyskane różnymi metodami na próbkach o tej samej geometrii, będących próbkami pierwotnymi, o powierzchni formowanej, nie ciętej. W tablicach 46-49 przedstawiono porównanie wyników badań próbek o tej samej geometrii badanych różnymi metodami. Po prawej stronie kolumny zawierającej średnie wyniki gęstości objętościowej metodą A, C lub D na próbkach o zagęszczeniu 100% wstawiono kolumnę zawierającą różnicę wyniku w stosunku do gęstości referencyjnej, w tym przypadku gęstości objętościowej określonej metodą B.

Tablica 36. Porównanie średnich wyników gęstości objętościowej –
mieszanka W

Rodzaj próbki	Metoda A kg/m ³	Różnica do ref.	Metoda B (ref) kg/m ³	Metoda D kg/m ³	Różnica do ref.
M5	2412	1	2411	2346	-65
M10	2418	0	2418	2380	-38
Z10.5	2423	5	2418	2353	-65
Z10.10	2418	6	2412	2360	-52
Z15.5	2417	1	2416	2371	-45
Z15.10	2417	5	2412	2372	-40
Z15.15	2419	6	2413	2376	-37
P10	2439	28	2411	2351	-60
Średnia	2420	7	2414	2364	-50
Odch. std.	8,1	9,0	3,0	12,8	11,9

Tablica 37. Porównanie średnich wyników gęstości objętościowej –
mieszanka Y

Rodzaj próbki	Metoda A kg/m ³	Różnica do ref.	Metoda B (ref) kg/m ³	Metoda D kg/m ³	Różnica do ref.
M5	2356	13	2343	2211	-132
M10	2370	13	2357	2274	-83
Z10.5	2428	64	2364	2213	-151
Z10.10	2406	47	2359	2278	-81
Z15.5	2393	31	2362	2290	-72
Z15.10	2411	47	2364	2280	-84
Z15.15	2404	41	2363	2300	-63
P10	2408	37	2371	2243	-128
Średnia	2397	37	2360	2261	-99
Odch. std.	23,4	17,5	8,1	34,5	32,7

Tablica 38. Porównanie średnich wyników gęstości objętościowej – mieszanka S

Rodzaj próbki	Metoda A kg/m ³	Różnica do ref.	Metoda B (ref) kg/m ³	Metoda D kg/m ³	Różnica do ref.
M5	2517	2	2515	2394	-121
M10	2505	-8	2513	2411	-102
Z10.5	2521	6	2515	2386	-129
Z10.10	2518	0	2518	2422	-96
Z15.5	2507	2	2505	2418	-87
Z15.10	2511	0	2511	2427	-84
P5	2511	3	2508	2354	-154
Średnia	2513	1	2512	2402	-110
Odch. std.	6,0	4,3	4,5	25,8	25,4

Tablica 39. Porównanie średnich wyników gęstości objętościowej – mieszanka N

Rodzaj próbki	Metoda B (ref) kg/m ³	Metoda D kg/m ³	Różnica do ref.
M5	2400	2274	-126
M10	2364	2270	-94
Z10.10	2387	2288	-99
Z15.10	2386	2303	-83
Z15.15	2379	2300	-79
Średnia	2383	2287	-96
Odch. std.	13,1	14,9	18,5

W przeprowadzonym porównaniu nie zaobserwowano powtarzalnego, istotnego wpływu metody badawczej na różnice wyników występujące pomiędzy metodami.

10.2) Wpływ sposobu zagęszczania

W tym etapie analizy zestawiono uzyskane wyniki badań gęstości objętościowej uzyskane różnymi metodami na próbkach o tej samej geometrii, ale różniących się sposobem zagęszczania. Próbki te były próbkami pierwotnymi, o powierzchni formowanej, nie ciętej. Próbki zestawiono parami, a do porównania wykorzystano wyniki badań próbek M5 i Z10.5 oraz M10 i Z10.10. W tablicach 50-56 przedstawiono porównanie wyników badań próbek o tej samej geometrii ale różnym sposobie zagęszczania, badanych różnymi metodami.

Tablica 40. Porównanie średnich wyników gęstości objętościowej – ta sama geometria, różne sposoby zagęszczania, mieszanka W

Rodzaj próbki	Metoda A kg/m ³	Różnica do ref.	Metoda B (ref) kg/m ³	Metoda D kg/m ³	Różnica do ref.
M5	2417	5	2422	2359	-63
	2413	-2	2411	2339	-72
	2413	-4	2409	2347	-62
	2406	-4	2402	2338	-64
Średnia	2412	-1	2411	2346	-65
Z10.5	2425	-2	2423	2347	-76
	2427	-3	2424	2370	-54
	2429	-7	2422	2357	-65
	2409	-7	2402	2338	-64
Średnia	2423	-5	2418	2353	-65

Tablica 41. Porównanie średnich wyników gęstości objętościowej – ta sama geometria, różne sposoby zagęszczania, mieszanka W

Rodzaj próbki	Metoda A kg/m ³	Różnica do ref.	Metoda B (ref) kg/m ³	Metoda D kg/m ³	Różnica do ref.
M10	2424	-2	2422	2378	-44
	2420	-1	2419	2384	-35
	2419	0	2419	2377	-42
	2409	1	2410	2379	-31
Średnia	2418	-1	2418	2380	-38
Z10.10	2418	-5	2413	2358	-55
	2418	-7	2411	2371	-40
	2418	-6	2412	2364	-48
	2417	-7	2410	2347	-63
Średnia	2418	-6	2412	2360	-52

Tablica 42. Porównanie średnich wyników gęstości objętościowej – ta sama geometria, różne sposoby zagęszczania, mieszanka Y

Rodzaj próbki	Metoda A kg/m ³	Różnica do ref.	Metoda B (ref) kg/m ³	Metoda D kg/m ³	Różnica do ref.
M5	2353	-19	2334	2205	-129
	2359	-15	2344	2192	-152
	2358	-11	2347	2228	-119
	2353	-8	2345	2220	-125
Średnia	2356	-13	2343	2211	-131
Z10.5	2414	-54	2360	2252	-108
	2419	-47	2372	2235	-137
	2422	-64	2358	2212	-146
	2455	-88	2367	2152	-215
Średnia	2428	-63	2364	2213	-152

Tablica 43. Porównanie średnich wyników gęstości objętościowej – ta sama geometria, różne sposoby zagęszczania, mieszanka Y

Rodzaj próbki	Metoda A kg/m ³	Różnica do ref.	Metoda B (ref) kg/m ³	Metoda D kg/m ³	Różnica do ref.
M10	2368	-5	2363	2287	-76
	2359	-6	2353	2284	-69
	2372	-18	2354	2259	-95
	2380	-22	2358	2264	-94
Średnia	2370	-13	2357	2274	-84
Z10.10	2408	-44	2364	2263	-101
	2413	-53	2360	2275	-85
	2406	-50	2356	2287	-69
	2398	-41	2357	2287	-70
Średnia	2406	-47	2359	2278	-81

Tablica 44. Porównanie średnich wyników gęstości objętościowej – ta sama geometria, różne sposoby zagęszczania, mieszanka S

Rodzaj próbki	Metoda A kg/m ³	Różnica do ref.	Metoda B (ref) kg/m ³	Metoda D kg/m ³	Różnica do ref.
M5	2522	-20	2502	2385	-117
	2512	-2	2510	2385	-125
	2524	7	2531	2424	-107
	2511	6	2517	2383	-134
Średnia	2517	-2	2515	2394	-121
Z10.5	2521	-8	2513	2382	-131
	2527	-7	2520	2385	-135
	2521	-8	2513	2391	-122
	2516	-3	2513	2387	-126
Średnia	2521	-7	2515	2386	-129

Tablica 45. Porównanie średnich wyników gęstości objętościowej – ta sama geometria, różne sposoby zagęszczania, mieszanka S

Rodzaj próbki	Metoda A kg/m ³	Różnica do ref.	Metoda B (ref) kg/m ³	Metoda D kg/m ³	Różnica do ref.
M10	2501	19	2520	2422	-98
	2508	4	2512	2413	-99
	2498	6	2504	2395	-109
	2513	1	2514	2413	-101
Średnia	2505	8	2513	2411	-102
Z10.10	2522	-2	2520	2419	-101
	2525	0	2525	2444	-81
	2509	3	2512	2412	-100
	2516	-1	2515	2414	-101
Średnia	2518	0	2518	2422	-96

Tablica 46. Porównanie średnich wyników gęstości objętościowej – ta sama geometria, różne sposoby zagęszczania, mieszanka N

Rodzaj próbki	Metoda B (ref)	Metoda D kg/m ³	Różnica do ref.
M10	2378	2303	-75
	2351	2275	-76
	2371	2260	-111
	2357	2243	-114
Średnia	2364	2270	-94
Z10.10	2391	2305	-86
	2395	2311	-84
	2396	2323	-73
Średnia	2394	2313	-61

W przeprowadzonym porównaniu nie zaobserwowano powtarzalnego, istotnego wpływu sposobu formowania próbki o tej samej geometrii na różnice wyników

występujące pomiędzy metodami. Z reguły różnice były powtarzalne dla obu sposobów formowania próbek.

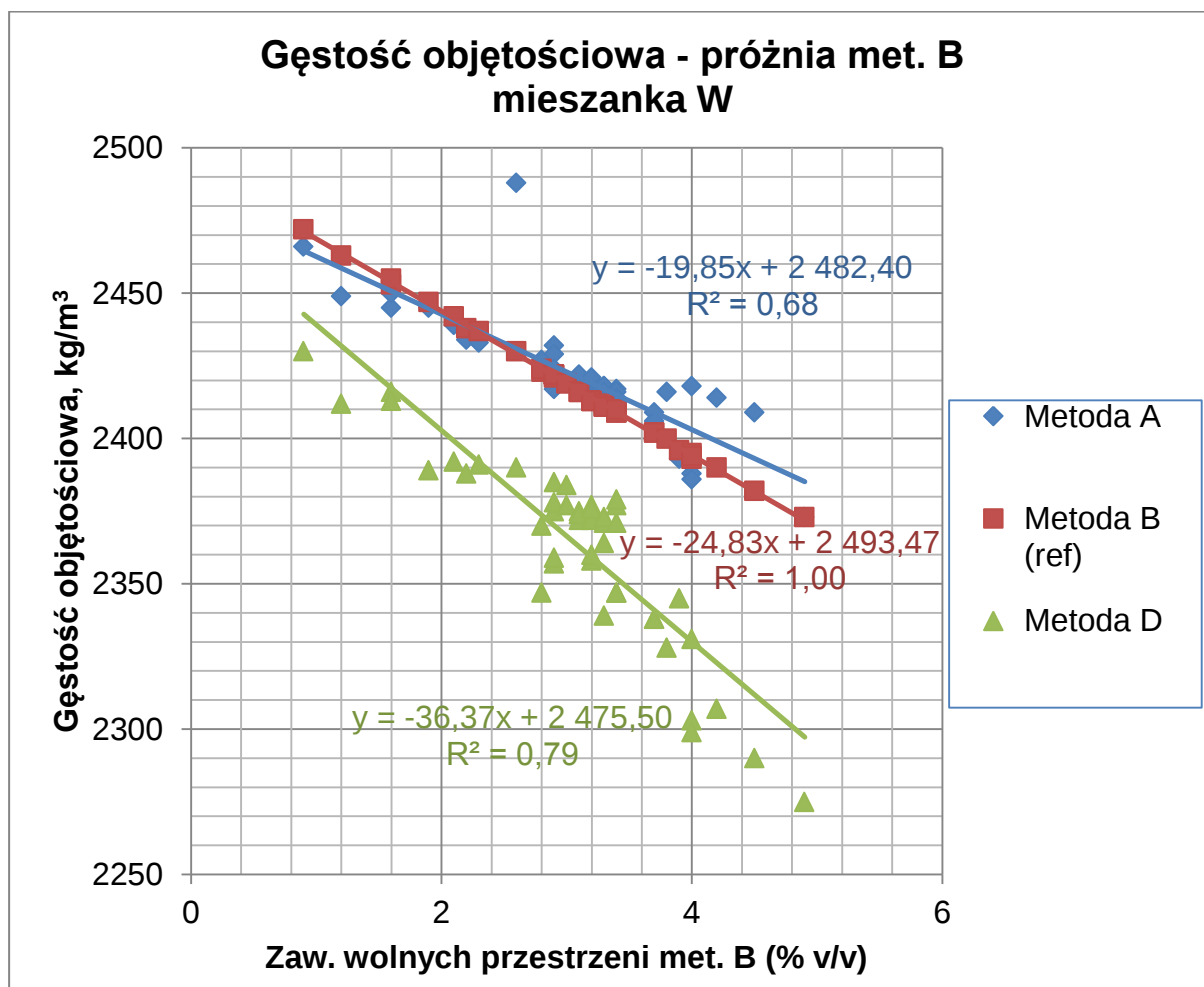
10.3) Wpływ zawartości wolnych przestrzeni na wyniki różnych metod

W tym zestawieniu zawarto wyniki wszystkich badań, nie tylko próbek o zagęszczeniu bliskim 100%.

Tablica 47. Porównanie różnic wyników metod w zależności od poziomu zawartości wolnych przestrzeni, mieszanka W, wszystkie rodzaje próbek

Zawartość wolnych przestrzeni, %	Metoda A kg/m ³	Metoda B (ref) kg/m ³	Metoda D kg/m ³
0,9	2466	2472	2430
1,2	2449	2463	2412
1,6	2445	2453	2416
1,6	2450	2455	2413
1,9	2445	2447	2389
2,1	2439	2442	2392
2,2	2434	2438	2388
2,3	2433	2437	2391
2,6	2488	2430	2390
2,8	2425	2423	2347
2,8	2427	2424	2370
2,9	2432	2421	2385
2,9	2429	2422	2357
2,9	2419	2422	2375
2,9	2417	2422	2359
2,9	2424	2422	2378
3	2420	2419	2384
3	2419	2419	2377
3,1	2416	2416	2375
3,1	2421	2416	2372

3,1	2422	2416	2374
3,2	2418	2413	2358
3,2	2415	2413	2360
3,2	2418	2413	2373
3,2	2416	2413	2372
3,2	2420	2413	2377
3,2	2421	2413	2376
3,3	2418	2411	2371
3,3	2418	2412	2364
3,3	2416	2411	2373
3,3	2413	2411	2339
3,4	2417	2410	2347
3,4	2416	2409	2371
3,4	2414	2409	2377
3,4	2413	2409	2347
3,4	2409	2410	2379
3,7	2409	2402	2338
3,7	2406	2402	2338
3,8	2416	2400	2328
3,9	2393	2396	2345
4	2388	2393	2303
4	2386	2395	2331
4	2418	2394	2299
4,2	2414	2390	2307
4,5	2409	2382	2290
4,9	2373	2373	2275



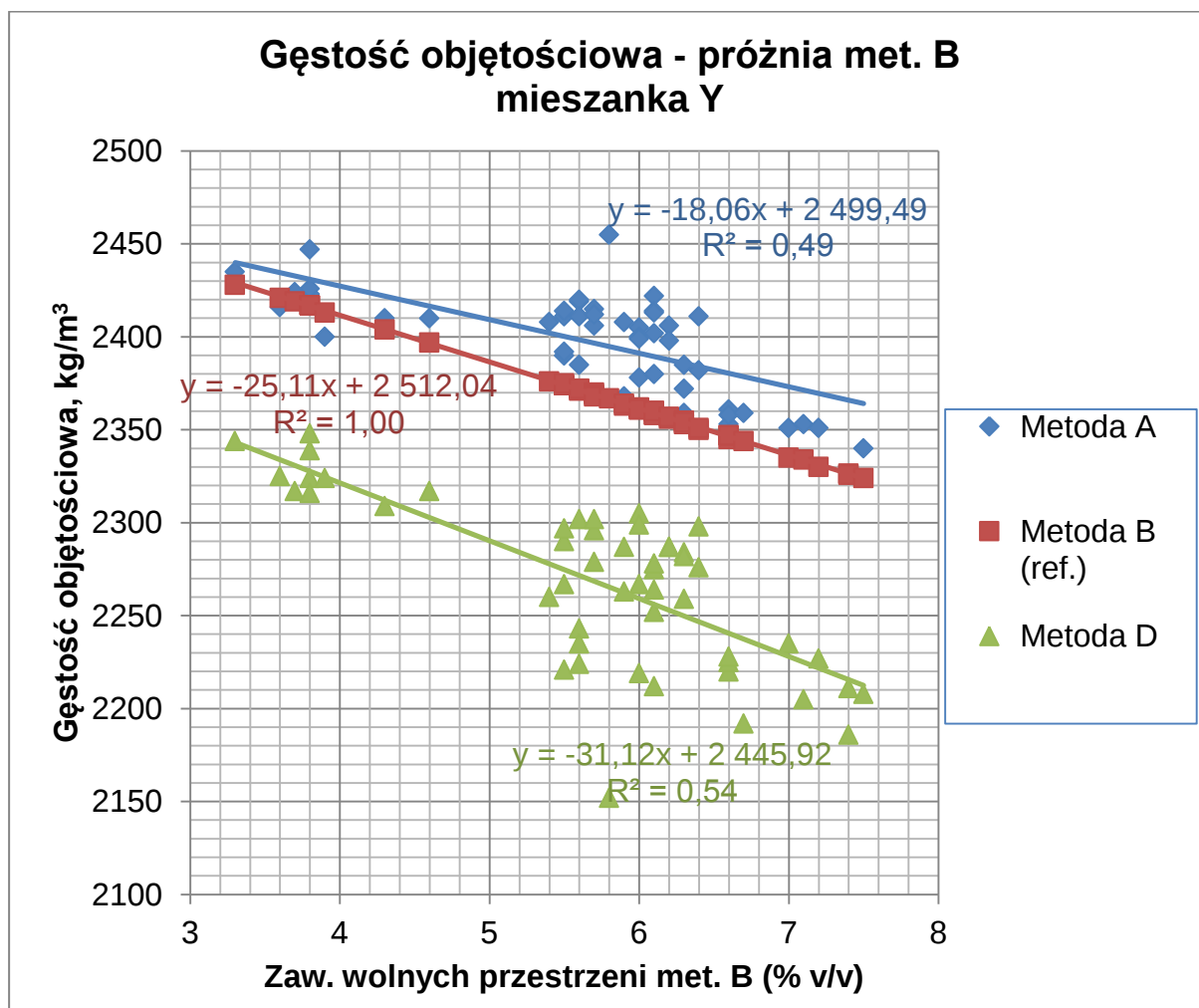
Rysunek 11. Zależność gęstości objętościowej od próżni metodą B, mieszanka W

Tablica 48. Porównanie różnic wyników metod w zależności od poziomu zawartości wolnych przestrzeni, mieszanka Y, wszystkie rodzaje próbek

Zawartość wolnych przestrzeni, %	Metoda A kg/m ³	Metoda B (ref) kg/m ³	Metoda D kg/m ³
3,3	2435	2428	2344
3,6	2416	2421	2325
3,7	2424	2419	2317
3,8	2423	2417	2339
3,8	2417	2417	2324
3,8	2426	2417	2316

3,8	2447	2417	2348
3,9	2400	2413	2324
4,3	2410	2404	2309
4,6	2410	2397	2317
5,4	2408	2376	2260
5,5	2390	2374	2290
5,5	2411	2374	2297
5,5	2414	2374	2267
5,5	2392	2375	2221
5,6	2385	2372	2243
5,6	2419	2372	2235
5,6	2420	2371	2302
5,6	2411	2372	2224
5,7	2406	2370	2296
5,7	2415	2369	2279
5,7	2412	2368	2302
5,8	2455	2367	2152
5,9	2368	2363	2287
5,9	2408	2364	2263
6	2378	2362	2305
6	2405	2361	2267
6	2400	2362	2299
6	2399	2361	2219
6,1	2422	2358	2212
6,1	2380	2358	2264
6,1	2414	2360	2252
6,1	2413	2360	2275
6,1	2402	2360	2278
6,2	2406	2356	2287
6,2	2398	2357	2287
6,3	2359	2353	2284
6,3	2385	2355	2282

6,3	2372	2354	2259
6,4	2411	2350	2276
6,4	2382	2351	2298
6,6	2353	2345	2220
6,6	2361	2347	2225
6,6	2358	2347	2228
6,7	2359	2344	2192
7	2351	2335	2235
7,1	2353	2334	2205
7,2	2351	2330	2227
7,4		2326,4	2186
7,4		2325,81	2211
7,5	2340	2324	2208



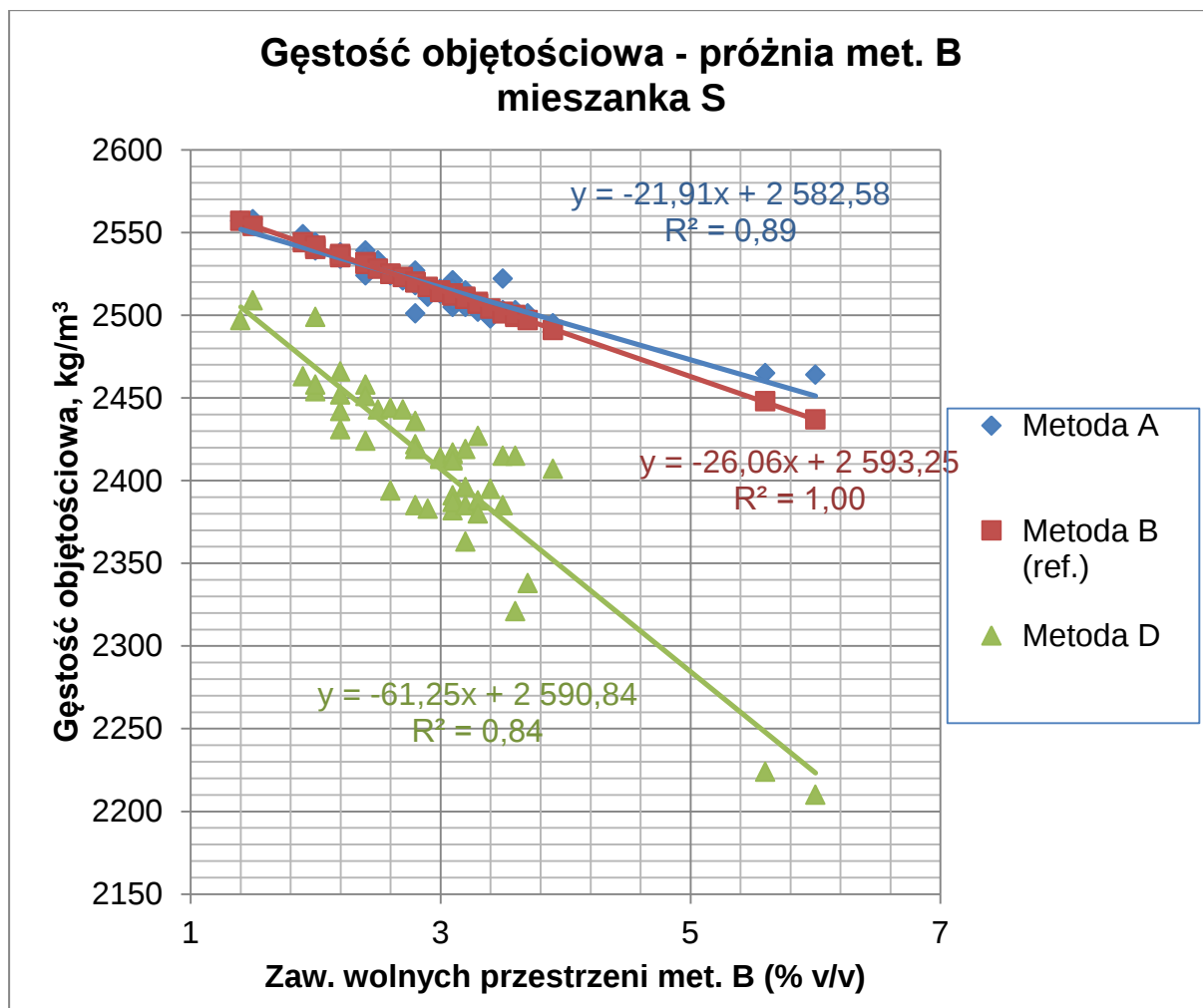
Rysunek 12. Zależność gęstości objętościowej od próżni metodą B, mieszanka Y

Tablica 49. Porównanie różnic wyników metod w zależności od poziomu zawartości wolnych przestrzeni, mieszanka S, wszystkie rodzaje próbek

Zawartość wolnych przestrzeni, %	Metoda A kg/m ³	Metoda B (ref) kg/m ³	Metoda D kg/m ³
1,4	2557	2557	2497
1,5	2558	2554	2509
1,9	2549	2544	2463
2	2539	2540	2454
2	2542	2541	2458

2	2544	2542	2499
2,2	2534	2537	2431
2,2	2536	2535	2442
2,2	2538	2536	2466
2,2	2535	2536	2452
2,4	2539	2532	2458
2,4	2535	2532	2451
2,4	2524	2531	2424
2,5	2533	2528	2443
2,6	2524	2525	2394
2,6	2525	2525	2444
2,7	2521	2523	2443
2,8	2501	2520	2422
2,8	2522	2520	2419
2,8	2527	2520	2385
2,8	2518	2520	2436
2,9	2511	2517	2383
3	2516	2515	2414
3	2513	2514	2413
3,1	2505	2512	2416
3,1	2508	2512	2413
3,1	2521	2513	2382
3,1	2512	2513	2417
3,1	2521	2513	2391
3,1	2516	2513	2387
3,1	2509	2512	2412
3,2	2505	2510	2396
3,2	2512	2510	2385
3,2	2514	2511	2363
3,2	2515	2510	2419
3,3	2507	2507	2388
3,3	2502	2508	2380

3,3	2506	2507	2427
3,4	2498	2504	2395
3,5	2522	2502	2385
3,5	2503	2501	2415
3,6	2502	2499	2415
3,6	2503	2500	2321
3,7	2501	2497	2338
3,9	2495	2491	2407
5,6	2465	2448	2224
6	2464	2437	2210

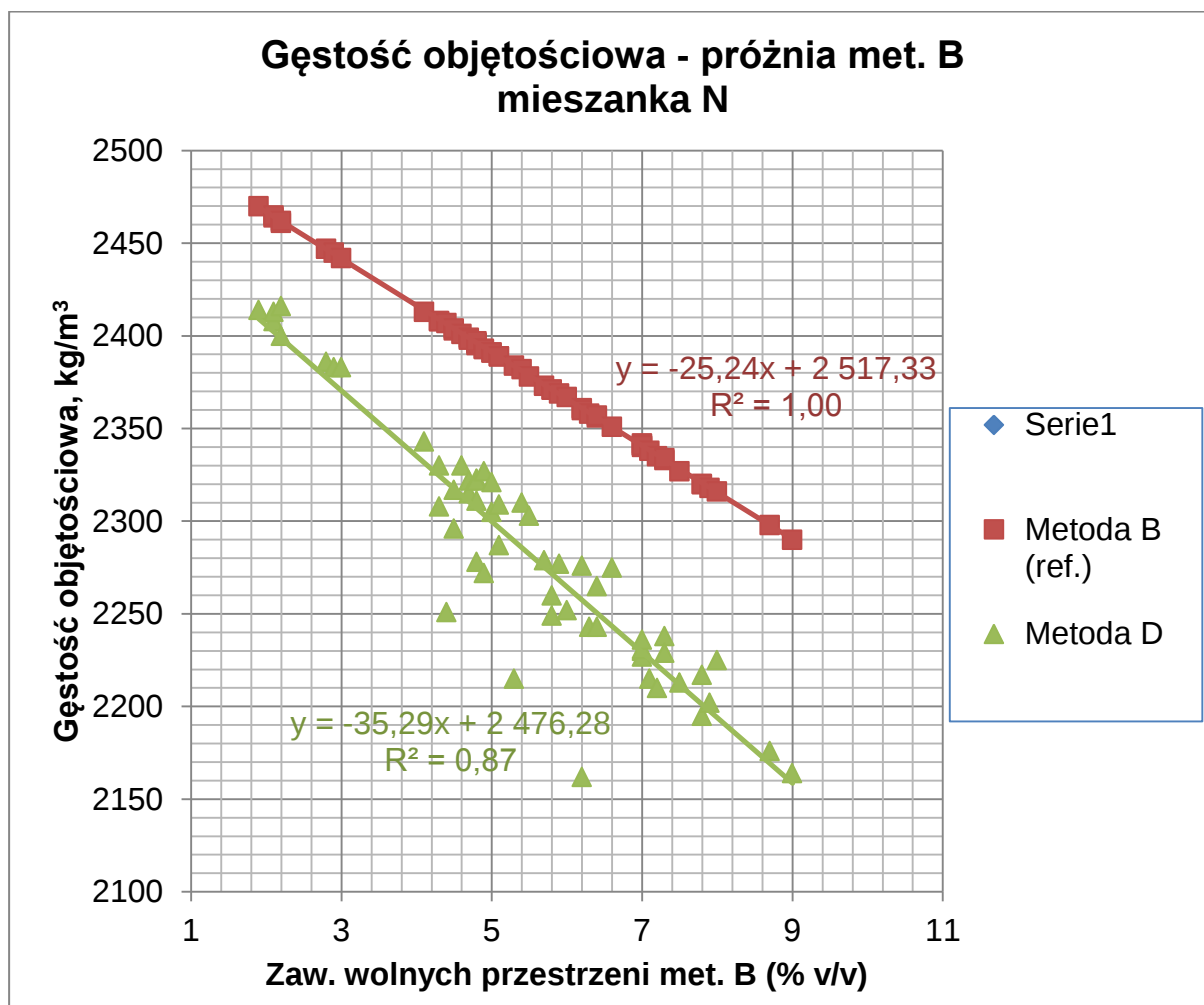


Rysunek 13. Zależność gęstości objętościowej od próżni metodą B, mieszanka S

Tablica 50. Porównanie różnic wyników metod w zależności od poziomu zawartości wolnych przestrzeni, mieszanka N, wszystkie rodzaje próbek

Zawartość wolnych przestrzeni, %	Metoda B (ref) kg/m ³	Metoda D kg/m ³
1,9	2470	2414
2,1	2464	2408
2,1	2465	2413
2,2	2461	2416
2,2	2462	2400
2,8	2447	2386
2,9	2445	2383
3	2442	2383
4,1	2413	2343
4,3	2408	2330
4,3	2408	2308
4,4	2407	2251
4,5	2403	2296
4,5	2404	2317
4,6	2401	2330
4,7	2399	2322
4,7	2398	2315
4,8	2396	2278
4,8	2395	2311
4,8	2396	2323
4,8	2397	2322
4,9	2393	2272
4,9	2393	2327
5	2391	2321
5	2391	2305
5,1	2389	2309

5,1	2389	2287
5,3	2384	2215
5,4	2382	2310
5,5	2378	2303
5,7	2373	2279
5,8	2371	2260
5,8	2371	2249
5,9	2369	2277
6	2367	2252
6,2	2361	2276
6,2	2360	2162
6,3	2358	2243
6,4	2356	2265
6,4	2357	2243
6,6	2351	2275
7	2340	2230
7	2341	2227
7	2342	2231
7	2341	2236
7,1	2338	2215
7,2	2335	2210
7,3	2333	2238
7,3	2334	2229
7,5	2327	2213
7,8	2320	2195
7,8	2320	2217
7,9	2318	2202
8	2316	2225
8,7	2298	2176
9	2290	2164



Rysunek 14. Zależność gęstości objętościowej od próżni metodą B, mieszanka N

Z przeprowadzonej analizy wynika, że najwyższe gęstości uzyskano w badaniu metodą A, następnie metodą B a najniższe gęstości uzyskano w badaniu metodą D. Bez względu na rodzaj mieszanki czy maksymalny wymiar ziarna różnice w wynikach gęstości objętościowej rosły wraz ze wzrostem zawartości wolnych przestrzeni.

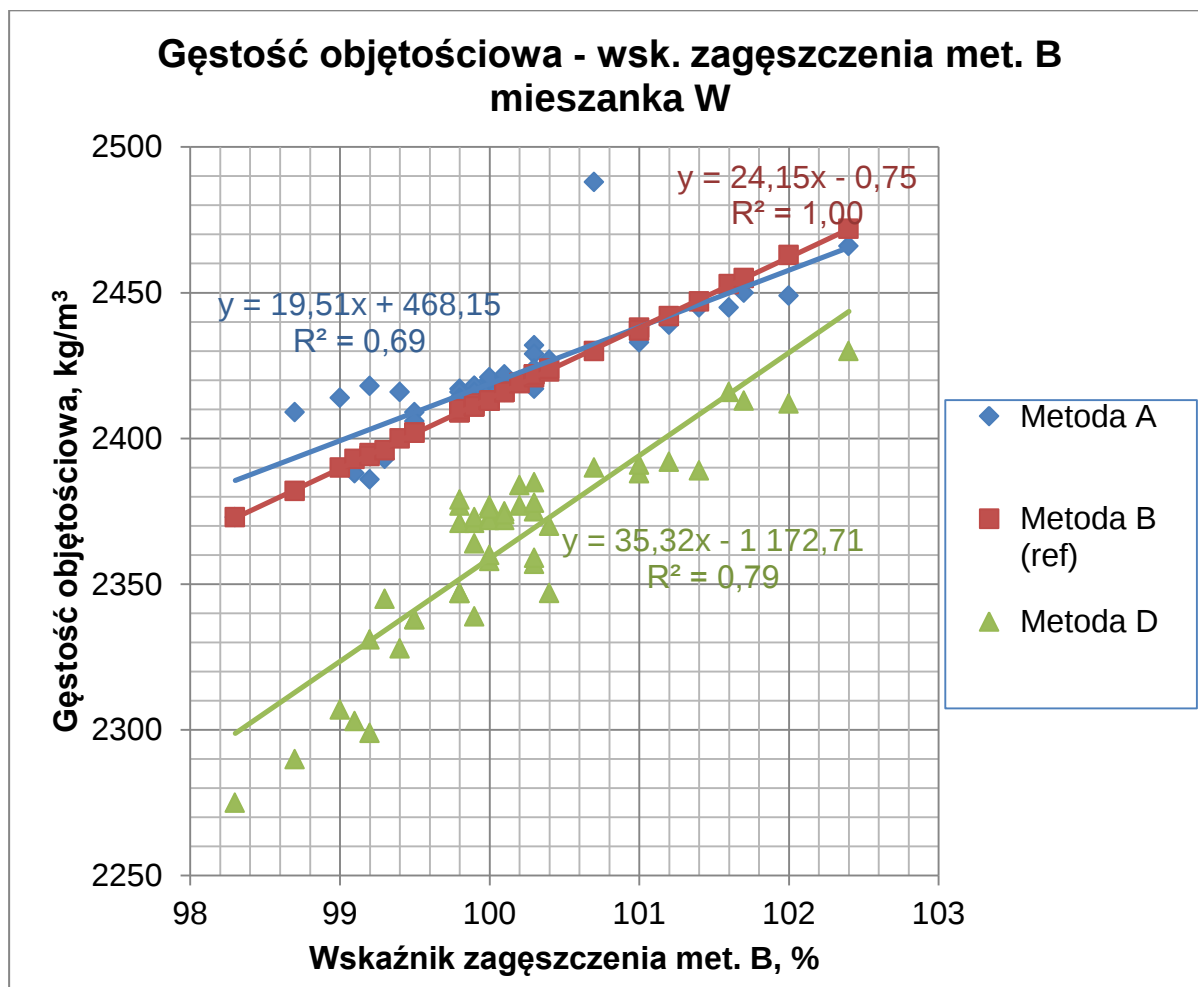
10.4) Wpływ stopnia zagęszczenia

W tym zestawieniu zawarto wyniki wszystkich badań, nie tylko próbek o zagęszczeniu bliskim 100%.

Tablica 51. Porównanie różnic wyników metod w zależności od stopnia zagęszczenia, mieszanka W, wszystkie rodzaje próbek

Wskaźnik zagęszczenia, %	Metoda A kg/m ³	Metoda B (ref)	Metoda D kg/m ³
98,3	2373	2373	2275
98,7	2409	2382	2290
99	2414	2390	2307
99,1	2388	2393	2303
99,2	2386	2395	2331
99,2	2418	2394	2299
99,3	2393	2396	2345
99,4	2416	2400	2328
99,5	2409	2402	2338
99,5	2406	2402	2338
99,8	2417	2410	2347
99,8	2416	2409	2371
99,8	2414	2409	2377
99,8	2413	2409	2347
99,8	2409	2410	2379
99,9	2418	2411	2371
99,9	2418	2412	2364
99,9	2416	2411	2373
99,9	2413	2411	2339
100	2418	2413	2358
100	2415	2413	2360
100	2418	2413	2373
100	2416	2413	2372
100	2420	2413	2377
100	2421	2413	2376
100,1	2416	2416	2375
100,1	2421	2416	2372

100,1	2422	2416	2374
100,2	2420	2419	2384
100,2	2419	2419	2377
100,3	2432	2421	2385
100,3	2429	2422	2357
100,3	2419	2422	2375
100,3	2417	2422	2359
100,3	2424	2422	2378
100,4	2425	2423	2347
100,4	2427	2424	2370
100,7	2488	2430	2390
101	2434	2438	2388
101	2433	2437	2391
101,2	2439	2442	2392
101,4	2445	2447	2389
101,6	2445	2453	2416
101,7	2450	2455	2413
102	2449	2463	2412
102,4	2466	2472	2430



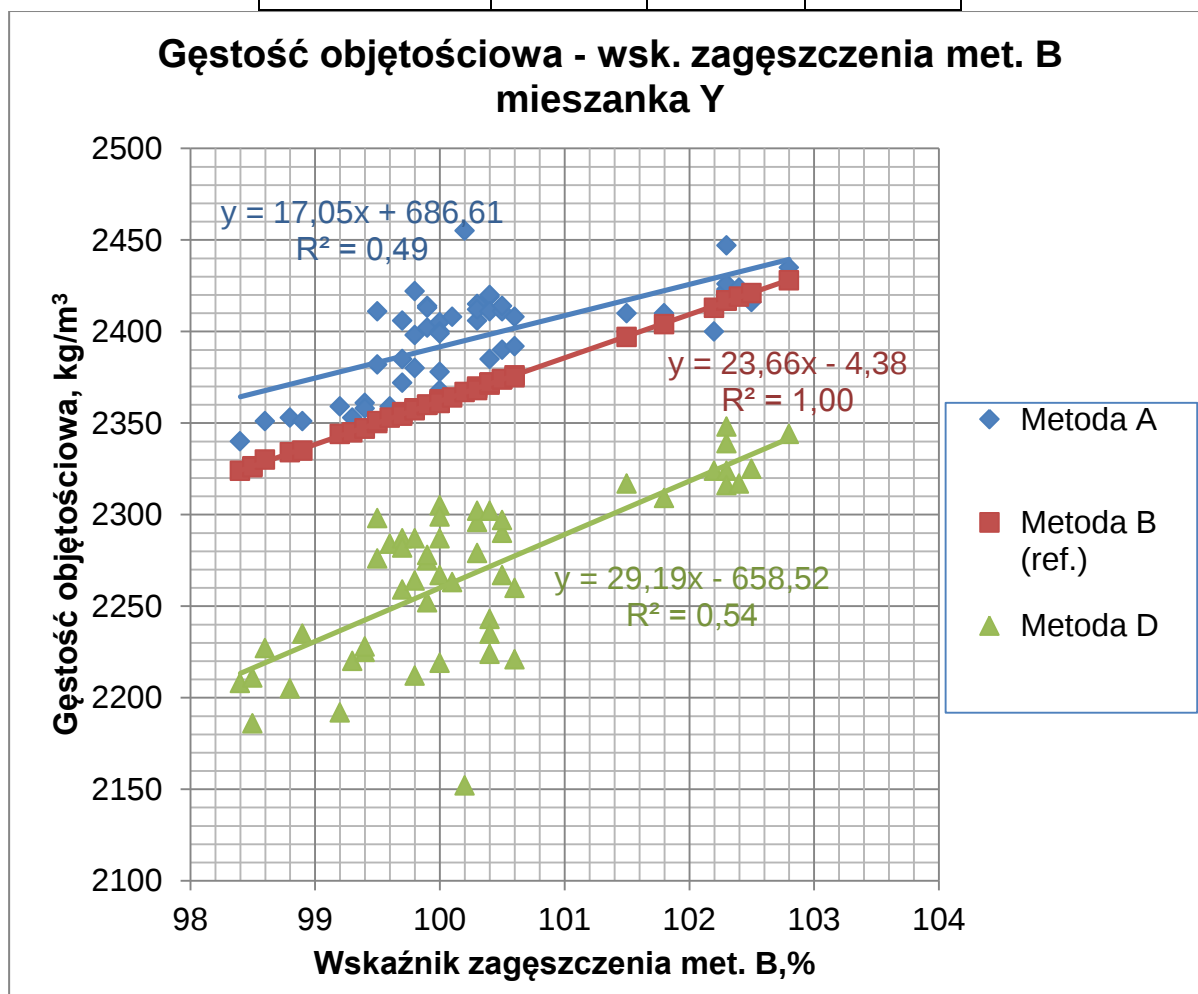
Rysunek 15. Zależność gęstości objętościowej od wskaźnika zagęszczenia metodą B, mieszanka W

Tablica 52. Porównanie różnic wyników metod w zależności od stopnia zagęszczenia, mieszanka Y, wszystkie rodzaje próbek

Wskaźnik zagęszczenia, %	Metoda A kg/m ³	Metoda B (ref) kg/m ³	Metoda D kg/m ³
98,4	2340	2324	2208
98,5	2351	2326	2186
98,5	2353	2326	2211
98,6	2351	2330	2227
98,8	2353	2334	2205
98,9	2351	2335	2235

99,2	2359	2344	2192
99,3	2353	2345	2220
99,4	2361	2347	2225
99,4	2358	2347	2228
99,5	2411	2350	2276
99,5	2382	2351	2298
99,6	2359	2353	2284
99,7	2406	2356	2287
99,7	2385	2355	2282
99,7	2372	2354	2259
99,8	2422	2358	2212
99,8	2380	2358	2264
99,8	2398	2357	2287
99,9	2414	2360	2252
99,9	2413	2360	2275
99,9	2402	2360	2278
100	2368	2363	2287
100	2378	2362	2305
100	2405	2361	2267
100	2400	2362	2299
100	2399	2361	2219
100,1	2408	2364	2263
100,2	2455	2367	2152
100,3	2406	2370	2296
100,3	2415	2369	2279
100,3	2412	2368	2302
100,4	2385	2372	2243
100,4	2419	2372	2235
100,4	2420	2371	2302
100,4	2411	2372	2224
100,5	2390	2374	2290
100,5	2411	2374	2297

100,5	2414	2374	2267
100,6	2408	2376	2260
100,6	2392	2375	2221
101,5	2410	2397	2317
101,8	2410	2404	2309
102,2	2400	2413	2324
102,3	2423	2417	2339
102,3	2417	2417	2324
102,3	2426	2417	2316
102,3	2447	2417	2348
102,4	2424	2419	2317
102,5	2416	2421	2325
102,8	2435	2428	2344

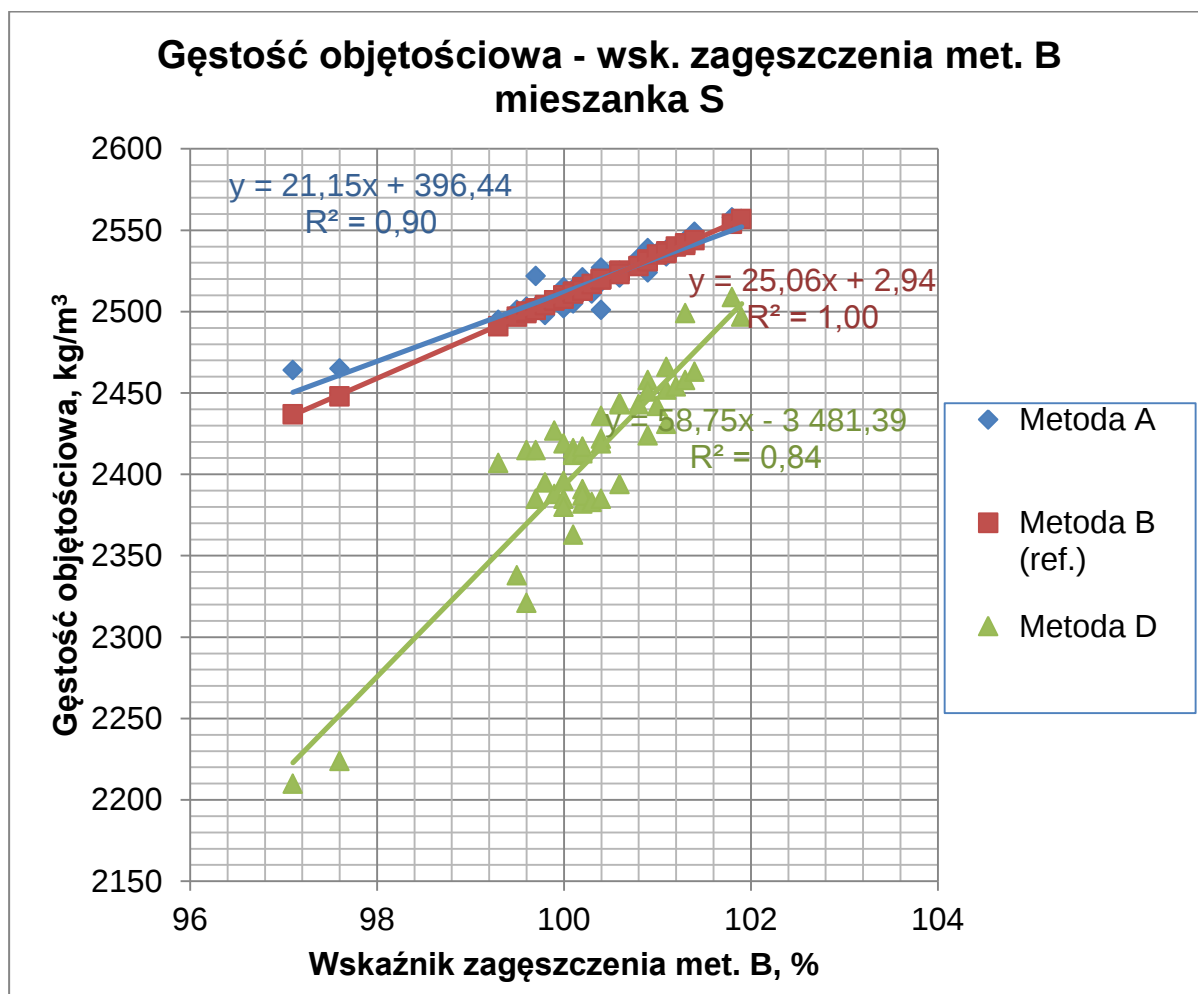


Rysunek 16. Zależność gęstości objętościowej od wskaźnika zagęszczenia metodą B, mieszanka Y

Tablica 53. Porównanie różnic wyników metod w zależności od stopnia zagęszczenia, mieszanka S, wszystkie rodzaje próbek

Wskaźnik zagęszczenia, %	Metoda A kg/m ³	Metoda B (ref) kg/m ³	Metoda D kg/m ³
97,1	2464	2437	2210
97,6	2465	2448	2224
99,3	2495	2491	2407
99,5	2501	2497	2338
99,6	2502	2499	2415
99,6	2503	2500	2321
99,7	2522	2502	2385
99,7	2503	2501	2415
99,8	2498	2504	2395
99,9	2507	2507	2388
99,9	2506	2507	2427
100	2505	2510	2396
100	2512	2510	2385
100	2515	2510	2419
100	2502	2508	2380
100,1	2505	2512	2416
100,1	2508	2512	2413
100,1	2509	2512	2412
100,1	2514	2511	2363
100,2	2516	2515	2414
100,2	2513	2514	2413
100,2	2521	2513	2382
100,2	2512	2513	2417
100,2	2521	2513	2391
100,2	2516	2513	2387
100,3	2511	2517	2383
100,4	2501	2520	2422

100,4	2522	2520	2419
100,4	2527	2520	2385
100,4	2518	2520	2436
100,6	2524	2525	2394
100,6	2525	2525	2444
100,6	2521	2523	2443
100,8	2533	2528	2443
100,9	2539	2532	2458
100,9	2535	2532	2451
100,9	2524	2531	2424
101	2536	2535	2442
101,1	2534	2537	2431
101,1	2538	2536	2466
101,1	2535	2536	2452
101,2	2539	2540	2454
101,3	2542	2541	2458
101,3	2544	2542	2499
101,4	2549	2544	2463
101,8	2558	2554	2509
101,9	2557	2557	2497



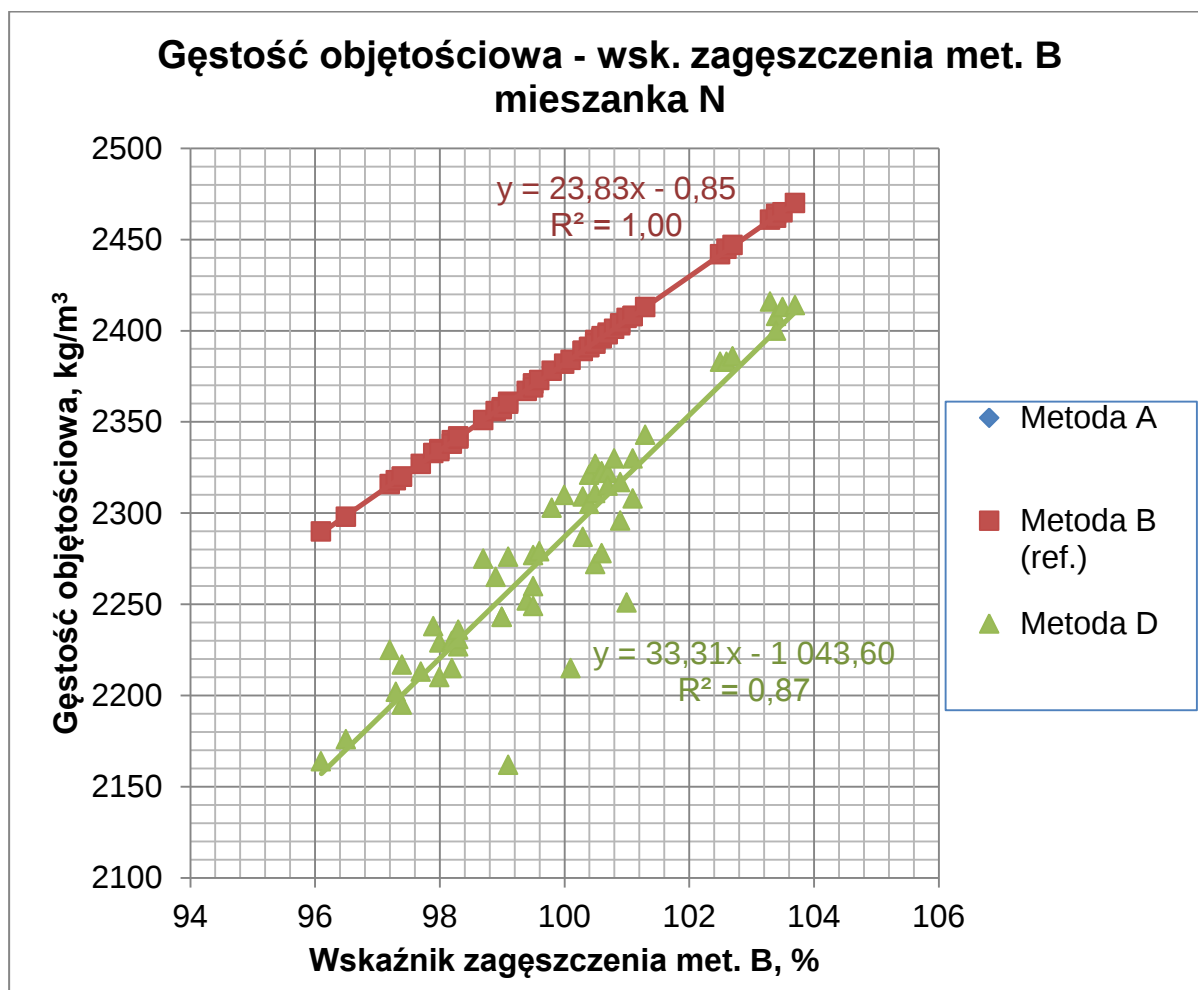
Rysunek 17. Zależność gęstości objętościowej od wskaźnika zagęszczenia metodą B, mieszanka S

Tablica 54. Porównanie różnic wyników metod w zależności od stopnia zagęszczenia, mieszanka N, wszystkie rodzaje próbek

Wskaźnik zagęszczenia, %	Metoda B (ref) kg/m³	Metoda D kg/m³
96,1	2290	2164
96,5	2298	2176
97,2	2316	2225
97,3	2318	2202
97,4	2320	2195
97,4	2320	2217
97,7	2327	2213

97,9	2333	2238
98	2335	2210
98	2334	2229
98,2	2340	2230
98,2	2338	2215
98,3	2341	2227
98,3	2342	2231
98,3	2341	2236
98,7	2351	2275
98,9	2356	2265
99	2358	2243
99	2357	2243
99,1	2361	2276
99,1	2360	2162
99,4	2367	2252
99,5	2371	2260
99,5	2371	2249
99,5	2369	2277
99,6	2373	2279
99,8	2378	2303
100	2382	2310
100,1	2384	2215
100,3	2389	2309
100,3	2389	2287
100,4	2391	2321
100,4	2391	2305
100,5	2395	2311
100,5	2393	2272
100,5	2393	2327
100,6	2396	2278
100,6	2396	2323
100,6	2397	2322

100,7	2399	2322
100,7	2398	2315
100,8	2401	2330
100,9	2403	2296
100,9	2404	2317
101	2407	2251
101,1	2408	2330
101,1	2408	2308
101,3	2413	2343
102,5	2442	2383
102,6	2445	2383
102,7	2447	2386
103,3	2461	2416
103,4	2464	2408
103,4	2462	2400
103,5	2465	2413
103,7	2470	2414

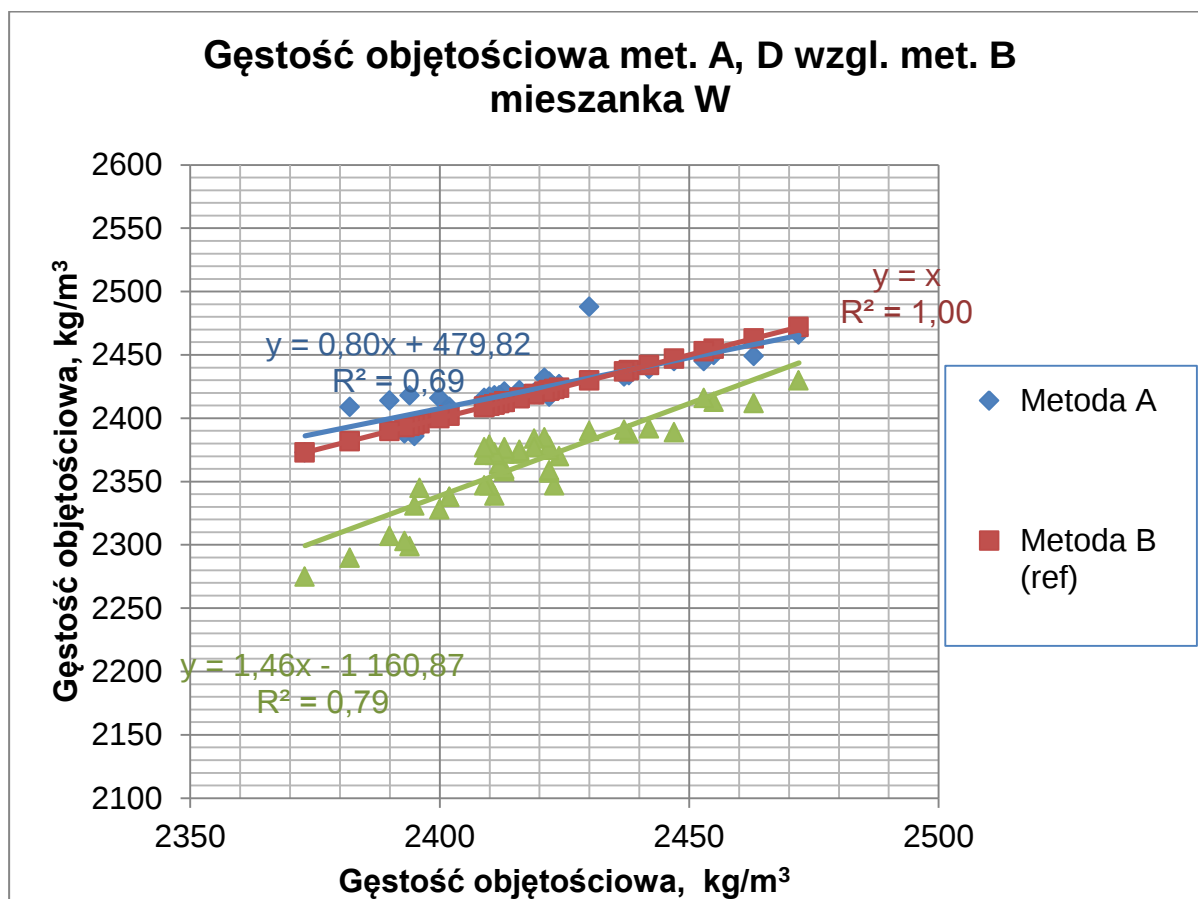


Rysunek 18. Zależność gęstości objętościowej od wskaźnika zagęszczenia metodą B, mieszanka N

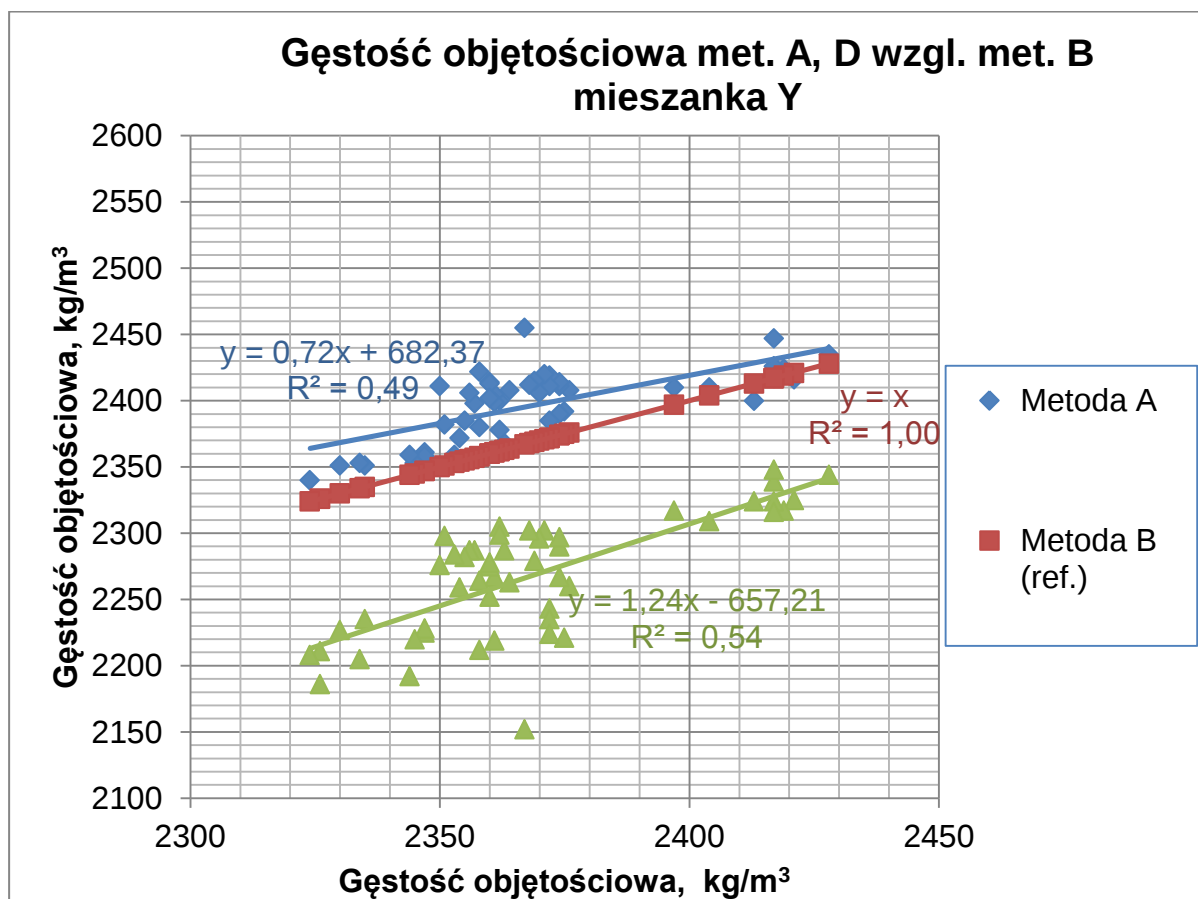
Z przeprowadzonej analizy wynika, że najwyższe gęstości uzyskano w badaniu metodą A, następnie metodą B a najniższe gęstości uzyskano w badaniu metodą D. Bez względu na rodzaj mieszanki czy maksymalny wymiar ziarna różnice w wynikach gęstości objętościowej rosły wraz ze spadkiem wskaźnika zagęszczenia.

10.5) Porównanie gęstości objętościowych różnymi metodami względem gęstości objętościowej metodą B

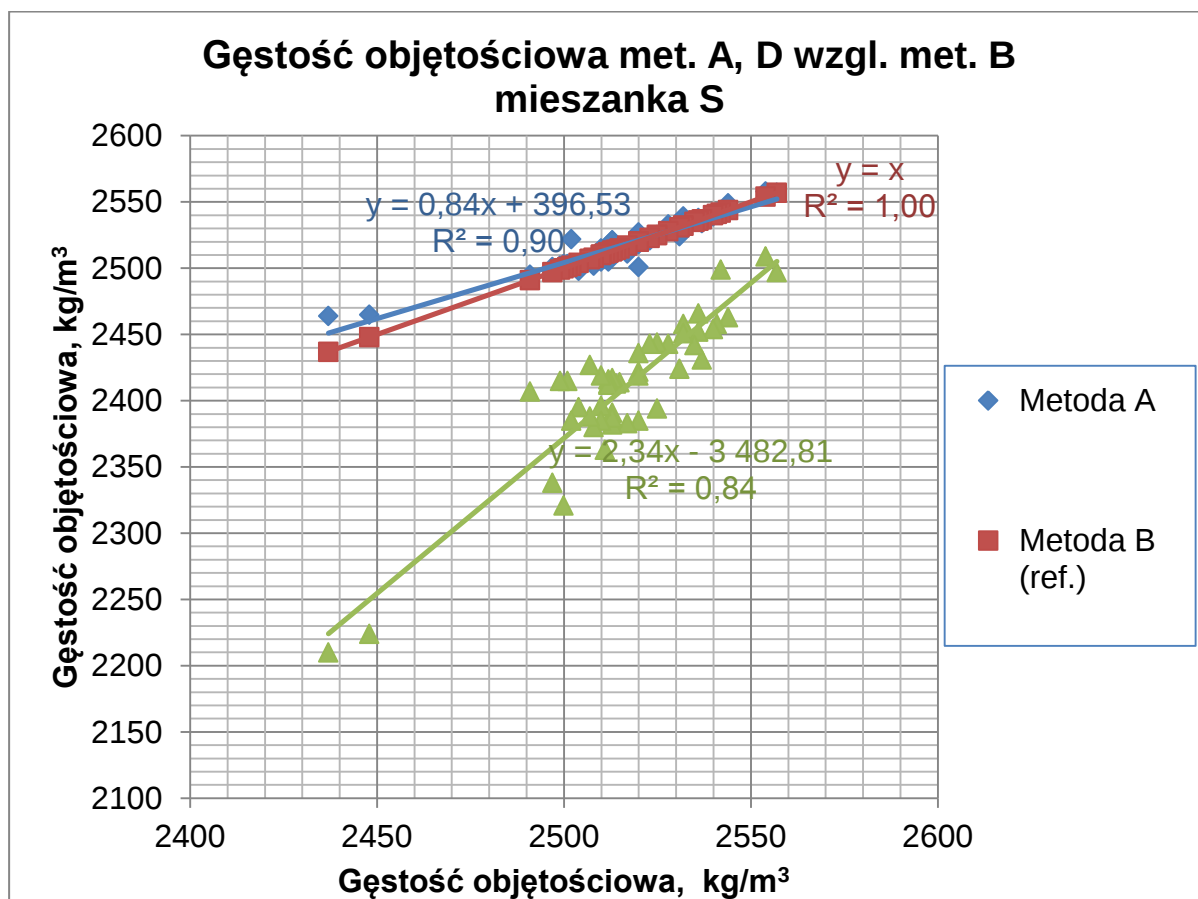
W tym etapie analizy naniesiono na wykresy wyniki badań gęstości objętościowej metodami A, B i D. Każdą z metod odniesiono do metody referencyjnej czyli metody B. Uzyskano w ten sposób wstępną zależność pomiędzy metodą A i D a metodą B. Odnosząc wyniki metodą B do siebie samej uzyskano na wykresie linię równości (opisaną funkcją $y=x$).



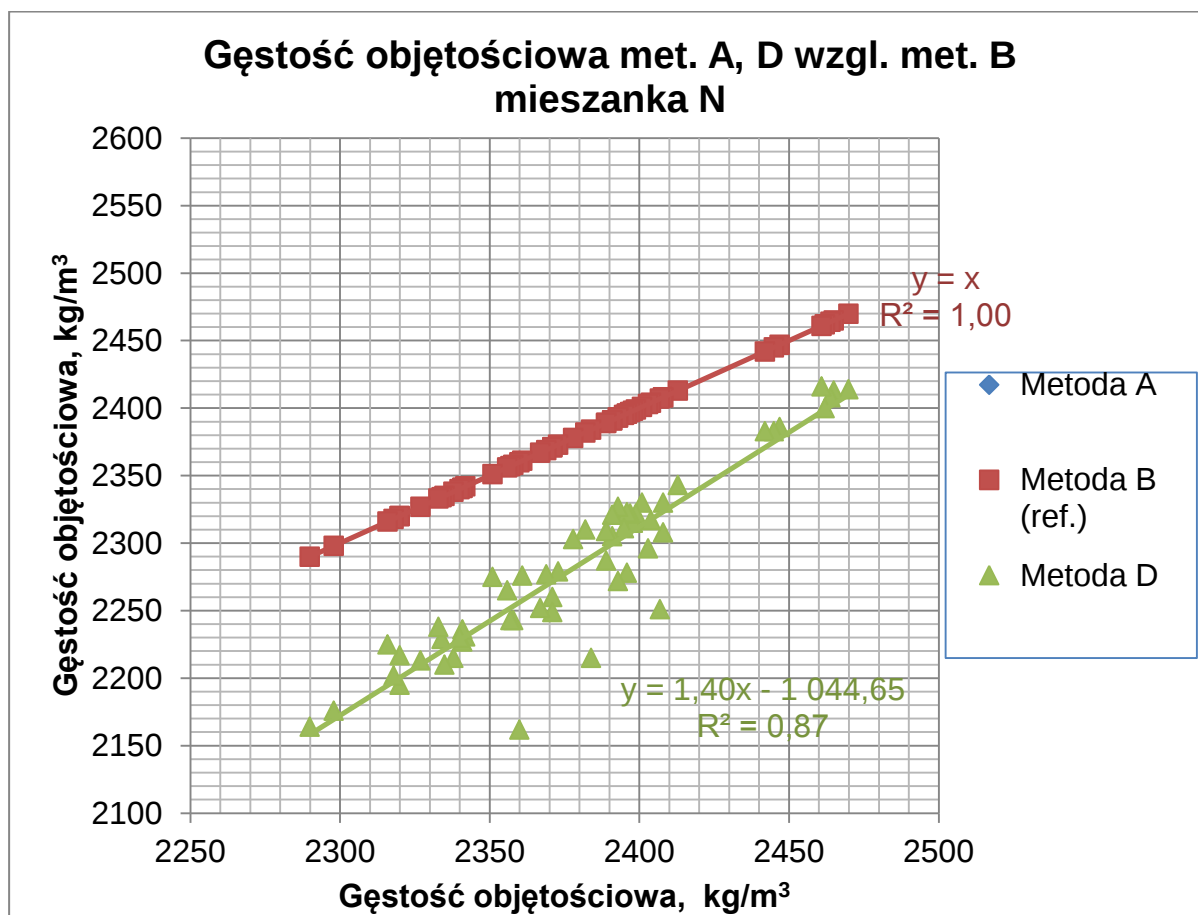
Rysunek 19. Porównanie gęstości objętościowej metodami A i D względem metody B, mieszanka W



Rysunek 20. Porównanie gęstości objętościowej metodami A i D względem metody B, mieszanka Y



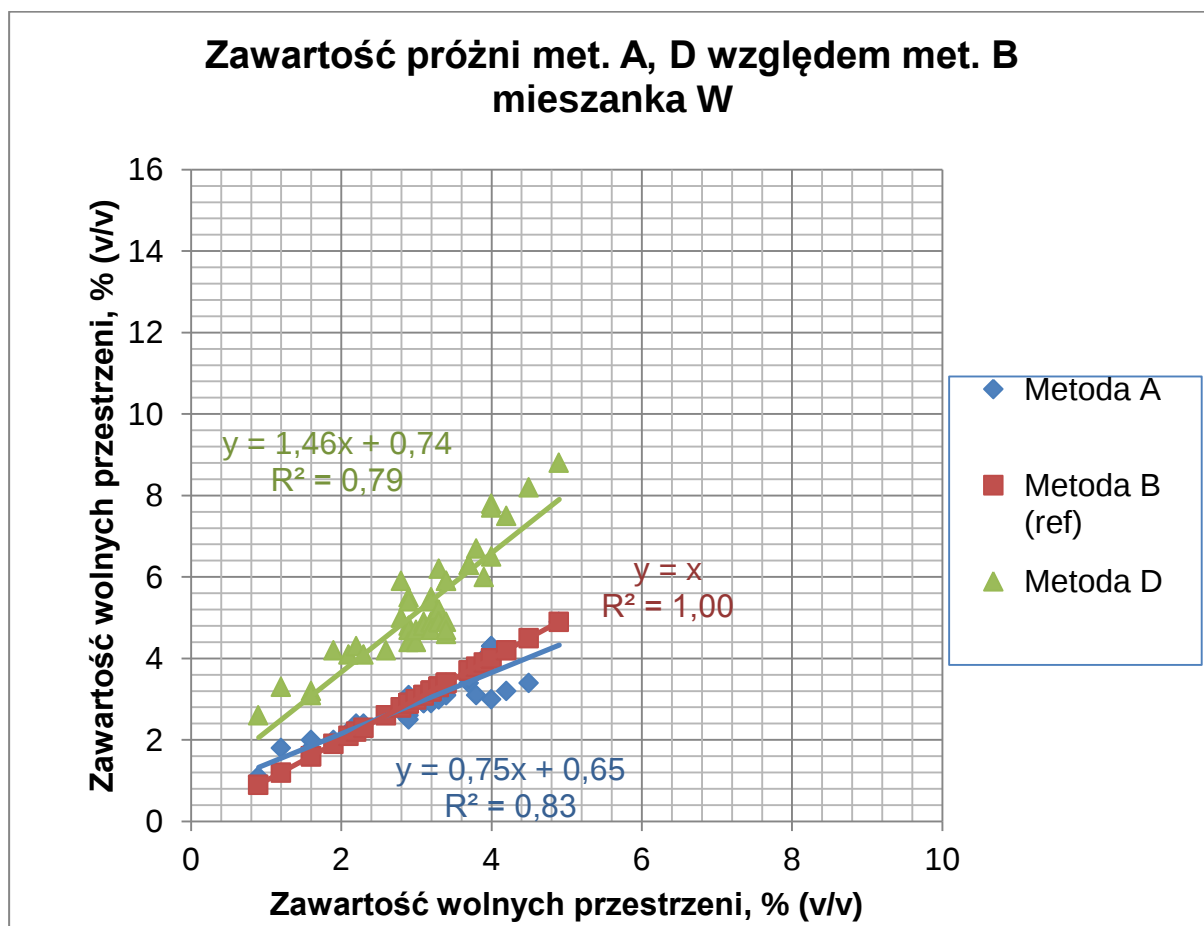
Rysunek 21. Porównanie gęstości objętościowej metodami A i D względem metody B, mieszanka S



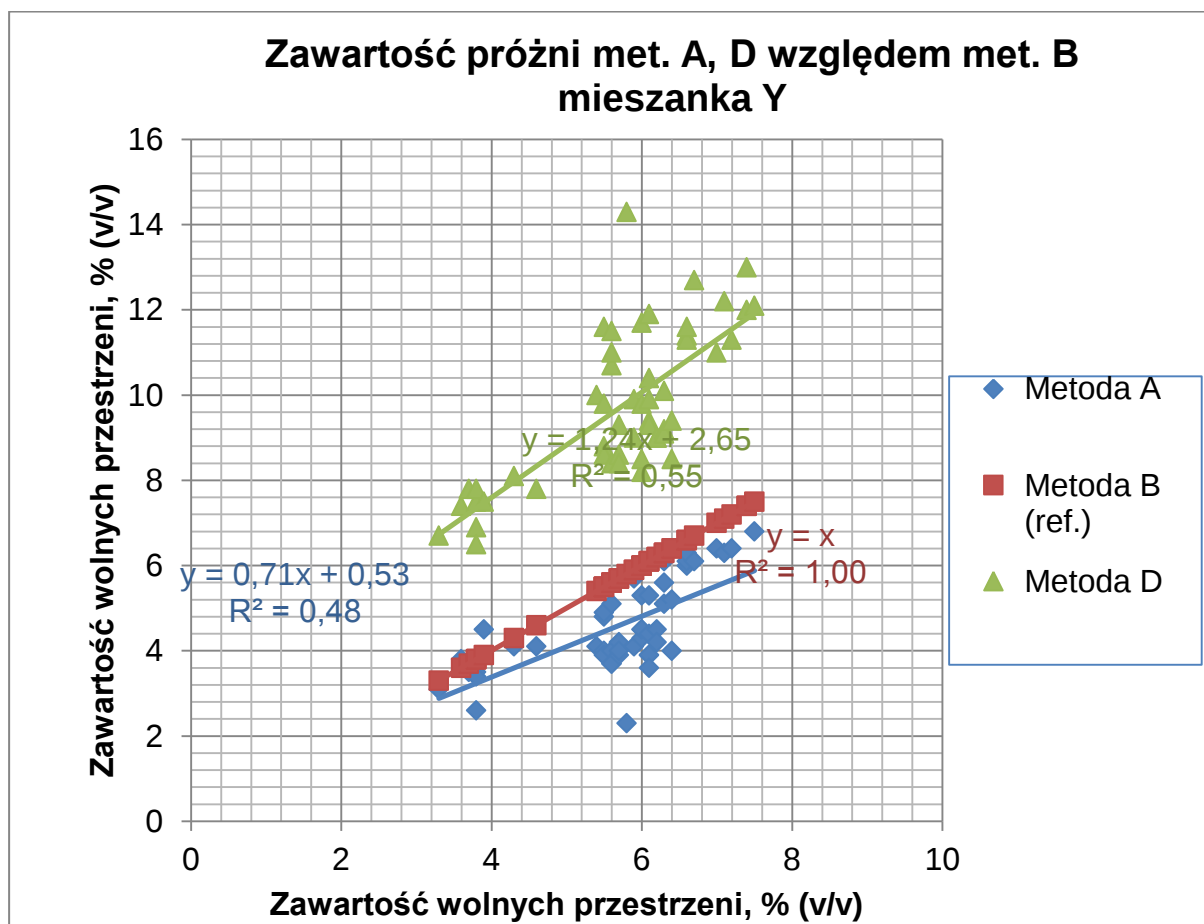
Rysunek 22. Porównanie gęstości objętościowej metodami A i D względem metody B, mieszanka N

10.6) Porównanie zawartości próżni uzyskanej różnymi metodami

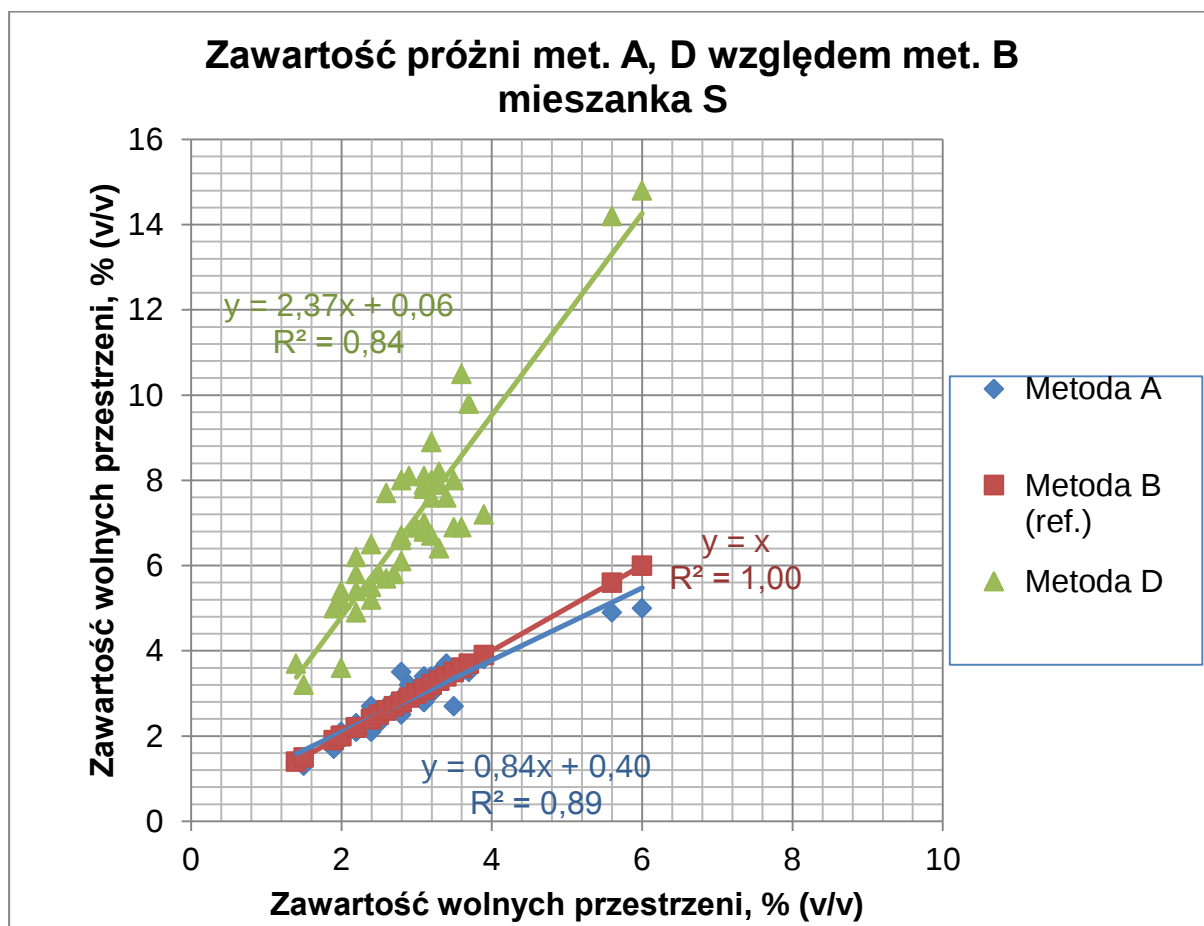
W tym etapie analizy naniesiono na wykresy wyniki badań zawartości wolnych przestrzeni w próbkach badanych metodami A, B i D. Każdą z metod odniesiono do metody referencyjnej czyli metody B. Uzyskano w ten sposób wstępną zależność pomiędzy metodą A i D a metodą B. Odnosząc wyniki metodą B do siebie samej uzyskano na wykresie linię równości (opisaną funkcją $y=x$).



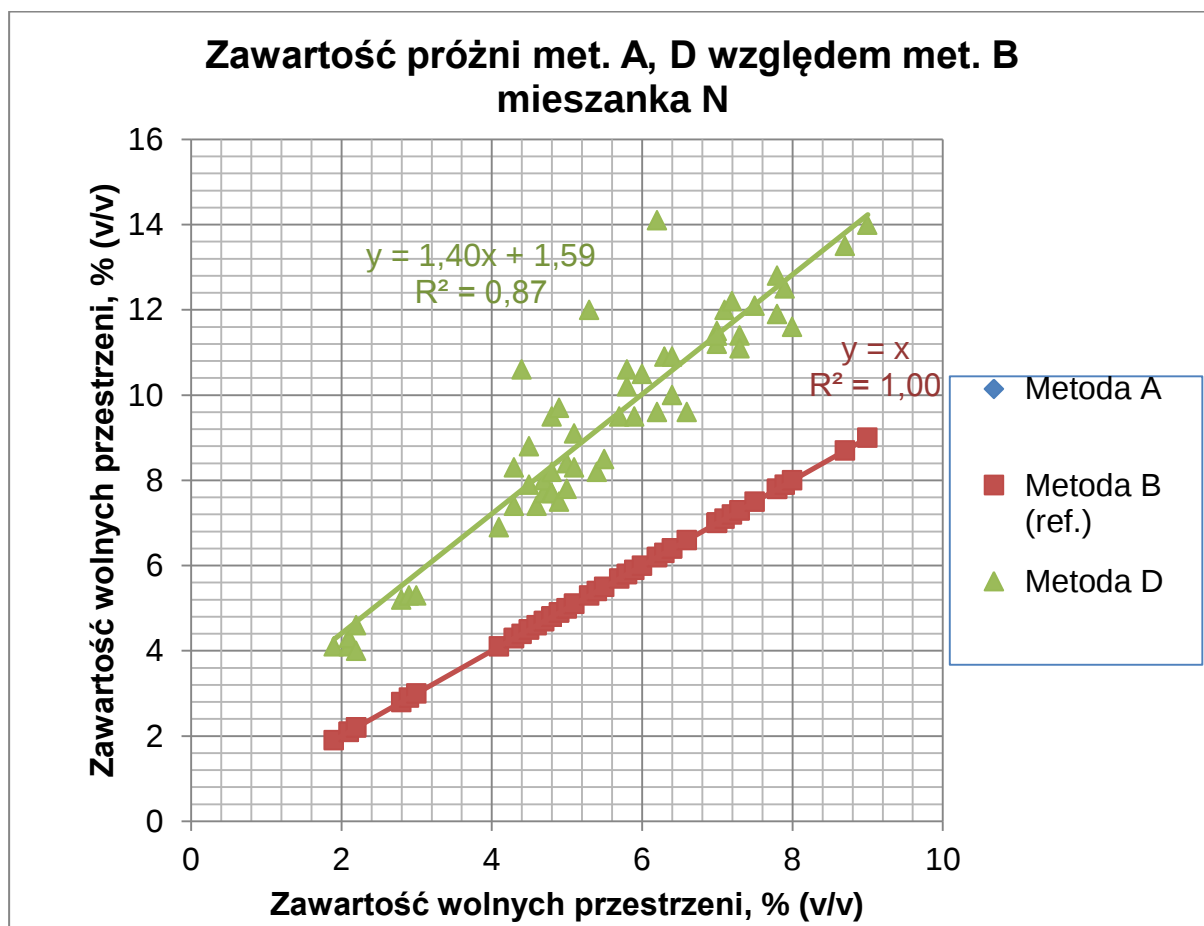
Rysunek 23. Porównanie zawartości próżni metodami A i D względem metody B, mieszanka W



Rysunek 24. Porównanie zawartości próżni metodami A i D względem metody B, mieszanka Y



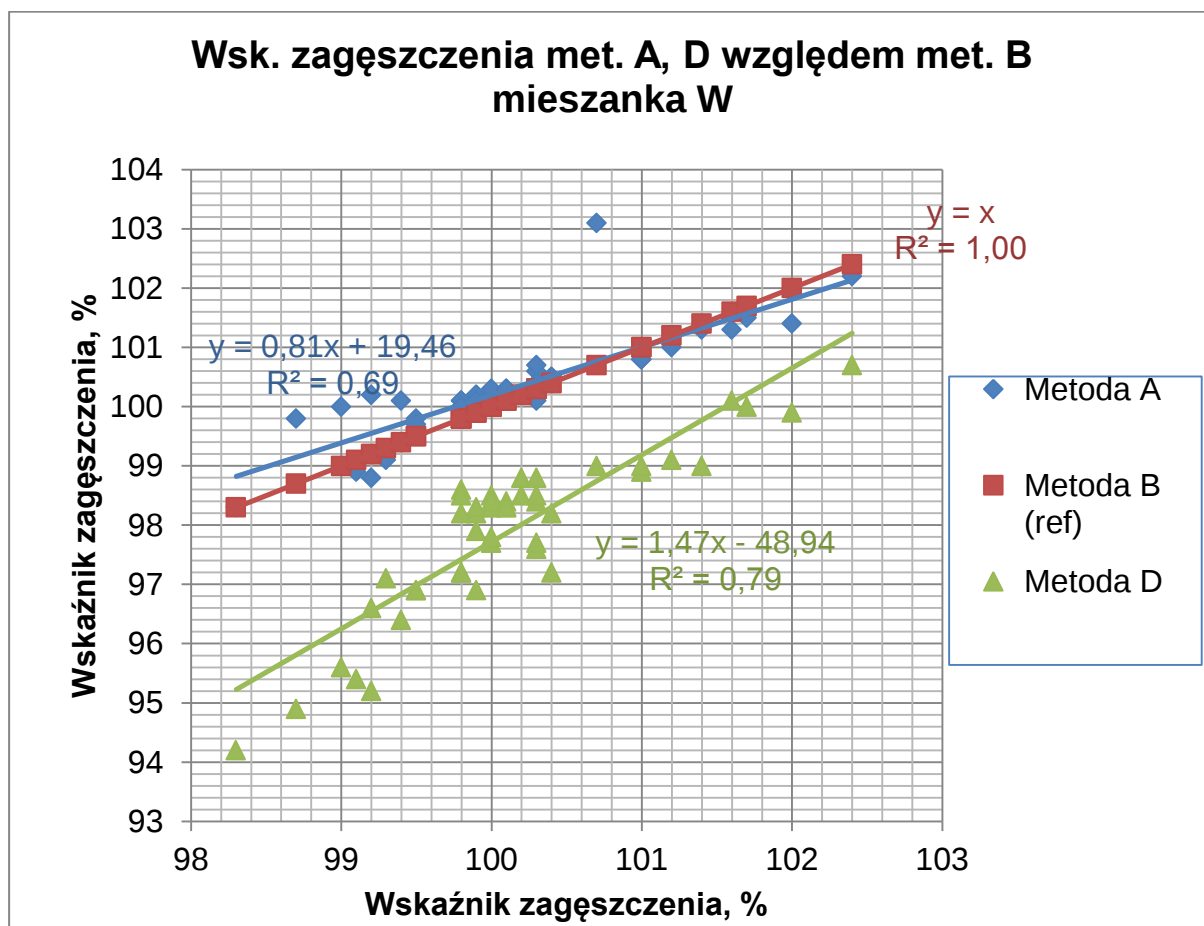
Rysunek 25. Porównanie zawartości próżni metodami A i D względem metody B, mieszanka S



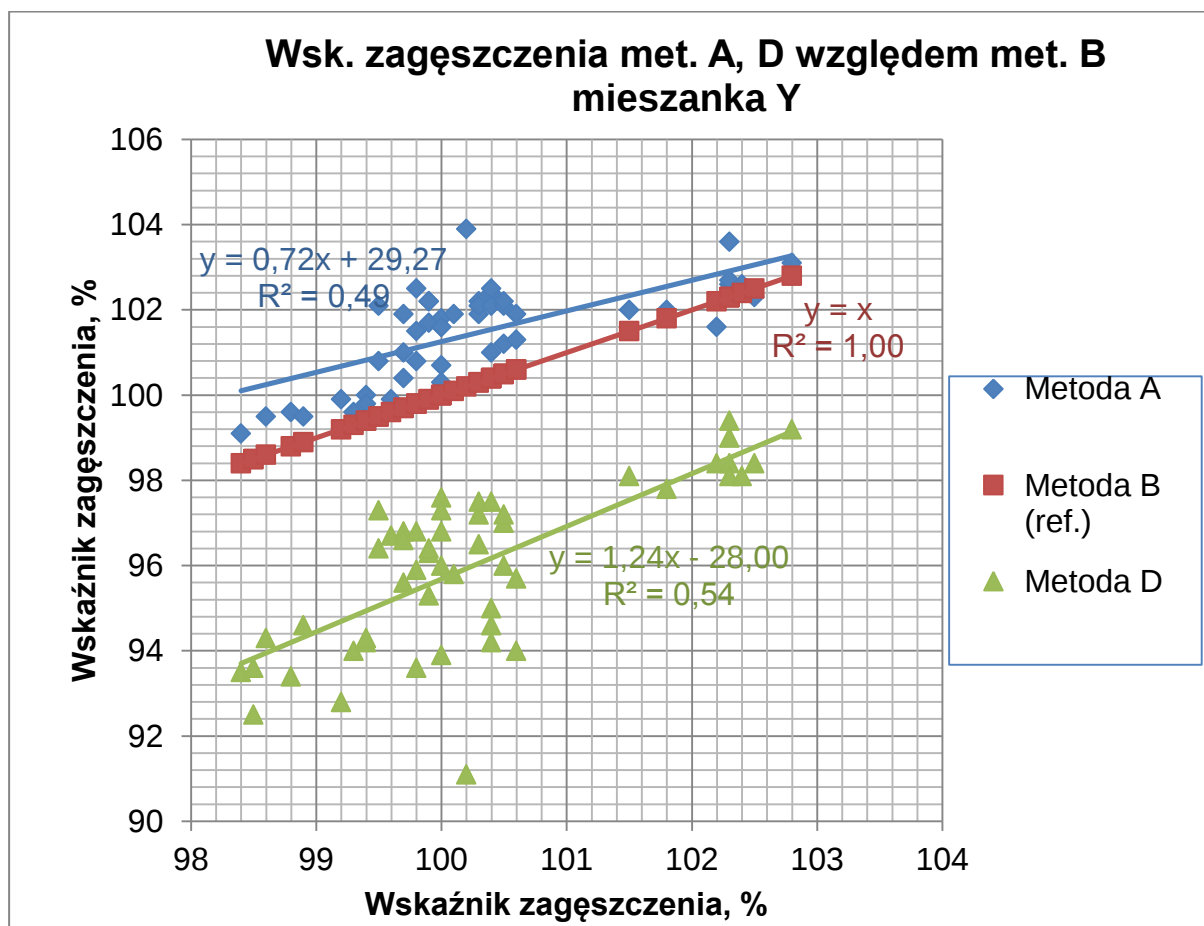
Rysunek 26. Porównanie zawartości próżni metodami A i D względem metody B, mieszanka N

10.7) Porównanie wskaźników zagęszczenia z różnych metod

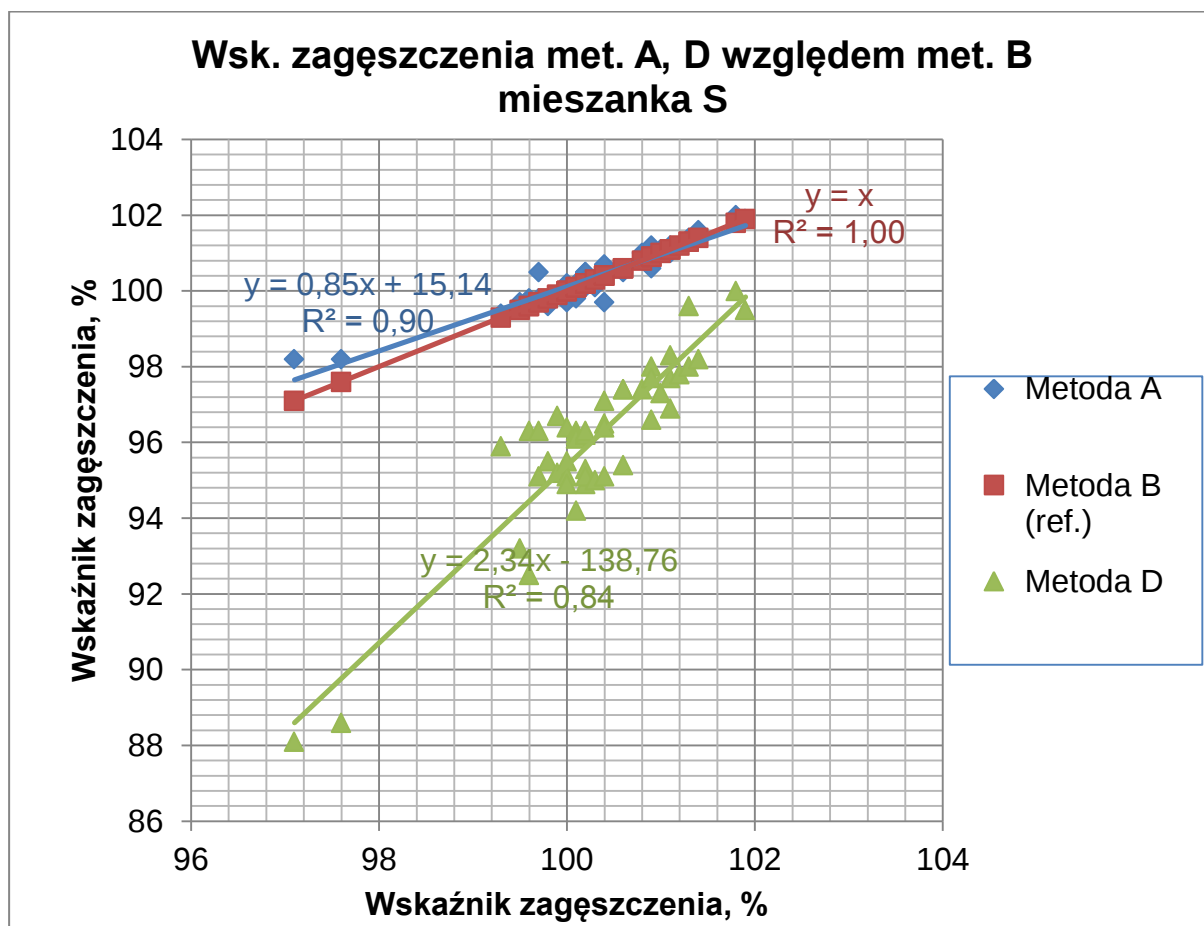
Na tym etapie analizy naniesiono na wykresy wyniki oznaczenia wskaźnika zagęszczenia próbek badanych metodami A, B i D. Każdą z metod odniesiono do metody referencyjnej czyli metody B. Uzyskano w ten sposób wstępną zależność pomiędzy metodą A i D a metodą B. Odnosząc wyniki metodą B do siebie samej uzyskano na wykresie linię równości (opisaną funkcją $y=x$).



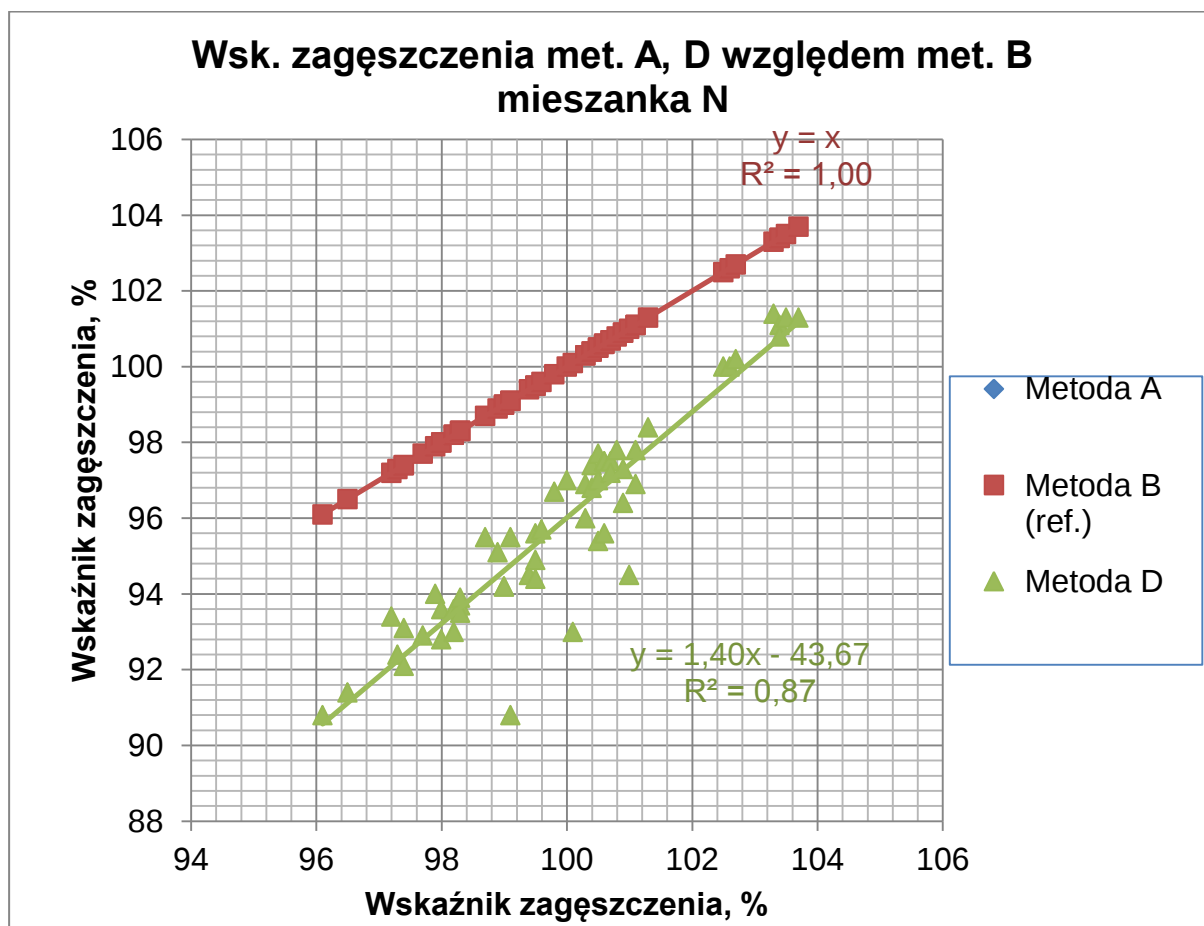
Rysunek 27. Porównanie wskaźnika zagęszczenia metodami A i D względem metody B, mieszanka W



Rysunek 28. Porównanie wskaźnika zagęszczenia metodami A i D względem metody B, mieszanka Y



Rysunek 29. Porównanie wskaźnika zagęszczenia metodami A i D względem metody B, mieszanka S



Rysunek 30. Porównanie wskaźnika zagęszczenia metodami A i D względem metody B, mieszanka N

10.8) Wpływ stanu próbki z drogi

Na tym etapie analizy zestawiono wyniki badań próbek pobranych z wykonanej nawierzchni.

Tablica 55. Gęstość objętościowa różnymi metodami, odwierty z drogi, górna podstawa nieodcięta, dolna cięta, powierzchnia boczna odwiercana

Symbol próbki	Metoda B (ref) kg/m ³	Metoda D kg/m ³
TN246S.D51	2356	2117
TN246S.D2	2374	2218
TN246S.D4	2385	2241
TN246S.D52	2388	2349

TN246S.D47	2393	2244
TN246S.D37	2397	2297
TN246S.D36	2401	2291
TN246S.D45	2408	2283
TN246S.D48	2410	2280
TN246S.D15	2412	2290
TN246S.D35	2412	2309
TN246S.D54	2414	2246
TN246S.D49	2422	2291
TN246S.D17	2431	2326
TN246S.D11	2433	2255
TN246S.D26	2433	2292
TN246S.D13	2434	2314
TN246S.D12	2435	2315
TN246S.D8	2436	2344
TN246S.D22	2436	2330
TN246S.D6	2441	2318
TN246S.D16	2444	2363
TN246S.D9	2445	2362
TN246S.D3	2447	2367
TN246S.D46	2448	2335
TN246S.D10	2449	2375
TN246S.D14	2454	2369
TN246S.D5	2457	2349
TN246S.D20	2457	2332
TN246S.D32	2462	2350
TN246S.D34	2463	2345
TN246S.D27	2467	2347
TN246S.D28	2472	2379
TN246S.D18	2473	2368
TN246S.D19	2473	2365
TN246S.D21	2473	2365

TN246S.D1	2479	2377
TN246S.D39	2479	2381
TN246S.D44	2488	2392
TN246S.D40	2491	2422
TN246S.D42	2493	2396
TN246S.D43	2493	2395
TN246S.D30	2495	2395
TN246S.D29	2496	2428
TN246S.D24	2498	2418
TN246S.D33	2498	2385
TN246S.D23	2499	2412
TN246S.D7	2509	2434
TN246S.D41	2513	2408

11) Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

Metoda A nie nadaje się do badania próbek o powierzchniach bocznych typu otwartego (np. mieszanki gruboziarniste) i w mieszankach o wysokiej zawartości wolnych przestrzeni. Mieszanki gruboziarniste ze względu na niską jednorodność przy krawędziach formowanej próbki zawierają podwyższoną porowatość na jej powierzchni. Metoda A (jak i B) nie uwzględniają objętości tych porów w pomiarach objętości próbki, co wpływa na zafałszowanie wyników w stronę wyższej gęstości objętościowej. Poza tym podczas badania próbek metodą A, jeśli zawartość wolnych przestrzeni jest większa, występuje trudność w ustabilizowaniu odczytu wagi po zanurzeniu próbki w wodzie. Z powodów praktycznych do wszystkich badanych próbek zastosowano regułę, że odczyt masy próbki po zanurzeniu w wodzie według metody A wykonuje się tuż po zarejestrowaniu przez wagę pierwszego stabilnego odczytu (w tym przypadku pojawieniu się symbolu jednostki ważenia, czyli „g”). Z reguły metoda ta przynosiła podobne średnie rezultaty, co metoda B, jednak w przypadku próbek o dużej chłonności występowały znaczne rozbieżności zbadanych gęstości objętościowych według metody A, względem metody B.

Metoda B jest metodą nową, wdrożoną przez normy europejskie, nieco odmienną od obecnie powszechnie stosowanej. W porównaniu do powszechnie stosowanej przez laboratoria drogowe, występującej w większości obecnych specyfikacji, metody określania gęstości strukturalnej według Zeszytu 64/2002 IBDiM metoda B różni się przede wszystkim czasem zanurzenia próbki w wodzie. Zgodnie z zapisami Zeszytu 64/2002 IBDiM próbkę w wodzie zanurza się na czas jednej minuty, poprzedzając zanurzenie w wodzie zanurzeniem próbki na 30 sekund w spirytusie skażonym (denaturacie). Z doświadczenia wynika jednak, że w przypadku próbek o porowatej strukturze 1 minutowe zanurzenie próbki w wodzie jest niewystarczające do ustabilizowania odczytu wagi. Próbka nadal chłonie wodę. W przypadku metody B zanurzenie próbki w wodzie trwa „z reguły 30 minut”, ale również do ustabilizowania odczytu wagi. W celu zredukowania napięcia powierzchniowego wody występującego podczas zanurzenia próbki można dodać do wody kilka kropel substancji powierzchniowo czynnej (np. płynu do naczyń). Metoda B (lub według Zeszytu 64/2002 IBDiM) jest metodą najczęściej stosowaną ze względu na dostępność wyposażenia do badań, łatwość procedury oraz powtarzalność wyników. Dlatego w rozważaniach przyjęto tą metodę jako metodę referencyjną.

Metoda C, czyli ważenia próbki w stanie powierzchniowego uszczelnienia jest metodą o bardzo obiecujących rezultatach (powołać artykuły), jednak ze względu na stopień trudności stosowania nie jest metodą uniwersalną. Dostępne jest kilka wariantów uszczelnienia powierzchniowego próbki. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem jest zanurzenie próbki w rozgrzanej parafinie. Do zalet metody należy łatwość wykonania, jednak ze względu na nieodwracalność procesu powlekania, próbka nie nadaje się już do dalszych badań. Rzadziej stosowanym rozwiązaniem jest zawijanie próbki w folię typu „stretch”. Rozwiązanie to jest w miarę dostępne, jednak silny wpływ na wyniki pomiarów ma sposób owinięcia próbki. Próbka nie jest zabezpieczana w sposób hermetyczny i możliwe jest penetrowanie wody pomiędzy warstwy folii. Bardzo często następuje również przerwanie folii na ostrej krawędzi próbki. Fakty te znajdują odzwierciedlenie w niskiej odtwarzalności i powtarzalności metody. Obiecujący jest kolejny sposób zabezpieczania powierzchniowego próbki poprzez pakowanie próżniowe w specjalne woreczki. Próbka jest pakowana w specjalny worek, w próżni odciągane jest powietrze ze środka próbki i z worka a następnie worek jest zgrzewany, co zapewnia trwałość zamknięcia i atmosfery wewnątrz worka. Zaletą rozwiązania jest uzyskanie objętości próbki zbliżonej do

teoretycznej objętości, ze zminimalizowanym wpływem tekstury próbki, a jednocześnie niewypełnianiem przez wodę wolnych przestrzeni połączonych wewnątrz próbki, co nie prowadzi do zakłamania wyniku. Do wad tej metody należy zaliczyć konieczność doposażenia laboratorium w specjalne urządzenie, tzw. pakowaczkę próżniową oraz dobór odpowiednich worków zapewniających wystarczającą trwałość a zarazem elastyczność. Na tym etapie analizy nie były dostępne wyniki badań próbek tą metodą. Było to spowodowane trudnościami wymienionymi powyżej, czyli koniecznością wykorzystania próbek po badaniach do przeprowadzenia dalszych badań (odpada parafina) i uszkodzaniem folii typu „stretch” na ostrych krawędziach próbek. W najbliższym czasie podjęte będą pierwsze próby pakowania próżniowego próbek mające na celu potwierdzenie prawidłowego doboru folii.

Metoda D jest metodą geometryczną pomiaru gęstości objętościowej próbki. Polega ona na wyznaczeniu objętości próbki na podstawie pomiaru geometrii badanej próbki. Metoda ta w pewnych warunkach jest jedyną słuszną metodą. Dotyczy to mieszanek mineralno-asfaltowych o znacznej zawartości wolnych przestrzeni np. asfalt porowaty. Gdyby pomiar gęstości objętościowej próbek o dużej porowatości i dużej zawartości połączonych wolnych przestrzeni odbywał się w wodzie (metodą B), to woda spenetrowałaby większość wolnych przestrzeni w próbce (jeśli nie wszystkie) co doprowadziłoby do znacznego zawyżenia wyniku badania. Gęstość objętościowa takiej próbki byłaby bliska gęstości niezagęszczonej mieszanki mineralno-asfaltowej badanej w wodzie. Z przeprowadzonych badań wynika, że wyniki badań gęstości objętościowej metodą D były znacznie niższe niż wyniki badań metodą B. Rozbieżność między metodami wzrastała wraz ze spadkiem gęstości objętościowej.

Na podstawie dotychczas zrealizowanych badań nie stwierdzono istotnego wpływu sposobu zagęszczania próbek o tej samej geometrii. Próba w postaci czterech mieszanek mineralno-asfaltowych może być za mała do oceny wpływu składu (maksymalnego wymiaru kruszywa w mieszance, składu frakcyjnego, itp.).

Na rozbieżności wyników analizowanych metod miało wpływ zagęszczenie próbek. Im większa była gęstość i stopień zagęszczenia, tym mniejsze występowały rozbieżności wyników badań różnymi metodami.

12) Bibliografia

- [1] – www.introtek.com/corelok.php
- [2] – NCAT - The National Center for Asphalt Technology at Auburn University,
- [3] – NCAT - The National Center for Asphalt Technology at Auburn University, 'tech-notes' – "WSDOT: Device CoreLok",
- [4] – National Center for Asphalt Technology, "Bulk Specific Gravity Round Robin Using the CoreLok Vacuum Sealing Device", NCAT Report No. 02-11, 2002,
- [5] – K.D. Hall, TRR1761, "Examination of Operator Variability for Selected Methods for Measuring Bulk Specific Gravity of Hot-Mix Asphalt Concrete",
- [6] – WSDOT – Washington State Department of Transportation, Materials Laboratory, South Second Ave. Tumwater, WA,
- [7] – DIMET Department – F. Pratico, A. Moro, R. Ammendola "Modeling HMA Bulk Specific Gravities: A Theoretical and Experimental Investigation",