



POLITECHNIKA GDAŃSKA
Katedra Inżynierii Drogowej
ZAKŁAD BUDOWY DRÓG

ul. G. Narutowicza 11
80-952 GDAŃSK

Tel: (0-58) 347 13 47
Fax: (0-58) 347 10 97

**WERYFIKACJA ZASAD PROJEKTOWANIA MIESZANEK
MINERALNO-CEMENTOWO-EMULSYJNYCH**

RAPORT KOŃCOWY

Opracowano dla potrzeb:

Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad
ul. Żelazna 59
00 – 848 WARSZAWA

Opracowali:

Prof. dr hab. inż. Józef Judycki

Dr inż. Bohdan Dołżycki

Mgr inż. Krzysztof Hunik

Mgr inż. Marcin Stienss

Gdańsk, 2006

WERYFIKACJA ZASAD PROJEKTOWANIA MIESZANEK MINERALNO-CEMENTOWO-EMULSYJNYCH

RAPORT KOŃCOWY

1.	Podstawa opracowania.....	5
2.	Opis problemu.....	7
3.	Cel i zakres prac.....	7
4.	Studia literatury.....	9
4.1.	Doświadczenia polskie.....	10
4.2.	Wymagania niemieckie.....	13
4.3.	Doświadczenia japońskie.....	16
4.4.	Doświadczenia norweskie.....	18
4.5.	Doświadczenia amerykańskie.....	19
4.6.	Doświadczenia brytyjskie.....	22
4.7.	Zalecenie PIARC.....	24
4.8.	Zalecenia PARAMIX.....	25
4.9.	Podstawowe cechy MCE w świetle studiów literatury.....	26
4.10	Wnioski.....	33
5.	Doświadczenia ze stosowaniem podbudów z mieszanki MCE w Polsce.....	35
5.1.	Ankiety dotyczące stosowania podbudowy z mieszanki MCE w Polsce...	35
5.2.	Wizualna ocena nawierzchni z podbudowami z mieszanek MCE.....	41
5.3.	Wnioski z analizy ankiet i oceny wizualnej wybranych odcinków.....	48
6.	Badania laboratoryjne.....	49
6.1.	Metodyka badań.....	49
6.1.1.	Przygotowanie próbek do badań.....	49
6.1.2.	Badanie wytrzymałości w pośrednim rozciąganiu.....	50
6.1.3	Moduł sztywności sprężystej w pośrednim rozciąganiu.....	51
6.1.4	Badanie stabilności i odkształcenia wg Marshalla.....	52
6.1.5	Zawartość wolnych przestrzeni.....	52
6.2.	Porównanie niemieckich zasad projektowania mieszanek MCE z wymaganiami polskimi.....	52
6.2.1.	Wstęp.....	52

6.2.2. Właściwości mieszanki mineralnej.....	53
6.2.3. Optymalna zawartość płynów.....	55
6.2.4. Przygotowanie próbek.....	57
6.2.5. Badania cech mieszanek MCE.....	59
6.2.6. Analiza wyników badań.....	70
6.2.7. Podsumowanie.....	71
6.3. Wpływ metody zagęszczenia na wyniki badań.....	72
6.3.1 Badany materiał.....	73
6.3.2. Wyniki badań.....	74
6.3.3. Wnioski z badań wpływu zagęszczenia mieszanki MCE na wyniki badań.	77
6.4. Zmienność cech mieszanki MCE.....	77
6.4.1. Badania laboratoryjne.....	77
6.4.2. Wyniki badań.....	78
6.4.3. Analiza wyników badań.....	81
7. Zakończenie.....	83
LITERATURA.....	85
ZAŁĄCZNIK NR 1: ZASADY PROJEKTOWANIA I WYKONANIA MIESZANEK MINERALNO-ASFALTWO-EMULSYJNYCH (MCE) PROPOZYCJA WYTYCZNYCH.....	87

WERYFIKACJA ZASAD PROJEKTOWANIA MIESZANEK MINERALNO-CEMENTOWO-EMULSYJNYCH

1. Podstawa opracowania

Weryfikacja zasad projektowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE) została przeprowadzona w oparciu o umowę nr WIL/F/109/002/2005 zawartą pomiędzy Wydziałem Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej a Generalną Dyrekcją Dróg Krajowych i Autostrad w Warszawie.

2. Opis problemu

W ciągu ostatnich kilku lat wzrosło zainteresowanie powtórным wykorzystaniem odzyskanego materiału pochodzącego z nawierzchni do wykonania nowych warstw konstrukcyjnych. Przyczynił się do tego zarówno rozwój techniki drogowej pozwalający na przetworzenie istniejących warstw konstrukcyjnych jak i rosnące koszty utylizacji materiałów pochodzących z rozbiórki istniejących nawierzchni drogowych oraz rosnące koszty pozyskania nowych materiałów do budowy dróg.

Problem ponownego zastosowania destruktu asfaltowego jest dość złożony, ponieważ materiał pochodzący z rozdrobnienia istniejących nawierzchni charakteryzuje się dość dużą zmiennością wynikająca zarówno ze stosowania różnych materiałów do budowy dróg jak i dużą zmienności grubości poszczególnych warstw. Duża zmienność konstrukcji wynika głównie z wykonywania kolejnych remontów i poszerzeń polskich dróg w różnych technologiach na stosunkowo krótkich odcinkach.

W Polsce pierwsze wytyczne do wykonywania warstw konstrukcyjnych z mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych pojawiły się w 1997 roku. Były to „Warunki techniczne wykonania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo emulsyjnej metodą recyklingu na miejscu” autorstwa Zawadzkiego i Matras wydane przez IBDiM, (zeszyt 53/1997) [1]. W 1999 roku pojawiła się aktualizacja tego opracowania w postaci „Warunków technicznych wykonania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo emulsyjnej (MCE) autorstwa Zawadzkiego, Matras, Mechowskiego i Sybilskiego wydane przez IBDiM (zeszyt 61/1999) [2].

„Warunki techniczne wykonania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo emulsyjnej” [2] oraz opracowane na ich podstawie Ogólne Specyfikacje Techniczne D-04.10.01 „Podbudowa z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej”, które ukazały się w 2001 roku, stanowiły podstawę do projektowania mieszanek MCE, ich wbudowywania oraz kontroli jakości. W wytycznych szczegółowo opisano wymagania materiałów wyjściowych, proces projektowania oraz wymagania dla zaprojektowanej mieszanki MCE.

W trakcie kilku lat korzystania z wytycznych [2] okazały się one niewystarczające i budziły szereg zastrzeżeń Wykonawców, Projektantów oraz Administracji Drogowej. Zastrzeżenia dotyczyły głównie następujących zagadnień:

1. Zbyt wygórowanych parametrów gotowej mieszanki MCE, co powodowało konieczność dodawania sporej ilości cementu oraz kruszywa doziarniającego, aby uzyskać wymagane parametry. Zbyt duża ilość drogich dodatków powoduje, że wykonywana mieszanka MCE przestaje być atrakcyjnym rozwiązaniem pod względem ekonomicznym.
2. Zastosowanie do oceny mieszanek MCE badania Marshalla w temperaturze +60°C, wydaje się być nie najlepszym rozwiązaniem, ponieważ badania w temperaturze +60°C nie odzwierciedla warunków pracy mieszanki MCE ponadto badanie Marshalla nie oddaje dobrze pracy materiału zawierającego cement.
3. Ograniczenie tylko do jednego typu mieszanki MCE, pod względem parametrów, dla poszczególnych kategorii ruchu, co w wielu przypadkach wymagało stosowania dość dużej ilości materiału doziarniającego w celu uzyskania wymaganego uziarnienia oraz wymaganych parametrów mechanicznych.
4. Dopuszczenie dwóch metod zagęszczania próbek, co często prowadziło do nieporozumień oraz problemów podczas kontroli i odbiorów wykonanych warstw.

Wymienione uwagi oraz konieczność dostosowania wymagań dla mieszanek MCE do nowych metod badawczych coraz powszechniej stosowanych w laboratoriach drogowych spowodowało konieczność przeprowadzenia badań, których celem będzie weryfikacja obowiązujących warunków technicznych oraz opracowanie zleceń dla nowych warunków technicznych.

Problem z projektowaniem mieszanki MCE nie dotyczy tylko Polski. Takie problemy występują w wielu krajach. Do dnia dzisiejszego nie opracowano jednej metody, która by była stosowana w większości krajów [7, 8]. Świadczą o tym również prace prowadzone w Unii Europejskiej w ramach programu badawczego PARAMIX [21].

3. Cel i zakres prac

Celem prac była weryfikacja zasad projektowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych, polegająca na szczegółowym przeanalizowaniu istniejących warunków technicznych [2] oraz zmienienie ich w taki sposób, aby z jednej strony uzyskać mieszankę MCE dobrej jakości a z drugiej strony, aby uczynić to w sposób jak najbardziej prosty i ekonomiczny.

Zakres pracy składał się z następujących części:

1. Studia literatury,
2. Zebranie danych o doświadczeniach krajowych,
3. Weryfikacja laboratoryjna metod projektowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych,
4. Opracowanie procedur badawczych do oceny mieszanek mineralno-asfaltowych.

Studia literatury pozwoliły na zebranie i porównanie doświadczeń z innych krajów w przetwarzaniu istniejących nawierzchni w technologii głębokiego recyklingu na zimno ze szczególnym uwzględnieniem mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych. Pozwoliło to na wybranie takiej procedury projektowania mieszanki MCE, która jest w miarę prosta a jednocześnie w miarę wiernie oddaje charakter pracy warstwy podbudowy wykonanej z mieszanki MCE.

Zebranie danych o doświadczeniach krajowych pozwoliło na określenie zakresu wykonywania remontów w technologii recyklingu głębokiego oraz pozwoliło na zebranie informacji o problemach, jakie występują podczas wykonywania recyklingu oraz odbioru warstw wykonywanych z mieszanki MCE. Dane o odcinkach wykonanych w technologii recyklingu głębokiego na zimno pozwoliły również na wybranie fragmentów dróg, gdzie przeprowadzono szczegółową ocenę stanu nawierzchni.

Weryfikacja laboratoryjna metod projektowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych polegała na sprawdzeniu procedur i metod projektowania mieszanek MCE opracowanych na podstawie studiów literatury. W laboratorium zostały przeprowadzone badania nad weryfikacją metod projektowania mieszanek MCE oraz metod badań i oceny wybranych cech mieszanek MCE. Analiza wyników badań laboratoryjnych pozwoliła na wybranie takiej metody projektowania mieszanki mineralno-asfaltowej, która w sposób prosty a jednocześnie dość precyzyjny pozwoli na projektowanie mieszanki MCE w polskich warunkach.

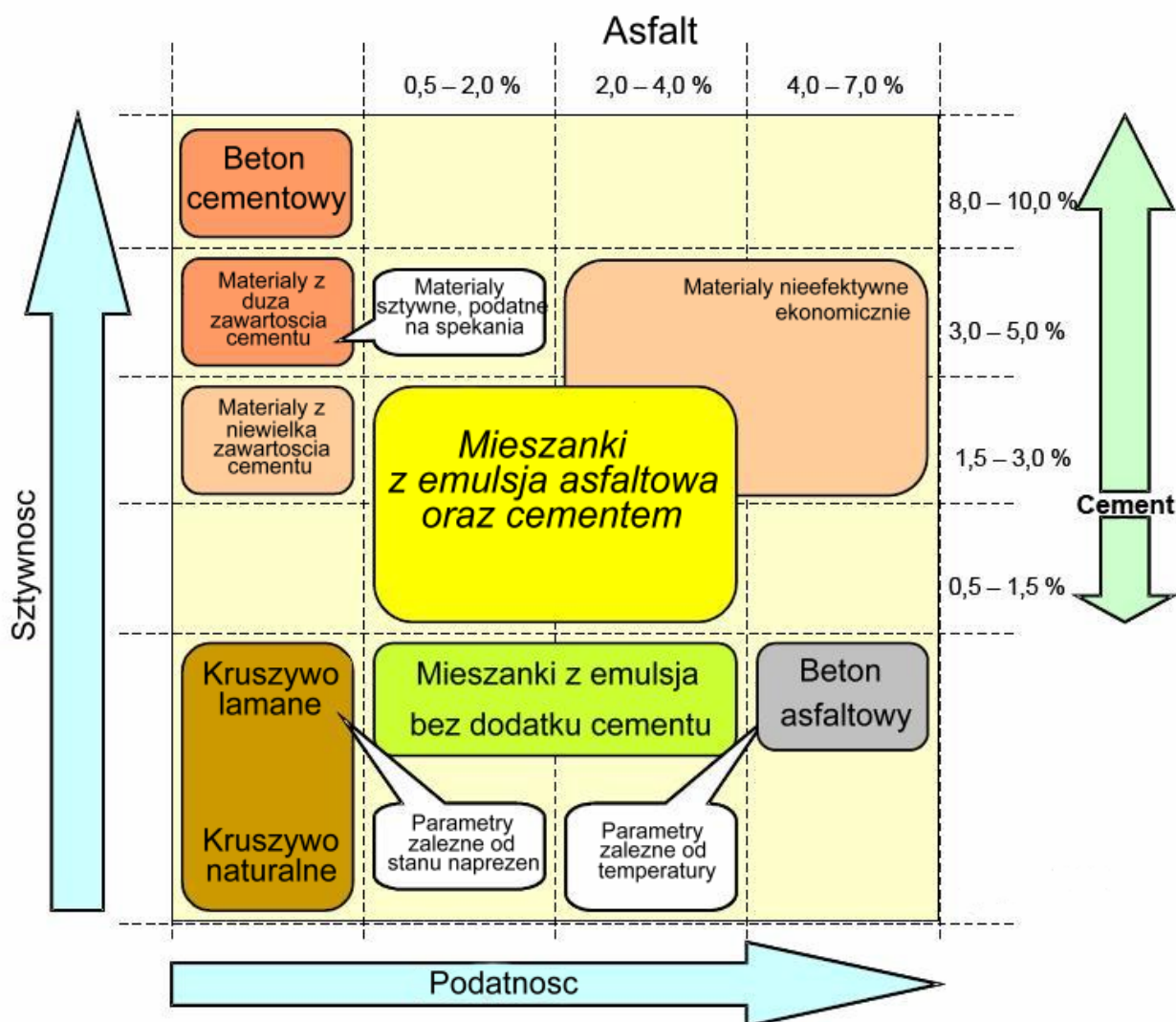
Opracowanie procedur badawczych do oceny mieszanek mineralno-asfaltowych było ostatnim etapem prac. W „Zasadach projektowania mieszanek mineralno-asfaltowo-emulsyjnych (MCE)” przedstawione procedury postępowania od wyboru odcinka drogi do remontu poprzez zaprojektowanie mieszanki MCE do zasad, jakie powinny obowiązywać podczas odbioru wykonanej warstwy.

4. Studia literatury

Recykling nawierzchni asfaltowych na zimno wykonywany jest w celu przetworzenia istniejących warstw nawierzchni w pełnowartościowy materiał. Proces ten odbywa się poprzez rozdrobnienie istniejących nawierzchni oraz dodanie w razie potrzeby kruszywa doziarniającego. W procesie recyklingu dodawane są również środki wiążące. W zależności od potrzeb oraz możliwości technicznych mogą to być:

- Emulsja asfaltowa [4, 8, 9, 11, 18, 19],
- Emulsja asfaltowa + cement [2, 4, 5, 18, 19],
- Emulsja asfaltowa + wapno [10,18, 19],
- Cement [4, 5 18, 19],
- Asfalt spieniony [4, 9, 11, 12].

Lepiszczka i spoiwa wpływają w różny sposób na uzyskany materiał, ich wpływ na zachowanie się materiałów ilustruje rysunek 4.1.



Rysunek 4.1. Wpływ cementu i asfaltu na właściwości materiałów [7]

Pokazany na rysunku 4.1 schemat przedstawia rodzaje materiałów drogowych oraz ich właściwości w zależności od zawartości asfaltu i cementu. Mieszanki mineralno-emulsyjne mogą być wykonane bez cementu, wówczas zwiększanie ilości asfaltu powoduje ich większą podatność. Najczęściej jednak w mieszankach mineralno-emulsyjnych występuje pewna, niewielka ilość cementu. Rola cementu nie polega tylko na zwiększeniu sztywności. Cement w tego typu mieszankach ma przyspieszyć rozpad emulsji (działa jak katalizator), zwłaszcza w początkowej fazie otaczania oraz zwiększyć ilość drobnych frakcji, których często w recyklowanym materiale brakuje. W zależności od ilości asfaltu i cementu tego typu mieszanki dzielą się na te z większą ilością asfaltu, są to mieszanki bardziej podatne oraz mieszanki z większą ilością cementu są to mieszanki sztywne. Podobny podział, ze względu na dominujące wiązanie w zależności od zawartości poszczególnych składników występuje w wymaganiach niemieckich [4].

W poszczególnych krajach, w zależności od dostępności materiałów, doświadczeń i dostępności sprzętu do wykonywania głębokiego recyklingu jako środka wiążącego używa się jednego lub dwóch z wymienionych dodatków. Zostanie to omówione w dalszej części tego punktu.

4.1. Doświadczenia polskie

Polskie wymagania dotyczące stosowania mieszanek MCE są opisane w warunkach technicznych [2] wydanych w 1999 roku. W wytycznych [2] mowa jest tylko o wymaganiach dotyczących mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych. Nie wspomina się o mieszankach mineralno-cementowych czy też mineralno-emulsyjnych. Badania i doświadczenie ze stosowania mieszanki MCE w warunkach polskich opisano również w [15, 16, 17].

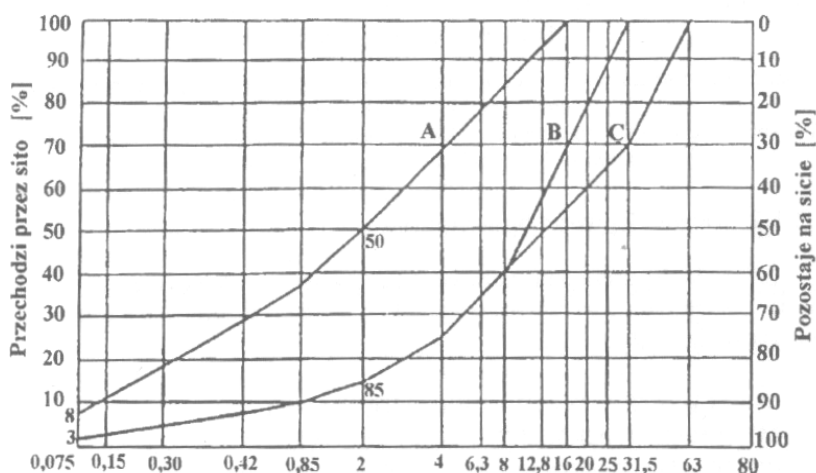
Mieszanka mineralno – cementowo – emulsyjna jest mieszanką o ciągłym uziarnieniu, składającą się z destruktu lub destruktu i kruszywa doziarniającego, wymieszaną sposobem na zimno z cementem i emulsją asfaltową w określonych proporcjach, w warunkach wilgotności optymalnej [2].

Składniki. Do wykonania mieszanki MCE stosuje się następujące materiały:

- Destrukt, czyli materiał mineralno-bitumiczny, mineralno-smołowy lub mineralno-cementowy, rozkruszony do postaci okruchów związanych lepiszczem bitumicznym lub spoiwem cementowym, powstały w wyniku frezowania warstw nawierzchni drogowej w temperaturze otoczenia, lub w wyniku kruszenia w kruszarce brył pochodzących z rozbiórki starej nawierzchni. Wymaga się, aby destruktu miał uziarnienie do 31,5 mm, dopuszcza się uziarnienie do 63 mm w przypadku występowania pod warstwami bitumicznymi podbudowy z tłucznia. W obu przypadkach dopuszcza się do 10 % nadziarna.
- Kruszywo doziarniające. Doziarnienie destruktu, w zależności od przeznaczenia i kategorii ruchu, może odbywać się w przypadku dróg o kategorii ruchu KR 3-6 z kruszywem łamanym zwykłym lub granulowanym oraz żwirem kruszonym. Na drogach o kategorii ruchu KR 1-2 stosuje się dodatkowo kruszywo naturalne.

- Emulsja. Jako lepiszcze stosuje się emulsję kationową wolnorozpadową K3 o zawężonych wymaganiach w stosunku do [3] lub emulsję kationową nadstabilną K4 wg [3].
- Cement portlandzki CEM I klasy 32,5 zgodny z PN-B-19701:1997 „Cement. Cement powszechnego użytku”.

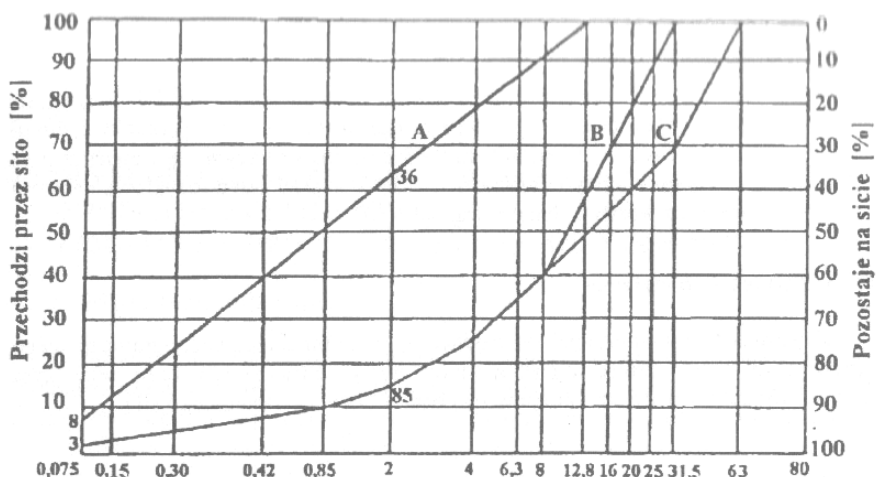
Projektowanie. Projekt recepty mieszanki MCE jest wynikiem czterech następujących po sobie etapów projektowania. W pierwszym etapie ustalany jest skład oraz procentowa zawartość cementu. Zalecana zawartość cementu powinna wahać się od 1,5 do 4% w przypadku destruktu asfaltowego oraz od 1,5 do 7% w przypadku destruktu smołowo-asfaltowego lub smołowego. Uziarnienie mieszanki (destruktu, kruszywa i cementu) powinno mieścić się w krzywych granicznych pokazanych na rysunkach 4.2 i 4.3



A-B – obszar uziarnienia standardowego,

A-C –obszar uziarnienia w przypadku recyklowania nawierzchni z warstwą tłucznia.

Rysunek 4.2. Graniczne uziarnienie mieszanki MCE do podbudowy dróg o ruchu kategorii od KR3 do KR6



A-B – obszar uziarnienia standardowego,

A-C –obszar uziarnienia w przypadku recyklowania nawierzchni z warstwą tłucznia.

Rysunek 4.3. Graniczne uziarnienie mieszanki MCE do podbudowy dróg o ruchu kategorii od KR1 do KR2

Drugi etap projektowania to ustalenie procentowej zawartości wody w oparciu o wilgotność optymalną określoną w badaniu Proctora. Należy pamiętać, aby w końcowej recepcie uwzględnić wodę pochodzącą z emulsji,

Etap trzeci sprowadza się do przyjęcia rodzaju i ilości emulsji asfaltowej w celu określenia cechy poszczególnych mieszanek MCE. Do wykonania podbudowy przyjmuje się projekt recepty spełniający wszystkie wymagania techniczne. Należy pamiętać o nie przekroczeniu maksymalnej zawartości lepiscza bitumicznego, łącznie z asfaltem wytraconym z emulsji w odniesieniu do wszystkich dróg wymaga się aby były spełnione następujące wymagania:

- w mieszance 0/12 do 0/31,5 mm: $\leq 6,0\%$ (m/m)
- w mieszance 0/63 mm: $\leq 5,5\%$ (m/m)
- ilość starego asfaltu, z destruktu nie powinna przekraczać 4 %.

Etap czwarty to badania przygotowanej mieszanki mineralno-asfaltowej i określenie na ich podstawie optymalnego składu mieszanki MCE.

Badania i wymagania dla mieszanek MCE.

Podstawowymi wymaganymi przez polskie wymagania [2] badaniami są:

1. Zagęszczenie próbek odbywa się jedną z metod:
 - Metoda 1 ubijak Marshalla, 2 x 75 uderzeń, formy perforowane, pielęgnacja przez 28 dni w temperaturze pokojowej,
 - Metoda 2 prasa hydrauliczna, stały nacisk 100 kN, przez 5 minut, pielęgnacja przez 7 dni w temperaturze pokojowej,
2. Oznaczenie stabilności metodą Marshalla w temp. +60°C próbek zagęszczonych i pielęgnowanych wg metody I lub II
 - dla dróg kategorii KR3 do KR6 8,0 – 20,0 kN,
 - dla dróg kategorii KR1 do KR2 4,0 – 20,0 kN.
3. Oznaczenie odkształcenia metodą Marshalla w temp. +60°C próbek zagęszczonych i pielęgnowanych wg metody I lub II w odniesieniu do dróg wszystkich kategorii ruchu: 1,0 – 3,5 mm.
4. Wolna przestrzeń w odniesieniu do dróg o wszystkich kategoriach ruchu:
 - próbek zagęszczonych metodą I: 9,0 – 16,0%,
 - próbek zagęszczonych metodą II: 5,0 – 12,0%.

W publikacjach [15, 17] Jabłoński i wsp. przedstawiają dodatkowe wymagania, jakie wykorzystano przy projektowaniu mieszanki MCE. Były to następujące parametry:

1. Moduł sztywności sprężystej po 28 dniach
 - w temp -10°C ≤ 9000
 - w temp +23°C 2500 – 3500
2. Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie po 28 dniach
 - w temp. -10°C min 0,65 MPa
 - w temp. +23°C min 0,35 MPa
3. Wytrzymałość na ściskania po 28 dniach
 - w temp. +23°C max 5 MPa

Jak widać z przedstawionego zestawienia wymagania wytrzymałościowe zarówno w wytycznych jak i stosowane później w praktyce są stosunkowo wysokie. Wymusza to stosowanie dość dużej ilości kruszywa doziarniającego o dobrych parametrach oraz

dużych ilości cementu, mniejszej emulsji. W konsekwencji uzyskuje się materiał dość drogi, którego stosowanie w wielu przypadkach przestaje być opłacalne.

4.2. Wymagania niemieckie

Wymagania niemieckie dotyczące recyklingu na zimno zawarte są w publikacji „Merkblatt für Kaltrecycling in situ im Straßenoberbau”, wydanej w 2005 roku [4]. Zawarto w nich zalecenia zarówno do wykonywania warstw z mieszanki MCE jak i asfaltu spienionego. W dalszej części skupiono się na wymaganiach dotyczących tylko mieszanek MCE i opisano je dość szczegółowo, ponieważ pokazują całą filozofię podejścia do projektowania i oceny mieszanek MCE. Warstwy z mieszanki MCE nie powinny być grubsze niż 20 cm, w wyjątkowych przypadkach dopuszcza się warstwy o grubości 22 cm.

Wiadomości ogólne.

Mieszanki MCE stosuje się tylko dla klas nośności konstrukcji VI, V, IV i III, czyli obciążeniu do 3 milionów osi porównawczych, odpowiada to polskim kategoriom ruchu od KR1 do dolnej granicy KR4. Nie dopuszcza się stosowania w Niemczech mieszanek MCE do największych klas obciążeń (kategorie KR5 i KR6 wg polskich wymagań).

Mieszanki MCE można podzielić w zależności od kombinacji spoiwa i osiągniętych tym samym modułów sztywności E, na typ wiązania dominująco bitumiczny i dominująco hydrauliczny. Przy mieszankach MCE dominująco bitumicznych moduł sztywności w pośrednim rozciąganiu E po 28 dniach, mierzony w temperaturze +5°C, wynosi od 3000 do 7000 MN/m². Przy mieszankach dominująco hydraulicznych moduł sztywności E po 28 dniach, mierzony w temperaturze +5°C, zawiera się pomiędzy 7000 a 12500 MN/m². Poprzez celowy dobór spoiwa można uzyskać mieszanki MCE, w których zachowanie materiałów zbliżone jest zarówno do warstw sztywnych jak i podatnych. Wybór kombinacji spoiwa, a tym samym charakteru warstwy, zależy od składu mieszanki oraz nośności podłoża. Przy wysokim udziale destruktu jest możliwe, że pomimo znacznego dodatku spoiwa hydraulicznego powstanie mieszanina MCE dominująco bitumiczna. Jest to szczególnie pożądane przy wysokim udziale asfaltu w destrukcie oraz przy konstrukcjach, które wymagają podatnego układu lub przy wysokiej nośności podbudowy. Przy czym zawsze należy pamiętać o tym, że podstawowym celem przy wyborze technologii procesu budowy, czyli doborze sprzętu mieszającego i sprzętu do wbudowywania, jest uzyskanie możliwie wysokiej jednorodności mieszanki MCE.

Materiały

Jako materiały wyjściowe dla wytworzenia mieszanki mineralnej MCE mogą to być stosowane:

- destrukc asfaltowy,
- destrukc zawierający smołę,
- kruszywa doziarniające.

Przy materiałach wyjściowych przewidywanych do zastosowania zakłada się, że są one przydatne. W przypadkach wątpliwych należy przewidzieć dodatkowa badania, takie jak badania mrozodporności i odporność na rozdrabnianie.

Jako środki wiążące mogą być zastosowane:

- lepiszcza (emulsje asfaltowe, asfalt spieniony),

- hydrauliczne środki wiążące (cement, popioły lotne),
- kombinacje z obu rodzajów środków wiążących.

Mieszanka mineralna

Mieszanka mineralna powinna posiadać ciągłe uziarnienie do maksymalnie 45 mm z maksymalnie 10% ilością nadziarna. W mieszankach z bitumiczną dominacją należy dążyć do tego, aby udział ziaren $< 0,09$ mm mieścił się w przedziale od 2 do 10%. Zawartość ziaren przechodzących przez sito 2 mm powinna wynosić minimum 20%. W wymaganiach niemieckich nie ma podanych krzywych granicznych mieszanki mineralnej.

Lepiszczca

Jako środki wiążące stosowane są z reguły emulsje bitumiczne, dla których zaleca się następujące wymagania:

- Cechy zewnętrzne: jednorodna, płynna, kolor brunatny.
- Rodzaj asfaltu: 50/70 lub 70/100 według EN 12591.
- Zawartość asfaltu: 60 do 65% wag.
- Rodzaj ładunku: kationowy ($\text{pH} < 3$), anionowy ($\text{pH} > 9$).
- Czas wpływu (DIN 52023 – 1) ≤ 12 s przy 20°C .

Emulsja bitumiczna musi spełniać warunek trwałości, czyli wzajemnej tolerancji z materiałami mineralnymi a przy stosowaniu cementu również z cementem. Emulsja bitumiczna musi być tak przygotowana, aby proces rozpadu został zakończony najwcześniej po 1 godzinie od wymieszania, po osiągnięciu trwałego otoczenie ziarn. Początek procesu można poznać po tym, że mieszanka staje się jednorodna. Poza tym kolor mieszanki MCE przechodzi od brunatnego w czarny. Im wcześniej stan ten wystąpi, tym większe potrzebne są siły do zagęszczenia przy wbudowywaniu.

Hydrauliczne środki wiążące

Dopuszczalne są środki wiążące zgodne z DIN 18506, których przydatność została sprawdzona w badaniach.

Mieszanka MCE

Mieszanka MCE składa się z mieszanki mineralnej, środków wiążących oraz wody. W stanie świeżym, w ustalonym oparciu o badania przydatności składzie, musi być jednorodnie przemieszana i równomiernie otoczona środkiem wiążącym.

Badania laboratoryjne mieszanki MCE

Wytwarzanie próbek

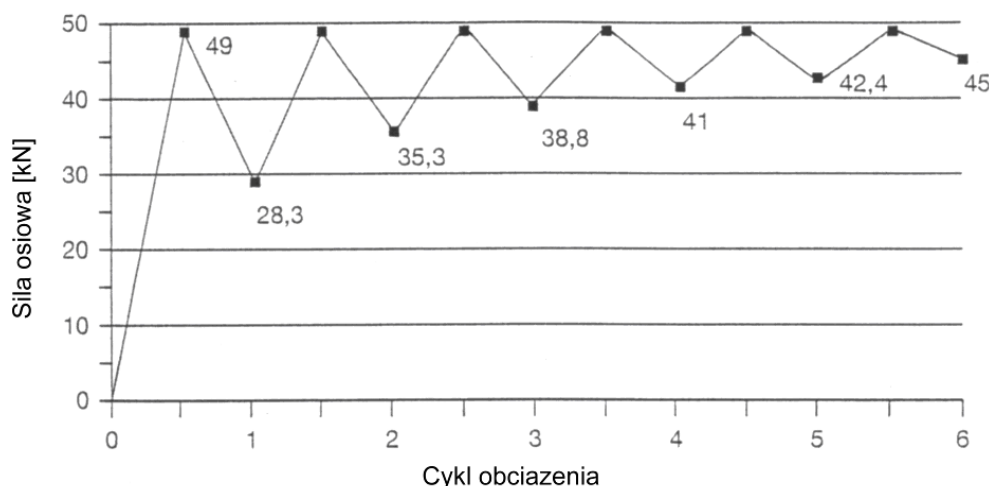
Sprzęt i środki pomocnicze

- forma o średnicy 150 mm, wysokości 300mm,
- 2 płyty stemplowe ϕ 149,6 mm i $h = 30$ mm z czterema bocznymi rowkami do odprowadzania wody,
- 2 stemple o wysokości $h = 60$ mm,
- prasa kontrolna o maksymalnym nacisku ≥ 100 kN,

Wykonanie próbek

Do lekko naoliwionej formy wkładamy płytę stemplową 30 mm grubości i przykrywamy bibułą filtracyjną. Następnie mieszanką MCE dzielimy na odważki niezbędne dla każdej próbki. Naważkę należy tak dobrać, aby zagęszczona próbka

miała wysokość $125 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$. Odważka w stanie luźnym wkładana jest do formy, przykrywana bibułą filtracyjną i drugą płytą stemplową. Przy napełnianiu mieszanki należy uważać, aby grube ziarna były jednorodnie rozłożone w mieszance. Ziarna lub kawałki o średnicy $> 32 \text{ mm}$ należy usunąć. Napelnioną formę do zagęszczania łącznie ze stemplem i płytami stemplowymi należy umieścić w urządzeniu zagęszczającym tak, aby obie płyty stemplowe pozostały ruchome w trakcie zagęszczania (zagęszczanie wg zasady podwójnego tłoka). Następnie należy ścisnąć statycznie poprzez obciążenie osiowe o wielkości 49 kN ($2,8 \text{ N/mm}^2$). Schemat zagęszczania przedstawiono na rysunku 4.4. Należy zwrócić szczególną uwagę, aby nie doszło do skrzywienia płyt stemplowych. Po przyłożeniu siły na skutek plastycznego zachowania mieszanki materiałów budowlanych wystąpi spadek ciśnienia. Dlatego po spadku należy ponownie osiągnąć maksymalne obciążenie (49 kN). Czynność tę należy powtarzać, tak długo aż spadek obciążenie będzie nie większy niż do 45 kN ($2,6 \text{ N/mm}^2$). Na ogół obciążenie końcowe osiągnięte jest po 5 do 7 obciążeniowych. Próbkę rozformowywane są następnego dnia. Próbkę po rozformowaniu jest ważona z dokładnością $\pm 1 \text{ g}$, a jej średnia wysokość określona z dokładnością $\pm 1 \text{ mm}$.



Rysunek 4.4. Cykliczny sposób przykładania obciążenia podczas zagęszczania próbek [4]

Kondycjonowanie próbek.

Próbki przez pierwsze dwa dni po rozformowaniu powinny być przechowywane w temperaturze $+20 \pm 2^\circ \text{C}$ i przy minimum 95% wilgotności powietrza. Od 3 do 7 dnia następuje "przechowywanie suche" przy wilgotności powietrza od 40% do 70% przy temperaturze powietrza $+20 \pm 2^\circ \text{C}$ na ruszcie kratkowym. W siódmym dniu dwie próbki z serii próbnej przygotowuje się do badania wytrzymałości na pośrednie rozciąganie. Od czternastego dnia dwie kolejne próbki umieszcza się w kąpielu wodnej o temperaturze $+20 \pm 2^\circ \text{C}$, przy całkowitym ich przykryciu na dalsze 14 dni. 28 dnia dwie próbki sucho przechowywane jak również dwie próbki sucho/mokro przechowywane przygotowuje się do badania wytrzymałości na pośrednie rozciąganie.

Badania.

Po wyjęciu z formy próbki określana jest jej wilgotność oraz gęstość jako iloraz z wilgotnej masy i objętości, którą oblicza się rachunkowo przez pomiar wysokości próbki i średnicy. Uwzględniając całkowitą zawartość wody w mieszance MCE,

obliczamy gęstość materiału suchego. Dla badanych próbek wyznacza się zawartość wolnych przestrzeni. Siódmego dnia określa się na dwóch próbkach, a po 28 dniach na pozostałych próbkach wytrzymałość na pośrednie rozciąganie. Parametry wymagane dla mieszanki MCE zostały podane w tablicy 4.1.

Tabela 4.1: Wymagania w odniesieniu do próbek z mieszanki MCE.

Parametr	Badanie przydatności
Zawartość wolnych przestrzeni (próżni)	8 do 15% obj. Maksymalnie 10% obj. ¹⁾
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie T = + 5 ⁰ C po 7 dniach	Wartość średnia ≥ 0,50 N/mm ² ≤ 0,80 N/mm ²
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie T = +5 ⁰ C po 28 dniach B _{S2, 28}	Wartość średnia ≥ 0,75 N/mm ² ≤ 1,20 N/mm ²
Spadek wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po 28 dniach próbek przechowywanych w wodzie w porównaniu z próbkami suchymi	< 30%

1) Materiały rozbiórkowe zawierające smołę

Wykorzystanie i ocena wyników badań

Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie po 28 dniach oraz wytrzymałość na pośrednie rozciąganie po 14 dniach składowania w wodzie stanowią parametry dla określenia optymalnego składu mieszanki MCE. W wyjątkowych przypadkach może nastąpić również ocena wytrzymałości na rozciąganie po 7 dniach.

4.3. Doświadczenia japońskie

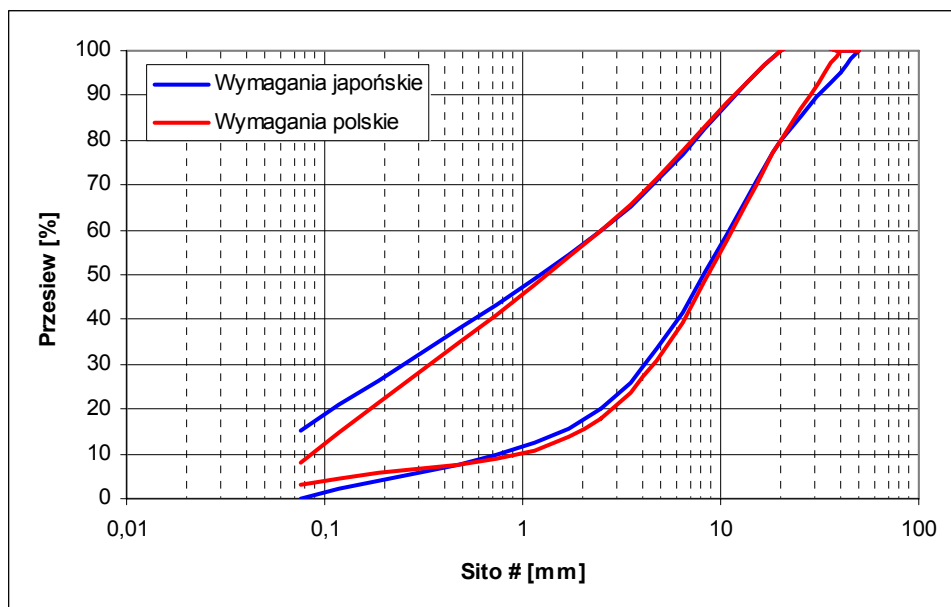
Doświadczenia japońskie oraz postępowanie związane z projektowaniem mieszanek do głębokiego recyklingu na miejscu przedstawiono w publikacji [5]. Publikacja ta omawia zalecenie opracowane przez japońską administrację drogową oraz doświadczenia, jakie wynikają ze stosowania tego typu mieszanek.

W Japonii wykonuje się około 2,5 mln m² podbudów w technologii recyklingu głębokiego na zimno (40 % z cementem i 60% z cementem i emulsją) w ciągu roku. Wymagania dla podbudów z mieszanki MCE są następujące:

- **Ruch.** Tego typu podbudowy wykonuje się na drogach obciążonych ruchem do 1000 pojazdów ciężarowych na dobę na pas, odpowiada to mniej więcej ruchowi KR4 według polskich wymagań.
- **Grubość warstwy,** od 10 do 30 cm.
- **Zalecane uziarnienie** mieszanki mineralnej podano w tablicy 4.2 oraz na rysunku 4.5.

Tablica 4.2. Zalecane uziarnienie mieszanki mineralnej

Sito [mm]	Krzywe graniczne [%]
50	100
40	95 – 100
20	50 – 100
2,5	20 – 60
0,074	0 – 15



Rysunek 4.5. Porównanie krzywych granicznych wg wymagań polskich [2] i wymagań japońskich [5]

Wymagania japońskie i polskie dla uziarnienia mieszanek MCE pokrywają się. Dodatkowo mieszanka mineralna powinna mieć CBR > 20 %, oraz wskaźnik plastyczności nie większy niż 9%.

- **Procedura projektowania** jest następująca:
 1. Oblicza się, na podstawie przesiewu, orientacyjną zawartość emulsji.
 2. Wyznacza się wilgotność optymalną, przy zawartości cementu 2,5%. Wilgotność optymalną wyznacza się dla próbek Marshalla, $h = 63,5$ mm, $\varnothing = 100$ mm, (2 x 50 uderzeń na stronę), na podstawie najlepszego zagęszczenia próbek.
 3. Przygotowuje się próbki z zawartością emulsji od 1 do 5 %.
 4. Badania wytrzymałości na ściskanie proste wykonuje się po 7 dniach, przy czym 6 dni próbki przechowuje się w powietrzu a 1 dzień w wodzie.
 5. Optymalny skład określa się w oparciu o parametry podane w tablicy 4.3.

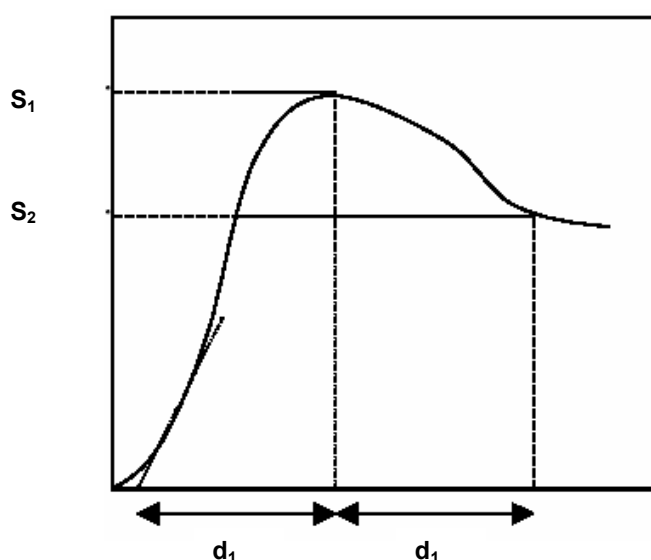
Tablica 4.3. Wymagania dla optymalnej mieszanki MCE, przy ściskaniu prostym

Cecha:	Wartość:
Wytrzymałość na ściskanie S1 [MPa]	1,5 – 3,0
Odształcenie przy maksymalnej wytrzymałości [mm]	0,5 – 3,0
Stosunek wytrzymałości S2/S1*	Nie mniej niż 65%

* - stosunek wyznacza się z wytrzymałości S1, przy odształceniu maksymalnym i S2 przy odształceniu dwa razy większym od maksymalnego.

Stosunek wytrzymałości wyznacza się z wytrzymałości S_1 , wyznaczonym przy odkształceniu maksymalnym i S_2 przy odkształceniu dwa razy większym od maksymalnego. Zasady wyznaczania S_1 oraz S_2 przedstawiono na rysunku 4.7.

Według wymagań japońskich [5] wytrzymałość mieszanki MCE większa od 3 MPa może być przyczyną spękań skurczowych podbudowy a w ich rezultacie spękań odbitych nawierzchni asfaltowych.



Rysunek 4.7. Zależność pomiędzy wytrzymałością a odkształceniem

4.4. Doświadczenia norweskie

Doświadczenia norweskie opisano na podstawie publikacji [9]. Praca ta omawia podejście do projektowania i wykonania podbudów z mieszanki mineralno-emulsyjnej oraz z mieszanki stabilizowanej asfaltem spienionym. W Norwegii nie stosuje się cementu do stabilizacji na miejscu. Mieszanki wykonywana w technologii mieszania na zimno stosowane są zarówno do budowy nowych jak i do rehabilitacji istniejących nawierzchni. W dalszej części skupiono się na podbudowach z mieszanki mineralno-emulsyjnej, której w Norwegii wykonuje się rocznie około 1,5 mln m².

Wymagania dla podbudów z mieszanki MCE są następujące:

- **Ruch.** Mieszanki mineralno-emulsyjne wykonywane w technologii mieszania na miejscu wykorzystywane są jako podbudowa pomocnicza przy ruchu do 3000 osi obliczeniowych AADT (ruch KR5 wg polskich wymagań) oraz jako podbudowa zasadnicza przy ruchu do 1500 osi obliczeniowych AADT (ruch KR4 wg polskich wymagań).
- **Zawartość asfaltu** powinna zawierać się w przedziale od 3,5 do 4,0 %.
- **Mieszanka mineralna** powinna zawierać od 1 do 7 % frakcji poniżej 0,075 mm, mniej niż 20% ziaren mniejszych od 2 mm a maksymalny wymiar ziarna nie powinien przekraczać 100 mm.
- **Procedura projektowania** jest następująca:
 1. Wybór lepszycza (emulsja czy asfalt spieniony).
 2. Dobór odpowiedniej emulsji (emulgator, zawartość asfaltu, czas rozpadu)

3. Wyznacza się wilgotność optymalną stosując metodę zmodyfikowaną Proctora.
4. Wybiera się ilość asfaltu. Orientacyjną zawartość asfaltu określa się na podstawie zależności:

$$P_a = 0,14 \times p_{75} + 2,6$$

Gdzie:

P_a – minimalna zawartość asfaltu ($P_a > 3 \%$),
 p_{75} – zawartość frakcji mniejszej niż 0,075 mm.

5. Przygotowuje się próbki o średnicy 100 mm i wysokości $63,5 \pm 0,5$ mm jedną z następujących metod:

Zagęszczanie statyczne:

- Doprowadzenie do obciążenie statycznego od 0 do 8 ton przez 2 minuty,
- Utrzymanie obciążenia 8 ton przez kolejne dwie minuty.
- Odciążenie i rozformowanie próbek.

Zagęszczanie w prasie gyratorowej (1°, 600 kPa, 30 obrotów na minutę):

- Zagęszczamy pierwszą serię, minimum 3 próbki, przy 200 obrotach,
 - Drugą serię, do badań, zagęszczamy stosując taką ilość obrotów, aby uzyskać zagęszczenie na poziomie 96% z serii pierwszej.
6. Próbki przechowuje się 7 dni w suszarce w temperaturze $+40^\circ\text{C}$ lub przez 3 dni w suszarce w temperaturze $+60^\circ\text{C}$.
 7. Po tym okresie próbki poddaje się 8 cyklom zamrażania i odmrażania stosując 4 cykle dziennie.
 8. Bezpośrednio przed badaniem próbka przechowywana jest w kąpeli wodnej w $+25^\circ\text{C}$ przez 30 – 40 minut.
 9. Jako kryterium stosuje się badanie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie.

4.5. Doświadczenia amerykańskie

W Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej przetwarzanie recyklingu istniejących nawierzchni jest dość powszechną praktyką. Liczne realizacje recyklingu w technologii wymusiły opracowanie metod projektowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych oraz mieszanek mineralno-emulsyjnych. W Stanach Zjednoczonych powszechnie stosuje się mieszanki mineralno-emulsyjne. Cement dodaje się takich przypadkach jedynie w ilości do 2%, głównie aby przyspieszyć rozpad emulsji oraz zwiększyć początkową wytrzymałość. Obecnie nie ma jednej metody projektowania tego typu mieszanek. Praktycznie każdy stan opracowuje swoją własną metodę dostosowując ją do warunków lokalnych oraz możliwości technicznych jakimi dysponuje. Prace nad metodami projektowania tego typu mieszanek ciągle trwają i metody te są ciągle unowocześniane.

Przegląd metod projektowania mieszanek stosowanych w technologii recyklingu na miejscu zawiera praca [10]. Procedura projektowania mieszanek do recyklingu na miejscu jest następująca:

1. Pobrać próbki z nawierzchni i określić dla nich uziarnienie oraz parametry odzyskanego asfaltu takie jak penetracja w +25°C oraz lepkość w +60°C.
2. Określić uziarnienie mieszanki do wbudowania. W razie potrzeb dodać kruszywo doziarniające.
3. Wybrać rodzaj spoiwa o ile będzie używane. Do mieszanki można dodać takie spoiwa jak cement, wapno, popioły lotne, środki chemiczne.
4. Określić potrzebną ilość asfaltu.
5. Wybrać rodzaj nowego lepiszcza w oparciu o wymagania końcowe dla lepiszczy w nawierzchni. Należy uwzględnić zawartość i cechy starego lepiszcza. Zaleca się stosowanie emulsji wolnorozpadowych.
6. Określić wilgotność optymalną.
7. Określić parametry gotowej mieszanki takie jak cechy wytrzymałościowe oraz odporność na działanie wody.

Do określania cech mieszanki do recyklingu na miejscu można zastosować jedną z wielu metod projektowania. Najbardziej popularne to:

1. **Metoda ARRA (Asphalt Recycling and Reclaiming Association)**

Metoda A, zmodyfikowanego Marshalla polega na wykonaniu szeregu próbek różniących zawartością emulsji, przy wilgotności 3%, zagęszczonych metodą Marshalla stosując po 50 uderzeń na stronę próbki. Próbki są przechowywane przez 6 godzin w +60°C. Następnie oznacza się maksymalną gęstość pozorną stabilność i odkształcenie wg Marshalla. Dla optymalnej zawartości emulacji wykonuje się próbki różniące się wilgotnością przy zagęszczeniu. Do realizacji wybiera się mieszankę z zawartością wolnych przestrzeni pomiędzy 9 a 14 procent. Zaleca się dodatkowo sprawdzić odporność mieszanek na działanie wody.

Metoda B, zmodyfikowanego Hveema polega na wykonaniu szeregu próbek różniących zawartością emulsji, przy wilgotności 3%, poprzez ich zagęszczenie w urządzeniu zwanym *kneading compactor*. Następnie oznacza się maksymalną gęstość pozorną stabilność w temperaturze +90°C. Dla optymalnej zawartości emulacji wykonuje się próbki różniące się wilgotnością przy zagęszczeniu. Do realizacji wybiera się mieszankę z zawartością wolnych przestrzeni pomiędzy 9 a 14 procent. Zaleca się dodatkowo sprawdzić odporność mieszanek na działanie wody.

Metoda C, oznaczenie Oregon. Metoda ta poświęca dużo uwagi wyborowi rodzaju emulsji w przypadku stosowania mieszanki składającej się w 100% z destruktu. Po analitycznym określeniu zawartości emulsji, przygotowuje się szereg próbek różniących się wilgotnością. Porcję mieszanki umieszcza się w formie o średnicy 101,6 mm i wysokości 262,1 mm. Zagęszczanie odbywa się w prasie hydraulicznej. Pierwszy etap polega na przyłożeniu przez minutę ciśnienia 137,9 MPa, następnie przez kolejne 1,5 minuty dodaje się ciśnienie 34,5 MPa, ostateczne ciśnienie 172,4 MPa jest utrzymywane przez minutę. W badaniu tym określa się ubytek wody w mieszance, podczas zagęszczania. Ubytek wody powinien mieścić się w przedziale od 1 do 4 g.

2. **Metoda firmy CHEVRON**

Metoda polega na określeniu uziarnienia mieszanki mineralnej, zawartości emulsji i określeniu wilgotności optymalnej. Minimalna zawartość emulsji wynosi 2%. Optymalizacja składu przeprowadzana jest na podstawie badań modułu sztywności, kohezji i stabilności.

3. Metoda stanu OREGON

Metoda polega na określeniu uziarnienia mieszanki mineralnej, zawartości emulsji i określeniu wilgotności optymalnej. Zawartość emulsji określana jest jak w metodzie C ARRA. Optymalizacja ceny przeprowadzana jest na podstawie badań modułu sztywności oraz stabilności Hveeema..

Doświadczenia z Minnesoty [8] pozwoliły na opracowanie specyfikacji wykonywania recyklingu na miejscu. Specyfikacja zakłada wykonanie mieszanki mineralno-emulsyjnej, ale zwiera też zapis mówiący o możliwości zastosowania spoiw o ile wymagane parametry wytrzymałościowe nie są osiągnięte. Według tej specyfikacja wymagania dla mieszanki mineralno-emulsyjnej są następujące:

- Uziarnienie materiału ma zawierać się w jednym z przedziałów podanych w tablicy 4. 4.

Tablica 4.4. Uziarnienie mieszanki mineralnej MCE wg [8]

Sito #, mm	Mieszanka		
	Drobna	Średnia	Gruba
31,5	100	100	100
25,0	100	100	85 – 100
19,0	95 – 100	85 – 96	75 – 92
4,75	55- 75	40 – 55	30 – 45
0,6	15 – 35	4 – 14	1 – 7
0,075	1 - 7	0,6 - 3	0,1 - 3

- Próbkę wykonuje się dla trzech zawartości emulsji .
- Zagęszczenie próbek o średnicy 100 mm i wysokości 63,5 mm odbywa się w prasie gyratorowej przy kącie 1,25°, ciśnieniu 600 kPa i przy 30 obrotach.
- Próbkę umieszczane są w suszarce z nawiewem w temperaturze +60°C. Próbkę są suszone do uzyskania stałej wagi ale nie krócej niż 16 h i nie dłużej niż 48 h.
- Dla gotowych próbek określa się:
 - Gęstość pozorną,
 - Wolne przestrzenie,
 - Stabilność Marshalla w +40°C (suche próbki) nie mniej niż 5, 6 kN
 - Spadek stabilności (próbki nasycone, 23 h w wodzie w +20°C i 1 h w wodzie w +40°C) nie więcej niż 30%,
 Dodatkowo można określić:
 - Odporność na spękania niskotemperaturowe,
 - Odporność na rozluźnienie (*raveling*).
- Optymalna zawartość emulsji jest dobierana na podstawie wyników badań.

Mallick i wsp. [18, 19, 20] opisali doświadczenia związane z opracowywaniem metody projektowania mieszanki wykorzystywanej do recyklingu na miejscu. Na podstawie tych badań można stwierdzić, że:

- **Destrukt** powinien być nie grubszy niż 31,5 mm. Nie dodawano kruszywa doziarniającego.
- **Środki wiążące.** W trakcie badań wykorzystywano jako środki wiążące emulsję, cement, emulsję +wapno oraz emulsję + cement.

- **Zagęszczenie próbek** odbywało się w prasie gyratorowej przy 75 obrotach (prasa wg wymagań SUPERPAVE). Po zagęszczeniu próbki przechowywane przez 7 dni w suszarce w temperaturze +40°C.
- **Wilgotność.** Optymalną wilgotność określono na podstawie gęstości pozornej oraz modułu sztywności wyznaczonego podczas pośredniego rozciągania.
- **Emulsja i środki wiążące** zostały dobrane na podstawie gęstości pozornej oraz modułu sztywności wyznaczonego podczas pośredniego rozciągania. Dodatkowo można określić:
 - Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie.
 - Wskaźnik wytrzymałości na pośrednie rozciąganie (stosunek wytrzymałości dla próbek suchych do wytrzymałości próbek wilgotnych).
 - Odporność na działanie wody w oparciu o ASHTO T 283.

Doświadczenia przeprowadzone przez Malicka i wsp. pokazały, że najlepsze rezultaty uzyskano przy połączeniu emulsji z cementem lub wapnem.

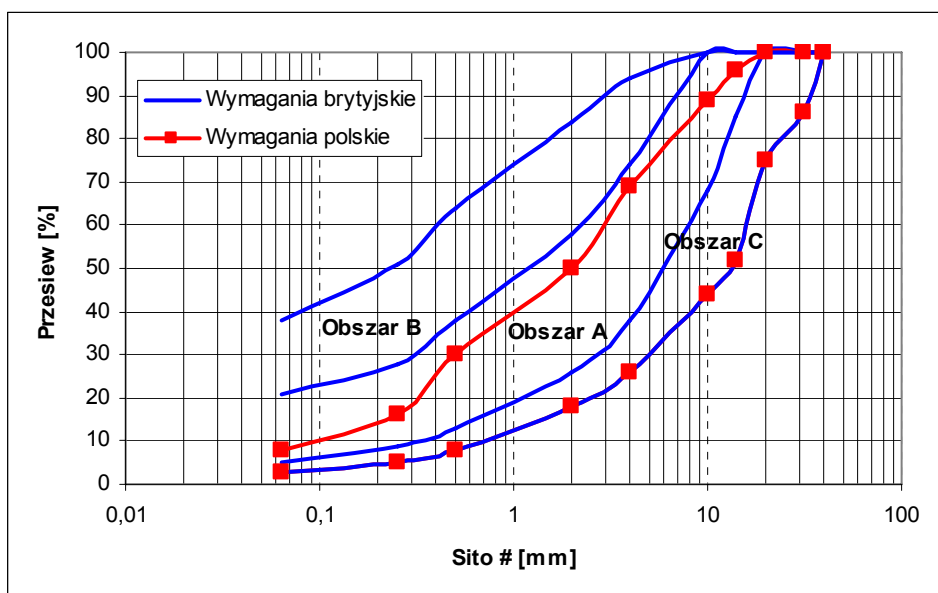
4.6. Doświadczenia brytyjskie

Doświadczenia angielskie opisano w pracy [22]. Praca ta stanowi wynik trzyletnich badań nad opracowaniem zasad do stosowania materiałów powstałych w wyniku recyklingu naziemno, zarówno z cementem, jak i cementem i asfaltem. W dalszej części zostaną omówienie doświadczenia dotyczące tylko mieszanek wykonywanych na zimno zawierających cement i asfalt (w postaci emulsji asfaltowej).

Wymagania angielskie dla mieszanek

- **Ruch.** Stosowanie warstw konstrukcyjnych wykonanych z materiałów recyklowalnych nie jest praktycznie ograniczone, ale zaleca się aby wraz ze wzrostem obciążeń oceniać ryzyko wystąpienia uszkodzeń związanych ze stasowaniem tych warstw.
- **Zawartość asfaltu** powinna wynosić minimum 3,0 %.
- **Zawartość cementu** powinna wynosić minimum 1 %.
- **Mieszanka mineralna** według [22] w 1999 roku Milton i Earland określili dwa obszary uziarnienia destruktu wyznaczające jego przydatność do wykonania recyklingu na zimno. Strefa A ogranicza pole dobrego uziarnienia z maksymalnym wymiarem ziarna równym 50 mm. Materiały, których krzywe uziarnienia znajdują się w strefie B są drobniej uziarnione w porównaniu ze strefą A. Ich wykorzystanie w procesie recyklingu na zimno jest dopuszczalne po przeprowadzeniu badań potwierdzających możliwość wytworzenia z nich jednorodnej mieszanki MCE. Podczas prac nad wytycznymi [22] zweryfikowano krzywe podane przez Milтона i Earlanda pod kątem wymagań europejskich określając dodatkowy obszar uziarnienia C. Materiały z tej strefy uznane są za podatne na segregację, jednakże możliwe jest ich wykorzystanie w procesie recyklingu na miejscu. Według Milтона i Earlanda właściwości mieszanek recyklingu na zimno związanych lepiszczami bitumicznymi w dużym stopniu zależą od zawartości frakcji pyłowej. W procesie wytwarzania mieszanki zbyt duża ilość drobnych cząstek może doprowadzić do niewystarczającego otoczenia ziaren o większych wymiarach. Z tego powodu autorzy poradnika zalecają ograniczenie zawartości cząstek mniejszych od 0,075 mm do przedziału 5-20 %. W razie konieczności korekcji zbyt grubego uziarnienia uzyskanego destruktu można użyć do tego celu

piasku lub popiołów lotnych. Porównanie uziarnień poszczególnych stref z wymaganiami polskimi przedstawiono na rysunku 4.7.



Rysunek 4.7. Porównanie krzywych granicznych wg wymagań polskich [2] i wymagań brytyjskich [22]

Polskie wymagania dla uziarnienia mieszanek mineralnych MCE pokrywają się w znacznej mierze z obszarem A, uznanym za najlepszy do recyklingu ale w całości obejmują też obszar C, który zwiera mieszanki mające tendencje do rozsegrowania się.

Wymagania brytyjskie nie podają szczegółowej procedury projektowania składu mieszanek MCE. Określono jedynie wymagania jakie powinna posiadać mieszanka MCE po roku od wbudowania, ponieważ mniejsze znaczenie ma to jak osiągnie się zamierzony rezultat. Ważne jest aby osiągnąć cechy niezbędne do dobrego funkcjonowania warstwy z mieszanki MCE.

Wymagania brytyjskie określają wymagania dla modułu sztywności sprężystej ITSM po roku od wbudowania mieszanki MCE. Są to następujące wymagania:

Mieszanka klasy B1	1900 MPa
Mieszanka klasy B2	2500 MPa,
Mieszanka klasy B3	3100 MPa.

Moduł sztywności określa się w warunkach laboratoryjnych a następnie stosując współczynniki określa spodziewaną wytrzymałość po roku od wbudowania. Dla mieszankę MCE współczynnik ten wynosi 1,2.

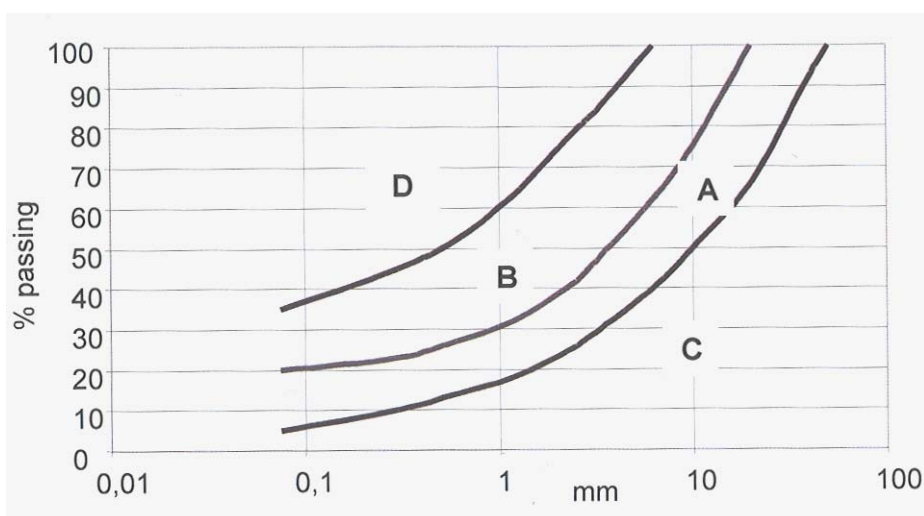
W warunkach laboratoryjnych próbki o średnicy 150 mm, po zagęszczeniu, przechowywane są przez 28 dni w temperaturze +40°C następnie poddaje się badaniom modułu sztywności. Dodatkowo bada się spadek parametrów po 7 dniach przechowywania próbek w wodzie, w temperaturze +20°C. Badane parametry nie mogą być mniejsze od 80% wartości cech określonych przed przechowywaniem w wodzie.

4.7. Zalecenie PIARC

W 2003 roku pod auspicjami PIARC wydano we Francji w 2003 roku przewodnik do recyklingu [25]. Publikacja ta obejmuje między innymi recykling na miejscu z cementem oraz recykling na miejscu z emulsją. Znamienne jest, że w wymaganiach stwierdzono **aby materiał z recykling z cementem i emulsją w przypadku zawartości cementu powyżej 2 % traktować jak stabilizację cementem**, ze względu zbliżone do stabilizacji cementem właściwości. Należy w takim przypadku stosować badania odpowiadające stabilizacji cementem.

Wymagania wg PIARC są następujące:

1. **Grubość warstwy** wykonywanej z mieszanki MCE powinna być ograniczona ze względu na jednorodność wymieszania i późniejsze zagęszczenie warstwy. Nie należy stosować warstw grubszych od 25 cm.
2. **Materiał** do recyklingu, pod względem uziarnienia dzieli się na kilka klas, co przedstawiono na rysunku 4.9.
3. **Emulsja** stosowana do mieszanek MCE powinna zawierać asfalt z przedziału od 70/100 do 180/220. Rodzaj stosowanego asfaltu w emulsji powinien zależeć od klimatu oraz przewidywanych obciążeń.
4. **Procedura projektowa** obejmuje sprawdzenie następujących elementów:
 - Materiał, jego jednorodność, uziarnienie plastyczność części drobnych, zawartość starego asfaltu w materiale,
 - Dobór nowego lepiszcza
 - Określenie zgodności lepiszcza z kruszywem,
 - Określenie zawartości płynów (asfalt+woda) w mieszance ze względu na zagęszczanie,
 - Określenie zawartości płynów (asfalt+woda) w mieszance ze względu na otoczenie kruszywa,
 - Wybór optymalnego składu ze względu na zawartość płynów.
 - Badanie cech mechanicznych wybranej mieszanki MCE.



Rysunek 4.9. Strefy uziarnienia według wymagań PIARC [25]
Strefa A – idealna, strefa B – akceptowalna, strefa C – materiał za gruby, wymaga korekty,
strefa D – materiał nie nadaje się, jest za drobny

5. **Zawartość płynów** (asfalt+woda) ze względu na zagęszczenie może być określona metodą zmodyfikowaną Proctora, poprzez zagęszczenie statyczne lub w prasie gyratorowej.
6. **Cechy mechaniczne** określa się dla próbek w stanie suchym i dla próbek po kondycjonowaniu w wodzie. Spadek określanych cech (wytrzymałości lub modułów) nie powinien być większy jak 25 -30%.
7. **Nie podano jednoznacznych wymagań wytrzymałościowych** dla mieszanek MCE. Pozostawiono dowolność testów. Można określać wytrzymałość na pośrednie rozciąganie, które dla mieszanek MCE powinno wynosić od 0,4 do 0,8 MPa (Kanada). Można określać moduł sprężystości, który dla mieszanek MCE zawierających w graniach 75-90% destruktu asfaltowego powinien wynosić od 2000 do 3000 MPa (Francja). Sposób oceny wytrzymałości badanej mieszanki MCE powinien zależeć od doświadczeń jaki posiada Administracja danego kraju.

4.8. Zalecenia PARAMIX

W latach 2001 – 2004 pod auspicjami Unii Europejskiej został wykonany projekt PARAMIX. Był to projekt poświęcony opracowaniu technik recyklingu nawierzchni asfaltowych. Jedną z metod recyklingu nawierzchni był recykling na zimno.

Procedura do projektowania mieszanek recyklingu na zimnego, na miejscu opracowana w ramach projektu PARAMIX przedstawia się następująco:

1. **Destruk** powinien być poddany następującym badaniom:
 - Uziarnienie należy określić dla otoczonych ziaren kruszywa., pochodzących bezpośrednio z frezowania.
 - Należy zbadać penetracje i temperaturę mięknięcia PiK starego asfaltu pochodzącego z destruktu.
2. **Emulsja** powinna być tak dobrana aby dobrze otoczyć kruszywo oraz posiadać dobrą adhezję do kruszywa.
3. **Cement – projekt PARAMIX nie przewiduje użycia cementu.**
4. **Wilgotność optymalna** ze względu na zagęszczenie powinna być określona zmodyfikowaną metodą Proctora. Wartość ta może zostać zmodyfikowana aby osiągnąć lepsze otoczenie oraz lepszą adhezję.
5. **Próbki** o średnicy 101,6 mm i wysokości 50 – 60 mm można przygotować dwoma metodami:
 - Poprzez zagęszczanie statyczne przez zagęszczenie siłą przykładaną z prędkością 1,27 mm/min aż do osiągnięcia 60 kN. Siła ta jest utrzymywana przez 2 minuty.
 - W prasie gyratorowej poprzez zagęszczenie 300 obrotami. Próbkę zagęszcza się stosując naprężenie 600 kPa oraz kąt pochylenia 1,25°.
 - Po zagęszczeniu próbki są przechowywane w temperaturze +60°C przez 3 dni.
6. **Badanie materiału** przeprowadza się na dwa sposoby:
 - Poprzez określenie na próbkach suchych wytrzymałości na pośrednie rozciąganie. Wytrzymałość określa się w temperaturze +5°C. Próbki bezpośrednio przed badaniem kondycjonuje się przez minimum 4 godziny.
 - Poprzez określenie na próbkach poddanych działaniu wody wytrzymałości na pośrednie rozciąganie. Wytrzymałość określa się w temperaturze +5°C. Próbki, bezpośrednio przed badaniem, przechowuje się przez 24 godziny

w wodzie w temperaturze +60°C, następnie suszy w powietrzu przez 8 -12 godzin. Bezpośrednio przed badaniem kondycjonuje się je w temperaturze +5°C przez minimum 4 godziny.

7. **Wytrzymałość** określa się poprzez wytrzymałość na pośrednie rozciąganie. Minimalna wartość powinna być nie mniejsza niż 1,0 MPa. Po kondycjonowaniu w wodzie próbki powinny wykazać wytrzymałość większą od 75 % wytrzymałości początkowej.

4.9. Podstawowe cechy MCE w świetle studiów literatury

Przeprowadzone studia literatury pozwalają na wyróżnienie kilku ważnych etapów określania składu mieszanek mineralno-asfaltowych. Etapy, które trzeba rozważyć podczas projektowania mieszanek MCE to:

1. **Dobór środka wiążącego.** W mieszankach MCE wykorzystuje się zarówno cement jak i emulsję. Stosowanie tych środków ma na celu polepszenie parametrów mieszanki MCE ale pociąga za sobą również pewne konsekwencje, które mają wpływ na późniejszą eksploatację nawierzchni. Parametry materiałów naturalnych można polepszyć stabilizując je spoiwami hydraulicznymi – cementem, wapnem bądź popiołami lotnymi. Dzięki ich krystalicznym wiązaniom zwiększa się moduł, wytrzymałość na ściskanie oraz odporność na działanie wody. Z powodu dużej sztywności warstwy związane spoiwami hydraulicznymi dobrze rozkładają naciski od obciążeń zewnętrznych na podłoże. Ma to niestety również skutki ujemne. Zjawisko skurczu towarzyszące procesowi wiązania przyczynia się do powstawania tuż po wykonaniu spękań poprzecznych, których intensywność zwiększają naprężenia temperaturowe. Warstwy wykonane z niewielką ilością spoiwa (np. stabilizacje cementem) w miarę postępującego czasu i ilości obciążeń ulegają stopniowej fragmentacji tak, że pod koniec okresu eksploatacji ich cechy materiałowe zbliżone są do parametrów gruntów lub kruszyw użytych do wytworzenia mieszanki. Drugim typem środków wiążących stosowanych powszechnie w drogownictwie są lepiszcza bitumiczne. Wprowadzone do materiałów rozdrobnionych zwiększają ich wewnętrzną spójność poprzez „sklejenie” poszczególnych ziaren. Dzięki temu warstwy bitumiczne są podatne i nie narażone na spękania skurczowe. Asfalty są materiałami o charakterze lepko-sprężystym, których parametry (lepkość, moduł) zmieniają się wraz z temperaturą oraz czasem obciążenia. Przenosi się to na zachowanie wykonanych z ich użyciem warstw, mogących doznawać trwałych deformacji w wysokich temperaturach i wolnym ruchu ciężkich pojazdów. W skład mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych wchodzi oba typy wyżej opisanych - o nieco „przeciwstawnych” właściwościach - środków wiążących. Charakter pracy warstw wykonanych z mieszanek MCE będzie zatem zależał od wzajemnych proporcji lepiszcza bitumicznego i cementu. W przypadku większego wpływu lepiszcza asfaltowego niż cementu uzyskuje się warstwę o charakterze podatnym; w przeciwnym razie podbudowa wykonana z MMCE będzie posiadać cechy zbliżone do warstwy sztywnej. Przykładem rozgraniczenia rodzaju wiązań dominujących są wytyczne niemieckie [4] wyróżniają dwa rodzaje mieszanek MCE: typ B1 o dominującym wpływie wiązania bitumicznego oraz B2 o dominującym wpływie wiązań hydraulicznych. Za kryterium kwalifikującym daną mieszankę do określonej grupy przyjmowany jest moduł sztywności w 5°C, który dla typu B1 powinien

zawierać się w przedziale od 3000 do 7000 MPa (po 28 dniach od wytworzenia). Dla typu B2 wartości te wynoszą odpowiednio 7000 i 12 500 MPa. Obawa przed przesztywnieniem mieszanki MCE uwidoczniła się w licznych publikacjach. Według autorów prac [25, 26] optymalną pod względem ekonomicznym i technicznym ilością cementu jest 2% (w stosunku do masy destruktu i kruszywa). Jeszcze bardziej radykalne podejście cechuje podręcznik [27]. Zalecana w nim zawartość cementu wynosi jedynie 1,5%, zaś wielkość 2% dopuszcza się jako wyjątkowe maksimum. Cement dodany w takiej ilości ma za zadanie głównie przyspieszyć rozpad emulsji, a nie zwiększyć radykalnie własności mechaniczne.

- 2. Określenie wilgotności optymalnej.** Dobór zawartości środków wiążących nie jest jedynym zagadnieniem, które należy rozwiązać. Bardzo ważnym etapem projektowania składu MMCE jest określenie właściwej wilgotności optymalnej. Dla tradycyjnych materiałów drogowych – gruntów i kruszyw – jedynym smarnym środkiem ułatwiającym wzajemne przemieszczanie ziaren, a tym samym ułatwiającym zagęszczenie, jest woda. W mieszankach recyklingu na zimno sytuacja ta jest bardziej skomplikowana, ponieważ na fazę płynów składa się zarówno woda, jak i emulsja asfaltowa. Z tego powodu, terminem częściej stosowanym dla mieszanek MCE jest optymalna zawartość płynów (Optimum Fluid Content - OFC) niż wilgotność optymalna. W przypadku mieszanek MCE wyróżnia się dwie metody określania wartości OFC, którą określa się dla mieszanki destruktu i kruszywa doziarniającego wraz z określoną ilością cementu. Pierwsza metoda opiera się na normalnym lub zmodyfikowanym badaniu Proctora. Sposób ten posiada jednak liczne wady. Najpoważniejszą z nich jest rozkruszanie w czasie przeprowadzania testu względnie słabych ziaren destruktu asfaltowego na mniejsze fragmenty. W ten sposób, już w czasie badania następuje zmiana parametrów mieszanki, której uziarnienie staje się coraz bardziej drobne. Poza tym, badanie Proctora jest zoptymalizowane pod kątem gruntów i kruszyw, materiałów które zawierają w porównaniu z mieszanką MCE relatywnie dużo frakcji drobnych. Z tego powodu, wartość OFC uzyskana bezpośrednio z badania musi zostać skorygowana. Polskie przepisy [2] wymagają zmniejszenie określonej przy pomocy zwykłej metody Proctora wartości wilgotności optymalnej o 2%. W przypadku zastosowania metody zmodyfikowanej poprawka ta nie jest konieczna. W niemieckich wytycznych [4] dostrzeżono problem rozdrabniania destruktu podczas udarowego zagęszczania w cylindrze Proctora, dlatego zawierają one zalecenie, aby optymalna zawartość płynów była określana stosując zagęszczanie statyczne. Inną możliwością wyznaczenia OFC jest wykorzystanie do tego prasy gyratorowej. Metodę tę opisano w pracy [24]. Sposób ten został opracowany z myślą o mieszankach recyklingu na zimno wytwarzanych jedynie z emulsją asfaltową, jednak możliwe jest też wykorzystanie go do badań mieszanek MCE. Schemat postępowania składa się z dwóch faz – w pierwszej określa się optymalną zawartość emulsji asfaltowej, a następnie optymalną zawartość wody. Badanie wymaga sprawdzenia kilku składów mieszanki różniących się ilością dodanej emulsji lub wody. Dla zagęszczonych i poddanych kondycjonowaniu próbek wykonuje się oznaczenie gęstości strukturalnej, objętościowej oraz zawartości wolnych przestrzeni. Za optymalną zawartość płynów przyjmuje się tę, przy której otrzymywana jest maksymalna gęstość strukturalna. Sposób zagęszczania przy pomocy prasy gyratorowej posiada niewątpliwą zaletę, jaką jest

rozdrabnianie ziaren destruktu w stopniu znacznie mniejszym, niż dzieje się to w przypadku ubijaka Proctora. Poza tym, urządzenie Superpave Gyrotory Compactor umożliwia ciągły zapis wysokości próbki, tym samym dostarczając informacji o dynamice procesu zagęszczania w zależności od zawartości płynów.

3. **Wykonanie próbek w laboratorium.** Zadaniem każdego procesu projektowego jest wcześniejsze określenie części składowych danego produktu tak, aby po wykonaniu posiadał wymagane parametry. W przypadku materiałów drogowych osiągnięcie tego celu jest możliwe, poprzez wytwarzanie i badanie mieszanek w laboratorium, w warunkach zbliżonych do tych z realizacji i eksploatacji. Sposób zagęszczania próbek MCE w laboratorium musi zatem pozwalać na uzyskiwanie gęstości i wolnych przestrzeni zbliżonych do wartości występujących w zagęszczonych warstwach nawierzchni. W tym celu stosuje się szereg metod zagęszczania próbek, takich jak:

- **Zagęszczanie ubijakiem Marshalla.** Metoda ta wykorzystuje tradycyjny ubijak Marshalla stosowany do zagęszczania mieszanek mineralno-bitumicznych. Średnica i wysokość próbek wynoszą odpowiednio 101,6 mm i 63,5 mm. Ze względu na zawartość płynów w MCE formy używane do wytwarzania próbek muszą być perforowane (wg [2] 24 otwory o średnicy 2 mm oraz po 16 otworów w podstawie i tłoku) aby wraz z postępującym zagęszczeniem możliwy był odpływ wody. Próbkę najczęściej zagęszcza się stosując 75 uderzeń na każdą stronę próbki [2, 28, 43], jednak nie jest to regułą. W amerykańskiej metodzie projektowania mieszanek recyklingu na zimno [24] oraz w Japonii [5] stosuje się po 50 uderzeń na każdą stronę próbki. Bez wątpienia, zaletą zagęszczania ubijakiem Marshalla jest dostępność sprzętu, obecnego w każdym laboratorium badającym mieszanki mineralno-bitumiczne. Z drugiej strony, metoda ta posiada szereg wad. Wymiary form są relatywnie niewielkie w porównaniu z rozmiarem ziaren jakie mogą pojawić się w destrukcie asfaltowym, zaburzając tym samym jednorodność próbek. Pomimo obecności otworów w ściankach form, w momencie zetknięcia ubijaka z tłokiem energię uderzenia tłumią płyny (woda i emulsja) obecne w MCE. W efekcie gęstość strukturalna tak zagęszczanych próbek jest mniejsza niż warstwy wykonywanej na budowie. Podczas weryfikacji metody opracowanej przez Zespół Roboczy 38 AASHTO w ramach prac URI [24], zawartość wolnych przestrzeni w próbkach zagęszczanych ubijakiem sięgała aż 17% (przy zalecanym przez tę metodę zakresie 9-14%). Obniżona gęstość strukturalna i zwiększone wolne przestrzenie pogarszają parametry wytrzymałościowe mieszanek MCE badanych w laboratorium.
- **Prasa statyczna.** Zagęszczenie próbek MCE przy wykorzystaniu prasy statycznej można prowadzić na dwa sposoby. Pierwszy polega na utrzymywaniu stałego obciążenia przez określony okres czasu. Oczywiście również w tym przypadku formy używane do wytwarzania próbek muszą umożliwiać odprowadzenie wody, aby naprężenie wywołwane naciskiem tłoka nie było absorbowane przez „zamkniętą” w mieszanke fazę płynną. Wielkość przykładowej siły osiowej różni się w poszczególnych krajach. Według [2] jej wartość powinna wynosić 100 kN (formy Marshallowskie o średnicy 101,6 mm), którą należy utrzymywać

przez 5 minut. Natomiast w końcowym raporcie z programu PARAMIX [21] wielkości te wynoszą, przy tych samych wymiarach próbek, jedynie 60 kN i 2 minuty. Drugi sposób – cykliczny – opisano w wytycznych [4] i przedstawiono w punkcie 4.2. Na próbkę przykładana jest siła o wartości 49 kN wywołująca w próbce naprężenie 2,9 MPa (średnica formy wynosi 150 mm). Stopniowe wyciskanie wody z mieszanki powoduje spadek naprężeń. Po ich ustabilizowaniu ponownie przykładana się siłę 49 kN wywołującą ciśnienie 2,9 MPa. Cykle obciążeń powtarza się tyle razy, aby końcowa wartość naprężenia wyniosła 2,6 MPa (odpowiada to sile 45 kN). Poziom ten jest zwykle osiągnięty po 5-7 taktach obciążeniowych (rys. 4.5). Prasa statyczna pozwala na osiągnięcie gęstości strukturalnej i zawartości wolnych przestrzeni na poziomie znacznie bliższym wielkościom występującym w nawierzchni niż ubijak Marshalla, ponieważ płyny znajdujące się w mieszance wpływają w niewielkim stopniu na zagęszczanie. Co więcej, wytwarzane próbki mogą mieć większe rozmiary (d=150 mm x h=125 mm; d=150 mm x h=75 mm), bardziej odpowiednie dla mieszanek zawierające ziarna o dużych średnicach. Nie bez znaczenia jest również fakt, iż prasy statyczne są stosunkowo dobrze rozpowszechnione w laboratoriach drogowych.

- **Prasa gyratorowa.** Niedoskonałości zagęszczania mieszanek recyklingu na zimno ubijakiem Marshalla zmusiły badaczy Uniwersytetu Rhode Island [24] do poszukiwania nowych rozwiązań. Uwagę zwrócono na Superpave Gyratory Compactor, urządzenie będące nieodłączną częścią metody projektowania mieszanek mineralno-asfaltowych SUPERPAVE. Proces zagęszczania w SGC charakteryzują trzy wartości: obciążenie pionowe, kąt odchylenia i liczba obrotów. Dla mieszanek recyklingu na zimno dwa pierwsze parametry są równe wielkościom obowiązującym przy zagęszczaniu mieszanek mineralno-bitumicznych – obciążenie pionowe 600 kPa, kąt nachylenia 1,25 stopnia. Natomiast ilość obrotów nie została dotąd ściśle zdefiniowana. Liczba ta powinna być tak dostosowana, aby gęstość strukturalna próbek zagęszczanych w laboratorium odpowiadała gęstości uzyskiwanej w trakcie budowy. Według badaczy amerykańskich [24], odpowiednie zagęszczenie osiągnięte jest po 50 obrotach próbek o średnicy 150 mm. Podobne wartości proponuje Mallick – 50 lub 75 obrotów [18, 19, 20]. Odmienne poglądy cechują badaczy europejskich. W końcowym raporcie z programu PARAMIX [21] liczba obrotów wynosi aż 300, zaś w pracy [29] za właściwy poziom uznaje się 200 obrotów. Nieco mniejszą wartość, 100 obrotów, stosowali autorzy pracy [30]. Wprowadzenie metody gyratorowej zagęszczania do procedury projektowania mieszanek recyklingu na zimno wymaga przeprowadzenia doświadczeń korelacyjnych w celu znalezienia właściwej liczby obrotów.
- **Zagęszczanie ubijakiem Proctora.** W publikacji firmy WIRTGEN [27] opisano możliwość wykonywania próbek o średnicy 150 mm przy wykorzystaniu standardowego ubijaka Proctora. Metoda ta jest zalecana w przypadku projektowania recepty recyklingu na zimno nawierzchni, której przewidywane obciążenie jest większe niż 5 mln ESALs. Mieszankę MCE zagęszcza się w 5 warstwach tak, aby końcowa wysokość próbki wyniosła 125 mm. Każdą warstwę ubija się 55 uderzeniami ubijaka o masie 4,536 kg spadającego z wysokości 457 mm.

Po zakończeniu zagęszczania należy delikatnie ściąć nadmiar materiału. Ze względu na niewielką kohezję świeżej mieszanki, wyciśnięcie próbek z form może nastąpić następnego dnia. Ubijak Proctora należy do podstawowych urządzeń laboratoryjnych, jednak użycie go zagęszczenia mieszanek zawierających destruktor powoduje rozdrabnianie ziaren, tym samym wpływając na parametry wytrzymałościowe gotowych próbek. Dodatkowo, podczas projektowania receptury mieszanki należy wykonać próbki dla kilku różnych zawartości środków wiążących, co powoduje konieczność posiadania dużej liczby cylindrów Proctora.

- 4. Kondycjonowanie próbek.** Z uwagi na użycie w MCE emulsji asfaltowej oraz cementu, parametry wytrzymałościowe zmieniają się czasie – wzrastają wraz z wyparowywaniem wody i postępującym wiązaniem spoiwa hydraulicznego. Ocena poszczególnych cech mieszanki musi następować w momencie, w którym procesy te są już zakończone lub ich przyrost jest znacznie spowolniony. Warunki przechowywania próbek powinny więc pozwalać na ich prawidłowy przebieg. Wytyczne niemieckie [4] nakazują wyciskanie próbek z form na drugi dzień po zagęszczeniu i przechowywanie przez 2 kolejne dni w komorze o wilgotności względnej powietrza 95% i temperaturze +20°C. (+/- 2). Po 3 dniu, wilgotność względna powietrza w jakim przechowywane są próbki może już spaść do zakresu 40 – 70%. Badania kwalifikujące przeprowadza się w 7 i 28 dniu przechowywania. Polskie warunki [2] przewidują z kolei 28 dniowy okres przechowywania (w temperaturze +20°C) jedynie dla próbek zagęszczanych ubijakami Marshalla; badania próbek wykonywanych przy użyciu prasy statycznej przeprowadza się już po 7 dniach od zagęszczenia. Co więcej, zeszyt [2] w ogóle nie przewiduje przechowywania próbek w kąpeli wodnej w celu określenia wrażliwości projektowanej mieszanki na wpływ wilgoci. W metodzie niemieckiej okres zanurzenia w wodzie wynosi 14 dni i następuje po również 14 dniowym przechowywaniu w warunkach analogicznych jak próbki do badań 28 dniowych. Inne podejście do kwestii kondycjonowania występuje w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej. Bardzo ważnym czynnikiem brany pod uwagę jest czas, jaki należy poświęcić na zaprojektowanie receptury roboczej – niemal miesięczny okres (28 dni) oczekiwania na możliwość przeprowadzenia badań zostałby uznany za zbyt długi. W analizie metody projektowania mieszanek recyklingu na zimno [24] poddano krytyce nawet 8 dniowy czas trwania procedury przygotowania próbek i badań. Poza tym, remonty dróg w technologii recyklingu na zimno w USA w większości przypadków przeprowadza się jedynie z użyciem emulsji asfaltowej, wobec czego nie jest konieczne oczekiwanie na zakończenie procesu wiązania cementu. W celu osiągnięcia finalnych parametrów mieszanki w krótkim czasie próbki najczęściej przechowuje się w temperaturze 60°C przez okres 48-72 h. Podwyższona temperatura wzmaga parowanie wody (zarobowej i pochodzącej z emulsji) przyspieszając zjawisko koagulacji drobin asfaltu.
- 5. Badanie laboratoryjnych cech MCE.** Badania laboratoryjne projektowanych mieszanek drogowych pozwalają na wybór recepty zapewniającej spełnienie w jak największym stopniu wymagań. Najlepszą sytuacją byłoby poddawanie analizowanych materiałów oddziaływaniom takim samym, jakie występują w prawdziwej nawierzchni drogowej. Możliwe jest to jedynie w przypadku badań w wielkiej skali, które są jednak bardzo czasochłonne i kosztowne. Poza tym, praktycznie niemożliwe jest zasymulowanie wszystkich czynników (zmienność

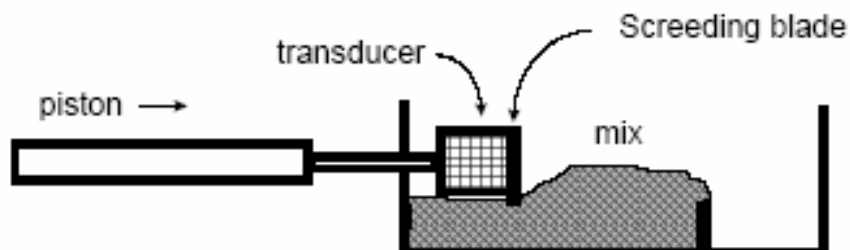
temperatury, obciążenia) wpływających na pracę i trwałość nawierzchni. Z tego powodu, aby dysponować pewnymi kryteriami służącymi od oceny materiałów można zastosować jedną ze znanych metod badawczych. W literaturze można znaleźć opisy następujących metod badawczych stosowanych do oceny mieszanek MCE:

- **Stabilność.** Badanie to pochodzi w prostej linii z podstawowego sposobu projektowania mieszanek mineralno-bitumicznych, metody Marshalla. Podstawową temperaturą w jakiej przeprowadza się badanie mieszanki mineralno-asfaltowych jest $+60^{\circ}\text{C}$. W niektórych metodach projektowania mieszanek recyklingu na zimno, z emulsją przewidziano temperaturę $+25^{\circ}\text{C}$. Zeszyt [2] zawiera dwie minimalne wartości stabilności, jakie muszą przekroczyć próbki wykonane z MCE. Dla mieszanek przeznaczonych dla dróg o natężeniu ruchu KR1-2 stabilność ($+60^{\circ}\text{C}$) nie powinna być mniejsza niż 4 kN, natomiast dla dróg o natężeniu ruchu KR3-6 wielkość ta wynosi 8 kN. Dla obu przypadków górna granica równa jest 20 kN. Polskie wymagania dotyczące stabilności są bardzo wygórowane. W badaniach prowadzonych w Stanach Zjednoczonych [24] dla mieszanek mineralno-emulsyjnych stabilność w $+25^{\circ}\text{C}$ zawierała się w przedziale 5,1 – 8,2 kN. Wymagania amerykańskie [8] podają, że w $+40^{\circ}\text{C}$ stabilność powinna być wyższa od 5,6 kN. Badania stabilności stroje się do mieszanek mineralno-emulsyjnych. W literaturze nie spotkano informacji o wykonywaniu oznaczenie stabilności wg Marshalla dla mieszanek MCE. Dążenie do zapewnienia wysokiej stabilności może prowadzić do niekorzystnego zwiększania zawartości cementu w mieszance MCE, prowadząc do powstawania spękań skurczowych w wykonanej warstwie.
- **Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie– Indirect Tensile Strength.** Badanie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie ITS (w jęz. niemieckim wytrzymałość na rozłupywanie), zwane metodą brazylijską, jest najpopularniejszą metodą służącą do oceny mieszanek recyklingu na zimno. Metoda ta jest prosta i nie wymaga użycia skomplikowanych urządzeń. Do jej przeprowadzenia potrzebna jest prasa statyczna oraz ramka z ruchomymi szczękami pozwalającymi na równomierne ściskanie próbki. W zależności od wielkości ramki możliwe jest badanie zarówno próbek typu Marshalla (średnicy 101,6 mm i wysokości 63,5 mm), jak i próbek o średnicy 150 mm [4, 23]. Jest to duża zaleta tej metody, ponieważ większe rozmiary próbek pozwalają na osiąganie lepszej powtarzalności wyników przy badaniu stosunkowo niejednorodnego materiału jakim jest MCE zawierająca destrukcję asfaltową. Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie mieszanek recyklingu na zimno zależy od rodzaju środków wiążących i temperatury przeprowadzania badania. Praca [28] zawiera zestawienie średnich wartości ITS dla mieszanki wytworzonej jedynie z emulsją asfaltową (3,5% zawartości asfaltu) – 0,2 MPa – oraz mieszanki MCE (3,5% zawartości asfaltu, 2% cementu) – 0,5 MPa. Wielkości te ulegają około dwukrotnemu zmniejszeniu w przypadku badania próbek przechowywanych w wodzie – 0,08 MPa i 0,25 MPa. Podobne wartości podają wytyczne niemieckie [4], wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek 7 dniowych nie może być mniejsza niż 0,5 MPa (w temperaturze 5 st. C), a próbek 28 dniowych 0,75 MPa. Dodatkowy warunek określa maksymalny spadek wytrzymałości ITS po

zanurzeniu w wodzie – nie więcej niż 30% w stosunku do próbek przechowywanych „na sucho”. W ramach programu PARAMIX [21] określono minimalne wymaganie dla wytrzymałości na pośrednie rozciąganie na 1 MPa, a spadek wytrzymałości nie więcej niż o 30%

- **Wytrzymałość na ściskanie.** Kryterium wytrzymałości na ściskanie jest klasycznym badaniem przeznaczonym dla materiałów związanych spoiwami hydraulicznymi. Istnieje jednak możliwość wykorzystania go przy badaniu mieszanek recyklingu na zimno. W pracy [26] porównano wyniki wytrzymałości na ściskanie próbek wytworzonych z czystego destruktu i emulsji asfaltowej zarówno bez, jak i z 2% dodatkiem cementu. Badanie przeprowadzono na próbkach zagęszczanych ubijakiem Proctora (d=110,6 x h=116,6 mm) metodą normalną i zmodyfikowaną. Prędkość posuwu tłoka podczas badania wytrzymałości wynosiła 10 mm/min. Po 7 dniach od zagęszczenia, wytrzymałość na ściskanie mieszanki MCE zawierała się w przedziale 0,22 – 0,54 MPa, zaś po 28 dniowym okresie wiązania 0,69 – 0,83 MPa. Wytrzymałość próbek wytworzonych jedynie z emulsją była znacząco niższa – oscylowała wokół wartości 0,2 MPa i nie wzrosła po 28 dniach przechowywania. Oba rodzaje mieszanek wykazały wyraźną zależność otrzymanywnych wyników od energii zagęszczenia.
- **Moduł sztywności.** Znajomość modułu sztywności materiału drogowego stanowiącego daną warstwę jest niezbędna w przypadku projektowania konstrukcji nawierzchni nowoczesnymi metodami mechanistycznymi. Dla nowoprojektowanych dróg badania modułu prowadzi się na próbkach wytworzonych z mieszanek wyprodukowanych w laboratorium. Istnieje również możliwość określenia tej wielkości na próbkach pobranych z już istniejącej nawierzchni. Najpopularniejszą metodą wyznaczenia modułu dla mieszanek MCE jest badanie w aparacie NAT, w którym na pobocznicy próbki o kształcie walcowym – średnicy 100 lub 150 mm - działa pionowa siła wywołująca w środkowej strefie naprężenia rozciągające. Urządzenie NAT umieszczone jest najczęściej w komorze termostatycznej, pozwalając na przeprowadzanie badań w różnych temperaturach. Nieco odmienny sposób wyznaczania modułu sztywności zawierają wytyczne [4]. Oblicza się go uwzględniając wartość odkształcenia poziomego występującego przy 45% sile niszczącej podczas badania wytrzymałości na pośrednie rozciąganie. Prawdłowo zaprojektowana mieszanka MCE powinna pozwolić na wykonanie warstwy podbudowy bez ryzyka wystąpienia spękań skurczowych będących wynikiem zbyt dużego wpływu spoiwa hydraulicznego – cementu. Z tego powodu moduł sztywności MCE nie powinien być zbyt duży. Polskie przepisy [2] nie podają jednak żadnych wskazówek dotyczących tej ważnej wielkości. Według wytycznych [4] dla mieszanek o wiązaniu dominująco bitumicznym, moduł sztywności, w temperaturze +5°C, powinien zawierać się w przedziale od 3000 do 7000 MPa. Poradnik angielski [22] podaje mniejsze wartości 1900-3100 MPa wyznaczane w temperaturze +20°C. Podobny poziom wielkości modułu przedstawiono w referacie [28] 3500 MPa (25°C.) dla mieszanki MCE zawierającej 3,5% rezydualnego asfaltu i 2% cementu.
- **Urabialność.** Szczególnym rodzajem badania mieszanek recyklingu na zimno jest opracowany przez firmę NYNAS test urabialności [29]. Służy

on do oceny możliwości ułożenia mieszanki tradycyjną rozkładarką mas bitumicznych. Po wytworzeniu mieszanki należy ją umieścić w szczelnie zamkniętym pojemniku na czas 60 minut. Następnie, porcję o masie 10 kilogramów umieszcza się w specjalnym urządzeniu, NYNAS Workability Tester, rys. 4.10, symulującym proces rozkładania na drodze. Po okresie następnym 60 minut następuje próba rozłożenia mieszanki. Miara urabialności jest siłą oporu powstała przy przesuwaniu niezagęszczonego materiału przez siłownik hydrauliczny – w przypadku planowanego użycia typowych rozkładarek siła ta nie powinna być wyższa niż 150-170 N.



Rysunek 4.10. Test urabialności w urządzeniu NYNAS Workability Tester [29]

4.10 Wnioski

Przeprowadzone studia literatury oraz przedstawione zestawienia pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Polskie wymagania pod względem badań wytrzymałościowych są bardzo wygórowane i wykorzystują mało powszechną metodą Marshalla. Powoduje to konieczność stosowania dużej ilości kruszywa doziarniącego i cementu.
2. Brak w polskich wymaganiach oceny wrażliwości na działanie wody.
3. Brak badań oceniających sztywność wytworzonej mieszanki, co może powodować uzyskiwane zbyt sztywnych mieszanek.
4. Uziarnienie mieszanki w polskich wymaganiach jest węższe od większości dopuszczalnych uziarnień stosowanych w innych krajach.
5. Należy wprowadzić badania powszechnie stosowane na świecie do tego typu mieszanek, czyli wytrzymałość na pośrednie rozciąganie. Należałoby też badać moduły sztywności.

Wydaje się, że z przedstawionych metod do warunków polskich najlepiej byłoby dostosować postępowanie przedstawione w przepisach niemieckich [4], ponieważ uwzględniają większość przedstawionych uwag. Ponadto obejmują badanie zarówno mieszanek z samą emulsją jak i z emulsją i cementem.

5. Doświadczenia ze stosowaniem podbudów z mieszanki MCE w Polsce

Technologia recyklingu starych nawierzchni pojawiła się pierwszy raz w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku w USA. Pierwsze remonty tego typu nazywano wówczas *Retreated Process*. W ciągu lat technologia recyklingu rozwijała się. Pojawiały się coraz bardziej wyspecjalizowane maszyny (recyklerzy), które z coraz większą dokładnością wykonywały procesy technologiczne związane z tego typu remontem. W miarę rozwoju technologii recyklingu wyodrębniły się jej różne rodzaje.

5.1. Ankiety dotyczące stosowania podbudowy z mieszanki MCE w Polsce

W Polsce recykling nawierzchni zaczął się na szerszą skalę w drugiej połowie lat 90-tych ubiegłego wieku. Od tego czasu recykling głęboki z zastosowaniem emulsji i cementu staje się coraz popularniejszą technologią remontu starych nawierzchni asfaltowych. Aby określić zakres stosowania mieszanek MCE w Polsce rozesłano do jednostek Administracji Drogowej ankiety dotyczące odcinków z takimi podbudowami. Przykład wypełnionej ankiety przedstawiono na rysunku 5.1. W sumie zebrano 65 ankiet. Informacje o odcinkach dróg wykonanych z podbudowami z mieszanki MCE pochodziły z następujących źródeł:

- Ankiet wypełnionych przez oddziały Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad – 56 ankiet,
- Ankiet wypełnionych przez Zarządy Dróg Wojewódzkich – 9 ankiet,
- Informacji uzyskanych od firmy Schmitt Asphalt Technik Polska Sp z o.o. – informacje o 16 odcinkach nie uwzględnionych w ankietach.

Spośród nadesłanych 64 ankiet 56 zawierały kompletne informacje o odcinkach i składzie mieszanki MCE. Informacje te posłużyły do analizy składów mieszanek MCE stosowanych w Polsce. Informacje o tym w jakich województwach wykonuje się podbudowy z mieszanek MCE przedstawiono w tablicy 5.1.

Tablica 5.1. Wykonywanie podbudów z mieszanek mineralno-asfaltowych w poszczególnych województwach

Lp.	Województwo	Informacje z GDDKiA	Informacje z ZDW
1	dolnośląskie	Nie stosuje się	Nie stosuje się
2	kujawsko-pomorskie	Stosuje się – 5 ankiet	Nie stosuje się
3	lubelskie	Brak danych	Nie stosuje się
4	lubuskie	Stosuje się – 3 ankiety	Stosuje się – 1 ankietka
5	łódzkie	Stosuje się – 1 ankietka	Brak danych
6	małopolskie	Stosuje się – 4 ankiety	Stosuje się – 1 ankietka
7	mazowieckie	Stosuje się – 9 ankiet	Stosuje się – 3 ankiety
8	opolskie	Stosuje się – 4 ankiety	Stosuje się – 1 ankietka
9	podkarpackie	Stosuje się – 5 ankiet	Nie stosuje się
10	podlaskie	Stosuje się – 6 ankiet	Nie stosuje się
11	pomorskie	Stosuje się – 4 ankiety	Nie stosuje się
12	śląskie	Nie stosuje się	Stosuje się – 1 ankietka
13	świętokrzyskie	Stosuje się – 5 ankiet	Stosuje się – 1 ankietka
14	warmińsko-mazurskie	Stosuje się – 7 ankiet	Stosuje się – 1 ankietka
15	wielkopolskie	Stosuje się – 3 ankiety	Nie stosuje się
16	zachodnio-pomorskie	Brak danych	Brak danych

**Weryfikacja zasad projektowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych
Raport końcowy**

ANKIETA
DOTYCZĄCA STOSOWANIA PODBUDOWY
Z MIESZANKI MINERALNO-CEMENTOWO-EMULSYJNEJ (MCE)

Dane ogólne o odcinku:

Administrator: *GDDKiA oddk. Bydgoszcz*
 Numer drogi: *Dk. ak. 10 Przej. Kujaw. Toruń*
 Kilometr: *km. 2.8.8 r. 0.97 - 2.96 r. 6.5.9*
 Kategoria ruchu: *K.R. 5*
 Rok wykonania: *2009*
 Generalny wykonawca: *P.B.O. m. K. Bytawina, P.R.O.S.A. Toruń*

Dane o podbudowie MCE:

Grubość warstwy z MCE: *20.0 cm*
 Grubość warstw asfaltowych: *profil... m. 3.0 cm, w. 1.0 cm, 9.0 cm, 5.0 cm, 4.0 cm*
 Wykonawca podbudowy z MCE: *S.A.T. Sp. z o.o. Olsztyn 5019 096*
 Technologia wykonania: na miejscu z rozsypaniem cementu przed recyklerem
 na miejscu z jednoczesnym mieszaniem emulsji i asfaltu w recylerze
 w wytwórni stacjonarnej
 inny sposób: *zesłał maszyną S.A.T. 2100 DCR*

Skład, o ile jest dostępny:

ilość emulsji	<i>Ek-60</i>	<i>1.0%</i>
ilość cementu	<i>3.0 Kujawy</i>	<i>3.0%</i>
ilość destruktu	<i>6.3 8.0</i>	<i>6.3%</i>
ilość kruszywa	<i>1.8 F. 1.8 r. 6.0</i>	<i>1.8%</i>

Ocena wykonywanych prac:

Czy prace były wykonywane sprawnie Tak Nie
 Czy wystąpiły problemy podczas wykonywania warstwy Tak Nie
 Jeżeli tak to jakie: *Niejednolitość kruszywa, brak mieszanki MCE*

Czy były problemy przy odbiorze warstwy Tak Nie
 Jeżeli tak to jakie:

Sprawę prowadził: dr inż. Bohdan Dołżycki, dołzycki@p.p.gda.pl, tel. 0 55 347 26 55 1/2

ANKIETA DOTYCZĄCA STOSOWANIA PODBUDOWY Z MIESZANKI MINERALNO-CEMENTOWO-EMULSYJNEJ (MCE)

Ocena wykonanego odcinka:

Czy na odcinku z podbudową z MCE wystąpiły następujące uszkodzenia:

Koleiny	<input checked="" type="checkbox"/> Nie	<input type="checkbox"/> Tak
Spękania poprzeczne	<input checked="" type="checkbox"/> Nie	<input type="checkbox"/> Tak, ile.....
Spękania podłużne	<input checked="" type="checkbox"/> Nie	<input type="checkbox"/> Tak
Obłamania krawędzi	<input checked="" type="checkbox"/> Nie	<input type="checkbox"/> Tak
Zapadnięcia	<input checked="" type="checkbox"/> Nie	<input type="checkbox"/> Tak
Uszkodzenia powierzchniowe	<input checked="" type="checkbox"/> Nie	<input type="checkbox"/> Tak

Inne uszkodzenia:

Nawierzchnia jednorodna bez zapadnięć i uskoków

Uwagi końcowe, proszę wpisać wszystko to co sprawiło trudności lub stanowiło jakiś problem w trakcie prac nad projektowaniem, wykonywaniem i odbiorem warstwy z MCE:

Wyniki z badań MCE

<i>kwadrant 1</i>	<i>2.8.8 r. 0.97</i>	<i>1.8% - 1.9% cm</i>
<i>kwadrant 2</i>	<i>2.8.8 r. 0.97</i>	<i>2.8% - 2.9% cm</i>
<i>kwadrant 3</i>	<i>2.8.8 r. 0.97</i>	<i>1.8% - 1.9% cm</i>
<i>kwadrant 4</i>	<i>2.8.8 r. 0.97</i>	<i>2.8% - 2.9% cm</i>

Opracował:
 (dane potrzebne w celu ewentualnych dalszych kontaktów):

Imię i Nazwisko: *Emilia Piotrowska*
 Telefon: *0 22 370 65 95*
 Email: *e.piotrowska@p.p.gda.pl*

Generalna Opiekun Krajowych i Autostrad:
 ODDZIAŁ w BYDGOSZCZY
 LABORATORIUM DROGOWE
 Gospodarstwo Pomocnicze
 85-085 BYDGOSZCZ, ul. Fordońska 6
 tel. (052) 370 56 70-75, 76, 77, 80, fax 370 56 71
 NIP 554-25-02-875 REGON 017511575-00258

KIEROWNIK
 LABORATORIUM DROGOWEGO
mgr inż. Mirosław Kotoniał

Sprawę prowadził: dr inż. Bohdan Dołżycki, dołzycki@p.p.gda.pl, tel. 0 55 347 26 55 2/2

Rysunek 6.1. Przykładowa, wypełniona ankieta z GDDKiA, oddział w Bydgoszczy

Zestawienie odcinków dróg wyremontowanych w technologii recyklingu na miejscu z zastosowaniem mieszanek MCE przedstawiono w tabelicy 5.2. Zestawienie opracowano na podstawie ankiet nadesłanych przez oddziały GDDKiA, ZDW i na podstawie informacji od SAT Polska. Zestawienie długości odcinków z podbudowami wykonanymi z MCE w poszczególnych latach przedstawia rysunek 5.2.

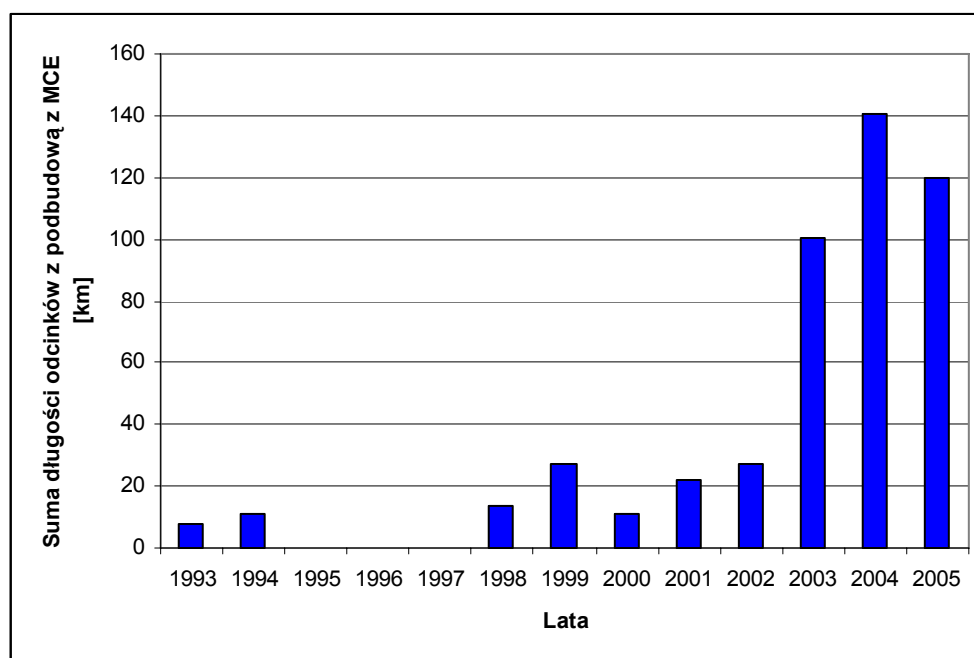
Tabela 5.2. Zestawienie wybranych odcinków głównych dróg wyremontowanych z zastosowaniem podbudów z mieszanki MCE.

Lp	Wojew.	Droga	Kilometraż		Ruch KR	Rok remontu	Skład MCE % [m/m]				Rodzaj destruktu	MCE [cm]	Nowe warstwy asfaltowe[cm]		
			od	do			E	C	D	KD			Ś	W	P
1	Wielk.	DW449	~8km		bd	1993	bd				bd	20			
2	Wielk.	DK2(92)	138+600	149+800	5	1994	bd			20(30)	bd	20	4	4	10
3	Podl.	DK61	126+087	133+945	4	1998	bd				bd	bd			
4	Lubel.	Dk 63	44+250	49+951	4	1998	bd				bd	bd			
5	Podl.	DK61	134+668	147+200	4	1999	bd				bd	bd			
6	Lubus.	DK2	8+750	23+250	6	1999(2000)	bd				bd	15			
7	Pom.	DK6	266+615	269+500	5	2000	bd				A	25	5		12
8	Zach.	DK10	67+303	74+152	4	2000	bd				bd	bd			
9	Zach.	DK 3	322+140	324+000	3	2000	bd				bd	bd			
10	Wielk.	DK2(92)	150+500	152+940	5	2001	bd				bd	20			
11	Zach.	DK3	13+150	13+810	4	2001	bd				bd	bd			
12	Zach.	DK31	41+680	46+810	4	2001	bd				bd	bd			
13	Zach.	DK31	53+600	56+600	4	2001	bd				bd	bd			
14	Lubus.	DK2	94+600	96+826	6	2001	3	4	60	36	bd	15	12		
15	Łódź	DK8	225+600	234+150	5	2001(2)	3	2,8	28	62,5	bd	23	21		
16	Podl.	DK8	585+634	599+313	5	2002	3	5	75	20	A	15	4	4	
17	Maz.	DK7	388+460	399+820	6	2002	3	4	53	37	bd	bd	bd		
18	Warm.	DK53	23+390	25+776	4	2002	bd				bd	bd			
19	Podl.	DK8	561+073	571+090	5	2003	3	4	51	45	A	15	4	7	
20	Podl.	DK8	571+090	578+192	5	2003	3	4	51	45	A	15	4	7	
21	Maz.	DK60	123+700	130+000	5	2003	bd				bd	bd			
22	Kuj.	DK15	304+630	310+630	4	2003	3	4	57	36	bd	15	4	8	
23	Warm.	DK51	40+770	49+300	3	2003	3	4	52	44	A	15	14		
24	Warm.	DK58	110+387	120+505	3	2003	bd				bd	13	14		
25	Wielk.	DK5	195+100	197+800	5	2003	3	4	45	45	bd	18	19		
26	Małop.	DK7	684+384	692+660	5	2003	3	7	60	40	AS	13	3,5	8,5	12
27	Małop.	DW780	52+364	53+152	4	2003	3	4	33	60	bd	38	13		
28	Zach.	DK10	74+152	83+185	4	2003	bd				bd	bd			
29	Zach.	DK10	155+544	164+432	4	2003	bd				bd	bd			
30	Pom.	DK7	26+330	44+740	6	2003(4)	2,8	4	60	36	bd	16	4	6	11
31	Opol.	DK94	225+000	228+400	6	2003(4)	5,5	4	22,5	77,5	bd				
32	Zach.	DK10	58+420	67+303	4	2004	bd				bd	bd			
33	Podl.	DK8	628+511	629+511	5	2004	3	4	51	45	A	15	4	8	
34	Podl.	DK8	636+661	638+771	5	2004	3	4	51	45	A	15	4	8	
35	Podl.	DK8	717+892	723+236	5	2004	3	4	51	45	A	20	4	6	7
36	Maz.	DK8	552+780	561+716	6	2004	3	2,5	45,7	50	A	22	4	6	11

Weryfikacja zasad projektowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych
Raport końcowy

Cd. tablicy 5.2.

37	Maz.	DK50	227+300	229+800	5	2004	2,5	2,8	72,4	17,6	A	20	20		
38	Maz.	DK48	54+200	59+475	4	2004	1,5	4	64,9	25,3	AS	20	5	6	
39	Maz.	DK7	223+932	235+012	6	2004	3	2,7	91,8	-	A	14	4	6	17
40	Kuj.	DK10	288+097	296+754	5	2004	4	3,4	63,8	28,8	bd	20	4	8	
41	Kuj.	DK5(10)	50+175	58+827	5	2004	3	4	51,6	41,4	bd	15	4	8	
42	Kuj.	DK55	82+443	91+879	4	2004	3	5	57	35	bd	15	4	8	
43	Warm.	DK58	12+800	22+800	3	2004	3,8	5,8	61,8	29	AS	12	14		
44	Warm.	DW591	26+959	30+509	3	2004	3	5	50	39	bd	16	4	6	
45	Opol.	DK94	219+200	221+850	6	2004	4,5	4	22	78	bd				
46	Opol.	DK94	223+000	224+276	6	2004	3,5	4	30	70	bd	20	4	5	
47	Opol.	DK88	0+500	2+568	6	2004	3	4	50	50	bd	16	4	9	12
48	Lubus.	DK3	325+068	327+331	6	2004	3	7	55	45	bd	14	13		
49	Święt.	DW728	152+100	156+200	3	2004	1,5	2,5	46,1	46,1	bd	23	3	6	
50	Święt.	DK73	60+300	75+269	4	2004	1,2	2,5	59,2	33,3	A	23	3,5	6	10
51	Święt.	DK7	506+701	509+501	6	2004	1,5	3	35	55	A	25	3,5	8	12
52	Święt.	DK7	565+300	569+800	5	2004	1,2	2,5	34,2	58,2	A	25	3,5	8	12
53	Podk.	DK9	158+000	161+600	4	2004	3	3,9	44,2	50,1	bd	16 i 21	13		
54	Zach.	DK11	65+850	77+800	4	2004	bd				bd	bd	bd		
56	Małop.	DK7	674+910	677+250	5	2004(5)	3	7	60	40	AS	13	4	8	11
57	Małop.	DK7	692+660	695+500	5	2004(5)	3	7	60	40	AS	13	4	8	11
58	Małop.	DK4	432+510	454+016	6	2004(5)	3	5	53	36	bd	17	3,5	8	9
59	Maz.	DK60	131+709	138+003	5	2005	3	3,9	64	29,1	AS	20	bd		
60	Maz.	DK12	454+081	460+700	5	2005	1,5	4	59,8	29,5	A	15	bd		
61	Maz.	DK12	512+150	519+100	6	2005	2,5	4	55,5	35	A	18	3	9	
62	Maz.	DW581	4+250	4+694	3	2005	3	3,9	73,7	19,4	bd	18	14-20		
63	Maz.	DW630	0+000	16+648	4	2005	3	4	64	30	bd	15	4	5	
64	Kuj.	DK10	296+754	304+754	5	2005	3	3,9	59,2	34	bd	11 (16)	4	8	
65	Warm.	DK15	318+350	322+350	4	2005	bd				bd	18	14		
66	Warm.	DK58	7+500	12+800	3	2005	4	5,8	61,4	28,8	S	12	14		
67	Warm.	DK58	105+500	110+387	3	2005	bd				bd	15	13		
68	Pom.	DK22	338+300	339+775	4	2005	3	4	70	26	A	20	4	6	
69	Pom.	DK7	45+700	55+515	5	2005	3	4	47,8	39,1	bd	16	21		
70	Opol.	DW426	23+400	28+401	5	2005	3	3,9	73,7	19,4	bd	13	5	8	10
71	Święt.	DK9	71+958	75+897	4	2005	1,5	3	80	20,8	A	18	3,5	7	10
72	Święt.	DK7	561+280	562+800	5	2005	1,2	2,5	37,1	55,4	A	20	3,5	8	10
73	Śląsk.	DW790	13+151	13+248	3	2005	bd				bd	43	4	8	
74	Podk.	DK9	189+809	192+915	5	2005	3	3,9	44,2	50,1	bd	18	12,5		
75	Podk.	DK9	215+138	223+938	4	2005	3	3,9	58,2	34,9	bd	15	11		
76	Podk.	DK77	134+500	135+800	4	2005	3	7	59,3	31,9	bd	23	13		
77	Podk.	DK77	137+150	139+500	4	2005	3	7	59,3	31,9	bd	23	13		
78	Maz.	DW728	41+300	45+400	4	2005(6)	1,5	3,5	60,4	30,1	bd	18	5	6	
79	Lubus.	DW137	82+126	101+022	bd	2005(6)	5,9	3,6	24,2	67,9	bd	12	4	10	
80	Podk.	DK9	198+908	204+306	4	2006	3	4	60	40	bd	16 i 20	11,5 i 13,5		
Oznaczenia: E – emulsja, C – cement, D – destruk, KD – kruszywo doziarniające, A – destruk asfaltowy, S – destruk smołowy, AS – asfaltowo-smołowy Ś – warstwa ściernalna, W – warstwa wiążąca, P – warstwa podbudowy bd – brak danych															



Rysunek 5.2. Zestawienie długości odcinków z podbudową z mieszanki MCE

Do analizy odcinków z podbudowami z MCE zebrano dane o 80 odcinkach dróg, z czego pełne dane dotyczyły 56 odcinków dróg. Te odcinki zostały poddane bardziej szczegółowej analizie.

Z analizy ankiet wynika że użyte w podbudowach mieszanki MCE mają zawartość cementu przekraczającą bezpieczną wartość 1,5-2%. Wśród 56 odcinków zawierających składy mieszanek MCE stwierdzono:

- 18 odcinków dla których zawartość cementu waha się między 2,5-3,9%,
- 24 odcinki z zawartością cementu wynoszącą 4 %. Jest to zawartość maksymalna w wg Warunków Technicznych [2] w mieszankach MCE z destruktem bitumicznym.
- 14 odcinków z zawartością cementu wynoszącą od 5 do 5,8%.
- 6 odcinków z zawartością cementu wynoszącą 7%. Jest to zawartość maksymalna wg [2], dla mieszanek MCE z destruktem smołowym.

Przedstawione zestawienie pokazuje, że w mieszankach MCE stosuje się stosunkowo dużo cementu. Dla porównania w tablicy 5.3. podano zalecane zawartości cementu dla innych rodzajów podbudów związanych cementem. Z przedstawionego zestawienia wynika, że w mieszankach MCE stosowana często zawartość cementu jest porównywalna ze stabilizacją lub chudym betonem. Powoduje to uzyskiwanie sztywnych podbudów podatnych na spękanie.

Tablica 5.3. Zawartości cementu dla podbudów drogowych

Lp.	Rodzaj materiału	Wymagania	Ilość cementu
1	Chudy beton	PN-S-96013:1997 „Drogi samochodowe. Podbudowa z chudego betonu. Wymagania i badania	5 – 7%
2	Stabilizacja Rm = 5 MPa	PN-S-96012:1997 Drogi samochodowe. Podbudowa i ulepszone podłoże z gruntu stabilizowanego cementem.	Max. 6
3	Stabilizacja Rm = 2,5 MPa		Max. 8
4	Stabilizacja Rm = 1,5 MPa		Max. 10
5	MCE <ul style="list-style-type: none"> • Destrukt asfaltowy • Destrukt smołowy 	Warunki Techniczni [2]	Max. 4 % Max. 7 %

Wśród 56 odcinków zawierających składy mieszanek recyklingu stwierdzono:

- 7 odcinków z zawartością emulsji większą od 3 %,
- 3 odcinki z zawartością emulsji mniejszą od 3 %,
- 46 odcinków z zawartością emulsji wynoszącą 3 %. Jest to minimalna zawartość emulsji w myśl polskich wymagań [2].

Zestawienie to pokazuje, że wykonywane w polskich warunkach podbudowy MCE mają zbyt małą zawartość asfaltu, a wymagane wytrzymałości uzyskiwane są głównie poprzez dodawanie dużej ilości cementu. Stosowanie powszechnie minimalnej ilości emulsji, a równocześnie stosunkowo dużej ilości cementu, skłania do stwierdzenia, że tak naprawdę jest ona dodawana tylko po to, aby nazwać podbudowę mieszanką MCE a nie stabilizacją cementem.

Wśród 56 odcinków zawierających składy mieszanek recyklingu stwierdzono:

- 14 odcinków z zawartością kruszywa doziarniającego do 30 %,
- 31 odcinków z zawartością kruszywa doziarniającego od 31 do 50 %,
- 19 odcinków z zawartością kruszywa doziarniającego od 51 do 70 %,
- 2 odcinki z zawartością kruszywa doziarniającego powyżej 71 %,

Zestawienie to pokazuje, że wykonywane w polskich warunkach podbudowy MCE zawierają stosunkowo dużo kruszywa doziarniającego, najczęściej dobrej jakości kruszyw łamanych. W większości przypadków jest to około 30-50 % w stosunku do całej mieszanki mineralnej MCE. W 21 przypadkach kruszywo doziarniające stanowiło ponad 50 % mieszanki mineralnej. Trudno w takich przypadkach mówić o konwencjonalnej mieszance MCE, gdzie podstawowym składnikiem jest destrukt.

Konieczność stosowania dużej ilości kruszywa doziarniającego może być podyktowana następującymi czynnikami:

Dążeniem do wpisania się w krzywe graniczne mieszanki MCE,

Stosowaniem drobnego destruktu, co powoduje konieczność dodawania znacznej ilości grubego kruszywa,

Koniecznością spełnienia dość wysokich wymagań wytrzymałościowych, trudnych do spełnienia dla mieszanek z dużą zawartością destruktu.

Duża ilość kruszywa doziarniającego w wielu przypadkach dyskwalifikuje pod względem ekonomicznym stosowanie podbudów z mieszanki MCE. Jeżeli dodać do tego dodatek emulsji, cementu oraz konieczność wymieszania tych składników, to rachunek ekonomiczny dla podbudów MCE jest niekorzystny.

5.2. Wizualna ocena nawierzchni z podbudowami z mieszanek MCE

Ocenę stanu nawierzchni z podbudowami z mieszanki MCE przeprowadzono w 2006 roku. Na wybranych 20 odcinkach dróg z podbudowami z mieszanki MCE wybrano fragmenty o długości 2 km i na tych fragmentach oceniono stan nawierzchni. Lokalizację ocenianych odcinków podano w tablicy 5.4. Zestawienie podstawowych informacji o odcinkach podano w tablicy 5.5.

Wygląd nawierzchni, ze szczególnym uwzględnieniem spękań przedstawiono na fotografiach od 5.1. do 5.12.

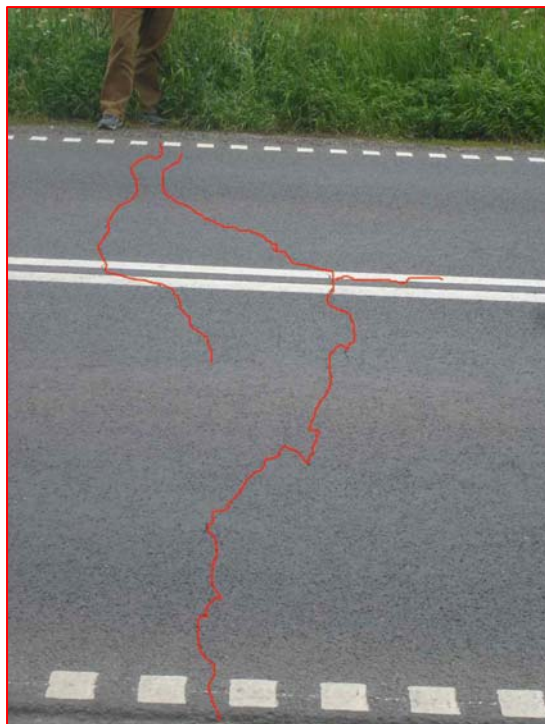
Tabela 5.4 Zestawienie odcinków dróg, na których dokonano inwentaryzacji

Lp.	Województwo	Numer drogi	Lokalizacja odcinka wykonanego w technologii MCE		Lokalizacja odcinka wybranego do obserwacji	
			Od km	Do km	Od km	Do km
1	Mazowieckie	DK60	131+709	138+003	132+000	134+000
2	Mazowieckie	DK50	227+300	229+800	227+500	229+500
3	Mazowieckie	DK8	552+780	561+716	554+000	556+000
4	Podlaskie	DK61	126+087	133+945	142+000	144+000
5	Warmińsko-mazurskie	DK58	7+500	22+800	10+000	12+000
6	Warmińsko-mazurskie				19+000	21+000
7	Warmińsko-mazurskie		105+500	120+509	106+000	108+000
8	Warmińsko-mazurskie				114+000	116+000
9	Pomorskie	DK7	26+330	44+740	30+000	32+000
10	Pomorskie				34+000	36+000
11	Pomorskie				40+500	42+500
12	Pomorskie				48+350	55+515
13	Pomorskie	DK6	266+615	269+500	260+800	262+800
14	Kujawsko-pomorskie	DK5(10)	50+175	58+827	53+000	55+000
15	Pomorskie	DK22	338+300	339+800	338+300	339+800
16	Kujawsko-pomorskie	DK15	304+630	310+630	306+000	308+000
17	Warmińsko-mazurskie		326+590	331+600	328+500	330+500
18	Warmińsko-mazurskie		335+298	343+350	336+000	338+000
19	Kujawsko-pomorskie	DK55	82+443	91+879	84+000	86+000
20	Warmińsko-mazurskie	DW591	27+959	30+509	brak słupków kilometrażowych	

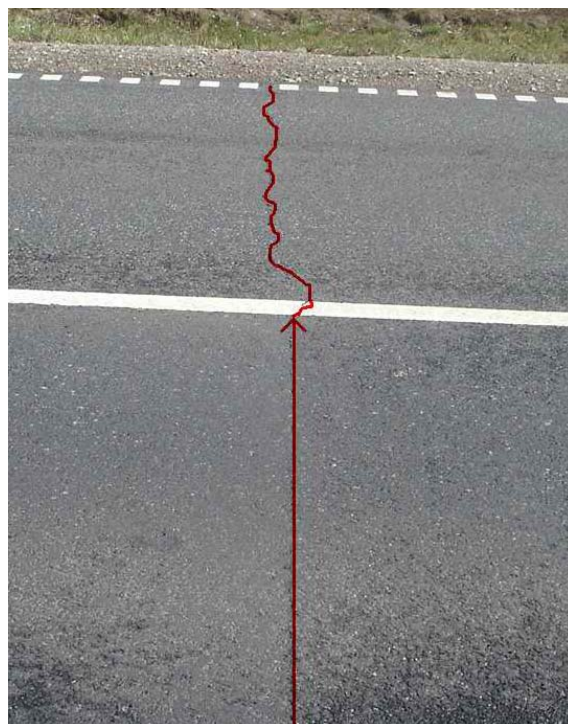
Tabela 5.5 Zestawienie informacji o odcinkach, na których dokonano inwentaryzacji oraz liczba spękań poprzecznych

Numer drogi	Lokalizacja odcinka wybranego do badań		Ruch KR	Rok Rem2ontu	Skład MCE % [m/m]				Grubość MCE [cm]	Warstwy asfaltowe [cm]	Ilość spękań na odcinku 2 km	Ilość spękań na 1 km
	od	do			[cm]	C	D	KD				
DK60	132+000	134+000	5	2005	3	3,9	64	29,1	20	Brak danych	8	4
DK50	227+500	229+500	5	2004	2,5	2,8	72,4	17,6	20	20	3	1,5
DK8	554+000	556+000	6	2004	3	2,5	45,7	50	22	18	4	2
DK61	142+000	144+000	4	1998	Brak danych				Brak danych	Brak danych	w dalszej części omówiony osobno	
DK58	10+000	12+000	3	2005	4	5,8	61,4	28,8	12	14	0	0
	19+000	21+000	3	2004	3,8	5,8	61,8	29,0	12	14	0	0
	106+000	108+000	3	2005	Brak danych				15	13	0	0
	114+000	116+000	3	2003	Brak danych				13	14	0	0
DK7	30+000	32+000	6	2003/4	2,8	4	60	36	16	21	2	1
	34+000	36+000	6	2003/4	2,8	4	60	36	16	21	3	1,5
	40+500	42+500	6	2003/4	2,8	4	60	36	16	21	3	1,5
	53+000	55+000	5	2005	3	4	47,9	39,1	16	21	0	0
DK6	261+300	262+800	5	1999	Brak danych				25	12	15	5
D5/10	53+000	55+000	5	2004	3	4	51,6	41,4	20	12	28	14
DK22	338+300	339+800	4	2005	3	4	70	26	20	10	3	1,5
DK15	306+000	308+000	4	2003	3	4	57	36	15	12	3	1,5
	328+500	330+500	4	2003	Brak danych				Brak danych	Brak danych	13	6,5
	336+000	338+000	4	2002	Brak danych				Brak danych	Brak danych	2	1
DK55	84+000	86+000	4	2004	3	5	57	35	15	12	0	0
DW591	brak słupków z kilometrażem		3	2004	3	5	50	39	16	10	0	0

Oznaczenia: E – emulsja, C – cement, D – destrukta, KD – kruszywo doziarniające,



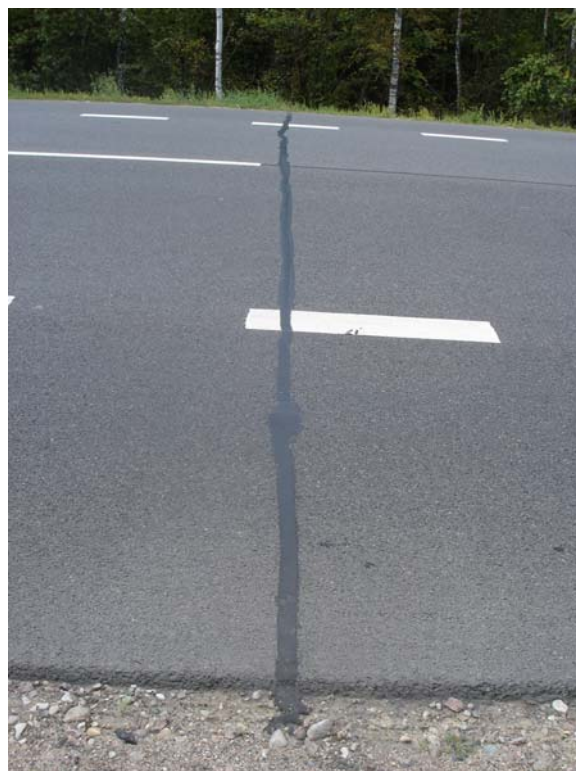
Fotografia 5.1. Spękanie poprzeczne, rozgałęzione(DK 15)



Fotografia 5.2 Spękanie poprzeczne będące efektem przedłużenia szwu roboczego (DK 5/10)



Fotografia 5.3. Spękanie poprzeczne, nieregularne (DK 6)



Fotografia 5.4 Spękanie poprzeczne uszczelnione (DK 8)



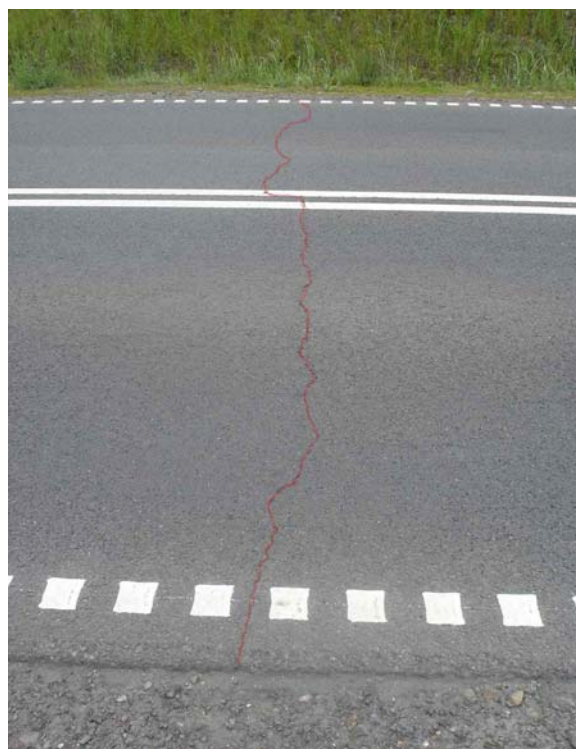
Fotografia 5.5. Spękanie poprzeczne (DK 50)



Fotografia 5.6 Spękanie poprzeczne (DK 60)



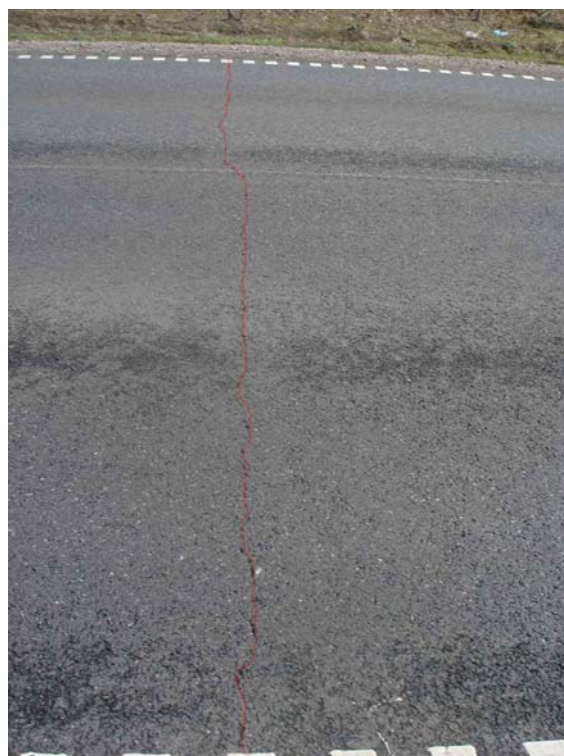
Fotografia 5.7. Spękanie poprzeczne,
rozgałęzione (DK 22)



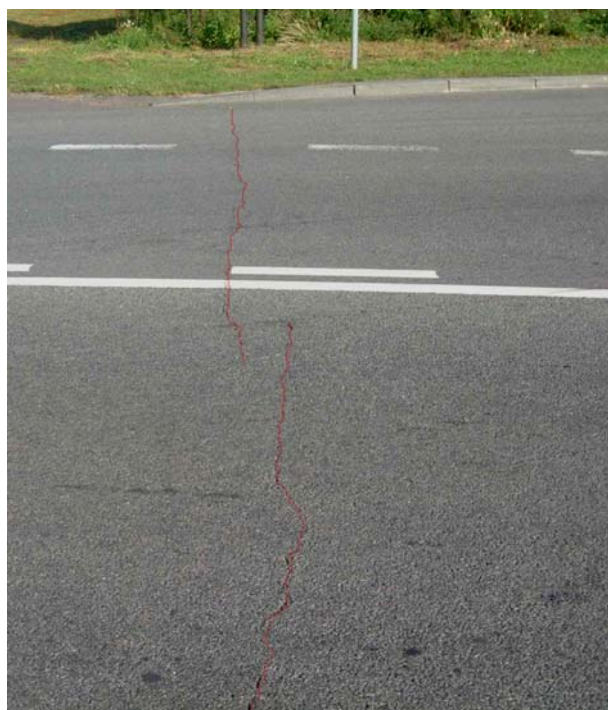
Fotografia 5.8 Spękanie poprzeczne (DK 15)



Fotografia 5.9. Spękanie poprzeczne (DK 5/10)



Fotografia 5.10 Spękanie poprzeczne (DK 5/10)



Fotografia 5.11. Spękanie poprzeczne (DK 7)



Fotografia 5.12 Spękanie poprzeczne (DK 7)

Droga krajowa nr 61, odcinek najstarszy z podbudową MCE. Odcinek wytypowany na drodze krajowej nr 61, wymaga osobnego omówienia, ponieważ jest to jeden z najstarszych w Polsce odcinków wykonanych w technologii MCE. Wykonany został w roku 1998 i jest to jedyna informacja dotycząca tego odcinka. Podczas wizji lokalnej stwierdzono, że odcinek jest w złym stanie. Występują liczne spękania poprzeczne, spękania blokowe oraz obłamania krawędzi jezdni. Ze względu na dużą ilość spękań oraz ich nieregularność nie wykonano szczegółowej inwentaryzacji uszkodzeń. Wygląd nawierzchni przedstawiono na fotografiach od 5.13 do 5.15.

Stan uszkodzeń nawierzchni, wskazuje, że na tym odcinku:

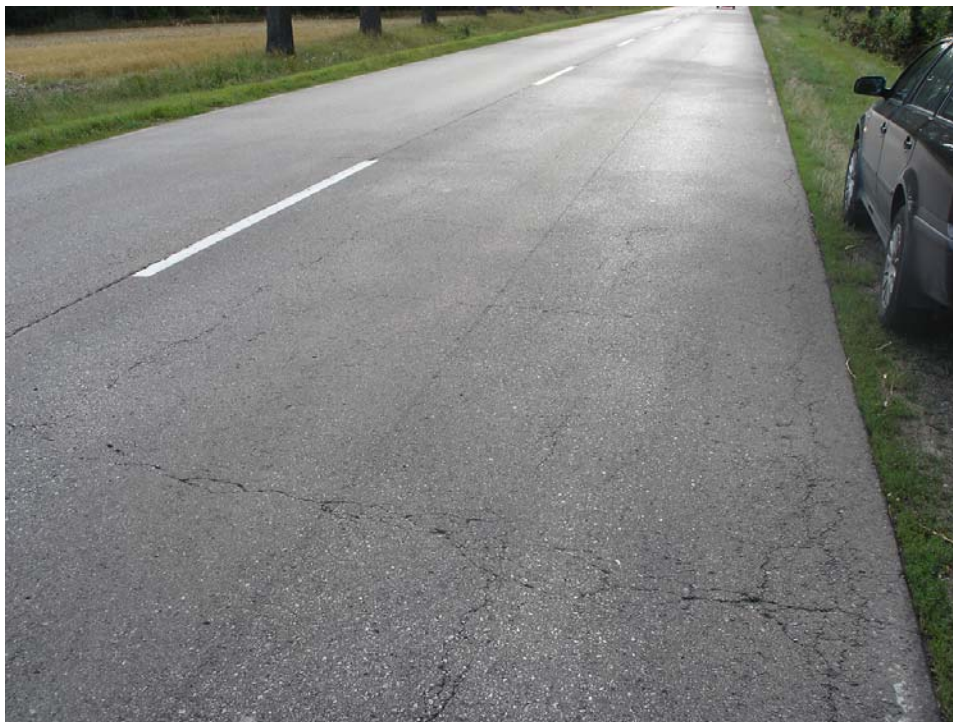
1. Prawdopodobnie wykonano bardzo sztywną mieszankę MCE. Była to raczej stabilizacja cementem, niż emulsją i cementem.
2. Sztywna podbudowa popękała.
3. Spękania odbiły się na powierzchni jezdni.
4. Wygląd spękań nawierzchni jest typowy dla nawierzchni asfaltowych z podbudowa z chudego betonu lub betonu cementowego po kilku lub kilkunastu latach użytkowania nawierzchni.



Fotografia 5.13. Spękanie poprzeczne, i obłamanie krawędzi (DK 61)



Fotografia 5.14 Spękanie poprzeczne (DK 61)



Fotografia 5.15 Spękania blokowe nawierzchni (DK 61)

Podczas wizji lokalnych stwierdzono, że:

Nawierzchnie z podbudową z mieszanki MCE są równe, nie wykazują zapadnięć ani kolein.

Nawierzchnie z podbudową z mieszanki MCE, wykazują spękania poprzeczne.

Liczba spękań jest zróżnicowana.

spośród badanych 20 odcinków 18 wykonano w latach 2002- 2006, jeden w 1998 i jeden w 1999 roku.

Brak spękań stwierdzono na 7 odcinkach, przy czym aż 4 odcinki były zlokalizowane na drodze krajowej nr 58 wyremontowanej w latach 2003 -2005.

Najwięcej spękań wystąpiło na DK5/10, gdzie stwierdzono 14 spękań na kilometr.

Remont na tej drodze przeprowadzono stosunkowo niedawno, w 2004 roku.

Osobnego przedstawienia wymaga odcinek najstarszy z 1998 roku, położony w województwie podlaskim, na drodze krajowej nr 61, ponieważ uszkodzenia występujące na tym odcinku są bardzo intensywne i wskazują na dość intensywne spękania podbudowy.

Spękania poprzeczne nie były uszczelniane, co wskazuje na brak należytego bieżącego utrzymania nawierzchni.

5.3. Wnioski z analizy ankiet i oceny wizualnej wybranych odcinków

Przeprowadzona analiza ankiet zebranych o odcinkach z podbudowami MCE oraz ocena stanu nawierzchni wybranych odcinków pokazuje, że:

1. Większość odcinków z podbudowami z MCE wykazuje spękania poprzeczne w ilości od 1 do 6 spękań na kilometr. Nie były to liczne spękania, ale pokazują, że występuje problem spękania podbudów z mieszanek MCE.
2. Analiza ankiet pokazuje, że przyczyn spękań należy prawdopodobnie szukać w zbyt dużej ilości cementu w mieszankach MCE. Ilość stosowanego cementu w mieszankach MCE jest zbliżona do zawartości cementu stosowanego w stabilizacjach i w chudym betonie.
3. Zawartość emulsji stosowana w mieszankach MCE najczęściej wynosi 3%. Jest to wartość najmniejsza dopuszczona, w polskich wytycznych.
4. Mieszanki MCE zawierają dużą ilość kruszywa doziarniającego, co w wielu przypadkach dyskwalifikuje pod względem ekonomicznym stosowanie podbudów z mieszanki MCE. Jeżeli dodać do tego dodatek emulsji, cementu oraz konieczność wymieszania wszystkich składników, to rachunek ekonomiczny dla podbudów MCE jest niekorzystny.
5. Spękania obserwowane na odcinkach z MCE należy zaliczyć raczej do spękań odbitych, choć nie można wykluczyć również że są to spękania niskotemperaturowe.
6. Spękania widoczne na odcinkach z podbudową z mieszanki MCE powstały najprawdopodobniej według następującego scenariusza:
Sztynna warstwa podbudowy uległa spękanom skurczowym.
Warstwy asfaltowe w miejscu spękania, podczas oziębiania nawierzchni były rozciągane od góry przez naprężenia termiczne a z dołu przez naprężenia wywołane kurczącą się podbudową MCE.
Nad spękanem w podbudowie tworzyło się spękanie w warstwach asfaltowych idące od góry, ponieważ tam wystąpiły największe naprężenia rozciągające.
Do szybkiego powstania spękań w nawierzchni przyczynił się dualizm spękań, polegający na rozciąganiu warstw asfaltowych zarówno od góry jak i od dołu.
Taki mechanizm był bardzo prawdopodobny, ponieważ powoduje on bardzo szybkie pojawienie się spękań nawierzchni a taki przypadek miał miejsce na obserwowanych odcinkach dróg wykonanych stosunkowo niedawno.

6. Badania laboratoryjne.

Badania laboratoryjne opisane w tym rozdziale mają posłużyć do weryfikacji zasad projektowania mieszanek MCE. Na tym etapie prac przedstawiono następujące badania:

- Porównanie wyników uzyskanych według niemieckich zasad projektowania mieszanek MCE [4] z wymaganiami polskimi [2]
- Wpływ metod zagęszczenia na parametry mieszanek MCE,
- Ocenę zmienności cech mieszanek MCE.

6.1. Metodyka badań

6.1.1. Przygotowanie próbek do badań

Do badań wykorzystywano próbki walcowe o średnicy 100 i wysokości 63,5 mm oraz próbki średnicy 150 i wysokości 125 mm. Przygotowanie próbek odbywało się wg następujących procedur:

- Zagęszczane statycznie próbek o średnicy 100 mm w prasie wg wytycznych polskich [2],
- Zagęszczanie udarowe próbek o średnicy 100 mm w ubijaku Marshalla wg wytycznych polskich [2],
- Zagęszczanie statycznie próbek o średnicy 150 mm w prasie wg wytycznych niemieckich [4].

Zagęszczane statycznie próbek o średnicy 100 mm w prasie hydraulicznej wg wytycznych polskich [2], metoda II. Próbki zagęszczano w perforowanych formach utrzymując nacisk 100 kN ($12,7 \text{ N/mm}^2$) przez 5 minut. Uformowane próbki miały średnicę 100 mm oraz wysokość $63,5 \pm 3 \text{ mm}$.

Zagęszczanie udarowe próbek o średnicy 100 mm w ubijaku Marshalla wg wytycznych polskich [2] wykonano w perforowanych formach stosując po 75 uderzeń na stronę. Uformowane próbki miały średnicę 100 mm oraz wysokość $63,5 \pm 3 \text{ mm}$.

Zagęszczanie statycznie próbek o średnicy 150 mm w prasie wg wytycznych niemieckich [4] odbywało się w formach o średnicy wewnętrznej 150 mm oraz wysokości 300 mm. Próbkę zagęszczaną jest poprzez przykładanie obciążenia o sile 49 kN ($2,8 \text{ N/mm}^2$), następnie czeka się 2 minuty, w tym czasie przyłożona siła maleje. Po dwóch minutach ponownie doprowadza się obciążenie do 49 kN. Takich operacji wykonuje się od 5 do 7, aby osiągnąć wymagane zagęszczenie próbki. Uformowane próbki miały średnicę 150 mm oraz wysokość $125 \pm 5 \text{ mm}$. Gotowe próbki (znajdujące się w formach) przez pierwsze 2 dni przechowywano szczelnie zamknięte w workach foliowych, zapewniających niezbędny 95% poziom wilgotności. Według wytycznych niemieckich wyciśnięcie próbek z form powinno nastąpić już drugiego dnia po zagęszczeniu, jednak z uwagi na wysokie ryzyko uszkodzenia bezpieczne przeprowadzenie tej czynności było możliwe dopiero po upływie 3 dni.

Próbki po uformowaniu były przechowywane wg następujących procedur:

1. Próbki zagęszczone wg polskich przepisów [2] przechowywano w temperaturze +20°C, przy normalnej wilgotności, przez 7 oraz 28 dni.
2. Próbki zagęszczone wg niemieckich przepisów [4] przechowywano przez 2 dni w temperaturze +20°C przy wilgotności 95%, następnie przy wilgotności normalnej odpowiednio 5 i 26 dni.
3. Próbki z zestawu przeznaczonego do badania wpływu nasycenia wodą przez pierwsze 14 dni od zagęszczenia przechowywano tak jak pozostałe, a następnie zanurzano w wodzie na okres pozostałych 14 dni.

6.1.2. Badanie wytrzymałości w pośrednim rozciąganiu

Badanie to przeprowadzono w prasie do badania Marshalla, o przesuwie tłoka 50 mm/min. Obciążenie było przekazywane przez przekładki o szerokości 12 mm i krzywiznie o promieniu 50,5 mm (75 mm dla próbek o średnicy 150 mm). Próbkę obciążano aż do zniszczenia.

Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie wyznaczono ze wzoru:

$$R = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot h}$$

gdzie:

- R - wytrzymałość na pośrednie rozciąganie,
- P - siła niszcząca,
- d - średnica próbki,
- h - wysokość próbki,



Rysunek 6.1. Badanie wytrzymałości mieszanki MCE na pośrednie rozciąganie

6.1.3 Moduł sztywności sprężystej w pośrednim rozciąganiu

Badanie to przeprowadzono zgodnie z instrukcją obsługi aparatu NAT [6]. W trakcie badania mierzone są przemieszczenia wzdłuż poziomej osi próbki, wzdłuż płaszczyzny poziomej przechodzącej przez oś próbki prostopadłą do kierunku przyłożonego obciążenia. Rejestracja danych podczas badania pośredniego rozciągania odbywa się automatycznie. Po wprowadzeniu danych wejściowych dotyczących warunków przeprowadzenia testu oraz danych dotyczących wymiarów badanej próbki NAT przeprowadza się kilka próbnych badań, na podstawie których dobiera odpowiednie obciążenie potrzebne do uzyskania wymaganego naprężenia poziomego. Po części pierwszej polegającej na określeniu optymalnych warunków do przeprowadzenia testu następuje właściwe badanie, składające się z pięciu kolejnych obciążeń, na podstawie których wyliczany jest średni moduł sztywności sprężystej. Dla każdej próbki badanie przeprowadza się dwukrotnie, z obrotem próbki o 90°C, wynik końcowy jest średnią z tych dwóch oznaczeń. Moduł sztywności sprężystej w badaniu pośredniego rozciągania jest określany automatycznie przez urządzenie badawcze, które wykorzystuje następująca zależność:

$$S = \frac{P \cdot v + 0,2732}{\delta_H \cdot h}$$

gdzie:

- S – moduł sztywności sprężystej w pośrednim rozciąganiu, [MPa],
- P – siła pionowa, [MN],
- h – wysokość próbki, [m],
- δ_H – przemieszczenie boczne, [m],
- v – współczynnik Poissona,



Rysunek 6.2. Badanie modułu sztywności mieszanki MCE w aparacie NAT

6.1.4 Badanie stabilności i odkształcenia wg Marshalla

Oznaczenie stabilności i odkształcenia wg Marshalla wykonano zgodnie z normą BN-70-8931-09 „Drogi samochodowe i lotniskowe. Oznaczenie stabilności i odkształcenia mas mineralno-asfaltowych”.

6.1.5 Zawartość wolnych przestrzeni

Zawartość wolnych przestrzeni przeprowadzono metodą hydrostatyczną zgodnie z procedurą opisaną w wymaganiach [2].

6.2. Porównanie niemieckich zasad projektowania mieszanek MCE z wymaganiami polskimi

6.2.1. Wstęp

Przeprowadzone studia literatury pokazały, że metodyka projektowania mieszanek MCE zawarta w polskich wytycznych [2] różni się od podejścia stosowanego w innych krajach, zwłaszcza w obszarze badań i wymagań wytrzymałościowych. W trakcie prac laboratoryjnych postanowiono zatem porównać metodę polską [2] z procedurą niemiecką, opartą na opublikowanych w 2005 roku wytycznych [4]. Wybrano ją z uwagi na:

- wieloletnie doświadczenia Niemiec w zakresie recyklingu na zimno,
- podobne podejście do stosowania dodatków do mieszanek MCE (zarówno emulsja jak i cement),
- bliskie sąsiedztwo z Polską a co się z tym wiąże podobne warunki klimatyczne.

Badania polegały na zaprojektowaniu mieszanek MCE według przepisów niemieckich i porównanie uzyskanych wartości z wymaganiami polskimi.

Program prac laboratoryjnych, dla przedstawionego podejścia, obejmował:

1. Określenie uziarnienia destruktu oraz materiałów doziarniających,
2. Skomponowanie właściwego składu mieszanki destruktu – kruszywo doziarniające,
3. Określenie optymalnej zawartości płynów (wilgotności optymalnej),
4. Wykonanie próbek stosując metody zagęszczenia opisane w punkcie 6.1.1,
5. Przeprowadzenie badań klasyfikujących:
 - Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie w temperaturze +5°C,
 - Stabilność w temperaturze +60°C,
 - Moduł sztywności w temperaturze +5°C,
 - Podstawowych cech mieszanki MCE (gęstość strukturalna, gęstość objętościowa, zawartość wolnych przestrzeni)

Badania cech wytrzymałościowych wykonano dla dwóch rodzajów próbek:

1. Suchych, przechowywanych przez 7 lub 28 dni w powietrzu
2. Sucho/mokrych, przechowywanych przez 14 dni w powietrzu i 14 dni w wodzie.

Jako wynik przyjmowano średnią arytmetyczną z 2 oznaczeń próbek o takim samym składzie.

6.2.2. Właściwości mieszanki mineralnej

W badaniach wykorzystano następujące materiały:

- Destrukt nr 1, uzyskany z rozbiórki drogi wojewódzkiej, składał się głównie z ziaren kruszywa naturalnego i zawierał dużą ilość frakcji piaskowej. Był to destrukt smołowo-asfaltowy.
- Destrukt nr 2 pochodził z betonu asfaltowego, zawierał ziarna grube żwirów i grysów.
- Piasek łamany 0/2 „Karlshamn” ze Szwecji,
- Mieszankę kruszyw 0/31,5 „Karlshamn” ze Szwecji.

Pewien problem stanowiło wykonanie przesiewu destruktu, ponieważ charakteryzował się on dużą wilgotnością, a wysuszenie w temperaturze 100-110°C może spowodować zbrylenie destruktu. Efektywnym sposobem na usunięcie wody z destruktu okazało się przechowywanie destruktu przez 48-72 h w pomieszczeniu o temperaturze +20°C. w formie rozłożonej warstwy o grubości 5-10 cm. Umożliwiło to równomierne sprowadzenie wilgotności dużej ilości materiału do akceptowalnego poziomu ok. 0,5% bez ryzyka zmiany uziarnienia.

Uziarnienie destruktu oraz kruszyw doziarniających przedstawiono w tabelicy 6.1.

Tablica 6.1. Uziarnienie materiałów wyjściowych stosowanych do mieszanki MCE

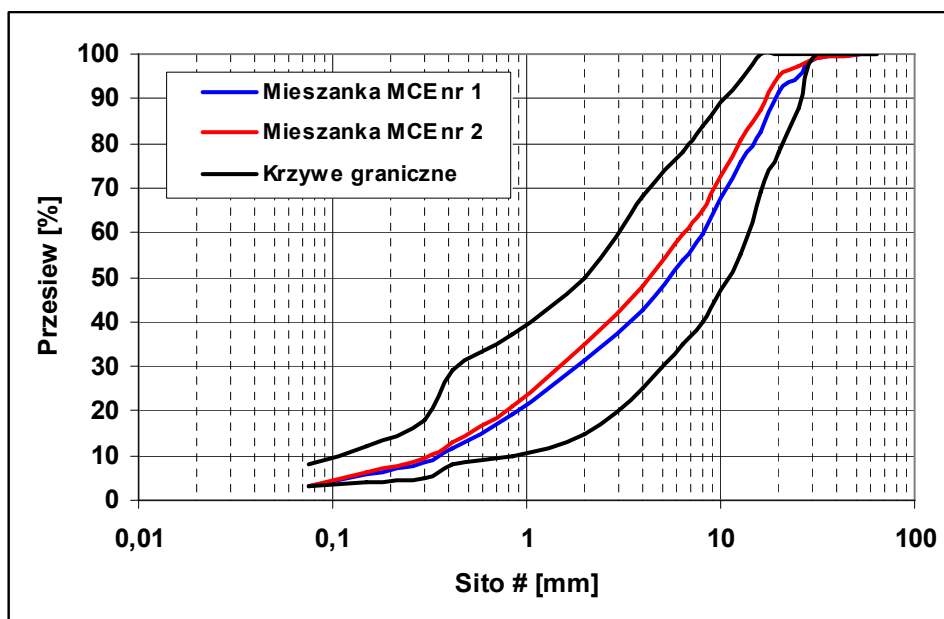
Sito # [mm]	Destrukt nr 1	Destrukt nr 2	Piasek 0/2	Mieszanka 0/31,5
63	100	100	100,0	100,0
31,5	98,6	98,9	100,0	100,0
25	93,2	97,0	100,0	97,3
20	89,4	95,8	100,0	92,2
16	83,2	91,0	100,0	76,0
12,8	76,9	84,7	100,0	65,7
8	60,5	69,1	100,0	45,0
6,3	51,5	61,0	100,0	43,0
4	38,1	47,1	89,9	35,0
2	25,8	32,2	70,6	29,1
0,85	13,3	16,5	51,8	20,5
0,42	4,7	6,7	35,6	17,8
0,3	2,2	3,8	25,6	14,7
0,15	0,5	1,2	21,3	11,3
0,075	0,2	0,4	19,8	3,4

Oba rodzaje destruktu posiadały zbyt małą ilość cząstek drobnych z przedziału 0,075 – 0,42 mm aby zmieścić się w obszarze dobrego uziarnienia zawartego [2], konieczne było skorygowanie uziarnienia dodatkiem nowego kruszywa doziarniającego. Poza tym, zachodziła obawa, iż mieszanka MCE wytworzona z samego destruktu będzie posiadała niewystarczające parametry wytrzymałościowe. Jako kruszywo doziarniające wybrano mieszankę kruszywa łamanego 0/31,5 oraz piasek łamany 0/2. Finalna mieszanka mineralna zawierała 60% destruktu, 30% kruszywa łamanego oraz 10% piasku. Powodem zastosowania piasku była chęć

zmniejszenia zawartości w mieszance MCE relatywnie drogiego materiału, jakim jest kruszywo łamane. W projektowaniu wykorzystano krzywe graniczne z polskich wymagań, dla ruchu KR3-KR6. Zaprojektowana mieszanka spełniała również wymagania niemieckie podane w [4]. Uziarnienie mieszanek MCE podano w tablicy 6.2 oraz na rysunku 6.3.

Tablica 6.2. Uziarnienie mieszanek MCE

Sito # [mm]	Mieszanka MCE nr 1 (z destruktem nr 1)	Mieszanka MCE nr 2 (z destruktem nr 2)	Krzywa graniczna	
			dolna	górna
63	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	99,2	99,3	100,0	100,0
25	95,1	97,4	88,0	100,0
20	91,3	95,1	78,0	100,0
16	82,7	87,4	69,0	100,0
12,8	75,9	80,5	55,0	94,0
8	59,8	65,0	40,0	84,0
6,3	53,8	59,5	35,0	78,0
4	42,4	47,8	25,0	68,0
2	31,3	35,1	15,0	50,0
0,85	19,3	21,2	10,0	37,0
0,42	11,7	12,9	8,0	29,0
0,3	8,3	9,3	5,0	18,0
0,15	5,8	6,2	4,0	12,0
0,075	3,1	3,2	3,0	8,0



Rysunek 6.3. Uziarnienie zaprojektowanych mieszanek MCE

Zaprojektowane krzywe uziarnienia charakteryzują się ciągłym uziarnieniem, mają zbliżone uziarnienie i zbliżony skład. Na różnice w ich cechach będzie wpływał głównie rodzaj destruktu. Należy zwrócić uwagę na jeszcze jeden aspekt projektowania mieszanki MCE. Ze względu na brak drobnych frakcji zachodzi konieczność stosowania kruszywa zawierającego duże ilości frakcji drobnych. Im

więcej frakcji drobnych w kruszywie doziarniającym tym mniej takiego kruszywa trzeba by stosować do doziarniania mieszanki MCE.

6.2.3. Optymalna zawartość płynów

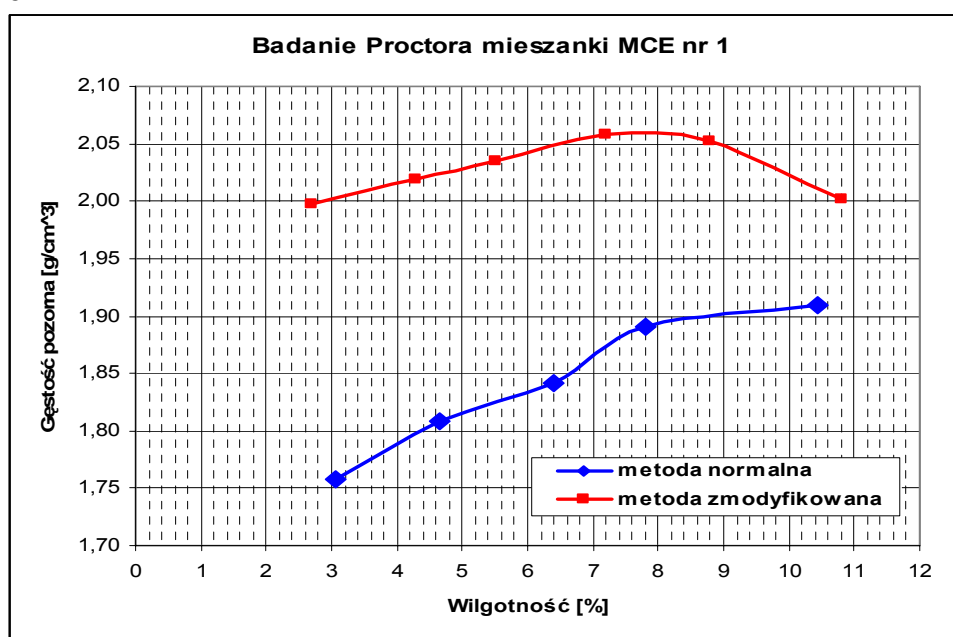
W mieszankach mineralno-cementowo-emulsyjnych jest pewien problem z określeniem wilgotności optymalnej, ponieważ nie tylko woda decyduje o zdolnościach mieszanki do zagęszczania. W mieszankach MCE decyduje o tym zarówno woda, jak i asfalt pochodzący z destruktu i emulsji. Aby uwzględnić oba składniki przyjęto nazywać wilgotność, przy jakiej uzyskuje się najlepsze zagęszczenie optymalną zawartością płynów.

Optymalna zawartość płynów próbowano wyznaczyć na podstawie:

- Badania Proctora metoda normalna (metoda II),
- Badania Proctora metodą zmodyfikowaną (metoda IV),
- Poprzez ustalenie maksymalnej gęstości strukturalnej osiągananej przez zagęszczaniu metodą statyczną.

Na podstawie tych prac została wybrana metoda do określania optymalnej zawartości płynów.

Do badania Proctora, zgodnie z zaleceniem wytycznych niemieckich [4], przygotowano mieszankę destruktu i kruszywa doziarniającego z 1,5 % cementu. Jediną dodawaną fazą płynną była woda. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 6.4.



Rys.6.4. Wyniki badania Proctora metoda normalna i zmodyfikowaną mieszanki MCE nr 1

Po przeprowadzeniu badania Proctora stwierdzono, że:

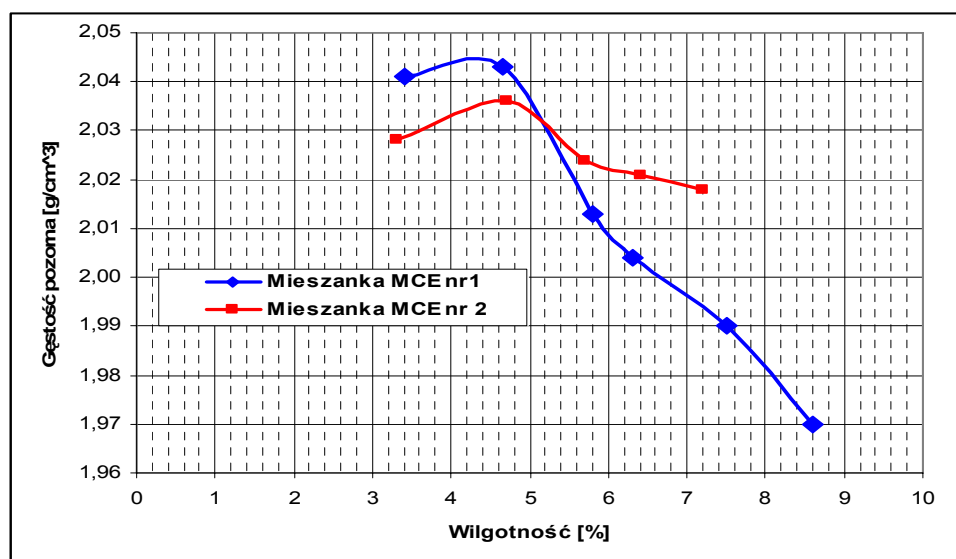
1. W przypadku metody normalnej krzywa zależności gęstość – wilgotność posiadała charakter stale rosnący, bez widocznego punktu przegięcia, pomimo znacznego nasycenia i wystąpienia wody z mieszanki na ostatnim etapie badania.

2. Lepszy efekt zagęszczenia otrzymano stosując zmodyfikowaną metodę Proctora. Większa energia spadającego ubijaka pozwoliła na otrzymanie prawidłowego kształtu krzywej gęstości. Uzyskana wilgotność optymalna mieszanki MCE nr 1 wyniosła 8%, przy gęstości pozornej $2,051 \text{ g/cm}^3$.
3. Wyznaczona w ten sposób wilgotność optymalna była dość duża i powodowała znaczne przesylenie mieszanki wodą (rys. 6.5). Mieszanka sprawiała wrażenie zbyt mocno nasączonej wodą.



Rys. 6.5. Mieszanka mineralna MCE nr 1 po zakończeniu badania Proctora metodą zmodyfikowaną

Mając na uwadze wady metody Proctora, między innymi rozbijanie ziaren destruktu podjęto próbę ustalenia optymalnej zawartości płynów na podstawie gęstości strukturalnej osiąganej przez próbki zagęszczane metodą statyczną, zalecaną w wytycznych niemieckich [4]. W tym celu wykonano kilka prób mieszanki mineralnej MCE z cement w ilości 1,5%, o różnej zawartości wody, bez dodatku emulsji asfaltowej. Wytworzone z nich próbki zostały zważone zaraz po zagęszczeniu oraz dokonano pomiaru objętości próbek. Uzyskane dane pozwoliły na stworzenie wykresu zależności gęstość pozorna-wilgotność, co przedstawiono na rysunku 6.6.



**Rys. 6.6. Zależność wilgotności i gęstości badanych mieszanek MCE
określona poprzez zagęszczanie prasą statyczną**

Dla obu rodzajów mieszanek największą gęstość objętościową udało się uzyskać przy zawartości wody na poziomie 4,5%. Ze względu na urabialność i jednorodność mieszanki w czasie wytwarzania próbek, wielkość tę zwiększono o 0,5% wody. Ostatecznie jako wilgotność optymalną wyznaczoną dla mieszanki MCE nr 1 i MCE nr 2 przyjęto 5,0 %.

Całkowita objętość płynów (wilgotność optymalna) wg przepisów niemieckich powinna uwzględniać dodatek emulsji oraz wody w celu uzyskania wartości optymalnej. Ponieważ jedynym płynem jaki może być kontrolowany jest woda, jej ilość wyznacza się z następującej zależności:

$$W_{dod} = W_{opt} - W_{nat} - W_{em} - 0,5 \times B$$

Gdzie:

- W_{dod} - ilość dodawanej wody do mieszanki [%]
- W_{opt} - wilgotność optymalna [%]
- W_{nat} - wilgotność naturalna mieszanki MCE (destruktu i kruszywo) [%]
- W_{em} - udział wody pochodzącej z emulsji asfaltowej [%]
- B - udział asfaltu z emulsji asfaltowej [%]

W przypadku badanych mieszanek MCE, dla których wilgotność optymalna wynosiła 5 %, przyjęta emulsja zawierała 60% asfaltu, a destruktu był suchy ilość dodawanej wody wynosiła:

- Dla 3% emulsji $W_{dod} = 5,0\% - 0\% - 0,4 \times 3\% - 0,5 \times 0,6 \times 3\% = 2,9\%$
- Dla 4% emulsji $W_{dod} = 5,0\% - 0\% - 0,4 \times 4\% - 0,5 \times 0,6 \times 4\% = 2,2\%$
- Dla 5% emulsji $W_{dod} = 5,0\% - 0\% - 0,4 \times 5\% - 0,5 \times 0,6 \times 5\% = 1,5\%$

W dalszych badaniach stosowano właśnie takie ilości wody w celu uzyskania optymalnej zawartości płynów.

6.2.4. Przygotowanie próbek

Badania przeprowadzono dla dwóch mieszanek MCE. Różniły się one rodzajem zastosowanego destruktu. Aby określić optymalny skład destruktu prowadzono badania próbek przy zmiennej zawartości cementu, która wynosiła 2, 3 i 4 % oraz zmiennej zawartości emulsji która wynosiła 3, 4 i 5 %. W sumie dla każdej mieszanki MCE wykonano 9 kombinacji.

Ze względu na ograniczenia czasowe w ciągu jednego dnia możliwe było wykonanie próbek dla 2 kombinacji środków wiążących. Naważka suchych składników mineralnych (destruktu, kruszywo, cement) na 1 według próbkę metody niemieckiej wynosiła 5000 g, natomiast naważka potrzebna do zagęszczenia 6 próbek Marshalla 7500 g. Prace rozpoczynano od skomponowania mieszanki mineralnej odmierzając do pojedynczych naczyń niezbędne ilości destruktu, kruszywa i piasku. Po ok. 60 sekundowym okresie mieszania „na sucho” dodawano obliczoną ilość wody i cementu w postaci zaczynu cementowego. Jako ostatnią, po uzyskaniu jednorodnej

konsystencji mieszanki mineralno-cementowej, dodawano emulsję asfaltową. Łączny czas mieszania wszystkich składników nie przekraczał 2 minut. Próbkę zagęszczano zaraz po wytworzeniu mieszanki. Proces wytwarzania próbek według przedstawiono na rysunkach od 6.7 do 6.10.



Rys. 6.7 Przygotowane suche zaroby mieszanki mineralnej



Rys. 6.8. Formy o średnicy 150 mm przeznaczone do zagęszczania mieszanki MCE



Rys. 6.9 Zagęszczanie prasą statyczną



Rys. 6.10 Przechowywanie zagęszczonych próbek

Bezpośrednio przed badaniem próbki doprowadzono do temperatury $+5^{\circ}\text{C}$ poprzez przechowywanie ich w inkubatorze przez ostatnie 24h przed badaniem. W celu zabezpieczenia próbek przed osuszeniem w inkubatora przechowywano je w szczelnie zawiniętych workach foliowych.

6.2.5. Badania cech mieszanek MCE

Badania cech mieszanek MCE obejmowały:

- Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie po 7 i 28 dniach,
- Stabilność Marshalla po 7 i 28 dniach,
- Moduł sztywności sprężystej po 7 i 28 dniach,
- Zawartość wolnych przestrzeni.

Wyniki badań wytrzymałości na pośrednie rozciąganie przedstawiono w tablicy 6.3 i na rysunkach od 6.11 do 6.16.

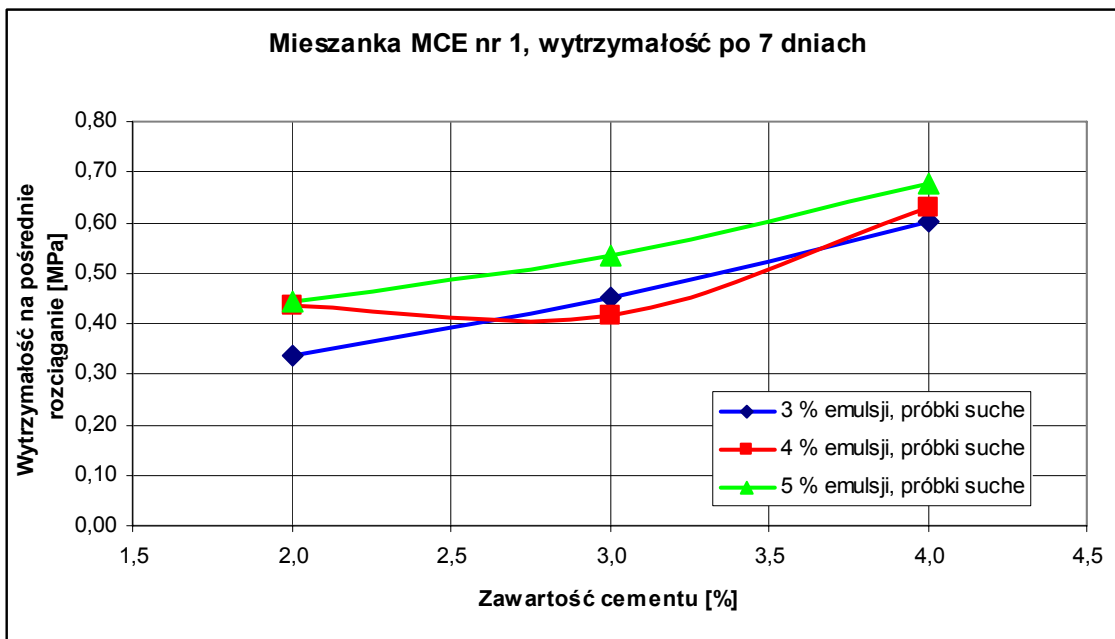
Wyniki badań stabilności Marshalla przedstawiono w tabeli 6.4. i na rysunkach od 6.17 do 6.22.

Wyniki badań modułu sztywności sprężystej przedstawiono w tablicy 6.5 i na rysunkach od 6.23 do 6.28.

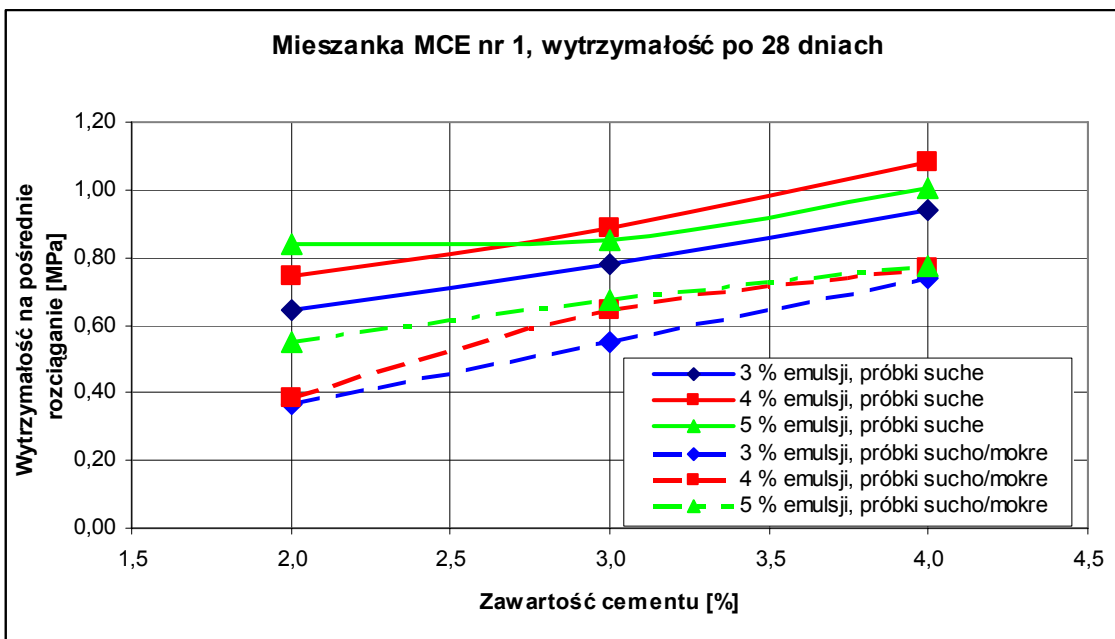
Zawartości wolnych przestrzeni określone dla próbek zagęszczonych różnymi metodami przedstawiono w tablicy 6.6 i na rysunkach od 6.29 do 6.30

Tablica 6.3. Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie i zmiana wytrzymałości po przechowywaniu w wodzie, próbki o średnicy 150 mm, temperatura +5°C

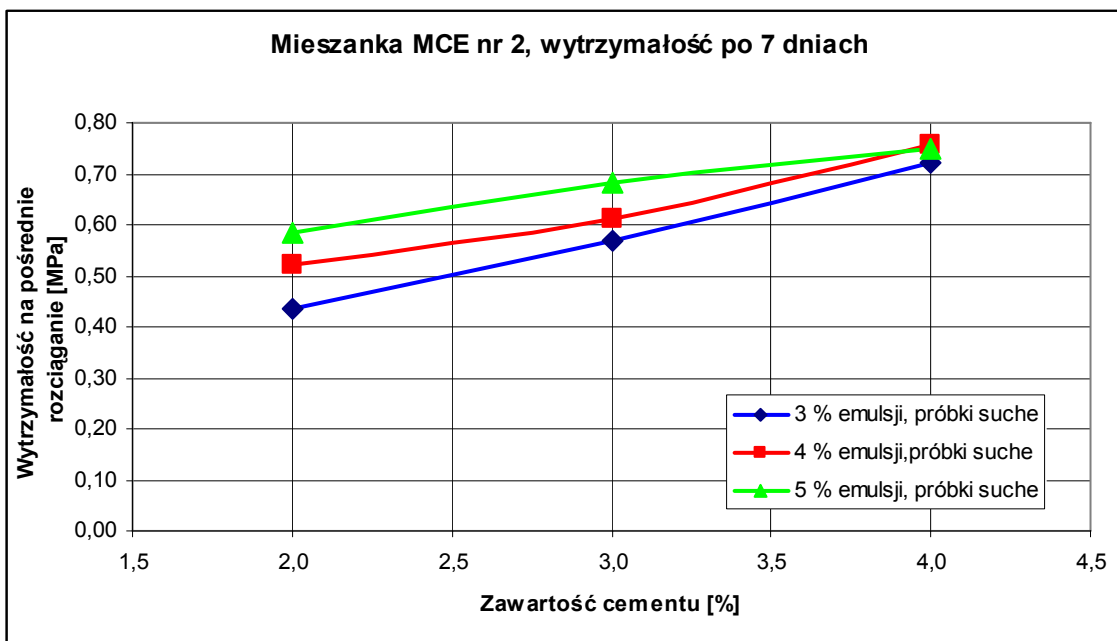
Czas przechowywania	Zawartość cementu[%]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]					
		Mieszanka MCE nr 1 (z destruktem nr 1)			Mieszanka MCE nr 2 (z destruktem nr 2)		
		Zawartość emulsji [%]			Zawartość emulsji [%]		
		3	4	5	3	4	5
7 dni w powietrzu	2	0,34	0,43	0,44	0,43	0,52	0,59
	3	0,45	0,41	0,54	0,57	0,61	0,68
	4	0,60	0,63	0,68	0,72	0,76	0,75
28 dni w powietrzu	2	0,64	0,75	0,84	0,70	0,76	0,90
	3	0,78	0,89	0,85	0,84	0,92	0,92
	4	0,94	1,08	1,01	0,95	1,03	1,00
14 dni w powietrzu+14 dni w wodzie	2	0,37	0,39	0,55	0,53	0,64	0,62
	3	0,55	0,65	0,67	0,62	0,71	0,74
	4	0,74	0,77	0,77	0,86	0,80	0,85
		Pozostała wytrzymałość po przechowywaniu w wodzie [%]					
14 dni w powietrzu+14 dni w wodzie	2	57,3	51,7	65,8	76,0	83,3	69,0
	3	70,1	72,6	79,1	73,5	76,4	80,8
	4	78,8	71,3	76,9	90,4	78,2	84,4



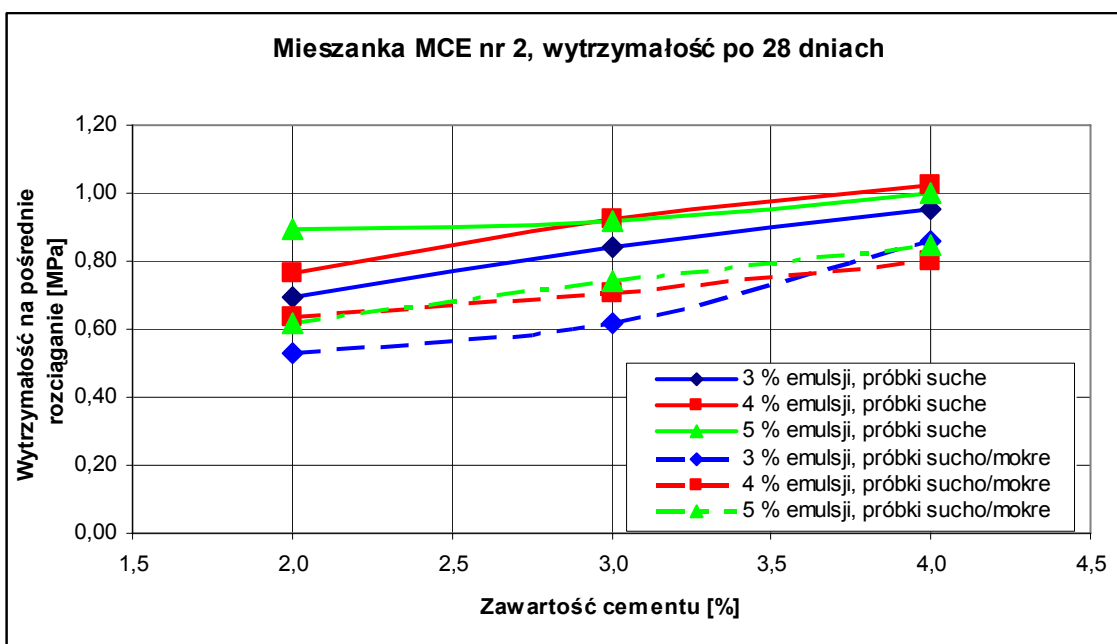
Rys. 6.11 Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie mieszanki MCE nr 1, po 7 dniach, próbki o średnicy 150 mm, temperatura +5°C



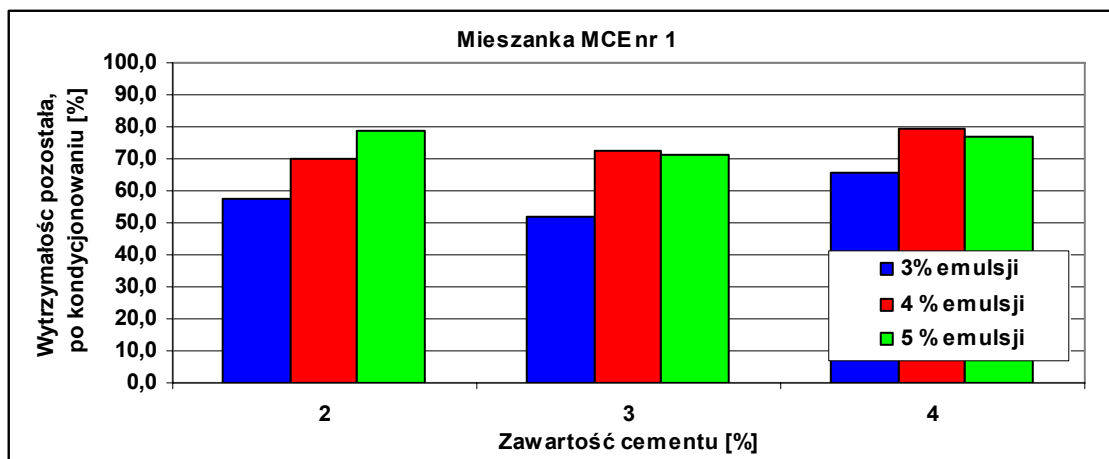
Rys. 6.12 Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie mieszanki MCE nr 1, po 28 dniach, próbki o średnicy 150 mm, temperatura +5°C



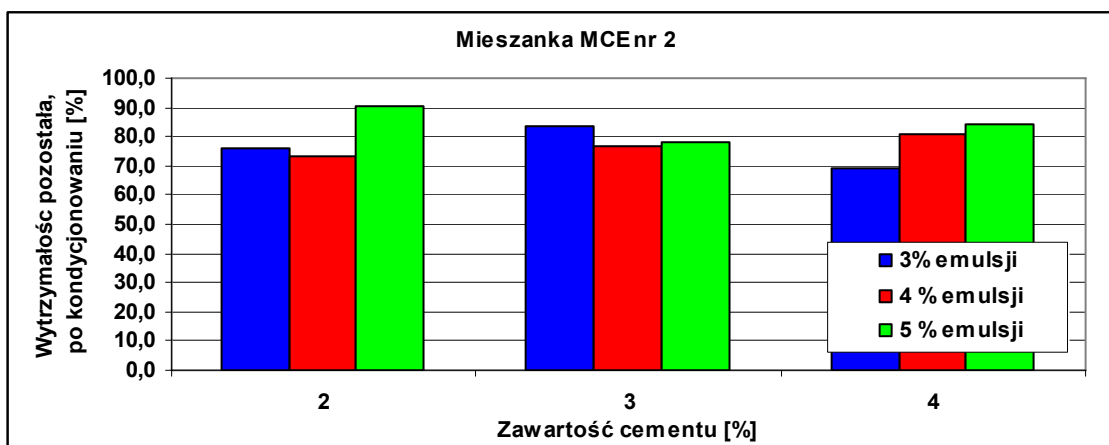
Rys. 6.13 Wytrzymałość na pośrodkowe rozciąganie mieszanki MCE nr 2, po 7 dniach, próbki o średnicy 150 mm, temperatura +5°C



Rys. 6.14 Wytrzymałość na pośrodkowe rozciąganie mieszanki MCE nr 2, po 28 dniach, próbki o średnicy 150 mm, temperatura +5°C



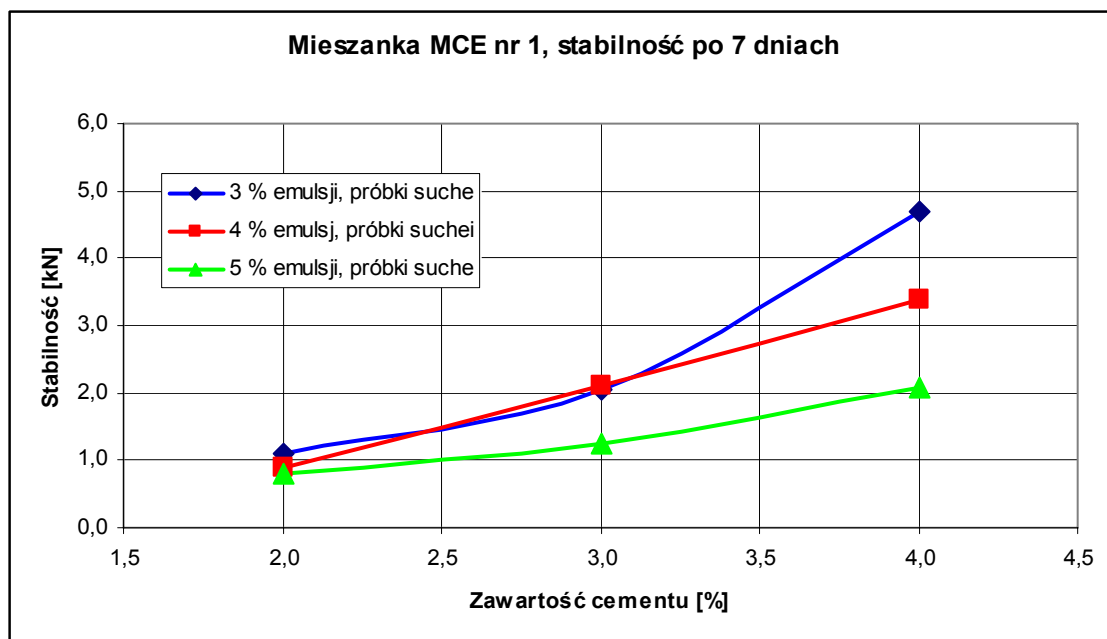
Rys. 6.15. Zmiana wytrzymałość na pośrednie rozciąganie mieszanki MCE nr 1 po kondycjonowaniu , próbki o średnicy 150 mm, temperatura +5°C



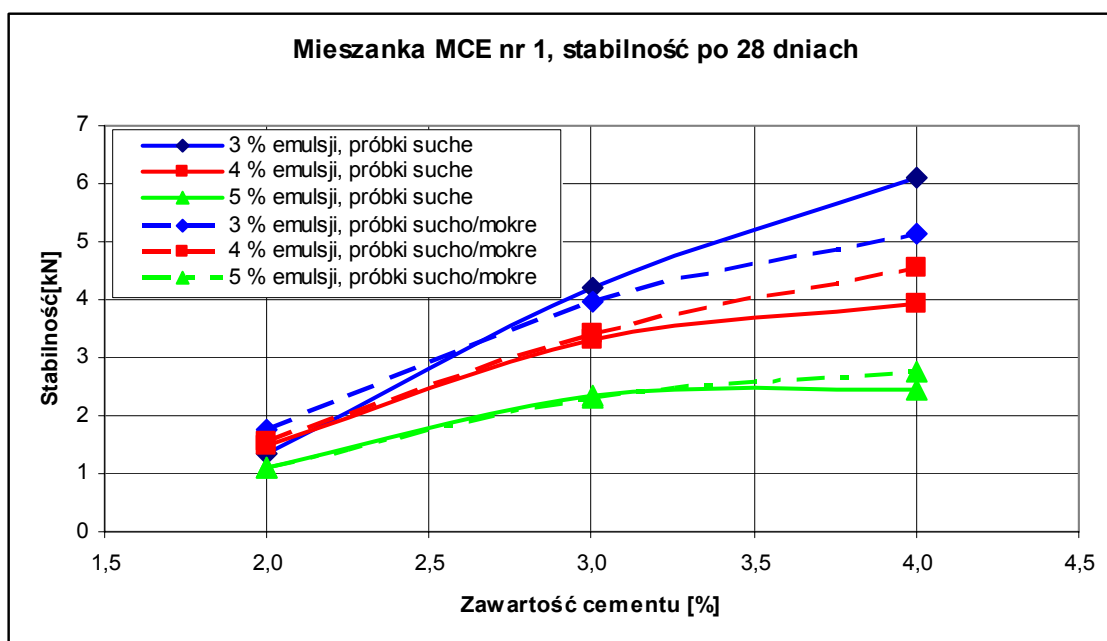
Rys. 6.16. Zmiana wytrzymałość na pośrednie rozciąganie mieszanki MCE nr 2 po kondycjonowaniu , próbki o średnicy 150 mm, temperatura +5°C

Tablica 6.4. Stabilność i zmiana stabilności po przechowywaniu w wodzie próbki o średnicy 100 mm, temperatura +60°C

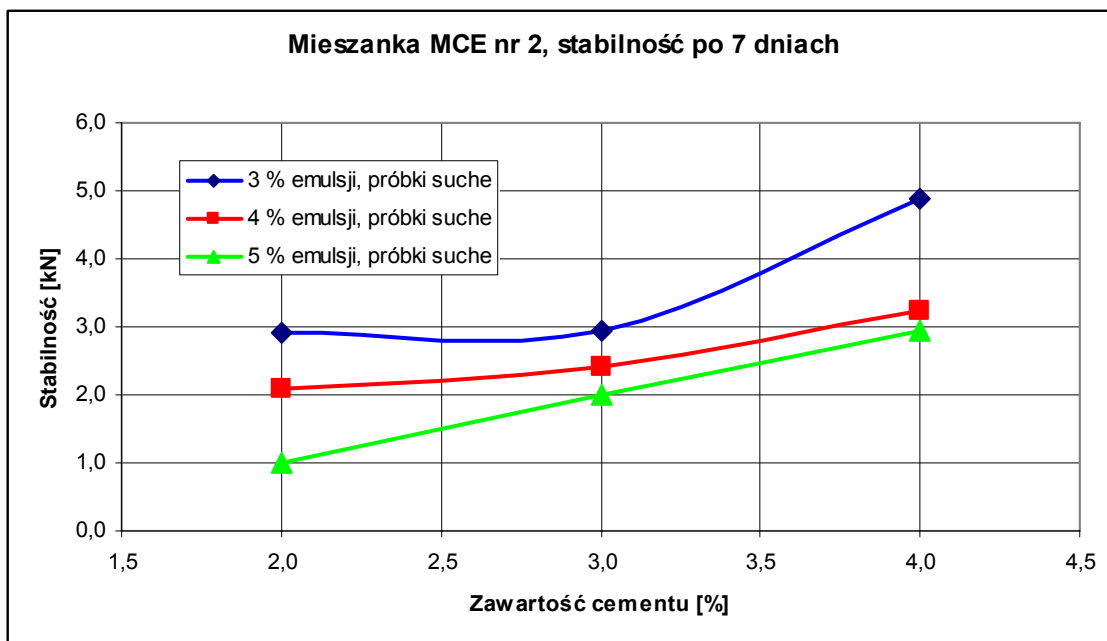
Czas przechowywania	Zawartość cementu[%]	Stabilność [kN]					
		Mieszanka MCE nr 1 (z destruktem nr 1)			Mieszanka MCE nr 2 (z destruktem nr 2)		
		Zawartość emulsji [%]			Zawartość emulsji [%]		
		3	4	5	3	4	5
7 dni w powietrzu	2	1,1	0,9	0,8	2,9	2,1	1,0
	3	2,1	2,1	1,3	3,0	2,4	2,0
	4	4,7	3,4	2,1	4,9	3,3	3,0
28 dni w powietrzu	2	1,3	1,5	1,1	3,4	2,4	1,6
	3	4,2	3,3	2,4	4,5	3,9	2,9
	4	6,1	3,9	2,5	5,9	4,2	3,7
14 dni w powietrzu+14 dni w wodzie	2	1,8	1,6	1,1	3,7	2,6	1,7
	3	4,0	3,4	2,3	4,3	3,5	2,9
	4	5,2	4,6	2,8	4,8	4,0	3,7
		Pozostała stabilność po przechowywaniu w wodzie [%]					
14 dni w powietrzu+14 dni w wodzie	2	131,6	103,3	100,0	109,5	111,9	106,5
	3	94,0	103,9	97,9	94,5	89,6	100,0
	4	84,4	115,8	112,2	81,9	95,2	98,6



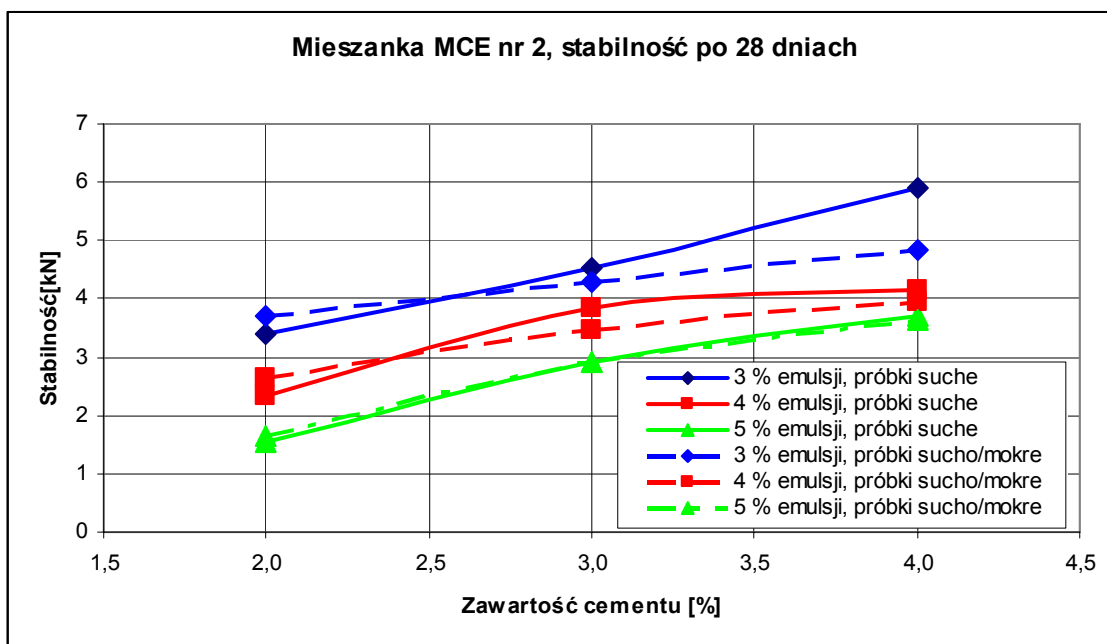
Rys. 6.17. Stabilność mieszanki MCE nr 1, po 7 dniach, próbki o średnicy 100 mm, temperatura +60°C



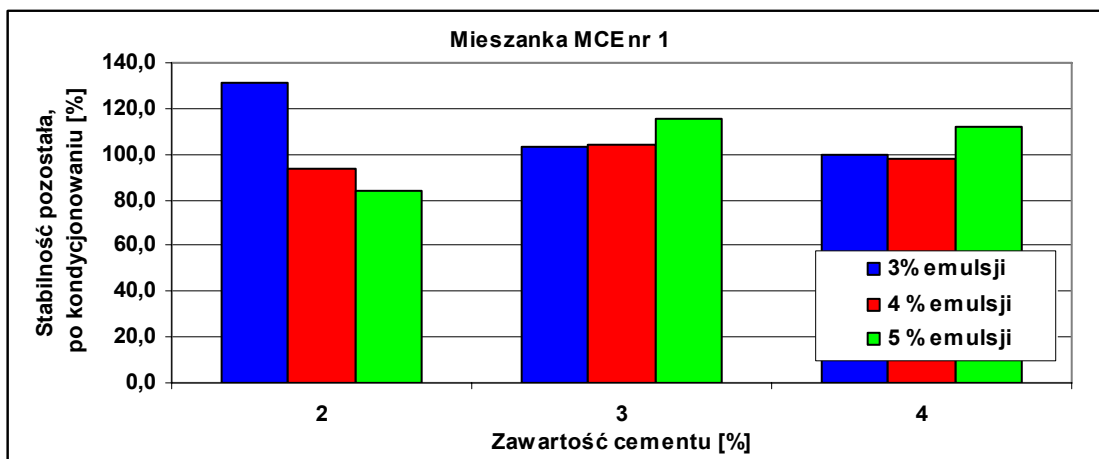
Rys. 6.18. Stabilność mieszanki MCE nr 1, po 28 dniach, próbki o średnicy 100 mm, temperatura +60°C



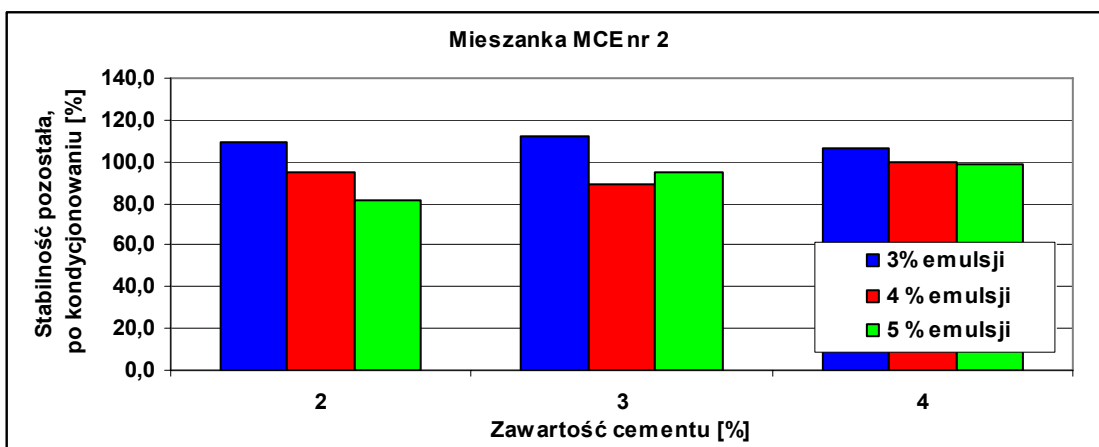
Rys. 6.19. Stabilność mieszanki MCE nr 2, po 7 dniach, próbki o średnicy 100 mm, temperatura +60°C



Rys. 6.20. Stabilność mieszanki MCE nr 2, po 28 dniach, próbki o średnicy 100 mm, temperatura +60°C



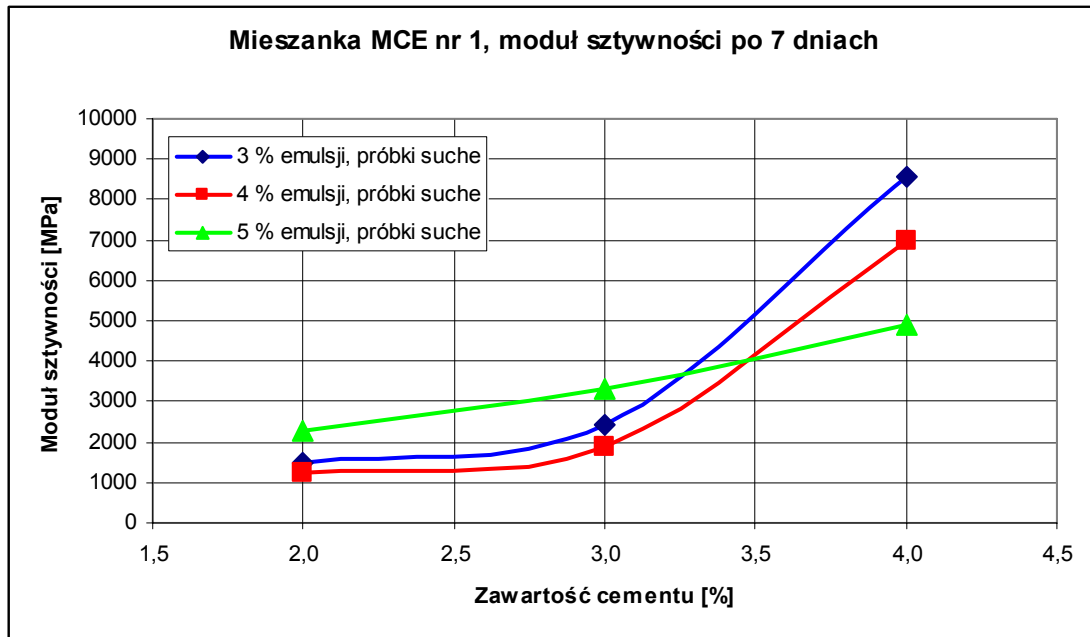
Rys. 6.21. Zmiana stabilności mieszanki MCE nr 1 po kondycjonowaniu, próbki o średnicy 100 mm, temperatura +60°C



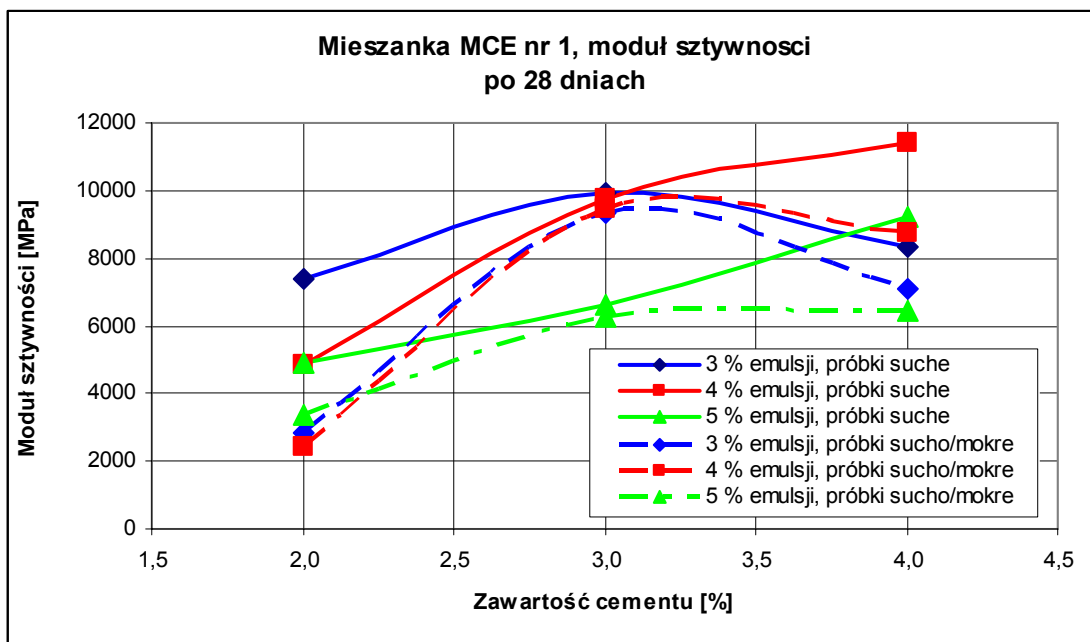
Rys. 6.22. Zmiana stabilności mieszanki MCE nr 2 po kondycjonowaniu, próbki o średnicy 100 mm, temperatura +60°C

Tablica 6.5. Moduł sztywności sprężystej i zmian modułu po przechowywaniu w wodzie, próbki o średnicy 100 mm, temperatura +5°C

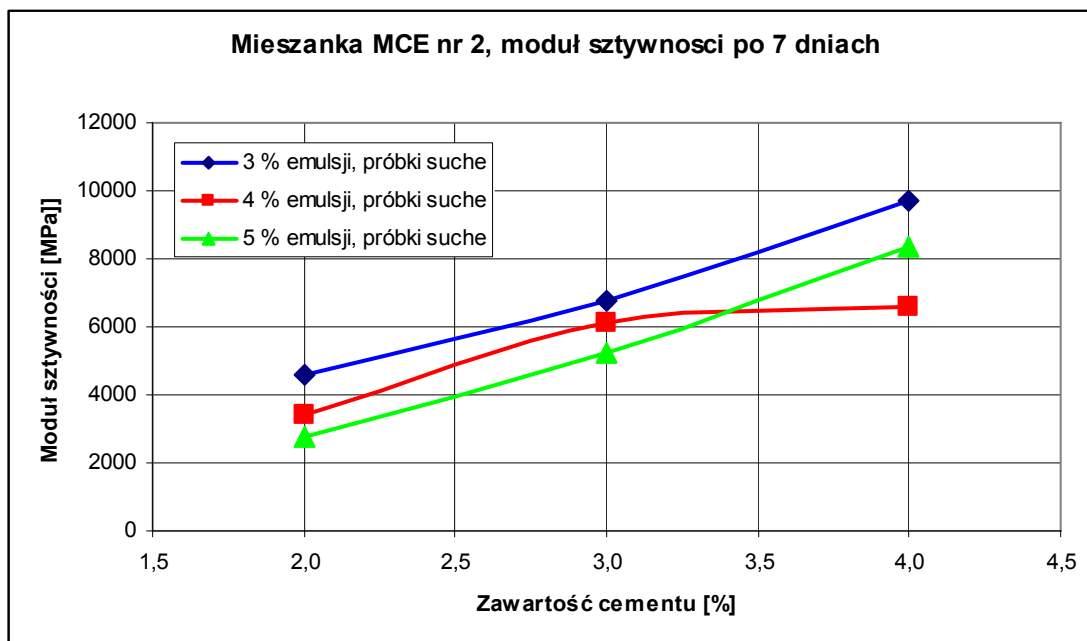
Czas przechowywania	Zawartość cementu [%]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]					
		Mieszanka MCE nr 1 (z destruktem nr 1)			Mieszanka MCE nr 2 (z destruktem nr 2)		
		Zawartość emulsji [%]			Zawartość emulsji [%]		
		3	4	5	3	4	5
7 dni w powietrzu	2	1488	1240	2259	4596	3392	2776
	3	2419	1903	3337	6747	6146	5237
	4	8589	6960	4914	9725	6613	8342
28 dni w powietrzu	2	7408	4833	4881	8253	7778	4166
	3	9936	9765	6612	8226	8433	7219
	4	8329	11380	9239	10166	9539	8666
14 dni w powietrzu+14 dni w wodzie	2	2822	2446	3386	7670	5666	3928
	3	9368	9469	6245	8057	6692	7171
	4	7093	8725	6470	9427	9925	7134
		Pozostały moduł sztywności sprężystej, po przechowywaniu w wodzie [%]					
14 dni w powietrzu+14 dni w wodzie	2	38,1	50,6	69,4	92,9	72,8	94,3
	3	94,3	97,0	94,4	97,9	79,4	99,3
	4	85,2	76,7	70,0	92,7	104,0	82,3



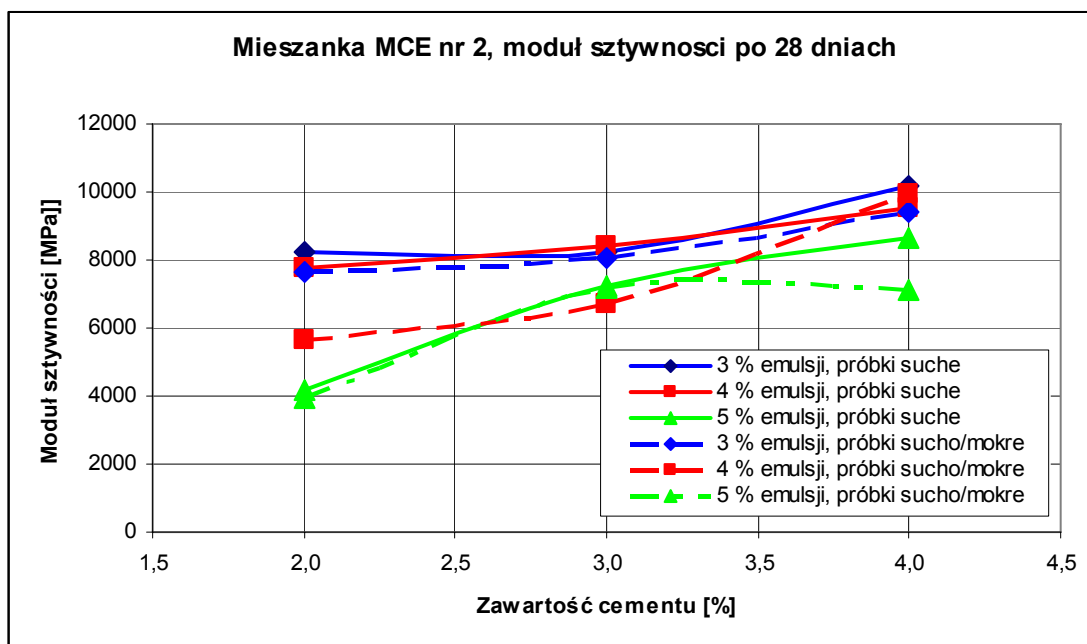
Rys. 6.23. Moduł sztywności sprężystej mieszanki MCE nr 1, po 7 dniach, próbki o średnicy 100 mm, temperatura +5°C



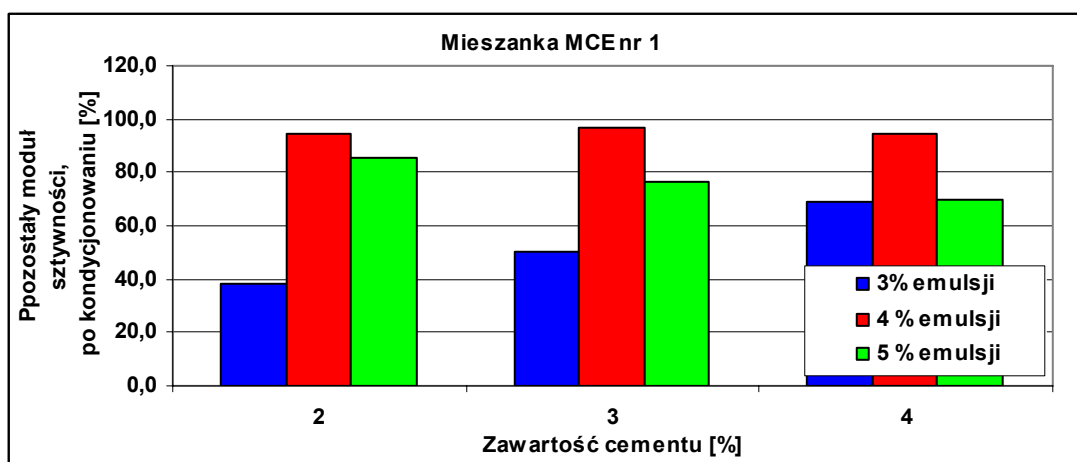
Rys. 6.24. Moduł sztywności sprężystej mieszanki MCE nr 1, po 28 dniach, próbki o średnicy 100 mm, temperatura +5°C



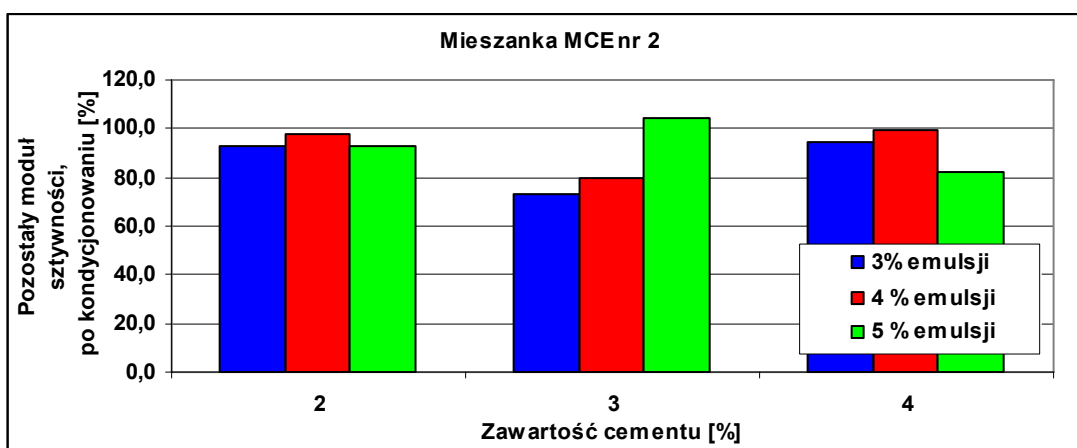
Rys. 6.25. Moduł sztywności sprężystej mieszanki MCE nr 2, po 7 dniach, próbki o średnicy 100 mm, temperatura +5°C



Rys. 6.26. Moduł sztywności sprężystej mieszanki MCE nr 2, po 28 dniach, próbki o średnicy 100 mm, temperatura +5°C



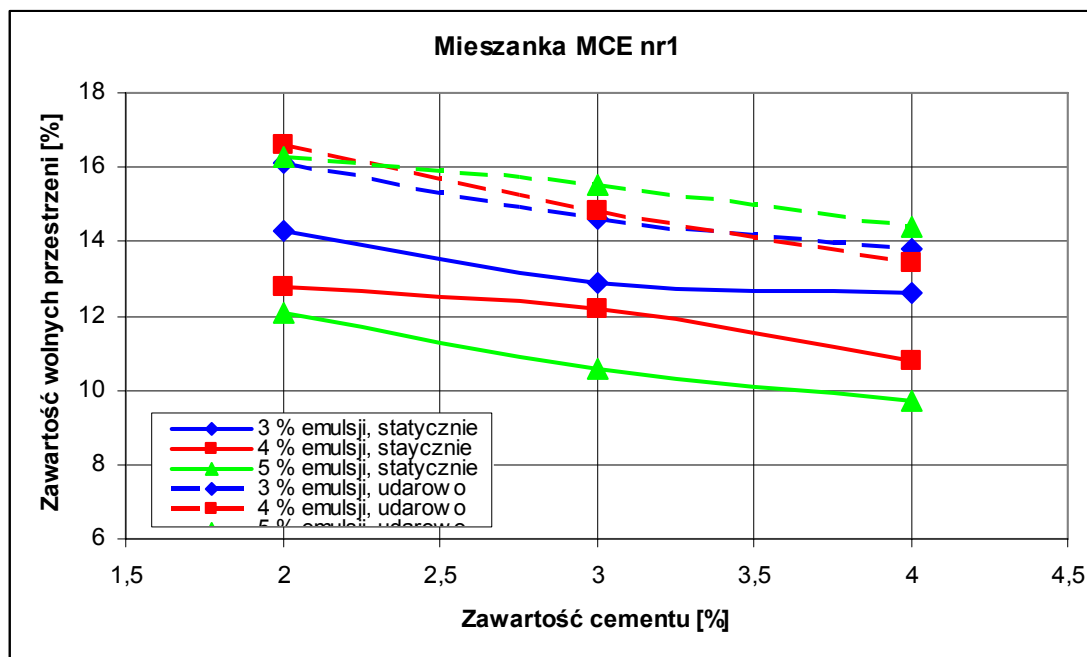
Rys. 6.27. Zmiana stabilności mieszanki MCE nr 1 po kondycjonowaniu, próbki o średnicy 100 mm, temperatura +5°C



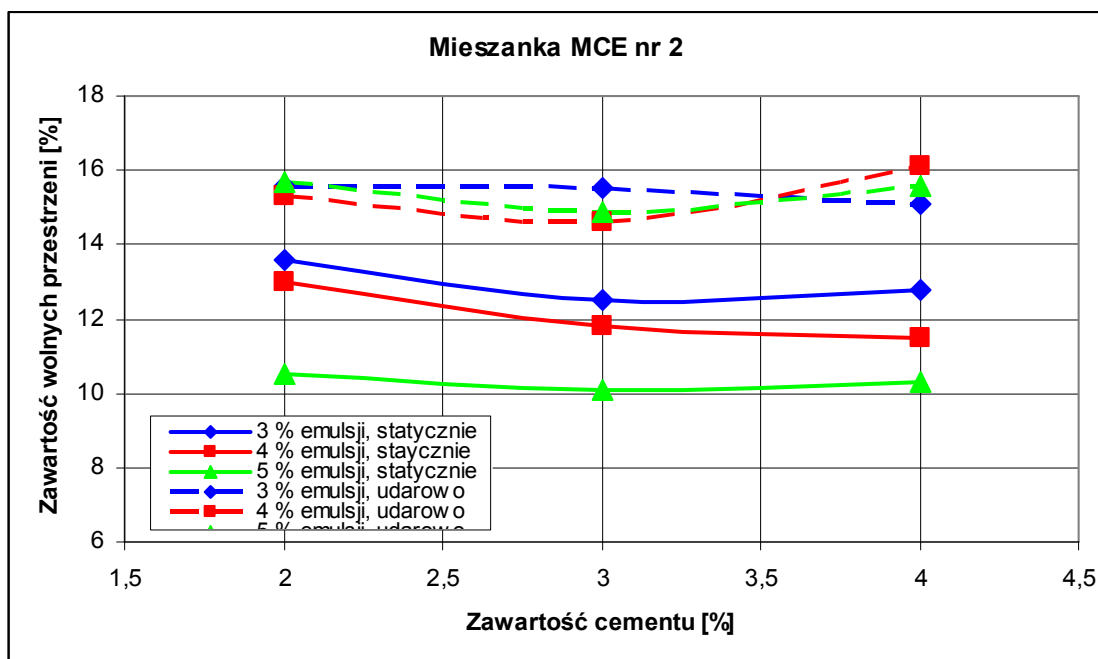
Rys. 6.28. Zmiana stabilności mieszanki MCE nr 2 po kondycjonowaniu, próbki o średnicy 100 mm, temperatura +5°C

Tablica 6.6. Zawartość wolnych przestrzeni, próbki o średnicy 100 mm,

Sposób zagęszczania	Zawartość cementu [%]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]					
		Mieszanka MCE nr 1 (z destruktem nr 1)			Mieszanka MCE nr 2 (z destruktem nr 2)		
		Zawartość emulsji [%]			Zawartość emulsji [%]		
		3	4	5	3	4	5
Zagęszczanie statyczne (prasa)	2	14,3	12,8	12,1	13,6	13,0	10,5
	3	12,9	12,2	10,6	12,5	11,8	10,1
	4	12,6	10,8	9,7	12,8	11,5	10,3
Zagęszczania udarowe (Marshall)	2	16,1	16,6	16,3	15,6	15,3	15,7
	3	14,6	14,8	15,5	15,5	14,6	14,9
	4	13,8	13,4	14,4	15,1	16,1	15,6



Rys. 6.29. Zawartość wolnych przestrzeni w mieszance MCE nr 1, w próbkach zagęszczonych statycznie (prasa) i udarowo (Marshall)



Rys. 6.30. Zawartość wolnych przestrzeni w mieszance MCE nr 2, w próbkach zagęszczonych statycznie (prasa) i udarowo (Marshall)

6.2.6. Analiza wyników badań

Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie. Wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie w $+5^{\circ}\text{C}$ po 7 dniach dla mieszanki MCE nr 1 zawierały się w granicach 0,34 - 0,68 MPa (w zależności od zawartości środków wiążących), a po 28 dniach 0,64 - 1,08 MPa. Dla mieszanki MCE nr 2 wielkości te wyniosły odpowiednio 0,43 - 0,75 MPa oraz 0,70 - 1,03 MPa. Można zaobserwować, że przedziały wytrzymałości 7 dniowej dla obu rodzajów destruktu różnią się, natomiast przedziały wytrzymałości 28 dniowej są do siebie zbliżone. Wynika z tego, że wpływ jakości materiału mineralnego destruktu (destruk nr 1- kruszywo naturalne, destruk nr 2 - kruszywo łamane) na wytrzymałość 7 dniową jest istotny, natomiast o wytrzymałości 28 dniowej - po całkowitym rozpadzie emulsji i zakończeniu procesu wiązania cementu - decyduje głównie ilość środków wiążących. Większy dodatek cementu wpływa bez wątplenia dodatnio na zwiększenie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie. Dla obu rodzajów mieszanki krzywe wytrzymałości 7 dniowej (wszystkie kombinacje środków wiążących) mają charakter stale rosnący. Nieregularność krzywej dla mieszanki z destruktem nr 1 i 3% zawartością cementu może być wywołana czynnikami zewnętrznymi, trudnymi w tej chwili do odtworzenia. Oceniając uzyskane wyniki w oparciu o kryteria niemieckie [4] można stwierdzić, że w przypadku mieszanki MCE nr 1 spełnione są one dla zawartości emulsji 3, 4 i 5% oraz zawartości cementu 3 i 4 %. Z zawartością cementu wynoszącą 2 % mieszanka MCE nr 1 (z destruktem z kruszywa naturalnego) charakteryzował się zbyt dużym spadkiem wytrzymałości po przechowywaniu w wodzie. W przypadku mieszanki MCE nr 2 tylko wariant z 2% cementu i 3 % emulsji nie spełniał wymagań. Wskazuje to wyraźnie, że można by w mieszance MCE nr 2 pokusić się jeszcze o ograniczenie ilości kruszywa doziarniającego, co zwiększyłoby korzyści ekonomiczne przy jednoczesnym spełnieniu wymagań.

Stabilność. Stabilności próbek Marshalla w temperaturze $+60^{\circ}\text{C}$ wytworzonych z mieszanki nr 1 i nr 2 były dość niskie. Po 7 dniach wynosiły, dla mieszanki nr 1 - 0,8 - 4,7 kN a po 28 dniach 1,1 - 5,2 kN. Dla mieszanki nr 2 wartości te były na poziomie 1,0 - 4,9 kN po 7 dniach oraz 1,55 - 5,9 kN po 28 dniach. Dla obu rodzajów mieszanek zwiększenie zawartości emulsji asfaltowej powodowało obniżenie stabilności. Badanie mieszanki nie spełniały wymagań polskich [2]. We wszystkich przypadkach stabilność była mniejsza od 8 kN. Jeżeli wsiąść pod uwagę wymagania firmy WIRTGEN [23], dla mieszanek mineralno-emulsyjnych, w których minimalna stabilność w $+60^{\circ}\text{C}$ wynosi 2 kN, w przypadku mieszanki MCE nr 1 z zawartością cementu 3 lub 4 %, przy ilości emulsji 3, 4 i 5 % wymagani te są spełnione. W przypadku mieszanki MCE nr 2 tylko z zawartością cementu 2% i emulsji 4 % nie są spełnione wymagania firmy WIRTGEN. W przypadku pozostałych kombinacji środków wiążących wymagania firmy WIRTGEN są spełnione.

Moduł sztywności. Analiza wyników badań modułów sztywności mieszanek MCE jest utrudniona ze względu na brak kryteriów zarówno w Polsce jak i w Niemczech. Można jedynie stwierdzić, że w przypadku próbek po 7 dniach przechowywania widoczna jest wyraźnie wzrostu modułów wraz ze wzrostem zawartości cementu. Dla próbek po 28 dniach, po zakończeniu twardnienia, tendencje te nie są tak widoczne. Wielkości uzyskiwane w badaniu są duże i świadczą o znacznej sztywności

mieszanek MCE. Należy zwrócić jeszcze uwagę, że wzrost zawartości cementu z 2 do 4 % powoduje prawie dwukrotny wzrost sztywności mieszanki MCE.

Zawartość wolnych przestrzeni. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach o średnicy 150 mm zagęszczanych prasą statyczną, dla obu mieszanek, cechowała jednoznaczna tendencja spadkowa wraz ze zwiększaniem zawartości lepiszcza bitumicznego. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach mieszanki nr 1 kształtowała się na poziomie 14,3% - 9,7%. W przypadku mieszanki nr 2 przedział ten był mniejszy - 13,6% - 10,1%. Wszystkie powyższe wartości mieszczą się w granicach 8% - 15% podanych w niemieckich wytycznych [4]. Metoda zagęszczania ubijaniem Marshalla dała odmienne rezultaty. Generalnie, otrzymane zależności zawartości wolnych przestrzeni od ilości emulsji asfaltowej posiadały charakter rosnący. W próbkach wykonanych z mieszanki nr 1 wolne przestrzenie wynosiły od 14,6 do 16,1%. W próbkach z mieszanki nr 2, od 13,4 do 16,6%. Wartości te znajdują się przy górnej granicy polskich wymagań [2], który wynosi od 9% do 16% a w kilku przypadkach nieznacznie przekraczając nawet górną granicę. Wzrost zawartości wolnych przestrzeni, podczas zagęszczania udarowego, wraz ze zwiększaniem się ilości emulsji asfaltowej prawdopodobnie wynika z faktu, iż podczas zagęszczania próbek w formach Marshalla płyny obecne w mieszance MCE absorbują część energii spadającego ubijaka. Zjawisko to staje się bardziej intensywne wraz ze wzrostem zawartości fazy płynnej w mieszance MCE.

6.2.7. Podsumowanie

Podsumowując przeprowadzone badania można stwierdzić, że:

1. Określenie wilgotności optymalnej dla mieszanki destruktu z kruszywem przy użyciu normalnej metody Proctora okazało się niemożliwe, natomiast jej wartość uzyskana metodą zmodyfikowaną była zbyt wysoka. Ubijak Proctora powoduje zmianę uziarnienia mieszanki podczas przeprowadzania badania. Możliwe jest wyznaczenie wilgotności optymalnej na podstawie pomiaru gęstości strukturalnej próbek mieszanki wyprodukowanej jedynie z wodą, metoda ta wymaga jednak dopracowania.
2. Zagęszczanie mieszanki MCE ubijaniem w formach Marshalla było utrudnione ze względu na uziarnienie destruktu zawierającego ziarna o dużych wymiarach. Wystąpienie w próbce ziarna zajmującego jej znaczną objętość wpływa na wyniki badań wytrzymałościowych, ale było możliwe zagęszczanie statyczne.
3. Zależności wytrzymałości na pośrednie rozciąganie i stabilności od zawartości lepiszcza są przeciwstawne. W przypadku zwiększania ilości asfaltu wytrzymałość na pośrednie rozciąganie wzrasta natomiast stabilność maleje.
4. Przeprowadzone badania pokazały, że parametry wytrzymałościowe mieszanek MCE zmniejszają się pod wpływem działania wody. Obserwacja tego zjawiska jest możliwa jedynie przy badaniu wytrzymałości na pośrednie rozciąganie i modułu sztywności. Niezależnie od sposobu przechowywania (w powietrzu i wodzie) stabilność próbek Marshalla nie ulegała znaczącym zmianom.
5. Odporność mieszanek MCE na działanie wodę zależy od zawartości środków wiążących (emulsji i cementu) i zwiększa się wraz ze zwiększeniem ich zawartości.

6. Zawartości wolnych przestrzeni dla próbek zagęszczanych prasą statyczną posiadają jednoznaczną tendencję spadkową wraz ze zwiększaniem zawartości lepiszcza. Osiągnięte wartości znajdują się w środkowym obszarze zalecanego przez niemieckie wytyczne [4].
7. W przypadku próbek zagęszczanych ubijakiem Marshalla zawartości wolnych są zbliżone do górnej dopuszczalnej w polskich wytycznych granicy [2].
8. Posługując się kryterium stabilności po 28 dniach dojrzewania według polskich wymagań [2], żadna z badanych mieszanek nie spełnia wymagań jak dla ruchu KR3-6, natomiast kilka, mieszanek z najmniejszą zawartością emulsji i największą cementu (w sumie 5 na 18 badanych) miało stabilność większą od 4 kN, wartości wymaganej dla KR1-2.
9. Oceniając uzyskane wyniki w oparciu o kryteria niemieckie [4] można stwierdzić, że w przypadku mieszanki MCE nr 1 spełnione są one dla zawartości emulsji 3, 4 i 5% oraz zawartości cementu 3 i 4 %. Z zawartością cementu wynoszącą 2 % mieszanka MCE nr 1 (z destruktem z kruszywa naturalnego) charakteryzowała się zbyt dużym spadkiem wytrzymałości po przechowywaniu w wodzie. W przypadku mieszanki MCE nr 2 tylko wariant z 2% cementu i 3 % emulsji nie spełniał wymagań, pozostałe warianty spełniały wymagania niemieckie.
- 10. Porównanie oceny według polskich i niemieckich kryteriów pokazuje, że wymagania polskie są zbyt wygórowane, i to co w Niemczech jest uważane za pełnowartościowy materiał dla dróg obciążonych ruchem do KR4, w Polsce nie jest nawet akceptowane dla ruchu KR1-2.**

6.3. Wpływ metody zagęszczenia na wyniki badań

Badania wpływu zagęszczenia na parametry mieszanek MCE przeprowadzono aby pokazać, że nie można w wymaganiach podawać dwóch metod zagęszczania, dla których uzyskuje się różne zagęszczenie. Ponadto w badaniach wprowadzono dodatkowo metodę niemiecką zagęszczania próbek, która jest w miarę prosta a ponadto umożliwia zagęszczanie próbek o większych średnicach, co jest szczególnie ważne w przypadku gruboziarnistych materiałów. Ostatecznie zagęszczanie odbywało się według następujących metod:

- Metoda A według polskich wytycznych (ubijak Marshalla).
- Metoda B według polskich wytycznych (prasa statyczna).
- Metoda wg wytycznych niemieckich (prasa statyczna).

Szczegółowo metody te opisano w punkcie 6.1.1.

6.3.1 Badany materiał

Badania mieszanka MCE składała się z następujących składników:

- | | |
|---|--------|
| • Destrukt z istniejącej nawierzchni | 47,8 % |
| • Mieszanka kruszywa łamanego 0/31,5 | 39,1 % |
| • Cement CEM II/BV 32,5 R | 4,0 % |
| • Woda | 6,2 % |
| • Emulsja asfaltowa, kationowa wolnorozpadowa K3-60 | 3,0 % |
| RAZEM: | 100 %. |

Uziarnienie mieszanki MCE przedstawiono w tablicy 6.7. Parametry uzyskane dla zaprojektowanej mieszanki MCE przedstawiono w tablicy 6.8.

Tablica 6.7. Uziarnienie mieszanki MCE

Sito # [mm]	Krzywe graniczne mieszanki MCE 0/31,5 wg [2]	Uziarnienie MCE
31,5	100	93,4
25,0	90 – 100	83,8
	70 - 100	93,4
16,0	60 - 100	78,4
12,8	58 – 93	73,3
8	40 – 85	65,2
6,3	35 – 78	59,0
4,0	25 – 70	46,7
2,0	15 – 50	33,8
0,85	10 – 37	22,0
0,42	8 – 28	15,2
0,3	5 – 18	12,4
0,15	4 – 11	8,9
0,075	3 – 8	6,6

Tablica 6.8. Parametry mieszanki MCE

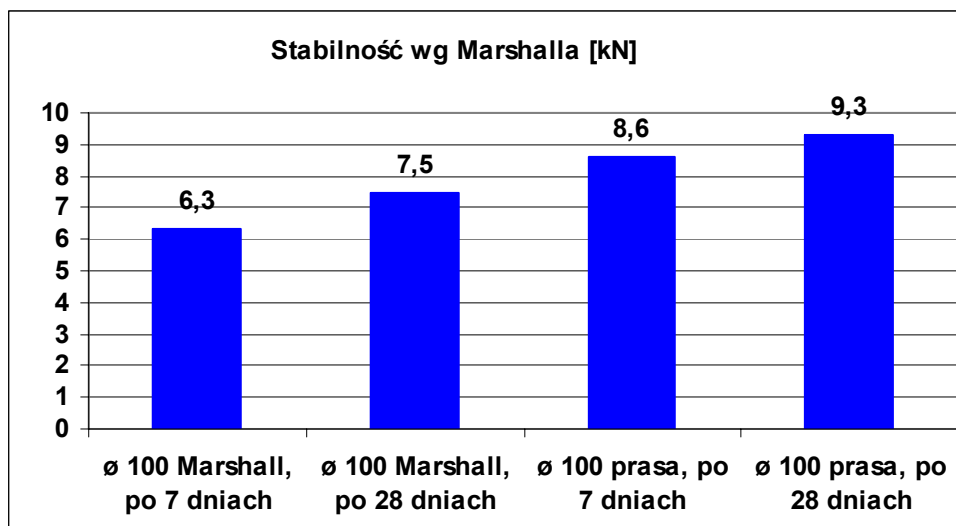
Parametr	Wartość	Wymagania wg [2] (metoda zagęszczania 2)
Gęstość strukturalna mieszanki MCE [g/cm ³]	2,142	-
Gęstość objętościowa mieszanki MCE [g/cm ³]	2,405	-
Stabilność wg Marshalla [kN]	11,6	8,0 – 20,0
Odkształcenie wg Marshalla [mm]	1,8	1,0 – 3,5
Wolna przestrzeń [%]	10,9	5,0 – 12,0
Wilgotność optymalna [%]	7,4	-
Maksymalny ciężar objętościowy wg Proctora [g/cm ³]	2,057	-

6.3.2. Wyniki badań

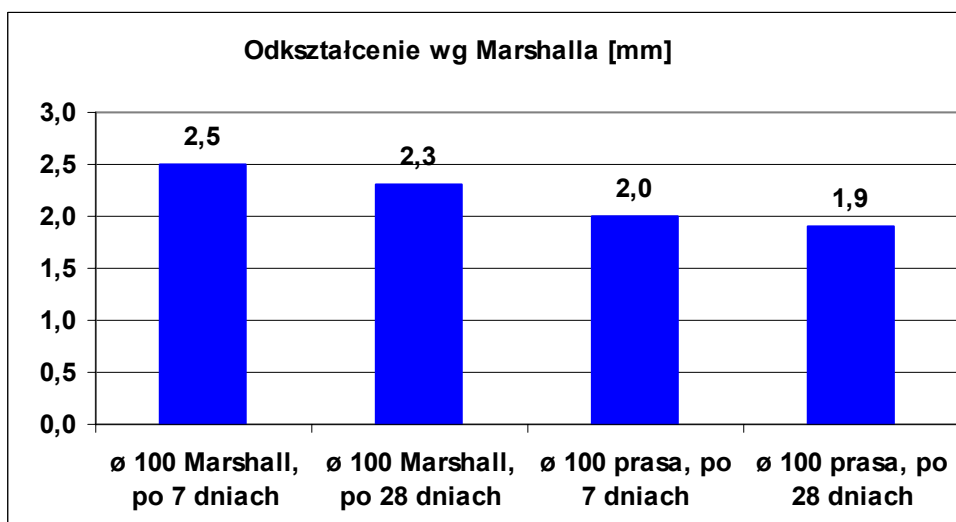
Wyniki badań mieszanki MCE przedstawiono w tablicy 6.9 oraz na rysunkach od 6.31 do 6.35.

Tablica 6.9. Wyniki badań mieszanki MCE zagęszczanych różnymi sposobami.

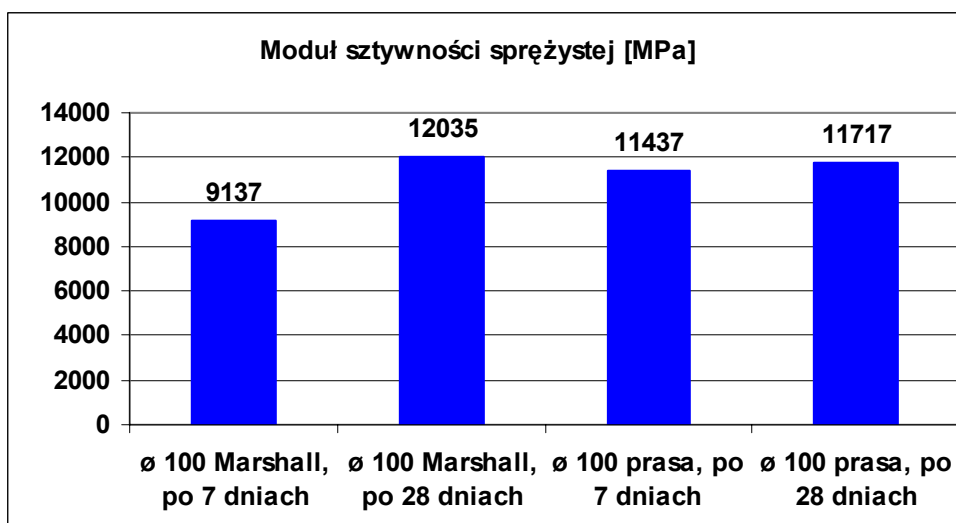
Cecha:	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Uwagi:
Próbki o średnicy 100 mm, zagęszczane udarowo w ubijaku Marshalla, po 7 dniach od zagęszczenia (metoda A wg polskich wytycznych)			
Stabilność wg Marshalla [kN]	6,3	0,4	
Odkształcenie wg Marshalla [mm]	2,5	0,6	
Moduł sztywności sprężystej [MPa]	9137	1831	
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]	0,84	0,04	
Zawartość wolnych przestrzeni [%]	12,6	0,9	
Próbki o średnicy 100 mm, zagęszczane udarowo w ubijaku Marshalla, po 28 dniach od zagęszczenia (metoda A wg polskich wytycznych)			
Stabilność wg Marshalla [kN]	7,5	0,7	
Odkształcenie wg Marshalla [mm]	2,3	0,5	
Moduł sztywności sprężystej [MPa]	12035	2057	
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]	0,95	0,17	
Próbki o średnicy 100 mm, zagęszczane statycznie w prasie hydraulicznej, po 7 dniach od zagęszczenia (metoda B wg polskich wytycznych)			
Stabilność wg Marshalla [kN]	8,6	0,9	
Odkształcenie wg Marshalla [mm]	2,0	0,1	
Moduł sztywności sprężystej [MPa]	11437	803	
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]	1,6	0,16	
Zawartość wolnych przestrzeni [%]	6,7	0,4	
Próbki o średnicy 100 mm, zagęszczane statycznie w prasie hydraulicznej, po 28 dniach od zagęszczenia (metoda B wg polskich wytycznych)			
Stabilność wg Marshalla [kN]	9,3	1,1	
Odkształcenie wg Marshalla [mm]	1,9	0,3	
Moduł sztywności sprężystej [MPa]	11717	520	
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]	1,74	0,03	
Próbki o średnicy 150 mm, zagęszczane statycznie w prasie hydraulicznej, po 7 dniach od zagęszczenia (metoda wg wymagań niemieckich)			
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]	0,78	0,08	
Zawartość wolnych przestrzeni [%]	11,4	1,3	
Próbki o średnicy 150 mm, zagęszczane statycznie w prasie hydraulicznej, po 28 dniach od zagęszczenia (metoda wg wymagań niemieckich)			
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]	1,01	0,12	



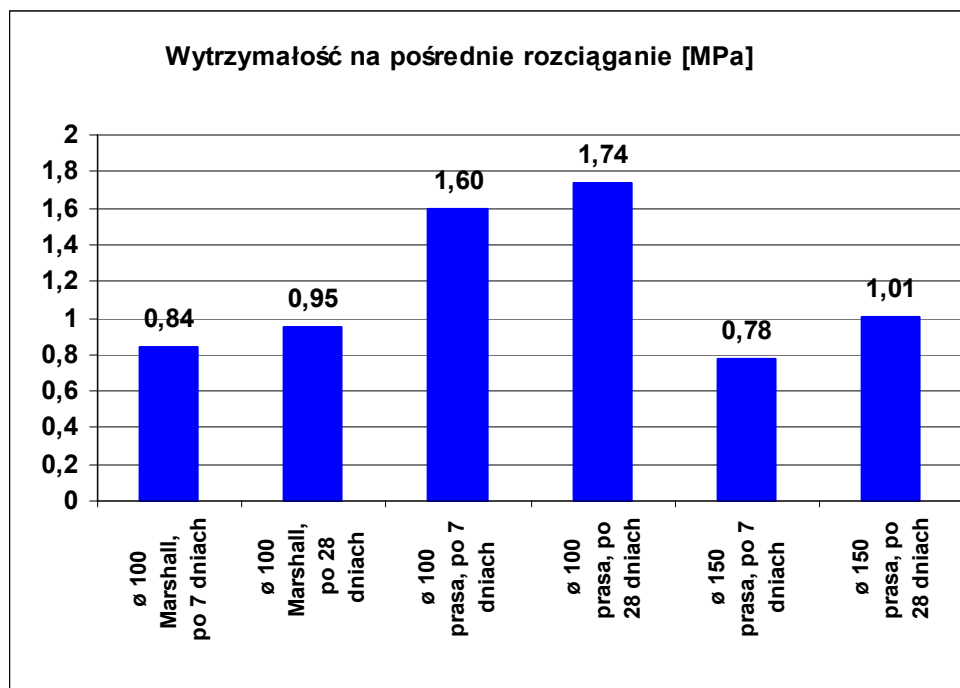
Rysunek 6.31 Wpływ metody zagęszczenia na stabilność wg Marshalla mieszanki MCE



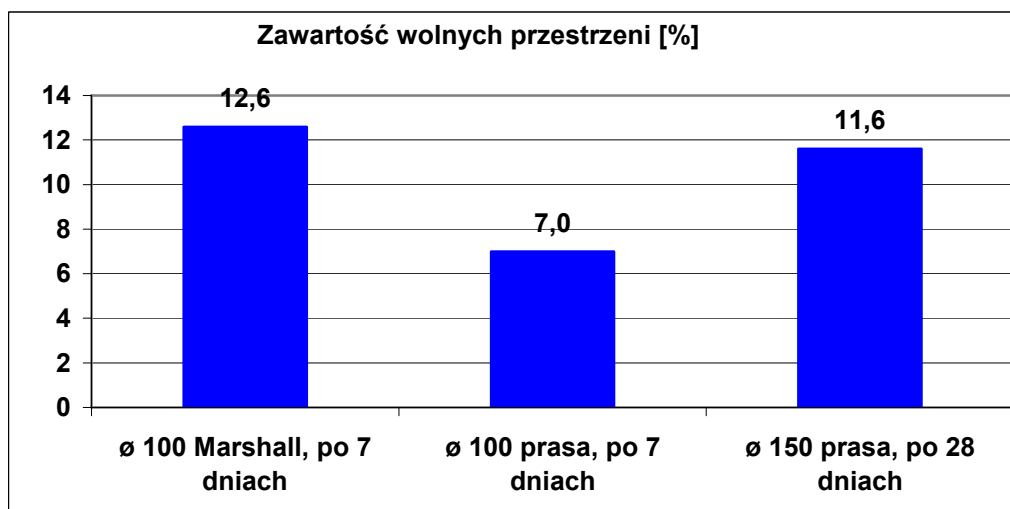
Rysunek 6.32 Wpływ metody zagęszczenia na odkształcenie wg Marshalla mieszanki MCE



Rysunek 6.33 Wpływ metody zagęszczenia na moduł sztywności sprężystej mieszanki MCE



Rysunek 6.34 Wpływ metody zagęszczania na wytrzymałość na pośrednie rozciąganie mieszanki MCE



Rysunek 6.35 Wpływ metody zagęszczania na zawartość wolnych przestrzeni w próbkach mieszanki MCE

6.3.3. Wnioski z badań wpływu zagęszczenia mieszanki MCE na wyniki badań

Z przeprowadzonego porównania wynika, że:

1. Istnieje duży wpływ metody zagęszczenia próbek na uzyskiwane wyniki, na co wskazują zarówno duże różnice w zawartości wolnych przestrzeni jak i wytrzymałość na pośrednie rozciąganie.
2. Nie można stosować dwóch metod zagęszczania do oceny tego samego materiału, ponieważ prowadzi to do uzyskiwania wartości, których nie można ze sobą porównać. Może prowadzić to do problemów związanych zarówno z projektowaniem jak i oceną wykonanej mieszanki MCE.
3. W wytycznych do projektowania MCE powinna znaleźć się jedna metoda zagęszczania próbek, która będzie zbliżona do warunków zagęszczania mieszanki MCE.
4. Z badań wynika, że lepszą metodą jest zagęszczanie statyczne niż zagęszczanie w ubijaku Marshalla i dlatego sugerujemy przyjęcie metody statycznej.

6.4. Zmienność cech mieszanki MCE

Przedmiotem badań była podbudowa z mieszanki MCE wykonana na drodze krajowej nr 5, od km 50+500 do km 59+000 (obejście Bydgoszczy). Istniejąca konstrukcja składała się z warstw bitumicznych o grubości od 11 do 26 cm, średnio 16,9 cm wykonanych na podbudowie z gruntu stabilizowanego cementem o grubości od 5 do 18 cm, średnio 13,6 cm. W podłożu zalegały piaski drobno i średnioziarniste. Podstawowymi uszkodzeniami nawierzchni były spękania, koleiny, obłamania krawędzi oraz wyboje i łaty. Stan drogi był typowy dla nawierzchni wykonanych w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku, obciążonych ciężkim ruchem.

Projekt remontu zakładał wykonanie podbudowy z mieszanki MCE o średniej grubości 20 cm oraz dwóch warstw asfaltowych o łącznej grubości 11 cm. Taka nawierzchnia, z założenia, miała funkcjonować 6 – 8 lat. Po tym czasie przewidywana jest przebudowa drogi.

6.4.1. Badania laboratoryjne

W trakcie wykonywania podbudowy, w ramach bieżącej kontroli jakości, każdego dnia formowano po trzy próbki o średnicy 100 mm i średniej wysokości 65 mm. Próbki były zagęszczane metodą udarową zgodnie z procedurą opisaną w [2]. Próbki były przechowywane ponad 28 dni, od chwili ich uformowania, a następnie zostały poddane badaniom laboratoryjnym.

Do określenia zmienności cech mieszanki MCE wykorzystano badanie pośredniego rozciągania, w którym wyznaczono:

- Moduł sprężystości w aparacie NAT,
- Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie określone metodą brazylijską.

Wykorzystano te badania, ponieważ określanie modułu sprężystości jest badaniem nieniszczącym i próbki po tym badaniu można wykorzystać do określenia wytrzymałości na pośrednie rozciąganie. Badania przeprowadzono w trzech

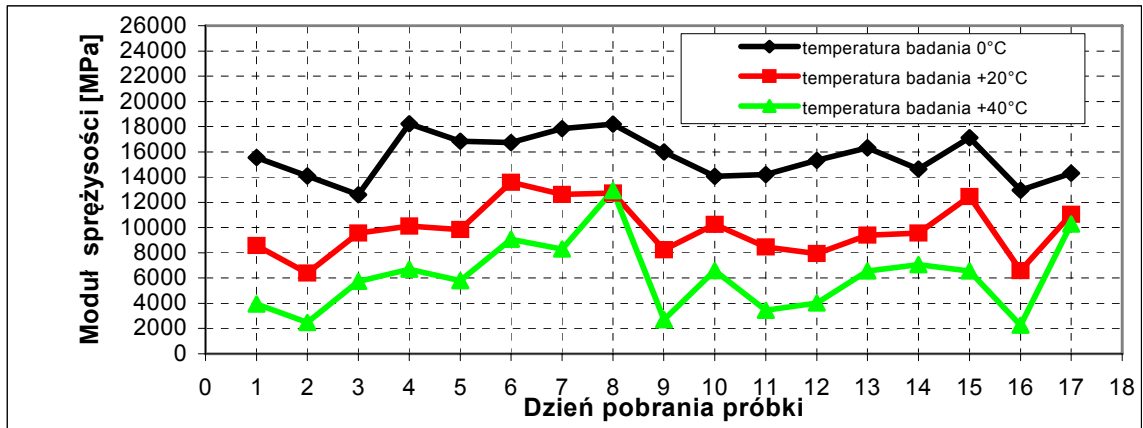
temperaturach, w 0°C, +20°C oraz +40°C. W każdej z tych temperatur badano po jednej próbce wykonanej w poszczególne dni. Łącznie przebadano po 17 próbek w każdej z trzech temperatur.

6.4.2. Wyniki badań

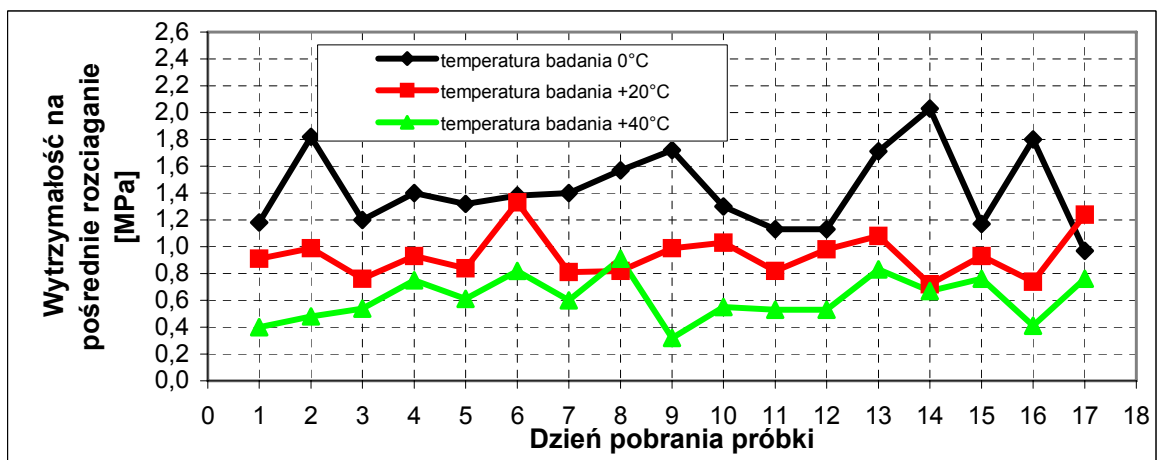
Wyniki badań modułów sprężystości oraz wytrzymałości na pośrednie rozciąganie przedstawiono w tablicy 6.10 oraz na rysunkach 6.36 i 6.37. Dodatkowo na rysunkach 6.38 i 6.39 przedstawiono zmienność badanych cech w poszczególnych temperaturach. Na rysunku 6.40 przedstawiono wygląd próbek z mieszanki MCE po badaniu pośredniego rozciągania.

Tablica 6.10. Wyniki badań modułów sprężystości oraz wytrzymałości na pośrednie rozciąganie

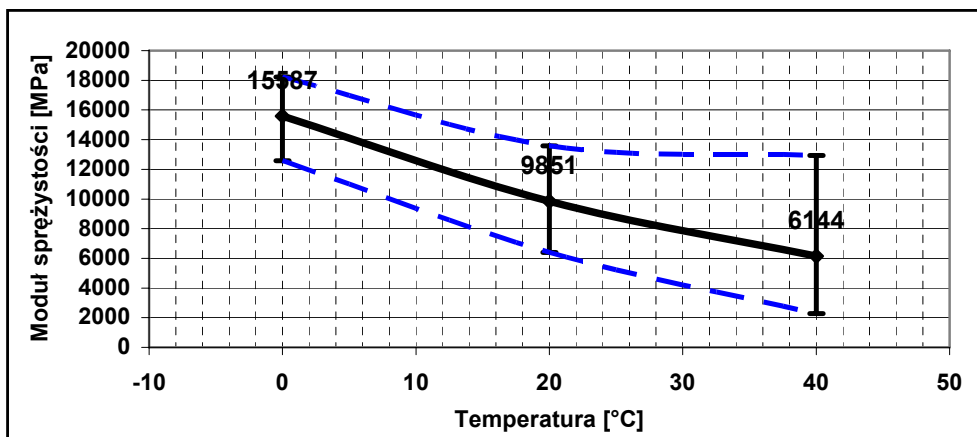
Nr próbki	Moduł sztywności [MPa]			Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]		
	0°C	+20°C	+40°C	0°C	+20°C	+40°C
3	15545	8582	3949	1,18	0,91	0,40
4	14089	6401	2475	1,82	0,99	0,48
5	12589	9566	5729	1,20	0,76	0,54
6	18225	10106	6707	1,40	0,93	0,75
7	16847	9845	5793	1,32	0,84	0,61
8	16727	13593	9063	1,38	1,33	0,82
9	17844	12616	8296	1,40	0,81	0,60
10	18200	12742	12931	1,57	0,82	0,91
11	16005	8244	2708	1,72	0,99	0,32
13	14049	10243	6582	1,30	1,03	0,55
16	14186	8473	3456	1,13	0,82	0,53
17	15324	7952	4030	1,13	0,98	0,53
19	16313	9394	6572	1,71	1,08	0,83
22	14646	9580	7059	2,03	0,72	0,67
25	17124	12476	6555	1,17	0,93	0,76
28	12970	6596	2271	1,80	0,74	0,41
30	14297	11059	10281	0,97	1,24	0,76
Wartość średnia	15587	9851	6144	1,42	0,93	0,61
Wartość maksymalna	18225	13593	12931	2,03	1,33	0,91
Wartość minimalna	12589	6401	2271	0,97	0,72	0,32
Odchylenie standardowe	1765	2109	2906	0,3	0,17	0,17
Współczynnik zmienności	11,3	21,4	47,3	21,1	18,3	27,9



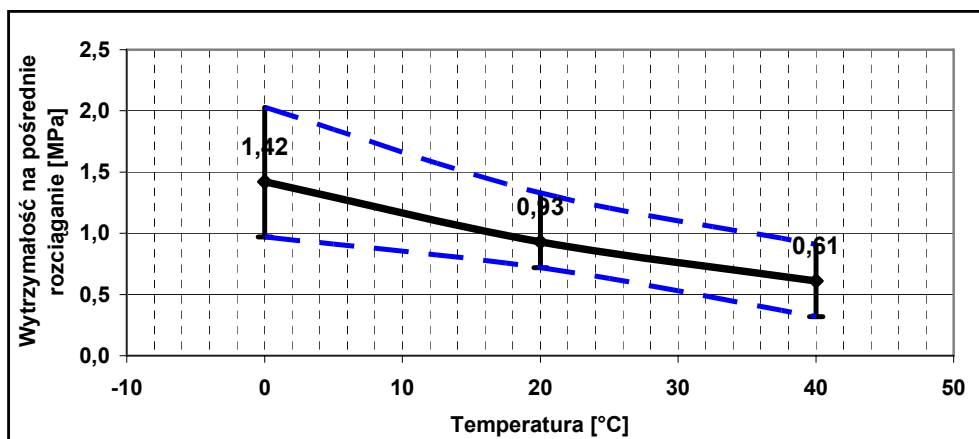
Rysunek 6.36. Zmienność modułu sprężystości w poszczególnych dniach



Rysunek 6.37. Zmienność wytrzymałości na pośrednie rozciąganie w poszczególnych dniach



Rysunek 6.38. Zakres występowania modułu sprężystości dla poszczególnych temperatur



Rysunek 6.39. Zakres występowania wytrzymałości na pośrodkie rozciąganie dla poszczególnych temperatur



Rysunek. 6.40. Próbkki mieszanki MCE po badaniu pośredniego rozciągania

6.4.3. Analiza wyników badań

Z przedstawionego zestawienia wyników badań wynika, że:

1. Wbudowana mieszanka MCE charakteryzuje się dużą zmiennością cech, niezależnie od temperatury badania. Wartości wyznaczone w tej samej temperaturze potrafią się różnić pomiędzy wynikami uzyskanymi dla mieszanki pobranej w różnych dniach nawet dwukrotnie.
2. Mieszanka MCE zachowuje się jak ciało lepko – sprężyste. Wyniki badania modułu sprężystości oraz wytrzymałości na pośrodkie rozciąganie zależą od temperatury badania.
3. Moduły sprężystości mieszanki MCE są stosunkowo duże, świadczy to o dużej nośności i sztywności wykonanej podbudowy.

Przedstawione wyniki wskazują na dużą niejednorodność mieszanki MCE, co jest rzeczą normalną, biorąc pod uwagę dużą niejednorodność istniejących nawierzchni drogowych oraz sposób wykonywania tej warstwy. Duża niejednorodność nie może dyskwalifikować mieszanki MCE. Niejednorodność należy uwzględnić na etapie projektowania wzmocnień z zastosowaniem mieszanki MCE oraz podczas kontroli jakości wykonywania warstwy MCE.

Uzyskiwane stosunkowo duże wartości, zarówno modułów sprężystości jak i wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, wskazują na uzyskanie stosunkowo mocnej i sztywnej warstw podbudowy. Wydaje się, że stwarza to pewne niebezpieczeństwo pojawienia się spękań skurczowych w tej sztywnej warstwie, a w konsekwencji również w nawierzchni. W projektowaniu konstrukcji nawierzchni z warstwą z mieszanki MCE należy brać pod uwagę zarówno dużą niejednorodność tej warstwy jak i obniżenie jej parametrów podczas eksploatacji nawierzchni.

Uzyskiwane stosunkowo wysokie parametry, oprócz niebezpieczeństw związanych z uszkodzeniami zmuszają do zastanowienia się nad celowością wykonywania tak mocnej warstwy. Są dwa aspekty tej sprawy (a) przesztynienie warstw oraz (b) wzrost kosztów budowy. Wysokie parametry uzyskiwane są głównie poprzez dość znaczną korektę istniejącej mieszanki mineralnej, dodawania stosunkowo dużej ilości emulsji i cementu. Wynika to głównie z wysokich wymagań wytrzymałościowych projektowanej mieszanki MCE. Gdyby zmniejszyć wymagania wytrzymałościowe można by wykonywać mieszanki MCE z mniejszą ilością dodatków oraz nie trzeba by było tak dużej ilości kruszywa doziarniającego. Umożliwiłoby to wykonywanie znacznie tańszych mieszanek MCE. Ma to duże znaczenie zwłaszcza w przypadku dróg o mniejszym znaczeniu.

7. Zakończenie

Przeprowadzone prace pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Polskie wymagania pod względem cech wytrzymałościowych są bardzo wygórowane i wykorzystują mało powszechną metodą Marshalla. Powoduje to konieczność stosowania dużej ilości kruszywa doziarniącego i cementu. Brak jest w polskich wymaganiach oceny wrażliwości na działanie wody, co może prowadzić wykonywania podbudowy z mieszanki MCE nieodpornej na działanie wody.
2. Do badań mieszanek MCE należy wprowadzić badania powszechnie stosowane na świecie do tego typu materiałów, czyli wytrzymałość na pośrednie rozciąganie. Należałoby też badać wrażliwość mieszanek na badanie wody.
3. Doświadczenia krajowe pokazały, że stosowanie podbudów z mieszanki MCE jest dość powszechne. Stwierdzono jednak, że większość odcinków z podbudowami z MCE wykazuje spękania poprzeczne. Spękania obserwowane na odcinkach z MCE należy zaliczyć raczej do spękań odbitych, choć nie można wykluczyć również że są to spękania niskotemperaturowe.
4. Analiza ankiet opisujących odcinki z podbudowami MCE pokazuje, że przyczyn spękań należy prawdopodobnie szukać w zbyt dużej ilości cementu w mieszankach MCE. Zawartość stosowanego cementu w mieszankach MCE jest zbliżona do zawartości cementu stosowanego w stabilizacjach i w chudym betonie, natomiast zawartość emulsji stosowana w mieszankach MCE najczęściej wynosi 3%. Jest to wartość najmniejsza dopuszczona, w polskich wytycznych [2].
5. Mieszanki MCE zawierają dużą ilość kruszywa doziarniącego, co w wielu przypadkach dyskwalifikuje pod względem ekonomicznym stosowanie podbudów z mieszanki MCE. Jeżeli dodać do tego dodatek emulsji, cementu oraz konieczność wymieszania wszystkich składników, to rachunek ekonomiczny dla podbudów MCE jest niekorzystny.
6. Przeprowadzone badania pokazały, że stosując ocenę według polskich i niemieckich kryteriów mieszanki MCE uzyskuje się inną klasyfikację tych materiałów. Wymagania polskie są zbyt wygórowane, i to co w Niemczech jest uważane za pełnowartościowy materiał dla dróg obciążonych ruchem do KR4, w Polsce nie jest nawet akceptowane dla ruchu KR1-2.
7. W warunkach polskich można adaptować wymagania niemieckie [4], dzięki czemu będzie można wykonywać bardziej podatne mieszanki MCE z mniejszą zawartością cementu i kruszywa doziarniącego.

Opracowali:

Prof. dr hab. inż. Józef Judycki

Dr inż. Bohdan Dołżycki

Mgr inż. Krzysztof Hunik

Mgr inż. Marcin Stienss

LITERATURA:

1. Zawadzkie J., Matras J.: „Warunki techniczne wykonania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo emulsyjnej metodą recyklingu na miejscu”, IBDiM, Zeszyt 53, Warszawa 1997.
2. Zawadzkie J., Matras J., Mechowski T., Sybilski D.: „Warunków technicznych wykonania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo emulsyjnej (MCE)” IBDiM, Zeszyt 61, Warszawa 1999.
3. Szczepaniak Z. Majewski J.: „Warunki techniczne. Drogowe kationowe emulsje asfaltowe EmA-99” IBDiM, Zeszyt 60, Warszawa 1999.
4. „Merkblatt für Kaltrecycling in situ im Straßenoberbau“ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau, Köln, 2005
5. Yoshida T., Noda E.: „Technical guidelines for In-situ recycling of base course in Japan”, 1 st International Symposium on Subgrade Stabilization and in situ Pavement Recycling Using Cement, Salamanca, Spain 2001
6. Nottingham Asphalt Tester, NAT Manual, 1st version, October 1994
7. Theyse H., Long F., Harvey J.H., Monismith C.L. “Discussion of deep in situ recycling”, Pavement Research Center, Institute of Transportation Studies, University of California Berkeley and University of California Davis. 2004
8. Marti M., Mielke A.: “Synthesis of Asphalt Recycling in Minnesota” Minnesota Local Road Research Board, 2002
9. Jostein M. :”The use of cold bitumen stabilized base course mixes in Norway” Norwegian road Administration
10. “Pavement recycling guidelines for state and local governments” FHWA-SA-98-042, Washington 1997
11. Verhaeghe BMJA., Long F.: „Cold In place recycling with bitumen-emulsion and foamed- bitumen . A South African Perspective” International Seminar on Asphalt Pavement Technologies II, Kuala Lumpur, Malaysia, 2004
12. Muthen. M. “Foamed asphalt mixes. Mix design procedure” SABITA Ltd & CSIR Transportek 1998
13. Brown S.F., Needham D.: „A study of cement modified bitumen emulsion mixtures” AAPT vol. 69 2000
14. Judycki J. “Opinia dotycząca metody badania wytrzymałości mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych MCE podczas recyklingu nawierzchni asfaltowej na zimno przy przebudowie drogi krajowej Nr 7 na odcinku Gdańsk – Kiezmark.” praca niepublikowana, Gdańsk, 2003
15. Jabłoński K., Rybaczyński M., Szydło A., „Recykling głęboki nawierzchni autostrady A-4. Podbudowa pomocnicza z mieszanki destruktu z cementem i emulsją”, „Drogownictwo” 8/99,
16. Zawadzki J. „ Recykling na zimno nawierzchni drogowych – technologia przyjazna środowisku”, Warszawa, 1997,
17. Jabłoński K., Rybaczyński M., Szydło A. „Recykling nawierzchni na autostradzie A – 4, odcinek Prądy – Przylesie.” „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe.” Kielce, 1999,
18. Mallick R.B., Teto M.R., Kandhal P.S. Bradbury R.L., Kearney E.J.: „A laboratory study of full depth reclamation (FDR) Mixes”, 81 Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, 2002

19. Mallick R.B., Bonner D.S., Bradbury R.L., Bradbury R.L., Kandhal P.S. Kearney E.J: "Evaluation of performance of full depth reclamation (FDR) mixes" 81 Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, 2002
20. Mallick R.B., Kandhal P.S., Brown E.R., Teto M.R., Bradbury R.L., Bradbury R.L., Kearney E.J: "Development of a rational and practical mix design system for full depth reclamation (FDR)", AAPT vol. 70, 2001
21. "Road Pavement Rehabilitation Techniques Using Enhanced Asphalt Mixtures" Final Technical Report, PARAMIX Project. 2004
22. Merrill D., Nunn M., Carswell I.- "A guide to the use and specification of cold recycled materials for maintenance of road pavements" TRL Report TRL611 2004.
23. Wirtgen GmbH „Wirtgen Road Construction Manual” – 2002
24. Lee K. W., Brayton T. E., Huston M. "Development of Performance Based Mix Design for Cold In-Place Recycling (CIR) of Bituminous Pavements Based on Fundamental Properties" - University of Rhode Island, FHWA-SIR-0201, 2002.
25. Pavement Recycling. Guidelines for in-place recycling with cement, in-place recycling with emulsion or foamed bitumen, hot mix recycling in-plant. Association mondiale de la Route (PIARC).2003
26. Giuliani F., Rastelli S. "An Analytical Approach To Evaluate The Performance Of Cold Recycled Asphalt Mixtures" Use of Recycled Materials in Building and Structures" Barcelona 2004
27. Wirtgen GmbH „Wirtgen Cold Recycling Manual” - 2004
28. Collins D. C., Lewis A. J. N. "Cold In Place Recycling - A Relevant Process For Road Rehabilitation And Upgrading" - 7th Conference On Asphalt Pavements For Southern Africa, 1999
29. Hillgren G., James A., Svenson T., Wallin T. "In-Plant Cold Recycling and Cold Mix in Sweden - Developments in Laboratory Testing" http://www.surface.akzonobel.com/asphalt_russian/pdf/aema98.pdf
30. Chiappinelli G., Santagata E. "Improvements In The Mix Design Of Cold-Recycled Bituminous Mixtures" - 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Wiedeń 2004

ZAŁĄCZNIK NR 1:

ZASADY PROJEKTOWANIA I WYKONANIA MIESZANEK MINERALNO-ASFALTWO-EMULSYJNYCH (MCE)

PROPOZYCJA WYTYCZNYCH

1. WSTĘP

1.1. Przedmiot zasad

Przedmiotem zasad są wymagania dotyczące materiałów, projektowania oraz wbudowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE) wytworzonych w ramach wykonywania recyklingu głębokiego na zimno. W dalszej części nazywane Zasadami. Poniższe zasady wzorowane są na wytycznych niemieckich „Merkblatt für Kaltrecycling in situ im Straßenoberbau“ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau, Köln, 2005 z uwzględnieniem uwarunkowań krajowych.

1.2. Cel i zakres stosowania

Zasady opisują postępowanie podczas projektowania i wbudowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych wytwarzanych zarówno na miejscu wbudowania jak w wytwórni stacjonarnej.

Celem zasad jest przedstawienie metody projektowania mieszanek MCE pozwalającej na maksymalne wykorzystanie materiałów pochodzących z rozbiórki istniejących dróg, poprzez ponowne wbudowanie ich z dodatkiem środków wiążących w technologii recyklingu na zimno, tak aby do minimum ograniczyć transport materiałów, zużycie nowych materiałów a jednocześnie wykonanie mieszanki MCE charakteryzującej się takimi parametrami, które pozwolą na długotrwałe funkcjonowanie warstwy w nawierzchni.

1.3 Określenia podstawowe

Podstawowe określenia:

- **Destrukt** – materiał mineralno-bitumiczny (tzn. mineralno-asfaltowy, mineralno-smołowy lub mieszany), mineralno-cementowy lub mineralny powstały w wyniku frezowania lub pokruszenia jednej lub kilku warstw konstrukcyjnych nawierzchni w temperaturze otoczenia.
- **Kruszywo doziarniające** – kruszywo, którego celem jest korekta uziarnienia destruktu.
- **Emulsja asfaltowa** – emulsja wolnorozpadowa lub nadstabilna, tak dobrana, aby czas rozpadu umożliwił równomierne otoczenie wytraconym asfaltem wszystkich ziarn mieszanki mineralnej oraz ułożenie i zagęszczenie mieszanki w warstwie podbudowy.

- **Cement** – spoiwo hydrauliczne, którego dodatek ma poprawić parametry wytrzymałościowe mieszanki MCE.
- **Mieszanka MCE** – mieszanka o ciągłym uziarnieniu składająca się z destruktu, kruszywa doziarniającego, emulsji asfaltowej, cementu oraz wody wytworzona w miejscu wbudowania lub w wytwórni stacjonarnej w procesie nazywanym recyklingiem na zimno.
- **Podbudowa z MCE** – podbudowa wykonana z mieszanki MCE.
- **Wzajemna tolerancja spoiw** – tolerancja emulsji asfaltowej z cementem ze względu na rozpad emulsji oraz wiązanie spoiw hydraulicznych.
- **Próbka destruktu** - próbka materiału uzyskana przez frezowanie z reprezentatywnej powierzchni i głębokości warstwy.
- **Wbudowanie na zimno** – wbudowanie mieszanki, która poprzez rodzaj zastosowanych materiałów wiążących zawierających bitum lub spoiwo hydrauliczne może być wbudowywana na zimno.
- **Optymalna zawartość płynów** – zawartość wody i asfaltu pozwalająca na osiągnięcie maksymalnej gęstości pozornej w przyjętej metodzie zagęszczanie próbek (odpowiednik wilgotności optymalnej dla gruntów).

1.4. Charakter podbudowy z MCE

Mieszanki MCE można podzielić, w zależności od kombinacji środków wiążących i osiągniętych tym samym sztywności, na typ dwa typy:

- wiązania dominująco asfaltowe – podbudowa podatna,
- wiązania dominująco hydrauliczne – podbudowa sztywna.

Poprzez dobór rodzaju środków wiążących zawierającego bitumu z cementem można uzyskać mieszanki MCE, w których zachowanie materiałów zbliżone jest zarówno do warstw nośnych utwardzonych hydraulicznie jak i do warstwy nośnej asfaltowej. Wybór kombinacji spoiwa zależy od rodzaju destruktu. Przy wysokim udziale asfaltu w destrukcie jest możliwe, że pomimo znacznego dodatku spoiwa hydraulicznego powstaje mieszanina MCE dominująco asfaltowa. Może też dojść do sytuacji odwrotnej, przy małej zawartości asfaltu w destrukcie nawet niewielka ilość spoiwa hydraulicznego może dać wiązanie dominująco hydrauliczne.

W projektowaniu mieszanek MCE należy dążyć do uzyskania wiązania dominująco asfaltowych aby zminimalizować ryzyko powstania spękań odbitych.

1.5. Zastosowanie podbudowy MCE

Podbudowa z MCE może być stosowana w następujących przypadkach:

1. Przebudowach istniejących nawierzchni,
2. Poszerzeń lub remontów poboczy,
3. Budowy nowych konstrukcji nawierzchni.

Podbudowy z mieszanek MCE mogą być stosowane do wszystkich kategorii ruchu, ale zaleca się aby dla kategorii KR 5 i KR 6 wykonywać je tylko w szczególnych przypadkach.

2. MATERIAŁY

2.1. Destrukt

Uziarnienie destruktu powinno być ciągłe i charakteryzować się następującym uziarnieniem:

ziarna mniejsze od 31,5mm	90 %
ziarna mniejsze od 63 mm	100 %

2.2. Kruszywo doziarniające

Jako kruszywo doziarniające można stosować:

- Kruszywo naturalne według normy PN-B-11111:1996 „Kruszywo mineralne. Kruszywo naturalne do nawierzchni drogowych. Żwir i mieszanka”.
- Kruszywo łamane według normy PN-B-11112:1996 „Kruszywo mineralne. Kruszywo łamane do nawierzchni drogowych”.
- Piasek według normy PN-B-11113:1996 „Kruszywo mineralne. Kruszywo naturalne do nawierzchni drogowych. Piasek”.
- Grys i żwir kruszony z naturalnie rozdrobnionego surowca skalnego wg załącznika G normy PN-S-96025 :2000 „Drogi samochodowe i lotniskowe. Nawierzchnie asfaltowe. Wymagania.”
- Żużle posiadające odpowiednią aprobatę techniczną (IBDiM lub inna uprawniona jednostka).

Po wprowadzeniu Dokumentu Aplikacyjnego do normy PN-EN 13043 „Kruszywo do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu” rodzaje stosowanych kruszyw należy dostosować do nowych wymagań.

2.3. Emulsja asfaltowa

Należy stosować emulację wolnorozpadową K3 lub nadstabilną K4 zgodną z wymaganiami Warunków Technicznych „Drogowe kationowe emulsje asfaltowe EmA-99”, zeszyt 60 IBDiM, oraz spełniać następujące warunki:

- Rodzaj asfaltu: 50/70 lub 70/100 wg PN-EN 12591:2004.
- Brak rozpuszczalników i topników.

Emulsja powinna charakteryzować się dobrą tolerancją z cementem.

2.4. Cement

Należy stosować cement powszechnego użytku spełniający wymagania PN-EN 197-1:2002 „Cement. Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku”, którego działanie zostało potwierdzone na etapie wykonywania recepty laboratoryjnej. Przydatność stosowanego cementu należy określić na podstawie badań gotowej mieszanki MCE.

2.5. Woda

Można stosować wodę spełniającą wymagania PN-EN-1008:2004 „Woda zarobowa do betonu. Specyfikacja pobierania próbek, badania i ocena przydatności wody zarobowej do betonu w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu”.

3. SPRZĘT DO WYKONWANIA PODBDUÓW Z MIESZANKI MCE

Do wytwarzania mieszanki MCE można stosować:

Wytwórnice stacjonarne, mające możliwość równoczesnego mieszania destruktu, kruszywa doziarniającego, emulsji asfaltowej i cementu.

Remixery – urządzenia wyposażone w następujące elementy:

- do frezowania warstw nawierzchni,
- do pobierania destruktu,
- do doziarniania destruktu
- do równoczesnego dozowania środków wiążących (emulsji i cementu),
- do homogenicznego mieszania przy użyciu mieszalnika o wymuszonym mieszanii
- do rozkładania i wbudowywania mieszanki MCE.

Zestawy składające się z kilku niezależnych maszyn wykonujących niezbędne czynności wymagane do prawidłowego przeprowadzenia recyklingu na miejscu, na zimno.

Do zagęszczania mieszanki MCE należy stosować ciężkie walce stalowe o wadze minimum 16 ton. Efektywność zagęszczania powinna być sprawdzona na odcinku próbnym, przed przystąpieniem do właściwych prac.

4. TRANSPORT

Transport materiałów do wytworzenia mieszanki MCE powinien odbywać się środkami do tego przeznaczonymi, spełniającymi odpowiednie przepisy.

Mieszanka MCE powinna być transportowana samochodami samowładowczymi, przykryta plandekami aby ograniczyć odparowywanie wody z mieszanki.

5. WYMAGANIA

5.1. Składniki mieszanki mineralnej

Mieszanka mineralna MCE może składać się z:

- Destruktu,
- Kruszywa doziarniającego.

Kruszywo doziarniające powinno spełniać wymagania zawarte w tablicy 1.

Tablica 1. Wymagania dla kruszyw doziarniających mieszankę MCE

Lp.	Rodzaj materiału	Ruch KR 1-2	Ruch KR 3-6
1	Kruszywo łamane granulowane oraz zwykłe a) z litego surowca skalnego wg PN-B-11112:1996: b) z surowca sztucznego (żuźle pomiedziowe i stalownicze)	kl. I, II, III gat. 1, 2 kl. I, II, III gat. 1, 2	kl. I, II gat. 1, 2 kl. I, II gat. 1, 2
2	Miał, piasek łamany, mieszanka drobna granulowana zgodna z PN-B-11112:1996	spełnia	spełnia
3	Grys i żwir kruszony z surowca naturalnie rozdrobnionego wg Załącznika G, PN-S-96025: 2000	kl. I, II, III gat. 1, 2	kl. I, II gat. 1, 2
4	Żwir i mieszanka zgodnie z PN-B-11111:1996	Kl. I, II, III	Kl. I, II
5	Piasek naturalny wg PN-B-11113:1996	gat. 1, 2	gat. 1, 2

5.2. Uziarnienie mieszanki MCE

Uziarnieni mieszanki MCE powinno być ciągle. Maksymalny wymiar ziarna nie powinien być większy niż 31,5 mm, przy czym dopuszcza się do 10 % nadziarna.

Uziarnienie mieszanki mineralnej MCE powinno mieścić się w przedziale podanym w tablicy 2.

Tablica 2. Uziarnienie mieszanki MCE

Sito #	Mieszanka MCE dla KR 1 - 2	Mieszanka MCE dla KR 3- 6
63,0	100	100
31,5	90 – 100	90 – 100
16	70 – 100	70 – 100
8	40 – 90	40 – 84
4	25 – 80	25 – 70
2	15 – 74	15 – 50
0,85	10 – 51	10 – 37
0,42	8 – 40	8 – 29
0,30	4 – 23	4 – 18
0,075	3 – 8	3 – 8

5.3. Środki wiążące

Jako środki wiążące należy stosować emulsję asfaltową i cement. Dla wyboru kombinacji środków wiążących należy przyjąć jako orientacyjne następujące ilości:

- emulsja asfaltowa: 2 do 6% wagowo,
- cement: 1 do 4% wagowo.

Należy dążyć do takiej kombinacji środków wiążących, aby ilość cementu była jak najmniejsza, aby tym samym zminimalizować ryzyko powstania spękań odbitych.

5.4. Projektowanie mieszanki MCE

Projektowanie mieszanki MCE należy przeprowadzić w następujący sposób:

Dobrać mieszankę mineralną składającą się z destruktu i kruszywa doziarniającego, tak aby mieściła się w krzywych granicznych podanych w tabelicy 2.

Określić optymalną zawartość płynów, według następujących zasad:

- Przygotować mieszankę mineralną z destruktu, kruszywa doziarniającego oraz 1,5 % cementu.
- Do każdej porcji mieszanki dodać wodę, tak aby każda kolejna próbka miała wilgotność większą o 1 – 1,5 %.
- Próbkę zagęścić w prasie statycznej wg metody opisanej w załączniku 1.
- Dla każdej próbki wyznaczyć wilgotność oraz gęstość strukturalną. Gęstość strukturalną wyznacza się poprzez określenie ilorazu masy i objętości próbki. Objętość próbki określa się na podstawie jej średnicy i wysokości.
- Optymalną zawartość płynów określa się na podstawie zależności wilgotności i gęstości strukturalnej. Jako optymalną zawartość płynów przyjmuje się taką wilgotność, przy której osiągnięta jest maksymalna gęstość strukturalna. Jest to wartość optymalna ze względu na zagęszczanie.
- Otrzymana wartość może wymagać niewielkiej korekty (zwiększenia) ze względu na urabialność mieszanki. Korekta nie powinna być większa od 1%.
- Jako końcową optymalną zawartość płynów podaje się wartość po korekcie.

Określić ilość dodawanej wody do gotowej mieszanki MCE na podstawie następującej zależności:

$$W_{dod} = W_{opt} - W_{nat} - W_{em} - 0,5 \times B$$

gdzie:

W_{dod} - ilość dodawanej wody do mieszanki [%]

W_{opt} - optymalna zawartość płynów [%]

W_{nat} - wilgotność naturalna mieszanki MCE (destruktu i kruszyw) [%]

W_{em} - udział wody pochodzącej z emulsji asfaltowej [%]

B - udział asfaltu z emulsji asfaltowej [%]

Przygotować próbki do badań różniące się zawartością emulsji asfaltowej i zawartością cementu. Próbkę przygotowuje się w następujący sposób:

- Do przygotowanej mieszanki destruktu i kruszywa dodaje się cement i wodę. Można dodawać cement i wodę w postaci zawiesiny, ułatwi to proces mieszania. Stosunek w/c zawiesiny powinien być zbliżony do 1.
- Do wymieszanego destruktu z kruszywem i cementem dodaje się emulsję asfaltową i miesza wszystko w celu uzyskania jednorodnej mieszanki MCE.
- Całkowity czas mieszania nie powinien być dłuższy niż 2 minuty.
- Zagęszczenie próbek powinno odbywać się w formach stalowych o średnicy 150 mm. Zasady zagęszczania próbek podano w załączniku 1.
- Dla każdej zawartości środków wiążących należy wykonać po minimum 2 próbki dla pojedynczego oznaczenia (6 próbek dla trzech oznaczeń).

Kondycjonowanie próbek powinno odbywać się w następujących warunkach:

- Pierwsze dwa dni po zagęszczeniu próbki powinny być przechowywane w temperaturze $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ i przy minimum 95% wilgotności względnej.
- Od 3 do 7 dnia następuje przechowywanie suche przy względnej wilgotności od 40% do 70% przy temperaturze powietrza $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ na ruszcie kratkowym.
- W siódmym dniu próbki, przeznaczone do badania przygotowuje się do badania wytrzymałości na pośrednie rozciąganie.
- Pozostałe próbki przechowuje się dalej w warunkach suchych.
- 14-tego dnia partie próbek dzieli się na dwie części.
- Połowę próbek przechowuje się dalej w powietrzu w $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ przez kolejne 14 dni,
- Drugą połowę próbek umieszcza się w kąpielii wodnej o temperaturze $+20 \pm 2^\circ\text{C}$, przy całkowitym ich przykryciu na kolejne 14 dni.
- 28 dnia próbki sucho przechowywane jak również próbki sucho/mokro przechowywane przygotowuje się do badania wytrzymałości na pośrednie rozciąganie.

Wymagania dla mieszanki MCE podano w tablicy 3. Decydującym kryterium są parametry po 28 dniach. Wytrzymałość na rozciąganie po 7 dniach należy traktować jako wymaganie pomocnicze. Parametry mechaniczne należy określać wg metody podanej w załączniku 2.

Tabela 3: Wymagania w odniesieniu do próbek z mieszanki MCE

Cecha:	Wymagane wartości:	Tolerancje dla badań wykonywanych przez Wykonawcę
Zawartość wolnych przestrzeni (próżni)	8 do 15% obj. maksym. 10% obj. ¹⁾	\leq wartości badania przydatności + 4% obj. \leq wartości badania przydatności + 2% obj. ¹⁾
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie, $T = +5^\circ\text{C}$ po 7 dniach	Wartość średnia $\geq 0,50 \text{ N/mm}^2$ $\leq 0,80 \text{ N/mm}^2$ ²⁾	\geq wartości badania przydatności – 20% ³⁾ \leq wartości badania przydatności + 30% ^{2), 3)}
Wytrzymałość na rozciąganie przy $T = +5^\circ\text{C}$ po 28 dniach	Wartość średnia $\geq 0,75 \text{ N/mm}^2$ $\leq 1,20 \text{ N/mm}^2$ ²⁾	\geq wartości badania przydatności – 20% \leq wartości badania przydatności + 30% ²⁾
Spadek wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po przechowywaniu próbek w wodzie	< 30%	

1. Materiały rozbiórkowe zawierające smołę.
2. Przy mieszance MCE z dominująco hydraulicznym typem wiązania.
3. Ważne tylko w ramach własnego nadzoru.

5.4. Wykonanie warstwy z mieszanki MCE

Podbudowa z mieszanki MCE powinna być wykonana z zachowaniem następujących zasad:

1. Grubość warstw, ze względu na zagęszczenie, nie powinna przekraczać 20 cm, w wyjątkowych przypadkach może wynosić 22 - 25 cm.
2. Mieszanka MCE powinna być wbudowywana przy temperaturach wyższych od +5°C. Wbudowywanie w niższych temperaturach spowalnia wiązanie cementu oraz rozpad emulsji asfaltowej.
3. Do zagęszczania należy stosować ciężkie wibracyjne walce o ciężarze roboczym minimum 16 ton.
4. Przy spoinach podłużnych należy minimum 10 cm gotowego pasma wbudowanej mieszanki MCE sfrezować na nowo i przerobić.
5. Ruch i wbudowanie następnej warstwy może rozpocząć się po osiągnięciu przez warstwę MCE nośności zgodnie z tablicą 4. Wymaganą nośność można uzyskać, przy normalnej pogodzie, po 3 do 4 dniach.
6. Jako zabieg pielęgnacyjny, ze względu na przejazdy pojazdów budowy oraz dla uzyskania powiązania z kolejnymi warstwami zastosować skropienie emulsją asfaltową i posypanie grysem lub żwirem.
7. Wykonana warstwa z mieszanki MCE powinna charakteryzować się parametrami podanymi w tablicy 4.

Tabela 4: Wymagania w odniesieniu do warstwy z mieszanki MCE

Parametr	Wymaganie
Grubość warstwy	±10%
Wskaźnik zagęszczenie	≥ 98%
Zawartość wolnych przestrzeni	≤ 12% obj.
Nośność warstwy podbudowy: <ul style="list-style-type: none"> • Wtórny moduł odkształcenia E_2 • Dynamiczny moduł odkształcenia E_{vd} 	$E_2 \geq 180 \text{ MN/m}^2$ $E_{vd} \geq 80 \text{ MN/m}^2$
Równość	15 mm/4m
Rzędne wysokościowe	± 2 cm

6. BADANIA

6.1 Badania przydatności

6.1.1 Wiadomości ogólne

Dla każdego odcinka należy określić przydatność materiałów lub mieszanek materiałów do wykonania mieszanki MCE. Niezbędny czas na wykonanie badania przydatności przy uwzględnieniu 28 dni wytrzymałości wynosi 6 tygodni. Potrzebne do badania przydatności ilości materiałów należy pobrać poprzez próbne frezowanie nawierzchni drogowej. Przy próbie należy zachować porównywalne warunki (np. głębokość frezowania) do tych, jakie wystąpią w procesie wytwarzania i wbudowania MCE. Przy wyborze składu mieszanki materiałów budowlanych należy uwzględnić informacje pochodzące od Zamawiającego, takie jak obciążenie ruchem, rodzaj warstw górnych nad warstwą z mieszanki MCE, jak również lokalne, klimatyczne i topograficzne uwarunkowania.

6.1.2 Badania na mieszance mineralnej

Próbki destruktu pochodzące z frezowania próbnego powinny być reprezentatywne dla rozpatrywanego odcinka, pod względem grubości i składu. Dostarczona próbka z jednego odcinka powinna ważyć około 150 kg. Na podstawie dostarczonej próbki określa się stosunek materiału związanego do niezwiązanego. Ocenę przeprowadza się wizualnie. Na próbce destruktu należy określić:

- Uziarnienie destruktu,
- Zawartość asfaltu,
- Uziarnienie materiału po ekstrakcji.

Gdy uziarnienie destruktu nie odpowiada w wystarczającym stopniu wymaganiom podanym w tabelicy 2 lub charakteryzuje się silną nieciągłością należy wówczas, zastosować materiał doziarniający o odpowiednim uziarnieniu lub dodatkowo przekruszyć destruk, aby uzyskać odpowiednie uziarnienie mieszanki mineralnej MCE.

Dla przygotowanej mieszanki mineralnej należy określić optymalną zawartość płynów.

6.1.3 Badania na mieszankach MCE

Przed wykonaniem próbek należy sprawdzić zgodność emulsji asfaltowej z cementem. Dla sprawdzenia wzajemnej tolerancji cementu z emulsją asfaltową należy 100g cementu przewidzianego do wykorzystania zmieszać z 50g wody ($w/c = 0,5$) dla uzyskania zawiesiny. Bezpośrednio po wykonaniu zawiesiny dodaje się 100g emulsji asfaltowej i miesza do uzyskania jednorodnej mieszaniny. Należy mierzyć czas od początku mieszania do wytrącenia emulsji. Wytrącenie emulsji (zmiana lepkości i wyraźne koloru mieszanki środków wiążących) powinno zacząć się najwcześniej po 5 minutach.

Badania mieszanki MCE należy przeprowadzać na mieszankach z minimum trzema zawartościami pierwszego środka wiążącego, przy stałej zawartości drugiego środków wiążących. Środki wiążące należy zmieniać o 1 do 2% w stosunku do ilości w poprzedzającej próbce. W razie potrzeby, gdy nie można uzyskać wymaganych parametrów, należy zmienić środek wiążący lub skorygować mieszankę mineralną.

Dla zapewnienia dobrej urabialności przy wytwarzaniu zawiesiny woda – cement, stosunek w/c powinien być zbliżony 1,0, jednak w żadnym przypadku nie może być mniejszy od 0,5.

Przygotowanie mieszanki MCE (mieszanki próbne) musi tak przebiegać, aby osiągnięte zostało jednorodne rozłożenie środków wiążących w mieszance mineralnej.

W mieszance MCE należy określić dla każdej serii prób gęstość strukturalną. Badania wykonuje się na próbkach suchych, po 7 lub 28 dniach przechowywania.

6.1.4 Badanie próbek

Po wyjęciu z formy próbki określana jest jej wilgotność jako iloraz z wilgotnej masy i objętości, którą oblicza się rachunkowo przez pomiar wysokości próbki i średnicy. Uwzględniając całkowitą zawartość wody w mieszance MCE. Obliczamy lub wyznaczamy gęstość objętościową materiału. Zawartość wolnych przestrzeni próbek oblicza się przy zastosowaniu gęstości strukturalnej wyliczonej zgodnie z rozdziałem 8.1.3.

Siódmego dnia wyznacza się na dwóch próbkach, a po 28 dniach na pozostałych próbkach wytrzymałość na pośrednie rozciąganie $R_{,7}$ i $R_{,28}$ oraz $R_{14/14}$ oraz, o ile jest to możliwe odkształcenie poziome i moduł sztywności zgodnie z instrukcją w załączniku 2.

6.1.5 Wykorzystanie i ocena wyników badań

Jako miarodajne, dla określenia optymalnego składu mieszanki, brane są pod uwagę wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po 28 dniach podobnie jak wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po 14 dniach składowania w wodzie. W wyjątkowych przypadkach powinna nastąpić również ocena wytrzymałości na rozciąganie po 7 dniach.

Może okazać się celowym wybór kombinacji środków wiążących pośredniej pomiędzy badanymi kombinacjami. Wówczas należy również pozostałe parametry właściwości mieszanki odpowiednio interpolować.

6.2 Badania własne Wykonawcy

Wykonawca powinien w czasie wbudowywania sprawdzać następujące parametry:

- jakość mieszanki mineralne - ocena wzrokowa,
- orientacyjna zawartość materiałów doziarniających,
- głębokość i szerokość frezowania,
- dozowanie środków wiążących (cement i emulsja asfaltowa),
- jednorodność i otoczenie - ocena wzrokowa,
- grubość wbudowania po zagęszczeniu,
- położenie zgodne z przekrojem poprzecznym.

Co każde 3000 m², ale minimum raz w ciągu dnia roboczego względnie dla każdego odcinka budowy należy określić następujące parametry:

- zawartość wody w mieszance mineralnej,
- gęstość w stanie suchym i wilgotnym na dwóch zagęszczonych na placu budowy próbkach zgodnie z załącznikiem 1.

Badania gotowej warstwy należy wykonać w odstępach co najwyżej 50 metrowych. Należy zbadać:

- spadek poprzeczny,
- równość,
- nośność.

6.3 Badania kontrolne

Co każde 3000 m² wykonywanej warstwy, ale minimum raz dziennie względnie co każdy odcinek należy określić następujące parametry na dwóch próbkach zagęszczonych na budowie podczas wbudowywania zgodnie z załącznikiem 1:

- zawartość wolnych przestrzeni,
- wytrzymałość na pośrednie rozciąganie po 28 dniach R_{28} ,
- o ile jest to możliwe odkształcenie poziome i moduł sztywności E po 28 dniach,

Na gotowej warstwie:

- grubość wbudowania,
- zawartość wolnych przestrzeni,
- wskaźnik zagęszczenia,
- równość,
- spadek poprzeczny,
- położenie zgodne z profilem.

6.4 Metody badań

Próbki powinny być zagęszczone zgodnie z załącznikiem 1.

Badania cech mechanicznych powinny być przeprowadzone zgodnie z załącznikiem 2.

Wskaźnik zagęszczenia oblicza się jako iloraz z wyliczonej przy pomocy gęstości strukturalnej w stanie suchym wbudowanej warstwy i gęstości strukturalnej próbki w stanie suchym. Gęstość strukturalna nawierzchni określa się na rdzeniach wywierconych z nawierzchni. Miejsca poboru rdzeni muszą być te same co i próbek mieszanki MCE zagęszczonej podczas wbudowania. Pobór rdzeni należy przeprowadzić najwcześniej po 20 dniach. Dni ze średnią temperaturą powietrza poniżej + 5⁰C nie są wliczane do czasu badania i pobierania próbek.

ZAŁĄCZNIK 1. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK MIESZANKI MCE DO BADAŃ

1. Zakres stosowania

Metodę zagęszczenia stosuje się do mieszanek MCE o maksymalnym uziarnieniu do 31,5 mm (maksymalnie 10% nadziarna do 63 mm). Wytwarzanie próbek może mieć miejsce zarówno w laboratorium, jak i na placu budowy.

2. Sprzęt i środki pomocnicze

Sprzęt:

- forma o średnicy 150 mm, wysokości $h = 300$ mm (rysunek Z.1)
- 2 płyty stemplowe $\phi 149,6$ mm i $h = 30$ mm z czterema bocznymi wpustami (rowkami) do odprowadzania wody,
- 2 stemple o wysokości $h = 60$ mm,
- waga o dokładności ± 1 g,
- do zagęszczania w laboratorium prasa kontrolna o maksymalnym ciężarze ≥ 100 kN
- do zagęszczania na placu budowy zestaw do zagęszczania: olejowa pompa ręczna, maksymalne ciśnienie robocze 700 barów, jednostopniowa, przewód wysoko ciśnieniowy (do 700 barów obciążenia) z przystawką, manometr ze skalą od 0 do 700 barów, cylinder ciśnieniowy, maksymalny nacisk ≥ 100 kN, czynna powierzchnia tłoka 20,3 cm², maksymalny skok ≥ 101 mm (pompa od VSS).

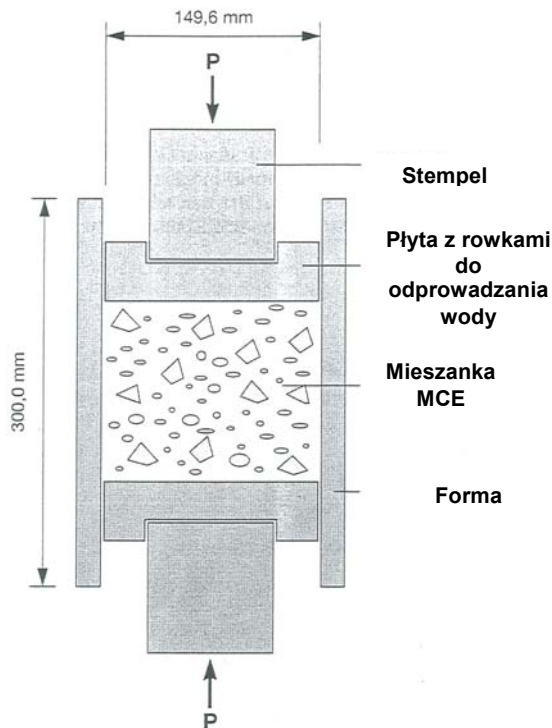
Środki pomocnicze:

- tłocznik (stempel ciśnieniowy) do ryglowania tłoka urządzenia ciśnieniowego,
- bibuła filtracyjna $\phi 145$ mm,
- olej do smarowania formy.

3. Zagęszczanie

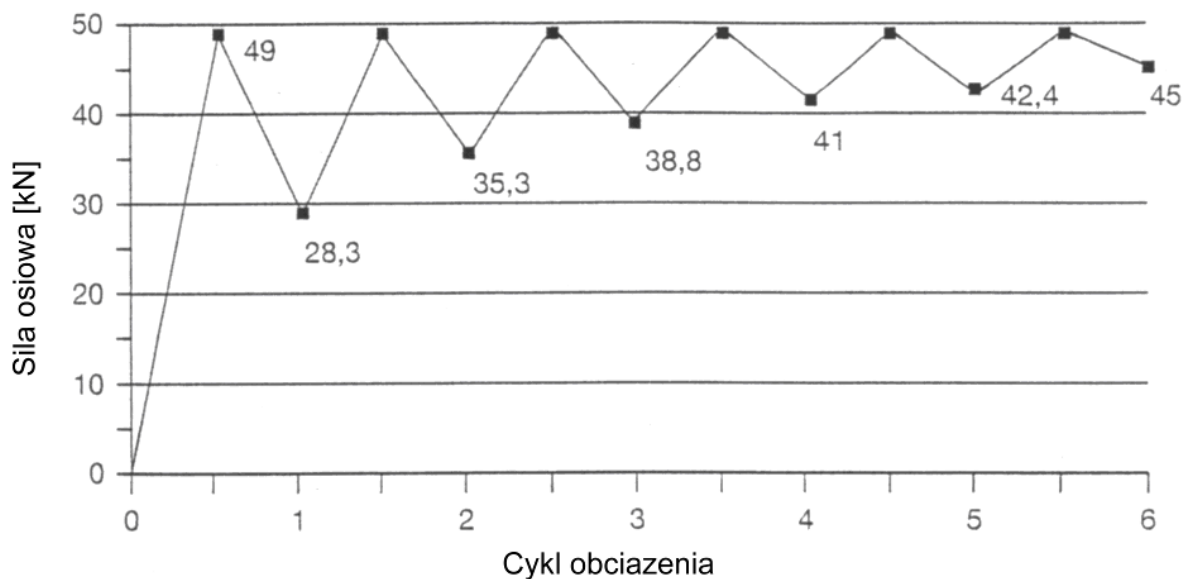
Zagęszczanie powinno odbywać się wg następujących zasad:

- Formę należy posmarować olejem, aby materiał nie przyklejał się do ścianek.
- Do formy należy włożyć płytę stemplową o grubości 30 mm i przykryć ją bibułą filtracyjną.
- Wsypać do formy porcję mieszanki MCE, tak aby po zagęszczeniu próbka miała wysokość $125 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$.
- Mieszanka w stanie luźnym wkładana jest do formy, przykryta bibułą filtracyjną i drugą płytą stemplową. Przy napełnianiu formy należy uważać, aby grube ziarna były jednorodnie rozłożone w mieszance. Ziarna lub kawałki o średnicy większej od 32mm należy usunąć.
- Napełnioną formę do zagęszczania łącznie ze stemplem i płytami stemplowymi należy umieścić w urządzeniu zagęszczającym tak, aby obie płyty stemplowe pozostały ruchome w trakcie zagęszczania (zagęszczanie wg zasady podwójnego tłoka).



Rysunek Z.1. Schemat przygotowania próbki z mieszanki MCE

- Próbkę zagęszcza się statycznie poprzez przyłożenie nacisku osiowego o wielkości 49 kN ($2,8 \text{ N/mm}^2$). Należy zwrócić szczególną uwagę, aby nie doszło do skrzywienia płyt stemplowych.
- Po przyłożeniu obciążenia na skutek plastycznego zachowania mieszanki MCE nastąpi jej zagęszczenie i wywoła to spadek obciążenia. Po spadku obciążenie należy przyłożyć ponownie obciążenie maksymalne równe 49 kN. Czynność tę należy powtarzać, tak długo aż spadek obciążenie nie będzie większy niż do 45 kN ($2,6 \text{ N/mm}^2$). Zasadę przykładania obciążeń ilustruje rysunek Z.2.
- Obciążenie należy wyrównywać do maksymalnego poziomu wówczas, gdy obciążenie dalej już nie spada lub gdy zostanie osiągnięte dolne graniczne obciążenie. Jeżeli oba te warunki nie wystąpią to obciążenie należy podnieść najpóźniej po dwóch minutach. Na ogół obciążenie końcowe osiągane jest po 5 do 7 taktach obciążeniowych.
- Próbkę rozformowuje się następnego dnia, po uformowaniu.
- Próbkę po rozformowaniu jest ważona z dokładnością $\pm 1\text{g}$, a jej średnia wysokość określona z dokładnością $\pm 1\text{mm}$.



Rysunek Z.2. Cykliczny sposób przykładania obciążenia podczas zagęszczania próbek

ZAŁĄCZNIK 2 OKREŚLENIE PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW MIESZANKI MCE

Określenie podstawowych parametrów mieszanki MCE obejmuje określenie:

- Wytrzymałości na pośrednie rozciąganie,
- Odształcenia poziomego,
- Modułu sztywności.

Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie służy do oceny jakości mieszanki MCE. Jest to badanie obowiązkowe. Określenie odształcenia poziomego oraz modułu powinno być przeprowadzone w miarę możliwości sprzętowych. Określenie odształcenia i modułu sztywności ma charakter jedynie informacyjny.

1. Próbk

Badanie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie przeprowadza się na cylindrycznych próbkach o średnicy 150 mm i wysokości około 125 mm.

2. Przygotowanie próbek do badania

Dla każdej próbki należy określić średnią wysokość i średnią średnicę. Przed badaniem próbki są poddawane kondycjonowaniu w temperaturze badania +5°C w powietrzu. Przy temperaturze wyjściowej +20°C, kondycjonowanie należy przeprowadzić od 8 do 12 godzin.

3. Formy, sprzęt, maszyny badawcze

Badanie to przeprowadzono w prasie do badania Marshalla, o przesuwie tłoka 50 mm/min. Obciążenie jest przekazywane przez przekładki o szerokości 12 mm i krzywiznie o promieniu 75 mm dla próbek o średnicy 150 mm. Próbkę obciążano aż do zniszczenia. Badanie pośredniego rozciągania przedstawiono na rysunku Z.1. Do pomiaru odkształcenia poziomego potrzebne jest specjalna przystawka, której nie pokazano na rysunku Z.3.



Rysunek Z.3. Badanie wytrzymałości mieszanki MCE na pośrednie rozciąganie, bez pomiaru przemieszczeń poziomych

4. Parametry

Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie wyznacza się ze wzoru:

$$R = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot h}$$

gdzie:

- R - wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa],
- P - siła niszcząca [N],
- d - średnica próbki [mm],
- h - wysokość próbki [mm],

Odkształcenie poziome wyznacza się ze wzoru:

$$\varepsilon = 1000 \cdot \frac{2 \cdot u \cdot (1 - 3 \cdot \nu)}{\pi \cdot d \cdot (0,274 + \nu)}$$

gdzie:

- ε - odkształcenie poziome [‰],
- P - siła niszcząca [N],
- d - średnica próbki [mm],
- ν - współczynnik Poissona (0,3),
- μ - przemieszczenie poziome w chwili zniszczenia próbki [mm]

Moduł sztywności wyznacza się ze wzoru:

$$E = \frac{P \cdot (0,274 + \nu)}{h \cdot u}$$

gdzie:

- E - Moduł sztywności [MPa],
- P - siła niszcząca [N],
- h - wysokość próbki [mm],
- ν - współczynnik Poissona (0,3),
- u - odkształcenie poprzeczne przy 45% siły niszczącej [mm]

Jako wyniki końcowe należy podać:

- Obowiązkowo: Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]
Gęstość strukturalną [g/cm³]
Wysokość próbki [mm]
- W miarę możliwości: Odkształcenie poziome [‰]
Moduł sztywności E [MPa] przy 45% obciążenia niszczącego

Literatura:

1. Zawadzki J., Matras J., Mechowski T., Sybilski D.: „Warunki techniczne wykonania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE)” IBDiM, Zeszyt 61, Warszawa 1999.
2. „Merkblatt für Kaltrecycling in situ im Straßenoberbau“ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau, Köln, 2005