



POLITECHNIKA GDAŃSKA
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Inżynierii Drogowej

ul. G. Narutowicza 11
80-233 GDAŃSK

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

**OPRACOWANIE PROCEDURY DO
PROJEKTOWANIA MIESZANEK
MINERALNO-CEMENTOWO-EMULSYJNYCH (MCE)**

RAPORT Z DRUGIEGO ETAPU PRAC

Opracowano na zlecenie:

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

Opracowali:

prof. dr hab. inż. Józef Judycki – autor kierujący

dr inż. Bohdan Dołżycki

mgr inż. Cezary Szydłowski

mgr inż. Bartosz Ossowski

Kierownik Katedry Inżynierii Drogowej - prof. dr hab. inż. Józef Judycki

Gdańsk, listopad 2012

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
*Raport z drugiego etapu prac***

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP	5
1.1. PODSTAWA OPRACOWANIA	5
1.2. OPIS PROBLEMU	5
1.3. ZAKRES PRACY	7
2. ODCINKI Z PODBUDOWĄ Z MIESZANEK MCE	8
2.1. ODCINKI Z PODBUDOWĄ Z MCE	8
2.2. OCENA ODCINKÓW Z MIESZANEK MCE	16
2.2.1. <i>Wizualna ocena odcinków z mieszanek MCE</i>	16
2.2.2. <i>Badania ugięciomierzem FWD odcinków z mieszanek MCE</i>	28
3. PROCEDURY PROJEKTOWANIA MIESZANEK MCE NA ŚWIECIE	30
3.1. POLSKA.....	30
3.1.1 <i>Materiały</i>	30
3.1.2 <i>Materiały zgodne z normami europejskimi</i>	31
3.1.3 <i>Projektowanie składu mieszanki MCE</i>	34
3.1.4 <i>Metody badań oraz wymagania dla mieszanek MCE</i>	36
3.2 NIEMCY	37
3.2.1 <i>Materiały</i>	38
3.2.2 <i>Projektowanie składu mieszanki</i>	40
3.2.3 <i>Wykonanie próbek</i>	41
3.2.4 <i>Kondycjonowanie próbek</i>	43
3.2.5 <i>Metody badań oraz wymagania dla mieszanek MCE</i>	43
3.3 PROJEKT PARAMIX	45
3.3.1 <i>Materiały</i>	45
3.3.2 <i>Zagęszczanie próbek</i>	45
3.3.3 <i>Badania oraz wymagania</i>	46
3.4 DOŚWIADCZENIA SZWEDZKIE.....	47
3.4.1 <i>Materiały</i>	48
3.4.2 <i>Wykonanie próbek</i>	49
3.4.3 <i>Zalecane parametry mieszanki</i>	49
3.4.4 <i>Badania mieszanki oraz wymagania</i>	51
3.5 ZALECENIA PIARC	52
3.5.1 <i>Parametry mieszanki i materiałów składowych</i>	52
3.5.2 <i>Projektowanie mieszanek</i>	54
3.5.3 <i>Właściwości mechaniczne</i>	54
3.6 DOŚWIADCZENIA AMERYKAŃSKIE	55
3.6.1 <i>Metoda projektowania mieszanek wg stanu Pensylwania</i>	56
3.6.2 <i>Metoda projektowania mieszanek wg stanu Kalifornia</i>	56
3.6.3 <i>Metoda projektowania mieszanek wg firmy Chevron</i>	56
3.6.4 <i>Metody zgodne z wytycznymi ARRA (Asphalt Recycling and Reclaiming Association)</i>	57
3.6.5 <i>Metoda projektowania mieszanek wg stanu Oregon</i>	59

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

3.6.6	Metoda projektowania mieszanek w stanie Minnesota	59
3.7	WYTYCZNE BRYTYJSKIE	61
3.7.1	Środki wiążące.....	62
3.7.2	Projektowanie składu mieszanki.....	62
3.7.3	Wykonywanie próbek i ich kondycjonowanie	63
3.7.4	Badania oraz wymagania	63
3.8	OCENA WPŁYWU ZAWARTOŚCI CEMENTU NA WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK MCE NA PODSTAWIE CHIŃSKICH WYTYCZNYCH	64
3.9	PORÓWNANIE METOD PROJEKTOWANIA MIESZANEK MCE NA ŚWIECIE	68
3.9.1	Dobór składu mieszanki	68
3.9.2	Wykonanie próbek	71
3.9.3	Kondycjonowanie próbek.....	74
3.9.4	Badania cech mieszanek MCE.....	75
3.10	WNIOSKI	78
4.	WERYFIKACJA ZASAD PROJEKTOWANIA MCE.....	79
4.1	WYBÓR RODZAJU ORAZ ZAWARTOŚCI EMULSJI ASFALTOWEJ.....	79
4.2	WYBÓR RODZAJU ORAZ ZAWARTOŚCI CEMENTU	79
4.3	UZIARNIENIE MIESZANKI MINERALNO-CEMENTOWEJ	80
4.4	CAŁKOWITA ZAWARTOŚĆ ASFALTU	83
4.5	OKREŚLENIE OPTYMALNEJ ZWARTOŚCI PŁYNÓW.....	83
4.6	WYKONANIE PRÓBEK	85
4.7	KONDYCYJONOWANIE PRÓBEK	85
4.8	BADANIA CECH MIESZANEK MINERALNO – CEMENTOWO – EMULSYJNYCH.....	86
4.8.1	Stabilność i odkształcenie według Marshalla.....	86
4.8.2	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie.....	91
4.8.3	Zawartość wolnej przestrzeni.....	97
4.8.4	Wytrzymałość na ściskanie proste	100
4.8.5	Podsumowanie wyników badań	102
5.	ODCINEK DOŚWIADCZALNY	105
6.	PODSUMOWANIE.....	116
7.	LITERATURA	116
ZAŁĄCZNIK 1		
	WYNIKI POMIARÓW UGIĘĆ NAWIERZCHNI UGIĘCIOMIERZEM FWD	119

OPRACOWANIE PROCEDURY DO PROJEKTOWANIA MIESZANEK MINERALNO-CEMENTOWO-EMULSYJNYCH (MCE)

RAPORT Z DRUGIEGO ETAPU PRAC

1. Wstęp

1.1. Podstawa opracowania

Opracowanie wykonano na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w Warszawie w ramach umowy nr 3095/2011 z dnia 18.11.2011 r.

1.2. Opis problemu

W ciągu ostatnich kilkunastu lat wzrosło zainteresowanie technologiami związanymi z powtórным wykorzystaniem odzyskanego materiału pochodzącego z nawierzchni do wykonania nowych warstw konstrukcyjnych. Przyczyniły się do tego zarówno koszty pozyskania nowych materiałów do budowy dróg jak i rosnące koszty utylizacji materiałów pochodzących z rozbiórki nawierzchni drogowych. Niebagatelny wpływ na rozwój recyklingu, a w szczególności recyklingu głębokiego na zimno, miał rozwój techniki drogowej oraz rosnąca dostępność maszyn pozwalających na przetworzenie istniejących warstw konstrukcyjnych w pełnowartościowe, nowe warstwy konstrukcyjne.

Problem ponownego zastosowania destruktu asfaltowego z istniejących, polskich dróg jest dość złożony, ponieważ materiał pochodzący z rozdrobnienia nawierzchni, zwłaszcza wielokrotnie przebudowywanych, charakteryzuje się dość dużą zmiennością wynikającą zarówno ze stosowania różnych materiałów do budowy dróg jak i dużą zmiennością grubości poszczególnych warstw.

Historia wykonywania pierwszych warstw w technologii głębokiego recyklingu w Polsce z mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych sięga lat 90-tych ubiegłego wieku. 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 J. Zawadzkiego i J. Matras wydane przez IBDiM, (zeszyt 53/1997) [1]. W 1999 roku pojawiła się aktualizacja

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

tego opracowania w postaci „Warunków technicznych wykonania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE) autorstwa J. Zawadzkiego, J. Matras, T. Mechowskiego, D. Sybilskiego wydane przez IBDiM (zeszyt 61/1999) [2].

„Warunki techniczne wykonania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo emulsyjnej” [2] oraz ogólne specyfikacje techniczne [3] jakie powstały na ich podstawie stanowią do dnia dzisiejszego podstawę do projektowania mieszanek MCE, ich wbudowywania oraz do kontroli ich jakości.

W trakcie kilkunastu lat korzystania z wytycznych [2] oraz specyfikacji [3] okazały się one niewystarczające, ponadto budziły szereg zastrzeżeń zarówno Wykonawców, Projektantów jak i samej Administracji Drogowej. Zastrzeżenia dotyczyły między innymi następujących zagadnień:

1. Parametrów wymaganych dla zaprojektowanych mieszanek MCE oraz wymagań dla warstw wykonanych z mieszanek MCE.
2. Stosowanych do oceny mieszanek MCE metod badawczych, a zwłaszcza metod zagęszczania próbek do badań.
3. Wymagań materiałowych dla poszczególnych składników stosowanych do podbudów z mieszanek MCE.
4. Braku zróżnicowania wymagań dla mieszanek MCE robionych dla dróg o różnych kategoriach ruchu.

Dodatkowo do mankamentów wynikających z samych zapisów w wymaganiach dla projektowania oraz wykonawstwa mieszanek MCE doszło wprowadzenie do ogólnego stosowania norm serii PN-EN, według których specyfikuje się dziś dopuszczone do obrotu materiały. Dotyczy to szczególnie wymagań dla takich materiałów jak:

1. Kruszyw stosowanych jako materiał doziarniający.
2. Emulsji asfaltowych.
3. Cementu.

Ponadto szereg metod badawczych stosowanych do oceny mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych zostało ujętych w normach serii PN-EN. Ich zastosowanie do mieszanek MCE wymaga weryfikacji laboratoryjnej ich przydatności do oceny mieszanek MCE oraz ewentualnych korekt pod kątem zastosowania do badania mieszanek MCE.

W trakcie weryfikacji dotychczasowych wymagań oraz opracowania nowych wymagań nieodzowne będzie zebranie informacji na temat dotychczasowego zachowania się odcinków wykonanych z podbudowami z mieszanek MCE. Badania będą obejmowały określenie nośności wytypowanych odcinków oraz określenie stopnia ich degradacji. Zebrane informacje powinny pomóc w weryfikacji dotychczasowych wymagań oraz pokazać kierunek zmian, w jakim powinna pójść weryfikacja zasad projektowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych.

1.3. Zakres pracy

Praca nad „Opracowaniem procedury do projektowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)” została podzielona na 3 etapy, w każdym z etapów przewidziano do wykonania kilka zadań. Zakres prac będzie obejmował:

Etap I, przewidziany do wykonania w 2011 roku obejmował:

1. Zebranie informacji o zmianach legislacyjnych w stosunku do dotychczas stosowanych wymagań do materiałów do mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych. Na tym etapie zostały sprawdzone zmiany wynikające z wprowadzenia do stosowania norm serii PN-EN odnośnie wymagań dla materiałów stosowanych do mieszanek MCE.
2. Przegląd dostępnych metod projektowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych. Zebrane zostały informacje o stosowanych w różnych krajach metodach projektowania mieszanek MCE, aby na tej podstawie w kolejnych etapach wybrać elementy mogące znaleźć zastosowanie w Polsce.

Etap II, przewidziany do wykonania w 2012 roku obejmuje:

1. Uzupelnienie bazy danych o odcinakach z podbudowami z mieszanki MCE. W posiadaniu zespołu badawczego znajdują się informacje o około 20 odcinkach z podbudowami z mieszanki z MCE. Celem tego etapu będzie zwiększanie bazy odcinków, aby w lepszym stopniu oceniać wpływ podbudów z mieszanek MCE na stan ogólny nawierzchni.
2. Ocena odcinków z podbudowami z MCE poprzez wykonanie ugięć ugięciomierzem FWD oraz przeprowadzenie inwentaryzacji uszkodzeń. Na tym etapie prac dla wybranych odcinków zostaną przeprowadzone szerokie prace badawcze, które będą miały za zadanie ocenę nośności odcinków z podbudowami z MCE oraz stopień degradacji nawierzchni po kilku latach eksploatacji nawierzchni.
3. Weryfikacja dotychczasowych zasad projektowania podbudów z mieszanki MCE w Polsce. Ten etap prac będzie poświęcony ocenie metod projektowania mieszanek MCE oraz porównania ich z doświadczeniami innych krajów. Prace z tego etapu posłużą do wyboru metod wytypowanych do dalszej oceny.
4. Przeprowadzenie oceny wybranych procedur stosowanych w innych krajach do projektowania i wbudowywania podbudów wykonywanych w technologii MCE lub zbliżonej. Zebrane informacje posłużą do określenia ilości i rodzaju dodawanych dodatków, zarówno wiążących jak i doziarniających, oraz jakie preferowane są metody do oceny parametrów wytrzymałościowych takiego materiału.

Etap III, przewidziany do wykonania w 2013 roku będzie obejmował:

1. Adaptacja istniejącej metodyki projektowania podbudów z MCE na podstawie dotychczasowych doświadczeń oraz studiów literatury do nowych potrzeb oraz do wymagań określonych w normach serii PN-EN. Na tym etapie prac, w oparciu o zebrane dane w terenie oraz dane o doświadczeniach z innych krajów, zostanie opracowana wstępna metoda projektowania mieszanek MCE.

2. Przeprowadzenie weryfikacji w warunkach laboratoryjnych metodyki opracowanej na podstawie dotychczasowych badań oraz studiów literatury. W tym etapie prac zostaną przeprowadzone badania, które pozwolą na zweryfikowanie opracowanej metody projektowania mieszanek MCE.
3. Opracowanie procedury do projektowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE).

Niniejsze sprawozdanie jest wynikiem realizacji II etapu prac. W trakcie jego realizacji pojawił się szereg zagadnień, które będą musiały być doprecyzowane i uszczegółowione na etapie III.

2. Odcinki z podbudową z mieszanek MCE

2.1. Odcinki z podbudową z MCE

W posiadaniu zespołu badawczego znajdują się informacje o około 60 odcinkach z podbudowami wykonanymi w technologii MCE, które zostały pozyskane w trakcie dotychczasowych prac badawczych. Celem tego etapu jest zwiększenie bazy danych odcinków, aby w lepszym stopniu oceniać wpływ podbudów z mieszanek MCE na stan ogólny nawierzchni.

Informacje będące w posiadaniu zespołu badawczego pochodzą z ankiet rozesłanych do przedstawicieli Administracji Drogowej, na szczeblu wojewódzkim. Skupiono się na drogach administrowanych przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad oraz Zarządy Dróg Wojewódzkich. W celu zebrania informacji rozesłano dwa typy ankiet:

1. Ankieta nr 1 – uzyskanie informacji o nowych odcinkach (od 2005r.) wykonanych z wykorzystaniem technologii MCE w celu uzupełnienia bazy danych,
2. Ankieta nr 2 – poszerzenie informacji o odcinkach wykonanych przed 2005r. w zakresie powstałych uszkodzeń oraz wykonywanych zabiegów utrzymaniowych.

Przykład wypełnionych ankiet pokazano na rysunku 2.1 i 2.2. Zestawienie informacji o odesłanych ankietach przedstawiono w tabeli 2.1.

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Tablica 2.1. Stosowanie podbudów z mieszanek MCE w poszczególnych województwach

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

Zestawienie odcinków dróg, na których zastosowano technologię MCE przedstawiono w tablicy 2.2. Do stworzenia zestawienia wykorzystano informacje uzyskane od Administracji Drogowej oraz od przedstawicieli firm wykonawczych. Na rysunku 2.3 pokazano sumaryczne długości odcinków wykonanych z wykorzystaniem mieszanki MCE w poszczególnych latach. Zarówno tablica 2.2 jak i rysunek 2.3 bazują na informacjach przekazanych zespołowi badawczemu, w związku z tym nie mogą być traktowane jako pełne odzwierciedlenie zakresu stosowania mieszanki MCE. Do czasu zakończenia prac nad etapem III posiadana baza danych może być rozszerzona.

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Ankieta dotycząca stosowania podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE)

**ANKIETA nr 1
DOTYCZĄCA STOSOWANIA PODBUDOWY
Z MIESZANKI MINERALNO-CEMENTOWO-EMULSYJNEJ (MCE)**

Dane ogólne o odcinku:

Administrator: GDDKiA Oddział w Białymstoku
 Numer drogi: 176 Zamojski - Opatów
 Kilometraż: 0+00 - 1+000
 Kategoria ruchu: III
 Rok wykonania: 2008-2009
 Generalny Wykonawca: STRAPOC Sp. z o.o.

Dane o podbudowie MCE:

Grubość warstwy z MCE: 15cm
 Grubość warstw asfaltowych: 10cm w podbud. + 10cm w pods.
 Wykonawca warstwy MCE: STRAPOC pod MCE SAT
 Technologia wykonania na miejscu z rozsypaniem cementu przed recyklerem
 na miejscu z jednoczesnym mieszaniem emulsji i asfaltu w recyklerze
 w wytwórni stacjonarnej
 inny sposób

Skład, o ile jest dostępny:

Ilość emulsji: 3,0% 10-60
 Ilość cementu: 5%
 Ilość destruktu: 6%
 Ilość kruszywa: 21,0% (mieszank. 0/15mm)

Ocena wykonywanych prac:

Czy prace były wykonywane sprawnie Tak Nie
 Czy wystąpiły problemy podczas wykonywania warstwy Tak Nie
 Jeżeli tak to jakie: problemy miały miejsce pod wpływem dużej ilości wody i trudności z utrzymaniem równości podłoża. Wskazywane były problemy z utrzymaniem równości podłoża. Wskazywane były problemy z utrzymaniem równości podłoża.

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

Sprawę prowadzi: dr inż. Bohdan Dołżycki, dozyczny@pcc.oda.pl, tel 58 347 26 55 1 z 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 Nie Tak
 Spękania poprzeczne Nie Tak, ile... 28
 Spękania podłużne Nie Tak
 Obiawienia krawędzi Nie Tak
 Zapadnięcia Nie Tak
 Uszkodzenia powierzchniowe Nie Tak

Inne uszkodzenia: zwiększona porowatość warstwy po przelaniu przez zimnymi wodą podłoża. Wskazywane były problemy z odbiorem warstwy. Wskazywane były problemy z odbiorem warstwy.

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

Podczas prac nastąpiło brnięcie do odcinku warstwy destruktu w wyniku nie idealnego wykonania warstwy destruktu. Wskazywane były problemy z odbiorem warstwy. Wskazywane były problemy z odbiorem warstwy.

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

Imię i Nazwisko: Bohdan Dołżycki
 Telefon: 58 347 26 55
 Email: dozyczny@pcc.oda.pl

1. MCE ma waler tendencji kamienistej: 1. MCE po daw znaczny kontakt w warstwie od 1,5m - 4,0m

1+000 - 2+000	1+000 - 1+100
2+000 - 3+000	2+000 - 2+100
3+000 - 4+000	3+000 - 3+100
4+000 - 5+000	4+000 - 4+100
5+000 - 6+000	5+000 - 5+100
6+000 - 7+000	6+000 - 6+100
7+000 - 8+000	7+000 - 7+100
8+000 - 9+000	8+000 - 8+100
9+000 - 10+000	9+000 - 9+100
10+000 - 11+000	10+000 - 10+100
11+000 - 12+000	11+000 - 11+100
12+000 - 13+000	12+000 - 12+100

Sprawę prowadzi: dr inż. Bohdan Dołżycki, dozyczny@pcc.oda.pl, tel 58 347 26 55 2 z 2

Rysunek 2.1. Przykład wypełnionej ankiety nr 1. GDDKiA Oddział w Białymstoku

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Ankieta dotycząca stosowania podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE)

ANKIETA nr 2
DOTYCZĄCA STANU NAWIERZCHNI NA ODCINKU STOSOWANIA
PODBUDOWY Z MIESZANKI MINERALNO-CEMENTOWO-EMULSYJNEJ (MCE)

Dane ogólne o odcinku:

Administrator: GDDKiA Oddział w Białymstoku
Numer drogi: 8
Kilometr: 571+090 + 578+192
Kategoria ruchu: KR5
Rok wykonania: 2003

Ocena stanu nawierzchni wykonanego odcinka:

Czy na odcinku z podbudową z MCE wystąpiły następujące uszkodzenia:

Kolejny	<input checked="" type="checkbox"/> Nie	<input type="checkbox"/> Tak
Spękania poprzeczne	<input type="checkbox"/> Nie	<input checked="" type="checkbox"/> Tak, ile <i>246 (P) 167 (L)</i>
Spękania podłużne	<input type="checkbox"/> Nie	<input checked="" type="checkbox"/> Tak <i>gdzieś na profrawie znowo</i>
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:	<i>lokalnie spękania różowe</i>	

.....
.....
.....
.....

Czy na odcinku z podbudową z MCE były przeprowadzone naprawy bieżące bądź remonty:

Naprawa (zalewanie) spękań	<input type="checkbox"/> Nie	<input checked="" type="checkbox"/> Tak <i>często</i>
Naprawa cząstkowa	<input type="checkbox"/> Nie	<input checked="" type="checkbox"/> Tak
Powierzchniowe utrwalenie	<input checked="" type="checkbox"/> Nie	<input type="checkbox"/> Tak
Wymiana warstwy ścieralnej	<input checked="" type="checkbox"/> Nie	<input type="checkbox"/> Tak
Nakładka warstwami bitumicznymi	<input checked="" type="checkbox"/> Nie	<input type="checkbox"/> Tak
Remont całkowity konstrukcji	<input checked="" type="checkbox"/> Nie	<input type="checkbox"/> Tak
Jeśli tak, to czy warstwa MCE została zastąpiona innym materiałem	<input type="checkbox"/> Nie <input type="checkbox"/> Tak	

Inne:
.....
.....
.....

Sprawę prowadzi: dr inż. Bohdan Dołycki, dołycki@pg.gda.pl, tel 58 347 26 55 1 z 2

Ankieta dotycząca stosowania podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE)

Uwagi końcowe, proszę wpisać wszystko to co sprawiło trudności lub stanowiło jakiś problem w trakcie eksploatacji i utrzymania odcinków dróg z warstwa z MCE w konstrukcji:

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

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

Imię i Nazwisko *Sławomir Błomant*
Telefon *58 749 70 88*
Email *sblomant@pde.o.gaz.pl*

Sprawę prowadzi: dr inż. Bohdan Dołycki, dołycki@pg.gda.pl, tel 58 347 26 55 2 z 2

Rysunek 2.2. Przykład wypełnionej ankiety nr 2. GDDKiA Oddział w Białymstoku

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Tablica 2.2. Zestawienie wybranych odcinków głównych dróg wyremontowanych z zastosowaniem podbudów z mieszanki MCE

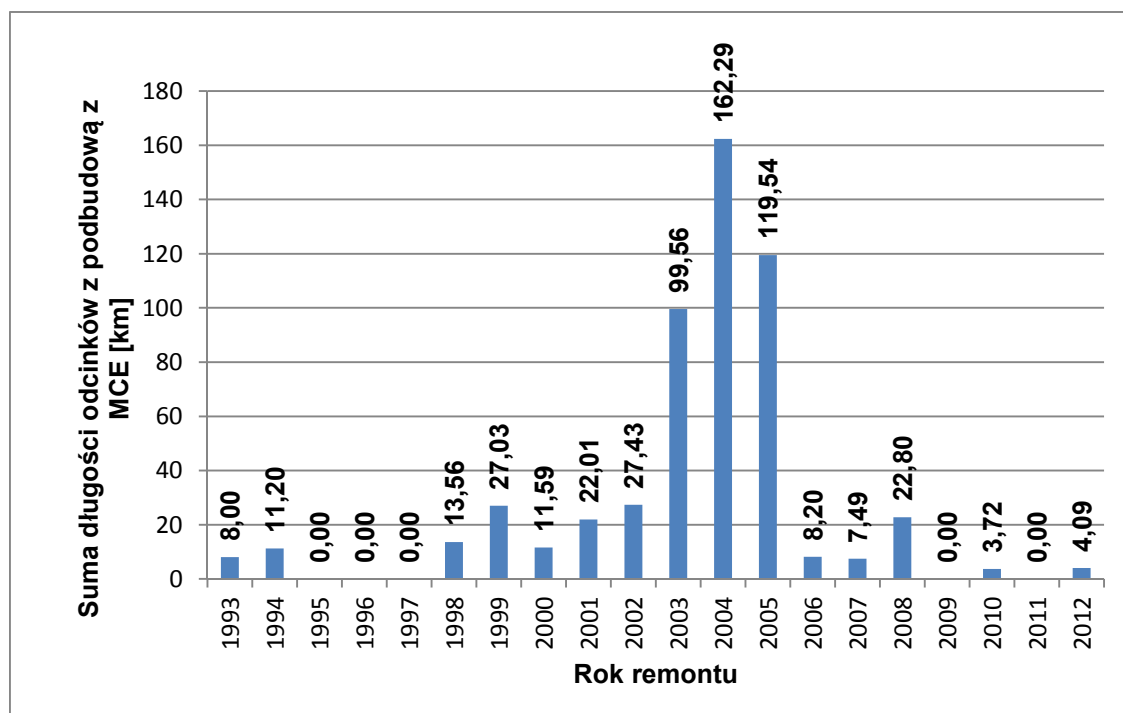
Lp.	Wojew.	Droga	Kilometraż		Ruch KR	Rok remontu	Skład MCE % [m/m]				Rodzaj destruktu	MCE [cm]	Nowe warstwy asfaltowe[cm]		
			od	do			E	C	D	KD			Ś	W	P
1	Wielk.	DW449	~8km		bd	1993	bd				bd	20	bd		
2	Wielk.	DK2(92)	138+600	149+800	5	1994	bd			20(30)	bd	20	4	4	10
3	Podl.	DK61	126+087	133+945	4	1998	bd				bd	bd	bd		
4	Lubel.	Dk 63	44+250	49+951	4	1998	bd				bd	bd	bd		
5	Podl.	DK61	134+668	147+200	4	1999	bd				bd	bd	bd		
6	Lubus.	DK2	8+750	23+250	6	1999(2000)	bd				bd	15	12		
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	bd		
9	Zach.	DK 3	322+140	324+000	3	2000	bd				bd	bd	bd		
10	Wielk.	DK2(92)	150+500	152+940	5	2001	bd				bd	20	16		
11	Zach	DK3	13+150	13+810	4	2001	bd				bd	bd	bd		
12	Zach.	DK31	41+680	46+810	4	2001	bd				bd	bd	bd		
13	Zach.	DK31	53+600	56+600	4	2001	bd				bd	bd	bd		
14	Lubus.	DK2	94+600	96+826	6	2001	3	4	60	36	bd	15	12		
15	Łódz.	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	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	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	bd		
29	Zach.	DK10	155+544	164+432	4	2003	bd				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	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
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	

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

c.d. Tablica 2.2.

45	Opol.	DK94	219+200	221+850	6	2004	4,5	4	22	78	bd	bd	bd	bd	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			
81	Śląsk.	DW793	37+460	40+260	3	2006(7)	4	3	39,5	56,5	bd	20	4	8	15	
82	Łódz.	DK1	364+150	366+700	6	2007	2,2	3	63,6	31,3	A	18	4	7	20	
83	Łódz.	DK1	367+265	369+000	6	2007	2,2	3	63,6	31,3	A	18	4	7	20	
84	Łódz.	DK1	369+480	372+688	6	2007	2,2	3	63,6	31,3	A	18	4	7	20	
85	Zach.	DW201	0+691	5+691	3	2008	3	5,8	62,1	29,1	bd	20	5	9		
86	Śląsk.	DW790	10+061	11+261	2	2008	4	3	76,8	19,2	bd	23	4	6	10	
87	Podl.	DK66	0+000	16+600	4	2008(9)	3	3,7	62,3	31	bd	13	5	8	10	
88	Małop.	DW977	0+649	3+116	3	2010	2,5	3,5	76,1	17,9	bd	18	12-15			
89	Zach.	DW172	22+950	24+200	3	2010	3	3,9	64	29,1	bd	20	4	6		
90	Zach.	DW172	24+200	27+290	3	2012	3	3	96	0	A	20	4	6		
91	Zach.	DW172	27+290	28+290	3	2012	bd	bd	bd	bd	bd	20	4	6		

Oznaczenia: E – emulsja, C – cement, D – destruk, KD – kruszywo doziarniające,
A – destruk asfaltowy, S – destruk smołowy, AS – asfaltowo-smołowy
Ś – warstwa ścieralna, W – warstwa wiążąca, P – warstwa podbudowy
bd – brak danych



Rysunek 2.3. Zestawienie długości odcinków z podbudową z mieszanki MCE

Zebrane dane z 91 odcinków dróg z podbudowami z mieszanki MCE pozwoliły na stworzenie bazy danych, która została wykorzystana do przeprowadzenia analizy. Zespół badawczy zwrócił szczególną uwagę na skład mieszanek MCE, w tym na zgodność recepty z obowiązującymi przepisami.

Wśród nadesłanych ankiet 65 zawierało dane na temat składu mieszanek MCE. Analizując ankiety stwierdzono, że:

- Na 29 odcinkach zastosowano mieszankę MCE z dodatkiem do 4% cementu,
- Na 24 odcinkach zastosowano 4% cementu, czyli największą zalecaną ilość według warunków technicznych [2],
- Na 13 odcinkach użyto więcej niż 4% cementu.

Klasyfikując nadesłane informacje o receptach mieszanek MCE pod względem zawartości emulsji asfaltowej można stwierdzić, że:

- 16 odcinków wykonano z mniejszą niż 3% zawartością emulsji,
- 41 odcinków wykonano z zawartością emulsji równą 3%, czyli z minimalną zawartością wg polskich wymagań [2],
- 9 odcinków wykonano z zawartością emulsji większą niż 3%. Wśród tej grupy znalazł się 1 odcinek z zawartością emulsji wynoszącą 5,5% równą maksymalnej zalecanej wartości wg [2] oraz jeden odcinek z zawartością przekraczającą tę wartość.

Wśród nadesłanych ankiet zawierających składy mieszanek użytych do wykonania recyklingu w technologii MCE zastosowano dodatek kruszywa doziarniającego w ilości:

- Na 9 odcinkach do 25%,

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

- Na 43 odcinkach od 25 do 50%,
- Na 12 odcinkach od 50 do 75%,
- Na 2 odcinkach powyżej 75%.

Z przedstawionej analizy można zauważyć tendencję do:

- stosowania zawartości cementu w największej dopuszczalnej warunkami technicznymi [2] ilości lub nawet do przekraczania tej wartości,
- stosowania minimalnej dopuszczalnej zawartości emulsji asfaltowej,
- stosowania kruszywa doziarniającego w ilości najczęściej przekraczającej 25%.

Takie dobieranie składu mieszanek MCE spowodowane jest koniecznością spełnienia wysokich wymagań wytrzymałościowych (duża stabilność, małe odkształcenie), stąd duża zawartość cementu oraz kruszywa doziarniającego, oraz ma na celu maksymalne obniżenie kosztów, stąd minimalne zawartości emulsji asfaltowej.

Informacje na temat stanu dróg z podbudowami z MCE, które zostały przekazane w ankiecie nr 2 zestawiono w tabelicy 2.3.

Tabela 2.3. Zestawienie stanu dróg z podbudowami z MCE
na podstawie informacji z ankiet nr 2

Lp	Wojew.	Droga	Kilometraż		Ruch KR	Rok remontu	Występujące uszkodzenia							Wykonywane naprawy i zabiegi utrzymaniowe					
			od	do			Koleiny	Spękania poprzeczne	Spękania podłużne	Oblamania krawędzi	Zapadnięcia	Uszkodzenia powierzchniowe	Uszczelnienie spękań	Naprawą cząstkową	Powierzchniowe utwardzenie	Wymiana warstwy scieralnej	Nakładka	Remont całkowity	
1	Lubus.	DK2	11+900	21+920	6	1999	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	
2	Lubus.	DK2	94+600	96+826	6	2000	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	
3	Łódz.	DK8	212+100	220+650	5	2001(2)	-	+	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-	
4	Podl.	DK8	585+634	599+313	5	2002	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-	
5	Podl.	DK8	571+090	578+192	5	2003	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-	
6	Podl.	DK8	561+073	571+090	5	2003	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-	
7	Małop.	DK7	684+384	962+660	5	2003	-	+	+	bd	bd	bd	+	bd	bd	bd	bd	+	
8	Małop.	DW780	52+364	53+152	4	2003	+	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	-	
9	Opol.	DK94	225+000	228+700	6	2003(4)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10	Podl.	DK8	717+892	723+236	5	2004	-	+	+	-	-	-	bd	bd	bd	bd	bd	bd	
11	Podl.	DK8	636+661	638+771	5	2004	Odcinek przebudowany												
12	Podl.	DK8	628+511	629+511	5	2004	Odcinek przebudowany												
13	Opol.	DK94	219+200	221+850	6	2004	-	-	+	bd	bd	bd	+	+	-	-	-	-	
14	Opol.	DK88	0+500	2+568	6	2004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
15	Opol.	DK94	223+000	224+276	6	2004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
16	Lubus.	DK3	325+068	327+331	6	2004	bd	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	
17	Małop.	DK7	674+910	677+255	5	2004(5)	-	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	
18	Małop.	DK7	692+660	695+500	5	2004(5)	-	+	+	bd	bd	bd	+	bd	bd	bd	bd	+	
19	Małop.	DK94g	0+866	21+288	3	2004(5)	+	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-	
20	Maz.	DW630	0+000	16+648	4	2005	-	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	
21	Maz.	DW581	4+250	4+694	3	2005	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	
22	Opol.	DW426	23+400	28+401	5	2005	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	
23	Maz.	DW728	41+300	45+400	4	2005(6)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Zespół badawczy zebrał informacje na temat stanu technicznego 23 odcinków wykonanych z wykorzystaniem technologii MCE. Dwa spośród nich zostały kompletnie przebudowane. Są to odcinki drogi krajowej nr 8 administrowane przez GDDKiA oddział w Białymstoku. Do dalszej analizy wykorzystano dane o 21 odcinkach.

Z otrzymanych danych wynika, że na 4 odcinkach nie zaobserwowano żadnych uszkodzeń ani nie wykonywano zabiegów utrzymaniowych. Były to odcinki wyremontowane w latach 2003÷2005.

Najczęściej występującym uszkodzeniem są spękania podłużne, które pojawiły się na 71% odcinków. Z opisów dodatkowych zamieszczonych w ankietach wynika, że są to w większości spękania w środku jezdni, na podłużnym szwie roboczym. Najbardziej typowe dla sztywnych podbudów spękania poprzeczne pojawiły się na 62% odcinków. Oprócz spękań respondenci zwrócili uwagę na uszkodzenia powierzchniowe (33% odcinków), pojawiające się koleiny (19% odcinków), zapadnięcia nawierzchni (14% odcinków) oraz obłamania krawędzi jezdni (5% odcinków).

Podczas badań ankietowych Zarządcy dróg zostali zapytani również o zabiegi utrzymaniowe. Najczęściej wykonywano naprawy cząstkowe nawierzchni (na 57% odcinków). Pojawiające się spękania zostały uszczelnione na 52% odcinków. Na dwóch odcinkach (10%) wykonano remont całkowity nawierzchni bez wymiany podbudowy z mieszanki MCE na inny materiał. Na pojedynczych odcinkach wykonano powierzchniowe utwalenie oraz wymianę warstwy ścieralnej. Na żadnym z odcinków nie wykonano nakładki warstwami asfaltowymi.

2.2. Ocena odcinków z mieszanek MCE

Na tym etapie prac dla wybranych odcinków zostały przeprowadzone szerokie prace badawcze, które miały za zadanie ocenę stopnia degradacji nawierzchni oraz nośności odcinków z podbudowami z MCE po kilku latach eksploatacji nawierzchni. W tym celu wykonano inwentaryzację uszkodzeń nawierzchni oraz badania ugięć nawierzchni ugięciomierzem FWD.

2.2.1. Wizualna ocena odcinków z mieszanek MCE

Przeprowadzoną w 2012 roku ocenę wizualną porównano z inwentaryzacjami wykonanymi w latach 2006, 2007, 2009 i 2011 w celu lepszego odzwierciedlenia procesu degradacji nawierzchni.

Do przeprowadzenia wizualnej analizy stanu nawierzchni wytypowano 16 odcinków dróg z podbudowami z mieszanki MCE. Wśród wybranych odcinków znalazły się 2 odcinki dwujezdniowe, na których jedna jezdnia wykonana była z zastosowaniem podbudowy z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie. Wybór tych odcinków miał na celu porównanie stanu nawierzchni obu jezdni oraz próbę przypisania wpływu zastosowanej technologii do wykonania warstwy podbudowy na degradację warstw asfaltowych. Lokalizację ocenianych odcinków przedstawiono w

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

tablicy 2.4. oraz na rysunku 2.4. W tablicy 2.5 zestawiono podstawowe dane na temat analizowanych odcinków.

Tablica 2.4. Lokalizacja odcinków dróg, na których dokonano inwentaryzacji

Lp.	Województwo	Numer drogi	Lokalizacja odcinka wybranego do obserwacji		Rok remontu	Rok inwentaryzacji
			od km	do km		
1.	pomorskie	DK6	261+300	263+000	1999	2006, 2007, 2009, 2011, 2102
2.	pomorskie	DK55	84+000	86+000	2004	2006, 2007, 2009, 2012
3.	pomorskie	DK22	338+250	339+760	2005	2006, 2007, 2009, 2012
4.	pomorskie	DK7	26+500	44+630	2003/2004	2009, 2011, 2012
5.	pomorskie	DK7	47+500	49+500	2005	
6.	pomorskie	DK7	65+500	67+500		
7.	warmińsko-mazurskie	DK7	69+000	71+000		
8.	warmińsko-mazurskie	DK7	75+000	77+000		
9.	warmińsko-mazurskie	DK7	79+300	81+300		
10.	kujawsko-pomorskie	DK15	306+000	308+000	2003	2006, 2007, 2011, 2012
11.	kujawsko-pomorskie	DK15	328+500	330+500	2003	
12.	kujawsko-pomorskie	DK15	336+000	338+000	2003	
13.	warmińsko-mazurskie	DK58	10+000	12+000	2005	2006, 2007, 2011, 2012
14.	warmińsko-mazurskie	DK58	19+000	21+000	2004	
15.	warmińsko-mazurskie	DK58	106+000	108+000	2005	
16.	warmińsko-mazurskie	DK58	114+000	116+000	2003	



1- DK6, 2- DK55, 3- DK22, 4- DK7, 5- DK15, 6- DK58

Rysunek 2.4. Lokalizacja odcinków dróg, na których dokonano inwentaryzacji

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Tablica 2.5. Zestawienie informacji o warstwie MCE na odcinkach, na których dokonano inwentaryzacji

Lp.	Numer drogi	Lokalizacja odcinka wybranego do badań		Ruch KR	Skład MCE % [m/m]				Grubość MCE [cm]	Warstwy asfaltowe [cm]
		od	do		E	C	D	KD		
1.	DK6	261+300	263+000	5	bd	bd	bd	bd	25	12
2.	DK55	84+000	86+000	4	3	5	57	35	15	12
3.	DK22	338+250	339+760	4	3	4	70	26	20	10
4.	DK7	26+500	44+630	6	2,8	4	60	36	16	21
5.	DK7	47+500	49+500	5	3	4	47,8	39,1	16	21
6.	DK7	65+500	67+500	6						
7.	DK7	69+000	71+000	6						
8.	DK7	75+000	77+000	6						
9.	DK7	79+300	81+300	6						
10.	DK15	306+000	308+000	4	3	4	57	36	15	12
11.	DK15	328+500	330+500							
12.	DK15	336+000	338+000							
13.	DK58	10+000	12+000	3	4	5,8	61,4	28,8	12	14
14.	DK58	19+000	21+000	3	3,5	4	30	70	20	9
15.	DK58	106+000	108+000	3	bd	bd	bd	bd	15	13
16.	DK58	114+000	116+000	3	bd	bd	bd	bd	13	14

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

Zestawienie wyników inwentaryzacji z poszczególnych lat przedstawiono w tablicy 2.6 oraz na rysunkach od 2.5 do 2.20. Na rysunkach od 2.21 do 2.26 pokazano widok typowych uszkodzeń nawierzchni.

Tablica 2.6. Zestawienie wyników inwentaryzacji

Nr drogi	kilometraż	rok inwentaryzacji	spękania poprzeczne	spękania zmęczeniowe	spękania podłużne	uszkodzony szew roboczy	ubytki masy
DK6	261+300 - 263+000	2007	24	0	0	0	0
		2009	32	13	7	0	0
		2011	53	22	10	0	0
		2012	88	59	38	0	2
DK55	84+000 - 86+000	2007	0	0	0	0	0
		2009	0	0	1	3	0
		2011	1	7	1	3	0
		2012	10	19	7	6	0
DK22	338+250 - 339+760	2007	3	0	0	0	0
		2009	6	0	0	3	0
		2011	23	0	0	4	0
		2012	34	1	3	11	3

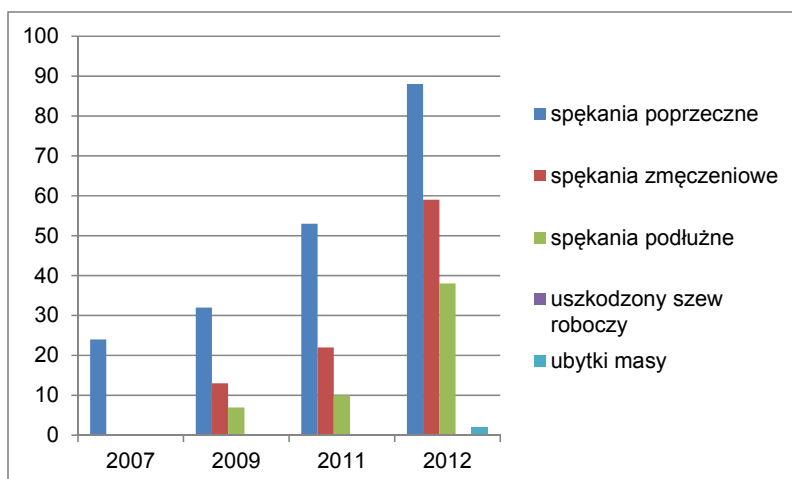
**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

c.d. Tablica 2.6.

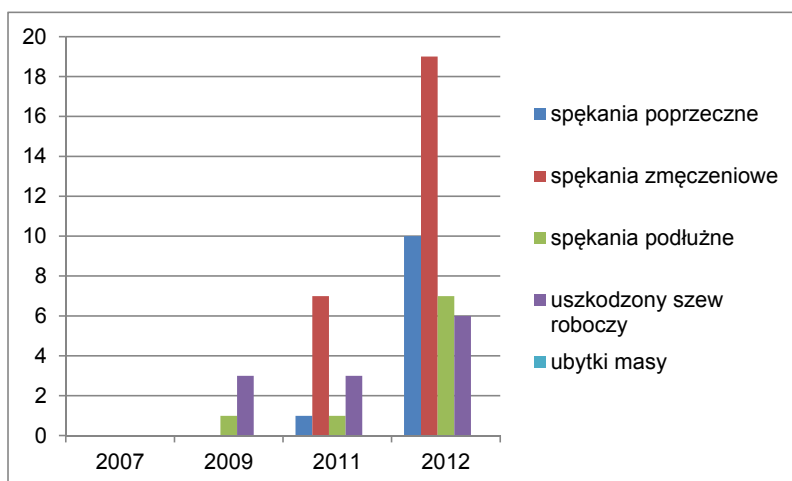
DK7	26+500 - 44+630	2007	31	0	0	9	0
		2009	63	4	6	15	0
		2011	209	9	21	21	0
		2012	376	47	80	40	0
	47+500 - 49+500	2009	0	0	0	0	0
		2011	6	3	0	6	1
		2012	12	7	0	12	2
	65+500 - 67+500	2009	0	0	0	0	0
		2011	23	1	0	7	0
		2012	42	3	1	14	0
	69+000 - 71+000	2009	0	0	0	0	0
		2011	16	0	1	2	0
		2012	28	0	1	4	0
	75+000 - 77+000 MCE	2011	2	0	0	0	0
2012		2	0	0	3	0	
79+300 - 81+300 MCE	2011	0	0	0	0	0	
	2012	4	0	0	2	0	
DK15	306+000 - 308+000	2006/2007	5	0	0	1	0
		2009	5	2	3	1	0
		2011	8	4	3	2	0
		2012	10	6	5	11	0
	328+500 - 330+500	2006/2007	18	0	0	0	0
		2009	23	6	4	0	0
		2011	27	15	7	2	0
		2012	37	52	10	4	2
	336+000 - 338+000	2006/2007	3	0	0	0	1
		2009	5	0	6	1	1
		2011	6	5	13	1	8
		2012	8	26	15	7	*
DK58	10+000 - 12+000	2011	0	0	0	2	2
		2012	6	0	2	13	2
	19+000 - 21+000	2011	0	0	0	7	7
		2012	0	0	0	16	7
	106+000 - 108+000	2011	1	1	0	6	4
		2012	1	2	4	15	4
	114+000 - 116+000	2011	0	0	0	0	0
		2012	1	4	0	6	0

* - na całym odcinku zaobserwowano powierzchniowe utrwalenie w stanie złym, z licznymi ubytkami

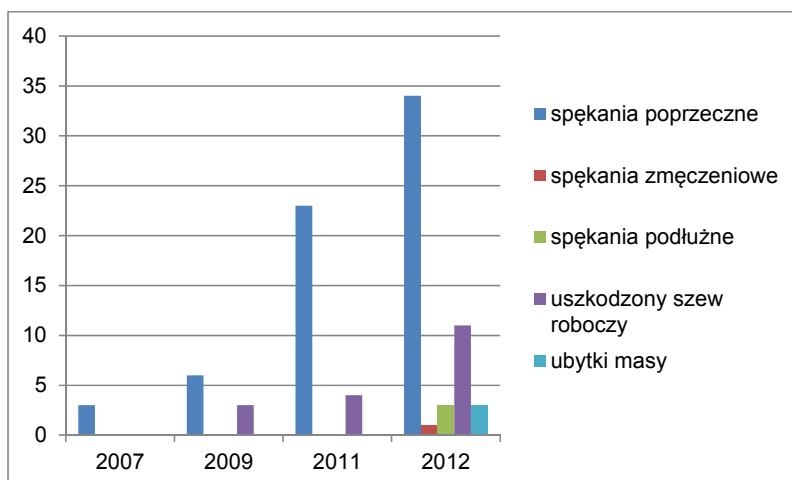
**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**



Rysunek 2.5 Zestawienie uszkodzeń nawierzchni, DK6 km 261+300 ÷ 263+000

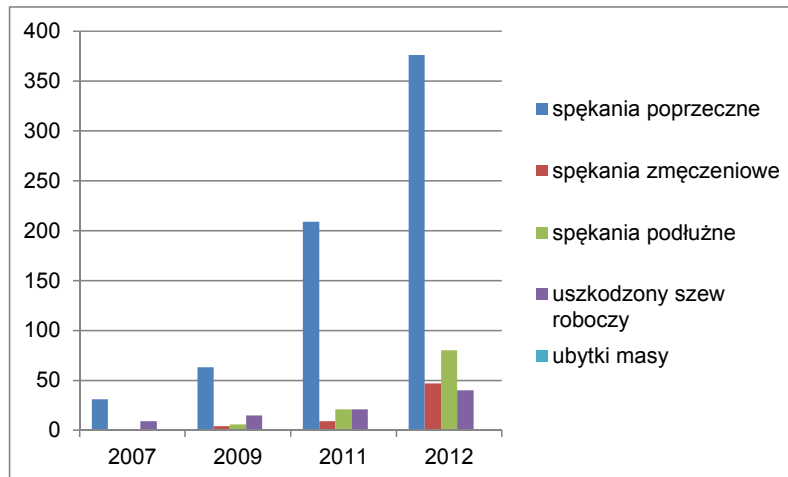


Rysunek 2.6. Zestawienie uszkodzeń nawierzchni, DK55 km 84+000 ÷ 86+000

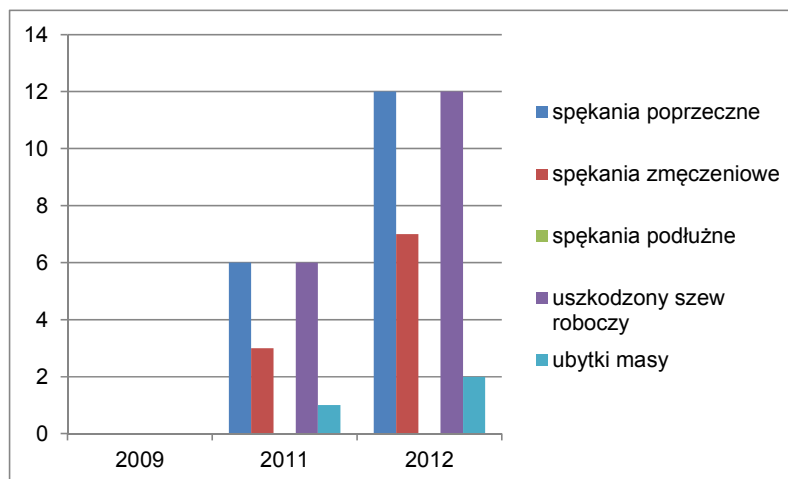


Rysunek 2.7. Zestawienie uszkodzeń nawierzchni, DK22 km 338+250 ÷ 339+760

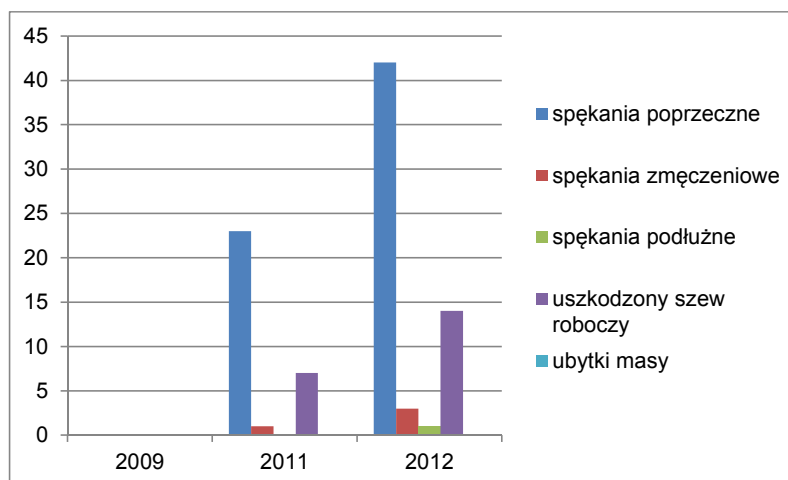
**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**



Rysunek 2.8. Zestawienie uszkodzeń nawierzchni, DK7 km 26+500 ÷ 44+630

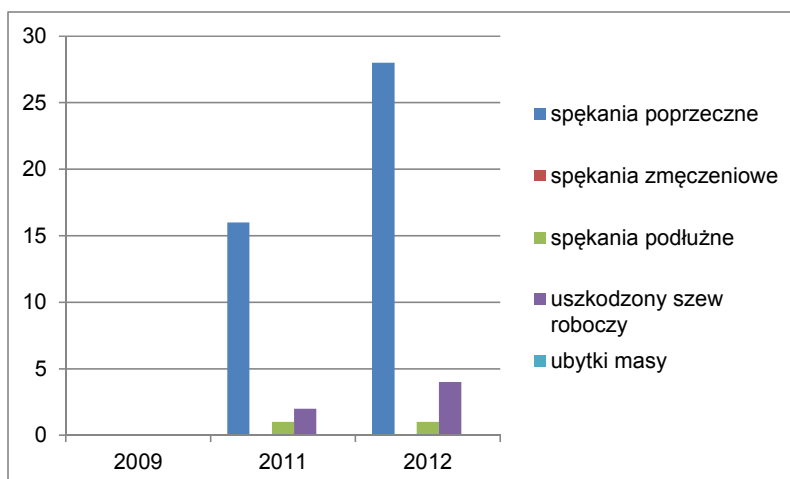


Rysunek 2.9. Zestawienie uszkodzeń nawierzchni, DK7 km 47+500 ÷ 49+500

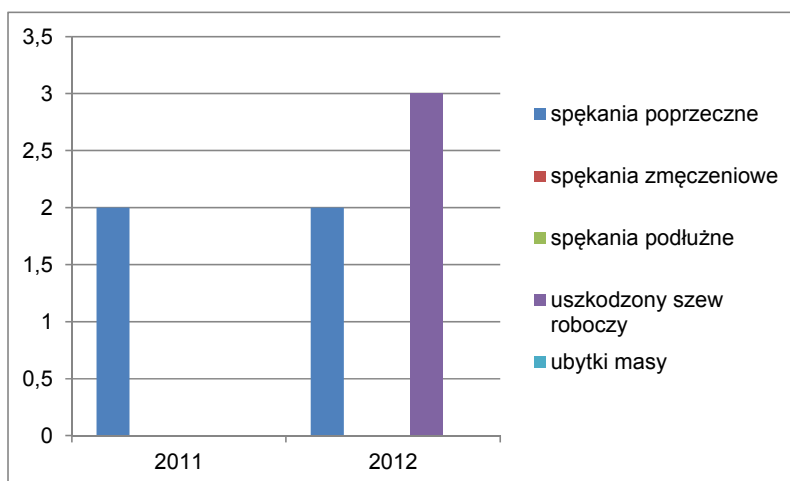


Rysunek 2.10. Zestawienie uszkodzeń nawierzchni, DK7 km 65+500 ÷ 67+500

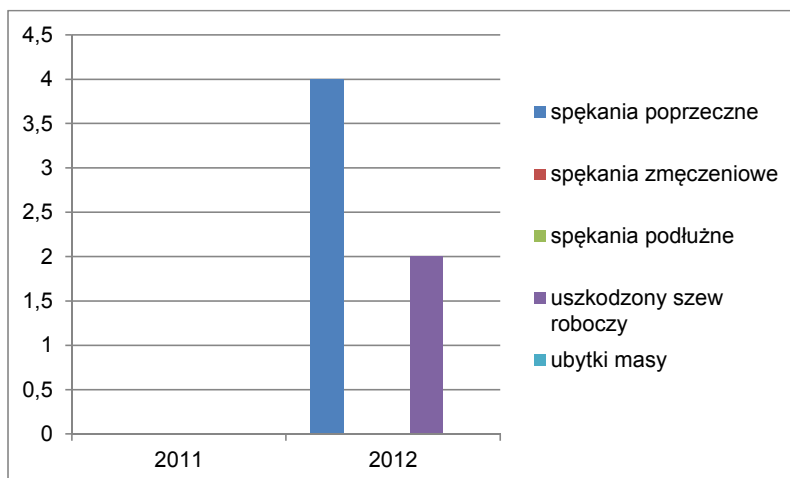
**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**



Rysunek 2.11. Zestawienie uszkodzeń nawierzchni, DK7 km 69+000 ÷ 71+000

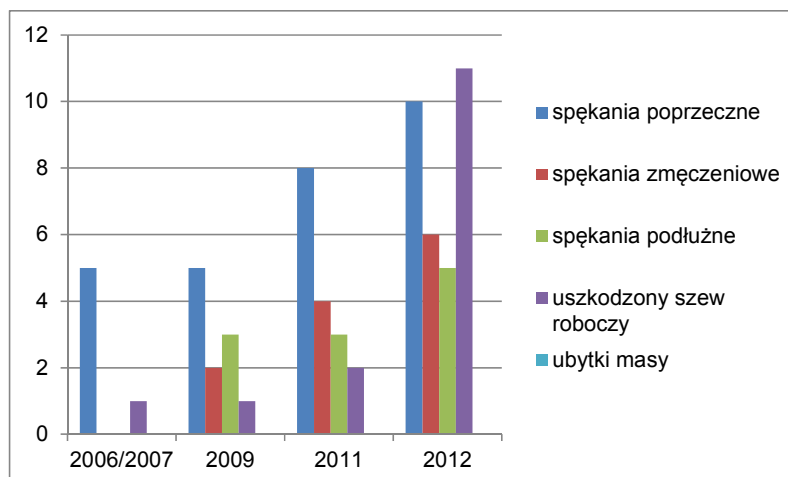


Rysunek 2.12. Zestawienie uszkodzeń nawierzchni, DK7 km 75+000 ÷ 77+000
jezdni prawa

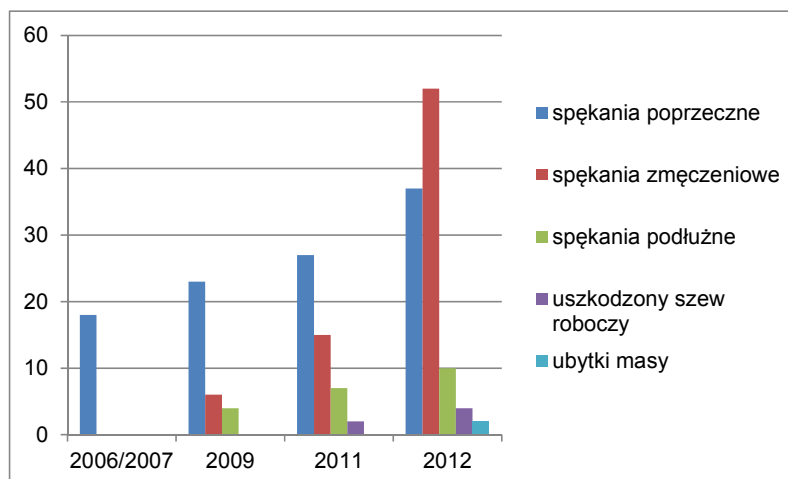


Rysunek 2.13. Zestawienie uszkodzeń nawierzchni, DK7 km 79+300 ÷ 81+300
jezdni prawa

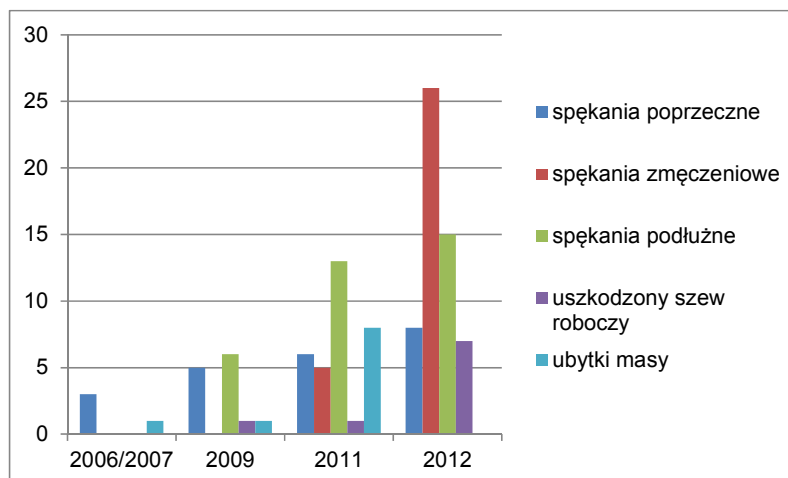
**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**



Rysunek 2.14. Zestawienie uszkodzeń nawierzchni, DK15 km 306+000 ÷ 308+000

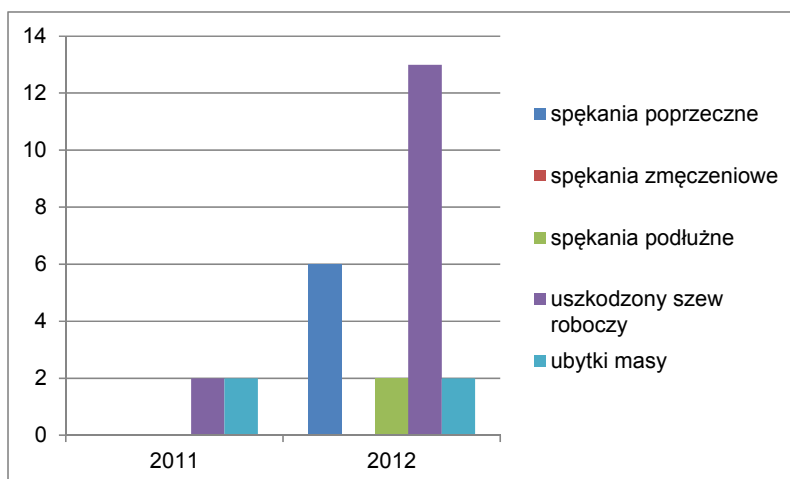


Rysunek 2.15. Zestawienie uszkodzeń nawierzchni, DK15 km 328+500 ÷ 330+500

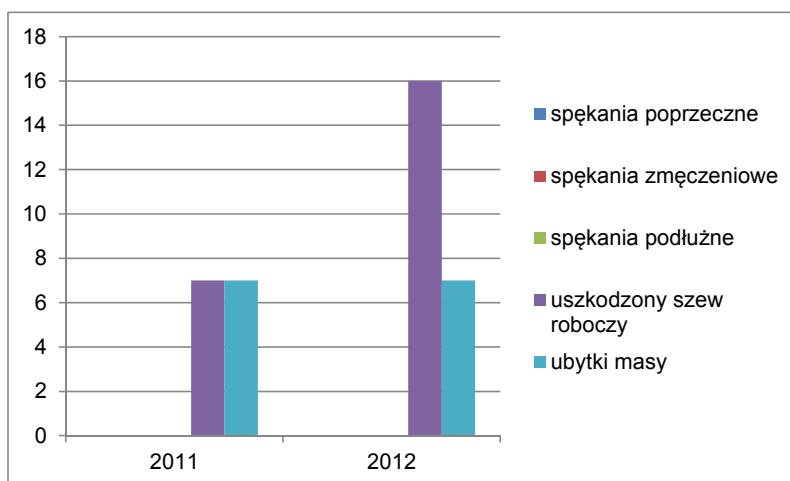


Rysunek 2.16. Zestawienie uszkodzeń nawierzchni, DK15 km 336+000 ÷ 338+000

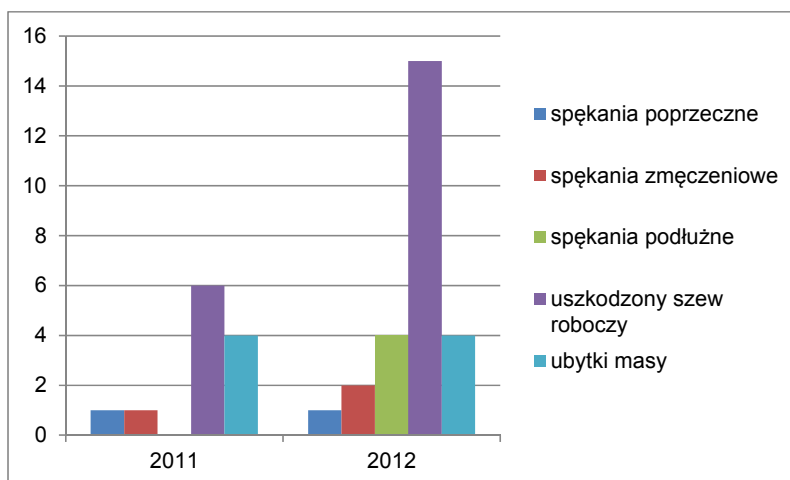
**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**



Rysunek 2.17. Zestawienie uszkodzeń nawierzchni, DK58 km 10+000 ÷ 12+000

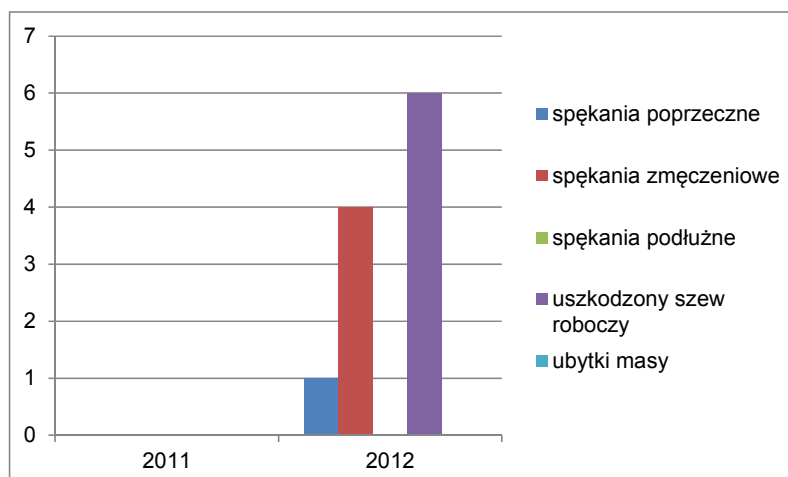


Rysunek 2.18. Zestawienie uszkodzeń nawierzchni, DK58 km 19+000 ÷ 21+000



Rysunek 2.19. Zestawienie uszkodzeń nawierzchni, DK58 km 106+000 ÷ 108+000

Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac



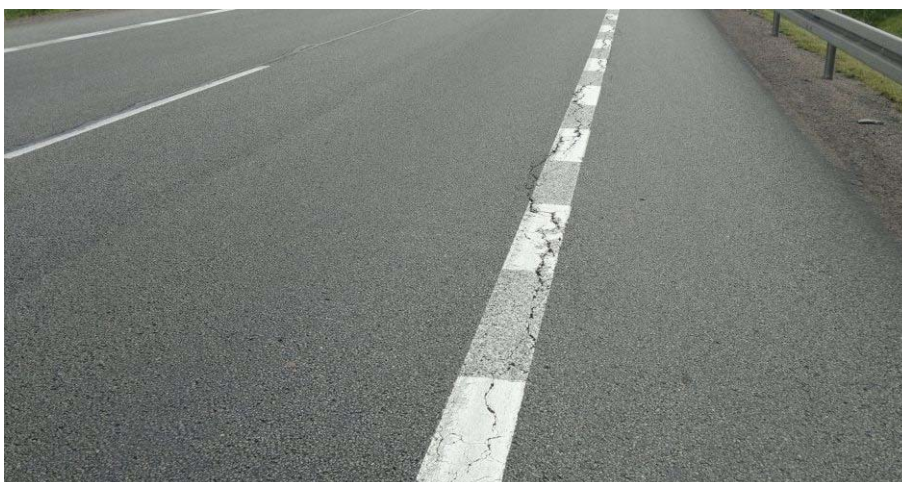
Rysunek 2.20. Zestawienie uszkodzeń nawierzchni, DK58 km 114+000 ÷ 116+000



Rysunek 2.21. Typowe spękanie poprzeczne, niezabezpieczone masą zalewową



Rysunek 2.22. Spękanie poprzeczne zabezpieczone masą zalewową



Rysunek 2.23. Spękanie podłużne



Rysunek 2.24. Spękania zmęczeniowe



Rysunek 2.25. Otwarty szew roboczy



Rysunek 2.26. Obłamanie krawędzi



Rysunek 2.27. Ubytek w warstwach bitumicznych

Podczas inwentaryzacji uszkodzeń stwierdzono, że:

1. Nawierzchnie z podbudową z mieszanki MCE są równe, poza pojedynczymi przypadkami nie wykazują zapadnięć ani kolein.
2. Nawierzchnie z podbudową z mieszanki MCE wykazują spękania poprzeczne i podłużne. Liczba spękań jest zróżnicowana i trudno znaleźć związek z analizowanymi cechami nawierzchni.
3. Liczba spękań rośnie wraz z wiekiem nawierzchni, im starsza nawierzchnia tym więcej spękań.
4. Spękania poprzeczne na części odcinków nie były uszczelniane, co wskazuje na brak należytego bieżącego utrzymania nawierzchni.

2.2.2. Badania ugięciemierzem FWD odcinków z mieszanek MCE

Badania ugięć nawierzchni przeprowadzono z wykorzystaniem aparatu FWD Dynatest 8002. Podczas badania indukowano obciążenie 50 kN, które symuluje oddziaływanie osi 100 kN. Pomiarów dokonywano co 50 m na każdym pasie ruchu, z przesunięciem wynoszącym 25 m. Zestawienie parametrów aparatury pomiarowej podczas badania przedstawiono w tabelicy 2.7. Widok urządzenia podczas badania przedstawiono na rysunku 2.28. Ocenę stanu dróg wykonano według zaleceń Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad (SOSN) [35].

Tabela 2.7. Parametry urządzenia FWD

Lp.	Parametr	Wartość								
1	Siła przekazywana na płytę, [kN]	50								
2	Średnica płyty, [mm]	300								
3	Naprężenie pod płytą, [kPa]	700								
4	Odległość geofonu od płyty obciążającej, [mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800



Rysunek 2.8. Aparat FWD podczas pomiaru ugięć nawierzchni

Na podstawie pomierzonych ugięć pod płytą obciążającą wyznaczono ugięcia standaryzowane, według wzoru [36]:

$$u_s = u \times [1 + 0,02 \times (20 - T)]$$

gdzie:

- u_s - ugięcie standaryzowane,
- u - ugięcie pod płytą obciążającą,
- T - temperatura warstw bitumicznych podczas badania.

Następnie na podstawie ugięć standaryzowanych wyznaczono średnie ugięcie standaryzowane, czyli wskaźnik nośności, dla każdego z odcinków. Średnie ugięcie standaryzowane pozwoliło zaklasyfikować każdy z odcinków dróg na podstawie pozostałej nośności nawierzchni. Progi klas nośności nawierzchni półsztywnych przy

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

rozdzieleniu dróg o różnym obciążeniu ruchem przedstawiono w tabeli 2.8. Analizę nośności badanych odcinków dróg przedstawiono w tabeli 2.9. Szczegółowe wyniki pomiarów przedstawiono w załączniku 1.

Tablica 2.8. Progi klas nośności nawierzchni półsztywnych przy rozdzieleniu dróg o różnym obciążeniu ruchem.

Kategoria ruchu	Progi klas, wskaźnik nośności [μm]		
	A/B	B/C	C/D
KR1-2	190	240	370
KR3	115	150	230
KR4	80	105	160
KR5	65	85	130
KR6	60	75	115

Tablica 2.9. Zestawienie wyników ugięć nawierzchni

Lp.	Numer drogi	Lokalizacja odcinka wybranego do badań		Ruch KR	Temperatura nawierzchni [$^{\circ}\text{C}$]	Średnie ugięcie na odcinku [μm]	Wskaźnik nośności [μm]	Klasa nośności wg SOSN
		od	do					
1.	DK6	261+300	263+000	5	4	173	229	D
2.	DK55	84+000	86+000	4	2	185	252	D
3.	DK22	338+250	339+760	4	3	117	157	C
4.	DK7	47+500	49+500	5	5	149	194	D
5.	DK7	65+500	67+500	6	5	130	169	D
6.	DK7	69+000	71+000	6	4	125	164	D
7.	DK7	75+000	77+000	6	4	116	153	D

Z przeprowadzonych badań ugięć nawierzchni wynika, że odcinki dróg będące przedmiotem pomiarów w 6 na 7 przypadków charakteryzują się klasą nośności D. Tylko jeden odcinek posiada klasę nośności C. Zgodnie z kryteriami SOSN [35] nawierzchnie w klasie D prawdopodobnie wymagają interwencji w ciągu 2 lat. Nawierzchnia odcinka w klasie C prawdopodobnie wymaga remontu w ciągu 8 lat.

3. Procedury projektowania mieszanek MCE na świetle

3.1. Polska

Mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjne w Polsce projektuje się według „Warunków technicznych wykonania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej” autorstwa Janusza Zawadzkiego, Joanny Matras, Tomasza Mechowskiego oraz Dariusza Sybilskiego wydanych w 1999 roku przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów (zeszyt 61/1999) [2]. Mieszanka MCE może stanowić podbudowę dla dróg o kategorii ruchu od KR1 do KR6. Jest ona wykonywana w wytwórni stacjonarnej lub na miejscu, metodą na zimno z destruktu otrzymanego ze starej nawierzchni, bądź z destruktu doziarnionego nowym kruszywem.

3.1.1 Materiały

Do wykonania mieszanki MCE stosuje się następujące materiały:

- destruk, t
- materiał doziarniający (kruszywo kamienne łamane z surowca skalnego, kruszywo naturalne lub kruszywo łamane z żużli hutniczych),
- cement portlandzki,
- emulsję asfaltową,
- wodę.

Destrukt

Destrukt jest to materiał mineralno-bitumiczny (również smołowy), lub mineralno-cementowy. Powstaje on w wyniku frezowania warstwy lub warstw nawierzchni drogi w temperaturze otoczenia, bądź też w wyniku kruszenia w kruszarce brył pochodzących z rozbiórki starej nawierzchni. Materiał powinien być rozdrobniony do postaci okruchów związanych lepiszczem bitumicznym lub spoiwem cementowym o wymiarach 0/31,5 mm lub 0/63 mm. Zawartość nadziarna nie powinna przekraczać 10% (m/m), a maksymalny wymiar powinien wynosić 63 mm dla destruktu o uziarnieniu 0/31,5 mm oraz 80 mm dla destruktu o uziarnieniu 0/63 mm [2].

Materiały mineralne

Do produkcji mieszanki MCE można stosować następujące materiały doziarniające:

- Kruszywo kamienne łamane z surowca skalnego zgodne z normą PN-B/11112:1996 „Kruszywa łamane do nawierzchni drogowych”, z wyłączeniem tłuczni 31,5/63 mm i niesortu 0/63 mm.
- Kruszywo naturalne zgodne z normą PN-B/11111:1996 „Kruszywa naturalne do nawierzchni drogowych, żwir i mieszanka”, z wyłączeniem żwiru 31,5/63 mm i mieszanki 0/63 mm.
- Kruszywo łamane z żużli hutniczych – kruszywa łamane powstałe z żużli stalowniczych i pomiedziowych, których uziarnienie mieści się w przedziale 0/31,5 mm. Warunkiem stosowania jest dopuszczenie do obrotu na podstawie aprobaty technicznej wydanej przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Do kruszywa łamanego z żużli hutniczych zalicza się także kruszywo z żużla wielkopiecowego, kawałkowego spełniającego wymagania normy PN-B/23004.

Cement portlandzki

Według warunków technicznych [2] do wykonania mieszanki MCE powinno stosować się cement portlandzki CEM I klasy 32,5, zgodny z normą PN-B 19701: 1997 „Cement. Cement powszechnego użytku”. Głównym jego składnikiem jest klinkier cementowy, stanowiący co najmniej 95% jego masy. Wytrzymałość normowa cementu portlandzkiego CEM I klasy 32,5 po 28 dniach powinna mieścić się w przedziale od 32,5 do 52,5 MPa.

Emulsja asfaltowa

Do wykonania mieszanek MCE zgodnie z warunkami technicznymi [2] powinno stosować się jeden z dwóch rodzajów emulsji:

- emulsje asfaltowe, kationowe, wolnorozpadowe o parametrach podanych w tabelicy 3.1,
- emulsje asfaltowe, kationowe, nadstabilne K4 według Warunków Technicznych „Drogowe kationowe emulsje asfaltowe EmA-99” [4].

Tabela 3.1. Właściwości emulsji asfaltowej stosowanej do mieszanek MCE według [2]

Cecha	Wymagania
Zawartość asfaltu	60±2%
Lepkość	5±1°E wg Englera
Czas rozpadu na piasku kwarcowym Sikaisol	> 170g/100g emulsji
Pozostałość na sicie o oczkach 0,63 mm	<0,1%
Przyczepność do bazaltu	>85%
Trwałość, określona pozostałością na sicie 0,63mm po 4 tygodniach magazynowania	<0,5%
Temperatura mięknięcia wytrąconego asfaltu	33-55°C
Wygląd	Jednorodny
Barwa	Ciemnobrązowa
Kontakt emulsji z cementem	Bez reakcji

Woda

Woda stosowana do wyrobu mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych powinna spełniać wymagania normy PN-B 32250: 1988 „Materiały budowlane. Woda do betonów i zapraw”.

3.1.2 Materiały zgodne z normami europejskimi

Od momentu podpisania przez Polskę układu akcesyjnego z Unią Europejską, głównym zadaniem Polskiego Komitetu Normalizacyjnego jest wprowadzanie Norm Europejskich do polskiego systemu norm technicznych. Wdrożenie jednolitych norm ma stworzyć warunki do swobodnego przepływu towarów, usług oraz myśli naukowo - technicznych. Od momentu wydania „Warunków technicznych wykonania warstw podbudowy z mieszanki mineralno – cementowo – emulsyjnej” wprowadzono normy europejskie (PN-EN) dotyczące materiałów składowych mieszanek MCE.

Destrukt

W warunkach technicznych [2] nie określono normy, według której należy oceniać przydatność destruktu. Zalecono jedynie zakres jego uziarnienia.

Obecnie nie ma również normy europejskiej, która klasyfikowałaby destrukt używany jako składnik mieszanek MCE. W 2008 roku powstała norma PN-EN 13108-8: 2008 „Mieszanki mineralno-asfaltowe – Wymagania – Część 8: Destrukt asfaltowy”, która zawiera wymagania wobec destruktu (dotyczące lepiszcza, kruszywa i materiałów obcych), który może być zastosowany jako składnik MMA wytwarzanych w technologii na gorąco. Norma ta dopuszcza stosowanie jedynie destruktu asfaltowego jako składnika mieszanek wytwarzanych na gorąco, natomiast w technologii na zimno można również wykorzystywać destrukt smołowy i cementowy, które nie wchodzą w zakres tej normy.

Kruszywa

Normy PN-B-11111:1996, PN-B-11112:1996 oraz PN-B-23004:1988, według których oceniano się przydatność kruszyw używanych do mieszanek MCE zostały zastąpione przez następujące normy europejskie:

- PN-EN 13242:2004 „Kruszywa do niezwiązanych i hydraulicznie związanych materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym”,
- PN-EN 13043:2004 „Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu”.

Cement

Normą, według której określa się wymagania dla cementu użytego jako składnika mieszanki MCE jest PN-EN 197-1: 2012 „Cement - Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku”. Podano w niej wymagania mechaniczne, fizyczne i chemiczne, które musi spełnić cement, oraz proporcje poszczególnych jego składników. Głównym składnikiem cementu CEM I klasy 32,5 jest klinkier cementowy, stanowiący co najmniej 95% jego masy. Jego wytrzymałość normowa po 28 dniach powinna mieścić się w przedziale od 32,5 do 52,5 MPa.

Emulsja

Obecnie emulsje asfaltowe klasyfikowane są według normy PN-EN 13808: 2010. Do recyklingu nawierzchni z wykorzystaniem mieszanki MCE zaleca się zastosowanie emulsji asfaltowej C60B5R o parametrach przedstawionych w tabelicy 3.2.

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Tablica 3.2. Parametry emulsji asfaltowej C60B5R

Właściwość	Metoda badania	Jednostka	Wymaganie (klasa)
Polarność	PN-EN 1430	-	dodatnia
Czas mieszania	PN-EN 13075-2	s	NPD(0)
Indeks rozpadu ¹	PN-EN 13075-1	g/100g	120 do 180 (5)
Zdolność do penetracji	PN-EN 12849	min	NPD(0)
Stabilność podczas mieszania z cementem	PN-EN 12848	g	<2 (2)
Zawartość lepiszcza (poprzez oznaczenie zawartości wody)	PN-EN 1428	% m/m	58 do 62 (5)
Zawartość lepiszcza pozostałego po destylacji	PN-EN 1431	% m/m	NPD(0)
Czas wypływu ϕ 2 mm przy 40°C	PN-EN 12846	s	15-45 (3)
Czas wypływu ϕ 4 mm przy 40°C	PN-EN 12846	s	NPD(0)
Lepkość dynamiczna w 40°C	PN-EN 14896	m Pas	NPD(0)
Pozostałość na sicie, sito 0,5mm	PN-EN 1429	% m/m	<0,2 (3)
Pozostałość na sicie, sito 0,16mm	PN-EN 1429	% m/m	NPD(0)
Pozostałość na sicie po 7 dniach magazynowania, sito 0,5mm	PN-EN 1429	% m/m	TBR (1)
Sedymentacja po 7 dniach magazynowania	PN-EN 12487	% m/m	TBR (1)
Adhezja ²	PN-EN 13614	% m/m	TBR (1)
	Załącznik NA.2.2	% pokrycia powierzchni	≥75
pH emulsji	PN-EN 12850	% pokrycia powierzchni	≥3,5
Asfalt odzyskany przez odparowanie	PN-EN 13074	-	
Penetracja w 25°C asfaltu odzyskanego	PN-EN 1426	0,1 mm	<150 (4)
Temperatura mięknięcia asfaltu odzyskanego	PN-EN 1427	°C	> 39 (5)
Nawrót sprężysty w 25°C asfaltu odzyskanego dla asfaltów modyfikowanych	PN-EN 13998	%	NPD(0)

1- Badania na wypełniaczu Sikaisol.

2- Badanie na kruszywie bazaltowym.

Właściwości nie wymienione w załączniku określone są jako NPD(0). Klasa NPD („Właściwość użytkowa nie określona”) została wprowadzona w celu zastosowania w tych krajach, w których dana właściwość nie jest objęta wymaganiami prawnymi.

TBR- „do zadeklarowania” jest to klasa oznaczająca, że producent może w trybie dowolnym dostarczyć informację o tej właściwości wraz z wyrobem.

Woda

Obecnie obowiązującą normą, według której określa się przydatność wody używanej do wykonania mieszanki MCE jest norma PN-EN 1008: 2004 „Woda zarobowa do betonu. Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu”. W normie podano wymagania dotyczące wody dopuszczonej do stosowania oraz opisano metody badania jej przydatności. Zastosowanie nieprzydatnej wody może

skutkować wydłużeniem czasu wiązania i zmniejszeniem wytrzymałości mieszanki MCE.

3.1.3 Projektowanie składu mieszanki MCE

Projektowanie składu mieszanki MCE polega na takim doborze poszczególnych składników, aby spełnione były wszystkie wymagania zawarte w wytycznych [2]. Proces ten składa się z czterech głównych etapów. Są to:

- ustalenie uziarnienia oraz dobór zawartości cementu,
- wyznaczenie wilgotności optymalnej,
- dobór rodzaju i ilości emulsji asfaltowej,
- badania cech mieszanki MCE.

W pierwszym etapie dobiera się odpowiednie uziarnienie mieszanki. Mieszanina destruktu, cementu oraz kruszywa doziarniającego powinna mieścić się w krzywych granicznych uziarnienia, odpowiednich dla dróg o kategorii ruchu, na której będzie wbudowywana. Krzywe graniczne pokazano na rysunkach 3.1 oraz 3.2. Obszar opisany na rysunkach jako AB jest obszarem uziarnienia standardowego, natomiast obszar AC jest obszarem uziarnienia dopuszczonym w przypadku recyklingu nawierzchni z warstwą tłuczniową.

Minimalna zawartość cementu w mieszance powinna wynosić 1,5% (m/m), natomiast maksymalna 4% (m/m) dla destruktu asfaltowego lub 7% (m/m) dla destruktu z lepiszczem smołowym (smołowego lub smołowo-asfaltowego). W przypadku projektowania mieszanki MCE z nowego kruszywa bądź z nowego kruszywa i destruktu mineralno-cementowego (bez destruktu bitumicznego) ilość cementu (oraz emulsji asfaltowej) może być inna niż zalecana, pod warunkiem, że spełnione zostaną wymagane parametry. Zbyt mała ilość cementu może skutkować znaczną podatnością mieszanki, natomiast zbyt duża nadmiernym usztywnieniem, co w konsekwencji może prowadzić do występowania spękań odbitych. Rolą cementu jest nie tylko zapewnienie odpowiedniej sztywności, ale także zwiększenie ilości drobnych frakcji (których często brakuje w recyklowanym materiale) oraz przyspieszenie rozpadu emulsji [2].

Doziarnienie destruktu może wynikać z 2 względów:

- konstrukcyjnego,
- technologicznego.

Względy konstrukcyjne wynikają z konieczności pogrubienia konstrukcji w celu zwiększenia nośności nawierzchni. Względy technologiczne wynikają najczęściej z:

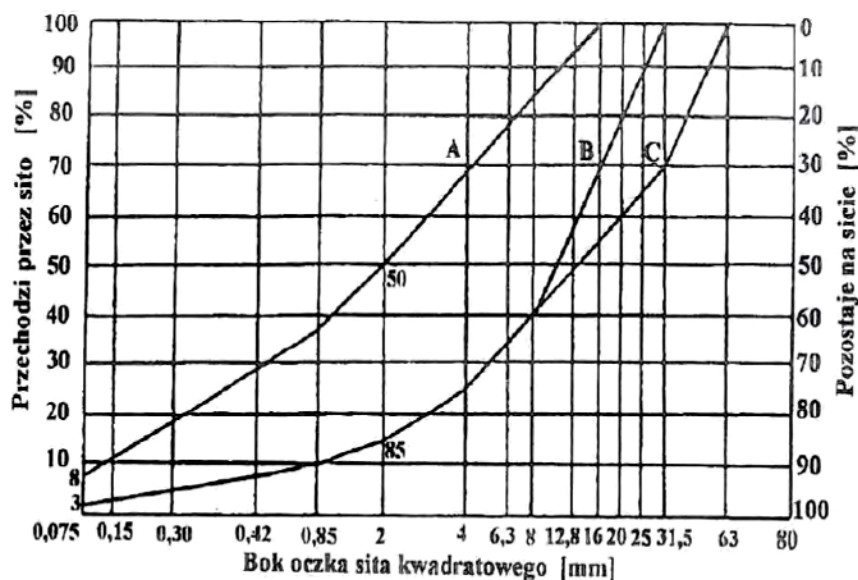
- uziarnienia nie mieszczącego się w krzywych granicznych,
- nadmiernej ilości starego lepiszcza – uniemożliwiającej dodanie odpowiedniej ilości emulsji.

Na drogach o kategorii ruchu od KR3 do KR6, materiałem, którego używa się do doziarniania destruktu jest kruszywo łamane klasy I lub II (granulowane i zwykłe) bądź żwir kruszony klasy I lub II [2].

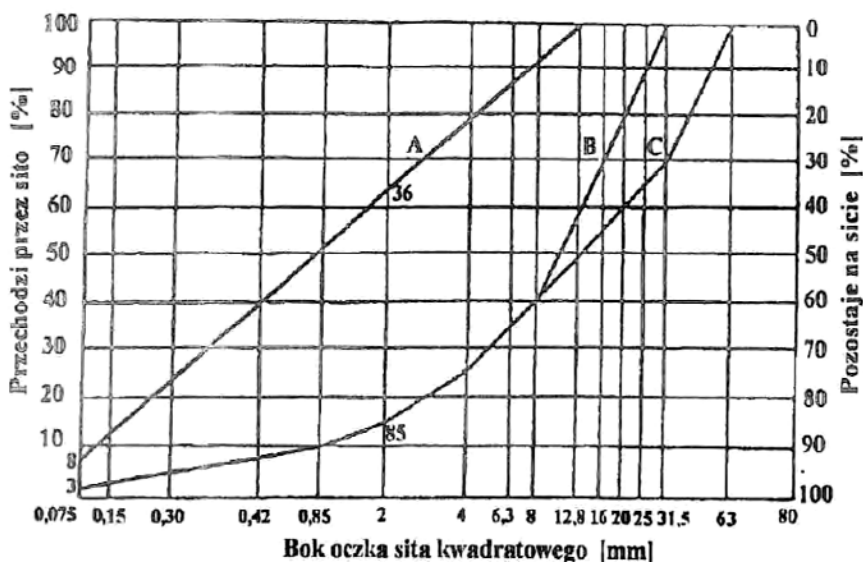
**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Na drogach o kategorii ruchu do KR1 do KR2, materiałem, którego używa się do doziarniania destruktu jest również kruszywo naturalne klasy I lub II, kruszywo łamane klasy III (granulowane i zwykłe) i żwir kruszony klasy III [2].

Kruszywa łamane mogą zostać wyprodukowane ze skał litych, surowca rozdrobnionego naturalnie oraz surowca sztucznego [2].



Rysunek 3.1. Graniczne uziarnienie mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej do podbudowy dróg o kategorii ruchu od KR3 do KR6



Rysunek 3.2. Graniczne uziarnienie mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej do podbudowy dróg o kategorii ruchu od KR1 do KR2

Kolejnym etapem projektowania jest wyznaczenie wilgotności optymalnej mieszanki z cementem według normalnej lub zmodyfikowanej metody Proctora. Metoda normalna

daje wyniki wilgotności optymalnej o około 2% większe od metody zmodyfikowanej. W końcowej receptce uwzględnia się zawartość wody w emulsji asfaltowej [2].

Trzecim etapem projektowania składu mieszanki MCE jest dobór rodzaju i ilości emulsji asfaltowej. Jej zawartość powinna wynosić od 3,0% do 5,5% (m/m). Powinny być także zachowane warunki na maksymalną sumaryczną ilość lepiszcza bitumicznego (łącznie z asfaltem wytrąconym z emulsji), która zależy od maksymalnego uziarnienia mieszanki i wynosi:

- maksymalnie 6% (m/m) dla mieszanek o uziarnieniu od 0/12 do 0/31,5 mm,
- maksymalnie 5,5% (m/m) dla mieszanek o uziarnieniu 0/63 mm [2].

Zawartość lepiszcza bitumicznego (starego) we wbudowywanej mieszance MCE nie powinna przekraczać 4% (m/m), niezależnie od kategorii ruchu drogi.

Czwartym, a zarazem ostatnim etapem projektowania mieszanki MCE jest określenie cech na próbkach laboratoryjnych, a następnie na ich podstawie wytypowanie mieszanki o składzie optymalnym.

3.1.4 Metody badań oraz wymagania dla mieszanek MCE

Podstawowe badania mieszanek MCE, wymagane przez polskie wytyczne [2] przeprowadza się na próbkach zagęszczonych laboratoryjnie, według jednej z dwóch metod:

- I metoda zagęszczania próbek
Do zagęszczania próbek używa się form oraz ubijaka Marshalla. Stosuje się 75 uderzeń ubijaka na każdą ze stron próbki (z częstotliwością 60 uderzeń na minutę), która po zagęszczeniu powinna mieć wysokość $63,5 \pm 3,0$ mm. Formy powinny być perforowane – posiadać odpowiednio rozmieszczone otwory (24 na ściance formy oraz po 16 w podstawie i tłoku, o średnicy 2 mm).
Próbki należy pielęgnować przez 28 dni w temperaturze $+20 \pm 5^\circ\text{C}$, w miejscu nienarażonym na bezpośrednie promieniowanie słoneczne.
- II metoda zagęszczania próbek
Do zagęszczania próbek używa się prasy hydraulicznej. Na próbki umieszczone w perforowanych formach (takich jak w I metodzie) wywiera się stały nacisk o wartości 100 kN przez 5 minut.
Pielęgnacja polega na przechowywaniu próbek w temperaturze $+20 \pm 5^\circ\text{C}$ w miejscu nienarażonym na bezpośrednie promieniowanie słoneczne przez 7 dni.

Niezależnie od metody podczas zagęszczania stosuje się wilgotność mieszanki równą:

- wilgotności optymalnej wyznaczonej według zmodyfikowanej metody Proctora $\pm 0,5\%$, pomniejszoną o wodę, która wytrąci się podczas rozpadu emulsji,
- wilgotności optymalnej wyznaczonej według normalnej metody Proctora pomniejszonej o 2% $\pm 0,5\%$ oraz o wodę, która wytrąci się podczas rozpadu emulsji [2].

Próbki zagęszczone według jednej z powyższych metod poddaje się następującym badaniom:

1. Stabilność oznaczona metodą Marshalla

Badanie wykonuje się w temperaturze +60°C. Polega ono na ściśnięciu próbek w szczękach z jednoczesnym rejestrowaniem siły i przemieszczenia. Dla próbek o wysokości $h=63,5\text{mm}$, osiągnięte maksymalne obciążenie przedstawia stabilność mieszanki. Jeżeli wysokość próbki jest inna, to należy uwzględnić współczynnik korygujący. Wymagane wartości stabilności dla mieszanek MCE zależą od kategorii ruchu drogi, na której dana mieszanka ma być wbudowana i wynoszą:

- $4,0 \div 20,0$ kN dla dróg o kategorii ruchu od KR1 do KR2,
- $8,0 \div 20,0$ kN dla dróg o kategorii ruchu od KR3 do KR6.

Metoda zagęszczania i pielęgnacji próbek nie ma wpływu na wymagane wartości stabilności [2].

2. Odkształcenie oznaczone metodą Marshalla

Badanie odkształcenia dokonywane jest jednocześnie z badaniem stabilności. Wykonuje się je według normy BN-70/8931-09. Wymagany zakres odkształcenia wynosi od 1,0 do 3,5 mm i nie zależy od kategorii ruchu drogi, na której dana mieszanka ma być wbudowana [2].

3. Wolna przestrzeń

Zawartość wolnej przestrzeni w mieszance MCE zagęszczonej w laboratorium wyznacza się według wzoru:

$$P = \frac{\rho_o - \rho_s}{\rho_o} \cdot 100 [\%]$$

gdzie:

ρ_o - gęstość objętościowa mieszanki MCE (nazewnictwo wg zeszytu 61 IBDiM),

ρ_s - gęstość strukturalna zagęszczonej mieszanki MCE, oznaczona metodą hydrostatyczną (nazewnictwo wg zeszytu 61 IBDiM).

Wymagane wartości wolnej przestrzeni zależą od metody zagęszczania. Wynoszą one dla próbek zagęszczonych:

- metodą I: $9,0-16,0\%$ (V/V),
- metodą II: $5,0-12,0\%$ (V/V).

Wymagany zakres wolnych przestrzeni nie zależy od kategorii ruchu drogi, na której dana mieszanka ma być wbudowana [2].

Wymagania wytrzymałościowe zawarte w polskich wytycznych są stosunkowo wysokie. Aby je spełnić konieczne jest doziarnianie destruktu kruszywem łamanym o wysokich parametrach oraz dodatek znacznej ilości cementu. W konsekwencji wykonanie podbudowy z mieszanki MCE może stać się nieopłacalne ekonomicznie.

3.2 Niemcy

Recykling nawierzchni metodą na zimno projektowany jest w Niemczech na podstawie wytycznych zawartych w instrukcji wydanej w 2005 roku przez Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau) o nazwie Merkblatt für Kaltrecycling in situ im Straßenoberbau [14].

Zawarte są w niej zalecenia dotyczące mieszanek MCE oraz asfaltu spienionego. W dalszej części opracowania skupiono się jedynie na mieszankach MCE.

Drogi w Niemczech można podzielić ze względu na ilość przenoszonych obciążeń na 7 klas. Są to klasy: SV, I, II, III, IV, V oraz VI, przy czym klasa SV jest najbardziej, a VI najmniej obciążana ruchem. Podbudowy z mieszanek MCE stosuje się dla dróg o klasach III-VI. Są to drogi, których trwałość zmęczeniowa wynosi do 3 milionów osi obliczeniowych 100kN. Gdyby zastosować podobne ograniczenia w Polsce, to wykonywanie podbudowy z MCE ograniczono by do dróg o obciążeniu ruchem od KR1 do KR3, oraz niewielkiej części dróg o obciążeniu ruchem KR4 [14].

Grubości warstw z mieszanki MCE nie powinna przekraczać 20 cm, w wyjątkowych przypadkach 22 cm. Wytwarzanie i wbudowywanie mieszanki powinno następować w temperaturze nie mniejszej niż 5°C. Do zagęszczania powinno się stosować walce gładkie, wibracyjne o ciężarze roboczym minimum 16 ton [14].

Mieszanki używane przy recyklingu na zimno można podzielić, ze względu na występujący typ wiązań, na jedną z 4 grup:

- A – mieszanki o wiązaniach wyłącznie bitumicznych,
- B1 – mieszanki o dominujących wiązaniach bitumicznych,
- B2 – mieszanki o dominujących wiązaniach hydraulicznych,
- C – mieszanki o wiązaniach wyłącznie hydraulicznych.

Typ wiązań zależy od przyjętej kombinacji spoiwa. Mieszanki zawierające środki wiążące w postaci emulsji asfaltowej oraz cementu (mieszanki MCE) posiadają jednocześnie wiązania bitumiczne oraz hydrauliczne (B1 lub B2). Wiązania dominujące określa się na podstawie wartości modułu sztywności uzyskanego w badaniu pośredniego rozciągania w temperaturze 5°C, po 28 dniach od wytworzenia próbki. Mieszanki o typie wiązania B1 charakteryzują się modułem w granicach 3000-7000 MPa, natomiast mieszanki o typie wiązania B2 7000-12500 MPa [14].

Wybór kombinacji spoiwa zależy od składu mieszanki mineralnej oraz nośności podłoża. Przy wysokiej zawartości asfaltu w destrukcie możliwe jest, że pomimo znacznego dodatku spoiwa hydraulicznego powstanie mieszanina o wiązaniach dominujących bitumicznie (B1).

3.2.1 Materiały

Zgodnie z wytycznymi niemieckimi do wykonania mieszanki MCE można zastosować następujące materiały:

- mieszankę mineralną (destrukc asfaltowy, destrukc smołowy, kruszywo doziarniające),
- środki wiążące (cement, emulsja asfaltowa)
- oraz wodę.

Mieszanka mineralna

Materiałami tworzącymi mieszankę mineralną mogą być:

- destrukc asfaltowy,

- destruktu smołowy,
- kruszywo doziarniające.

Zakłada się, że materiały te charakteryzują się parametrami umożliwiającymi wykonanie mieszanki MCE. W przypadkach wątpliwych zaleca się poddanie ich badaniom mrozoodporności i odporności na rozdrabnianie. Mieszanka mineralna powinna mieć ciągłe uziarnienie. W wytycznych niemieckich nie określono granicznych krzywych uziarnienia mieszanki. Wymagane jest jedynie spełnienie wymagań, zawartych w tabelicy 3.3.

Tabela 3.3. Wymagane wartości przesiewu dla mieszanek mineralnych według wytycznych niemieckich

Sito	Przesiew	
	Min % [m/m]	Max % [m/m]
45,0 mm	90	100
2,0 mm	20	100
0,09 mm*	2	10

*warunek zalecany jedynie przy mieszankach o dominujących wiązaniach bitumicznych

Jeżeli uziarnienie destruktu nie odpowiada wymaganiom zawartym w tabelicy 3.3 lub charakteryzuje się silną nieciągłością, to należy go doziarnić kruszywem lub odpowiednio pokruszyć [14].

Środki wiążące

Według niemieckich wytycznych [14], środkami wiążącym stosowanymi do recyklingu nawierzchni mogą być:

- lepiszcza bitumiczne (emulsja asfaltowa, asfalt spieniony),
- spoiwa hydrauliczne (cement, popioły lotne),
- kombinacja obu rodzajów środków wiążących.

Emulsja asfaltowa

Emulsje asfaltowe stosowane do produkcji mieszanek MCE powinny być zgodne z DIN 1995-3. Asfalt znajdujący się w emulsji musi spełniać wymagania DIN EN 12591. Emulsje asfaltowe nie mogą zawierać żadnych rozpuszczalników oraz środków rozpuszczających. Muszą posiadać odpowiednią trwałość, czyli być „tolerancyjne” w stosunku do części mineralnych oraz cementu. Zalecane właściwości emulsji asfaltowych podano w tabelicy 3.4.

Tabela 3.4. Zalecane właściwości emulsji asfaltowych według wytycznych niemieckich

Parametr	Właściwość
Cechy zewnętrzne	jednorodna, płynna, kolor brunatny
Rodzaj asfaltu	50/70 lub 70/100, zgodny z DIN EN 12591
Zawartość asfaltu	60-65% [m/m]
Wartość pH	<3 – emulsja kationowa >9 – emulsja anionowa
Czas wypływu	≤12s przy 20°C, zgodnie z DIN 52023

Przy wiązaniu typu B1 zaleca się stosowanie głównie kationowej emulsji asfaltowej, natomiast przy wiązaniu typu B2 nie wprowadza się zaleceń dotyczących ładunku emulsji.

Zastosowana emulsja powinna mieć takie parametry, aby jej proces rozpadu został zakończony najwcześniej po 1 godzinie od wymieszania, po trwałym otoczeniu ziaren. Czas rozpadu emulsji można poznać po procesie ujednoczenia mieszanki. Następuje także zmiana jej barwy z brązowej w czarną. Czas rozpadu ma istotny wpływ na energię potrzebną do zagęszczenia mieszanki podczas wbudowywania. Im jest on mniejszy, tym potrzebna energia zagęszczania jest większa [14].

Cement

Według niemieckich wytycznych dopuszcza się spoiwa hydrauliczne zgodne z normą DIN 18506 bez specyfikacji rodzaju.

3.2.2 Projektowanie składu mieszanki

Projektowanie składu mieszanki MCE polega na wyborze optymalnej zawartości poszczególnych składników. Orientacyjna ilość środków wiążących wynosi:

- emulsja asfaltowa: od 2 do 6% [m/m],
- cement: od 3 do 6% [m/m].

Wilgotność optymalna mieszanki MCE powinna być ustalona zgodnie z normą DIN EN 13286-2. Wyznacza się ją na podstawie maksymalnej gęstości objętościowej mieszaniny mineralno-cementowej dla różnych zawartości wody (bez dodatku emulsji asfaltowej). Zawartość cementu powinna wynosić 1,5 %. Zagęszczenie należy wykonać metodą statyczną. Przy wyznaczaniu ilości wody dodanej podczas wytwarzania mieszanki MCE należy uwzględnić zawartość emulsji asfaltowej oraz wilgotność destruktu. W tym celu korzysta się ze wzoru:

$$W_{dod} = W_{opt} - W_{des} - W_{em} - 0,5 \cdot B$$

gdzie:

- W_{dod} – ilość wody dodanej do mieszanki [%],
- W_{opt} – wilgotność optymalna [%],
- W_{des} – wilgotność mieszaniny destruktu, kruszywa i cementu [%],
- W_{em} – udział wody pochodzącej z emulsji asfaltowej [%],
- B – zawartość asfaltu z emulsji asfaltowej [%].

Dla zapewnienia odpowiedniej urabialności mieszanki, stosunek masy wody do masy cementu, przy wytwarzaniu zawiesiny wodno-cementowej powinien wynosić około 1,0. Minimalna jego wartość to 0,5 [14].

Należy zbadać mieszanki, z co najmniej trzema różnymi zawartościami jednego ze środków wiążących przy stałej zawartości drugiego ze środków. Ilość pierwszego środka wiążącego powinna różnić się w kolejnych próbkach w granicach od 1 do 2% [m/m]. W razie potrzeby należy zmienić zawartość drugiego środka wiążącego [14].

Dla każdej wybranej kombinacji środków wiążących należy wykonać po cztery próbki, a dla części z nich dwie dodatkowe do oceny spadku wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po przechowywaniu w wodzie.

Przygotowanie próbných mieszanek MCE powinno przebiegać w następującej kolejności:

- wymieszanie składników mieszanki mineralnej (fakultatywnie przy dodatku wody),
- dodanie zawiesiny cementowo-wodnej i dalsze mieszanie,
- dodanie emulsji asfaltowej oraz kontynuowanie procesu mieszania do momentu, aż środki wiążące zostaną równomiernie rozprowadzone. Czas mieszania po dodaniu emulsji asfaltowej nie powinien przekraczać 2 minut [14].

3.2.3 Wykonanie próbek

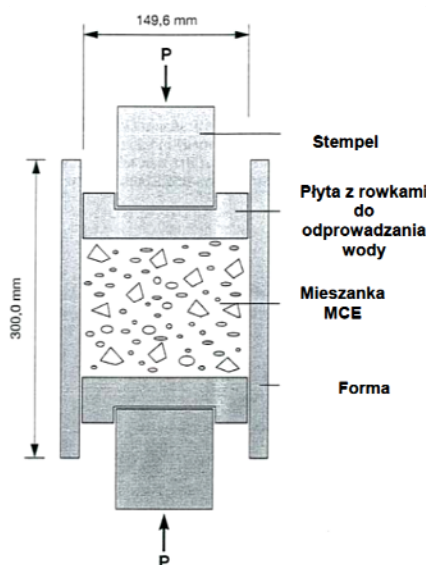
Wymagany sprzęt:

- forma walcowa o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm,
- 2 płyty stemplowe o średnicy $\phi 149,6$ mm i wysokości $h=30$ mm z czterema bocznymi rowkami do odprowadzenia wody,
- 2 stemple o wysokości $h=60$ mm,
- prasa kontrolna o maksymalnej sile nacisku nie mniejszej niż 100 kN,
- waga z dokładnością do 1 g [14].

Materiały pomocnicze:

- bibuła filtracyjna o średnicy $\phi 150$ mm,
- olej do smarowania formy.

Próbki zagęszcza się w prasie statycznej. Schemat zagęszczania próbek pokazano na rysunku 3.3.

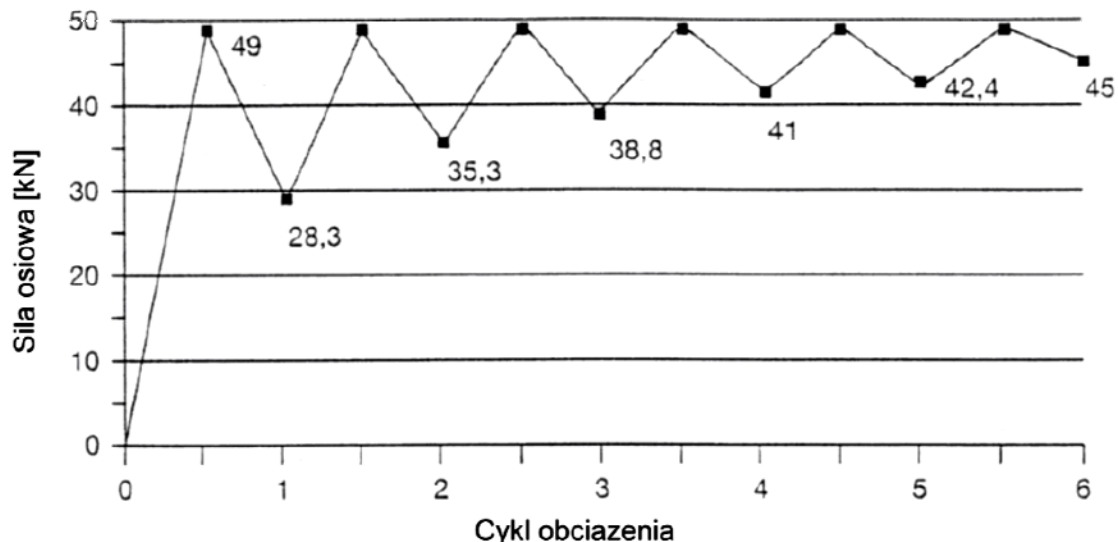


Rysunek 3.3. Schemat aparatury do zagęszczania próbek [8]

Wewnętrzną część formy walcowej smaruje się niewielką ilością oleju. Wkłada się do niej jedną z płyt stemplowych, a następnie bibułę filtracyjną. Kolejnym etapem jest umieszczenie w formie odpowiedniej ilości mieszanki MCE (takiej, aby po zagęszczeniu próbka miała wysokość 125 ± 5 mm). Należy zwrócić uwagę, aby mieszanka nie zawierała ziaren większych od 32 mm oraz aby pozostałe ziarna o znacznych rozmiarach były równomiernie rozłożone. Na luźnej mieszance umieszcza się bibułę filtracyjną oraz kolejną płytę stemplową. Tak przygotowaną formę wraz ze stemplem i płytami stemplowymi umieszcza się w prasie w taki sposób, aby umożliwić przemieszczanie płyt stemplowych podczas zagęszczania (zasada podwójnego tłoka). Następnie wywierany jest nacisk statyczny o wartości 49 kN (2,8 MPa). Płyty stemplowe podczas obciążenia nie powinny ulec skrzywieniu. Po obciążeniu następuje spadek ciśnienia związany z plastycznym zachowaniem mieszanki. W kolejnych krokach należy ponownie zadawać obciążenie 49 kN do momentu, aż końcowa jego wartość będzie stała i wyniesie minimum 45 kN (2,6 MPa) Ponowne przyłożenie obciążenia należy zastosować, gdy spełniony jest co najmniej jeden z poniższych warunków:

- ciśnienie nie zmienia już swojej wartości,
- osiągnięte zostanie dolne, graniczne ciśnienie,
- minęły 2 minut od momentu ostatniego przyłożenia obciążenia.

Najczęściej ciśnienie 2,6 MPa osiągnane jest po 5÷7 cyklach. Przykładowy wykres przedstawiający cykliczne zagęszczanie próbki znajduje się na rysunku 3.4.



Rysunek 3.4. Wykres cyklicznego obciążenie próbki podczas zagęszczania

Wytyczne niemieckie zakładają zagęszczanie próbek w sposób statyczny. Związane jest to z tym, iż ich doświadczenia pokazały, że zagęszczanie mieszanki w sposób dynamiczny (przez uderzanie) powoduje znaczne pokruszenie ziaren [14].

3.2.4 Kondycjonowanie próbek

Przez pierwsze dwa dni po wyjęciu z formy, próbki powinny być przechowywane w temperaturze $+20\pm 2^{\circ}\text{C}$ przy minimalnej wilgotności względnej wynoszącej 95%. Od 3 dnia powinno się je umieścić na ruszcie kratkowym w miejscu, w którym wilgotność względna powietrza wynosi od 40 do 70%, a temperatura $+20\pm 2^{\circ}\text{C}$. Siódmego dnia dwie próbki z każdej serii przygotowuje się do badania wytrzymałości na pośrednie rozciąganie $\beta_{SZ,7}$. Czternastego dnia próbki przeznaczone do badania wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po przechowywaniu w wodzie umieszcza się w kąpeli wodnej w temperaturze $+20\pm 2^{\circ}\text{C}$ (przy całkowitym zanurzeniu). 28 dnia dwie próbki z każdej serii przechowywane przez cały okres kondycjonowania w powietrzu $\beta_{SZ,28}$ oraz próbki przechowywane przez pierwsze 14 dni w powietrzu, a następnie w wodzie $\beta_{SZ,14/14}$ przygotowuje się do badania wytrzymałości na pośrednie rozciąganie [14].

3.2.5 Metody badań oraz wymagania dla mieszanek MCE

Po dobie od wykonania próbki, wyjmowana jest ona z formy oraz ważona (z dokładnością do $\pm 1\text{g}$), a jej średnia wysokość mierzona (z dokładnością do $\pm 1\text{mm}$). Na tej podstawie można określić gęstość wilgotnej próbki jako stosunek jej masy i objętości. Uwzględniając całkowitą zawartość wody w mieszance MCE można wyznaczyć gęstość objętościową. Na podstawie gęstości objętościowej oraz gęstości wyznaczonej według normy DIN 52102 ustala się, zgodnie z normą DIN 1996-7, zawartość wolnych przestrzeni [14].

Na wykonanych próbkach bada się wytrzymałość na pośrednie rozciąganie, odkształcenie poprzeczne oraz wartość modułu sztywności [14]. Przed przystąpieniem do badania, próbki należy doprowadzić do wymaganej temperatury ($+5^{\circ}\text{C}$). Przy początkowej temperaturze wynoszącej $+20^{\circ}\text{C}$ powinna być ona umieszczona w komorze termostatycznej na okres od 8 do 12 godzin [14].

Do określenia wytrzymałości na pośrednie rozciąganie należy użyć sprzętu zgodnego z DIN 1048-5 (rozdział 7.4.1). W celu wyznaczenia modułu sztywności stosuje się metalowe ramy z czujnikami przemieszczenia. Czujniki te powinny być usytuowane prostopadle do kierunku przyłożenia obciążenia. Ich głowica musi przylegać do powierzchni próbki [14].

Próbki umieszcza się w prasie. Obciążenie przekazywane jest na nie za pomocą przekładek o krzywiznie identycznej z krzywizną próbki i szerokości 12 mm. Prędkość przesuwu tłoka prasy wynosi 50 mm/min. Parametry mieszanki MCE wyznacza się z następujących zależności:

- wytrzymałość na pośrednie rozciąganie

$$\beta_{SZ} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot l} \text{ [MPa]}$$

gdzie:

β_{SZ} – wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa],
F – siła niszcząca [N],

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

d – średnica próbki [mm],
l – wysokość próbki [mm].

- odkształcenie poziome

$$\varepsilon_{SZ} = 1000 \cdot \frac{2 \cdot u \cdot (1 + 3 \cdot \mu)}{\pi \cdot d \cdot (0,274 + \mu)} [\text{‰}]$$

gdzie:

ε_{SZ} – odkształcenie poziome [‰],
u – przemieszczenie poziome w momencie zniszczenia próbki [mm],
d – średnica próbki [mm],
 μ - współczynnik Poissona (0,3) [-].

- moduł sztywności

$$E_{SZ} = \frac{F \cdot (0,274 + \mu)}{h \cdot u} [MPa]$$

gdzie:

E_{SZ} – moduł sztywności [MPa],
F – siła niszcząca [N],
h – wysokość próbki [mm],
u – odkształcenie poprzeczne przy 45% siły niszczącej [mm],
 μ - współczynnik Poissona (0,3) [-].

Jako końcowe wyniki według wytycznych niemieckich należy podać:

- wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa],
- odkształcenie poziome [‰],
- moduł sztywności przy 45% siły niszczącej [MPa],
- wysokość próbki [mm],
- gęstość objętościową [g/cm³].

Wymagania w odniesieniu do próbek z mieszanek MCE zestawiono w tabelicy 3.5.

Tablica 3.5. Wymagane parametry wytrzymałościowe dla próbek z mieszanki MCE według zaleceń niemieckich

Parametr	Wymagania
Zawartość wolnych przestrzeni	8-15 % [V/V] maksymalnie 10 % [V/V] ¹
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie po 7 dniach, w temperaturze +5°C $\beta_{SZ,7}$	Wartość średnia $\geq 0,50 \text{ MPa}$ $\leq 0,80 \text{ MPa}$
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie po 28 dniach, w temperaturze +5°C $\beta_{SZ,28}$	Wartość średnia $\geq 0,75 \text{ MPa}$ $\leq 1,20 \text{ MPa}$
Spadek wytrzymałości na pośrednie rozciąganie dla próbek przechowywanych w wodzie	< 30%

1 – jeżeli wykorzystywany jest materiał zawierający smołę

2 – warunek dla mieszanki, która posiada wiązania o typie dominująco hydraulicznym

Parametrami służącymi do określenia optymalnego składu mieszanki MCE jest wytrzymałość na pośrednie rozciąganie po 28 dniach przechowywania w warunkach suchych oraz wytrzymałość na pośrednie rozciąganie po 14 dniach przechowywania w warunkach suchych i 14 dniach w wodzie. W wyjątkowych przypadkach powinno się także uwzględniać wytrzymałość na pośrednie rozciąganie po 7 dniach [14].

3.3 Projekt PARAMIX

Projekt badawczy PARAMIX rozpoczął się w 2001 roku i trwał 3 lata. Był on wspierany finansowo przez Komisję Europejską. W projekcie tym wzięło udział 11 organizacji z 5 krajów europejskich (Hiszpania, Belgia, Niemcy, Włochy i Szwecja). Jego celem była optymalizacja zasad recyklingu nawierzchni. Jedną z technik recyklingu, która podlegała badaniom był recykling na zimno.

3.3.1 Materiały

Destrukt

Destrukt według programu PARAMIX cechują trzy właściwości:

- uziarnienie,
- zawartość spoiwa,
- cechy spoiwa.

Uziarnienie destruktu powinno być badane dla otoczonych ziaren kruszywa pochodzących bezpośrednio z frezowania (bez wykonywania ekstrakcji). Parametrami spoiwa znajdującego się w destrukcie, które powinny być określone to, oprócz jego zawartości, także temperatura mięknięcia oraz penetracja [29].

Emulsja

Wybór emulsji powinien odbywać się poprzez ocenę jej współpracy z destruktem. Należy określić ilość wody potrzebnej do dodania oraz wymaganą procentową zawartość emulsji, a następnie dzięki znajomości tych parametrów sprawdzeniu podlega, czy spełnione są następujące wymagania:

- otoczenie kruszywa – minimum 90%,
- adhezja czynna, czyli zdolność asfaltu do otoczenia wilgotnego kruszywa, minimum 75%,
- adhezja bierna, czyli zdolność asfaltu do zwilżenia suchego kruszywa, minimum 75%,
- odpowiednia urabialność [29].

Cement

Projekt PARAMIX zakłada dodatek cementu podczas wykonywania recyklingu metodą na zimno do 2%. Nie określa rodzaju stosowanego cementu. Rola cementu sprowadza się do regulacji czasu rozpadu emulsji.

3.3.2 Zagęszczanie próbek

Zagęszczanie próbek następuje przy wilgotności optymalnej ustalonej według zmodyfikowanej metody Proctora. Jest to wartość referencyjna. Zawartości wody

oraz emulsji może być modyfikowana w celu uzyskania lepszego otoczenia kruszywa, bądź większej spójności mieszanki [29].

W celu zagęszczania próbek stosuje się jedną z dwóch metod:

- Metoda I – zagęszczanie w prasie statycznej,
- Metoda II – zagęszczanie w prasie żyra torowej.

Zagęszczanie statyczne

Procedura zagęszczania przebiega następująco:

- odpowiednia ilość materiału umieszczana jest w metalowej cylindrycznej formie o średnicy 101,6 mm (w raporcie nie określono, czy formy były perforowane, czy nie),
- obciążenie przekazywane jest przez tłok, którego prędkość wynosi 1,27 mm/min, aż do osiągnięcia siły 60 kN,
- po osiągnięciu wymaganej siły jest ona utrzymywana przez 2 minuty.

Wynikiem takiego zagęszczania jest otrzymanie próbek o średnicy 101,6 mm i wysokości mieszczącej się w przedziale 50÷60 mm [29].

Zagęszczanie żyratorowe

Procedura zagęszczania przebiega następująco:

- odpowiednia ilość materiału umieszczana jest w metalowej cylindrycznej formie o średnicy 101,6mm (w raporcie nie określono, czy formy były perforowane, czy nie),
- prasa żyratorowa przekazuje na próbkę ciśnienie o wartości 0,6 MPa, przy kącie żyratorowym wynoszącym 1,25°,
- proces zagęszczania kończy się po osiągnięciu 300 obrotów.

Wynikiem zagęszczania żyratorowego, tak jak zagęszczania statycznego, jest otrzymanie próbek o średnicy 101,6mm i wysokości mieszczącej się w przedziale 50÷60 mm [29].

Po zagęszczeniu jedną z wymienionych metod, próbki są wyjmowane z formy. Następnie przechowuje się je przez 3 dni w temperaturze +60°C.

3.3.3 Badania oraz wymagania

Najważniejszą właściwością rozważaną dla mieszanek mineralno-emulsyjnych jest spójność (zastępując stabilność lub odporność na koleinowanie, które są parametrami uwzględnianymi podczas projektowania konwencjonalnych mieszanek mineralno-asfaltowych). W związku z tym, iż wytrzymałość na ściskanie nie odzwierciedla wpływu emulsji na spójność mieszanki, konieczne było zastosowanie innego badania. Ustalono, że odpowiednim będzie badanie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, według metody brazylijskiej [31].

Według zaleceń programu PARAMIX badanie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie przeprowadza się dla 2 wariantów:

- próbki suche,
- próbki, które zostały poddane działaniu wody.

Próbki suche

Próbki umieszcza się w urządzeniu, które umożliwia kontrolę temperatury. Przechowuje się je w temperaturze +5°C przez minimum 4 godziny. Bezpośrednio po wyjęciu próbek wykonuje się badanie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie na próbkach suchych [29].

Próbki poddana działaniu wody

Próbki umieszcza się w wodzie o temperaturze +60°C na okres 24 godzin. Następnie wyjmuje się je i suszy w powietrzu przez 8÷12 godzin. Po tym etapie próbki kondycjonuje się przez minimum 4 godziny w temperaturze +5°C. Bezpośrednio po wyjęciu próbek wykonuje się badanie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie na próbkach poddanych działaniu wody [29].

Podczas wykonywania badania wytrzymałości na pośrednie rozciąganie (metoda brazylijska) prędkość obciążenia próbki musi być stała i powinna wynosić 50,8 mm/min. Badanie wykonuje się aż do zniszczenia próbki. Rejestrowane jest obciążenie oraz przemieszczenie, a wytrzymałość na rozciąganie pośrednie wyznacza się według wzoru:

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

gdzie:

R_{TI} – wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa],

P – obciążenie niszczące [N],

h – wysokość próbki [mm],

d – średnica próbki [mm].

Dla próbek niepoddanych działaniu wody, minimalna wytrzymałość na rozciąganie pośrednie w temperaturze +5°C powinna wynosić 1,0 MPa. Próbki, które były poddane działaniu wody powinny osiągnąć minimalną wytrzymałość na pośrednie rozciąganie wynoszącą co najmniej 75% wytrzymałości początkowej. Wymagana wartość wytrzymałości na pośrednie rozciąganie nie zależy od sposobu zagęszczania próbek [29].

3.4 Doświadczenia szwedzkie

Wytyczne dotyczące recyklingu nawierzchni w Szwecji znajdują się w publikacji „Handbok för återvinning av asfalt” [32]. Można w niej znaleźć zalecenia dotyczące recyklingu mieszanek w technologii na zimno oraz na gorąco. W dalszej części opracowania skupiono się jedynie na recyklingu metodą na zimno.

Technologia recyklingu na zimno staje się w Szwecji coraz bardziej powszechna. Związane jest to z tym, iż w budowywana w nawierzchnię mieszanina może zawierać do 100% materiału z odzysku. Szczegółowy podział stosowanych w Szwecji technologii recyklingu przedstawia tablica nr 3.6.

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Tablica 3.6. Rodzaje recyklingu na zimno według szwedzkich wytycznych [32]

Metoda	Miejsce zastosowania	Dodane spoiwo	Cechy mieszanki
Na zimno, w zakładzie	Warstwy ścieralne i podbudowy; zwykle o nieco niższej kategorii ruchu	Emulsja asfaltowa, miękki asflt, asfalt spieniony	Zawartość destruktu asfaltowego w nowej mieszance ponad 80%
Na zimno, na miejscu (kall remixing)	Warstwy ścieralne i podbudowy; zwykle o nieco niższej kategorii ruchu	Emulsja asfaltowa lub asfalt spieniony	Dodanie spoiw i kruszyw do około 20%
Na zimno, na miejscu (stabilizacja) - MCE	Warstwy podbudowy; zwykle o nieco niższej kategorii ruchu	Emulsja asfaltowa i ewentualnie cement	Dodanie spoiw i kruszyw do około 50%
Na zimno, na miejscu (frezowanie głębokie)	Warstwy podbudowy; zwykle o nieco niższej kategorii ruchu	-	Możliwe ewentualne dodatki kruszyw

W Szwecji do recyklingu na zimno bardzo rzadko używa się cementu. Może być on wykorzystywany jedynie do recyklingu na miejscu. Najczęściej stosowanym lepiszczem jest emulsja asfaltowa. W związku z tym w opracowaniu skupiono się na mieszankach mineralno – emulsyjnych.

W wytycznych „Handbok för återvinning av asfalt” [32] zalecenia dotyczące wykonywania próbek, sposobu badań oraz wymagań dla mieszanek mineralno-emulsyjnych podano głównie dla recyklingu w wytwórni.

3.4.1 Materiały

Destrukt asfaltowy

Destrukt asfaltowy zasadniczo składa się ze lepiszcza bitumicznego oraz kruszywa. Może posiadać także dodatki, takie jak np. włókna, pozostałości znakowania dróg czy odpady gumowe. Lepiszczce bitumiczne zawarte w destrukcie asfaltowym wykazuje inne właściwości niż pierwotnie. Związane jest to z procesami starzenia spowodowanymi ogrzaniem, mieszaniem, transportem, wbudowaniem oraz wpływem czynników atmosferycznych.

Kruszywo zawarte w destrukcie także może wykazywać inne właściwości niż początkowo. Związane jest to głównie z procesem frezowania, który może mieć wpływ na zmiany kształtu i uziarnienia.

Maksymalny rozmiar granulatu asfaltowego użytego do warstwy podbudowy, według wytycznych szwedzkich, nie powinien przekraczać 22 mm [32].

Środki wiążące

Środki wiążące dodane do mieszanki mogą być zarówno bitumiczne (asfalt zwykły, asfalt miękki, emulsja asfaltowa), jak i hydrauliczne (cement, popioły lotne). W szczególnych przypadkach, podczas stabilizacji na miejscu, używa się obu jednocześnie. W recyklingu na zimno w Szwecji zwykle środkiem wiążącym jest emulsja asfaltowa. Zawartość asfaltu w klasycznych emulsjach waha się, w

zależności od rodzaju, w granicach 50÷70%. W wytycznych „Handbok för återvinning av asfalt” nie określono ilości środków wiążących [32].

Kruszywo doziarniające

Kruszywo doziarniające dodaje się w celu:

- zwiększenia stabilności materiału,
- poprawy spójności i urabialności mieszanki.

Woda

Woda dodawana jest w celu poprawienia urabialności oraz odpowiedniego zagęszczenia gotowej mieszanki. Jeśli granulata ma wysoką wilgotność, powyżej 5%, to woda nie powinna być dodawana.

Optymalna zawartość płynów wynosi około 7,0%, lub 6% w przypadku recyklingu na miejscu. Oznacza to, że przy dodaniu emulsji w ilości 3%, całkowita zawartość wody w granulacie powinna wynosić około 4%. Wilgotność optymalna może być określona na podstawie zmodyfikowanej metody Proctora lub metody Marshalla [32].

3.4.2 Wykonanie próbek

Proces wykonania próbek z mieszanek mineralno – emulsyjnych można podzielić na 3 etapy:

- mieszanie składników,
- zagęszczanie próbek na jeden z dwóch sposobów:
 - zagęszczanie statyczne w temperaturze pokojowej,
 - zagęszczanie żyratorowe w temperaturze pokojowej,

W publikacji „Handbok för återvinning av asfalt” [32] nie są opisane wytyczne dotyczące zagęszczania próbek. W raporcie PARAMIX można znaleźć adnotację mówiącą, iż zagęszczanie próbek przy użyciu prasy żyratorowej w Szwecji odbywa się w formach perforowanych o średnicy 150 mm. Prasa ta przekazuje na próbkę ciśnienie o wartości 1,0 MPa, przy kącie żyratorowym wynoszącym 2°. Proces zagęszczania kończy się po osiągnięciu 35 obrotów [29].

- pielęgnowanie próbek na jeden z dwóch sposobów:
 - 7 dni w temperaturze +40°C,
 - 4 dni w temperaturze +60°C.

3.4.3 Zalecane parametry mieszanki

Zawartość lepiszcza z granulatu

Zawartość lepiszcza z granulatu powinna wynosić od 3,0 do 6,0% [m/m]. Jeżeli przekracza ona 6,0%, to należy dodać do mieszanki kruszywo, aby obniżyć zawartość lepiszcza. Zbyt duża zawartość lepiszcza może powodować nadmierne odkształcenia plastyczne [32].

Zawartość wody w granulacie

Zawartość wody w granulacie (woda znajdująca się pierwotnie w granulacie oraz woda dodana) powinna wynosić dla warstwy podbudowy od 3,0 do 5,0 % [m/m].

Ilość emulsji

Ilość emulsji dodanej do mieszanki powinna wynosić (dla emulsji BE60M/V6000 zawierającej około 65% asfaltu):

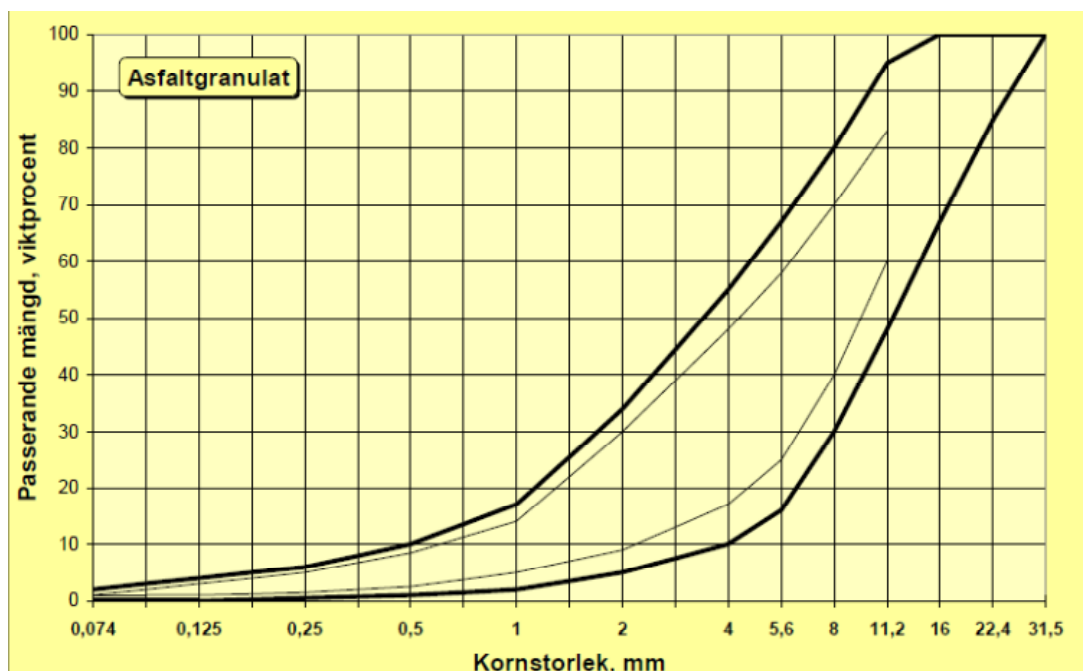
- dla warstwy podbudowy od 1,2 do 2,7% [m/m] (wartość nominalna to 2,4% [m/m]),
- dla warstwy podbudowy (recykling na miejscu) od 1,5 do 4,0 % [m/m].

Całkowita zawartość lepiszcza

Całkowita zawartość lepiszcza w mieszance powinna wynosić dla warstwy podbudowy od 4,5 do 6,5% [m/m].

Uziarnienie destruktu asfaltowego

Uziarnienie destruktu asfaltowego powinno odpowiadać krzywom granicznym uziarnienia przedstawionym na rysunku nr 3.5.



Rysunek 3.5. Uziarnienie graniczne granulatu asfaltowego według wytycznych szwedzkich [32]

Lepkość kinematyczna w +60°C

Na drogach, które wymagają podatności powinno stosować się emulsje na bazie bitumu o lepkości kinematycznej $\leq 6000 \frac{mm^2}{s}$. Na drogach, na których wymagana jest większa sztywność i stabilność powinno stosować się emulsje na bazie bitumu o lepkości kinematycznej $\geq 6000 \frac{mm^2}{s}$ [32].

Maksymalna zalecana wielkość ziaren

Maksymalne zalecane rozmiary ziaren mieszanki zależą od lokalizacji oraz warstw, w jakich ta mieszanka będzie wbudowana. Dla warstwy podbudowy maksymalny rozmiar cząstek wynosi 22 mm [32].

3.4.4 Badania mieszanki oraz wymagania

W celu zaprojektowania odpowiedniej mieszanki mineralno-emulsyjnej konieczna jest analiza materiału odzyskanego z nawierzchni. Badanymi parametrami są:

- zawartość lepiszcza,
- krzywa uziarnienia kruszywa w destrukcie,
- zawartość wody,
- rodzaj kruszywa, typ ziaren,
- cechy lepiszcza z odzyskanego materiału:
 - penetracja,
 - temperatura mięknięcia,
 - lepkość [32].

Wymagania stawiane mieszankom wytworzonym w technologii recyklingu na zimno można podzielić w zależności od natężenia ruchu na 3 kategorie:

- dla dróg i ulic o $ADT_{total} < 500$ pojazdów lub $ADT_{k.tung} < 50$ pojazdów
Wymagane jest jedynie spełnienie wymagań materiałowych. Parametry, które należy zbadać, to:
 - zawartość lepiszcza,
 - zawartość wody.
- dla dróg i ulic o $ADT_{total} = 500 \div 1500$ pojazdów lub $ADT_{k.tung} \geq 50$ pojazdów
Wymagane jest spełnienie wymagań stawianych poszczególnym materiałom, oraz wymagań zaprojektowanej mieszanki (w zależności od warstwy w nawierzchni). Parametry, które należy zbadać w mieszance MCE to:
 - zawartość lepiszcza,
 - zawartość wody,
 - zawartość wolnych przestrzeni,
 - moduł sztywności w $+10^{\circ}C$,
 - stabilność według Marshalla w $+25^{\circ}C$,
 - wrażliwość na wodę (wskaźnik przyczepności).
- dla dróg i ulic o $ADT_{total} > 1500$ pojazdów
Powinny być wykonane specjalne badania. W publikacji „Handbok för återvinning av asfalt” nie są one wyszczególnione [32].

W tabelicy 3.7 zestawiono wymagania dla próbek wytworzonych w technologii recyklingu na miejscu.

Tablica 3.7. Wymagania dotyczące próbek wytworzonych w technologii recyklingu na zimno

Metoda badania	Warstwa podbudowy z MCE
Zawartość wolnych przestrzeni, [%]	6-14
Stabilność według Marshalla w +25°C, [kN]	>7
Moduł sztywności w +10°C, [MPa]	>2000
Wrażliwość na wodę, [%]	>50

3.5 Zalecenia PIARC

W 2003 roku we Francji wydany został przewodnik do recyklingu nawierzchni: "Pavement recycling. Guidelines for in-place recycling with cement, in-place recycling with emulsion or foamed bitumen, hot mix recycling in plant" [9] opracowany przez grupę inżynierów pod przewodnictwem Jana Th. van der Zwan'a z Holandii. Dokument ten nie stanowi specyfikacji. Jego celem jest uaktualnienie informacji o zastosowaniach recyklingu na całym świecie, oraz przekazanie kilku wskazówek zaczerpniętych z doświadczeń różnych krajów.

3.5.1 Parametry mieszanki i materiałów składowych

Mieszanka wytworzona w technologii recyklingu na zimno na miejscu z emulsją składa się z granulatu, emulsji asfaltowej, wody oraz ewentualnie kruszywa doziarniającego.

Dodanie do tej mieszanki cementu lub wapna (w ilościach do 2%) pozwala na zmniejszenie plastyczności oraz zwiększenie modułu sprężystości i wytrzymałości. Wytyczne PIARC zakładają, że mieszanki z zawartością cementu większą niż 2%, mają właściwości zbliżone do stabilizacji cementem [9].

Emulsja

Wybór emulsji zależy od materiału użytego do recyklingu. Można wyróżnić trzy przypadki:

- Recykling, w którym głównymi składnikami są materiały ziarniste niezwiązane. Najbardziej odpowiednie w takim wypadku są emulsje kationowe nadstabilne. Wybór rodzaju asfaltu zależy od wielkości ruchu drogowego oraz warunków klimatycznych. Dla ruchu niskiego i średniego, w klimacie umiarkowanym można użyć asfaltu o penetracji w temperaturze +25°C od 70/100 do 180/220. W krajach o zimniejszym klimacie używa się asfaltów o większej penetracji.
- Typowy recykling mieszanek bitumicznych na zimno na miejscu stosowany w Europie do wykonywania warstwy wiążącej lub podbudowy. Najbardziej odpowiednie w takim wypadku są emulsje kationowe wolnorozpadowe, które cechują się małą lepkością (czasami ze środkiem recyklującym).
- Typowy recykling mieszanek bitumicznych na zimno na miejscu stosowany w USA do warstw górnych. Stosowane są kationowe oraz anionowe emulsje średniorozpadowe zawierające znaczny udział upłynniaczy – od 5 do 10%.

Zawartość emulsji niezbędna do odpowiedniego otoczenia materiałów poddanych recyklingowi oraz do uzyskania wymagań mechanicznych mieści się zazwyczaj w przedziale:

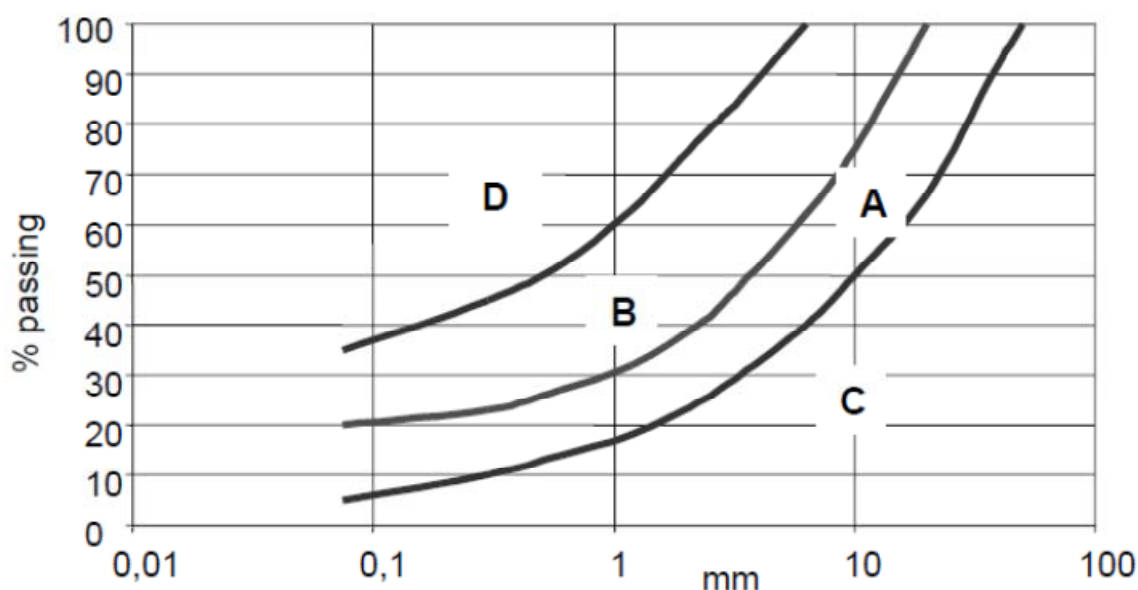
- 2÷3% w przypadku recyklingu mieszanek bitumicznych,
- do 7% w przypadku pozostałych materiałów [9].

Optymalna zawartość płynów

Do określenia całkowitej zawartości płynów, przy której mieszanka osiąga maksymalną gęstość objętościową stosuje się zmodyfikowaną metodę Proctora. Do całkowitej zawartości płynów zalicza się wodę znajdującą się w materiałach pochodzących z recyklingu, wodę dodaną oraz emulsję bitumiczną przed rozpadem [9].

Uziarnienie mieszanki

Wytyczne PIARC podają jedynie obszary uziarnienia dla mieszanek z asfaltem spienionym. Klasyfikują one materiał ziarnisty użyty do recyklingu z tym lepiszczem do jednej z 4 stref, które zostały przedstawione na rysunku 3.6.



- Strefa A – uziarnienie idealne,
- Strefa B – uziarnienie akceptowalne,
- Strefa C – uziarnienie zbyt grube – wymagana korekta,
- Strefa D – uziarnienie zbyt drobne – materiał nie nadaje się do użycia.

Rysunek 3.6. Strefy uziarnienia według wymagań PIARC dla mieszanek z asfaltem spienionym [20]

Wyraźnie zaznaczono, iż wymagania dotyczące uziarnienia mieszanek do recyklingu z użyciem asfaltu spienionego różnią się od wymagań dla mieszanek, w których jako lepiszcze wykorzystuje się emulsję asfaltową [9].

Grubość warstw z mieszanki

Mimo tego, że możliwości technologiczne maszyn pozwalają na przetwarzanie warstw o grubości ponad 35 cm, to grubość warstw poddanych recyklingowi na

miejscu z wykorzystaniem emulsji asfaltowej jest mniejsza ze względu na odpowiednie wymieszanie składników, oraz z powodu wymagań dotyczących ewakuacji wody. Maksymalna grubość warstwy z mieszanki MCE według zaleceń PIARC to około 25 cm [9].

3.5.2 Projektowanie mieszanek

Podejście do projektowania mieszanki z emulsji oraz materiałów pochodzących z recyklingu pozostaje głównie empiryczne. Wynika to z faktu, że mieszanki laboratoryjne nie odwzorowują zjawisk, które występują w terenie.

Zgodnie z praktykami stosowanymi w poszczególnych krajach, wyróżnia się wiele metod projektowania mieszanek. Można jednak wymienić ich główne etapy. Są to:

- charakterystyka materiałów przeznaczonych do recyklingu, a w szczególności:
 - jednorodność,
 - uziarnienie (należy określić, czy konieczne jest dodanie kruszywa doziarniającego w celu korekty krzywej uziarnienia),
 - plastyczność części drobnych (przy stabilizacji kruszywem),
 - jakość kruszywa w destrukcie,
 - zawartość i rodzaj lepiszcza bitumicznego w destrukcie oraz określenie konieczności dodania środka recyklującego.
- wybór nowego spoiwa,
- badanie zgodności pomiędzy lepiszczem a kruszywem,
- określenie całkowitej zawartości płynów ze względu na zagęszczenie mieszanki MCE,
- określenie zawartości emulsji oraz wody w celu uzyskania odpowiedniego otoczenia kruszywa,
- ostateczny wybór zawartości emulsji asfaltowej,
- badanie właściwości mechanicznych zaprojektowanej mieszanki.

3.5.3 Właściwości mechaniczne

W przypadku projektowania mieszanek z nowych materiałów, projektant ma możliwość wyboru składników oraz dostosowania składu w celu uzyskania żądanych właściwości mechanicznych. W przypadku recyklingu na zimno na miejscu z emulsją asfaltową, materiały poddane recyklingowi w znacznym stopniu określają właściwości mechaniczne powstałej mieszanki. W związku z tym można podać tylko orientacyjne i dość szerokie przedziały wartości właściwości mechanicznych. Należy również zauważyć, że wartości parametrów określane w laboratorium mogą znacznie różnić się od rzeczywistych [9].

Zalecenia PIARC nie podają sprecyzowanych wymagań wytrzymałościowych dotyczących mieszanek MCE. Podają jedynie przykładowe badania oraz zalecane parametry. Jedną z cech mechanicznych zawartych w zaleceniach jest wytrzymałość na pośrednie rozciąganie, która powinna wynosić według zaleceń kanadyjskich (Quebec) od 0,4 do 0,8 MPa. Kolejnym parametrem określanym dla mieszanek MCE jest moduł sprężystości, który zgodnie z francuskimi założeniami powinien wynosić:

- od 2000 do 3000 MPa – dla mieszanek z emulsją bitumiczną, zawierających od 75 do 90% destruktu asfaltowego,
- od 3000 do 4000 MPa – dla mieszanek z emulsją bitumiczną, zawierających ponad 90% destruktu asfaltowego [9].

Innymi wymienionymi parametrami, które można określić podczas badań cech mechanicznych mieszanek MCE są między innymi:

- wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie,
- stabilność,
- stabilność po przechowywaniu w wodzie,
- moduł sztywności.

3.6 Doświadczenia amerykańskie

W Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej nie ma ściśle określonej metody projektowania mieszanek stosowanych przy recyklingu nawierzchni metodą na zimno. Mimo tego, główne etapy są takie same w większości procedur używanych w poszczególnych stanach. Można wyróżnić 7 zasadniczych kroków [27]:

- Ocena recyklowanego materiału
Krok ten opiera się głównie na pobraniu próbek z nawierzchni oraz określeniu ich właściwości. Próbki należy pobierać w sposób usystematyzowany, tak aby jak najdokładniej reprezentowały materiał znajdujący się w nawierzchni. W celu ustalenia uziarnienia granulatu należy wykonać analizę sitową. Aby określić cechy lepiszcza znajdującego się w destrukcie należy przeprowadzić ekstrakcję. Parametry wyodrębnionego z destruktu lepiszcza, które należy zbadać to:
 - penetracja w +25°C,
 - lepkość w +60°C.
- Uziarnienie mieszanki
Należy określić uziarnienie mieszanki przeznaczonej do wbudowania, a w razie konieczności zastosować doziarnienie kruszywem. Dodatkowe kruszywo jest konieczne w przypadku, gdy:
 - przesiew materiału z recyklingu nie mieści się w granicznych krzywych uziarnienia,
 - w destrukcie znajduje się zbyt duża ilość starego lepiszcza,
 - nie są spełnione wymagania wytrzymałościowe,
 - konieczne jest wykonanie warstwy o większej grubości.
- Wybór środków wiążących
Najczęściej stosowanym środkiem wiążącym w recyklingu nawierzchni metodą na zimno w Stanach Zjednoczonych jest emulsja asfaltowa. Do mieszanki można także dodać cement, popioły lotne, wapno lub inne środki chemiczne.
- Wyznaczenie potrzebnej ilości asfaltu
Ilość nowego asfaltu wymagana do recyklingu na zimno na miejscu w przypadku stosowania emulsji asfaltowych zazwyczaj waha się od 0,3 do 2%. Większa ilość potrzebna jest w przypadku, gdy do mieszanki dodane zostało kruszywo doziarniające.
- Określenie rodzaju nowego lepiszcza asfaltowego

Przy określaniu rodzaju nowego lepiszcza należy zwrócić uwagę na zawartość oraz cechy starego lepiszcza. Zaleca się stosowanie emulsji wolnorozpadowych.

- Wyznaczenie optymalnej zawartości wody
Optymalną zawartość wody wyznacza się ze względu na odpowiednią urabialność, otoczenie ziaren mieszanki oraz zagęszczenie. Przed wykonaniem mieszanki należy zbadać zgodność wody z emulsją, a jej jakiegokolwiek negatywny wpływ (np. na przedwczesny rozpad emulsji) powinien dyskwalifikować dane źródło wody.
- Wykonanie badań służących do określenia cech wytrzymałościowych zaprojektowanej mieszanki
Ilość, rodzaje badań oraz przyjęte wymagania zależą od przyjętej metody projektowania mieszanki.

3.6.1 Metoda projektowania mieszanek wg stanu Pensylwania

Metoda projektowania mieszanek używanych do recyklingu na zimno w stanie Pensylwania określa wielkość destruktu oraz procedury wyznaczania wilgotności optymalnej i optymalnej zawartości emulsji. Wstępna ocena polega na określeniu uziarnienia kruszywa z destruktu oraz zawartości asfaltu w destrukcie. Następnie na wykstrahowanym z destruktu asfalcie bada się penetrację i lepkość [27].

W tej metodzie przeprowadza się dwie serie testów. W pierwszej z nich dla stałej zawartości emulsji asfaltowej i zmiennej zawartości wody bada się otoczenie ziaren mieszanki. Na tej podstawie ustalana jest wilgotność optymalna. W drugiej serii testów określa się optymalną zawartość emulsji na podstawie badania modułów sztywności dla zagęszczonych próbek, które były kondycjonowane w wodzie i w powietrzu [27].

3.6.2 Metoda projektowania mieszanek wg stanu Kalifornia

Wytyczne projektowania mieszanek w Kalifornii określają metody przygotowania oraz badania próbek. Destrukt powinien mieć odpowiednie uziarnienie, określone na podstawie przesiewu poprzez sita 38 mm, 25 mm, 20 mm, 9,5 mm oraz 4,75 mm. Wytyczne zalecają również wykonanie badania lepkości na asfalcie wykstrahowanym z destruktu. Na zagęszczonych próbkach przeprowadza się badania gęstości objętościowej, zawartości wolnej przestrzeni oraz stabilności. Ostatecznie dobrana ilość emulsji powinna być wielkością maksymalną, dla której próbka spełnia warunek stabilności, a zawartość wolnych przestrzeni wynosi minimum 4% [27].

3.6.3 Metoda projektowania mieszanek wg firmy Chevron

Projektowanie mieszanek używanych do recyklingu na zimno składa się według zaleceń firmy Chevron z 6 następujących etapów:

- Ocena destruktu,
- Wybór ilości i uziarnienia kruszywa odziarniającego,
- Oszacowanie ilości potrzebnego asfaltu,

- Wybór rodzaju i ilości emulsji asfaltowej,
- Badania mieszanki,
- Ustalenie składu optymalnego.

W metodzie firmy Chevron opisane są sposoby określenia zawartości asfaltu, spójności w asfalcie odzyskanym z destruktu oraz uziarnienia wyekstrahowanego kruszywa. Ustalono także procedury dotyczące wyznaczania ilości i uziarnienia kruszywa doziarniającego oraz oszacowania zapotrzebowania na asfalt. W metodzie tej znajduje się również przewodnik służący do wyboru rodzaju i ilości emulsji asfaltowej.

Próbki wytworzone z zaprojektowanej mieszanki badane są pod względem modułu sztywności, stabilności oraz kohezji (część próbek bada się w początkowym okresie kondycjonowania, natomiast pozostałe po całym cyklu kondycjonowania).

Ostateczny skład mieszanki dobiera się na podstawie najmniejszej zawartości emulsji asfaltowej. Muszą być jednak spełnione kryteria projektowe dotyczące modułu sztywności, stabilności oraz kohezji, a zawartość emulsji nie może być mniejsza niż 2% [27].

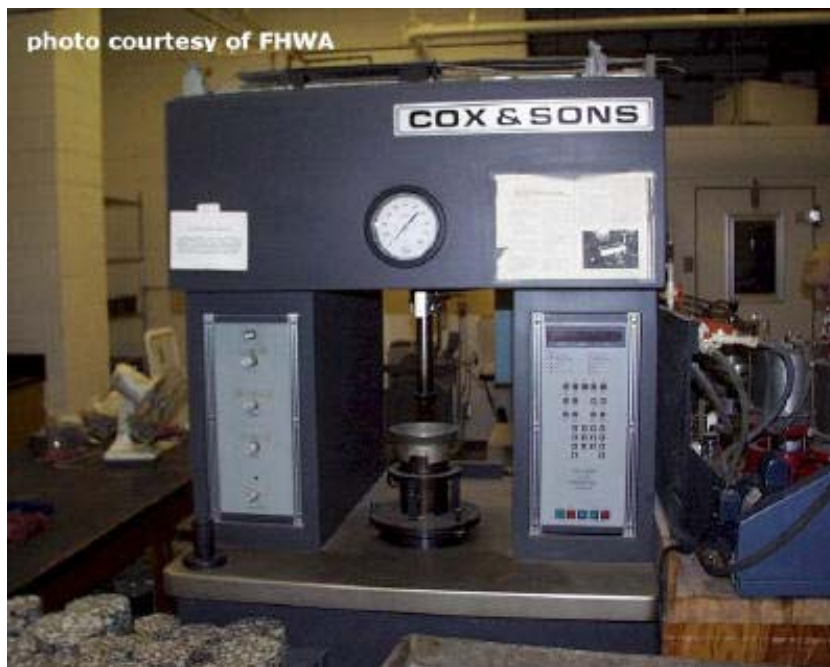
3.6.4 Metody zgodne z wytycznymi ARRA (Asphalt Recycling and Reclaiming Association)

Zgodnie z wytycznymi ARRA wyróżnia się trzy różne metody projektowania mieszanek używanych do recyklingu na zimno. Są to [27]:

- **Metoda A**, zmodyfikowanego Marshalla.
Mieszanki projektowe przygotowywane są w taki sposób, aby całkowita zawartość wody wynosiła 3%. Na zawartość tą składa się woda znajdująca się w emulsji, woda znajdująca się w destrukcie oraz woda dodana do mieszanki. Emulsja asfaltowa dodawana jest do mieszanki w ilościach różniących się o 0,5%. Zagęszczanie wykonuje się metodą Marshalla przy pomocy 50 uderzeń na stronę próbki. Próbki są kondycjonowane przez 6 godzin w temperaturze +60°C, a następnie badane pod kątem gęstości objętościowej, stabilności i odkształcenia według Marshalla (+60°C). Dla optymalnej zawartości emulsji przygotowuje się próbki, które różnią się wilgotnością o 0,5%. Zaleca się wybór mieszanki o zawartości wolnych przestrzeni w przedziale od 9 do 14%.
- **Metoda B**, zmodyfikowanego Hveema.
W tym przypadku metoda przygotowania próbki jest taka sama jak dla metody A, przy czym do zagęszczania próbek wykorzystuje się urządzenie zwane *kneading compactom*, które zostało pokazane na rysunku 3.7 [27]. Metoda zagęszczania urządzeniem *kneading compactor* polega na uderzaniu próbki na górze w pobliżu krawędzi przez trzpień o powierzchni 20 cm². Podstawa obraca się o kąt 60° po każdym uderzeniu.

W celu osiągnięcia stanu „pół-zagęszczonego” stosuje się 20 uderzeń trzpienia przy ciśnieniu 1,725 MPa. Następnie wykonuje się 150 uderzeń trzpienia przy ciśnieniu 3,45 MPa. Po zagęszczeniu uzyskuje się próbki o średnicy 4 cali (101,6 mm) i wysokości około 2,5 cala (63,5mm). Próbki

badane są pod kątem gęstości objętościowej i stabilności (+60°C). Dla optymalnej zawartości emulsji przygotowuje się próbki, które różnią się wilgotnością o 0,5%. Zaleca się wybór mieszanki o zawartości wolnych przestrzeni w przedziale od 9 do 14%.



Rysunek 3.7. Urządzenie "California kneading compactor" służące do zagęszczania próbek

- **Metoda C**, oznaczenie Oregon.

Metoda ta poświęca sporo uwagi wyborowi wstępnej zawartości emulsji asfaltowej dodawanej do mieszanki składającej się w 100% z destruktu. Na początku określa się uziarnienie destruktu poprzez przesiew na sitach o średnicy oczek 12,5 mm, 6,3 mm i 2,0 mm. Następnie lepiszcze asfaltowe odzyskane z destruktu jest testowane pod względem penetracji w +25°C i lepkości w +60°C. Szacunkowa zawartość emulsji asfaltowej jest wyznaczana z następującego równania:

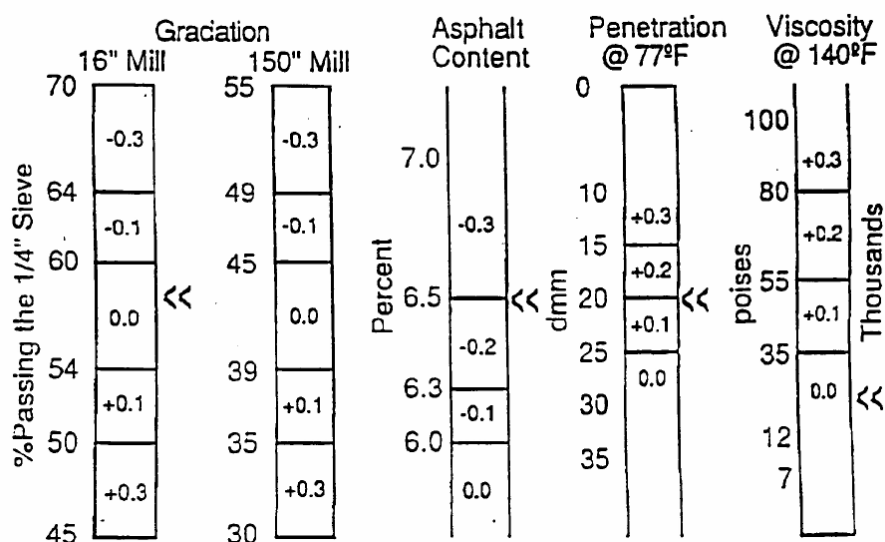
$$EC_{EST} = 1,2 + A_G + A_{AC} + A_{P/V}$$

gdzie:

- EC_{EST} - szacunkowa zawartość dodanej emulsji [%],
- 1,2 - bazowa zawartość emulsji [%],
- A_G - korekta ilości emulsji ze względu na uziarnienie destruktu,
- A_{AC} - korekta ilości emulsji ze względu na zawartość asfaltu w destrukcie,
- A_{P/V} - korekta ilości emulsji ze względu na penetrację i lepkość asfaltu w destrukcie. Wartość korekty przedstawiono na rysunku 3.8.

Jeżeli istnieje rozbieżność pomiędzy korektą ze względu na penetrację oraz ze względu na lepkość, należy przyjąć mniejszą wartość korekty.

Dla wyznaczonej zawartości emulsji sporządza się szereg próbek różniących się zawartością wody. Każda porcja mieszanki jest ważona, a następnie umieszczana w specjalnej formie o średnicy 101,6 mm i wysokości 262,1 mm. Zagęszczenie wykonuje się w prasie hydraulicznej. Początkowo przykładana się na czas jednej minuty ciśnienie o wartości 137,9 MPa, następnie przez okres 1,5 minuty dodaje się ciśnienie z prędkością 0,383 MPa/s. Uzyskaną wartość ciśnienia wynoszącą 172,4 MPa utrzymuje się przez kolejną minutę. Po zagęszczeniu określa się wagę próbki. Ubytek wody wyznacza się jako różnicę pomiędzy masą próbki przed i po zagęszczeniu. Powinien się on mieścić w przedziale od 1 do 4 g. Ilość wody potrzebnej do dodania ustala się poprzez odjęcie zawartości emulsji i zawartości wody w destrukcie od projektowanej, całkowitej zawartości.



Rysunek 3.8. Wartości korekty ilości emulsji asfaltowej ze względu na parametry materiałowe, według oznaczenia Oregon [27]

3.6.5 Metoda projektowania mieszanek wg stanu Oregon

W tej metodzie etapy przygotowania próbek oraz oznaczenie zawartości emulsji i wody są takie same jak w metodzie C według ARRA. Występuje dodatkowy etap, podczas którego określa się moduły sztywności oraz stabilność Hveem'a [27].

3.6.6 Metoda projektowania mieszanek w stanie Minnesota

W 2002 roku, na podstawie doświadczeń zebranych w stanie Minnesota wydano raport, w którym przedstawiono syntezę recyklingu nawierzchni asfaltowych. W raporcie tym znajduje się specyfikacja dotycząca wykonywania recyklingu metodą na zimno. Zakłada ona wykonanie recyklowanej warstwy z destruktu oraz emulsji asfaltowej. Jeśli istnieje taka konieczność, to dodaje się również wodę, kruszywo doziarniające oraz inne środki wiążące [28,33].

Pobieranie próbek

Należy wykonać odwierty z nawierzchni przeznaczonych do recyklingu. Jeśli wykazują one znaczne zróżnicowanie warstw konstrukcyjnych, to konieczne jest sporządzenie osobnych projektów mieszanek dla każdego z wydzielonych segmentów nawierzchni. Należy pobrać co najmniej jeden odwiert z każdej mili danego pasa ruchu oraz odwierty z miejsc, które wizualnie różnią się rodzajem nawierzchni. Następnie są one przycinane do wysokości równej głębokości frezowania, a potem kruszone [28,33].

Projektowanie składu

Wykonuje się co najmniej 2 projekty mieszanki MCE o różnym uziarnieniu:

- mieszankę o średnim uziarnieniu,
- o drobnym lub o grubym uziarnieniu.

Podział mieszanek ze względu na uziarnienie przedstawiono w tablicy 3.8.

Tablica 3.8. Wartości przesiewu mieszanki mineralnej według zaleceń stanu Minnesota [28]

Sito [mm]	Przesiew mieszanki mineralnej		
	Drobny	Średni	Gruby
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

Z każdej mieszanki wykonuje się 4 próbki dla trzech różnych zawartości emulsji. Zalecane zawartości emulsji to od 1,5 do 4,0%. Mieszanie próbek wykonywane jest w temperaturze pokojowej za pomocą mechanicznego miksera kubelkowego. Destrukt mieszany jest dokładnie z wodą, a następnie wlewana jest emulsja. Czas mieszania po dodaniu emulsji nie powinien przekraczać 60 sekund [28,33].

Zagęszczanie

Próbki powinny być zagęszczane bezpośrednio po wymieszaniu. Przed zagęszczaniem, na górze i na dole próbki, umieszcza się papierowe krążki. Zagęszczanie próbek o średnicy 100 mm i zalecanej wysokości od 61 do 66 mm odbywa się w prasie żyrotorowej przy kącie 1,25°, ciśnieniu 600 kPa i przy 30 obrotach. Forma nie jest podgrzewana [28,33].

Kondycjonowanie próbek

Próbki wyjmowane są z formy bezpośrednio po zagęszczaniu. Po usunięciu papierowych krążków, umieszczane są one w komorze z wentylacją, w temperaturze +60°C. Suszenie próbek do stałej masy powinno trwać minimalnie 16 godzin, lecz nie więcej niż 48 godzin. Stała masa próbki jest uzyskana, gdy jej zmiana w ciągu 2

godzin jest nie większa niż 0,05%. Po wysuszeniu próbek, są one chłodzone w temperaturze pokojowej przez 12 do 24 godzin [28,33].

Badania przeprowadzane na próbkach

- wysokość (może być ona także odczytana z prasy żyratorowej),
- gęstość objętościowa,
- zawartość wolnych przestrzeni,
- stabilność Marshalla w +40°C (po 2 godzinnym przechowywaniu w komorze termostatycznej). Powinna ona wynosić nie mniej niż 5,6 kN.
- spadek wartości stabilności Marshalla
Próbka przechowywana jest w wodzie w temperaturze +25°C przez 23 godziny, a następnie przez godzinę w +40°C. Określana jest stabilność, której spadek w porównaniu do próbki suchej nie powinien być większy niż 30%.

Ostatnim etapem projektowania mieszanki jest wybór optymalnej zawartości emulsji na podstawie wyników przeprowadzonych badań [28,33].

3.7 Wytoczne brytyjskie

Ponowne wykorzystanie materiałów z nawierzchni staje się coraz bardziej popularne w Wielkiej Brytanii. Związane to jest z wprowadzeniem wytycznych krajowych dotyczących recyklingu. Obecnie, mieszanki stosowane podczas recyklingu metodą na zimno projektuje się według wytycznych „A guide to the use and specification of cold recycled materials for the maintenance of road pavements” [24] autorstwa D. Merrill'a, M. Nunn'a i I. Carswell'a. Oparte są one o wyniki trzyletniego programu badawczego. Środkami wiążącymi, które można stosować według brytyjskich zaleceń są:

- cement portlandzki,
- asfalt spieniony,
- emulsja asfaltowa,
- popioły lotne,
- zmielony żużel wielkopiecowy,
- wapno.

W dalszej części raportu skupiono się wyłącznie na mieszankach związanych cementem i emulsją asfaltową [24].

Wytyczne brytyjskie nie ograniczają stosowania warstw wykonanych z mieszanek MCE do dróg o dużym natężeniu ruchu. Zalecają jednak, aby uwzględnić w takim przypadku ryzyko wystąpienia uszkodzeń związanych z wbudowaniem tych warstw.

Celem projektowania mieszanek MCE jest uzyskanie odpowiednich właściwości po roku od wbudowania. Wytyczne nie narzucają szczegółowych procedur określania ich składu [24].

3.7.1 Środki wiążące

Cement

Głównym powodem stosowania cementu jest stworzenie materiału, który w krótkim czasie od wbudowania uzyska określoną wytrzymałość. Należy zachować ostrożność podczas projektowania mieszanek MCE, gdyż mimo wyraźnych korzyści, zbyt duży dodatek cementu może skutkować powstaniem spękań poprzecznych. Cement powinien być zgodny z normą EN 197-1, a jego minimalna zawartość powinna wynosić 1%. Zawartość maksymalna nie została określona [24].

Emulsja asfaltowa

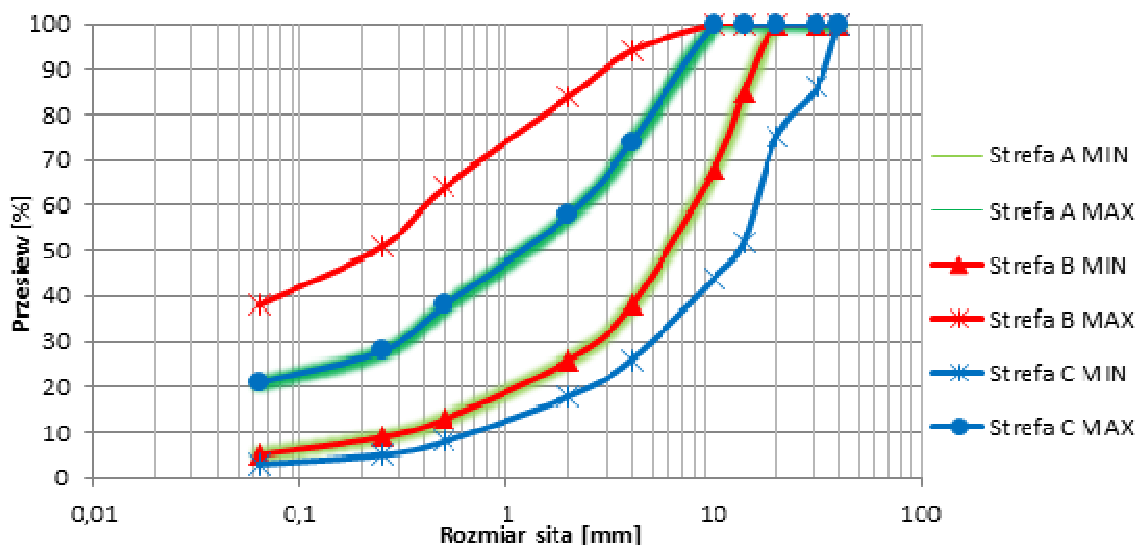
Zastosowana emulsja musi spełniać wymagania normy BS 434-1 i być używana zgodnie z BS 434-2. Minimalna zawartość asfaltu pozostałego po rozpadzie emulsji powinna wynosić 3% dla mieszanek wykonanych w wytwórni i 4 % dla mieszanek wykonanych na miejscu [24].

3.7.2 Projektowanie składu mieszanki

Uziarnienie destruktu, kruszywa doziarniającego i cementu powinno mieścić się w jednej z trzech stref uziarnienia. Wartości przesiewu dla stref A, B oraz C przedstawia tablica 3.9 oraz rysunek 3.10 [24].

Tablica 3.9. Wartości przesiewu dla poszczególnych stref uziarnienia [24]

Sito [mm]	Przesiew [%]					
	Strefa A		Strefa B		Strefa C	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
40	100	100	100	100	100	100
31,5	100	100	100	100	86	100
20	100	100	100	100	75	100
14	85	100	85	100	52	100
10	68	100	68	100	44	100
4	38	74	38	94	26	74
2	26	58	26	84	18	58
0,5	13	38	13	64	8	38
0,25	9	28	9	51	5	28
0,063	5	21	5	38	3	21



Rysunek 3.10. Strefy uziarnienia mieszanki według wytycznych brytyjskich

Strefa A jest częścią wspólną stref B i C. W celu dokładniejszego opisu wprowadzono następujące nazewnictwo:

- strefa D – część strefy B nie będąca częścią wspólną ze strefą C,
- strefa E – część strefy C nie będąca częścią wspólną ze strefą B.

Mieszanka, której przesiew znajduje się w strefie D jest uziarniona drobniej od mieszanki, której przesiew mieści się w strefie A. Może ona być stosowana w procesie recyklingu metodą na zimno tylko i wyłącznie, gdy możliwe jest stworzenie jednorodnej mieszanki MCE. Mieszanka, której przesiew znajduje się w strefie E jest uziarniona grubiej od mieszanki, której przesiew mieści się w strefie A. Ze względu na większe ryzyko segregacji, materiały z tej strefy mogą być wykorzystywane tylko podczas recyklingu na miejscu [18].

3.7.3 Wykonywanie próbek i ich kondycjonowanie

Próbki, które formuje się do badań mają średnicę 150 mm. Zagęszczają je według normy BS 598 (część 104). Maksymalny czas pomiędzy końcem procesu mieszania i początkiem zagęszczania powinien być ograniczony do minimum. Jego maksymalna wartość to 2 godziny.

Wytworzone próbki powinny być kondycjonowane w powietrzu przez 28 dni w temperaturze $+40\pm 2^{\circ}\text{C}$ [24].

3.7.4 Badania oraz wymagania

Głównym badaniem wykonywanym na przygotowanych w laboratorium próbkach jest moduł sztywności sprężystej, Określany po kondycjonowaniu próbek przez 28 dni. Aby uzyskać wartość spodziewaną po 360 dniach stosuje się współczynnik przeliczeniowy, który dla mieszanek MCE wynosi 1,2.

Wymagania dla modułu sztywności sprężystej ITSM są zależne od klasy mieszanki. Określa się je po 360 dniach od wbudowania warstwy z mieszanki MCE. Wynoszą one odpowiednio:

- 1900 MPa – dla mieszanek klasy B1,
- 2500 MPa – dla mieszanek klasy B2,
- 3100 MPa – dla mieszanek klasy B3.

Jeśli wymagane są informacje dotyczące wrażliwości na działanie wody, to należy wykonać dodatkowe próbki, które po 28 dniach kondycjonowania umieszcza się w wodzie o temperaturze $+20\pm 2^{\circ}\text{C}$ na okres 7 dni. Nie powinny one wykazywać oznak pęknięcia oraz pęcznienia, a ich parametry powinny być nie mniejsze niż 80% wartości dla próbek w tym samym wieku, lecz niepoddanych działaniu wody [24].

3.8 Ocena wpływu zawartości cementu na właściwości mieszanek MCE na podstawie chińskich wytycznych

W artykule “The Impact of Cement Contents on the Properties of Asphalt Emulsion Stabilized Cold Recycling Mixtures” autorstwa Jian Xu, Songchang Huang, Yongchun Qin oraz Feng Li [30], analizowano jaki jest wpływ zawartości cementu portlandzkiego na właściwości mieszanki MCE.

W ciągu ostatnich 10 lat w Chinach odnotowano znaczny wzrost w stosowaniu mieszanek MCE. W większości krajów na świecie nie są one stosowane do wykonywania podbudów dla dróg o dużym natężeniu ruchu, natomiast w Chinach wykorzystuje się je również do budowy dróg ekspresowych (zazwyczaj w budowlanej warstwie z MMA o grubości zaledwie 6÷15 cm). W związku z tym, mieszanki MCE muszą posiadać następujące właściwości [30]:

- szybkie tempo wzrostu wytrzymałości początkowej,
- duża odporność na koleinowanie, nawet dla zwiększonych obciążeń, których występowanie w Chinach jest powszechne,
- wytrzymałość na spękania niskotemperaturowe, szczególnie ważne ze względu na trudne warunki klimatyczne panujące w Chinach.

Właściwościami, względem których badano wpływ zawartości cementu portlandzkiego na cechy mieszanki MCE, były:

- tempo wzrostu wytrzymałości początkowej,
- wrażliwość na działanie wody,
- odporność na koleinowanie,
- odporność na spękania.

Przeanalizowano mieszanki MCE o różnych zawartościach cementu i odmiennych sposobach kondycjonowania. W celu weryfikacji założonych cech mieszanki MCE wykonano badania:

- wytrzymałość na pośrednie rozciąganie (ITS) w $+15^{\circ}\text{C}$,
- wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu w -10°C ,
- odporność na koleinowanie w temperaturze $+60^{\circ}\text{C}$.

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Uziarnienie mieszanki MCE, dla której wykonano badania przedstawiono na rysunku 3.11. Zastosowano następujący skład mieszanki:

- 75% destruktu,
- 20% kruszywa odziarniającego,
- 5% z wypełniacza.

Sieve Size (mm)	Percentage Passing Each Sieve by Weight (%)				Gradation Band of Chinese MOT Spec. JTJG F41 [11]	
	RAP	Virgin Aggregate	Mineral Filler	Combined Gradation	Low Limit	High Limit
	26.5	100	100	100	100	100
19	89	100	100	91.8	90	100
9.5	56.6	100	100	67.5	60	80
4.75	31.6	85.3	100	45.8	35	65
2.36	18.9	60.4	100	31.3	20	50
0.3	6.3	17.7	100	13.3	3	21
0.075	3	5.4	90	7.8	2	8
Proportion (%)	75	20	5	-	-	-

Rysunek 3.11. Uziarnienie mieszanki MCE, która została poddana badaniom

Skład emulsja asfaltowej, która została wykorzystana do wytworzenia mieszanki MCE poddanej badaniom przedstawiono na rysunku 3.12.

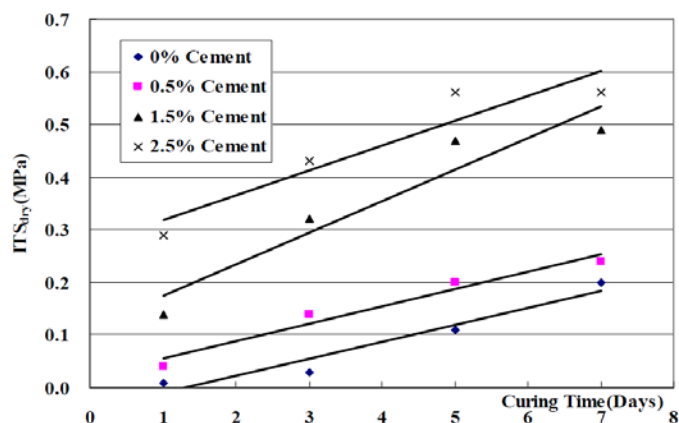
Ingredient	Percentage (%)
Asphalt (60/90 pen, From CNOOC)	63
Emulsifier (PC-55, from MeadWestvaco)	1.6
Water phase	35.4
Hydrochloric acid	Until pH value of water phase reaches 2.0

Rysunek 3.12. Skład emulsji wykorzystanej do wykonania mieszanki MCE poddanej badaniom

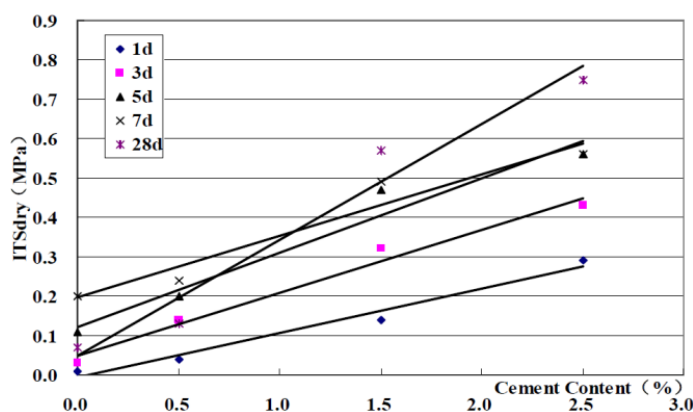
Po wykonaniu badań, autorzy opracowania przedstawili następujące wnioski:

- Wyniki wykazały, że wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie wzrastały liniowo wraz ze wzrostem zawartości cementu i długością czasu kondycjonowania (zarówno dla próbek kondycjonowanych w wodzie, jak i w powietrzu). Rysunek 3.13 przedstawia zależność wytrzymałości na pośrednie rozciąganie od czasu kondycjonowania próbek, natomiast na rysunku 3.14 pokazano zależność wytrzymałości na pośrednie rozciąganie od zawartości cementu.

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

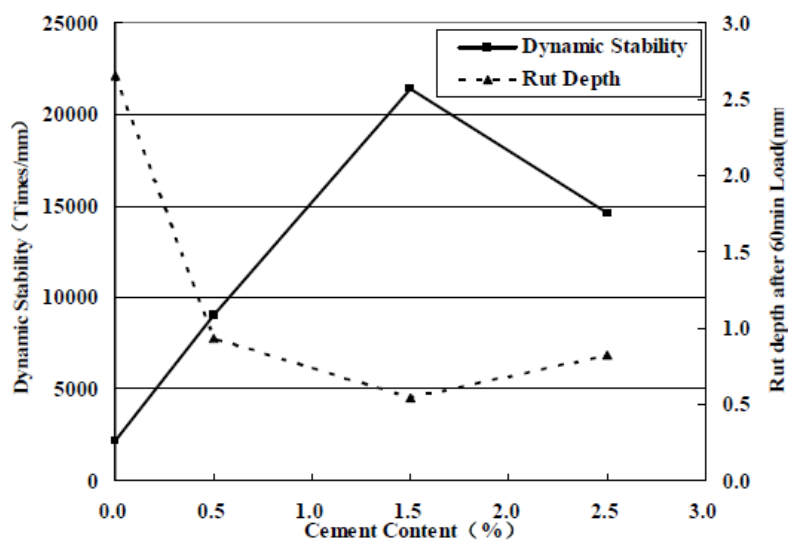


Rysunek 3.13. Zależność wytrzymałości na pośrednie rozciąganie od czasu kondycjonowania próbek



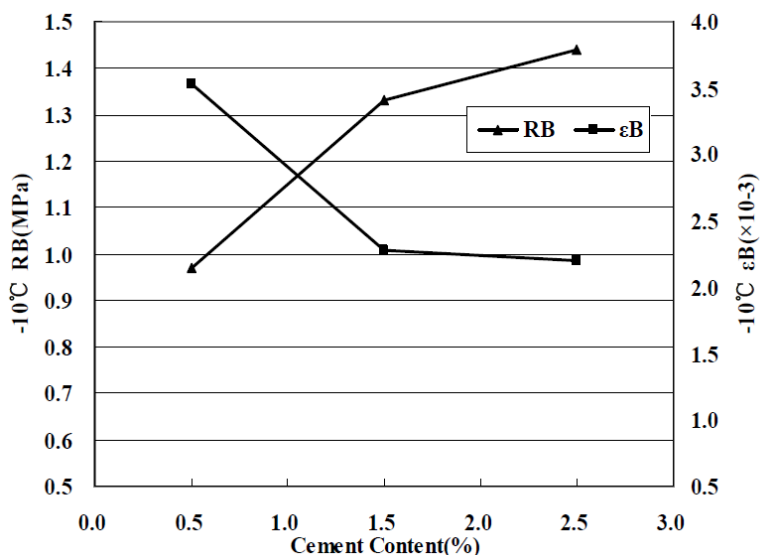
Rysunek 3.14. Zależność wytrzymałości na pośrednie rozciąganie od zawartości cementu

- Zawartość cementu miała większy wpływ na wartość ITS dla próbek kondycjonowanych w wodzie niż dla próbek suchych.
- Zwiększenie zawartości cementu podwyższa odporność na działanie wody oraz zwiększa tempo wzrostu wytrzymałości.
- Próbki o zawartości cementu mniejszej niż 0,5% wykazywały małą odporność na działanie wody i niewielkie tempo wzrostu wytrzymałości początkowej.
- Próbki o zawartości wagowej cementu wynoszącej 1,5% wykazywały większą odporność na koleinowanie niż próbki o zawartości cementu 0%, 0,5% oraz 2,5%. Autorzy wyjaśniają spadek odporności dla zawartości cementu wynoszącej 2,5% tym, że mieszanka jest zbyt sztywna, a tym samym trudna do skutecznego zagęszczenia. Zależność pomiędzy stabilnością próbki podczas badania koleinowania a zawartością cementu przedstawiono na rysunku 3.15.



Rysunek 3.15. Zależność pomiędzy stabilnością próbek podczas koleinowania a zawartością cementu

- Wraz ze wzrostem zawartości cementu, rośnie również maksymalna wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu (w -10°C), jednak odkształcenie spada. Zakładając, że uszkodzenia w warstwach MCE powodowane są nadmiernym odkształceniem, zbyt wysoka zawartość cementu nie jest zalecana. Wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu i odkształcenia wykazują znaczną zmianę dla mieszanek MCE o zawartości cementu do 1,5%. Dodawanie większej ilości cementu nie jest konieczne. Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz odkształcenia w zależności od zawartości cementu przedstawiono na rysunku 3.16.



Rysunek 3.16. Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz odkształcenia w zależności od zawartości cementu

- Cement zawarty w mieszance MCE powoduje, że wymaga ona pewnej ilości czasu, do osiągnięcia swoich optymalnych parametrów. Przyspieszone metody kondycjonowania próbek, mogą skutkować tym, że podczas badań nie będą odzwierciedlone rzeczywiste właściwości mieszanki MCE.
- Wszystkie próbki zawierające cement spełniły wymogi chińskich specyfikacji dotyczące odporności na koleinowanie. Oznacza to, że mieszanki MCE są odporne na działanie podwyższonych temperatur.
- Stwierdzono, że cement portlandzki jest konieczny do zwiększenia tempa wzrostu wytrzymałości początkowej i poprawy zarówno odporności na działanie wody jak i odporności na koleinowanie w podwyższonych temperaturach. Zbyt wysoka zawartość cementu prowadzi jednak do możliwości powstania spękań odbitych.
- Autorzy opracowania sugerują, że optymalna zawartość cementu w mieszance MCE wynosi około 1,5%.

3.9 Porównanie metod projektowania mieszanek MCE na świecie

Na podstawie przeprowadzonych studiów literatury można stwierdzić, że istnieje szereg różnych metod wykonywania, kondycjonowania i badania mieszanek MCE. Jest to technologia, która wykorzystywana jest coraz częściej na całym świecie. W tej części raportu porównano i podsumowano poszczególne etapy projektowania składu mieszanek MCE.

3.9.1 Dobór składu mieszanki

Zawartość emulsji

Porównując wymagania dotyczące zawartości lepiszcza bitumicznego w Polsce i pozostałych krajach wymienionych w syntezie literatury, można zauważyć, że:

- Polskie wytyczne zakładają zawartość emulsji asfaltowej od 3,0% do 5,5%.
- Wytyczne niemieckie podają większy zakres ilości emulsji w mieszance – od 2,0% do 6,0%.
- W zaleceniach brytyjskich bierze się pod uwagę zawartość asfaltu pozostałego po rozpadzie emulsji, która powinna wynosić co najmniej 3,0% dla mieszanek wykonywanych w wytwórni oraz 4,0% dla mieszanek wykonywanych na miejscu.
- W Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej podczas określania rodzaju asfaltu w emulsji zwraca się uwagę na cechy lepiszcza w destrukcie. Ilość nowego asfaltu wymagana do recyklingu na zimno na miejscu podczas stosowania emulsji asfaltowych zazwyczaj waha się od 0,3% do 2,0%. Większa ilość potrzebna jest, gdy do mieszanki dodane zostało kruszywo odziarniające.
- Wytyczne firmy Chevron (USA) podają, że w celu ustalenia ostatecznego składu mieszanki wybiera się projekt o najmniejszej zawartości emulsji asfaltowej, dla którego spełnione są kryteria projektowe dotyczące modułu sztywności, stabilności oraz kohezji, a zawartość emulsji nie może być mniejsza niż 2,0%.
- Polskie wytyczne podają dodatkowe warunki:

- maksymalna sumaryczna ilość lepiszcza bitumicznego (łącznie z asfaltem wytrąconym z emulsji) powinna wynosić 6,0% (m/m) dla mieszanek o uziarnieniu od 0/12 do 0/31,5 mm oraz 5,5% (m/m) dla mieszanek o uziarnieniu 0/63 mm,
- zawartość lepiszcza bitumicznego (starego) we wbudowywanej mieszance MCE nie powinna przekraczać 4,0% (m/m).

Zawartość cementu

Cement, podobnie jak emulsja asfaltowa może pozytywnie lub negatywnie wpłynąć na właściwości mieszanki MCE. Zbyt mała ilość cementu może skutkować znaczną podatnością mieszanki, natomiast zbyt duża nadmiernym usztywnieniem, co w konsekwencji może prowadzić do występowania spękań odbitych. Rolą cementu jest nie tylko zapewnienie odpowiedniej sztywności, ale także wzrost odporności na działanie wody, zwiększenie ilości drobnych frakcji (których często brakuje w recyklowanym materiale) oraz przyspieszenie rozpadu emulsji. Porównując wymagania dotyczące zawartości cementu w Polsce i pozostałych krajach wymienionych w syntezie literatury, można zauważyć, że:

- Minimalna zawartość cementu w mieszance według polskich wytycznych powinna wynosić 1,5% (m/m), natomiast maksymalna 4,0% (m/m) dla destruktu asfaltowego lub 7,0% (m/m) dla destruktu z lepiszczem smołowym.
- Zalecenia brytyjskie podają tylko minimalną zawartość cementu, która powinna wynosić 1%. Sugerują jednak, że należy zachować ostrożność podczas projektowania mieszanek MCE, gdyż mimo wyraźnych korzyści, zbyt duży dodatek cementu może skutkować powstaniem spękań termicznych.
- Orientacyjna ilość cementu, zalecana według wytycznych niemieckich jest zdecydowanie większa niż w Polsce i wynosi od 3,0% do 6,0% [m/m],
- W części krajów nie zakłada się dodatku cementu podczas wykonywania recyklingu metodą na zimno (np. projekt PARAMIX) w celu uzyskania większej wytrzymałości.
- Autorzy zaleceń PIARC twierdzą, że optymalna pod względem ekonomicznym i technologicznym zawartość cementu w mieszance mineralno – cementowej to 2%. Uważają oni, iż mieszanki z zawartością cementu większą niż 2%, mają właściwości zbliżone do stabilizacji cementem.
- Autorzy opracowania “The Impact of Cement Contents on the Properties of Asphalt Emulsion Stabilized Cold Recycling Mixtures” sugerują, że optymalna zawartość cementu w mieszance MCE wynosi około 1,5%. Stwierdzili, że cement jest konieczny do zwiększenia tempa wzrostu wytrzymałości początkowej i poprawy zarówno odporności na działanie wody jak i odporności na koleinowanie w podwyższonych temperaturach.

Uziarnienie mieszanki mineralnej

Bardzo ważnym etapem projektowania składu mieszanki MCE jest dobór odpowiedniego uziarnienia mieszanki mineralnej. Mieszanka destruktu, cementu oraz kruszywa powinna mieścić się w krzywych granicznych uziarnienia. Według polskich wytycznych wyróżnia się dwa zakresy uziarnienia granicznego, w zależności od kategorii ruchu drogi, na której dana mieszanka będzie wbudowywana. Dla kategorii ruchu od KR1 do KR2 dopuszcza się drobniejsze uziarnienie mieszanki mineralnej niż dla kategorii ruchu od KR3 do KR6.

W wytycznych niemieckich nie określono krzywych granicznych. Zalecono, aby mieszanka miała ciągłe uziarnienie oraz spełniała warunki minimalnej i maksymalnej wartości przesiewu na sitach 45,0 mm, 2,0 mm oraz 0,09 mm (warunek zalecany jedynie przy mieszankach o dominujących wiązaniach bitumicznych).

Według wytycznych brytyjskich uziarnienie destruktu, kruszywa doziarniającego i cementu powinno mieścić się w jednej z trzech stref uziarnienia. Mieszanka znajdująca się w strefie środkowej ma uziarnienie optymalne. Mieszanka uziarniona drobniej może być stosowana w procesie recyklingu metodą na zimno tylko i wyłącznie, gdy możliwe jest stworzenie jednorodnej mieszanki MCE. Mieszanka uziarniona grubiej może być wykorzystywana tylko podczas recyklingu na miejscu, ze względu na większe ryzyko segregacji.

W Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej nie ma ściśle określonej metody doboru uziarnienia mieszanki mineralnej. Metoda projektowania mieszanek wg stanu Kalifornia podaje, że destruktu powinien mieć odpowiednie uziarnienie, określone na podstawie przesiewu poprzez sita 38 mm, 25 mm, 20 mm, 9,5 mm oraz 4,75 mm. Zgodnie z metodą C (oznaczenie Oregon) zawartą w wytycznych ARRA, uziarnienie destruktu określa się poprzez przesiew na sitach o średnicy oczek 12,5 mm, 6,3 mm i 2,0 mm. Według raportu, wydanego na podstawie doświadczeń ze stosowania recyklingu nawierzchni w stanie Minnesota, należy wykonać co najmniej 2 projekty mieszanki MCE o różnym uziarnieniu: mieszankę o średnim uziarnieniu oraz co najmniej jedną: o drobnym lub o grubym uziarnieniu. Wartości przesiewu dla tych mieszanek określa się na sitach 31,5 mm, 25,0 mm, 19,0 mm, 4,75 mm, 0,6mm oraz 0,075 mm.

Mieszanka mineralno-cementowa, której przesiew mieści się w polskich granicznych krzywych uziarnienia, spełnia również wymagania dotyczące uziarnienia w większości innych państw. Zbyt wąski przedział dopuszczalnych krzywych uziarnienia może skutkować koniecznością znacznego doziarnienia mieszanki, co wiąże się ze zmniejszeniem opłacalności ekonomicznej stosowania warstw z mieszanek MCE.

Wilgotność optymalna

Kolejnym ważnym etapem projektowania składu mieszanek MCE jest wyznaczenie wilgotności optymalnej. Zbyt mała wilgotność może skutkować nieoptymalnym zagęszczeniem mieszanki ze względu na mniejszą możliwość wzajemnego przemieszczania się jej ziaren. Zbyt duża wilgotność może natomiast powodować nieoptymalne zagęszczenie ze względu na rozpychanie przez płyny ziaren mieszanki mineralnej. Składnikiem odpowiedzialnym za optymalne ułożenie ziaren szkieletu w mieszance MCE jest oprócz wody również emulsja asfaltowa. W związku z tym, powinna być ona także uwzględniana podczas wyznaczania ilości wody potrzebnej do dodania w celu uzyskania maksymalnej gęstości objętościowej mieszanki MCE.

W Polsce na optymalną zawartość płynów składa się woda zawarta w destrukcie, woda dodana do mieszanki oraz woda zawarta w emulsji asfaltowej. Nie uwzględnia się asfaltu znajdującego się w emulsji asfaltowej. Inne podejście można znaleźć w wytycznych niemieckich. Oprócz wody zawartej w destrukcie, wody dodanej do

mieszanki oraz wody zawartej w emulsji asfaltowej uwzględnia się również połowę zawartości asfaltu z emulsji. Jeszcze inne podejście do określenia wilgotności optymalnej można znaleźć w wytycznych szwedzkich oraz zaleceniach PIARC. Według nich uwzględnia się całkowitą zawartość płynów, czyli wodę znajdującą się w materiałach pochodzących z recyklingu, wodę dodaną oraz emulsję bitumiczną przed rozpadem.

Istnieje wiele wariantów wyznaczania wilgotności optymalnej. W Polsce określa się ją według normalnej lub zmodyfikowanej metody Proctora. Wilgotność, przy której uzyskuje się maksymalną gęstość szkieletu mieszanki, określona metodą zmodyfikowaną jest jednocześnie wilgotnością optymalną. Jeśli badanie zostało wykonane metodą normalną, to wilgotność optymalną uzyskuje się poprzez zmniejszenie o około 2% wilgotności, przy której uzyskuje się maksymalną gęstość szkieletu mieszanki. Podobne podejście można znaleźć w raporcie PARAMIX oraz zaleceniach PIARC. Wilgotność optymalna określana jest w tych wytycznych według zmodyfikowanej metody Proctora. W Szwecji wilgotność optymalna może być określona na dwa sposoby: na podstawie zmodyfikowanej metody Proctora lub metody Marshalla. Metody opisane powyżej posiadają jednak szereg wad. Główną z nich jest rozkruszanie ziaren destruktu podczas przeprowadzania badania. Ponadto, metoda Proctora służy głównie do określania wilgotności optymalnej dla gruntów, czyli materiałów zawierających więcej frakcji drobnych niż mieszanka MCE. Zbyt duża zawartość frakcji grubych (powyżej 10 mm dla cylindra o objętości 2,2 dm³) powoduje konieczność zmniejszenia uzyskanej wilgotności ze względu na mniejszą powierzchnię właściwą ziaren o większych wymiarach. W Niemczech, wilgotność optymalną wyznacza się stosując zagęszczanie metodą statyczną, ze względu na mniejsze pokruszenie ziaren destruktu. Określa się ją na podstawie maksymalnej gęstości objętościowej mieszanki mineralno-cementowej dla różnych zawartości wody (bez dodatku emulsji asfaltowej). Odmienne podejście można znaleźć w metodzie projektowania mieszanek używanych do recyklingu na zimno w stanie Pensylwania. Według niej przeprowadza się dwie serie testów. W pierwszej z nich dla stałej zawartości emulsji asfaltowej i zmiennej zawartości wody bada się otoczenie ziaren mieszanki. Na tej podstawie ustalana jest wilgotność optymalna. W drugiej serii testów określa się optymalną zawartość emulsji na podstawie badania modułów sztywności dla zagęszczonych próbek.

3.9.2 Wykonanie próbek

Wykonanie próbek w laboratorium ma na celu jak najlepsze odwzorowanie parametrów mieszanki MCE, wbudowanej w konstrukcję nawierzchni. Na świecie stosuje się kilka metod zagęszczania. Każda z nich posiada swoje zalety oraz wady.

Zagęszczanie ubijakiem Marshalla

Do zagęszczania próbek używa się form oraz ubijaka Marshalla. Próbka po zagęszczeniu powinna mieć średnicę 101,6 mm oraz wysokość 63,5±3,0 mm. Formy powinny być perforowane, posiadać odpowiednio rozmieszczone otwory. Polskie wytyczne precyzują ich ilość, która wynosi 24 otwory na ściance formy oraz po 16 w podstawie i tłoku. Ich średnica to 2 mm. Brak perforacji mógłby powodować znaczne tłumienie energii przekazywanej przez ubijak, poprzez płyny zawarte w mieszance. Według polskich zaleceń, w celu zagęszczenia stosuje się 75 uderzeń ubijaka na

każdą ze stron próbki, z częstotliwością 60 uderzeń na minutę. Zgodnie z wytycznymi ARRA (Metoda A, zmodyfikowanego Marshalla), zagęszczanie wykonuje się przy pomocy 50 uderzeń na stronę próbki. Zaletą zagęszczania próbek ubijakiem Marshalla jest dostępność sprzętu. Znajduje się on w każdym laboratorium, w którym przeprowadza się badania mieszanek mineralno – asfaltowych. Analizowany sposób zagęszczania ma jednak szereg wad. Główną z nich jest rozkruszanie ziaren destruktu, skutkujące zmianą uziarnienia mieszanki w porównaniu z uziarnieniem mieszanki wbudowanej na drodze. Kolejną wadą jest niewielki wymiar form użytych do zagęszczania próbek w porównaniu z wymiarami ziaren destruktu. Może skutkować to znaczną niejednorodnością próbek. Następną wadą zagęszczania próbek ubijakiem Marshalla jest tłumienie energii przekazywanej przez młot. Pomimo zastosowania form perforowanych, płyny w momencie uderzenia pochłaniają część energii, co skutkuje zmniejszeniem gęstości objętościowej i zwiększeniem ilości wolnych przestrzeni w próbce. W konsekwencji, próbka zagęszczona w laboratorium ma gorsze parametry wytrzymałościowe niż warstwa z mieszanki MCE, która została wykonana w terenie.

Zagęszczanie statyczne

Kolejnym sposobem zagęszczania próbek w laboratorium jest zagęszczanie przy pomocy prasy statycznej. W przeanalizowanej literaturze można wyróżnić dwie metody zagęszczania statycznego. Pierwszą z nich jest przyłożenie stałej siły i utrzymywanie jej przez określony czas. Według polskich wytycznych na próbki umieszczone w perforowanych formach wywiera się stały nacisk o wartości 100 kN przez 5 minut. Próbki po zagęszczeniu powinny mieć średnicę 101,6 mm oraz wysokość $63,5 \pm 3,0$ mm. Według wytycznych programu PARAMIX wartość siły powinna wynosić 60 kN, a czas obciążenia 2 minuty. Próbki uzyskane w wyniku takiego zagęszczania powinny mieć wysokość mieszczącą się w przedziale $50 \div 60$ mm. Drugim sposobem zagęszczania statycznego jest metoda cykliczna zawarta w wytycznych niemieckich. Na próbkę o średnicy 150 mm wywierany jest nacisk o wartości 49 kN (2,8 MPa). Po obciążeniu następuje spadek ciśnienia związany z plastycznym zachowaniem mieszanki. Gdy ciśnienie nie zmienia już swojej wartości, osiągnięte zostało dolne graniczne ciśnienie lub minęły 2 minut od momentu ostatniego przyłożenia obciążenia, należy ponownie przyłożyć siłę wynoszącą 49 kN. Zagęszczanie uznaje się za zakończone w momencie, gdy końcowa wartość obciążenia będzie stała i wyniesie minimum 45 kN (2,6 MPa). Najczęściej ciśnienie 2,6 MPa osiągnane jest po $5 \div 7$ cyklach. Zagęszczanie sposobem statycznym nie powoduje tak znacznego rozkruszania ziaren destruktu, jakie można zaobserwować podczas zagęszczania udarowego. Nie następuje także tłumienie energii przekazywanej na próbkę. W konsekwencji, próbka zagęszczona w prasie statycznej ma lepsze parametry wytrzymałościowe niż próbka zagęszczona w ubijaku Marshalla. Jej gęstość objętościowa oraz zawartość wolnych przestrzeni są porównywalne z wartościami uzyskanymi podczas wykonywania warstw z mieszanek mineralno – cementowo – emulsyjnych w terenie. Kolejną zaletą zagęszczania statycznego w porównaniu z zagęszczaniem w ubijaku Marshalla jest możliwość wykonywania próbek o większych wymiarach ($d=150$ mm), co zmniejsza niejednorodność wytworzonych próbek.

Zagęszczanie w prasie żyratorowej

Następny sposób zagęszczania wykorzystuje prasę żyratorową. Proces zagęszczania polega na przyłożeniu obciążenia pionowego, na próbkę znajdującą się w specjalnej formie, z jednoczesnym wychyleniem jej osi od pionu o kąt Φ . Podczas zagęszczania próbki, jej płaszczyzny końcowe pozostają w poziomie. Forma wykonuje ruch okrężny, w efekcie czego oś podłużna próbki zatacza łuk, tworząc obwiednię stożka. Próbka nie wykonuje obrotu wokół własnej osi. Parametrami charakteryzującymi proces zagęszczania są:

- obciążenie pionowe,
- kąt odchylenia osi próbki od pionu,
- liczba wykonanych obrotów.

Dwa pierwsze parametry w większości krajów nie różnią się od tych, które wykorzystuje się podczas zagęszczania mieszanek mineralno asfaltowych i wynoszą:

- obciążenie pionowe równe 600 kPa,
- kąt odchylenia osi próbki od pionu równy $1,25^\circ$.

Wyjątkiem jest Szwecja. W raporcie PARAMIX można znaleźć adnotację, że ciśnienie zagęszczania powinno wynosić 1,0 MPa przy kącie żyratorowym równym 2° . Znaczne rozbieżności można natomiast znaleźć w liczbie obrotów, służących do zagęszczenia próbek. Według zaleceń projektowania mieszanek MCE stanu Minnesota, liczba obrotów powinna wynosić 30 (próbki o średnicy 100 mm i zalecanej wysokości od 61 mm do 66 mm). Według raportu PARAMIX proces zagęszczania należy zakończyć po osiągnięciu 300 obrotów (próbki o średnicy 101,6 mm i wysokości mieszczącej się w przedziale 50÷60 mm). W Szwecji, ilość obrotów powinna wynosić 35 (próbki o średnicy 150 mm, zagęszczane w formie perforowanej). Jeszcze inną wartość można znaleźć w pracach R.B. Mallick'a, według których odpowiednie zagęszczenie uzyskiwane jest po osiągnięciu 50 lub 75 obrotów. Dziesięciokrotna różnica w ilości obrotów koniecznych do zagęszczenia próbek (przy jednakowym ciśnieniu i kącie żyratorowym) powoduje potrzebę sprecyzowania tego parametru, to znaczy znalezienia takiej ilości obrotów, która spowoduje uzyskanie gęstości objętościowej równej gęstości uzyskiwanej podczas wykonywania warstwy w terenie. Zagęszczanie w prasie żyratorowej nie powoduje tak znacznego rozkruszania ziaren destruktu, jakie można zaobserwować podczas zagęszczania udarowego. Należy jednak zwrócić uwagę na znacznie mniejszą dostępność tego sprzętu, w porównaniu z ubijakami Marshalla.

Zagęszczanie w urządzeniu kneading compactor

Kolejnym urządzeniem służącym do zagęszczania mieszanek MCE jest urządzenie kneading compactor. Jest ono wykorzystywane podczas projektowania mieszanek używanych do recyklingu na zimno w Stanach Zjednoczonych (wytyczne ARRA, metoda B, zmodyfikowanego Hveema). Metoda zagęszczania urządzeniem kneading compactor polega na uderzaniu próbki na górze w pobliżu krawędzi przez trzpień o powierzchni 20 cm^2 . Podstawa obraca się o kąt 60° po każdym uderzeniu. W celu osiągnięcia stanu „pół-zagęszczonego” stosuje się 20 uderzeń trzpienia przy ciśnieniu 1,725 MPa. Następnie wykonuje się 150 uderzeń trzpienia przy ciśnieniu 3,45 MPa. Po zagęszczeniu uzyskuje się próbki o średnicy 4 cali (101,6 mm) i wysokości około 2,5 cala (63,5 mm). Urządzenie to nie ma dużych szans na zastosowanie podczas projektowania mieszanek MCE w warunkach polskich, głównie ze względu na dostępność sprzętu. Kolejną wadą jest rozkruszanie ziaren

destruktu, skutkujące zmianą uziarnienia mieszanki w porównaniu z uziarnieniem mieszanki wbudowanej na drodze.

3.9.3 Kondycjonowanie próbek

Czas kondycjonowania próbek wykonanych z mieszanek używanych podczas recyklingu metodą na zimno zależy głównie od użytych spoiw. Mieszanki nie zawierające cementu osiągają maksymalną wytrzymałość w momencie wyparowania wody. Parametry materiałowe mieszanek zawierających cement osiągają swoje maksymalne wartości w momencie zakończenia procesu wiązania spoiwa hydraulicznego. Ocena właściwości mieszanek powinna następować w momencie, gdy osiągną one swoje wartości ekstremalne lub gdy ich dalszy wzrost będzie nieznaczący.

Mieszanki mineralno-emulsyjne pielęgnuje się zdecydowanie krócej niż mieszanki MCE. Zalecenia programu PARAMIX zakładają pielęgnację w powietrzu, w temperaturze $+60^{\circ}\text{C}$ przez okres 3 dni, wytyczne szwedzkie w temperaturze $+40^{\circ}\text{C}$ przez okres 7 dni lub $+60^{\circ}\text{C}$ przez 4 dni. W Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej, kondycjonowanie w $+60^{\circ}\text{C}$ trwa w większości przypadków tylko 2-3 dni, w zależności od metody projektowania.

W Polsce, okres pielęgnacji próbek z mieszanek MCE zależy od sposobu zagęszczania i wynosi 28 dni dla próbek zagęszczanych ubijakiem Marshalla lub 7 dni dla próbek zagęszczanych w prasie hydraulicznej. Temperatura pielęgnacji w obu przypadkach jest jednakowa i wynosi $+20\pm 5^{\circ}\text{C}$. Miejsce przechowywania próbek nie powinno być narażone na promieniowanie słoneczne. W wytycznych nie jest określona wilgotność, w jakiej należy kondycjonować próbkę.

Według wytycznych brytyjskich, próbki z mieszanek MCE powinny być kondycjonowane w powietrzu przez 28 dni w temperaturze $+40\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Wytyczne niemieckie podchodzą do sposobu pielęgnacji próbek z mieszanek MCE w sposób bardziej dokładny. Wyjęcie próbek z form powinno nastąpić dzień po zagęszczeniu. Następnie należy je przechowywać przez 2 dni w temperaturze $+20\pm 2^{\circ}\text{C}$ przy minimalnej wilgotności względnej wynoszącej 95%. Po tym czasie wilgotność przechowywania powinna wynosić od 40% do 70%. Badania wytrzymałości na pośrednie rozciąganie przeprowadza się po 7 i 28 dniach. Wytyczne niemieckie przewidują również badanie wrażliwości mieszanki na działanie wody. W tym celu, określona ilość próbek w 14 dniu kondycjonowania umieszczana jest na okres kolejnych 14 dni w wodzie o temperaturze $+20\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Polska metoda kondycjonowania próbek z mieszanek MCE budzi kilka wątpliwości:

- Nie określa wilgotności, w jakich próbki powinny być przechowywane. Zbyt mała wilgotność może skutkować powstaniem rys skurczowych, a tym samym zmniejszeniem wartości parametrów wytrzymałościowych próbki.
- Skrócenie czasu pielęgnacji do 7 dni w przypadku zagęszczania w prasie hydraulicznej może skutkować tym, że podczas badań nie będą odzwierciedlane rzeczywiste właściwości mieszanek.

- Bardzo ważnym parametrem, którego brakuje w polskich wytycznych jest badanie wpływu wody na cechy mieszanek.

Metodą kondycjonowania, w której spełnione są wszystkie powyższe uwagi jest metoda niemiecka.

3.9.4 Badania cech mieszanek MCE

Badania oraz ocenę właściwości mieszanek MCE przeprowadzana się na świecie według różnych metod. Należy zwrócić uwagę na fakt, iż w przypadku projektowania mieszanek MCE projektant ma ograniczone możliwości uzyskania zadanych właściwości mechanicznych. Spowodowane jest to tym, że właściwości te określone są w znacznym stopniu przez materiały pochodzące z recyklingu. Należy również zauważyć, że wartości parametrów określane w laboratorium mogą znacznie różnić się od rzeczywistych.

Stabilność i odkształcenie według Marshalla

W Polsce badanie wykonuje się w temperaturze +60°C. Według wytycznych ARRA (metoda A, zmodyfikowanego Marshalla) temperatura badania również powinna wynosić +60°C. Inne źródła amerykańskie (wytyczne ze stanu Minnesota) podają, że stabilność Marshalla powinno się określać w +40°C (po 2 godzinnym przechowywaniu w komorze termostatycznej). Wytyczne projektowania mieszanek mineralno-emulsyjnych ze Szwecji podają, aby temperatura ta wynosiła +25°C. W Polsce wymagane wartości stabilności dla mieszanek MCE zależą od kategorii ruchu drogi, na której dana mieszanka ma być wbudowana i wynoszą:

- 4,0÷20,0 kN dla dróg o kategorii ruchu od KR1 do KR2,
- 8,0÷20,0 kN dla dróg o kategorii ruchu od KR3 do KR6.

Według wytycznych ze stanu Minnesota stabilność Marshalla powinna wynosić nie mniej niż 5,6 kN. W Szwecji zaleca się, aby podbudowa z mieszanki mineralno-emulsyjnej miała stabilność większą niż 7,0 kN (w +25°C). Dodatkowym parametrem określającym w stanie Minnesota jest spadek wartości stabilności Marshalla po przechowywaniu w wodzie w temperaturze +25°C przez 23 godziny, a następnie przez godzinę w +40°C. Nie powinien on być większy (w porównaniu do próbki suchej) niż 30%. W Polsce dodatkowo określa się odkształcenie badanej próbki, które powinno wynosić od 1,0 do 3,5 mm. Nie jest ono zależne od kategorii ruchu drogi, na której dana mieszanka ma być wbudowana. Po analizie literatury stwierdzono, że badanie stabilności i odkształcenia dla mieszanek MCE wykonywane jest tylko w Polsce. W innych krajach wykonuje się to badanie dla mieszanek mineralno-emulsyjnych. Jednocześnie polskie wymagania dotyczące stabilności są bardzo wygórowane. W celu ich spełnienia konieczne jest zastosowanie znacznej ilości cementu, co w konsekwencji może skutkować powstaniem spękań skurczowych oraz przeniesieniem się ich na górne warstwy nawierzchni w postaci spękań odbitych.

Zawartość wolnych przestrzeni

Według „Warunków technicznych wykonania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej” (zeszyt 61 IBDiM) [2] wymagane wartości wolnej przestrzeni w próbce zależą od metody zagęszczania i wynoszą:

- dla próbek zagęszczonych ubijakiem Marshalla od 9,0 do 16,0%,

- natomiast dla próbek zagęszczonych w prasie statycznej od 5,0 do 12,0%.

Próbki MCE wycięte z zagęszczonej warstwy podbudowy powinny charakteryzować się zawartością wolnych przestrzeni od 7,0 do 18,0 %, bez względu na kategorię ruchu drogi, na której dana mieszanka jest wbudowana. Zawartość wolnych przestrzeni wg wymagań niemieckich powinna wynosić od 8,0 do 15,0%. W Szwecji zaleca się, aby podbudowa z mieszanki mineralno-emulsyjnej miała zawartość wolnych przestrzeni w granicach od 6,0 do 14,0%. Przedział zawartości wolnych przestrzeni, który można znaleźć w wytycznych ARRA (metoda A oraz B) jest większy i wynosi od 9,0 do 14,0%.

Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie

W Polsce metoda ta nie jest stosowana, jednak jest ona bardzo rozpowszechniona w innych krajach. W Niemczech, wytrzymałość na pośrednie rozciąganie jest podstawowym badaniem służącym do określenia optymalnego składu mieszanek MCE. Badanie wykonuje się w temperaturze +5°C. Wytrzymałość po 28 dniach nie powinna być mniejsza od 0,75 MPa, a spadek wytrzymałości dla próbek przechowywanych w wodzie nie powinien przekraczać 30%. W wyjątkowych przypadkach należy także uwzględnić wytrzymałość na pośrednie rozciąganie po 7 dniach, której wartość powinna wynosić co najmniej 0,5 MPa. Dodatkowo, mieszanki o typie wiązań dominująco hydraulicznym powinny mieć wytrzymałość nie większą niż 0,8 MPa i 1,2 MPa (odpowiednio po 7 i 28 dniach). Według zaleceń programu PARAMIX, badanie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie przeprowadza się dla 2 wariantów:

- próbki suche,
- próbki, które zostały poddane działaniu wody o temperaturze +60°C przez okres 24 godzin.

Dla obu wariantów wytrzymałość określa się w temperaturze +5°C. Dla próbek niepoddanych działaniu wody, minimalna wytrzymałość na rozciąganie pośrednie powinna wynosić 1,0 MPa. Próbki, które były poddane działaniu wody powinny osiągnąć minimalną wytrzymałość na pośrednie rozciąganie wynoszącą co najmniej 75% wytrzymałości początkowej. Mniej restrykcyjne wymagania można znaleźć w zaleceniach PIARC. Powołują się one na zalecenia kanadyjskie (Quebec), według których wartość wytrzymałości na pośrednie rozciąganie powinna wynosić od 0,4 do 0,8 MPa. Według szwedzkich wytycznych zaleca się, aby mieszanka mineralno-emulsyjna stosowana do wykonania warstwy ścieralnej miała po 7 dniach wytrzymałość na pośrednie rozciąganie większą niż 0,3 MPa. Badanie to powinno się wykonać na próbkach suchych w temperaturze +10°C. Jeszcze inną temperaturę badania można znaleźć w wytycznych chińskich. Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie określana jest tam w temperaturze +15°C. W artykule "The Impact of Cement Contents on the Properties of Asphalt Emulsion Stabilized Cold Recycling Mixtures" [30] przeanalizowano mieszanki MCE o różnych zawartościach cementu i odmiennych sposobach kondycjonowania. Wyniki badań wykazały, że wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie wzrastały liniowo wraz ze wzrostem zawartości cementu i długością czasu kondycjonowania (zarówno dla próbek kondycjonowanych w wodzie, jak i w powietrzu). Dla próbek przechowywanych w powietrzu, po 7 dniach wartość ITS wynosiła od 0,2 MPa (mieszanka bez dodatku cementu) do 0,56 MPa (dla mieszanki o zawartości cementu wynoszącej 2,5%). Po 28 dniach nie odnotowano zwiększenia wytrzymałości dla mieszanki nie zawierającej cementu, natomiast wytrzymałość mieszanki zawierającej 2,5% cementu wzrosła do

0,75 MPa. Zawartość cementu miała większy wpływ na wartość ITS dla próbek kondycjonowanych w wodzie niż dla próbek suchych.

Moduł sztywności

Moduł sztywności mieszanki w znacznym stopniu wpływa na jej zachowanie w czasie eksploatacji. Zbyt niska wartość może skutkować zwiększoną podatnością warstwy, natomiast zbyt wysoka, ryzykiem wystąpienia spękań skurczowych. Najpopularniejszą metodą badania modułu sztywności wykorzystywaną do oceny mieszanek MCE jest badanie rozciągania pośredniego na próbce walcowej (IT-CY: indirect tension test on cylindrical specimens). Istotną wadą jest przyjmowanie przybliżonej wartości współczynnika Poissona, który zależy od rodzaju materiału, temperatury oraz prędkości obciążenia. Wytyczne stosowane w Polsce nie podają wymagań dotyczących zalecanych wartości modułów sztywności. W Wielkiej Brytanii, określenie modułu sztywności jest głównym badaniem służącym do oceny próbek wykonanych z mieszanek MCE. Temperatura badania wynosi $+20^{\circ}\text{C}$. Wymagane wartości zależą od klasy mieszanki i określa się je po 360 dniach od wbudowania warstwy. W związku z tym, że badanie wykonuje się po 28 dniach, należy zastosować współczynnik przeliczeniowy wynoszący 1,2 (dla mieszanek MCE). Wymagane wartości wynoszą od 1900 MPa dla mieszanki klasy B1 do 3100 MPa dla mieszanki klasy B3. W Niemczech badanie IT-CY przeprowadza się w temperaturze $+5^{\circ}\text{C}$, po 28 dniach od wytworzenia próbki. Mieszanki o wiązaniach dominująco bitumicznych powinny charakteryzować się modułami w granicach 3000–7000 MPa. Różnicą w wyznaczaniu modułu sztywności w Niemczech jest to, że bada się go przy wartości 45% siły niszczonej wyznaczonej z badania wytrzymałości na pośrednie rozciąganie. Jeszcze inną temperaturę badania można znaleźć w wytycznych szwedzkich. Zalecają one, aby mieszanka mineralno-emulsyjna stosowana do wykonania warstwy podbudowy miała w temperaturze $+10^{\circ}\text{C}$ moduł sztywności wynoszący ponad 2000 MPa.

Wytrzymałość na ściskanie

Wytrzymałość na ściskanie jest jedną z najważniejszych cech materiałów związanych spoiwami hydraulicznymi. Zalecenia PIARC podają przykładowe badania dotyczące mieszanek MCE. Jednym z nich jest wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie. Nie podają one jednak sprecyzowanych wymagań parametrów wytrzymałościowych, jakie powinna spełniać mieszanka MCE. W pracy "An analytical approach to evaluate the performance of cold recycled asphalt mixtures" autorstwa Felice Giuliani'ego oraz Silvia Rastelli'ego [35] dokonano analizy mieszanek składających się wyłącznie z destruktu i emulsji asfaltowej (w ilości 3,5%, 4,5% oraz 5,5%) zarówno bez, jak i z 2% dodatkiem cementu. Próbki cylindryczne o średnicy 110,6 mm i wysokości 116,6 mm zagęszczono przy użyciu dwóch różnych energii, zgodnych ze standardową i zmodyfikowaną metodą Proctora. Następnie badano wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe po okresie kondycjonowania wynoszącym 7 i 28 dni. Próbki ścisano z prędkością 1 mm/min do uzyskania odkształcenia wynoszącego 10 mm. Próbki MCE zagęszczane przy użyciu energii zgodnej ze zmodyfikowaną metodą Proctora osiągały po 7 dniach wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wynoszące od 0,38 do 0,57 MPa, natomiast po 28 dniach od 0,71 do 0,83 MPa (wzrost od 40 do 90 %). Próbki MCE zagęszczane przy użyciu energii zgodnej ze standardową metodą Proctora osiągały po 7 dniach wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wynoszące od 0,23 do 0,33 MPa, natomiast po 28 dniach od 0,37 do 0,49 MPa (wzrost od 50 do

60 %). Próbki nie zawierające cementu zagęszczane przy użyciu energii zgodnej ze zmodyfikowaną metodą Proctora osiągały po 7 dniach wytrzymałości w granicach $0,27 \div 0,39$ MPa, natomiast po 28 dniach $0,40 \div 0,53$ MPa. Próbki wykonane z mieszanek MCE oraz ME zagęszczane przy użyciu energii zgodnej ze zmodyfikowaną metodą Proctora wykazywały wytrzymałość większą około $1,6 \div 2,3$ razy w porównaniu do próbek zagęszczanych przy użyciu energii zgodnej z normalną metodą Proctora. Wraz ze wzrostem zawartości emulsji zmniejszała się wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, niezależnie od metody zagęszczania, długości kondycjonowania próbek oraz tego, czy użyty został cement.

3.10 Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych studiów literatury można sformułować następujące wnioski:

1. Projektowanie mieszanek MCE przeprowadza się na wiele sposobów. Różnice występują na każdym z etapów projektowania.
2. Polskie wytyczne podają graniczne krzywe uziarnienia mieszanki mineralno-cementowej, które są węższe niż w większości innych krajów.
3. Ważnym elementem, którego brakuje w polskich wytycznych jest ocena wpływu wody na właściwości mieszanki MCE.
4. W Polsce, ocena właściwości mechanicznych mieszanki opiera się głównie na badaniu stabilności i odkształcenia wg Marshalla w temperaturze $+60^{\circ}\text{C}$. Badanie wykonywane w temperaturze $+60^{\circ}\text{C}$ nie odzwierciedla warunków, w których pracuje wbudowana mieszanka MCE. Dodatkowo wymagane parametry są bardzo wysokie, przez co konieczne jest dodawanie znacznej ilości kruszywa doziarniającego oraz cementu, co wiąże się ze wzrostem kosztów oraz zwiększeniem prawdopodobieństwa powstania spękań.
5. Należy rozważyć rezygnację ze stosowania badania stabilności i odkształcenia wg Marshalla. W zamian należałoby wprowadzić badanie powszechnie stosowane na świecie, czyli wytrzymałość na pośrednie rozciąganie.
6. Polskie wytyczne nie uwzględniają oceny sztywności wytworzonej mieszanki. Parametrem wytrzymałościowym, który należałoby badać jest moduł sztywności.
7. W polskich wytycznych stosuje się 2 odmienne metody zagęszczania próbek. Ponadto wymagana zawartość wolnych przestrzeni zależy od metody zagęszczania. Prowadzi to do bardzo dużej niejednorodności próbek wykonanych z tego samego materiału. W związku z tym, należałoby wprowadzić jedną metodę zagęszczania, która jak najlepiej odzwierciedla parametry wbudowanej mieszanki.
8. Należałoby zbadać możliwość krótszego kondycjonowania próbek (ewentualnie znaleźć współczynniki korygujące, pozwalające na obliczenie wytrzymałości po żądanym okresie), gdyż 28 dniowy czas oczekiwania na możliwość wykonania badań wydaje się zbyt duży.

4. Weryfikacja zasad projektowania MCE

Przeprowadzono ocenę wybranych procedur stosowanych w innych krajach do projektowania i wbudowywania podbudów wykonywanych w technologii MCE lub zbliżonej. Zebrane informacje posłużyły do określenia ilości i rodzaju dodawanych dodatków zarówno wiążących jak i doziarniających oraz jakie preferowane są metody do oceny parametrów wytrzymałościowych takiego materiału.

Badania wykonane w laboratorium miały na celu określenie wpływu ilości oraz rodzaju cementu, rodzaju emulsji oraz uziarnienia mieszanki mineralnej na właściwości mieszanki MCE. W tym celu wykonano 24 projekty mieszanek MCE. Każda seria składała się z 14 próbek (12 próbek do badań i 2 próbek dodatkowych).

4.1 Wybór rodzaju oraz zawartości emulsji asfaltowej

W celu weryfikacji wpływu rodzaju emulsji asfaltowej na właściwości mieszanki MCE, zbadano mieszanki z dwoma rodzajami emulsji:

- C60B5R,
- C60B5ZM.

Wymagania dotyczące, polarności, indeksu rozpadu, stabilności podczas mieszania z cementem, zawartości lepiszcza, czasu wypływu, pozostałości na sicie 0,5 mm, adhezji, pH oraz temperatury mięknięcia asfaltu odzyskanego są takie same dla obu rodzajów emulsji. Różnica występuje w wymaganiach dotyczących penetracji asfaltu odzyskanego w +25°C. Dla emulsji C60B5R powinna być ona mniejsza niż 150 jednostek, natomiast dla emulsji C60B5ZM mniejsza niż 100 jednostek.

Według polskich wytycznych, zawartość emulsji asfaltowej powinna wynosić od 3,0% do 5,5% (m/m). W każdym z 24 projektów mieszanek MCE ustalono jej ilość na 3,5% [m/m].

4.2 Wybór rodzaju oraz zawartości cementu

W związku z faktem, iż cement portlandzki CEM I klasy 32,5 o normalnej wytrzymałości wczesnej jest obecnie produktem trudno dostępnym na polskim rynku, przeanalizowano możliwość zastosowania innych cementów. Podczas doboru ich rodzajów, wzięto pod uwagę głównie warunki środowiskowe, na które narażona jest wbudowana warstwa mieszanki MCE. W ramach etapu II raportu zbadano wpływ dwóch cementów na właściwości mieszanki MCE.

Warstwa podbudowy z mieszanki MCE może być narażona na cykliczne oddziaływanie zamrażania/rozmarzania ze środkami odladzającymi pochodzącymi z zimowego utrzymania dróg. W związku z tym, należy zastosować cement przydatny w klasie ekspozycji XF.

Pierwszym cementem, który poddano analizie jest cement portlandzki CEM I 32,5R. Różni się on od cementu zalecanego według warunków technicznych [2] tym, że posiada wyższą wytrzymałość wczesną. Wytrzymałość normowa po 28 dniach jest

taka sama. Jest on przydatny we wszystkich klasach ekspozycji z wyjątkiem klas XA2 i XA3 (agresja chemiczna). Charakteryzuje się on:

- umiarkowanym ciepłem hydratacji,
- umiarkowaną dynamiką narastania wytrzymałości wczesnej,
- umiarkowaną dynamiką narastania wytrzymałości w długich okresach dojrzewania.

Kolejnym cementem poddanym analizie jest cement portlandzki CEM I 42,5 R. Różni się on od cementu zalecanego według warunków technicznych [2] zwiększoną wytrzymałością wczesną i zwiększoną wytrzymałością normową po 28 dniach. Charakteryzuje się on:

- bardzo wysokim ciepłem hydratacji,
- szybkim narastaniem wytrzymałości wczesnej,
- niewielką dynamiką narastania wytrzymałości w długich okresach dojrzewania.

Ustalono, iż zawartość cementu w mieszance mineralno-cementowej będzie wynosiła 2,0% i 4,0%. Role, jakie ma pełnić cement w projektowanych mieszankach to przede wszystkim wzrost odporności na działanie wody, zwiększenie ilości drobnych frakcji oraz przyspieszenie rozpadu emulsji.

4.3 Uziarnienie mieszanki mineralno-cementowej

W celu weryfikacji wpływu rodzaju uziarnienia, zawartości destruktu oraz zawartości cementu na właściwości mieszanki MCE, zbadano mieszanki o sześciu projektach uziarnienia. Różnice występowały w zawartościach destruktu, kruszywa, piasku oraz cementu. Podczas badania wykorzystano następujące materiały:

- destruktu asfaltowy pochodzący z rozbiórki istniejących nawierzchni,
- kruszywo łamane 0/31,5,
- piasek naturalny 0/2,
- cement CEM I 32,5R lub cement CEM I 42,5R.

Pierwszym etapem wykonania projektów uziarnienia było dokonanie przesiewów materiałów składowych. W związku z tym, że podczas suszenia destruktu w temperaturze około +110°C uległby sklejeniu, co wiązałoby się ze zmianą uziarnienia, należało go wysuszyć w inny sposób. W tym celu rozłożono go w warstwie około 5 cm w pomieszczeniu o temperaturze 20°C. Po 5 dniach (raz dziennie mieszając) uzyskano materiał, który posiadał wilgotność około 0,2%. W związku z tym, iż destruktu jest materiałem o znacznej niejednorodności, dokonano 4 przesiewów, a następnie ich wartość uśredniono. Skład granulometryczny destruktu, kruszywa łamanego 0/31,5 oraz piasku naturalnego 0/2 przedstawiono w tablicy 4.1.

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Tablica 4.1. Skład granulometryczny materiałów do projektowania mieszanki MCE

Sito [mm]	Destrukt	Kruszywo 0/31,5	Piasek naturalny 0/2
63	100,0	100,0	100,0
31,5	99,7	98,3	100,0
16	88,6	73,0	100,0
12,5	81,1	65,1	100,0
8	63,3	56,3	100,0
4	34,6	45,5	100,0
2	18,4	35,3	86,8
0,85	9,2	24,8	55,3
0,42	5,1	17,6	38,1
0,3	3,6	14,0	30,8
0,075	0,8	4,7	5,7

Zawartość poszczególnych składników w receptach laboratoryjnych przedstawiono w tablicy 4.2.

Tablica 4.2. Zawartość procentowa składników w poszczególnych receptach mieszanek mineralno-cementowych

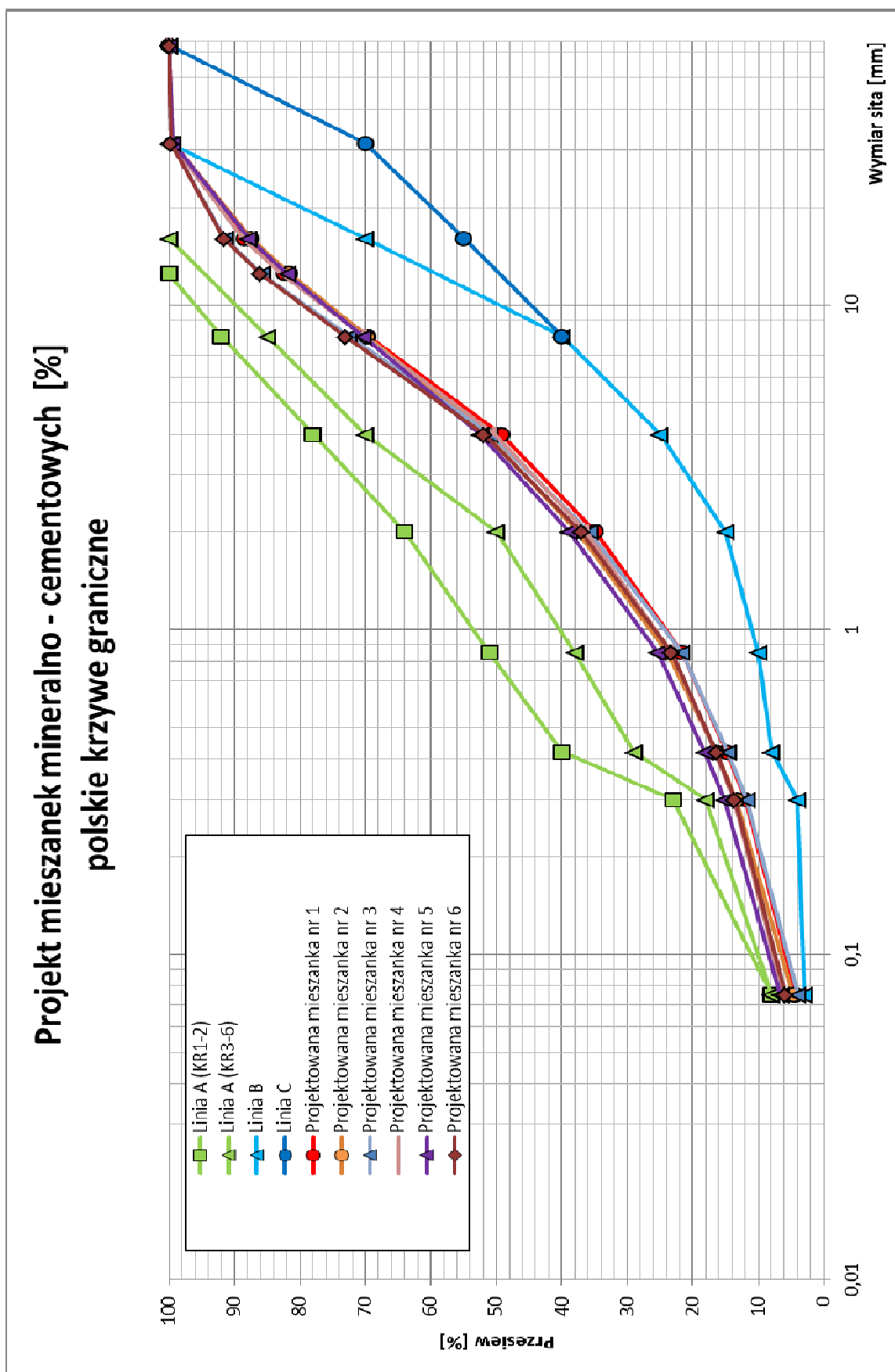
Składnik [%]	Projekt 1	Projekt 2	Projekt 3	Projekt 4	Projekt 5	Projekt 6
Destrukt	65	55	75	63,7	53,9	73,5
Kruszywo łamane 0/31,5	15	23	0	14,7	22,5	22,5
Piasek naturalny 0/2	18	20	23	17,6	19,6	0
Cement	2	2	2	4	4	4

Uziarnienie mieszanek mineralno-cementowych wraz z krzywymi granicznymi przedstawiono w tablicy 4.3 oraz na rysunku 4.1

Tablica 4.3. Uziarnienie mieszanek mineralno-cementowych

Sito [mm]	Projektowana mieszanka						Krzywe graniczne					
	Przesiew						KR1÷2			KR 3÷6		
	1	2	3	4	5	6	Linia A	Linia B	Linia C	Linia A	Linia B	Linia C
63	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0			100			100
31,5	99,5	99,4	99,7	99,5	99,4	99,8		100	70		100	70
16	88,6	87,5	91,5	88,8	87,8	91,7		70	55	100	70	55
12,5	82,5	81,6	85,8	82,8	81,9	86,1	100					
8	69,6	69,8	72,5	70,2	70,4	73,1	92	40	40	85	40	40
4	49,3	51,5	50,9	50,3	52,5	51,9	78	25		70	25	
2	34,9	37,6	35,7	36,2	38,9	37,0	64	15		50	15	
0,85	21,7	23,8	21,6	23,3	25,4	23,2	51	10		38	10	
0,42	14,8	16,5	14,6	16,6	18,2	16,4	40	8		29	8	
0,3	12,0	13,3	11,8	13,8	15,1	13,6	23	4		18	4	
0,075	4,3	4,7	3,9	6,2	6,6	5,9	8	3		8	3	

Rysunek 4.1. Uziarnienie mieszanek mineralno-cementowych



4.4 Całkowita zawartość asfaltu

Według warunków technicznych [2] powinny być spełnione następujące wymagania:

- sumaryczna ilość lepiszcza bitumicznego (łącznie z asfaltem wytrąconym z emulsji), powinna wynosić:
 - maksymalnie 6% (m/m) dla mieszanek o uziarnieniu od 0/12 do 0/31,5mm,
 - maksymalnie 5,5% (m/m) dla mieszanek o uziarnieniu 0/63mm.
- zawartość w mieszance MCE lepiszcza bitumicznego pochodzącego z destruktu nie powinna przekraczać 4% (m/m).

W pierwszej kolejności wyznaczono zawartość asfaltu znajdującego się w destrukcie. W tym celu dokonano dwóch ekstraktacji destruktu bitumicznego. Zawartość asfaltu wyznaczono na podstawie różnicy mas:

$$A = \frac{m_1 - m_2 - m_3}{m_1} \cdot 100$$

gdzie:

- A – zawartość asfaltu [% m/m],
- m_1 – masa próbki analitycznej po wysuszeniu przed badaniem [g],
- m_2 – masa mieszanki mineralnej po ekstrakcji [g],
- m_3 – masa ziaren wypełniacza z gilzy [g].

Wyznaczona zawartość asfaltu w destrukcie wynosi 4,40%. W celu wyznaczenia całkowitej zawartości asfaltu w mieszance MCE, zsumowano ją z asfaltem pochodzącym z rozpadu emulsji. Wyniki obliczeń dla sześciu projektów mieszanek przedstawiono w tabelicy 4.4.

Tabela 4.4. Całkowita zawartość asfaltu w mieszankach MCE

Składnik [%]	Projekt 1	Projekt 2	Projekt 3	Projekt 4	Projekt 5	Projekt 6
Destrukt	62,7	53,1	72,4	61,5	52,0	70,9
Kruszywo łamane 0/31,5	14,5	22,2	0,0	14,2	21,7	0,0
Piasek naturalny 0/2	17,4	19,3	22,2	17,0	18,9	21,7
Cement	1,9	1,9	1,9	3,9	3,9	3,9
Emulsja	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Asfalt z emulsji	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
Woda z emulsji	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Asfalt z destruktu	2,8	2,4	3,2	2,7	2,3	3,2
Asfalt całkowity	4,9	4,5	5,4	4,9	4,5	5,3

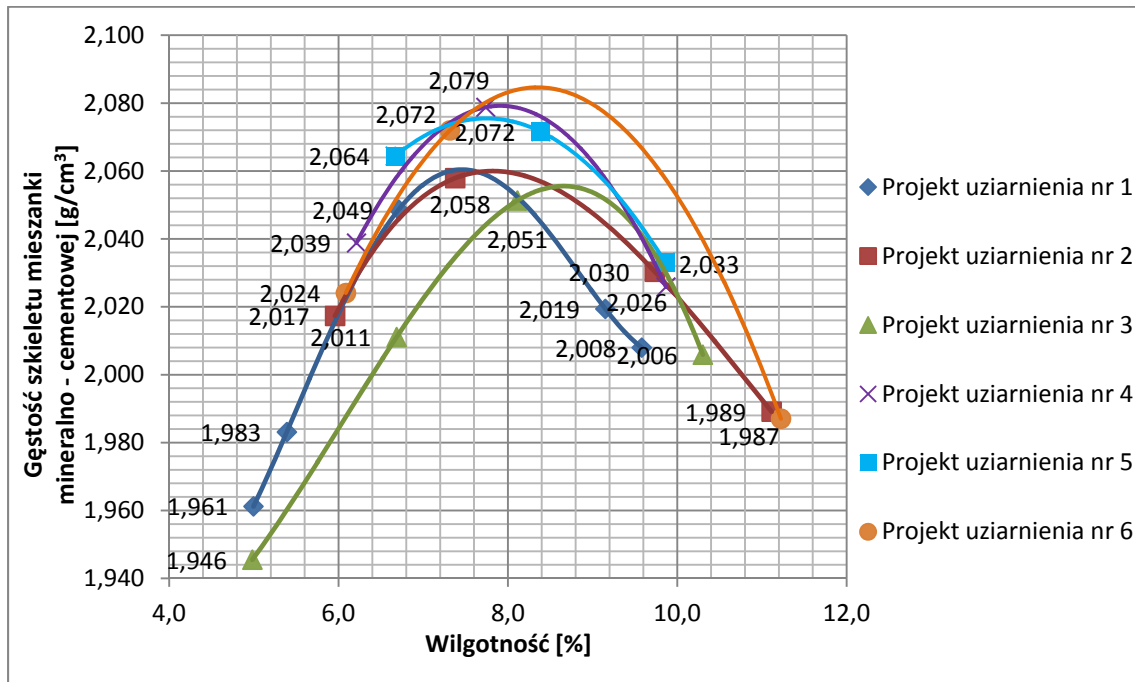
Warunki na zawartość w mieszance MCE lepiszcza bitumicznego pochodzącego z destruktu oraz sumaryczną ilość lepiszcza bitumicznego zostały spełnione dla wszystkich projektów uziarnienia mieszanek MCE.

4.5 Określenie optymalnej zawartości płynów

Składnikami odpowiedzialnymi za optymalne ułożenie ziaren szkieletu w mieszance MCE jest woda oraz emulsja asfaltowa. Podczas badań laboratoryjnych, wilgotność optymalną ustalano na podstawie polskich wytycznych, według których na optymalną

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

zawartość płynów składa się woda zawarta w destrukcie, woda dodana do mieszanki oraz woda zawarta w emulsji asfaltowej. Wilgotność optymalna podczas badań została ustalona na podstawie zmodyfikowanej metody Proctora. Wilgotność optymalną określono dla każdego z sześciu projektów uziarnienia mieszanek mineralno-cementowych. Badania wykonano w cylindrze o objętości 2200 cm³. Wykresy zależności gęstości szkieletu mieszanek mineralno-cementowych od wilgotności przedstawiono na rysunku 4.2.



Rysunek 4.2. Wyznaczenie wilgotności optymalnej projektowanych mieszanek mineralno-cementowych

Zgodnie z normą PN-88/B-04481, jeśli masa odsianych z próbki grubszych ziaren wynosi od 5 do 25 % całkowitej masy szkieletu mieszanki destruktu, kruszywa, piasku oraz cementu, to wartości wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu mieszanki mineralno-cementowej należy skorygować. Skorygowane wartości wilgotności optymalnej, gęstości objętościowej szkieletu mieszanki oraz parametry służące do ich ustalenia zestawiono w tabeli 4.5.

Tablica 4.5. Wyznaczanie skorygowanych wartości wilgotności optymalnych oraz gęstości objętościowych szkieletu mieszanek mineralno-cementowych

Numer projektu uziarnienia	Gęstość objętościowa szkieletu (odczytana z wykresu)	Wilgotność optymalna (odczytana z wykresu)	Zawartość nadziarna	Gęstość właściwa mieszaniny	Skorygowana wilgotność optymalna	Skorygowana gęstość objętościowa szkieletu mieszaniny
	[%]	[%]	[%]	[g/cm ³]	[%]	[g/cm ³]
1	2,060	7,4	24,84	2,515	5,56	2,157
2	2,060	7,9	23,30	2,533	6,06	2,154
3	2,055	8,7	24,66	2,511	6,55	2,151
4	2,079	8,0	24,80	2,532	6,02	2,176
5	2,075	7,8	24,45	2,542	5,89	2,173
6	2,084	8,3	23,94	2,513	6,31	2,173

Podczas dalszych etapów projektowania korzystano ze skorygowanych wartości wilgotności optymalnych.

4.6 Wykonanie próbek

Podczas badań laboratoryjnych wykonano 24 projekty mieszanek MCE. Różniły się one ilością oraz rodzajem cementu, rodzajem emulsji oraz uziarnieniem mieszanki mineralnej. Każda seria składała się z 14 próbek (12 próbek do badań i 2 próbek dodatkowych). Proces wytwarzania mieszanek rozpoczęto od naważenia odpowiedniej ilości destruktu, kruszywa oraz piasku. Ziarna większe niż 25 mm odrzucono, a naważkę mieszanki uzupełniono taką samą masą analogicznego materiału frakcji 16/25 mm. Następnie składniki te mieszano przez około 60 s. Kolejnym etapem było dodanie zaczynu cementowo-wodnego (umożliwia to bardziej równomierne rozprowadzenie cementu w mieszance). Następnie ponownie mieszano wszystkie dodane składniki, do momentu uzyskania jednorodnej mieszanki. Ostatnim etapem było dolanie emulsji asfaltowej oraz wymieszanie wszystkich składników mieszanki MCE (czas mieszania nie przekraczał 2 minut). Zagęszczania mieszanki dokonywano metodą Marshalla w formach perforowanych, bezpośrednio po jej wytworzeniu. Zastosowano 75 uderzeń ubijaka na każdą ze stron próbki. Po zagęszczeniu ich wysokość wynosiła 63,5±3,0 mm. Przed każdym kolejnym cyklem zagęszczania wszystkie formy były czyszczone ze względu na częściowe zatykanie otworów umożliwiających odprowadzanie wody.

4.7 Kondycjonowanie próbek

Ze względu na możliwość uszkodzenia próbek, ich wyjęcie z form następowało następnego dnia po wytworzeniu. Przechowywano je w powietrzu w temperaturze +20°C przez 28 dni (licząc od momentu wytworzenia). Po tym okresie dokonywano badań. Wyjątkiem były próbki (3 sztuki z każdej serii), które zostały poddane ocenie wrażliwości na wpływ wilgoci. Probki te po 28 dniach przechowywania w powietrzu w temperaturze +20°C umieszczano na 7 dni w wannie z wodą o temperaturze +20°C (przy całkowitym zanurzeniu). Dla pierwszego projektu mieszanki MCE wykonano

dodatkowo 9 próbek. Sześć (do badania stabilności i odkształcenia wg Marshalla oraz wytrzymałości na pośrednie rozciąganie) z nich przechowywano przez 7 dni w powietrzu w temperaturze +40°C, natomiast kolejne trzy (do badania wytrzymałości na pośrednie rozciąganie) początkowo przez 7 dni w powietrzu w temperaturze +40°C, a następnie przez 21 dni w powietrzu w temperaturze +20°C.

Przed badaniem wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, próbki były umieszczane w komorze termostatycznej w temperaturze +5°C na około 5÷6 godzin.

4.8 Badania cech mieszanek mineralno – cementowo – emulsyjnych

W celu oceny wpływu rodzaju cementu, rodzaju emulsji oraz uziarnienia mieszanki mineralnej na właściwości mieszanek MCE wykonano następujące badania:

- stabilność i odkształcenie według Marshalla (po 28 dniach),
- zawartość wolnej przestrzeni (po 28 dniach),
- gęstość strukturalna (wg nazewnictwa użytego w zeszycie 61 IBDiM),
- gęstość objętościowa (wg nazewnictwa użytego w zeszycie 61 IBDiM),
- wytrzymałość na pośrednie rozciąganie (po 28 dniach oraz po 28+7 dniach),
- wytrzymałość na ściskanie proste (po 28 dniach).

4.8.1 Stabilność i odkształcenie według Marshalla

Badanie stabilności i odkształcenia przeprowadzono zgodnie z zeszytem 64 IBDiM – „Procedury badań do projektowania składu i kontroli mieszanek mineralno – asfaltowych”. Po kondycjonowaniu w łaźni wodnej w temperaturze +60°C przez 30 min, próbki zostały ściśnięte w szczękach z jednoczesnym zarejestrowaniem siły i przemieszczenia. Dla próbek o wysokości 63,5 mm, osiągnięte maksymalne obciążenie to jednocześnie ich stabilność. Dla próbek o wysokości innej niż 63,5 mm, konieczne było zastosowanie współczynnika korygującego c , według normy PN-EN 12697-34:

$$c = 5,24 \cdot e^{-0,0258 \cdot h}$$

Według warunków technicznych [2], wymagane wartości stabilności dla mieszanek MCE zależą od kategorii ruchu drogi, na której dana mieszanka ma być wbudowana i wynoszą:

- 4,0÷20,0 kN dla dróg o kategorii ruchu od KR1 do KR2,
- 8,0÷20,0 kN dla dróg o kategorii ruchu od KR3 do KR6.

Wymagany zakres odkształcenia wynosi od 1,0 do 3,5 mm i nie zależy od kategorii ruchu drogi, na której dana mieszanka ma być wbudowana.

W tabelicy 4.6 zestawiono wyniki badań stabilności i odkształcenia według Marshalla. Wartości stabilności mieściły się w granicach od 1,6 do 7,5 kN. Żaden projekt mieszanki MCE nie spełniał wymagań zawartych w polskich wytycznych dla dróg o kategorii ruchu od KR3 do KR6, wszystkie mieszanki zawierające 4% cementu spełniły natomiast wymagania dla dróg o kategorii ruchu od KR1 do KR2. Wszystkie oznaczone stabilności, z wyjątkiem jednej mieszanki MCE, osiągnęły wartości wyższe niż wymagania określone przez firmę Wirtgen (>2kN). Odkształcenie

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

osiągało wartości w granicach od 1,6 do 2,7 mm. Oznacza to, że we wszystkich projektach mieściło się ono w wymaganym zakresie.

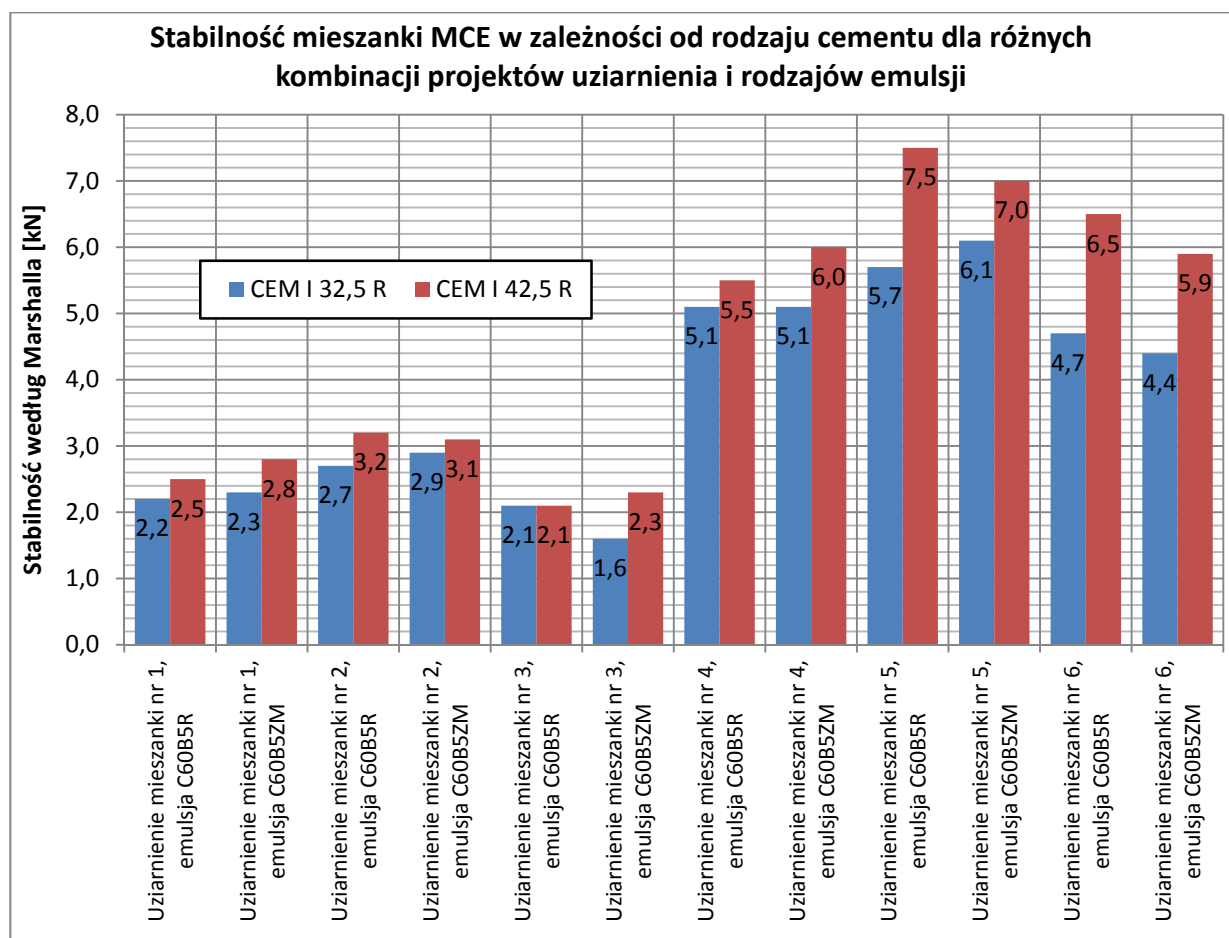
Tablica 4.6. Zestawienie wyników badań stabilności oraz odkształcenia według Marshalla

Nr próbki	Projekt uziarnienia	Rodzaj cementu	Rodzaj emulsji	Badanie	
				Stabilność Marshalla [kN]	Odkształcenie Marshalla [mm]
653	1	CEM I 42,5 R	C60B5R	2,5	2,0
653 (7)	1	CEM I 42,5 R	C60B5R	2,3	2,2
671	2	CEM I 42,5 R	C60B5R	3,2	1,7
672	3	CEM I 42,5 R	C60B5R	2,1	2,3
698	1	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	2,8	2,3
700	2	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	3,1	1,6
702	3	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	2,3	2,6
731	1	CEM I 32,5 R	C60B5R	2,2	2,6
742	2	CEM I 32,5 R	C60B5R	2,7	1,7
743	3	CEM I 32,5 R	C60B5R	2,1	2,6
750	1	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	2,3	2,4
754	2	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	2,9	1,8
762	3	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	1,6	2,7
939	4	CEM I 42,5 R	C60B5R	5,5	2,0
940	4	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	6,0	1,8
941	4	CEM I 32,5 R	C60B5R	5,1	2,0
942	4	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	5,1	1,8
956	5	CEM I 42,5 R	C60B5R	7,5	1,8
957	5	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	7,0	2,1
962	5	CEM I 32,5 R	C60B5R	5,7	1,7
963	5	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	6,1	1,8
988	6	CEM I 42,5 R	C60B5R	6,5	2,0
989	6	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	5,9	2,0
1014	6	CEM I 32,5 R	C60B5R	4,7	1,9
1015	6	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	4,4	2,0

Analizując stabilność mieszanki MCE z cementem CEM I 32,5R w zależności od uziarnienia i rodzaju emulsji stwierdzono, iż nie widać wyraźnego trendu określającego wpływ rodzaju emulsji na osiągnięte wartości stabilności. Można natomiast stwierdzić, że mieszanki zawierające większą zawartość cementu osiągały większe wartości stabilności. Rozpatrując osobno wyniki stabilności dla mieszanek zawierających 2% oraz 4% cementu można zauważyć, że niezależnie od rodzaju emulsji, maksymalne wartości stabilności osiągały próbki o najmniejszej zawartości destruktu (uziarnienie mieszanki nr 2 lub 5). Próbki o największej zawartości destruktu (uziarnieniu mieszanki nr 3 lub 6) charakteryzowały się najmniejszymi wartościami stabilności. Świadczy to o tym, że wraz ze wzrostem zawartości destruktu w badanej próbce, jej stabilność maleje.

Rozpatrując zależność stabilności mieszanki MCE z cementem CEM I 42,5R od uziarnienia i rodzaju emulsji można stwierdzić, iż zmiana cementu nie spowodowała powstania wyraźnego trendu określającego wpływ rodzaju emulsji na osiągnięte wartości stabilności. Podobnie jak dla cementu CEM I 32,5R, mieszanki zawierające większą zawartość cementu osiągały większe wartości stabilności. Rozpatrując osobno wyniki stabilności dla mieszanek zawierających 2% oraz 4% cementu również zauważono, iż najmniejsze wartości stabilności uzyskały mieszanki o największej zawartości destruktu i odwrotnie – największe wartości stabilności uzyskały mieszanki o najmniejszej zawartości destruktu (wyjątek stanowi seria z emulsją C60B5R, dla której stabilność mieszanki z destruktem w ilości 73,5% jest większa niż w ilości 63,7%).

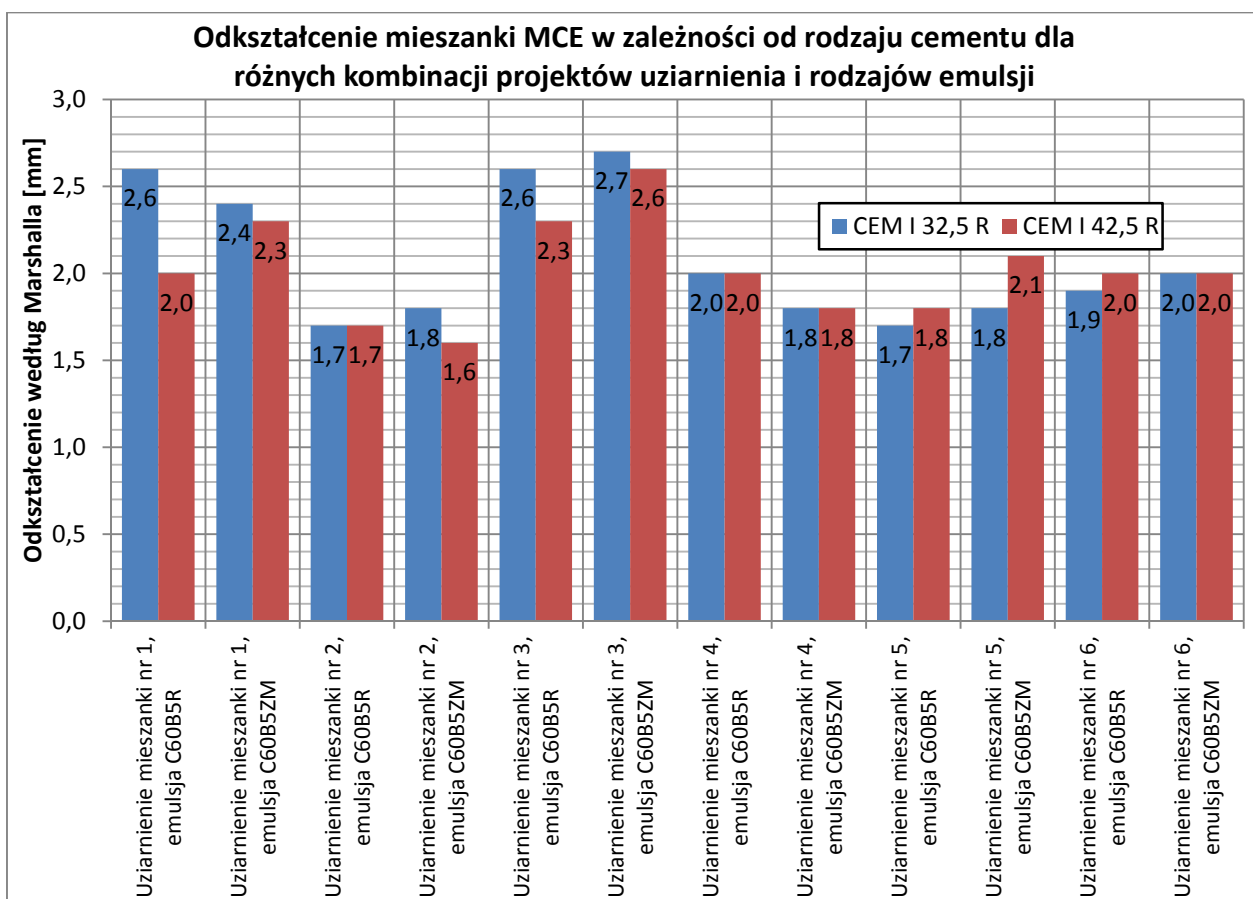
Wykres stabilności mieszanki MCE w zależności od rodzaju cementu dla różnych kombinacji projektów uziarnienia i rodzajów emulsji przedstawia rysunek 4.3. Analizując go można zauważyć, że mieszanki z cementem CEM I 42,5R mają większą stabilność niż analogiczne mieszanki z cementem CEM I 32,5R. Wyjątek stanowi mieszanka o uziarnieniu nr 3 (zawartość destruktu wynosi 75%) z emulsją C60B5ZM, dla której stabilność dla obu rodzajów cementu jest jednakowa i wynosi 2,1 kN.



Rysunek 4.3. Stabilność mieszanki MCE w zależności od rodzaju cementu dla różnych kombinacji projektów uziarnienia i rodzajów emulsji

Rozważając odkształcenia mieszanek z cementami CEM I 32,5R oraz CEM I 42,5R (osobno dla 2% i 4% zawartości cementu) można zauważyć tendencję, że wraz ze wzrostem zawartości destruktu w mieszance, wzrasta jej odkształcenie. Szczególnie widoczna jest ona dla mieszanek o zawartości cementu wynoszącej 2%. Wyjątek stanowi mieszanka MCE z cementem CEM I 42,5R oraz emulsją C60B5ZM. Największą wartość odkształcenia zaobserwowano dla niej przy uziarnieniu nr 4 (zawartość destruktu wynosząca 63,7%). Dla mieszanek o zawartości cementu wynoszącej 4% różnice pomiędzy maksymalną a minimalną wartością stabilności wynoszą zaledwie 0,4 mm.

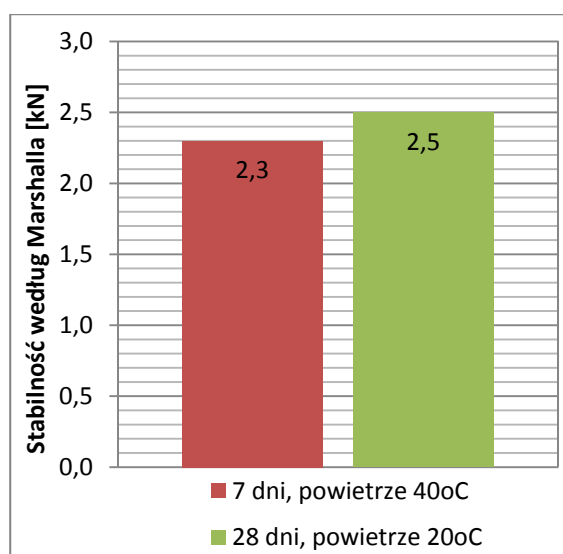
Wykres odkształcenia mieszanki MCE w zależności od rodzaju cementu dla różnych kombinacji projektów uziarnienia i rodzajów emulsji przedstawia rysunek 4.4. Rozpatrując go można zauważyć, iż dla projektów o 2% zawartości cementu, mieszanki z cementem CEM I 32,5R mają większe odkształcenie niż analogiczne mieszanki z cementem CEM I 42,5R. Wyjątek stanowi mieszanka o uziarnieniu nr 2 (zawartość destruktu wynosi 55%) z emulsją C60B5R, dla której odkształcenie dla obu rodzajów cementu jest jednakowe i wynosi 1,7 mm. Dla projektów o 4% zawartości cementu można zauważyć, iż w trzech przypadkach odkształcenie jest jednakowe, natomiast w trzech większe odkształcenie osiągają mieszanki z cementem CEM I 42,5R.



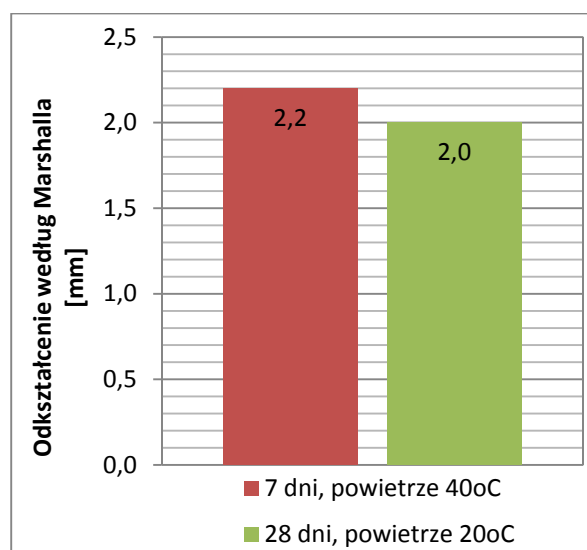
Rysunek 4.4. Odkształcenie mieszanki MCE w zależności od rodzaju cementu dla różnych kombinacji projektów uziarnienia i rodzajów emulsji

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Dla mieszanki MCE o projekcie uziarnienia nr 1, zawierającej cement CEM I 42,5R oraz emulsję C60B5R sporządzono dodatkowe próbki w celu porównania wpływu kondycjonowania na wartości stabilności i odkształcenia według Marshalla. Jedna seria próbek była kondycjonowana w powietrzu w temperaturze +20°C przez 28 dni, natomiast druga w powietrzu w temperaturze +40°C przez 7 dni. Wykres stabilności przedstawiono na rysunku 4.5, natomiast wykres odkształcenia na rysunku 4.6. Próbką kondycjonowana przez 28 dni osiągnęła większą stabilność oraz mniejsze odkształcenie. Spowodowane jest to tym, iż wytrzymałość cementu wzrasta wraz z długością czasu kondycjonowania (wzrost znaczący do 28 dni od wykonania mieszanki). Różnice jednak są niewielkie i mieszczą się w granicach błędu pomiaru.



Rysunek 4.5. Stabilność mieszanki MCE o projekcie uziarnienia nr 1, z cementem CEM I 42,5R i emulsją C60B5R w zależności od metody kondycjonowania



Rysunek 4.6. Odkształcenie mieszanki MCE o projekcie uziarnienia nr 1, z cementem CEM I 42,5R i emulsją C60B5R w zależności od metody kondycjonowania

4.8.2 Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie

Wytrzymałość próbek na pośrednie rozciąganie nie jest badaniem wykorzystywanym do oceny mieszanek MCE w Polsce. Metoda ta jest jednak bardzo rozpowszechniona w innych krajach. Podczas badań laboratoryjnych wykorzystano uniwersalną maszynę badawczą INFRATEST 35-5100, w której zamontowano głowicę testową wyposażoną w szczęki obciążające o wklęsłej powierzchni – przystosowane do badania wytrzymałości na pośrednie rozciąganie. Prędkość obciążania wynosiła 50 ± 2 mm/min. Próbkę, które badano miały średnicę wynoszącą 101,6 mm i wysokość $63,5 \pm 3$ mm. Analizie poddano próbki kondycjonowane w powietrzu przez 28 dni w temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$ oraz próbki, które były kondycjonowane w powietrzu przez 28 dni w temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$, a następnie przez 7 dni w wodzie w temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$. Bezpośrednio przed badaniem umieszczano je w inkubatorze w komorze termostatycznej $+5^{\circ}\text{C}$ na około 5÷6 godzin.

Wyniki uzyskane podczas badań przedstawiono w tabelicy 4.7.

Tablica 4.7. Zestawienie wyników badań wytrzymałości na pośrednie rozciąganie

Nr próbki	Projekt uziarnienia	Rodzaj cementu	Rodzaj emulsji	Parametr		
				Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [Mpa]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie po przechowywaniu w wodzie [MPa]	Pozostała wytrzymałość po przechowywaniu w wodzie [%]
653	1	CEM I 42,5 R	C60B5R	0,664	0,577	86,9
653 (7)	1	CEM I 42,5 R	C60B5R	0,638	-	-
653 (7+21)	1	CEM I 42,5 R	C60B5R	0,674	-	-
671	2	CEM I 42,5 R	C60B5R	0,704	0,572	81,3
672	3	CEM I 42,5 R	C60B5R	0,624	0,550	88,1
698	1	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	0,698	0,489	70,1
700	2	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	0,683	0,467	68,4
702	3	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	0,793	0,543	68,5
731	1	CEM I 32,5 R	C60B5R	0,630	0,520	82,5
742	2	CEM I 32,5 R	C60B5R	0,621	0,506	81,5
743	3	CEM I 32,5 R	C60B5R	0,709	0,647	91,3
750	1	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	0,650	0,431	66,3
754	2	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	0,665	0,493	74,1
762	3	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	0,674	0,489	72,6
939	4	CEM I 42,5 R	C60B5R	0,965	0,887	91,9
940	4	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	1,077	0,810	75,2
941	4	CEM I 32,5 R	C60B5R	0,952	0,957	100,5
942	4	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	1,107	0,779	70,4
956	5	CEM I 42,5 R	C60B5R	1,244	0,927	74,5
957	5	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	0,977	0,868	88,8

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

c.d. Tablica 4.7.

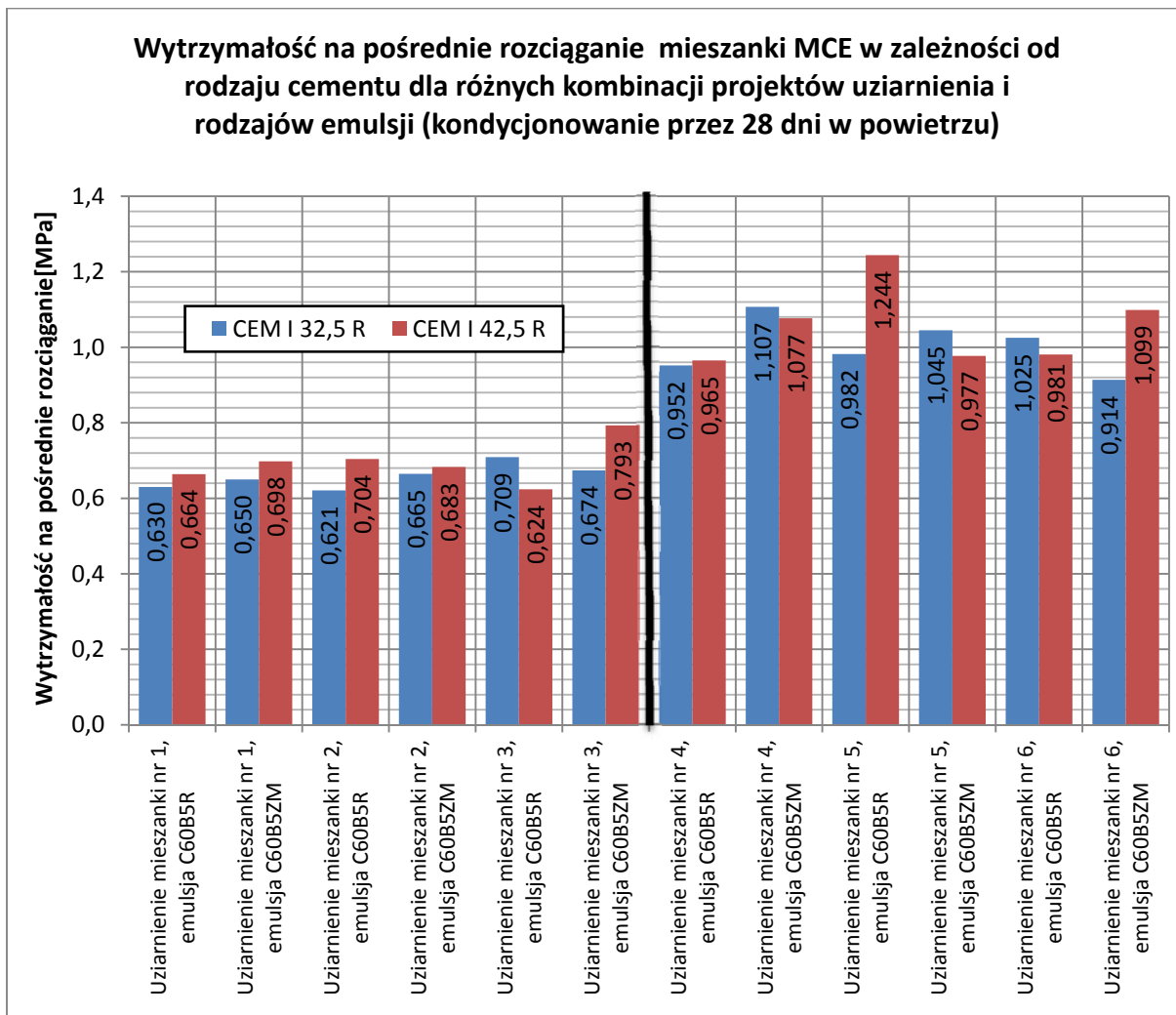
962	5	CEM I 32,5 R	C60B5R	0,982	0,769	78,3
963	5	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	1,045	0,850	81,3
988	6	CEM I 42,5 R	C60B5R	0,981	0,914	93,2
989	6	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	1,099	0,890	81,0
1014	6	CEM I 32,5 R	C60B5R	1,025	0,832	81,2
1015	6	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	0,914	0,669	73,2

Analizując wytrzymałość na pośrednie rozciąganie mieszanek MCE z 2% dodatkiem cementu CEM I 32,5R w zależności od uziarnienia i rodzaju emulsji, po 28 dniowym okresie kondycjonowania w powietrzu w temperaturze +20°C widać, iż wartości uzyskane podczas badań mieszczą się w granicach od 0,621 do 0,709 MPa. Są one mniejsze niż wymagane według niemieckich wytycznych, zgodnie z którymi powinny wynosić od 0,75 do 1,20 MPa. Stanowią one od 82,8 do 94,5% wymaganej wartości minimalnej. Niespełnienie wymagań niemieckich związane może być to z faktem, iż zakładają one zawartość cementu wynoszącą od 3% do 6%. Rozważając wytrzymałość na pośrednie rozciąganie mieszanek MCE z 4% dodatkiem cementu CEM I 32,5R w zależności od uziarnienia i rodzaju emulsji, po 28 dniowym okresie kondycjonowania w powietrzu w temperaturze +20°C widać, iż wartości uzyskane podczas badań mieszczą się w granicach od 0,914 do 1,107 MPa. Wszystkie spełniają wymagania niemieckie. Zarówno dla mieszanek z 2%, jak i 4% dodatkiem cementu nie zauważono wyraźnego trendu określającego wpływ zawartości destruktu i rodzaju emulsji na uzyskiwane wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie.

Analizując wytrzymałość na pośrednie rozciąganie mieszanek MCE z 2% dodatkiem cementu CEM I 42,5R w zależności od uziarnienia i rodzaju emulsji, po 28 dniowym okresie kondycjonowania w powietrzu w temperaturze +20°C widać, iż wartości uzyskane podczas badań wynoszą od 0,624 do 0,793 MPa. Stanowią one od 83,2 do 105,7% wymaganej wartości minimalnej. Tylko jeden z projektów mieścił się w wymaganiach zawartych w niemieckich wytycznych. Zawierał on uziarnienie mieszanki nr 3 (75% destruktu) oraz emulsję C60B5ZM. Rozważając wytrzymałość na pośrednie rozciąganie mieszanek MCE z 4% dodatkiem cementu CEM I 42,5R w zależności od uziarnienia i rodzaju emulsji, po 28 dniowym okresie kondycjonowania w powietrzu w temperaturze 20°C widać, iż wartości uzyskane podczas badań mieszczą się w granicach od 0,965 do 1,244 MPa. Wszystkie mieszanki osiągają wartości większe niż 0,75 MPa (minimalne wg niemieckich wymagań). Jeden z projektów nie mieścił się w wymogach zawartych w niemieckich wytycznych – posiadał zbyt wysoką wytrzymałość na pośrednie rozciąganie. Zawierał on uziarnienie mieszanki nr 5 (53,9% destruktu) oraz emulsję C60B5R. Zarówno dla mieszanek z 2%, jak i 4% dodatkiem cementu nie zauważono wyraźnego trendu określającego wpływ zawartości destruktu i rodzaju emulsji na uzyskiwane wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po 28 dniowym okresie kondycjonowania w powietrzu w temperaturze 20°C.

Analizując wykres wytrzymałości na pośrednie rozciąganie mieszanki MCE w zależności od rodzaju cementu dla różnych kombinacji projektów uziarnienia i rodzajów emulsji, po 28 dniowym okresie kondycjonowania w powietrzu w

temperaturze +20°C (rysunek 4.7), można zauważyć, że w większości przypadków mieszanki z cementem CEM I 42,5R mają większą wytrzymałość na pośrednie rozciąganie niż analogiczne mieszanki z cementem CEM I 32,5R (8 na 12 przypadków).

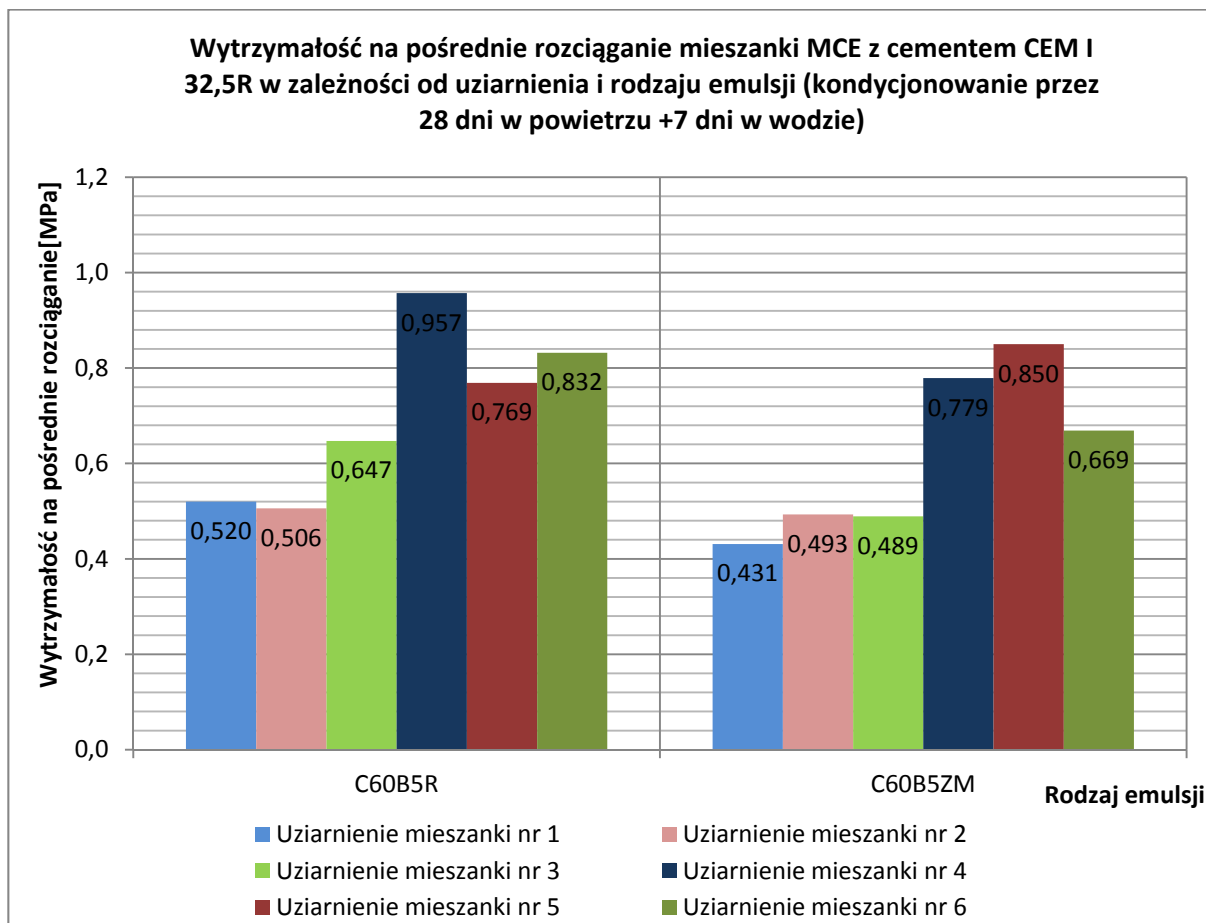


Rysunek 4.7. Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie mieszanek MCE

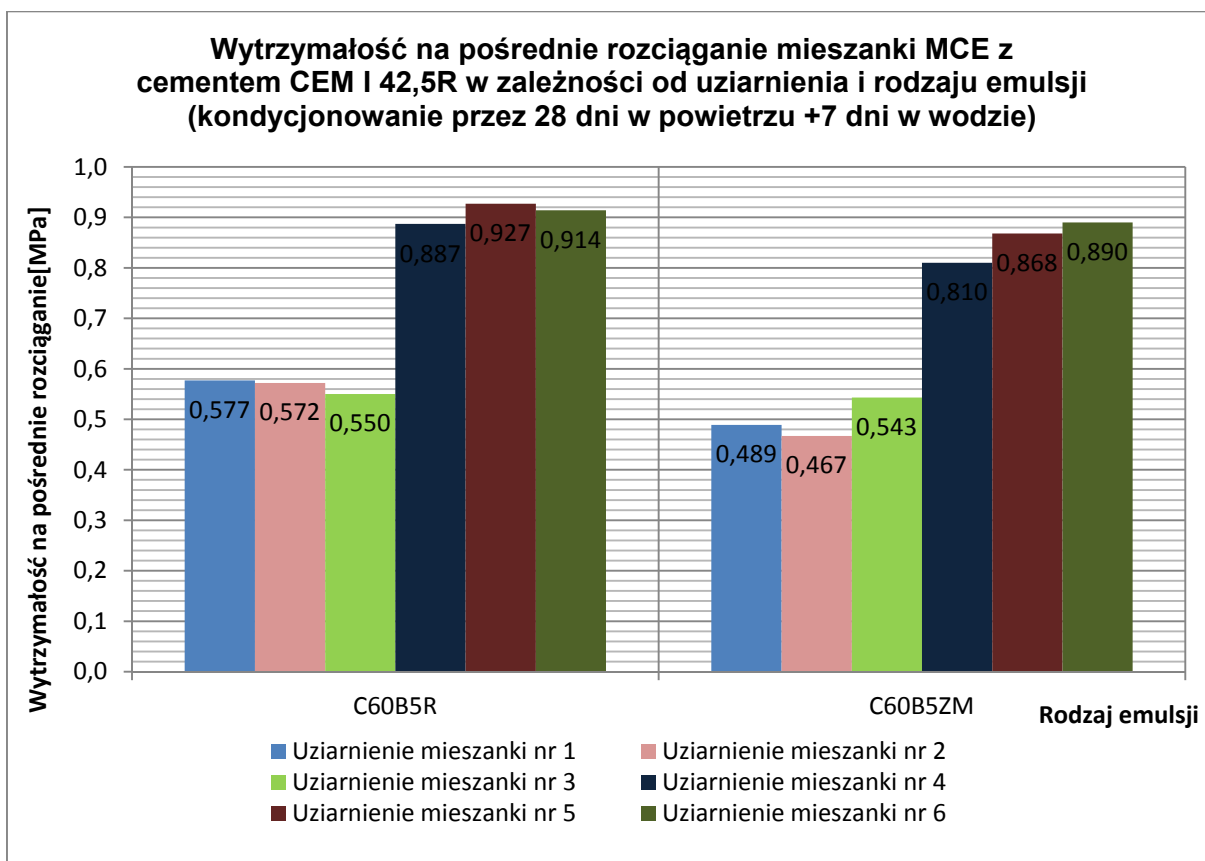
Analizując wykresy wytrzymałości na pośrednie rozciąganie (po 28 dniowym okresie kondycjonowania w powietrzu w temperaturze +20°C i 7 dniowym okresie kondycjonowania w wodzie w temperaturze +20°C) dla cementów CEM I 32,5R (rysunek 4.8) oraz CEM I 42,5R (rysunek 4.9) można stwierdzić, że wytrzymałości na pośrednie rozciąganie dla mieszanek z emulsją C60B5R są większe od wytrzymałości na pośrednie rozciąganie dla mieszanek z emulsją C60B5ZM. Wyjątek stanowi mieszanka o uziarnieniu nr 5 (zawartość destruktu wynosi 53,9%) z cementem CEM I 32,5R, dla której wytrzymałość na pośrednie rozciąganie jest większa dla emulsji C60B5ZM (0,850 MPa przy 0,769MPa dla emulsji C60B5R). Można również zauważyć, że mieszanki o uziarnieniu 4, 5 oraz 6 osiągają zdecydowanie wyższe wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie niż mieszanki o uziarnieniu 1, 2 oraz 3. Związane jest to z tym, iż mają one większą zawartość cementu. Dla 2% zawartości cementu CEM I 32,5R wartości

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

wytrzymałości na pośrednie rozciąganie wynoszą od 0,506 do 0,647 MPa dla emulsji C60B5R oraz od 0,431 do 0,493 MPa dla emulsji C60B5ZM, natomiast dla 4% zawartości tego cementu wynoszą one od 0,769 do 0,957 MPa dla emulsji C60B5R oraz od 0,779 do 0,850 MPa dla emulsji C60B5ZM. Dla 2% zawartości cementu CEM I 42,5R wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie wynoszą od 0,550 do 0,577 MPa dla emulsji C60B5R oraz od 0,467 do 0,543 MPa dla emulsji C60B5ZM, natomiast dla 4% zawartości tego cementu wynoszą one od 0,887 do 0,927 MPa dla emulsji C60B5R oraz od 0,810 do 0,890 MPa dla emulsji C60B5ZM.



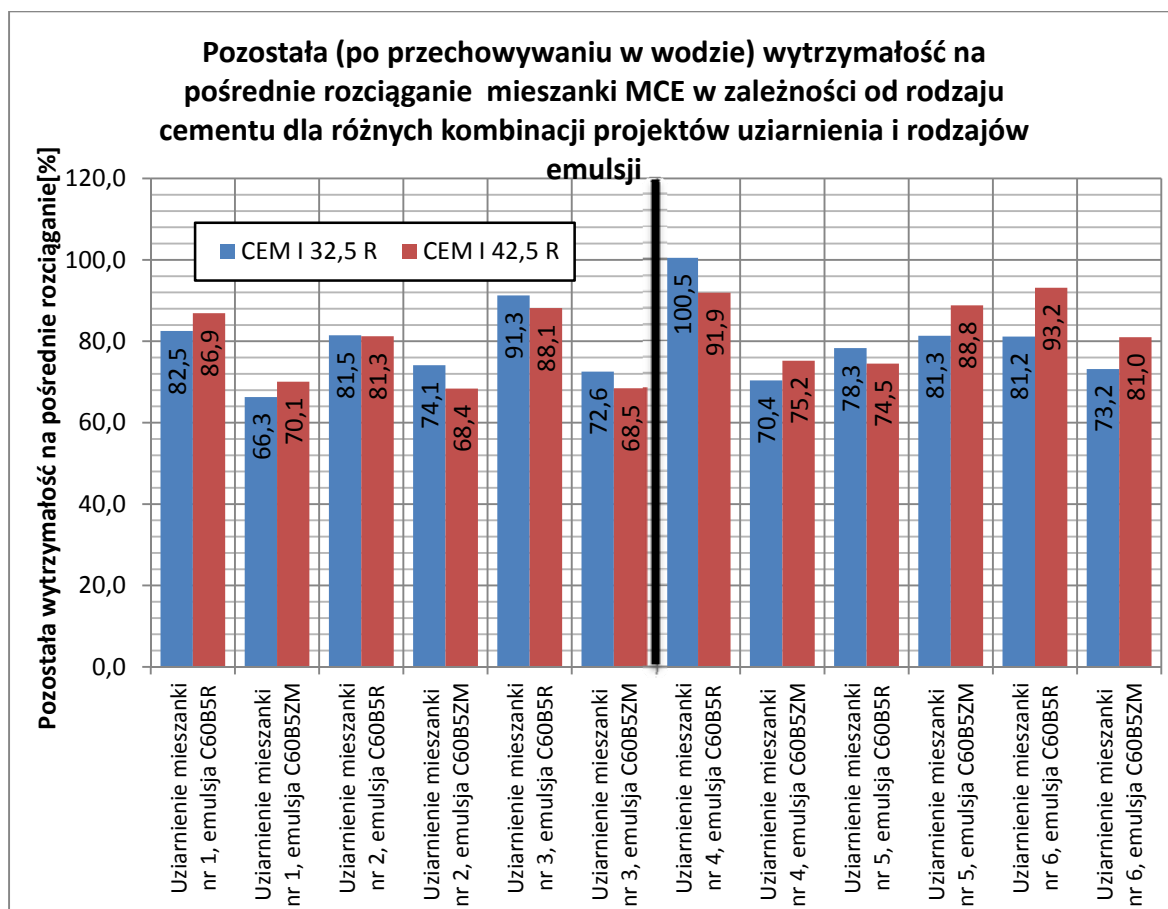
Rysunek 4.8. Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie mieszanki MCE z cementem CEM I 32,5R w zależności od uziarnienia i rodzaju emulsji, po 28 dniowym okresie kondycjonowania w powietrzu w temperaturze +20°C i 7 dniowym okresie kondycjonowania w wodzie w temperaturze +20°C



Rysunek 4.9. Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie mieszanki MCE z cementem CEM I 42,5R w zależności od uziarnienia i rodzaju emulsji, po 28 dniowym okresie kondycjonowania w powietrzu w temperaturze +20°C i 7 dniowym okresie kondycjonowania w wodzie w temperaturze +20°C

Analizując wytrzymałość na pośrednie rozciąganie ze względu na rodzaj cementu (dla próbek po 28 dniowym okresie kondycjonowania w powietrzu w temperaturze +20°C i 7 dniowym okresie kondycjonowania w wodzie w temperaturze +20°C) dla mieszanek o jednakowym uziarnieniu i rodzaju emulsji można zauważyć, że w większości przypadków (9 z 12) mieszanki z cementem CEM I 42,5R osiągały większe wartości wytrzymałości. Różnice w wynikach pomiarów nie są jednak duże i wynoszą od -0,097 do + 0,221 MPa (stanowi to od -18% do +25% w stosunku do wytrzymałości próbek z cementem CEM I 42,5R).

Parametrem obrazującym wpływ wilgoci na właściwości mieszanek MCE jest pozostała wytrzymałość na pośrednie rozciąganie po przechowywaniu w wodzie. Wykres pozostałej wytrzymałości na pośrednie rozciąganie mieszanki MCE w zależności od rodzaju cementu dla różnych kombinacji projektów uziarnienia i rodzajów emulsji przedstawia rysunek 4.10. Dla cementu CEM I 32,5R wynosi ona od 66,3 do 100,5%, natomiast dla cementu CEM I 42,5R od 68,4 do 93,2%. Nie widać wyraźnego trendu określającego wpływ rodzaju cementu na pozostałą po przechowywaniu w wodzie wartość wytrzymałości na pośrednie rozciąganie.

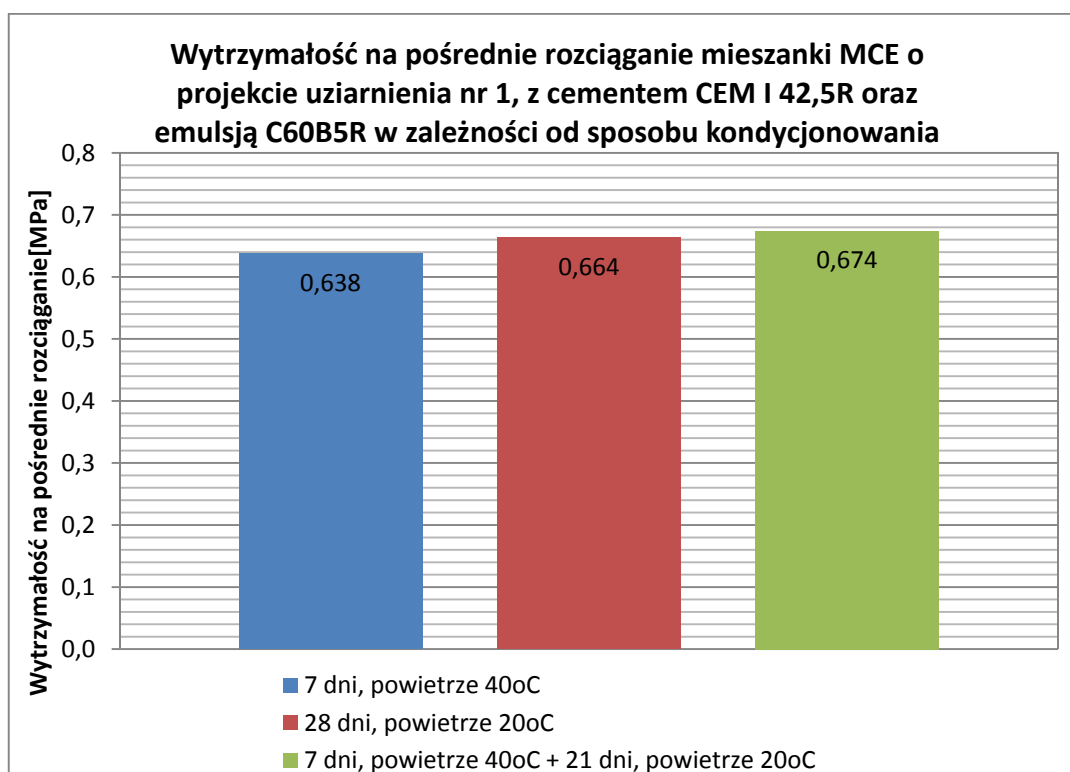


Rysunek 4.10. Pozostała (po przechowywaniu w wodzie) wytrzymałość na pośrednie rozciąganie mieszanki MCE w zależności od rodzaju cementu dla różnych kombinacji projektów uziarnienia i rodzajów emulsji

Analizując wpływ rodzaju emulsji na pozostałą wytrzymałość na pośrednie rozciąganie mieszanki MCE dla różnych kombinacji projektów uziarnienia i rodzajów cementu, zauważono, iż mieszanki z emulsją C60B5R są mniej wrażliwe na wpływ wilgoci niż mieszanki z emulsją C60B5ZM (10 z 12 przypadków). Mieszanki z emulsją C60B5R spełniły wymagania brytyjskie dotyczące pozostałej wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, która powinna wynosić co najmniej 80% (wyjątek stanowią mieszanki o uziarnieniu nr 5, dla których do osiągnięcia pozostałej wytrzymałości wynoszącej 80% zabrakło zaledwie 5,5 oraz 1,7%). 9 z 12 projektów mieszanek z emulsją C60B5ZM nie spełniło wymagań brytyjskich dotyczących pozostałej wytrzymałości na pośrednie rozciąganie.

Dla mieszanki MCE o projekcie uziarnienia nr 1, zawierającej cement CEM I 42,5R oraz emulsję C60B5R sporządzono dodatkowe próbki w celu porównania wpływu kondycjonowania na wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie. Pierwsza seria próbek była kondycjonowana w powietrzu w temperaturze +40°C przez 7 dni, druga w powietrzu w temperaturze +20°C przez 28 dni, natomiast trzecia początkowo w powietrzu w temperaturze +40°C przez 7 dni, a następnie przez 21 dni w powietrzu w temperaturze +20°C. Wykres wytrzymałości na pośrednie rozciąganie w zależności od sposobu kondycjonowania przedstawiono na rysunku 4.11. Uzyskane wartości są

bardzo zbliżone i wynoszą od 0,638 do 0,674 MPa. Najmniejszą wartość uzyskały próbki kondycjonowane przez 7 dni w temperaturze +40°C, natomiast największą kondycjonowane początkowo w powietrzu w temperaturze +40°C przez 7 dni, a następnie w powietrzu w temperaturze +20°C przez 21 dni. W celu potwierdzenia tego trendu, konieczne byłoby wykonanie badań wpływu kondycjonowania dla większej ilości projektów mieszanek MCE, gdyż różnice pomiędzy wynikami są nieznaczne i mieszczą się w granicach błędu pomiaru.



Rysunek 4.11. Wytrzymałość na pośrodkie rozciąganie mieszanki MCE o projekcie uziarnienia nr 1, z cementem CEM I 42,5R oraz emulsją C60B5R w zależności od sposobu kondycjonowania

4.8.3 Zawartość wolnej przestrzeni

Zawartość wolnej przestrzeni wyznacza się na podstawie gęstości objętościowej oraz gęstości strukturalnej (wg nazewnictwa użytego w zeszytu 61 IBDiM). Według warunków technicznych [2] wymagane wartości wolnej przestrzeni w próbce zależą od metody zagęszczania. Podczas badań dokonywano zagęszczania próbek ubijakiem Marshalla. Wymagane wartości wolnej przestrzeni wynoszą dla tej metody od 9,0 do 16,0%. Wyznacza się je z następującego wzoru:

$$P = \frac{\rho_o - \rho_s}{\rho_o} \cdot 100 [\%]$$

gdzie:

- ρ_o - gęstość objętościowa mieszanki MCE (nazewnictwo wg zeszytu 61 IBDiM),
- ρ_s - gęstość strukturalna zagęszczonej mieszanki MCEj, oznaczona metodą hydrostatyczną (nazewnictwo wg zeszytu 61 IBDiM),

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Wartości uzyskane podczas badań zestawiono w tablicy 4.8.

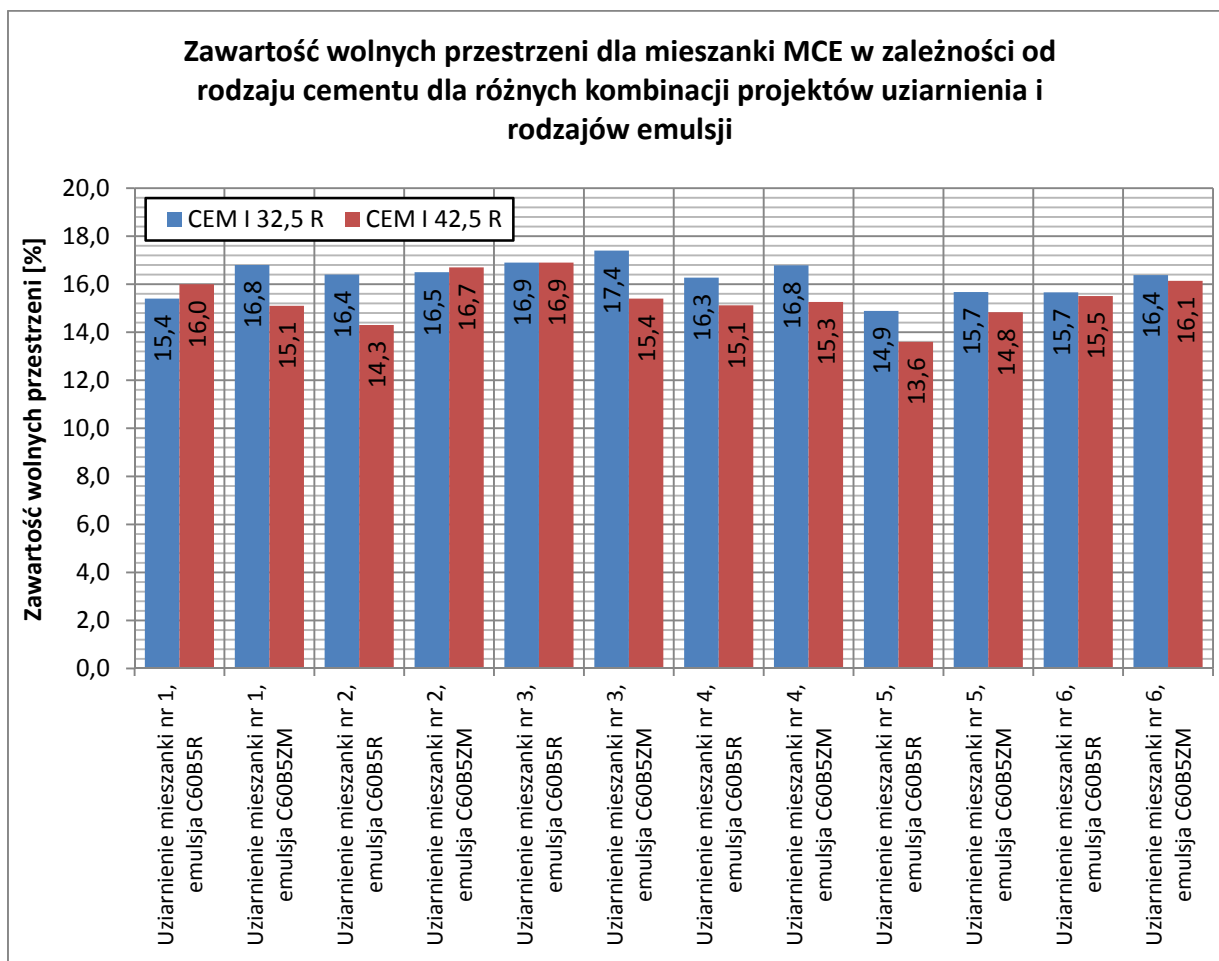
Tablica 4.8. Wyniki badań wolnej przestrzeni

Nr próbki	Projekt uziarnienia	Rodzaj cementu	Rodzaj emulsji	Badanie		
				Gęstość strukturalna [g/cm ³]	Gęstość objętościowa [g/cm ³]	Wolna przestrzeń [%]
653	1	CEM I 42,5 R	C60B5R	2,079	2,474	16,0
671	2	CEM I 42,5 R	C60B5R	2,130	2,484	14,3
672	3	CEM I 42,5 R	C60B5R	2,063	2,484	16,9
698	1	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	2,099	2,472	15,1
700	2	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	2,090	2,509	16,7
702	3	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	2,098	2,481	15,4
731	1	CEM I 32,5 R	C60B5R	2,109	2,493	15,4
742	2	CEM I 32,5 R	C60B5R	2,091	2,500	16,4
743	3	CEM I 32,5 R	C60B5R	2,059	2,478	16,9
750	1	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	2,078	2,498	16,8
754	2	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	2,097	2,510	16,5
762	3	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	2,048	2,478	17,4
939	4	CEM I 42,5 R	C60B5R	2,127	2,506	15,1
940	4	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	2,121	2,503	15,3
941	4	CEM I 32,5 R	C60B5R	2,099	2,507	16,3
942	4	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	2,092	2,514	16,8
956	5	CEM I 42,5 R	C60B5R	2,147	2,485	13,6
957	5	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	2,136	2,508	14,8
962	5	CEM I 32,5 R	C60B5R	2,115	2,485	14,9
963	5	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	2,120	2,514	15,7
988	6	CEM I 42,5 R	C60B5R	2,108	2,495	15,5
989	6	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	2,078	2,478	16,1
1014	6	CEM I 32,5 R	C60B5R	2,095	2,484	15,7
1015	6	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	2,067	2,472	16,4

Gęstości strukturalne próbek wynoszą od 2,048 do 2,147 g/cm³, natomiast gęstości objętościowe od 2,472 do 2,514 g/cm³. Zawartości wolnej przestrzeni uzyskane podczas badań laboratoryjnych mieszczą się w granicach od 13,6 do 17,4%. Aż 11 z 24 projektów mieszanek nie spełnia wymagań zawartych w polskich wytycznych. Spowodowane jest to tym, że pomimo zastosowania form perforowanych, płyny w momencie uderzania pochłaniają część energii, co skutkuje zmniejszeniem gęstości strukturalnej i zwiększeniem ilości wolnych przestrzeni w próbce.

Rozpatrując zawartość wolnych przestrzeni w zależności od rodzaju cementu dla różnych kombinacji projektów uziarnienia i rodzajów emulsji (rysunek 4.12) można zauważyć, iż mieszanki z cementem CEM I 42,5R uzyskują mniejsze zawartości wolnych przestrzeni niż analogiczne mieszanki z cementem CEM I 32,5R (9 z 12

przypadków). Wyjątek stanowią 3 mieszanki z 2% zawartością cementu (projekt o uziarnieniu mieszanki nr 1 z emulsją C60B5R, projekt o uziarnieniu mieszanki nr 2 z emulsją C60BZM oraz projekt o uziarnieniu mieszanki nr 3 z emulsją C60B5R). Porównując uzyskane zawartości wolnych przestrzeni dla próbek z 2 oraz 4% zawartością cementu można zauważyć, iż w 8 z 12 przypadków zawartości wolnych przestrzeni w mieszankach z 4% zawartością cementu były mniejsze niż dla analogicznych mieszanek z 2% zawartością cementu.



Rysunek 4.12. Zawartość wolnej przestrzeni dla mieszanki MCE w zależności od rodzaju cementu dla różnych kombinacji projektów uziarnienia i rodzajów emulsji

Analizując zawartość wolnych przestrzeni w zależności od rodzaju emulsji dla różnych kombinacji projektów uziarnienia i rodzajów cementu można zauważyć, że w 10 na 12 przypadków mieszanki z emulsją C60B5R uzyskiwały mniejszą zawartość wolnych przestrzeni. Wyjątek stanowiły 2 projekty mieszanek z 2% zawartością cementu CEM I 42,5R – projekt uziarnienia nr 1 oraz nr 3.

Dokonując analizy zawartości wolnych przestrzeni w zależności od uziarnienia (zawartości destruktu) nie zauważono żadnych zależności określających jego wpływ na wyniki uzyskiwane dla próbek zagęszczanych w laboratorium metodą Marshalla.

4.8.4 Wytrzymałość na ściskanie proste

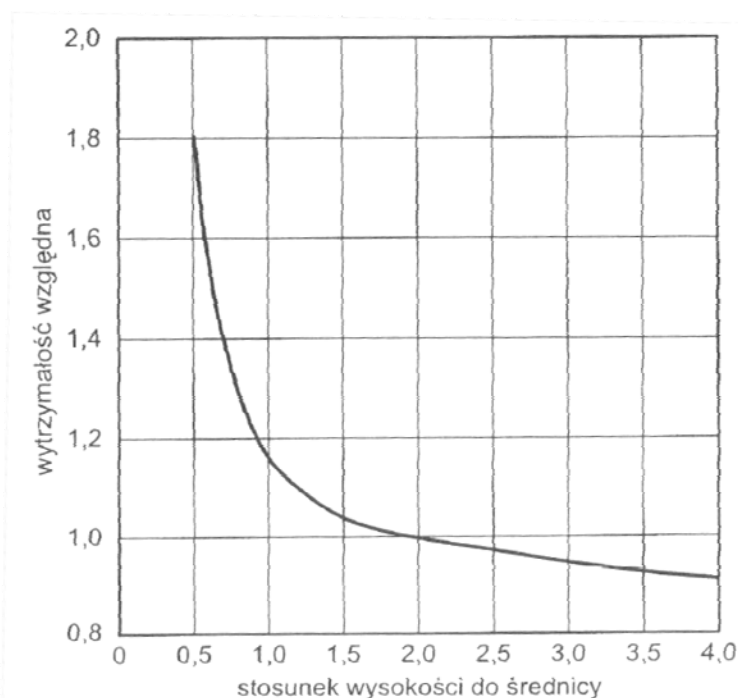
Kolejnym badaniem, które wykorzystano do oceny wpływu rodzaju oraz ilości cementu, rodzaju emulsji oraz uziarnienia mieszanki mineralnej na właściwości mieszanek MCE jest badanie wytrzymałości na ściskanie proste. Analizie poddano próbki o wysokości $63,5 \pm 3$ mm i średnicy 101,6 mm. Prędkość posuwu tłoka prasy wynosiła 0,3 mm/s (18 mm/min). Temperatura badanych próbek wynosiła $+20 \pm 5^\circ\text{C}$. Nie jest to badanie normowe. Jego celem jest porównanie, w jaki sposób rodzaj oraz ilość cementu, rodzaj emulsji oraz uziarnienie mieszanki wpływają na wytrzymałość próbek. Wyniki uzyskane podczas badań przedstawia tablica 4.8.

Tablica 4.8 Zestawienie wyników badań wytrzymałości na ściskanie proste

Nr próbki	Projekt uziarnienia	Rodzaj cementu	Rodzaj emulsji	Badanie	
				Wytrzymałość na ściskanie proste [Mpa]	Wytrzymałość na ściskanie proste po uwzględnieniu smukłości (dla $h/d=2,0$) [Mpa]
653	1	CEM I 42,5 R	C60B5R	3,09	1,99
671	2	CEM I 42,5 R	C60B5R	3,36	2,15
672	3	CEM I 42,5 R	C60B5R	2,31	1,50
698	1	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	3,18	2,07
700	2	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	3,48	2,24
702	3	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	3,58	2,27
731	1	CEM I 32,5 R	C60B5R	2,56	1,64
742	2	CEM I 32,5 R	C60B5R	3,01	1,96
743	3	CEM I 32,5 R	C60B5R	2,76	1,80
750	1	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	3,13	2,03
754	2	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	3,61	2,32
762	3	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	2,81	1,83
939	4	CEM I 42,5 R	C60B5R	4,88	3,13
940	4	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	6,11	3,96
941	4	CEM I 32,5 R	C60B5R	5,47	3,54
942	4	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	5,84	3,78
956	5	CEM I 42,5 R	C60B5R	6,11	3,94
957	5	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	6,25	4,03
962	5	CEM I 32,5 R	C60B5R	4,89	3,16
963	5	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	5,73	3,68
988	6	CEM I 42,5 R	C60B5R	5,21	3,40
989	6	CEM I 42,5 R	C60B5ZM	5,73	3,74
1014	6	CEM I 32,5 R	C60B5R	5,30	3,43
1015	6	CEM I 32,5 R	C60B5ZM	4,48	2,95

W związku z tym, iż analizowane próbki nie miały stosunku $h/d=2,0$, konieczne było zastosowanie współczynnika korygującego. Na podstawie rysunku 4.13, który

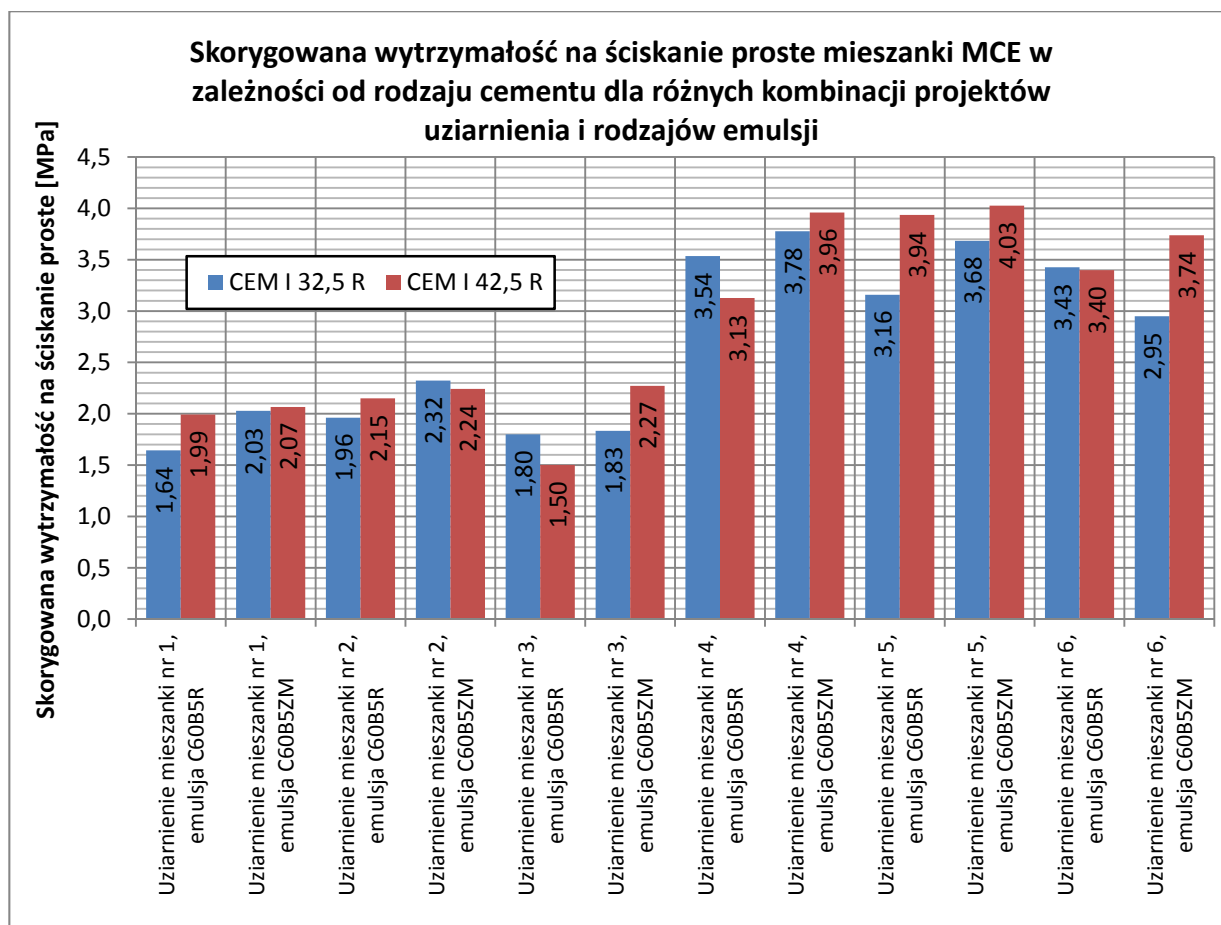
przedstawia wpływ smukłości na wytrzymałość betonów o niskiej wytrzymałości znajdującego się w książce A.M.Neville'a pt. „Właściwości betonu”, określono zależność pomiędzy stosunkiem wysokości do średnicy, a wytrzymałością względną. Następnie na podstawie pomiaru wysokości oraz średnicy dla każdej z próbek określano wartość wytrzymałości względnej. Wzrost mierzonej wytrzymałości przy wartościach h/d mniejszych niż 1,5 spowodowany jest na skutek ograniczającego wpływu, jaki płyty dociskowe wywierają na badaną próbkę.



Rysunek 4.13. Wpływ stosunku wysokości walca do jego średnicy na wytrzymałość pozorną próbki walcowej

Analizując skorygowaną wytrzymałość na ściskanie proste wyraźnie widać, że mieszanki z 4% zawartością cementu osiągają wyższe wartości wytrzymałości niż analogiczne projekty z 2% zawartością cementu.

Rozpatrując wykres skorygowanej wytrzymałości na ściskanie proste mieszanki MCE w zależności od rodzaju cementu dla różnych kombinacji projektów uziarnienia i rodzajów emulsji (rysunek 4.14) można zauważyć, iż nie wszystkie mieszanki z cementem CEM I 42,5R (8 z 12) uzyskały większą wytrzymałość niż analogiczne mieszanki z cementem CEM I 32,5R.



Rysunek 4.14. Skorygowana wytrzymałość na ściskanie proste mieszanki MCE w zależności od rodzaju cementu dla różnych kombinacji projektów uziarnienia i rodzajów emulsji

Rozważając wpływ rodzaju emulsji na skorygowaną wytrzymałość na ściskanie proste dla różnych kombinacji projektów uziarnienia i rodzajów cementu zauważono, iż mieszanki z emulsją C60B5ZM uzyskują większe wartości wytrzymałości na ściskanie proste. Prawdopodobnie spowodowane jest to tym, iż asfalt znajdujący się w tej emulsji ma mniejszą penetrację niż asfalt znajdujący się w emulsji asfaltowej C60B5R. Wyjątek stanowi mieszanka o uziarnieniu nr 6 z cementem CEM I 32,5R, dla której skorygowana wytrzymałość na ściskanie wynosi 3,43 MPa dla emulsji C60B5R oraz 2,95 MPa dla emulsji C60B5ZM.

Rozpatrując skorygowaną wytrzymałość na ściskanie proste w zależności od uziarnienia i rodzaju emulsji nie zauważono wyraźnego trendu, który przedstawiałby zależność wytrzymałości od rodzaju uziarnienia (zawartości destruktu w mieszance).

4.8.5 Podsumowanie wyników badań

Dokonując analizy wyników uzyskanych z przeprowadzonych badań laboratoryjnych można dojść do następujących wniosków:

1. Żaden projekt mieszanki MCE nie spełniał wymagań zawartych w polskich wytycznych dotyczących stabilności według Marshalla dla dróg o kategorii ruchu od KR3 do KR6.

2. Wszystkie projekty mieszanek MCE, w których użyto 4% cementu spełniły wymagania dotyczące stabilności według Marshalla dla dróg o kategorii ruchu od KR1 do KR2).
3. Maksymalne wartości stabilności osiągały próbki o najmniejszej zawartości destruktu. Próbki o największej zawartości destruktu charakteryzowały się najmniejszymi wartościami stabilności. Świadczy to o tym, że wraz ze wzrostem zawartości destruktu w badanej próbce, jej stabilność maleje.
4. Mieszanki z cementem CEM I 42,5R mają większą stabilność niż analogiczne mieszanki z cementem CEM I 32,5R. Oznacza to, że zastosowanie cementu o wyższej klasie wytrzymałości powoduje uzyskanie większej stabilności według Marshalla.
5. Wszystkie projekty mieszanek MCE spełniały polskie wymagania dotyczące odkształcenia według Marshalla.
6. Projekty mieszanek MCE charakteryzujące się większą zawartością destruktu uzyskały większe odkształcenie według Marshalla.
7. Tylko jeden z projektów mieszanek MCE z 2% zawartością cementu mieścił się w wymaganiach dotyczących wytrzymałości na pośrednie rozciąganie zawartych w niemieckich wytycznych. Związane może być to z faktem, iż wymagania niemieckie zakładają zawartość cementu wynoszącą od 3 do 6%. Próbki o najmniejszej wytrzymałości na pośrednie rozciąganie uzyskały 83% wymaganej wartości minimalnej. Różnica pomiędzy najmniejszą zbadaną wartością, a dolną granicą wartości wymaganych wynosiła zaledwie 0,13 MPa.
8. Rozważając wytrzymałość na pośrednie rozciąganie mieszanek MCE z 4% dodatkiem cementu po 28 dniowym okresie kondycjonowania w powietrzu w temperaturze +20°C zauważono, iż wszystkie mieszanki osiągnęły wartości większe niż 0,75 MPa (minimalne wg niemieckich wymagań). Jeden z projektów nie mieścił się w wymogach zawartych w niemieckich wytycznych – posiadał zbyt wysoką wytrzymałość na pośrednie rozciąganie.
9. Mieszanki z cementem CEM I 42,5R w większości przypadków osiągnęły większą wytrzymałość na pośrednie rozciąganie po 28 dniowym okresie kondycjonowania w powietrzu w temperaturze +20°C niż analogiczne mieszanki z cementem CEM I 32,5R.
10. Wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po 28 dniowym okresie kondycjonowania w powietrzu w temperaturze +20°C i 7 dniowym okresie kondycjonowania w wodzie w temperaturze +20°C uzyskane dla mieszanek z emulsją C60B5R były większe od wytrzymałości na pośrednie rozciąganie uzyskanych dla mieszanek z emulsją C60B5ZM.
11. Wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po 28 dniowym okresie kondycjonowania w powietrzu w temperaturze +20°C i 7 dniowym okresie kondycjonowania w wodzie w temperaturze +20°C uzyskane dla mieszanek z 4% zawartością cementu były zdecydowanie wyższe niż dla mieszanek z 2% zawartością cementu.
12. W większości przypadków (9 z 12) mieszanki z cementem CEM I 42,5R osiągały większe wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po 28 dniowym okresie kondycjonowania w powietrzu w temperaturze +20°C i 7 dniowym okresie kondycjonowania w wodzie w temperaturze +20°C
13. Nie zauważono wyraźnego trendu określającego wpływ rodzaju cementu na pozostałą po przechowywaniu w wodzie wartość wytrzymałości na pośrednie

- rozciąganie. Mieszanki z emulsją C60B5R były mniej wrażliwe na wpływ wilgoci niż mieszanki z emulsją C60B5ZM (10 z 12 przypadków). Mieszanki z emulsją C60B5R spełniły wymagania brytyjskie dotyczące pozostałej wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, która powinna wynosić co najmniej 80% (wyjątek stanowią mieszanki o uziarnieniu nr 5, dla których do osiągnięcia pozostałej wytrzymałości wynoszącej 80% zabrakło zaledwie 5,5 oraz 1,7%). 9 z 12 projektów mieszanek z emulsją C60B5ZM nie spełniło wymagań brytyjskich dotyczących pozostałej wytrzymałości na pośrednie rozciąganie.
14. Zawartości wolnej przestrzeni uzyskane podczas badań laboratoryjnych mieściły się w granicach od 13,6 do 17,4%. Aż 11 z 24 projektów mieszanek nie spełniało wymagań zawartych w polskich wytycznych. Spowodowane było to tym, że pomimo zastosowania form perforowanych, płyny w momencie uderzania pochłaniają część energii, co skutkuje zmniejszeniem gęstości strukturalnej i zwiększeniem ilości wolnych przestrzeni w próbce.
 15. Mieszanki z cementem CEM I 42,5R uzyskały mniejsze zawartości wolnych przestrzeni niż analogiczne mieszanki z cementem CEM I 32,5R (9 z 12 przypadków).
 16. W 8 z 12 przypadków zawartości wolnych przestrzeni w mieszankach z 4% zawartością cementu były mniejsze niż dla analogicznych mieszanek z 2% zawartością cementu.
 17. Mieszanki z emulsją C60B5R uzyskują mniejszą zawartość wolnych przestrzeni (10 z 12 przypadków).
 18. Mieszanki MCE z 4% zawartością cementu osiągały wyższe wartości wytrzymałości niż analogiczne projekty z 2% zawartością cementu.
 19. Mieszanki MCE o jednakowym uziarnieniu, w których użyto emulsję C60B5ZM uzyskały większe wartości wytrzymałości na ściskanie proste niż mieszanki, w których użyto emulsję C60B5R. Prawdopodobnie spowodowane jest to tym, iż asfalt znajdujący się w emulsji C60B5ZM ma mniejszą penetrację niż asfalt znajdujący się w emulsji asfaltowej C60B5R.

Wnioski z niniejszej części posłużą do opracowania weryfikacji metody projektowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych, która będzie przedmiotem III etapu raportu.

5. Odcinek doświadczalny

W celu weryfikacji metod projektowania podbudów z mieszanek MCE, przy współpracy z Zachodniopomorskim Zarządem Dróg Wojewódzkich w Koszalinie oraz firmą wykonawczą warstwy MCE, SAT Sp. z o.o., zrealizowano odcinek doświadczalny.

Odcinek doświadczalny wykonano w ciągu drogi wojewódzkiej DW 172 Barwice – Radacz, od km 24+200 do km 27+290. Remont polegał na przetworzeniu istniejących warstw asfaltowych na podbudowę MCE w technologii na miejscu, ułożeniu warstwy przeciwspekaniowej z geosiatki oraz ułożeniu dwóch warstw asfaltowych – wiążącej z betonu asfaltowego o grubości 6 cm oraz ścieralnej z mastyksu grysowego SMA o grubości 4 cm.

Recepta laboratoryjna na wykonanie podbudowy z mieszanki MCE zakładała następujący skład:

- 3% emulsji asfaltowej C65 B3 RC,
- 3% cementu,
- 94% destruktu bitumiczny + podbudowa.

W receptie nie przewidziano użycia kruszywa doziarniającego.

W celu określenia wpływu składu mieszanki MCE na jej parametry na fragmencie przeznaczonym na odcinek doświadczalny wykonano trzy sekcje:

- Sekcja nr 1 – zawartość emulsji i cementu zgodna z receptą,
- Sekcja nr 2 – 3% emulsji i 1% cementu,
- Sekcja nr 3 – 5% emulsji i 1% cementu.

Podział na sekcje został zastabilizowany w terenie w celu możliwości późniejszej obserwacji zachowania nawierzchni. Podział odcinka na sekcje doświadczalne przedstawiono w tabelicy 5.1.

Tabela 5.1. Podział odcinka na sekcje doświadczalne

Nr sekcji	Kilometraż	
	od	do
1	25+369	25+433
2	25+433	25+482
3	25+482	25+535

Na rysunkach od 5.1 do 5.6 przedstawiono wykonywanie warstwy z mieszanki MCE, natomiast na rysunku 5.7 wykonane warstwy asfaltowe.

Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac



Rysunek 5.1. Rozłożona warstwa podbudowy z mieszanki MCE



Rysunek 5.2. Dozowanie cementu na destruk bitumiczny

Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac



Rysunek 5.3. Dozowanie emulsji asfaltowej oraz mieszanie składników



Rysunek 5.4. Wstępne zagęszczanie warstwy MCE



Rysunek 5.5. Równanie warstwy MCE



Rysunek 5.6. Zagęszczona warstwa podbudowy z mieszanki MCE



Rysunek 5.7. Wykonana nawierzchnia odcinka doświadczalnego

Podczas wykonywania prac Zespół Badawczy pobrał z każdej sekcji próbki mieszanki MCE, bezpośrednio z recyklera po ostatecznym dozowaniu i wymieszaniu wszystkich składników. Z tak pobranych próbek materiału zostały uformowane próbki do badań. Próbki zostały zagęszczone w ubijakach Marshalla w laboratorium Wykonawcy w Koszalinie, następnie zostały przetransportowane do Laboratorium Badań Drogowych Politechniki Gdańskiej.

Z każdej sekcji wykonano po 9 próbek. Próbki po 28 dniach zostały poddane następującym badaniom:

- Stabilność i odkształcenie wg Marshalla wg [2],
- Moduł sztywności sprężystej ITSM wg PN-EN 12697-26,
- Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie ITS wg PN-EN 12697-23.

Wyniki badań przedstawiono w tabelicy 5.2. Badanie Marshalla przeprowadzono w temperaturach +20°C i +40°C kondycjonując próbki w powietrzu oraz w temperaturze +60°C kondycjonując próbki w wodzie.

Tablica 5.2. Wyniki badań próbek MCE formowanych w laboratorium

nr sekcji	Moduł sztywności sprężystej wg PN-EN 12697-26 ITSM [MPa]		Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie wg PN-EN 12697-23 ITS [MPa]		Stabilność wg Marshalla [kN]			Odkształcenie wg Marshalla [mm]		
	+5°C	+20°C	+5°C	+20°C	+20°C	+40°C	+60°C	+20°C	+40°C	+60°C
1	14480	9832	1,043	0,826	33,8	27,5	18,4	1,3	1,8	1,7
2	7030	1374	0,557	0,286	18,1	11,5	4,7	1,8	1,5	2,3
3	5343	1830	0,602	0,395	16,9	10,0	4,6	2,4	2,6	2,3

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

W celu porównania wyników otrzymanych na próbkach laboratoryjnych badania powtórzono na próbkach pobranych z nawierzchni, po 28 dniach od wykonania warstwy podbudowy z mieszanki MCE. Próbki do badań zostały pobrane wiertnicą mechaniczną. Z każdej sekcji pobrano po 9 próbek o średnicy 100 mm. Na rysunku 5.8 pokazano wiertnicę podczas pobierania próbek.



Rysunek 5.8. Pobieranie próbek z wykonanej nawierzchni.

Wyniki badań przeprowadzonych na próbkach pobranych z nawierzchni przedstawiono w tabelicy 5.3.

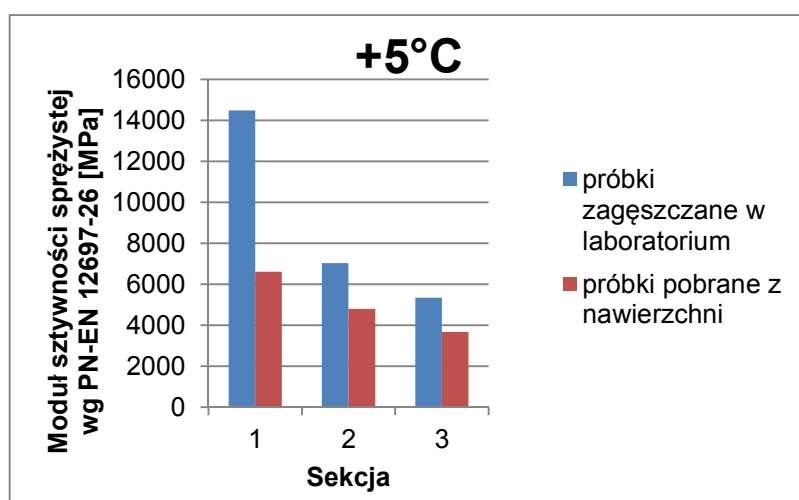
Tablica 5.3. Wyniki badań próbek MCE pobranych z nawierzchni

nr sekcji	Moduł sztywności sprężystej wg PN-EN 12697-26 ITSM [MPa]		Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie wg PN-EN 12697-23 ITS [MPa]		Stabilność wg Marshalla [kN]			Odształcenie wg Marshalla [mm]		
	+5°C	+20°C	+5°C	+20°C	+20°C	+40°C	+60°C	+20°C	+40°C	+60°C
1	6605	6098	0,431	0,515	20,0	13,4	13,8	3,8	4,1	3,8
2	4785	1607	0,524	0,335	16,1	7,4	3,3	4,8	3,6	3,7
3	3667	1391	0,747	0,372	13,1	9,5	3,3	4,0	4,2	4,0

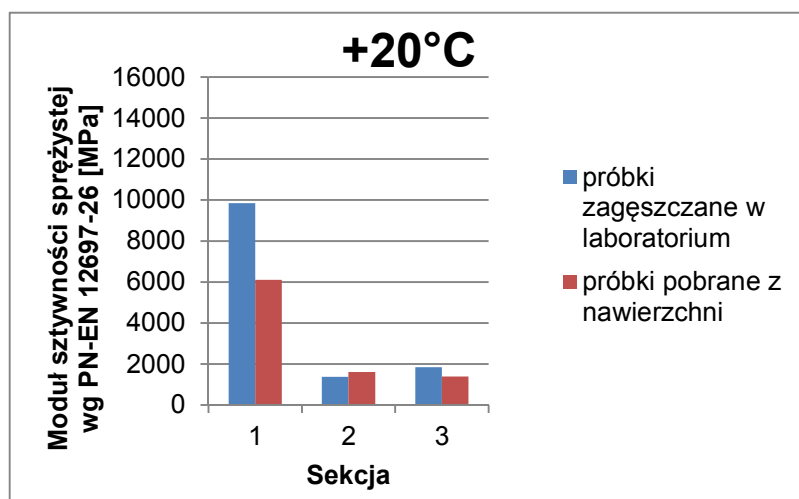
Porównanie otrzymanych wyników badań z wartościami otrzymanymi w receptce oraz wymaganiami wg warunków technicznych [2] przedstawiono w tablicach od 5.4 do 5.7 oraz na rysunkach od 5.9 do 5.18.

Tablica 5.4. Moduł sztywności sprężystej

nr sekcji	Moduł sztywności sprężystej wg PN-EN 12697-26 ITSM [MPa]			
	+5°C		+20°C	
	próbki z laboratorium	próbki z nawierzchni	próbki z laboratorium	próbki z nawierzchni
1	14480	6605	9832	6098
2	7030	4785	1374	1607
3	5343	3667	1830	1391



Rysunek 5.9. Moduł sztywności sprężystej w temperaturze +5°C

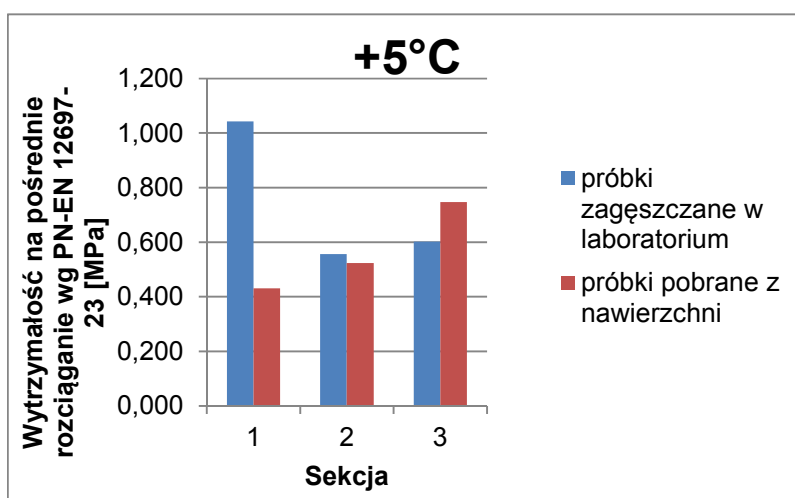


Rysunek 5.10. Moduł sztywności sprężystej w temperaturze +20°C

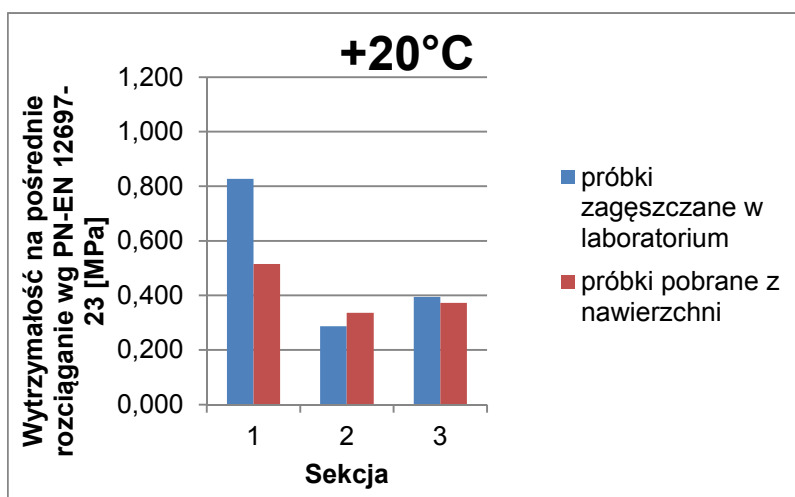
**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Tablica 5.5. Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie

nr sekcji	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie wg PN-EN 12697-23 ITS [MPa]			
	+5°C		+20°C	
	próbki z laboratorium	próbki z nawierzchni	próbki z laboratorium	próbki z nawierzchni
1	1,043	0,431	0,826	0,515
2	0,557	0,524	0,286	0,335
3	0,602	0,747	0,395	0,372



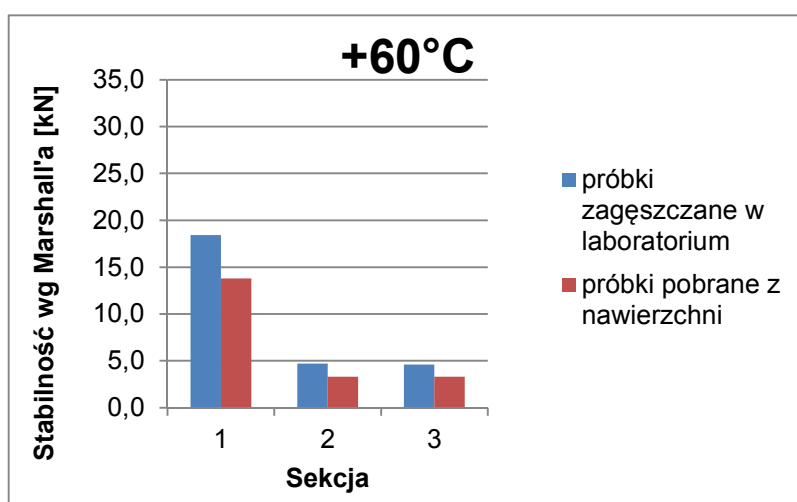
Rysunek 5.11. Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie w temperaturze +5°C



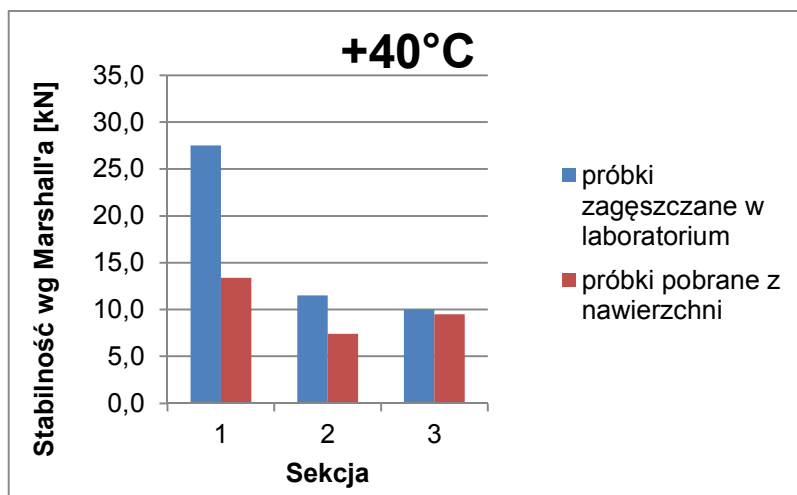
Rysunek 5.12. Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie w temperaturze +20°C

Tablica 5.6. Stabilność wg Marshalla

nr sekcji	Stabilność wg Marshalla [kN]							
	+60°C				+40°C		+20°C	
	próbki z laboratorium	próbki z nawierzchni	wartość z recepty	wymagania [2]	próbki z laboratorium	próbki z nawierzchni	próbki z laboratorium	próbki z nawierzchni
1	18,4	13,8	8,2	8,0÷20,0	27,5	13,4	33,8	20,0
2	4,7	3,3	-		11,5	7,4	18,1	16,1
3	4,6	3,3	-		10,0	9,5	16,9	13,1

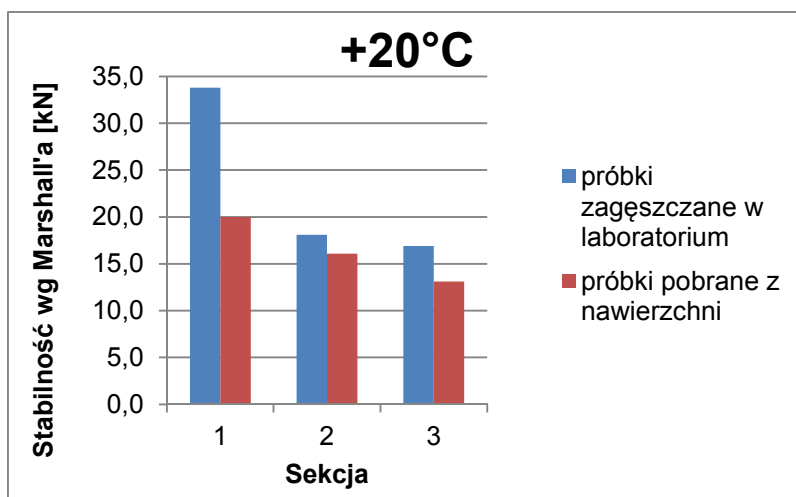


Rysunek 5.13. Stabilność wg Marshalla w temperaturze +60°C



Rysunek 5.14. Stabilność wg Marshalla w temperaturze +40°C

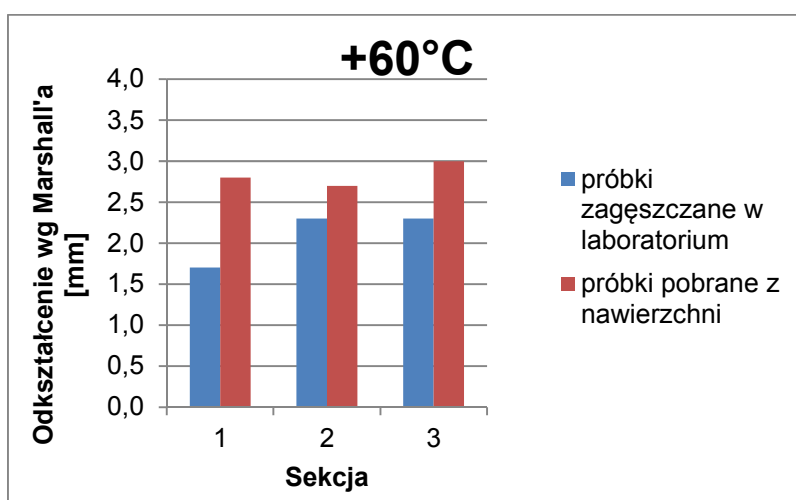
**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**



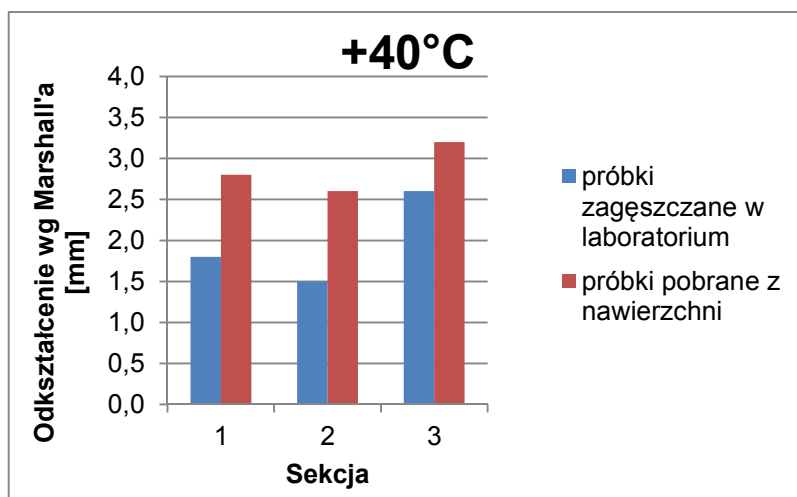
Rysunek 5.15. Stabilność wg Marshalla w temperaturze +20°C

Tablica 5.7. Odkształcenie wg Marshalla

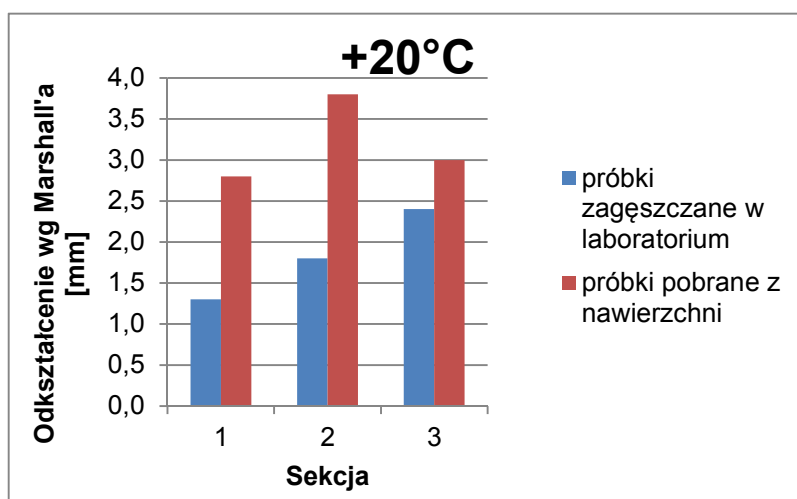
nr sekcji	Odkształcenie wg Marshalla [mm]							
	+60°C				+40°C		+20°C	
	próbki z laboratorium	próbki z nawierzchni	wartość z recepty	wymagania [2]	próbki z laboratorium	próbki z nawierzchni	próbki z laboratorium	próbki z nawierzchni
1	1,7	2,8	2,8	1,0÷3,5	1,8	2,8	1,3	2,8
2	2,3	2,7	-		1,5	2,6	1,8	3,8
3	2,3	3,0	-		2,6	3,2	2,4	3,0



Rysunek 5.16. Odkształcenie wg Marshalla w temperaturze +60°C



Rysunek 5.17. Odształcenie wg Marshalla w temperaturze +40°C



Rysunek 5.18. Odształcenie wg Marshalla w temperaturze +20°C

Z przeprowadzonych badań na próbkach zagęszczonych w laboratorium oraz rdzeniach pobranych z nawierzchni można wnioskować, że:

1. Sposób zagęszczenia próbek ma wpływ na otrzymane wyniki badań.
2. Na próbkach zagęszczonych w laboratorium uzyskano lepsze parametry mieszanki MCE. Należy jednak pamiętać, że w laboratorium zagęszcza się próbki o uziarnieniu do 25 mm, natomiast z drogi zostały odwiercone próbki mieszanki MCE 0/63,5. Obecność dużych ziarn destruktu ma wpływ na otrzymane wyniki.
3. Uzyskane wartości stabilności i odkształcenia wg Marshalla spełniają wymagania warunków technicznych [2].
4. Próbki z sekcji 1, z 3% zawartością cementu wykazują wyższe parametry wytrzymałościowe niż próbki z sekcji 2 i 3, z 1% zawartością cementu.
5. Brak jest wyraźnej różnicy pomiędzy wartościami uzyskanymi dla próbek z sekcji 2 i 3, na których zastosowano odpowiednio 3% i 5% emulsji asfaltowej.

W kolejnym etapie prac na odcinku doświadczalnym zostaną przeprowadzone badania ugięć nawierzchni ugięciomierzem FWD w celu sprawdzenia jaki wpływ ma skład podbudowy z mieszanki MCE na nośność remontowanej nawierzchni. Otrzymane wyniki zostaną porównane z ugięciami pomierzonymi płytą dynamiczną wykonanymi na ułożonej i zagęszczonej warstwie MCE.

6. Podsumowanie

Podczas prac nad etapem II, przewidzianym do wykonania w 2012 roku:

1. Uzupełniono bazy danych o odcinakach z podbudowami z mieszanki MCE., co umożliwiło w lepszym stopniu oceniać wpływ podbudów z mieszanek MCE na stan ogólny nawierzchni.
2. Wykonano dla wybranych odcinków badania ugięć ugięciomierzem FWD oraz przeprowadzono inwentaryzację uszkodzeń. Dzięki tym badaniom oceniono stopień degradacji nawierzchni po kilku lub kilkunastu latach ich eksploatacji.
3. Zweryfikowano dotychczasowe zasady projektowania podbudów z mieszanki MCE w Polsce. Ten etap prac pozwolił na wstępne wytypowanie metod, które będą sprawdzane pod kątem wykorzystania ich w opracowywanej instrukcji projektowania mieszanek MCE.
4. Przeprowadzono oceny wybranych procedur stosowanych w innych krajach do projektowania i wbudowywania podbudów wykonywanych w technologii MCE, co pozwoliło na określenie wstępnych tendencji oraz kierunków w jakich powinna iść polska procedura projektowania mieszanek MCE.

Z dotychczasowych prac nie przedstawiono wiążących wniosków, ponieważ będą one podlegały weryfikacji w trzecim etapie prac.

7. 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.: „Warunki techniczne wykonania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo emulsyjnej (MCE)” IBDiM, Zeszyt 61, Warszawa 1999.
3. Ogólne specyfikacje techniczne. D-04.10.01 „Podbudowa z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej” GDDP Warszawa 2001.
4. Szczepaniak Z. Majewski J.: „Warunki techniczne. Drogowe kationowe emulsje asfaltowe EmA-99” IBDiM, Zeszyt 60, Warszawa 1999.
5. Wirtgen. Podręcznik recyklingu na zimno. 2006.
6. Del Val M. A., Rocci S., „Guía para el dimensionamiento de firmes reciclados "in situ" en frío” , Probisa, 1998.

7. Lewis A.J.N., Collings D.C., „Cold In Place Recycling: A Relevant Process For Road Rehabilitation And Upgrading”, 7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, 1999.
8. Judycki J., Dołycki B., Hunik K., Stienss M., „Weryfikacja zasad projektowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych”, Politechnika Gdańska, 2006.
9. PIARC, „Pavement Recycling Guidelines” PIARC Committee C7/8 – “Road Pavements”, 2003.
10. Rafałowski J., „Technologia asfaltu spienionego w recyklingu dróg zawierających smołę”, Magazyn Autostrady 7/2006.
11. Walat B., Projekt Score (Recykling na zimno), „Nowości zagranicznej techniki drogowej”, nr 172/2008.
12. Eckmann B., Soliman S., Performance assessment of Cold Recycling in Place, Konferencja Enviroad, Warszawa, 2009.
13. Lesueur D., Potti J. J., Southwell C., Walter J., Cruz M., Delfosse F., Eckmann B., Fiedler J., Racek I., Simonsson B., Placin F., Serrano J., Ruiz A., Kalaaji A., Attané P., Superior Cold Recycling: The Score Project, 3th Eurasphalt&Eurobitume Congress, Wiedeń, 2004.
14. FGSV, Merkblatt für Kaltrecycling in situ im Straßenoberbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau, Köln, 2005.
15. Jostein M., The use of cold bitumen stabilized base course mixes in Norway, Baltic Road Association, seminar session B2, 2000.
16. Jacobson T., Cold recycling of asphalt pavement - mix in plant, 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona, 2000.
17. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras (PG-4) w Orden Circular 8/2001, 27 grudnia 2001.
18. Segura Pérez P., Reciclado de firmes y otros materiales, Congreso Nacional del Medio Ambiente, 2008.
19. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) w Orden Circular 5/200, 27 grudnia 2001.
20. Comité Français pour les Techniques Routières, Retraitement en place des anciennes chaussées, Guide technique, 2003.
21. Comité Français pour les Techniques Routières, Retraitement des chaussées et recyclage des matériaux bitumineux des chaussées, Guide technique, 2004.
22. Carswell I., Ellis S.J., Hewitt A., „Design and specification for sustainable maintenance of roads using cold recycling techniques”, PIARC, 2008.
23. Milton L.J., Earland M., „Design guide and specification for structural maintenance of highway pavements by cold in-situ recycling”. TRL Report 386, TRL, Crowthorne, 1999.
24. Merrill D., Nunn M.E., Carswell I., „A guide to the use and specification of cold recycled materials for the maintenance of road pavements”. TRL Report 611, Transport Research Laboratory, Crowthorne, 2004.
25. Design Manual for Roads and Bridges, Provisions for the Use of Secondary and Recycled Materials, Volume 7 Section 1, Part 2 HD 35/04, November 2004.
26. Highway Agency, Specification MCHW 1 for Highway Works: Manual of Contract Documents for Highway Works, 2005.
27. Basic Asphalt Recycling Manual. ARRA. 2001.
28. Marti Michael, Mielke Andrew: Synthesis of Asphalt Recycling in Minnesota. Minnesota Local Road Research Board. 2002.

29. Road Pavement Rehabilitation Techniques Using Enhanced Asphalt Mixtures. Final Technical Report PARAMIX. 2004.
30. Xu Jian, Huang Songchang, Qin Yongchun, Li Feng : The Impact of Cement Contents on the Properties of Asphalt Emulsion Stabilized Cold Recycling Mixtures. International Journal of Pavement Research and Technology. 2011.
31. Jové Martí Bou, De Bock Luc: The PARAMIX project: enhanced recycling techniques for asphalt pavements. Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials WASCON 2003. San Sebastian 4 - 6 June 2003.
32. Westergren Pereric: Handbok för återvinning av asfalt. 2004.
33. Salomon Atenea, Newcomb David E.: Cold in-place recycling literature review and preliminary mixture design procedure. Minnesota Department of Transportation. Minnesota 2000.
34. Giuliani Felice, Rastelli Silvia: An analytical approach to evaluate the performance of cold recycled asphalt mixtures. Use of recycled materials in building and structures. Barcelona 2004.
35. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, System oceny stanu nawierzchni SOSN, Wytoczne stosowania, Aktualizacja związana z wykorzystaniem wyników pomiarów ugięć nawierzchni, Warszawa 2010.
36. Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych, IBDiM, Warszawa 2001.

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Załącznik 1

Wyniki pomiarów ugięć nawierzchni ugięciomierzem FWD

Tablica Z.1.1. Wyniki pomiarów ugięć nawierzchni
na drodze DK6 km od 261+300 do 263+000 strona prawa

Station	Stress	Force	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
261,300	719,00	50,79	183,60	168,40	158,90	141,30	131,70	105,00	84,10	67,20	53,90
261,350	703,00	49,66	345,40	306,40	261,10	203,10	164,50	107,30	74,90	54,60	41,80
261,400	709,00	50,12	106,00	96,10	90,80	82,00	76,50	62,30	50,80	41,10	34,00
261,450	704,00	49,76	87,80	79,70	76,00	69,50	65,80	55,70	46,40	38,70	32,20
261,501	701,00	49,54	118,70	102,50	95,60	84,20	78,50	62,60	50,60	40,90	34,20
261,550	707,00	49,97	111,90	103,80	98,00	88,60	83,80	68,00	55,00	43,40	35,80
261,600	706,00	49,93	107,10	99,50	95,00	84,20	82,70	69,50	56,70	46,50	36,90
261,650	705,00	49,85	114,90	105,20	99,00	89,50	84,60	70,50	58,60	49,00	39,80
261,701	706,00	49,87	109,60	104,10	100,10	91,50	88,00	72,90	59,40	49,30	39,30
261,750	702,00	49,64	127,90	118,20	111,20	100,00	93,50	75,90	61,80	50,30	40,80
261,801	707,00	49,94	153,10	143,70	134,10	117,40	108,40	86,20	69,00	57,20	45,60
261,901	708,00	50,03	168,70	150,00	135,50	113,60	102,20	78,40	62,00	51,30	42,10
261,950	705,00	49,83	147,40	138,20	132,50	118,50	116,10	101,50	44,60	36,70	31,90
262,001	711,00	50,24	111,50	103,50	97,30	88,90	84,20	70,60	58,40	49,10	39,80
262,050	697,00	49,29	149,90	136,30	127,50	109,80	102,00	79,30	60,70	48,20	38,00
262,105	705,00	49,83	162,60	142,80	131,30	114,80	103,70	81,20	63,40	49,80	40,20
262,149	705,00	49,85	181,10	164,00	152,60	132,90	117,20	87,10	65,70	50,60	40,10
262,201	700,00	49,50	156,20	151,10	140,40	120,80	106,60	79,20	60,80	47,50	37,40
262,253	707,00	49,96	275,30	204,30	169,80	135,90	118,40	85,50	60,70	42,50	33,00
262,302	709,00	50,08	123,00	113,90	108,30	98,60	91,90	74,90	60,50	48,50	34,50
262,351	707,00	50,00	134,10	120,80	113,90	101,10	94,80	75,90	60,70	49,50	39,80
262,400	703,00	49,71	233,10	194,70	168,60	133,10	112,00	77,80	56,40	45,60	35,70
262,450	706,00	49,87	141,20	126,70	117,80	102,40	92,10	70,80	55,80	46,60	36,00
262,500	704,00	49,75	159,50	130,00	121,90	106,80	95,50	72,30	54,90	43,80	35,50
262,551	707,00	49,97	124,30	113,10	106,60	95,10	87,20	67,00	52,40	41,70	33,20
262,600	707,00	49,96	129,50	118,80	111,40	98,70	90,50	70,90	55,90	44,20	35,70
262,651	705,00	49,82	109,50	104,30	100,10	93,00	86,60	68,60	54,90	43,70	35,30
262,700	702,00	49,59	218,80	197,70	180,70	153,10	132,70	93,80	67,80	51,30	39,10
262,750	696,00	49,16	443,00	346,00	284,90	204,80	157,30	95,80	65,60	49,90	40,30
262,801	705,00	49,85	345,70	301,30	268,60	216,70	179,10	114,90	77,50	57,40	45,20
262,848	704,00	49,78	312,30	284,30	261,00	221,80	190,80	105,40	80,10	61,00	47,80
262,900	710,00	50,15	168,30	147,60	133,10	111,90	98,40	74,30	59,00	48,00	39,50
262,950	707,00	50,00	165,70	151,20	140,30	123,60	112,00	89,40	71,20	56,90	45,90
263,000	708,00	50,05	263,80	239,70	221,20	190,00	165,30	118,40	85,80	66,00	51,40

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Tablica Z.1.2. Wyniki pomiarów ugięć nawierzchni
na drodze DK6 km od 261+300 do 263+000 strona lewa

Station	Stress	Force	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
263,000	712,00	50,29	299,00	270,10	245,70	206,30	176,40	122,00	86,90	66,30	51,00
262,975	704,00	49,78	206,70	191,90	181,50	162,60	148,60	114,80	88,70	69,40	53,40
262,924	712,00	50,33	123,50	114,30	108,70	99,10	95,00	78,80	65,10	55,50	46,20
262,874	705,00	49,80	235,60	210,10	191,20	158,80	136,60	95,20	67,70	51,10	39,80
262,825	698,00	49,36	202,70	180,70	165,70	141,30	123,80	89,50	65,70	49,40	37,80
262,775	697,00	49,23	231,50	212,40	195,40	168,00	147,90	106,50	77,50	58,00	44,10
262,725	699,00	49,40	267,60	235,70	211,70	173,40	146,10	99,40	70,90	52,90	40,60
262,673	704,00	49,76	124,70	116,60	109,60	98,30	91,00	72,40	55,80	45,10	36,20
262,623	705,00	49,82	226,90	198,50	176,90	145,20	125,20	89,90	66,40	50,40	38,60
262,575	712,00	50,33	133,10	122,80	114,80	101,50	93,90	73,90	57,00	45,80	36,90
262,525	707,00	49,97	178,90	156,90	141,50	118,60	104,20	76,70	58,90	46,90	37,80
262,476	710,00	50,21	183,80	164,20	148,50	124,50	109,70	80,60	60,40	47,90	38,40
262,422	706,00	49,90	123,30	113,50	107,30	96,60	89,00	70,80	56,40	45,40	36,50
262,374	706,00	49,93	177,30	157,20	143,00	122,10	107,70	81,00	62,50	49,40	39,60
262,324	701,00	49,52	203,60	180,80	164,10	140,30	121,90	91,20	70,70	56,30	45,50
262,275	702,00	49,59	165,00	147,70	135,90	117,80	105,80	81,70	63,70	51,10	40,70
262,224	706,00	49,90	165,30	150,30	140,90	123,10	110,10	85,00	66,10	52,00	41,40
262,175	706,00	49,93	148,10	136,90	130,10	118,10	109,60	87,20	67,90	52,90	41,40
262,125	701,00	49,55	203,60	182,10	166,70	141,10	126,40	93,80	70,20	54,50	42,80
262,025	705,00	49,83	260,70	225,50	199,30	161,60	136,00	94,10	68,80	53,00	41,60
261,974	707,00	50,00	104,40	97,60	93,40	85,90	81,40	68,20	57,50	48,60	40,60
261,925	710,00	50,21	114,70	105,10	98,80	89,50	83,30	69,00	57,30	48,40	40,10
261,873	705,00	49,82	113,20	107,20	103,80	94,50	87,30	71,20	58,40	49,00	40,50
261,825	704,00	49,73	195,10	170,20	157,50	137,40	124,60	97,60	76,40	61,60	47,40
261,774	708,00	50,07	101,60	95,50	92,00	85,20	81,80	69,80	58,80	50,70	42,00
261,725	704,00	49,78	124,90	115,60	110,20	101,30	95,10	78,50	64,50	53,60	42,90
261,675	699,00	49,37	148,30	136,90	129,70	119,20	110,10	83,70	66,20	52,90	41,10
261,625	708,00	50,05	139,30	129,40	123,00	113,50	106,40	87,00	70,20	54,30	40,60
261,575	707,00	49,94	120,20	110,90	105,70	96,90	91,00	75,50	62,50	51,00	40,50
261,524	709,00	50,10	101,40	95,50	92,10	85,10	81,50	68,80	57,20	47,10	38,40
261,474	702,00	49,59	119,80	112,10	106,90	97,30	91,40	74,50	60,60	48,90	38,60
261,423	709,00	50,10	183,00	152,20	137,60	117,10	103,50	77,70	59,20	46,00	36,80
261,375	698,00	49,32	191,00	175,00	165,00	147,50	135,00	106,60	85,40	68,80	57,70
261,325	702,00	49,64	195,30	181,40	172,30	155,00	140,70	106,80	79,00	61,50	49,00
261,299	707,00	49,97	159,40	146,80	139,20	125,90	118,30	95,20	76,30	60,80	48,60

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Tablica Z.1.3. Wyniki pomiarów ugięć nawierzchni
na drodze DK55 km od 84+000 do 86+000 strona prawa

Station	Stress	Force	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
84,000	744,00	52,59	95,70	67,50	64,50	60,60	58,00	50,20	42,30	36,80	30,90
84,061	711,00	50,26	93,40	87,50	83,30	76,90	72,10	59,80	49,20	40,60	32,50
84,099	711,00	50,28	91,70	85,70	81,50	75,30	70,90	59,20	48,70	40,30	32,50
84,150	702,00	49,62	90,90	82,80	78,70	72,60	67,50	55,30	45,00	36,80	29,50
84,200	695,00	49,09	90,90	83,30	79,50	72,90	68,40	56,70	46,10	38,50	30,80
84,253	705,00	49,85	136,30	121,70	114,60	104,30	95,20	75,90	59,70	48,90	38,60
84,300	705,00	49,80	137,40	130,30	124,80	115,60	108,90	90,40	73,20	58,40	46,30
84,350	707,00	49,94	158,80	148,80	142,50	131,20	123,00	102,00	83,00	67,80	53,10
84,400	708,00	50,01	153,70	145,10	138,50	128,40	117,50	95,10	75,50	60,80	47,30
84,450	698,00	49,36	143,40	133,90	127,50	117,00	109,00	89,10	71,90	58,10	46,30
84,500	708,00	50,05	154,90	146,40	140,90	130,60	123,50	102,70	84,00	69,10	55,30
84,550	711,00	50,26	111,00	105,30	101,70	95,60	91,40	78,70	66,40	56,40	45,40
84,601	696,00	49,16	98,10	78,70	74,00	69,80	67,10	59,10	51,80	45,40	39,10
84,650	698,00	49,34	78,10	69,10	66,20	62,20	60,50	52,90	46,10	40,90	35,10
84,701	703,00	49,66	89,00	78,50	76,00	70,30	67,90	58,20	49,80	42,90	36,50
84,751	715,00	50,53	113,60	105,80	102,00	95,60	91,50	78,30	65,80	54,70	44,70
84,800	707,00	50,00	162,90	146,20	136,10	120,30	110,10	85,10	64,30	49,30	37,90
84,852	700,00	49,47	234,90	215,80	203,90	184,60	171,90	138,40	110,40	87,70	68,10
84,901	701,00	49,55	273,70	250,30	232,10	202,00	181,10	136,30	98,80	73,20	55,90
84,950	705,00	49,80	315,20	287,00	265,40	231,50	204,10	149,30	107,00	76,20	54,30
85,000	707,00	49,96	250,60	233,50	220,10	197,20	179,30	140,10	105,90	81,10	59,20
85,051	704,00	49,76	331,90	295,20	269,10	227,00	201,70	146,20	104,80	74,50	53,00
85,102	709,00	50,10	210,40	196,90	187,30	170,20	157,20	123,20	92,30	73,10	54,20
85,150	706,00	49,89	248,90	236,20	224,10	199,50	179,00	135,80	101,90	74,50	54,40
85,202	702,00	49,62	226,00	209,60	198,50	177,80	164,40	129,50	101,80	79,00	62,10
85,250	711,00	50,28	240,80	211,90	195,30	167,60	146,50	105,70	77,10	57,50	43,30
85,300	700,00	49,50	213,60	197,90	188,00	169,20	151,80	115,60	87,10	65,90	50,10
85,350	708,00	50,01	224,20	213,40	201,10	178,30	159,70	120,20	89,00	65,30	50,00
85,401	702,00	49,61	194,30	178,80	167,90	151,10	138,20	108,20	84,10	64,70	49,20
85,453	699,00	49,43	302,00	291,00	283,90	266,10	250,00	207,10	165,30	129,30	97,40
85,501	713,00	50,38	180,00	170,00	162,70	150,80	139,00	113,20	90,00	71,10	54,60
85,550	696,00	49,18	317,00	297,70	278,70	245,10	217,70	164,10	122,10	90,20	66,40
85,600	707,00	49,97	213,00	202,00	192,30	174,20	161,00	129,50	101,40	79,10	60,60
85,650	702,00	49,59	248,20	234,10	221,30	198,80	180,40	140,00	106,60	80,00	59,20
85,701	707,00	50,00	212,80	199,60	188,60	167,10	151,20	114,40	85,40	63,20	46,30
85,750	706,00	49,90	227,90	211,80	201,10	181,30	164,60	128,20	97,00	73,00	54,10
85,801	711,00	50,26	171,10	160,10	152,60	138,80	128,40	101,00	77,60	59,30	43,90
85,850	698,00	49,30	268,50	243,90	224,70	191,40	163,90	113,10	77,80	54,60	39,80
85,900	706,00	49,90	227,60	212,80	199,50	176,40	158,50	120,60	91,80	70,60	53,80
85,950	706,00	49,89	266,10	243,80	230,00	206,90	187,70	146,50	113,00	87,20	65,30
86,000	707,00	50,00	198,60	187,60	180,00	165,60	153,60	122,10	94,40	70,90	51,70

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Tablica Z.1.4. Wyniki pomiarów ugięć nawierzchni
na drodze DK55 km od 84+000 do 86+000 strona lewa

Station	Stress	Force	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
86,000	710,00	50,19	226,60	211,20	201,40	182,40	166,60	128,50	96,30	69,70	47,90
85,975	712,00	50,35	242,30	222,00	207,10	181,50	162,80	123,80	93,20	71,10	52,50
85,925	704,00	49,75	237,90	218,40	204,00	183,10	167,70	133,70	104,70	82,20	63,60
85,874	705,00	49,82	176,90	163,10	153,30	136,50	124,30	96,20	74,60	58,50	45,90
85,825	704,00	49,75	177,20	160,80	152,70	139,40	125,90	95,40	70,60	53,20	39,10
85,775	704,00	49,76	255,20	234,80	219,10	193,00	171,90	129,40	95,50	70,20	51,10
85,725	704,00	49,73	189,30	174,30	166,00	150,70	139,70	111,20	87,20	66,70	50,40
85,675	706,00	49,89	183,20	173,40	167,70	157,10	148,70	123,30	100,60	80,90	63,20
85,625	706,00	49,89	234,90	211,00	193,70	167,60	147,50	108,40	79,40	57,80	41,90
85,575	704,00	49,78	253,50	227,50	211,90	184,70	166,00	127,50	98,90	76,70	59,50
85,524	703,00	49,69	263,70	240,10	223,10	197,80	179,40	141,30	111,20	87,40	67,50
85,475	705,00	49,85	236,10	218,90	205,20	181,90	164,80	127,90	98,30	74,20	55,30
85,425	706,00	49,90	199,50	184,00	173,20	155,90	141,50	110,50	85,20	65,40	49,50
85,375	705,00	49,82	208,10	189,20	176,30	154,40	137,80	105,70	81,10	64,00	50,70
85,325	708,00	50,05	125,10	118,70	113,70	103,90	97,20	78,00	63,00	50,70	40,20
85,275	707,00	49,97	179,90	163,40	152,10	134,40	121,00	94,50	74,60	59,20	47,30
85,224	702,00	49,59	255,70	238,70	224,30	197,90	179,30	138,00	105,90	80,60	60,70
85,175	707,00	49,97	228,00	208,40	194,80	172,50	154,50	118,50	90,30	68,90	52,40
85,124	705,00	49,83	246,30	228,00	212,00	186,20	165,80	123,90	91,00	67,50	50,40
85,075	701,00	49,55	331,60	293,30	265,80	223,20	193,30	135,90	98,00	70,70	51,70
85,025	709,00	50,08	240,60	216,30	198,10	169,70	147,40	106,10	76,00	54,90	40,50
84,975	703,00	49,68	259,10	239,40	222,70	194,60	172,80	127,60	95,70	70,70	53,90
84,925	703,00	49,66	249,50	228,20	213,10	187,80	169,60	128,90	97,60	73,00	55,80
84,875	707,00	50,00	205,50	192,30	182,40	163,90	150,60	121,90	97,50	77,50	61,30
84,825	711,00	50,22	222,70	199,30	182,40	153,50	135,70	98,40	71,30	53,60	40,20
84,775	702,00	49,59	227,60	208,60	192,70	166,20	145,00	105,30	77,40	56,80	42,20
84,723	703,00	49,66	127,40	119,70	114,80	105,90	99,20	82,30	67,60	55,10	44,10
84,671	703,00	49,69	101,40	96,90	93,90	88,60	85,80	74,00	63,90	54,90	45,90
84,625	709,00	50,08	100,10	95,00	92,40	87,80	84,40	74,90	65,30	56,20	47,00
84,575	709,00	50,08	148,50	140,10	134,50	123,40	115,60	95,40	77,90	63,60	50,80
84,524	712,00	50,31	127,10	119,10	114,60	105,70	99,80	82,70	67,90	55,00	44,30
84,475	708,00	50,01	130,20	123,10	119,10	108,80	104,70	88,70	74,10	61,60	50,70
84,425	707,00	49,96	123,10	115,80	110,80	101,70	95,30	77,80	62,90	50,90	39,90
84,375	705,00	49,85	100,00	92,40	88,80	82,20	77,70	65,20	54,00	45,10	36,30
84,324	701,00	49,54	99,60	88,40	82,20	73,20	70,50	58,00	46,10	38,90	31,10
84,275	701,00	49,55	115,50	106,60	101,70	91,30	86,10	70,10	55,60	44,10	36,20
84,224	709,00	50,14	127,30	104,10	98,30	89,50	84,70	68,90	55,60	46,10	37,50
84,176	706,00	49,93	103,10	97,80	93,50	86,10	81,00	66,70	54,70	44,60	35,60
84,125	706,00	49,90	82,80	74,90	71,50	66,20	63,50	53,70	45,10	38,00	31,20
84,073	700,00	49,48	96,00	81,00	74,90	67,90	63,50	52,10	42,90	35,10	28,70
84,025	701,00	49,57	71,20	63,40	61,10	57,70	55,70	49,30	43,00	37,90	32,60
84,000	713,00	50,40	61,20	54,80	51,60	47,70	46,50	40,90	35,70	31,30	26,50

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Tablica Z.1.5. Wyniki pomiarów ugięć nawierzchni
na drodze DK22 km od 338+250 do 339+760 strona prawa

Station	Stress	Force	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
338,250	706,00	49,93	182,00	145,70	135,30	118,10	104,10	75,80	55,30	41,80	32,50
338,300	706,00	49,93	154,40	83,60	79,30	72,90	68,00	57,80	49,10	40,10	34,50
338,350	711,00	50,28	112,40	71,70	68,60	64,20	61,50	53,60	46,60	40,10	34,00
338,399	697,00	49,29	155,70	92,90	85,70	74,50	70,30	58,00	46,90	38,30	31,00
338,451	703,00	49,69	105,50	96,40	90,70	81,30	74,30	58,90	46,80	36,60	28,40
338,501	703,00	49,69	103,40	72,20	68,10	62,80	58,70	49,70	41,30	33,70	27,50
338,551	703,00	49,68	88,50	80,50	76,70	70,90	66,70	56,80	48,00	39,60	31,70
338,600	702,00	49,62	126,00	74,00	69,10	63,30	58,90	50,30	42,80	35,90	29,00
338,651	705,00	49,82	110,00	93,20	89,00	81,90	74,70	60,10	49,20	39,10	31,80
338,750	706,00	49,90	135,50	93,50	88,30	81,20	75,50	62,70	52,20	43,60	37,40
338,801	706,00	49,87	98,10	70,40	67,50	63,50	60,50	53,30	46,20	39,40	33,90
338,850	696,00	49,18	130,50	117,40	110,80	102,60	96,00	80,30	66,90	55,00	43,30
338,900	701,00	49,52	94,60	86,50	82,80	77,10	72,40	62,10	51,60	43,60	34,90
338,950	708,00	50,03	61,60	46,20	44,70	42,80	41,80	38,70	35,80	32,70	30,00
339,000	700,00	49,44	138,90	124,10	114,00	97,60	85,30	65,30	50,40	40,80	33,10
339,050	707,00	50,00	80,50	75,90	73,10	69,40	66,60	59,50	52,50	45,60	38,20
339,101	710,00	50,15	122,70	98,40	92,10	83,70	77,30	65,30	55,40	47,30	39,70
339,150	706,00	49,87	130,60	89,00	84,10	77,10	72,20	60,80	50,80	42,50	35,00
339,200	700,00	49,47	79,00	65,80	62,70	58,40	55,00	47,30	40,30	34,20	28,30
339,249	705,00	49,80	81,40	75,40	72,10	67,40	63,70	55,40	47,50	40,50	34,10
339,300	698,00	49,32	111,50	99,70	93,70	84,10	76,10	61,00	48,60	38,50	30,20
339,350	706,00	49,93	74,40	65,50	61,60	56,40	52,70	44,60	37,60	31,80	26,50
339,400	706,00	49,87	61,10	55,10	52,40	49,10	46,90	41,40	36,50	32,10	27,70
339,450	704,00	49,76	98,80	72,30	68,70	63,60	60,10	51,80	44,10	37,00	30,70
339,501	710,00	50,19	81,60	73,70	71,70	67,60	64,50	57,20	49,50	42,00	35,30
339,550	704,00	49,78	102,70	87,10	82,70	75,80	70,60	59,50	50,50	42,70	35,40
339,600	711,00	50,28	86,10	80,10	76,70	71,50	67,50	58,20	49,70	41,90	34,90
339,650	703,00	49,69	78,50	66,80	64,00	60,20	57,50	51,10	45,20	39,50	34,50
339,701	709,00	50,12	138,80	78,10	74,70	69,70	66,10	56,90	48,70	42,00	35,20
339,750	706,00	49,90	179,80	166,60	155,40	134,80	117,10	84,10	60,70	45,20	35,30

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Tablica Z.1.6. Wyniki pomiarów ugięć nawierzchni
na drodze DK22 km od 338+250 do 339+760 strona lewa

Station	Stress	Force	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
339,725	713,00	50,42	105,80	100,00	92,50	82,00	74,40	59,70	48,10	39,20	31,80
339,675	702,00	49,62	107,60	80,50	75,40	68,20	61,30	48,80	39,00	32,80	27,80
339,625	702,00	49,62	120,10	92,20	87,40	79,40	72,90	59,30	47,60	38,70	31,10
339,574	705,00	49,85	92,50	86,70	82,10	74,80	69,20	57,00	46,60	38,70	31,60
339,525	705,00	49,80	115,50	91,30	85,70	77,10	70,30	56,30	44,60	35,90	28,60
339,475	707,00	49,96	115,00	87,80	83,90	77,60	72,90	60,90	49,90	41,70	33,70
339,423	708,00	50,07	143,00	67,00	63,40	57,80	55,90	47,20	39,40	33,90	26,60
339,375	707,00	49,97	135,70	87,60	83,50	77,30	72,90	61,80	51,30	42,50	34,40
339,325	709,00	50,08	158,60	75,80	72,20	65,30	60,50	48,80	39,40	33,30	25,80
339,276	693,00	48,99	124,20	81,10	75,60	67,00	60,60	48,20	38,10	29,40	23,60
339,223	703,00	49,66	110,00	45,70	43,10	39,80	37,70	32,70	27,90	24,30	21,10
339,175	710,00	50,19	146,20	48,20	44,80	39,90	36,30	30,60	25,40	22,00	18,50
339,125	708,00	50,05	137,10	56,40	53,10	48,60	45,70	39,50	34,60	30,40	26,60
339,076	706,00	49,93	129,80	72,40	68,20	61,50	56,80	46,80	39,20	33,40	27,60
339,025	703,00	49,68	128,60	73,70	69,40	63,50	58,90	48,50	40,00	33,00	27,40
338,976	705,00	49,83	173,30	81,90	76,30	68,70	64,40	51,70	42,50	35,90	28,50
338,925	705,00	49,85	167,20	73,70	70,10	65,70	63,00	54,30	47,20	41,90	33,70
338,875	703,00	49,71	165,60	123,90	116,30	103,90	95,00	75,90	60,90	50,30	42,00
338,826	711,00	50,26	136,60	117,50	111,10	98,10	93,20	75,20	59,70	50,50	38,20
338,775	701,00	49,57	122,60	80,20	76,00	69,60	65,40	56,60	49,90	43,60	38,10
338,724	709,00	50,14	115,80	105,40	98,60	87,70	79,70	65,20	52,90	44,30	36,50
338,675	701,00	49,57	124,80	70,30	65,10	57,70	52,80	43,40	36,10	30,80	25,90
338,626	711,00	50,26	112,50	53,60	50,70	46,70	43,90	37,60	32,30	26,40	21,90
338,575	702,00	49,64	129,60	118,10	109,30	96,50	86,60	69,00	55,00	44,00	35,70
338,525	702,00	49,61	120,30	109,60	102,00	91,40	83,00	66,60	53,00	42,10	32,30
338,475	709,00	50,08	124,30	114,40	107,40	95,50	86,10	66,90	51,70	39,80	31,30
338,425	700,00	49,47	107,00	99,70	94,40	86,70	80,30	65,80	53,10	42,50	32,10
338,375	702,00	49,64	93,50	86,70	82,60	76,50	72,10	61,30	52,20	43,10	35,70
338,325	705,00	49,80	86,50	79,00	74,80	68,80	64,20	53,50	45,30	37,90	31,10
338,275	705,00	49,82	111,80	101,20	94,50	84,30	76,80	61,90	49,50	39,50	30,80
338,250	705,00	49,85	95,00	85,70	81,50	73,60	66,70	53,10	43,00	34,10	27,40

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Tablica Z.1.7. Wyniki pomiarów ugięć nawierzchni
na drodze DK7 km od 47+500 do 49+500 strona prawa

Station	Stress	Force	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
47,500	700,00	49,48	245,10	68,00	65,90	60,60	60,60	54,50	49,50	44,20	37,70
47,550	707,00	49,94	161,40	54,40	52,70	50,70	49,80	44,80	41,10	37,60	34,50
47,603	708,00	50,03	122,40	56,30	54,10	52,50	51,20	47,20	43,70	39,60	35,20
47,700	704,00	49,76	104,60	68,40	65,10	60,70	58,90	51,80	46,30	42,00	37,40
47,750	705,00	49,80	217,50	87,70	81,40	71,90	67,20	53,40	44,10	40,30	36,00
47,801	704,00	49,73	104,10	64,10	61,40	58,70	58,10	52,60	47,90	43,80	40,10
47,849	705,00	49,82	125,00	67,80	65,80	62,50	60,90	54,00	48,40	43,70	39,20
47,900	705,00	49,85	90,40	48,20	46,20	43,80	43,10	39,00	35,80	33,20	29,80
47,950	703,00	49,68	122,50	53,90	52,70	50,50	50,30	45,10	41,30	37,40	34,20
48,000	705,00	49,80	116,90	76,80	73,50	69,00	66,30	59,10	53,40	47,80	43,20
48,051	707,00	49,96	139,00	55,90	54,00	51,80	50,70	46,30	43,10	40,10	36,60
48,100	705,00	49,80	133,50	79,60	76,90	72,90	71,00	64,10	59,10	54,40	47,80
48,150	706,00	49,89	134,00	81,30	78,00	73,60	72,40	64,70	58,80	53,80	48,50
48,199	708,00	50,07	118,30	64,00	62,30	59,40	58,30	53,40	49,50	45,40	40,90
48,250	711,00	50,22	162,70	65,80	62,60	58,00	55,10	47,30	41,40	36,70	32,30
48,301	699,00	49,41	137,60	76,60	74,30	70,70	68,60	61,00	54,50	48,70	43,00
48,350	705,00	49,80	145,20	84,10	80,10	74,80	71,60	62,10	54,80	48,30	41,50
48,399	704,00	49,78	163,10	108,80	104,20	96,10	91,20	76,00	64,40	55,10	48,50
48,452	707,00	49,94	165,70	76,70	73,40	69,00	66,20	57,30	50,00	43,80	39,00
48,500	705,00	49,85	153,10	76,40	73,70	69,50	66,90	58,30	51,00	44,80	38,80
48,550	703,00	49,69	130,30	112,10	106,50	98,50	93,20	79,00	67,50	58,10	49,10
48,603	705,00	49,85	119,10	110,60	105,60	97,20	91,70	77,20	65,20	55,70	47,00
48,652	701,00	49,52	152,20	143,20	137,20	125,30	117,10	96,80	81,60	69,80	60,20
48,700	709,00	50,14	144,30	130,80	125,20	116,90	111,00	95,00	82,90	73,10	63,90
48,750	707,00	49,97	148,90	140,40	134,50	125,00	118,30	100,20	85,50	74,00	63,50
48,800	705,00	49,80	155,00	145,10	138,60	128,70	120,20	100,50	84,50	72,80	61,90
48,850	707,00	50,00	149,20	135,20	127,50	113,70	105,00	84,20	69,70	58,10	49,60
48,900	702,00	49,59	163,20	151,60	143,30	130,40	122,00	101,40	87,10	75,70	64,60
48,951	701,00	49,55	126,20	119,90	114,40	105,00	98,90	83,30	72,30	63,10	54,60
49,001	712,00	50,29	90,30	85,40	82,90	79,00	76,50	68,30	61,00	54,90	48,40
49,050	704,00	49,75	132,50	121,90	116,10	106,90	101,60	86,60	75,10	65,60	56,90
49,100	706,00	49,87	147,70	138,00	132,10	123,40	116,90	100,80	87,40	76,50	66,20
49,150	705,00	49,85	131,80	122,10	117,80	110,90	106,70	94,30	84,20	75,50	66,50
49,200	708,00	50,05	140,10	110,50	107,70	102,20	99,60	88,90	79,80	71,70	63,30
49,251	707,00	49,94	215,70	195,80	183,30	163,20	148,80	119,40	98,70	81,80	68,50
49,300	707,00	49,97	166,00	155,90	149,30	137,20	128,60	106,70	90,10	77,30	65,90
49,349	707,00	49,97	175,00	142,30	135,80	124,40	116,80	98,20	85,30	73,90	64,20
49,400	703,00	49,66	129,60	108,40	104,60	98,90	94,50	83,10	73,60	65,20	57,60
49,450	706,00	49,87	157,20	146,30	139,70	128,40	120,50	101,50	87,60	76,00	65,00
49,500	705,00	49,83	145,80	138,30	133,80	125,30	119,50	103,50	89,70	78,50	67,90

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Tablica Z.1.8. Wyniki pomiarów ugięć nawierzchni
na drodze DK7 km od 47+500 do 49+500 strona lewa

Station	Stress	Force	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
49,500	715,00	50,50	188,90	73,80	70,60	63,90	63,10	54,60	47,90	42,00	37,40
49,475	704,00	49,78	118,10	108,20	102,20	91,50	83,80	67,50	56,20	48,20	41,50
49,425	708,00	50,07	211,50	94,30	91,00	84,80	81,00	69,40	59,70	51,80	44,20
49,375	701,00	49,57	169,70	120,40	115,30	104,70	97,20	78,40	63,90	54,10	46,40
49,325	704,00	49,75	202,20	85,90	82,60	77,00	73,40	62,10	53,50	46,50	41,10
49,278	707,00	49,94	140,70	90,50	86,80	80,60	76,30	64,70	55,40	49,20	42,90
49,224	707,00	49,94	171,90	87,60	83,40	76,80	72,50	61,40	53,10	46,20	40,60
49,175	705,00	49,82	141,90	81,50	78,00	72,50	69,20	59,00	51,20	45,30	40,10
49,124	705,00	49,82	154,10	115,40	110,20	100,40	92,20	76,00	63,80	54,50	46,10
49,076	706,00	49,93	181,60	78,90	76,10	70,80	67,60	57,80	50,40	44,10	38,20
49,024	707,00	49,94	130,90	89,50	85,10	78,40	74,60	62,90	54,10	47,10	40,40
48,975	704,00	49,75	192,60	84,20	80,30	74,10	70,20	59,50	51,20	44,30	38,30
48,921	705,00	49,83	91,20	76,20	73,20	68,40	65,70	57,00	50,00	44,40	39,10
48,875	705,00	49,83	130,60	80,20	77,10	71,80	68,20	58,40	50,40	44,50	39,10
48,824	705,00	49,82	148,40	116,00	109,80	99,80	91,90	74,20	61,50	52,10	43,70
48,775	712,00	50,29	130,80	88,70	85,20	79,80	76,00	65,10	56,10	49,50	43,20
48,725	704,00	49,76	138,30	97,90	92,80	84,60	79,80	65,90	56,30	49,40	43,30
48,675	705,00	49,82	167,40	118,70	113,50	105,40	97,40	81,00	67,70	57,70	49,40
48,626	713,00	50,38	157,10	91,90	87,70	81,80	76,90	64,00	53,70	46,30	40,80
48,574	698,00	49,36	176,20	103,60	99,40	91,30	85,30	71,70	60,30	50,50	43,50
48,523	702,00	49,61	131,40	82,90	79,60	74,10	70,40	60,60	52,50	45,80	40,70
48,475	706,00	49,89	167,90	76,20	72,70	68,10	64,50	55,50	46,50	41,00	34,20
48,424	705,00	49,80	154,00	85,30	81,10	75,20	70,80	58,50	47,60	39,90	33,10
48,376	705,00	49,83	176,80	79,00	75,50	70,20	66,70	55,80	47,40	40,50	33,80
48,323	712,00	50,33	136,70	62,60	58,60	53,30	50,30	42,30	36,30	31,60	27,30
48,275	698,00	49,36	137,00	68,60	66,40	62,70	60,30	53,10	48,30	43,70	38,80
48,225	704,00	49,73	194,10	48,50	46,90	44,90	44,00	41,00	38,40	36,20	33,10
48,176	707,00	49,97	149,40	60,30	57,70	54,90	53,40	48,90	44,60	40,70	36,80
48,125	706,00	49,89	146,20	60,40	59,00	57,40	56,20	52,10	49,00	45,30	40,60
48,074	706,00	49,90	121,70	52,50	50,80	48,70	48,10	44,80	42,20	39,80	36,60
48,025	706,00	49,90	199,90	55,10	52,70	50,80	50,00	45,60	42,90	39,90	36,40
47,975	706,00	49,90	118,30	52,80	52,00	48,20	48,40	44,00	40,40	37,40	34,00
47,925	705,00	49,80	164,80	44,60	42,20	40,30	39,90	35,70	32,70	31,00	27,80
47,874	706,00	49,93	136,20	66,50	63,00	58,30	57,60	52,20	47,30	44,40	38,60
47,826	710,00	50,21	125,50	65,70	63,40	60,00	58,20	51,70	46,30	41,60	36,40
47,775	705,00	49,85	120,50	58,40	56,60	54,80	53,10	49,00	45,10	41,20	36,30
47,725	701,00	49,57	188,30	63,30	60,30	57,20	55,60	49,70	44,40	39,30	35,10
47,682	703,00	49,66	224,40	75,50	73,10	68,70	65,30	57,00	50,50	44,70	38,60
47,574	707,00	49,96	118,20	47,10	43,50	43,00	41,10	37,10	33,00	30,60	27,20
47,525	706,00	49,87	100,70	50,20	47,80	45,10	45,10	41,50	37,90	34,30	30,20

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Tablica Z.1.9. Wyniki pomiarów ugięć nawierzchni
na drodze DK7 km od 65+500 do 67+500 strona prawa

Station	Stress	Force	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
65,500	707,00	49,97	134,30	58,00	56,00	52,90	51,70	46,40	41,80	37,60	33,30
65,551	711,00	50,24	138,00	91,40	83,00	75,50	71,60	63,40	55,90	50,10	44,20
65,600	710,00	50,17	119,10	82,30	79,50	75,20	72,70	64,20	57,20	51,20	44,70
65,650	701,00	49,55	121,80	116,60	114,00	109,60	107,10	98,60	91,10	84,90	66,20
65,700	706,00	49,90	137,30	68,60	66,90	64,90	63,50	59,20	55,10	50,00	46,40
65,750	705,00	49,80	111,10	96,60	93,30	88,40	85,40	76,00	67,70	59,90	51,90
65,800	707,00	49,96	134,60	93,10	88,70	83,10	80,20	71,10	63,40	57,00	49,80
65,850	703,00	49,68	99,00	87,90	84,40	79,70	76,40	68,50	61,00	54,50	47,10
65,901	705,00	49,85	109,80	73,30	70,60	67,10	65,00	58,30	52,10	46,60	40,40
65,952	703,00	49,66	105,30	95,80	92,80	87,90	84,70	74,90	66,00	58,40	50,70
66,000	709,00	50,08	155,30	99,60	96,30	92,40	87,50	77,40	67,50	60,30	53,50
66,050	709,00	50,12	140,30	96,50	93,10	87,10	83,60	72,70	63,50	56,00	48,30
66,101	705,00	49,80	140,50	84,10	81,40	76,80	73,70	64,70	57,20	51,00	44,60
66,150	716,00	50,58	196,00	94,80	92,10	88,10	85,90	76,60	67,90	58,50	50,90
66,200	698,00	49,32	92,60	85,40	82,30	77,80	75,30	66,20	58,60	51,40	44,20
66,251	699,00	49,40	215,00	85,70	79,90	72,40	67,40	58,00	50,30	45,30	38,50
66,299	699,00	49,41	92,80	63,00	59,60	54,90	52,20	45,20	38,70	34,60	31,10
66,350	694,00	49,08	131,10	47,40	44,70	40,70	41,00	37,60	34,70	31,80	28,60
66,401	705,00	49,83	110,90	46,20	44,10	41,90	40,90	37,20	34,00	31,40	28,40
66,450	708,00	50,01	86,70	54,90	52,60	50,00	48,70	44,70	40,90	37,80	34,20
66,492	713,00	50,40	151,70	94,20	89,50	84,30	80,70	71,00	62,80	56,20	49,10
66,550	702,00	49,61	137,00	109,50	104,60	96,40	91,20	76,00	62,50	50,50	38,80
66,600	707,00	49,97	126,20	69,50	67,40	64,10	62,30	56,30	50,90	46,10	40,70
66,650	704,00	49,76	164,30	129,60	126,40	120,80	119,00	110,80	105,80	45,80	40,60
66,700	708,00	50,01	116,40	64,20	62,10	59,60	59,10	54,20	49,30	45,60	41,10
66,750	702,00	49,61	121,40	67,90	65,40	62,00	59,60	53,80	48,60	44,30	39,10
66,799	702,00	49,59	114,00	58,60	55,80	52,80	51,50	47,40	42,80	39,80	34,90
66,850	708,00	50,07	86,80	47,80	45,90	44,10	43,50	39,60	37,00	34,60	31,10
66,901	706,00	49,93	130,20	65,50	63,00	60,10	58,20	52,50	47,30	42,80	38,00
66,950	711,00	50,26	101,00	77,60	74,50	70,10	67,70	60,40	53,70	48,20	42,60
67,000	704,00	49,78	103,80	93,80	90,30	84,90	80,90	70,90	62,00	54,60	48,20
67,050	703,00	49,71	134,10	100,20	95,30	88,90	84,80	73,90	64,90	57,50	51,10
67,100	701,00	49,52	124,80	89,60	86,30	81,50	77,80	68,50	60,20	53,00	46,40
67,150	707,00	49,94	131,30	111,00	105,90	97,60	91,20	77,50	66,20	57,80	49,30
67,200	705,00	49,82	144,60	97,60	93,70	87,20	83,40	73,00	63,80	56,00	48,80
67,250	707,00	49,96	152,10	78,70	76,00	72,30	69,80	62,10	55,50	49,90	43,90
67,300	710,00	50,19	116,20	88,80	85,30	80,60	77,20	68,30	60,20	53,00	47,00
67,351	707,00	49,94	154,20	81,50	78,30	73,90	71,10	62,80	55,30	49,70	43,10
67,401	707,00	49,96	124,50	81,60	78,50	73,90	71,10	62,40	54,90	48,80	42,50
67,450	707,00	50,00	150,40	84,50	81,40	76,60	73,30	64,60	56,70	49,90	43,50
67,500	709,00	50,08	144,20	80,30	76,40	71,50	68,50	60,80	54,00	48,60	42,80

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Tablica Z.1.10. Wyniki pomiarów ugięć nawierzchni
na drodze DK7 km od 65+500 do 67+500 strona lewa

Station	Stress	Force	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
67,500	715,00	50,53	110,50	48,00	45,80	43,90	43,20	40,00	37,40	34,90	31,60
67,475	707,00	49,97	122,30	55,50	53,00	50,60	49,50	45,40	41,60	38,70	35,40
67,426	701,00	49,55	158,40	96,00	91,50	85,30	81,00	69,80	60,30	52,50	45,70
67,375	704,00	49,78	91,30	81,70	78,80	74,60	71,80	63,90	56,10	50,30	44,60
67,325	707,00	49,94	132,90	76,20	73,10	69,00	66,30	59,10	52,60	46,90	41,60
67,275	707,00	49,96	125,70	78,90	75,70	72,80	68,30	60,70	53,60	47,90	42,30
67,225	702,00	49,64	136,00	86,40	83,30	78,30	74,50	65,20	57,20	50,80	43,20
67,174	703,00	49,66	120,90	108,90	104,50	97,60	92,30	79,50	68,60	59,70	51,40
67,126	706,00	49,87	114,30	93,40	90,00	83,30	81,30	72,20	64,10	57,20	49,20
67,075	702,00	49,62	123,30	93,30	89,20	83,90	79,10	68,70	59,00	51,50	45,00
67,024	707,00	49,96	124,20	85,40	82,20	75,50	75,00	66,40	58,90	52,40	46,70
66,975	707,00	49,96	106,60	98,00	93,80	88,80	83,10	72,10	63,20	55,10	47,90
66,925	709,00	50,14	148,30	65,40	62,80	59,80	57,90	52,20	47,30	42,50	38,40
66,874	702,00	49,64	190,80	48,50	45,60	42,70	41,20	37,30	33,90	31,10	28,70
66,825	703,00	49,69	157,80	38,30	36,40	34,90	34,10	31,70	29,80	27,70	25,50
66,776	702,00	49,64	148,90	52,30	49,70	47,30	46,00	41,60	37,80	34,40	30,90
66,724	708,00	50,01	131,40	62,00	59,30	56,40	54,90	49,70	45,00	40,40	36,20
66,675	709,00	50,10	118,80	84,50	81,60	77,70	74,70	66,00	57,90	50,90	43,20
66,624	710,00	50,15	131,90	92,80	88,70	83,50	79,70	69,30	60,80	53,10	45,70
66,576	704,00	49,76	146,90	138,60	130,90	119,10	109,40	89,40	73,40	61,20	50,20
66,525	707,00	49,94	110,20	81,40	78,00	75,00	71,00	62,60	54,30	49,30	42,90
66,474	710,00	50,15	112,70	58,60	56,50	53,90	52,20	47,50	42,80	39,00	34,70
66,425	696,00	49,20	101,50	69,20	66,40	63,00	60,80	54,60	48,80	44,40	38,90
66,376	702,00	49,59	83,10	65,10	63,00	60,10	58,40	52,60	47,50	42,30	37,60
66,325	704,00	49,73	112,20	59,30	57,30	54,90	53,70	48,70	44,10	40,20	36,40
66,276	702,00	49,61	155,70	65,50	63,20	60,20	58,40	52,60	47,50	42,90	37,60
66,225	712,00	50,35	120,30	80,30	77,20	73,30	70,70	63,20	56,20	50,20	43,60
66,173	704,00	49,78	149,50	86,40	83,30	79,10	76,60	68,50	61,10	54,80	48,50
66,125	704,00	49,73	150,90	136,60	127,90	116,80	109,10	91,40	76,80	64,50	55,40
66,075	704,00	49,73	150,80	137,70	129,50	117,50	109,20	91,50	77,40	65,50	54,60
66,024	702,00	49,59	148,60	117,20	111,00	102,90	97,30	83,40	72,60	64,10	54,60
65,974	708,00	50,05	175,00	105,40	100,10	93,60	88,70	77,70	68,50	59,50	51,20
65,924	706,00	49,89	124,00	71,40	70,10	69,70	69,70	58,20	50,80	44,50	38,30
65,875	701,00	49,52	128,70	39,20	37,70	35,60	35,40	32,50	30,40	28,30	26,00
65,825	704,00	49,75	141,60	34,40	32,30	32,00	30,40	28,60	27,40	25,80	24,00
65,775	703,00	49,69	106,60	50,80	48,60	45,90	45,20	41,10	37,70	34,60	31,10
65,724	705,00	49,85	143,20	57,00	54,70	52,30	50,80	46,80	43,00	39,30	35,70
65,672	705,00	49,83	125,50	95,80	91,50	86,80	82,40	73,00	64,30	57,30	49,60
65,625	717,00	50,70	117,30	81,70	78,70	75,50	72,90	65,90	59,20	53,50	46,70
65,575	696,00	49,16	164,00	77,40	74,60	72,30	68,00	60,60	53,30	46,50	40,30
65,525	701,00	49,57	84,10	79,30	75,70	70,90	69,50	62,90	57,20	51,40	45,60

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Tablica Z.1.11. Wyniki pomiarów ugięć nawierzchni
na drodze DK7 km od 69+000 do 71+000 strona prawa

Station	Stress	Force	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
69,000	713,00	50,36	186,90	82,70	79,30	75,60	71,60	63,40	55,40	49,30	42,60
69,050	707,00	49,96	169,30	83,30	80,00	74,80	71,20	62,60	55,10	48,40	42,60
69,100	708,00	50,07	128,00	69,40	64,80	61,70	57,90	51,90	46,70	41,50	36,20
69,150	710,00	50,15	105,80	68,80	65,80	65,30	65,40	64,30	63,70	64,80	25,80
69,200	704,00	49,75	104,50	54,30	50,10	47,90	46,80	41,70	39,00	34,40	31,00
69,250	702,00	49,64	145,70	64,40	62,50	59,80	57,70	51,20	45,00	39,30	33,80
69,301	712,00	50,31	123,30	55,10	52,80	50,00	48,20	43,60	39,90	36,50	33,00
69,350	700,00	49,47	128,70	111,70	109,40	108,10	107,60	51,50	33,00	28,90	26,30
69,400	701,00	49,52	206,50	67,30	64,60	60,90	58,40	52,00	45,90	40,60	35,80
69,449	702,00	49,62	202,70	61,20	59,10	55,90	53,60	48,10	42,70	38,10	33,50
69,550	703,00	49,66	150,80	90,90	87,10	81,80	77,50	67,60	58,80	50,80	43,00
69,601	709,00	50,14	97,70	70,80	67,00	62,30	58,90	51,80	45,90	40,30	35,10
69,700	712,00	50,31	98,00	88,30	84,60	79,30	75,10	65,60	57,30	50,40	43,80
69,750	697,00	49,25	146,30	95,50	93,60	91,40	89,80	85,80	83,20	81,50	34,30
69,800	703,00	49,69	125,30	69,20	66,30	62,40	59,90	53,30	47,40	42,00	36,90
69,854	709,00	50,14	124,60	63,90	61,30	57,70	55,10	49,20	43,70	38,70	34,00
69,900	701,00	49,55	113,60	70,50	66,10	62,20	57,20	50,00	44,00	38,80	33,70
69,950	703,00	49,69	147,00	64,40	61,30	57,90	55,70	49,80	44,70	39,60	35,30
70,000	705,00	49,82	134,80	62,90	60,10	57,20	54,80	49,40	44,20	39,50	34,90
70,050	705,00	49,80	114,80	52,50	50,80	50,50	47,40	44,30	40,50	38,00	34,80
70,101	707,00	49,94	76,80	60,40	57,50	55,10	53,50	49,30	45,60	42,10	38,30
70,150	702,00	49,64	131,50	88,90	85,90	81,50	78,40	71,40	64,80	58,20	51,70
70,199	698,00	49,30	189,10	176,50	166,80	151,00	138,30	112,50	91,20	73,50	59,30
70,254	710,00	50,17	123,10	113,10	107,70	99,90	93,10	79,30	67,20	56,60	46,70
70,301	712,00	50,35	96,80	51,10	49,00	46,70	45,40	41,40	38,00	34,60	31,20
70,350	699,00	49,43	127,50	91,70	86,50	79,10	74,50	63,70	55,60	48,50	42,20
70,402	704,00	49,76	117,70	51,60	49,60	47,40	46,10	42,90	38,80	35,70	32,50
70,451	708,00	50,01	107,00	68,80	66,20	61,70	58,20	50,90	44,60	38,70	33,50
70,502	706,00	49,93	105,50	83,30	79,70	74,80	71,00	62,00	53,80	46,80	40,40
70,550	706,00	49,90	126,20	83,00	78,80	73,00	68,70	59,80	52,40	45,60	39,10
70,600	703,00	49,68	161,80	141,10	131,50	118,10	108,90	90,90	76,10	63,50	52,50
70,650	707,00	49,94	98,30	72,80	69,70	66,00	63,20	56,00	50,10	44,20	38,30
70,698	707,00	49,97	80,10	66,40	64,50	61,40	59,60	54,50	49,50	44,60	39,70
70,800	707,00	49,96	130,70	98,70	93,30	85,20	78,60	65,60	53,90	45,20	37,20
70,850	710,00	50,17	167,30	82,60	79,30	74,40	71,70	64,60	57,00	50,20	43,70
70,888	705,00	49,82	124,80	83,20	80,20	75,80	72,40	64,90	57,40	50,30	43,20
70,950	703,00	49,68	127,20	119,50	114,50	107,00	101,10	88,60	76,10	64,60	54,30
71,000	705,00	49,80	89,40	86,70	83,90	79,90	76,90	69,30	61,00	53,90	46,40

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

Tablica Z.1.12. Wyniki pomiarów ugięć nawierzchni
na drodze DK7 km od 69+000 do 71+000 strona lewa

Station	Stress	Force	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
71,000	721,00	50,96	135,30	56,10	54,20	51,90	50,30	45,70	40,80	36,50	32,00
70,975	702,00	49,61	107,60	55,30	53,80	51,30	49,90	45,40	41,50	36,40	33,20
70,875	707,00	49,97	129,30	76,80	74,20	70,50	67,60	60,90	54,00	47,60	40,90
70,825	702,00	49,59	133,70	70,40	67,20	62,80	59,60	52,70	46,10	40,60	35,00
70,778	704,00	49,73	183,40	71,80	68,90	64,40	61,40	53,60	46,60	40,30	34,20
70,712	703,00	49,69	111,60	72,00	69,20	65,90	63,20	56,20	49,90	44,10	38,50
70,675	707,00	49,96	128,80	66,40	63,80	59,80	57,10	50,70	44,50	38,90	33,10
70,624	701,00	49,57	145,40	130,10	123,30	111,60	104,30	87,70	73,50	61,40	50,70
70,574	708,00	50,01	92,70	59,50	57,10	54,30	52,40	47,50	42,70	38,90	34,80
70,525	706,00	49,93	158,70	79,40	75,70	71,10	67,20	59,00	51,50	44,50	38,40
70,475	713,00	50,36	133,20	82,90	79,50	75,50	72,40	64,70	57,40	50,80	44,30
70,421	700,00	49,44	150,10	64,40	62,00	58,50	56,40	51,60	47,10	43,10	39,90
70,375	704,00	49,78	94,40	67,40	64,10	60,10	57,20	51,30	46,00	41,50	37,00
70,323	705,00	49,80	120,10	62,80	60,30	57,00	55,00	49,20	44,30	39,80	35,30
70,275	701,00	49,52	182,90	124,40	115,40	102,80	94,70	78,70	65,50	55,30	46,30
70,225	707,00	49,96	94,70	70,90	67,70	63,10	60,50	54,20	48,50	43,30	38,20
70,175	708,00	50,03	114,60	73,10	70,50	66,60	63,70	56,80	49,70	43,70	38,40
70,125	707,00	49,97	109,20	66,00	64,30	62,20	60,50	53,70	47,50	42,30	37,00
70,074	710,00	50,21	105,60	59,20	57,00	54,30	52,60	48,10	43,70	39,80	35,40
70,026	701,00	49,52	153,40	66,30	63,90	60,80	58,90	52,60	48,20	43,00	38,00
69,976	706,00	49,89	92,50	76,30	73,80	70,20	66,70	60,00	53,70	46,50	40,80
69,925	706,00	49,93	91,90	74,10	71,00	66,80	63,80	56,70	50,00	44,00	38,10
69,875	709,00	50,12	124,80	79,20	75,20	69,40	65,70	57,30	49,70	43,40	37,50
69,825	709,00	50,08	96,10	63,00	61,30	58,70	57,20	52,80	48,50	44,30	40,20
69,775	699,00	49,41	116,00	68,50	66,50	63,40	61,20	55,70	49,50	43,60	37,80
69,725	703,00	49,66	154,00	84,60	82,70	79,00	76,30	69,90	63,90	58,30	52,60
69,676	704,00	49,73	162,70	56,30	54,80	52,70	51,30	47,30	43,00	39,40	35,10
69,575	708,00	50,07	133,40	50,70	49,20	47,10	45,90	42,60	38,80	35,40	32,00
69,533	702,00	49,61	90,70	62,90	60,40	57,90	54,40	48,90	44,70	39,50	35,60
69,426	708,00	50,01	144,20	78,90	74,90	69,80	67,20	58,90	51,20	45,40	39,50
69,375	710,00	50,17	95,90	71,60	67,30	62,60	58,60	50,90	44,30	38,00	33,60
69,323	710,00	50,19	101,50	72,00	70,70	70,20	69,00	68,40	68,70	69,40	23,60
69,275	705,00	49,83	106,60	63,70	61,10	55,30	55,20	49,50	44,40	39,80	34,60
69,225	702,00	49,62	94,20	59,30	56,40	53,40	51,30	45,70	40,80	36,40	31,60
69,175	709,00	50,10	93,70	58,60	56,30	53,70	51,70	47,30	43,50	39,50	35,00
69,125	703,00	49,69	90,30	68,40	65,70	61,90	59,10	52,70	47,70	42,70	37,80
69,075	712,00	50,35	81,40	70,10	66,90	62,40	59,30	52,10	46,20	40,70	35,40
69,025	704,00	49,73	82,00	77,90	75,70	73,10	71,20	63,70	54,40	46,60	39,80

**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)
Raport z drugiego etapu prac**

**Tablica Z.1.13. Wyniki pomiarów ugięć nawierzchni
na drodze DK7 km od 75+000 do 77+000
jezdni z podbudową z MCE**

Station	Stress	Force	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
75,000	716,00	50,61	109,20	51,80	50,00	48,10	45,80	41,30	36,70	32,60	28,00
75,050	705,00	49,80	129,80	44,10	42,30	39,70	38,40	34,50	30,80	27,50	24,20
75,100	704,00	49,76	133,70	70,00	66,70	59,30	58,40	50,10	43,20	36,70	31,90
75,150	703,00	49,66	144,10	64,10	61,40	57,50	54,30	47,30	41,10	35,70	30,70
75,200	702,00	49,59	137,80	71,70	68,40	63,50	59,40	50,40	42,70	36,40	30,80
75,250	701,00	49,57	156,90	76,60	70,10	65,10	59,00	49,60	41,40	34,90	29,00
75,301	708,00	50,01	118,00	73,30	68,70	62,00	56,40	45,40	36,40	29,40	23,80
75,350	706,00	49,89	134,10	83,20	79,30	70,80	65,20	52,10	40,90	32,60	25,90
75,399	704,00	49,73	104,20	95,90	89,70	80,00	73,00	57,80	46,50	37,00	29,80
75,450	704,00	49,78	154,50	83,40	78,80	71,20	64,80	51,70	42,10	34,30	28,00
75,500	710,00	50,17	119,80	74,10	69,50	63,50	57,40	46,30	37,10	30,50	25,00
75,550	704,00	49,75	92,70	84,80	79,70	70,70	65,00	51,80	41,40	32,70	26,10
75,600	704,00	49,73	113,50	86,20	81,10	73,00	66,60	53,60	42,30	33,40	26,30
75,650	709,00	50,12	103,80	86,20	80,80	73,30	65,60	52,10	40,90	33,30	26,70
75,701	706,00	49,89	118,70	105,60	98,80	87,70	78,50	59,70	45,40	34,90	26,60
75,750	705,00	49,80	98,40	89,90	84,00	75,20	67,80	53,30	40,40	31,40	24,60
75,799	706,00	49,90	116,60	62,70	59,20	54,10	50,30	42,10	35,00	29,00	24,60
75,850	705,00	49,82	126,80	84,10	79,10	71,30	64,90	52,20	42,20	34,50	28,00
75,900	703,00	49,66	105,50	88,20	82,20	73,80	67,40	53,30	42,20	33,20	27,00
75,950	708,00	50,03	130,90	77,70	73,30	66,80	61,70	50,90	41,80	34,30	27,50
76,000	704,00	49,78	130,10	89,40	84,60	77,20	71,10	57,90	46,50	37,40	29,40
76,051	708,00	50,03	96,40	86,20	82,30	75,10	69,50	56,80	45,40	36,80	29,30
76,100	704,00	49,75	101,40	88,80	83,60	75,90	69,30	56,10	45,40	36,70	29,20
76,150	706,00	49,93	100,00	76,30	72,40	66,10	61,20	50,60	41,80	34,30	28,10
76,199	708,00	50,07	149,20	81,70	77,40	71,10	65,50	53,90	43,90	35,50	28,60
76,250	705,00	49,85	90,90	79,80	75,70	69,20	63,90	52,20	42,40	34,40	27,90
76,300	702,00	49,61	115,10	77,20	73,80	66,90	62,40	51,30	41,60	34,10	27,80
76,351	705,00	49,85	104,00	70,60	66,80	61,50	56,80	47,10	38,70	32,30	25,40
76,400	710,00	50,21	113,90	74,40	70,40	65,50	59,20	48,70	39,70	32,60	26,20
76,450	701,00	49,57	121,70	84,20	77,90	72,00	64,80	51,00	42,40	34,40	27,60
76,500	704,00	49,75	94,80	82,20	78,40	72,30	66,90	55,20	45,10	36,40	29,00
76,550	709,00	50,12	103,70	79,30	75,20	68,70	63,60	52,30	42,80	35,00	28,60
76,600	705,00	49,82	127,60	83,80	79,60	72,40	66,30	53,90	43,40	34,80	28,30
76,650	708,00	50,07	138,70	87,00	82,60	75,70	69,80	57,20	45,70	36,60	28,90
76,700	704,00	49,75	102,10	70,50	66,30	60,10	55,10	44,90	36,60	30,40	25,20
76,750	709,00	50,14	127,50	85,70	80,50	72,00	65,30	52,00	41,00	32,80	27,80
76,802	702,00	49,61	130,40	65,20	61,80	56,40	51,60	42,50	34,70	28,70	22,80
76,850	699,00	49,43	132,10	58,00	54,50	49,30	45,40	37,30	30,90	25,90	20,50
76,900	704,00	49,76	166,10	73,70	70,00	63,70	58,50	48,10	39,20	31,40	23,70
76,950	703,00	49,71	129,00	91,60	86,90	78,10	71,20	57,10	45,70	36,50	29,30
77,000	704,00	49,75	142,70	78,10	73,60	67,10	61,60	50,80	41,40	33,50	27,60