



**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 PIERWSZEGO 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. Zuzanna Wiśniewska**

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

**Gdańsk, listopad 2011**

## **SPIS TREŚCI**

1.	WSTĘP .....	3
1.1.	PODSTAWA OPRACOWANIA .....	3
1.2.	OPIS PROBLEMU .....	3
1.3.	ZAKRES PRACY .....	4
2.	WYMAGANIA MATERIAŁOWE .....	6
2.1.	WYMAGANIA DOTYCHCZASOWE .....	6
2.2.	WYMAGANIA WEDŁUG NORM SERII PN-EN .....	7
3.	PROJEKTOWANIE MIESZANEK MINERALNO-CEMENTOWO-EMULSYJNYCH.....	9
3.1.	RECYKLING W TECHNOLOGIACH NA ZIMNO .....	9
3.2.	ŚRODKI WIĄŻĄCE WYKORZYSTYWANE W RECYKLINGU NA ZIMNO .....	11
3.2.1.	RECYKLING Z ZASTOSOWANIEM EMULSJI ASFALTOWEJ .....	12
3.2.2.	RECYKLING Z ZASTOSOWANIEM CEMENTU .....	13
3.2.3.	RECYKLING Z ZASTOSOWANIEM CEMENTU I EMULSJI ASFALTOWEJ LUB ASFALTU SPIENIONEGO .....	13
3.3.	PROJEKT SUPERIOR COLD RECYCLING (SCORE) .....	14
3.4.	RECYKLING NA ZIMNO W POSZCZEGÓLNYCH KRAJACH.....	17
3.4.1.	NIEMCY.....	17
3.4.2.	NORWEGIA.....	19
3.4.3.	SZWECJA .....	20
3.4.4.	REPUBLIKA POŁUDNIOWEJ AFRYKI.....	21
3.4.5.	HISZPANIA.....	22
3.4.6.	FRANCJA.....	24
3.4.7.	WIELKA BRYTANIA.....	26
	<i>Literatura:</i> .....	29

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

## RAPORT Z PIERWSZEGO 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 istniejących nawierzchni drogowych. Nie bagatelny 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 istniejących 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 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. Kruszywa stosowane jako materiał doziarniający.
2. Emulsje asfaltowe.
3. Cement.

Ponadto szereg metod badawczych stosowanych do oceny mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych zostało ujętych w normach serii PN-EN. Ich zastosowanie do badania mieszanek MCE wymaga weryfikacji laboratoryjnej w celu oceny ich przydatności do badań 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 podzielna na 3 etapy, w każdym z etapów przewidziano do wykonania kilka zadań. Zakres prac będzie obejmował:

**Etap I, przewidziany do wykonania w 2011 roku obejmuje:**

1. Zebranie informacji o zmianach legislacyjnych w stosunku do dotychczas stosowanych wymagań do materiałów do mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych. Na tym etapie zostaną 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 zostaną 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 będzie obejmował:**

1. Uzupełnienie 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 prace 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 metody są preferowane do oceny parametrów wytrzymałościowych takiego materiału.

**Etap II, przewidziany do wykonania w 2012 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).

## 2. Wymagania materiałowe

### 2.1. Wymagania dotychczasowe

Polskie wymagania dotyczące stosowania mieszanek MCE są opisane w warunkach technicznych [2] wydanych w 1999 roku. W wymaganiach wyspecyfikowano materiały w oparciu o wówczas stosowane wymagania. W ciągu ponad 20 lat funkcjonowania wymagań w Polsce zaszły pewne zmiany w opisie poszczególnych materiałów. Były to zmiany związane z wejściem Polski do Unii Europejskiej i wprowadzeniem w Polsce norm serii PN-EN.

W dotychczasowych wymaganiach [2] stosowane do wykonania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych materiały były opisane w następujący sposób:

**Destrukt**, czyli materiał mineralno-bitumiczny lub mineralno-cementowy, rozkruszony do postaci okruchów związanych lepiszczem bitumicznym lub spoiwem cementowym, powstały w wyniku frezowania warstw nawierzchni drogowej w temperaturze otoczenia, lub w wyniku kruszenia w kruszarce brył pochodzących z rozbiórki starej nawierzchni. Wymaga się, aby destrukt miał uziarnienie do 31,5 mm, dopuszcza się uziarnienie do 63 mm w przypadku występowania pod warstwami bitumicznymi podbudowy z tłuczni. W obu przypadkach dopuszcza się do 10 % nadziarna. W wymaganiach [2] nie podano żadnych innych wymagań.

**Kruszywo doziarniające**. Aby nadać mieszance MCE odpowiednie wymagania jej uziarnienie powinno mieścić się w polu dobrego uziarnienia wyznaczonego przez krzywe graniczne. W tym celu destrukt powstały w wyniku rozdrobnienia istniejącej nawierzchni należy doziarnić kruszywem. Doziarnienie destruktów, w zależności od przeznaczenia i kategorii ruchu, może odbywać się w przypadku dróg o kategorii ruchu KR 3-6 kruszywem łamanym zwykłym lub granulowanym oraz żwirem kruszonym. Na drogach o kategorii ruchu KR 1-2 stosuje się dodatkowo kruszywo naturalne. Stosowane do doziarnienia materiały muszą spełniać wymagania według następujących norm:

1. PN-B-11112:1997 „Kruszywa mineralne. Kruszywa łamane do nawierzchni drogowych” z wyjątkiem tłuczni 31,5/63 i niesortu 0/63.
2. PN-S-96025:2000 „Drogi samochodowe i lotniskowe. Nawierzchnie asfaltowe. Wymagania” Załącznik G.
3. PN-B-11111:1997 „Kruszywa naturalne do nawierzchni drogowych. Żwir i mieszanka” z wyjątkiem żwiru 31,5/63 i mieszanki 0/63.

Na etapie opracowywania szczegółowych specyfikacji technicznych dla poszczególnych zadań niekiedy dochodziło do sytuacji ograniczania również tych wymagań dla materiałów doziarniających i stosowania kruszyw o bardzo wysokich parametrach.

**Emulsja**. Jako lepiszcz stosowano emulsję kationową wolnorozpadową K3 o zawężonych wymaganiach w stosunku do „Warunków technicznych. Drogowe kationowe emulsje asfaltowe EmA-99” [4] lub emulsję kationową nadstabilną K4 wg [4]. W tabelicy 2.1. podano wymagania dla emulsji wymaganej do mieszanki MCE według [2]

Tablica 2.1. Właściwości emulsji asfaltowej wolnorozpadowej wg [2]

Lp.	Właściwości	Wymagania
1	Zawartość asfaltu, %	60 ±2
2	Lepkość, °E	5 ±1
3	Czas rozpadu na piasku kwarcowym Sikaisol, g/100g emulsji, więcej niż:	170
4	Pozostałość na sitku 0,63 mm, %, nie więcej niż:	0,1
5	Przyczepność do bazaltu, % ,	85
6	Trwałość podczas magazynowania, pozostałość na sitku 0,63 mm po 4 tygodniach, %, nie więcej niż:	0,5
7	Temperatura mięknięcia wytraconego asfaltu, °C	od 35 do 55
8	Wygląd	jednorodny
9	Barwa	ciemnobrązowa
10	Kontakt emulsji z cementem	brak reakcji

**Cement.** Wymagania dla mieszanek MCE [2] wymagały zastosowania cementu portlandzkiego CEM I klasy 32,5 zgodnego z PN-B-19701:1997 „Cement. Cement powszechnego użytku”. Jest to cement portlandzki bez dodatków. Wymagania nie dopuszczały stosowania cementu z dodatkami ani innych rodzajów cementu.

**Woda.** Należało stosować wodę zarobową do betonów i zapraw według normy PN-B-32250:19898 „Materiały budowlane. Woda do betonów i zapraw”

## 2.2. Wymagania według norm serii PN-EN

Wymagania materiałowe określone w wymaganiach [2] muszą ulec zmianie ponieważ przywołane wówczas normy zostały wycofane, zamienione lub uległy zmianie. Na tym etapie prac zostaną omówione poszczególne składniki pod kątem wymagań według dziś stosowanych norm. W kilku przypadkach wybór podejścia do oceny materiałów wyjściowych pozostanie nierozstrzygnięty, ponieważ bez przeprowadzenia szczegółowych badań przewidzianych do realizacji w kolejnych etapach będzie to bardzo trudne.

Dla poszczególnych materiałów wykorzystywanych do wytworzenia mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej przygotowano następujące podejście do propozycji wymagań materiałowych:

**Destrukt.** W normach europejskich nie znaleziono wymagań dla destruktu do podbudów w osobnej normie. Wymagania dla destruktu można znaleźć w następujących normach:

1. PN-EN 13108-8:2008. „Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania. Część 8: Destrukt asfaltowy”. Norma ta opisuje cechy jakie mogą być wymagane dla oceny destruktu asfaltowego przeznaczonego do stosowania w mieszankach mineralno-asfaltowych. Ponieważ norma ta dotyczy tylko destruktu asfaltowego nie można jej wykorzystać do oceny destruktu do mieszanek MCE. Może ona służyć co najwyżej jako pewien wskaźnik do sprecyzowania wymagań dla destruktu.

2. PN-EN 13242:2010 „Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym”. Norma ta oprócz kruszyw pochodzenia naturalnego opisuje również wymagania dla kruszyw z recyklingu. Nie są to mieszaniny destruktu asfaltowego z innymi materiałami a jedynie materiały powstałe z przetworzenia (recyklingu) betonu cementowego. Wymagania te mogą być pomocne w określeniu parametrów wymaganych dla materiału mineralnego przeznaczonego do wytworzenia mieszanki MCE.

Destrukt asfaltowy nadal będzie wymagał określenia wymagań poza stosowanymi normami. Przy wyborze cech do oceny destruktu zostaną wykorzystane cechy oraz parametry stosowane w normach PN-EN 13108-8:2008 oraz PN-EN 13242:2010.

**Kruszywo doziarniające.** Wymagania dla kruszyw uległy znacznym zmianom. Dziś w drogownictwie wymagania dla kruszyw opisywane są przez następujące normy:

1. PN-EN 13043:2004 „Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu”. Dotychczas kruszywa doziarniające do mieszanek MCE były klasyfikowane według norm opisujących materiały głównie do mieszanek mineralno-asfaltowych wynikało to z braku wymagań dla kruszyw do podbudów. W normach europejskich kruszywo jest osobno klasyfikowane pod kątem zastosowania do mieszanek mineralno-asfaltowych oraz osobno pod kątem zastosowania do podbudów. W przypadku nowych wymagań dla kruszyw doziarniających norma PN-EN 13043:2004 nie zostanie wykorzystana.
2. PN-EN 132421:2010 „Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym”. Norma ta opisuje wymagania dla kruszyw do podbudów drogowych. Kruszywo doziarniające zostanie opisane według tej normy.

Kruszywo doziarniające zostanie opisane poprzez wymagania zawarte w normie PN-EN 13242:2010. Przy wyborze cech do oceny kruszywa doziarniającego zostaną wykorzystane te cechy oraz parametry które są istotne dla mieszanek MCE.

**Emulsja.** Emulsja asfaltowa produkowana dla potrzeb drogownictwa jest klasyfikowana w oparciu o normę PN-EN 13808:2010 “Asfalty i lepiszcza asfaltowe. Zasady klasyfikacji kationowych emulsji asfaltowych”. W opracowywanych wymaganiach emulsja zostanie opisana w oparciu o wymagania zawarte w tej normie. Przy wyborze emulsji zostaną uwzględnione wymagania określone w załączniku krajowym (dokumencie aplikacyjnym) powstającym dla tej normy. Rodzaje wybranych emulsji zostaną określone na podstawie studiów i badań laboratoryjnych wykonanych w dalszych etapach pracy.

**Cement.** Wymagania dla cementu stosowanego do mieszanek MCE zostaną opisane zgodnie z normą PN-EN 197-1:2002 „Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku”. Rodzaje wybranych cementów zostaną określone na podstawie studiów i badań laboratoryjnych wykonanych w dalszych etapach pracy.



**Woda.** Wymagania dla wody nie są najistotniejszym elementem. Nie mniej jakość wody powinna być oceniana. Woda powinna spełniać wymagania normy 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”.

### 3. Projektowanie mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych

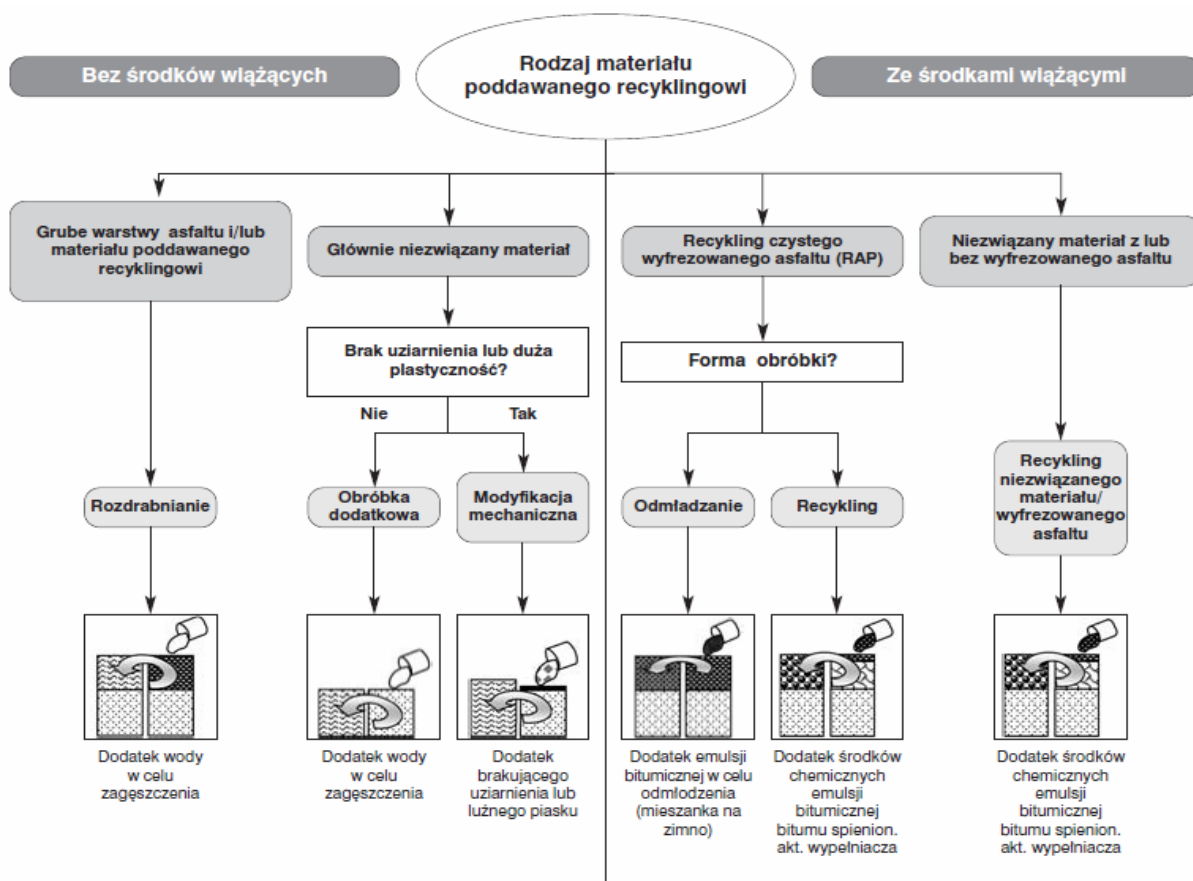
Przegląd dostępnych metod projektowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych będzie obejmował ogólne informacje o recyklingu głębokim na zimno oraz w tym kontekście o mieszankach mineralno-cementowo-emulsyjnych. Przedstawione zostaną informacje o stosowanych w różnych krajach podejściach do projektowania mieszanek MCE. Informacje te w dalszej części pracy posłużą do wyboru elementów mogących znaleźć zastosowanie w Polsce.

#### 3.1. Recykling w technologiach na zimno

Recykling na zimno może odbywać się w wytwórni lub bezpośrednio na miejscu budowy, przy pomocy odpowiednich maszyn. Forma *in situ* zyskała duże uznanie ze względu na stosunkowo niskie koszty wykonania i zredukowanie potrzeby transportowe. Alternatywnym rozwiązaniem dla recyklingu na zimno są mobilne wytwórnie instalowane w pobliżu prowadzonych robót, popularne w Wielkiej Brytanii i Skandynawii a także coraz częściej stosowane w Polsce.

Schemat podział technik recyklingu na zimno ze względu na materiały użyte do jego wykonania przedstawiono na rysunku 3.1. Pokazuje on szerokie możliwości recyklingu na zimno, zarówno z dodatkami jak i bez dodatków, co w Polsce jest praktycznie niespotykane.

**Recykling w wytwórniach.** Technika *in plant*, choć nieporównywalnie droższa, ma sporą przewagę nad formą *in situ*, jeśli chodzi o kontrolę dodawanych materiałów i jakość mieszania. Do produkcji mieszanki wykorzystuje się emulsje asfaltową lub asfalt spieniony. Ten ostatni daje możliwość zmagazynowania otrzymanego materiału i wykorzystania w przyszłości. Proces wykonywania nawierzchni rozpoczyna się od pozyskania destruktu asfaltowego. Stare warstwy nawierzchni są sfrezowane i transportowane do wytwórni, gdzie wszystkie składniki są mieszane. Przed tym procesem nie podgrzewa się destruktu ale można go rozkruszyć i przesiać dla zapewnienia lepszej kontroli wyjściowego produktu. Otrzymaną mieszankę przewozi się na miejsce budowy, rozkłada i zagęszcza walcami wibracyjnymi. Wadą tego rozwiązania jest dłuższy czas robót [5].



Rysunek 3.1. Recykling na zimno. Podział [5].

**Recykling na miejscu.** Recykling na zimno *in situ* realizuje się przy pomocy zespołu pojazdów, wśród których najważniejszą rolę pełni recykler. Jego najważniejszym elementem jest bęben, który frezuje daną warstwę i miesza ją z jednym lub kilkoma środkami wiążącymi oraz z wodą. Do maszyny podłączone są inne pojazdy, między innymi dozowniki zawieszony cementowej oraz cysterny z emulsją lub wodą. Za recyklerem poruszają się urządzenia wyrównujące i zagęszczające wykonaną warstwę. Na wykonanej warstwie wykonuje się warstwy bitumiczne z konwencjonalnych mieszanek [5].

Przystępując do planowania recyklingu na zimno na danej drodze trzeba ustalić rodzaj, przyczynę i zasięg uszkodzeń, które na niej występują. Należy wziąć pod uwagę rodzaj i skład mieszanki tworzącej warstwę oraz cel operacji (odmłodzenie górnych warstw, wzmocnienie konstrukcji). Na dobór środka wiążącego ma wpływ grubość warstwy, jaką chce się utworzyć. Jeżeli jest ona cienka (do 10 cm) a celem jest odmłodzenie warstw górnych, stosuje się emulsję regenerującą. Dla większych grubości, stabilizatorem jest asfalt spieniony, emulsja asfaltowa lub cement [6].

Głównymi zaletami recyklingu na zimno są [5, 7]:

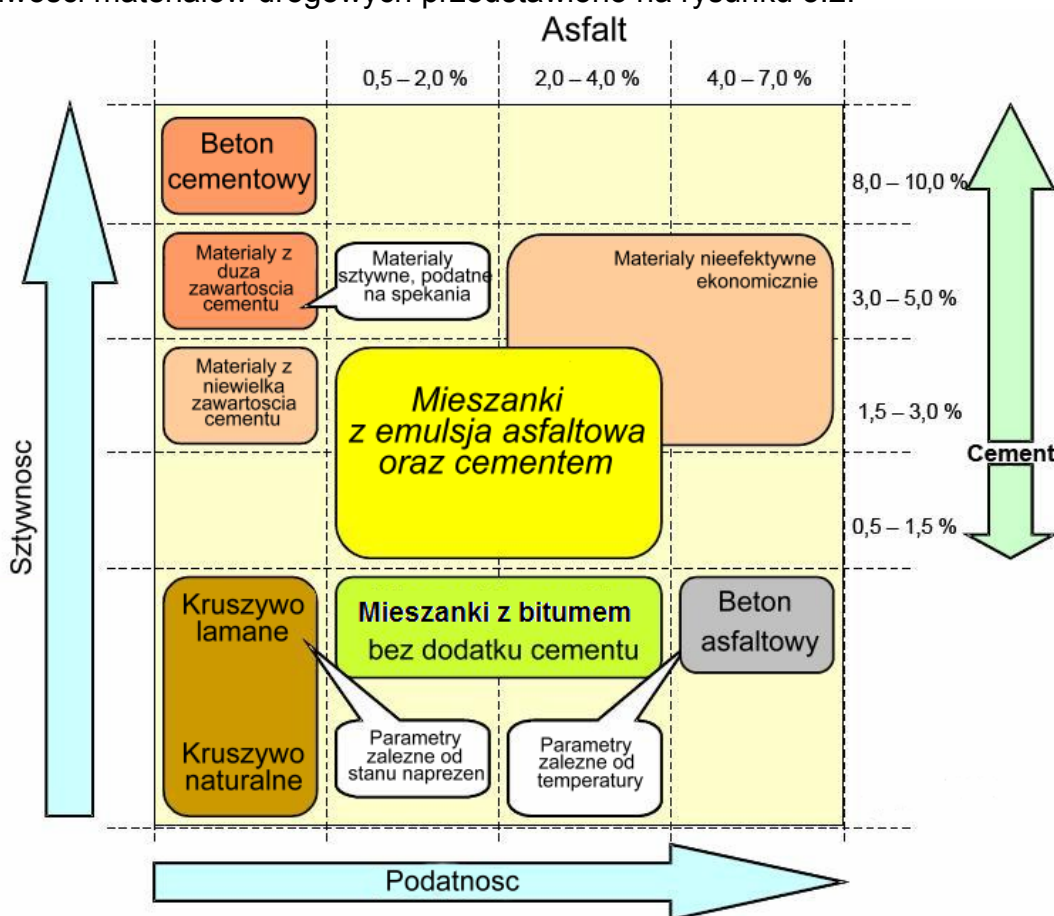
- Możliwość wykorzystania całego dostępnego materiału z rozbiórki, w tym warstw zawierających smołę drogową.
- Brak konieczności organizowania transportów i składowania destruktu.
- Obniżenie zużycia energii i emisji zanieczyszczeń ze względu na niską temperaturę przetwarzania.

- Integralność strukturalna, ponieważ wytwarzane warstwy są grube i jednorodne, nie ma problemu ze szczepnością cieńszych warstw.
- Krótszy czas budowy, ponieważ maszyny są efektywne i często wystarczy jedno przejście by wykonać całą warstwę.
- Mniejsza zależność od warunków meteorologicznych - jeżeli istnieje ryzyko opadów, budowę można przerwać i wznowić po ustaniu deszczu.
- Mniejsze zakłócenia ruchu, ponieważ recykling może być wykonany na szerokości jednego pasa drogi.

Ograniczenia stwarza niejednorodność używanego destruktu, a co za tym idzie znaczna zmienność parametrów uzyskanych warstw.

### 3.2. Środki wiążące wykorzystywane w recyklingu na zimno

Dobór środka wiążącego do recyklingu jest jednym z najważniejszych elementów projektowania recyklingu głębokiego na zimno, ponieważ zastosowany środek wiążący determinuje późniejsze zachowanie się mieszanki z recyklingu. Do recyklingu na zimno można stosować różne środki wiążące, może to być sama emulsja, asfalt spieniony, cement, wapno lub mieszaniny tych środków. W przypadku mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych mamy do czynienia z możliwością dodawania emulsji i cementu. Wpływ rodzaju stosowanych środków wiążących na właściwości materiałów drogowych przedstawiono na rysunku 3.2.



Rysunek 3.2. Wpływ rodzaju środka wiążącego na właściwości materiałów drogowych

Lepiszczca bitumiczne i spoiwa hydrauliczne nadają odmienne właściwości mieszankom mineralno-cementowo-emulsyjnym. Podczas gdy, dodatek emulsji zwiększa podatność mieszanki, spoiwa zwiększają jej wytrzymałość. Nadmierna sztywność może spowodować pęknięcie warstwy, dlatego częstym rozwiązaniem jest mieszanie środków wiążących w celu optymalizacji własności. Cement przyspiesza rozpad emulsji i poprawia uziarnienie mieszanki mineralnej, jednak jego nadmiar przyspiesza jej starzenie [5,8].

Na wybór konkretnej techniki wpływa cena i dostępność środków wiążących. Największy wpływ ma jednak akceptowalność danej formy w danym kraju tj. istnienie odpowiednich specyfikacji i pomyślnych doświadczeń wykonawczych, np. w Polsce wykonuje się przede wszystkim mieszanki z emulsją i cementem, podczas gdy w Norwegii nie używa się w ogóle cementu w recyklingu na zimno. Znaczenie mają także aspekty techniczne ponieważ efektywność środka wiążącego powinna być dopasowana do destruktu który się przetwarza [7].

### **3.2.1. Recykling z zastosowaniem emulsji asfaltowej**

Technika z wykorzystaniem emulsji jest nieskomplikowana, ponieważ lepiszcze zostaje wtryskiwane bezpośrednio do bębna mieszającego recyklera. Uzyskany materiał jest podatny i odporny na spękania. Odpowiednio pielęgnowana tuż po wbudowaniu, warstwa jest odporna na przesiąkanie wody. Wadą jest koszt emulsji, wyższy niż cementu czy asfaltu spienionego. Utrudnione jest jej stosowanie w przypadku gdy materiał istniejącej warstwy jest zawilgocony [7].

Dobór emulsji zależy od materiału poddawanego recyklingowi. Czas rozpadu emulsji musi dać możliwość przeprowadzenia mieszania i zagęszczania materiału. Przewodnik PIACR [9] wyróżnia trzy podstawowe przypadki:

1. Stabilizacja materiałów niezwiązanych - przypadek analogiczny do mieszanki żwiro-emulsyjnej. Chemiczne właściwości emulsji są uzależnione od zawartości frakcji pylistych i ich aktywności w materiale. Najbardziej odpowiednie są nadstabilne emulsje kationowe. Dobór lepiszcza zależy od warunków ruchowych i klimatycznych. Dla niskich i średnich natężeń ruchu w klimacie umiarkowanym stosuje się asfalty od 70/100 do 180/220
2. Recykling warstw asfaltowych (wykonywany zwłaszcza w Europie) w ramach przebudowy podbudowy lub warstwy wiążącej z MMA o ciągłym uziarnieniu i niewielkiej zawartości drobnych cząstek. Najlepszym lepiszczem dla tej opcji są wolnorozpadowe emulsje kationowe wyprodukowane z asfaltu o niskiej lepkości, czasem z dodatkiem środka regenerującego.
3. Recykling warstw ścieralnych z MMA o otwartej strukturze, popularny w Sanach Zjednoczonych. Stosuje się do niego emulsje kationowe lub anionowe, średniorozpadowe, o znaczącej zawartości upłynniacza (5-10%).

Dobór parametrów emulsji zalecanych do poszczególnych warstw w recyklowanej nawierzchni według [9] przedstawiono w tabelicy 3.1.

Tablica 3.1. Dobór emulsji do recyklingu na zimno [11]

Własności emulsji	Norma	Przypadek		
		materiały niezwiązane	warstwy asfaltowe	warstwy ścieralne
Zawartość lepiszcza	EN 1428	55-60%	60-65%	60-70%
Wskaźnik rozkładu	EN 13075-1	>160	120-180	80-140
Czas mieszania	EN 13075-2	>180	>180	-
Stabilność mieszania emulsji z cementem	EN 12848	≤2	-	-
Przyczepność wg metody zanurzenia w wodzie	EN 13614	≥75%		
Lepiszczce odzyskane z destylacji (EN 1431)	Penetracja	EN 1426	Przystosowane do warunków obciążenia ruchem i klimatu oraz lepkości starego lepiszcza w destrukcie	
	Temp. mięknięcia	EN 1427		
	Lepkość	EN 12595		
Objętość upłynniacza	EN 1431	0-2%	0-2%	5-10%

### 3.2.2. Recykling z zastosowaniem cementu

Cement jest jednym z najpopularniejszych środków wiążących, ze względu na jego dostępność, cenę i długą tradycję stosowania (istnieją liczne normy i specyfikacje na jego temat) [5]. Zazwyczaj dodatek cementu wynosi 2-4% masy mieszanki. Jego dozowanie w operacjach recyklingu może się odbywać na różne sposoby: jako zawiesina do bębna recyklera, w formie proszku rozprowadzonego na nawierzchni przed przejściem zespołu maszyn lub przy pomocy specjalnego rozścielacza instalowanego na obudowie recyklera. Zaletą cementu jest zwiększenie odporności materiału na działanie wilgoci. Projekt mieszanki powinien uwzględniać w miarę niskie zawartości cementu i wody, aby uniknąć przedwczesnych spękań [7].

Wykonanie recyklingu z zastosowaniem samego cementu należy traktować podobnie jak klasyczną stabilizację materiałów spoiwami hydraulicznymi.

### 3.2.3. Recykling z zastosowaniem cementu i emulsji asfaltowej lub asfaltu spienionego

Odpowiednia kombinacja bitumu i cementu pozwala na połączenie zalet obydwu środków. Wykonana w ten sposób warstwa szybciej osiąga dobrą wytrzymałość i jest bardziej odporna na działanie wody. Dobrze zaprojektowana, nie przeszywniona mieszanka nie ulega nadmiernemu spękaniu. Czasem dochodzi do przedwczesnego rozpadu emulsji asfaltowej w kontakcie z cementem. Pojawiają się wówczas problemy z właściwym wymieszaniem składników [7]. Bolączką polskich inżynierów

są zbyt restrykcyjne wymagania co do oczekiwanej sztywności, co w efekcie oznacza nadmierne stosowanie cementu w mieszankach mineralno-emulsyjno-cementowych (MCE) i w praktyce zbyt szybkie spękanie nawierzchni wykonanych w tej technologii [8].

Porównanie własności mechanicznych mieszanek stabilizowanych różnymi środkami wiążącymi przedstawia tablica 3,2.

Tablica 3.2. Typowe własności mechaniczne w różnych technologiach na zimno [10]

Własności mechaniczne	Emulsja asfaltowa	Emulsja+cement (3.5% asfaltu)	Asfalt spieniony (3.5%)	Asfalt spieniony (3.5% asfaltu)+cement(1%)
Wytrzymałość na pośrednia rozciąganie (na sucho) [kPa]	200	500	250	500
Wytrzymałość na pośrednia rozciąganie (na mokro) [kPa]	80	250	100	300
Stabilność wg Marshalla (na sucho) [kN]	10	20	20	20
Stabilność wg Marshalla (na mokro) [kN]	4	15	10	15
Moduł sprężystości (na sucho) [MPa]	1500	2500	3000	3000

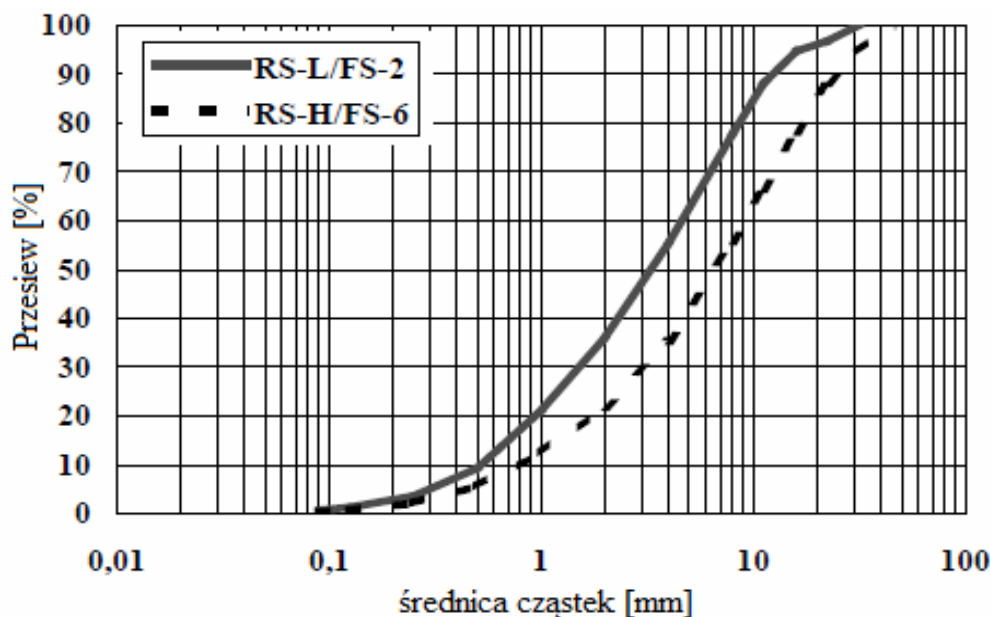
### **3.3. Projekt Superior COLD REcycling (SCORE)**

Opublikowany w 2003r Przewodnik PIACR [9] przedstawiał wiele ograniczeń dotyczących zastosowania technik na zimno np.: zła jakość materiałów, utrudnienia we frezowaniu, przeszkody mechaniczne lub meteorologiczne. Komisja Europejska, zainteresowana promowaniem budownictwa przyjaznego środowisku, sfinansowała projekt który miał zweryfikować znaczenie tych barier i poszukać sposobów na ich zniwelowanie. Projekt ten nosił nazwę Superior COLD Recycling, w skrócie SCORE.

Przedsięwzięcie trwało 281 miesięcy (2002-2005), przy współpracy firm i jednostek naukowych z kilku krajów [11]. Cele projektu obejmowały [12]:

- Obserwacje i lepsze zrozumienie procesu recyklingu poczynwszy od frezowania po osiągnięcie końcowych właściwości mechanicznych gotowych warstw, optymalizację istniejących technik.
- Wprowadzanie ulepszonych środków wiążących i badanie zależności pomiędzy lepizczem z destruktu a nowym lepizczem regenerującym.
- Rozwijanie nowych technologii opartych na zastosowaniu asfaltu spienionego, emulsji asfaltowej, mikroemulsji asfaltowych i ich kombinacji.

Badania laboratoryjne obejmowały odcinki testowe wykonane w krajach o różnym klimacie i odmiennej praktyce wykonywania nawierzchni. Były to Hiszpania i Czechy. Mieszanki mineralno-asfaltowe w gorącej Hiszpanii zawierały 4-5% lepiszcza o wysokim stopniu utlenienia, penetracji 10 pen w 25°C i temperaturze mięknięcia 70-80°C. W Czechach stosowano mniej twarde asfalty (penetracja 25 pen, temperatura mięknięcia 50-55°C) w większej ilości, rzędu 7-8%. Uznano, że destruk z takich nawierzchni będzie najbardziej reprezentatywny dla materiałów z rozbiórki nawierzchni w całej Europie.



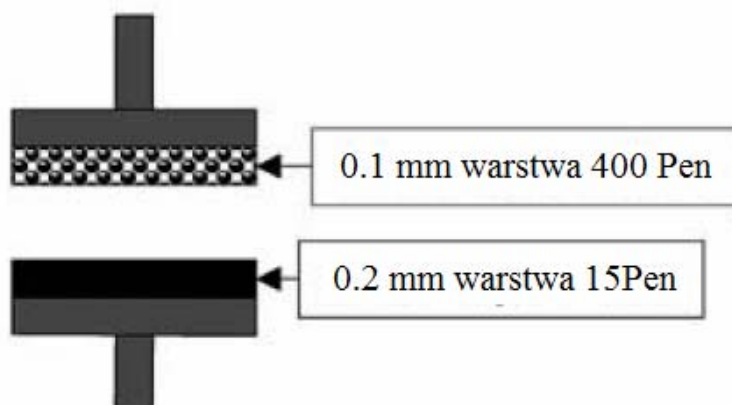
Rysunek 3.3. Wpływ sposobu frezowania na uziarnienie destruktu asfaltowego [13]

RS-L/FS2: prędkość przemieszczania 2m/min, 130 obrotów na min

RS-H/FS2: prędkość przemieszczania 6m/min, 200 obrotów na min

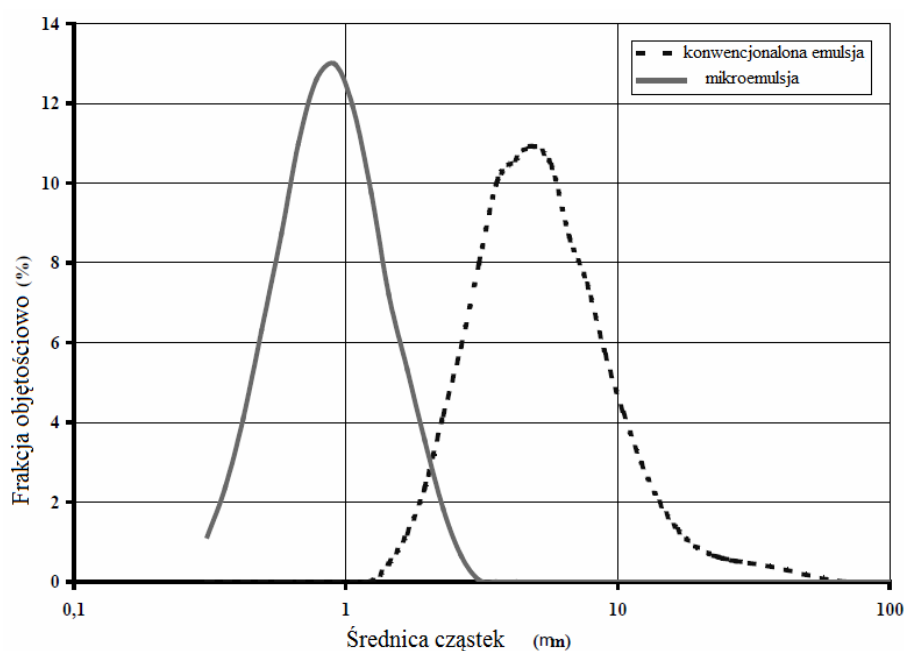
Głębokość frezowania: 10 cm

Pierwszym zadaniem projektu była ocena pozyskiwanego materiału. Badano wpływ sposobu frezowania (prędkości przemieszczania, prędkości obrotów, głębokości) na jakość destruktu. Rysunek 3.3. pokazuje analizę doświadczenia przeprowadzonego w miejscowości Žďár przy pomocy recyklera WR 2500 Wirtgen. [13] Przedmiotem badań było także oddziaływanie lepiszcza znajdującego się w materiale z rozbiórki z nowym bitumem. W reometrze typu płytka-płytko umieszczono 2 warstwy asfaltu: o penetracji 400pen oraz sztucznie postarzonego o penetracji 15pen. Mierzono wzrost modułu pozornego układu i na jego podstawie oceniono kinetykę dyfuzji. Wyniki wykazały, że jest ona niezwykle powolna, a czas trwałości mieszanki jest mniejszy od czasu niezbędnego do zregenerowania lepiszcza. [11]



Rysunek 3.4. Schemat pomiaru dyfuzji kinetycznej [13]

Wadą recyklingu na zimno jest słaba kohezja i wrażliwość na wodę, dlatego unika się stosowania go w niskich temperaturach i przy dużej wilgotności. Pewne nadzieje zmiany w tym zakresie wiązano z, zastosowaną w ramach projektu po raz pierwszy, mikroemulsją. Jest to lepszycze zawierające cząsteczki o zredukowanej wielkości (w porównaniu z konwencjonalną emulsją). Zwiększona powierzchnia właściwa drobin, pozwala na lepsze otaczanie kruszywa oraz zmniejsza wrażliwość mieszanki na wodę. [11]



Rysunek .3.5. Porównanie składu granulometrycznego konwencjonalnej emulsji i mikroemulsji [13]

Aby poprawić kohezję mieszanek dodano 0.5-1% cementu. Zaobserwowano, że spoiwo przyspiesza proces rozpadu emulsji, zmniejsza wilgotność mieszanki,



zwiększa jej zagęszczalność, poprawia parametry mechaniczne, w tym zwiększa moduł sprężystości początkowej o 30% [11].

Poprawa powyższych parametrów zlikwidowała występujące wcześniej problemy: konieczność późniejszego oddawania do ruchu niemożliwość pobierania próbek rdzeniowych przed upływem kilku miesięcy [11].

Dzięki realizacji takiego programu techniki recyklingu na zimno stają się coraz bardziej powszechne a jakość wytwarzanych materiałów coraz bardziej spełnia oczekiwania projektantów oraz inwestorów.

### **3.4. Recykling na zimno w poszczególnych krajach**

#### **3.4.1. Niemcy**

Wymagania niemieckie dotyczące recyklingu na zimno zawarte są w publikacji „Merkblatt für Kaltrecycling in situ im Straßenoberbau”, wydanej w 2005 roku [14]. Zawarto w nich zalecenia zarówno do wykonywania warstw z mieszanki MCE jak i asfaltu spienionego. Mieszanki MCE stosuje się tylko dla klas nośności konstrukcji VI, V, IV i III, czyli obciążeniu do 3 milionów osi porównawczych, odpowiada to polskim kategoriom ruchu od KR1 do dolnej granicy KR4. Nie dopuszcza się stosowania w Niemczech mieszanek MCE do największych klas obciążeń (kategorie KR5 i KR6 wg polskich wymagań).

Mieszanki MCE można podzielić w zależności od kombinacji spoiwa i osiąganych tym samym modułów sztywności E, na typ wiązania dominująco bitumiczny i dominująco hydrauliczny. Przy mieszankach MCE dominująco bitumicznych moduł sztywności w pośrednim rozciąganiu E po 28 dniach, mierzony w temperaturze +5°C, wynosi od 3000 do 7000 MN/m<sup>2</sup>. Przy mieszankach dominująco hydraulicznych moduł sztywności E po 28 dniach, mierzony w temperaturze +5°C, zawiera się pomiędzy 7000 a 12500 MN/m<sup>2</sup>. Poprzez celowy dobór spoiwa można uzyskać mieszanki MCE, w których zachowanie materiałów zbliżone jest zarówno do warstw sztywnych jak i podatnych. Wybór kombinacji spoiwa, a tym samym charakteru warstwy, zależy od składu mieszanki granulometrycznej oraz nośności podłoża. Przy wysokim udziale destruktu jest możliwe, że pomimo znacznego dodatku spoiwa hydraulicznego powstanie mieszanina MCE dominująco bitumiczna.

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

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

Jako środki wiążące mogą być zastosowane:

- lepiszcza (emulsje asfaltowe, asfalt spieniony),
- hydrauliczne środki wiążące (cement, popioły lotne),
- kombinacje z obu rodzajów środków wiążących.

Mieszanka mineralna powinna posiadać ciągłe uziarnienie do maksymalnie 45 mm z maksymalnie 10% ilością nadziarną. W mieszankach z bitumiczną dominacją należy dążyć do tego, aby udział ziaren < 0,09 mm mieścił się w przedziale od 2 do 10%. Zawartość ziaren przechodzących przez sito 2 mm powinna wynosić minimum 20%. Uziarnienie mieszanki często wymaga doziarnienia nowym kruszywem. Jeżeli destrukcja zawiera smołę, dodatek doziarnienia nie powinien przekraczać 15% masy kruszywa.

Dla emulsji bitumicznych zaleca się następujące wymagania:

- Cechy zewnętrzne: jednorodna, płynna, kolor brunatny.
- Gatunek (rodzaj) bitumu: 50/70 lub 70/100 według EN 12591.
- Zawartość bitumu: 60 do 65% wag.
- Rodzaj ładunku: kationowy (pH < 3), anionowy (pH > 9).
- Czas wypływu (DIN 52023 – 1) ≤ 12 s przy 200C.

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

W przypadku spoiw hydraulicznych dopuszczalne są środki wiążące zgodne z DIN 18506, których przydatność została sprawdzona w badaniach. Nie precyzuje się wymagań dla cementu.

Według wymagań określonych w wymaganiach niemieckich [14] gotowa mieszanka powinna charakteryzować się parametrami podanymi w tabeli 3.3.

Tablica 3.3: Wymagania w odniesieniu do próbek z mieszanki MCE.

Parametr	Badanie przydatności
Zawartość wolnych przestrzeni (próżni) [%]	8 do 15% Maksymalnie 10% dla materiałów zawierających smołę
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie T = + 50C po 7 dniach [N/mm <sup>2</sup> ]	0,5 – 0,8
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie T = +50C po 28 dniach BS2, 28 [N/mm <sup>2</sup> ]	0,75 - 1,2
Spadek wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po 28 dniach, w porównaniu z próbkami przechowywanymi w wodzie [%]	< 30
Moduł E	Należy badać

Z kolei poradnik firmy WIRTGEN [5] dla mieszanek z dodatkiem 4 -5 % (wagowo) emulsji lub 3- 5 % asfaltu spienionego oraz 1.5-2 % spoiwa hydraulicznego, określa następujące wymagania dla mieszanki MCE:

- Efektywne związanie mieszanki
- Zawartość wolnych przestrzeni 4-12 % v/v
- Stabilność Marshalla >2 kN ( 60 °C) lub >10 kN (w 25 °C)
- Zgodność z wymaganiami środowiskowymi

W Niemczech recykling warstw asfaltowych do głębokości 10cm (odświeżenie) wykonuje się z emulsją asfaltową. Grubsze warstwy bitumiczne stabilizuje się asfaltem spienionym lub emulsją i cementem [5].

### 3.4.2. Norwegia

W Norwegii nie stosuje się cementu do recyklingu na miejscu. Utworzono za to kompleksowe procedury projektowania dla recyklingu lepiszczami bitumicznymi [15]. Zazwyczaj asfalt wybierany do spienienia w klimacie umiarkowanym ma penetracje ok. 60 -120 pen (tablica 3.4.). Unika się twardszych asfaltów ze względu na ryzyko zatkania dyszy i gorszą jakość piany, prowadzącą do gorszego otoczenia kruszywa przez lepiszcze.

Tablica 3.4. Dobór asfaltu do recyklingu w Norwegii [9]

Średnia temperatura roczna [°C]	Typ asfaltu
<3	V600-12000
3-6	330/430, V6000-V12000
>6	160/220-330/430, V12000

Asfalt spieniony wytwarza się więc zwykle z asfaltu 145/210 lub 300/430. Rozgrzewa się go do temp. ok 150°C i dodaje 2-5% (optymalnie 3%) wody [15].

Recykling na zimno dopuszcza się na drogach o ruchu do 3000 pojazdów dziennie (dla podbudów pomocniczych) oraz do 1500 pojazdów dziennie (dla podbudów zasadniczych). Zawartość lepiszcza powinna wynosić 3.5-4%. Orientacyjnie wyznacza się ją ze wzoru:

$$P_a = 0.14p_{75} + 2.6$$

gdzie  $p_{75}$  oznacza zawartość procentową ziaren poniżej 0.075 mm.

W mieszance mineralnej powinno znajdować się 1-7% ziaren poniżej 0.075 oraz mniej niż 20% frakcji poniżej 2 mm średnicy. Aby uniknąć uszkodzenia recyklera, maksymalna wielkość ziaren destruktu nie powinna przekroczyć 100mm [15].

### **3.4.3. Szwecja**

Szwedzkie doświadczenia z wykorzystaniem materiałów pochodzących z rozbiórki nawierzchni sięgają lat sześćdziesiątych [16]. Recykling na zimno odbywa się głównie w mobilnych wytwórniach na terenie budowy. Dzięki możliwości przenoszenia, łatwo można je przystosować do robót o niewielkiej skali. Zwykle taka wytwórnia produkuje 100 - 150 ton mieszanki na godzinę. Biorąc pod uwagę wymagania materiałowe, sposób projektowania i specyfikacje wykonawcze, jest to forma bliższa recyklingowi na miejscu niż w wytwórni. Zasadniczą różnicą są: metoda przechowywania materiału z rozbiórki oraz miejsce w którym odbywa się mieszanie składników [9]. Proces rozpoczyna pokruszenie i posortowanie destruktu asfaltowego. Do warstw ścieralnych stosuje się kruszywa do 16 mm, zaś do podbudów do 22 mm. Granulat jest zazwyczaj podzielony na dwie frakcje: 0/8 i 8/16 lub 8/22. Jego wilgotność powinna się mieścić w przedziale 3-5% masy dla podbudów oraz 2-4% dla warstw wierzchnich. Jeśli granulat asfaltowy o wysokiej zawartości lepiszcza (> 6%) bądź mieszanka wymaga poprawy urabialności, dodaje się konwencjonalnego kruszywa. Zawartość wody w kruszywie jest określana według zmodyfikowanej metody Proctora. Jeśli granulat ma więcej niż 5% wody, nie należy jej dodawać podczas mieszania. Kruszywo i granulat asfaltowy nie są wstępnie podgrzewane, zaś lepiszcze ma temperaturę 50-60°C. Zaprojektowana mieszanka musi spełnić podstawowe wymogi (tabela 3.5). Nie należy prowadzić robót w temperaturze poniżej +5°C [16].

Recykling na zimno stał się najpopularniejszym narzędziem utrzymaniowym na szwedzkich drogach o niskim natężeniu ruchu (poniżej 1500 pojazdów na dzień) [16].

Tablica 3.5. Wymagania dla warstw recyklowanych według doświadczeń  
Szwedzkich[16]

Własność MMA	Podbudowa	Warstwy wierzchnie
Zawartość wolnych przestrzeni [%]	6-14	4-12
Stabilność wg Marshalla w 25°C [kN]	>7	>5
Moduł sztywności w 10°C [MPa]	>2000	-
Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie w 10°C, na suchych próbkach 7-dniowych [kPa]	-	>300

#### **3.4.4. Republika Południowej Afryki**

W 2002 roku Południowoafrykańskie Towarzystwo Bitumiczne (Sabita) wydało *Przewodnik Techniczny: Materiały stabilizowane lepiszczami asfaltowymi*, który został uaktualniony w 2009 roku [15]. Publikacja opisuje klasyfikacje, metody projektowania i wykonania recyklingu nawierzchni przy pomocy emulsji asfaltowej i asfaltu spienionego. Podstawowy podział takich materiałów obejmuje trzy grupy [15]:

- BSM1 o wysokiej wytrzymałości na ścinanie, zazwyczaj stosowany w podbudowach dróg o ruchu przekraczającym 6 milionów osi standardowych. Używanym kruszywem jest destruk asfaltowy bądź dobrze uziarniony przekruszony materiał kamienny.
- BSM2 o dość dobrej wytrzymałości na ścinanie, wykorzystywany w podbudowach na drogach o mniejszym obciążeniu ruchem. Stabilizowanym materiałem jest żwir naturalny lub destruk asfaltowy.
- BSM3 używany w podbudowach dróg o mniejszym ruchu-poniżej 1miliona osi standardowych. Recykling obejmuje warstwy asfaltowe i podbudowę z kruszyw.

Recykling typu BSM1, gdy zawartość destruktu asfaltowego stanowi 75-100% całego kruszywa, wymaga szczególnej staranności na etapie projektowania. Należy przeanalizować warunki klimatyczne na danym obszarze, i na próbkach projektowanej mieszanki wykonać testy trójosiowego ściskania w temperaturze typowej dla regionu.

Materiały przeznaczone do recyklingu asfaltem spienionym dzieli się na 4 grupy, gdzie grupa FB4 jest przeznaczona wyłącznie dla dróg o lekkim natężeniu ruchu, zaś FB1 jest odpowiednia dla dróg o najwyższym natężeniu ruchu (tablica 3.6) [9].

Tablica 3.6. Klasyfikacja materiałów recyklowanych asfaltem spienionym [9]

Wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe w 25°C	Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie w 25°C	
	100-300	300-500
700-1400	FB4	FB3
1400-2000	FB2	FB1

Procedura projektowania mieszanek z asfaltem spienionym przewiduje użycie materiałów z dość niską zawartością lepiszcza. Przyjmuje się różne techniki modelowania nawierzchni. Jeżeli zawartość dodatków stabilizujących jest niska (asfalt<2, cement≤1%), bierze się pod uwagę nacisk w danej warstwie. Sztywność, w zależności od jakości uziarnienia, może wynosić od 600 do 12000 MPa. Ważne jest podzielenie takiej podbudowy na cieńsze podwarstwy w celu oszacowania rzeczywistej sztywności w momencie modelowania nawierzchni [9]. Testy rozciągania pośredniego i ściskania jednoosiowego nie są idealne dla mieszanek recyklowanych na zimno. Test ściskania trójosiowego dostarcza bardziej miarodajne dane, jednak nie stosuje się go rutynowo ze względu na czas i koszty. Wykonuje się go tylko dla mieszanek o niskiej zawartości (< 1.5%) cementu [9].

### **3.4.5. Hiszpania**

W Hiszpanii zasady dla recyklingu in situ z emulsją (tylko dla warstw asfaltowych) oraz z cementem (dla wszystkich warstw nawierzchni) ustala specyfikacja PG-4 [17]. Na drogach najwyższych kategorii T00 i T0, nie można stosować żadnych materiałów pochodzących z recyklingu. Na drogach kategorii T1 można stosować recykling z emulsją warstw bitumicznych, jeśli będą one następnie przykryte MMA na gorąco grubości minimum 6 cm na poboczach i 8 cm na jezdni [17]. Na drogach niższych kategorii dozwolone są wszystkie techniki recyklingu, jeżeli nad recyklowaną warstwą wbuduje się mieszankę na gorąco. [18].

W 1998 r. firma Probisa we współpracy naukowcami Politechniki Madryckiej wydała Podręcznik wymiarowania dla nawierzchni recyklowanych na zimno na miejscu [6]. Klasy recyklingu wyszczególnione w tym podręczniku przedstawiono w tablicy 3.7.

Tablica 3.7. Klasy recyklingu w Hiszpanii [6]

Klasa	Emulsja bitumiczna			Cement
	I	II	III	IV
Dozowanie lepiszcza/spoiwa	4-7%	3-5%	2-4%	4-6%
Rodzaj recyklowanej nawierzchni	Warstwy bitumiczne <5cm i podbudowa niezwiązana	Warstwy bitumiczne <10cm i podbudowa	Warstwy bitumiczne	Zniszczone nawierzchnie
Głębokość recyklingu [cm]	8-15	8-15	5-15	15-35
Cel	Wzmocnienie nawierzchni		Odświeżenie wierzchnich warstw	Uformowanie nowej podbudowy

Recykling klasy pierwszej wykonuje się na drogach o niskim natężeniu ruchu wymagających wzmocnienia, ale o nośnym podłożu. Recykling wykonuje się przy pomocy emulsji lub asfaltu spienionego. Na przetworzonej warstwie układa się ciekłą warstwę ścieralną w postaci powierzchniowego utrwalenia lub cienkiej warstwy na gorąco. Nawierzchnie o wystarczającej nośności i grubszych warstwach asfaltowych, ale w których może występować zła szczepność międzywarstwowa kwalifikuje się do recyklingu klasy drugiej. Używa się do niego emulsji asfaltowej na bazie asfaltu 120/180. Podobnie jak w poprzednim przypadku, po wykonaniu zabiegu układa się ciekłą warstwę ścieralną na gorąco. Jeżeli problemem są kiepskie własności mechaniczne wierzchnich warstw, przeprowadza się recykling klasy III. Polega on na ułożeniu recyklowanej warstwy wiążącej a następnie warstwy ścieralnej, co powoduje podniesienie niwelety drogi o kilka centymetrów. Recykling klasy czwartej wykonuje się na nawierzchniach o niewystarczającej nośności, często wymagających poszerzenia. Celem jest wykonanie podbudowy przy pomocy cementu lub cementu i emulsji.

Aby przygotować próbki do badań laboratoryjnych, w celu zaprojektowania mieszanki, hiszpańscy wykonawcy przesiewają destrukcję przez sito 32mm, dzieląc go na dwie frakcje. Frakcja gruba zostaje umieszczona w rozkruszarce laboratoryjnej i przesiana przez sito 5mm. Frakcja drobna (<32mm) zostaje wymieszana z kruszywem 0/5 oraz 5/25 w proporcjach: na 50 kg destrukcji, 7kg frakcji 0/5 oraz 1kg frakcji 5/25. [9]. Próbkę poddawane są statycznemu zagęszczaniu, i suszone w 50°C do osiągnięcia stałej masy-zazwyczaj przez 3 dni. Minimalna zawartość emulsji jest uzależniona od wyników testów rozciągania i ściskania jednoosiowego oraz od warunków obciążenia danej drogi (tablica 3.8.).

Tablica 3.8. Wymagana wytrzymałość na rozciąganie [17]

Ruch [pojazdy ciężkie/dobę/ kierunek]	R (na sucho) [MPa]	r (po namoczeniu) [MPa]	r/R (%)
200-2000	3	2.5	75
≤ 199	2.5	2	70

Najczęściej stosowaną jest kationowa emulsja średniorozpadowa ECL-2 na bazie asfaltu o penetracji 200x0.1mm. Jeżeli jest to konieczne, do mieszanki można dodać wapna lub cementu w ilości nie większej niż 1% masy suchego materiału.

#### **3.4.6. Francja**

Francuski Komitet Technik Drogowych (Comité Français des Techniques Routières) wydał dwa przewodniki: *Recykling na miejscu starych warstw drogowych* [20] oraz *Odświeżanie i recykling warstw bitumicznych* [21]. Publikacje te opisywały istniejące praktyki, ich zakres i ograniczenia.

Francuski przewodnik techniczny [21] przedstawia klasyfikację przetwarzania nawierzchni zależnie od:

- rodzaju istniejących uszkodzeń (strukturalne lub powierzchniowe),
- techniki odnowy, związanej z rodzajem środka wiążącego,
- celu jaki chce się osiągnąć (wzmocnienie strukturalne lub odnowa warstw powierzchniowych),

Wymienione czynniki dają w konsekwencji do dyspozycji 5 klas recyklingu, który przedstawiono w tabeli 3.9.



**Opracowanie procedury do projektowania mieszanek  
mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)**

Tabela 3.9 Klasyfikacja recyklingu na miejscu „na zimno” wg [21].

RODZAJ ŚRODKA	EMULSJA			CEMENT	CEMENT + EMULSJA
KLASA	KLASA I	KLASA II	KLASA III	KLASA IV	KLASA V
RODZAJ NAPRAWY	wzmocnienie strukturalne	regeneracja górnych warstw		wzmocnienie strukturalne	wzmocnienie strukturalne lub regeneracja górnych warstw
CEL	polepszenie właściwości mechanicznych i geometrycznych nawierzchni z ewentualną regeneracją asfaltu w przypadku klasy II.		Frezowanie warstw bitumicznych z regeneracją bitumu	warstwy podbudowy	- warstwy podbudowy - warstwa wiążąca
RECYKLOWANE WARSTWY	3 do 4 cm warstw bitumicznych + podbudowa	4 do 8 cm warstw bitumicznych + podbudowa (25% podbudowy + 75% warstw bitumicznych)	wyłącznie warstwy bitumiczne	- całość lub część warstw bitumicznych - całość lub część podbudowy - ewentualnie część podłoża	- całość lub część warstw bitumicznych - całość lub część podbudowy
TYP ŚRODKA WIĄŻĄCEGO	emulsja	emulsja (zwykła lub regenerująca)	emulsja regenerująca	cement	cement + emulsja
ILOŚĆ DODANEGO ŚRODKA	3 – 5%	1 – 3%	do 2%	3 -6%	3 – 7% (jako kompozyt)
GRUBOŚĆ NOWEJ WARSTWY	10 – 15cm	5 – 12cm	5 – 12cm	20 – 30cm	10 – 30cm

Dla poszczególnych klas przewidziano następujące cele:

**KLASA I** Celem odnowy klasy I jest wzmocnienie strukturalne starych nawierzchni z podbudową wykonaną wyłącznie z kruszyw niestabilizowanych z pokryciem w postaci cienkich dywaników bitumicznych lub powierzchniowych utwaleń (<4cm). Konstrukcja takich nawierzchni wynikała z bardzo oszczędnej techniki budowy i utrzymania francuskich dróg. W kraju bogatym w surowiec skalny, preferowano właśnie podbudowy z kruszywa i powierzchniowe utwalenia lub cienkie dywaniki bitumiczne. Warstwy wierzchnie grubości 4cm były efektem późniejszych zabiegów utrzymaniowych polegających na układaniu kolejnych powierzchniowych utwaleń.

**KLASA II & III** W obu przypadkach chodzi o poprawę właściwości górnych warstw starej nawierzchni, uszkodzonych w wyniku starzenia asfaltu, utraty

szczepności międzywarstwowej, intensywnych spękań. Grubość odnowionej warstwy waha się w granicach 5-12cm, a różnica między klasami polega na konstrukcji starej podbudowy. Klasa II dotyczy nawierzchni z podbudową z kruszyw niestabilizowanych lub stabilizowanych spoiwem hydraulicznym; natomiast klasa III dotyczy nawierzchni z podbudową bitumiczną.

**KLASA IV:** Klasa IV recyklingu polega na wzmocnieniu strukturalnym przez wykonanie nowej podbudowy, na której układa się warstwę ścieralną w przypadku, gdy odnowiona warstwa pełni funkcję podbudowy zarówno zasadniczej jak i pomocniczej, lub warstwę podbudowy zasadniczej i warstwę ścieralną, w przypadku gdy odnowiona warstwa pełni funkcję podbudowy pomocniczej. Grubość odnowionej w ten sposób warstwy oscyluje w granicach 20-30cm.

**KLASA V** Zależnie od występujących uszkodzeń i typu naprawy, recykling klasy V ma na celu wykonanie warstwy wiążącej albo warstwy podbudowy. Warstwę wiążącą wykonujemy, gdy mamy do czynienia z naprawą uszkodzeń powierzchniowych starych warstw (brak szczepności międzywarstwowej, spękania, starzenie asfaltu) oraz gdy nie ma uszkodzeń podbudowy. Nowa warstwa będzie miała grubość sięgającą 15 cm. Warstwy podbudowy zasadniczej wykonujemy w przypadku występowania uszkodzeń warstw powierzchniowych oraz nieznacznych uszkodzeń strukturalnych w podbudowie. Grubość nowej warstwy zawiera się wówczas między 15-20 cm; oraz dwóch warstw podbudowy w przypadku znacznych uszkodzeń starej podbudowy. W tym przypadku grubość odnowionej warstwy sięga 30 cm. Na tak wykonanej warstwie, w zależności od kategorii ruchu układa się warstwę ścieralną dla obciążenia  $\leq T2$  wystarczające jest zazwyczaj wykonanie powierzchniowego utrwalenia, począwszy od kategorii T3 wykonuje się warstwę ścieralną grubości co najmniej 4cm.

### **3.4.7. Wielka Brytania**

Pierwszy, pełny przewodnik *Projektowanie i specyfikacje utrzymania konstrukcji autostradowych poprzez recykling na zimno in situ* [23], wydano w 1999 r. Zawierał wskazówki dotyczące recyklingu z asfaltem spienionym lub cementem na drogach przenoszących obciążenie do 20 mln osi. Jego publikacja znacząco przyczyniła się do upowszechniania technologii wśród inwestorów i wykonawców. Nieco później, jeszcze większą popularność zyskała technologia na zimno w mobilnych lub stacjonarnych wytwórniach, umiejscowionych w sąsiedztwie budowy. Jej zaletami były lepsza jednorodność mieszanki i możliwość dodania granulatu asfaltowego pochodzącego z innych źródeł niż remontowana nawierzchnia [22].

Instrukcja do Projektowania Dróg i Mostów HD 31 [25] podaje szereg procedur dla recyklingu warstw asfaltowych na zimno. Jeżeli recyklowana warstwa spełnia wymagane parametry funkcjonalne, specyfikacje nie stawiają żadnych ograniczeń w jej wykorzystaniu [24]. Przed podjęciem decyzji, należy jednak rozważyć własności i jednorodność destruktu, a także dostępność odpowiednich maszyn oraz umiejętności ekipy wykonawczej. Mając do dyspozycji granulaty asfaltowe należy rozpatrzyć możliwość recyklingu na zimno i na gorąco. Wpływ na przyjęcie rozwiązania mają:

- Odległość miejsca, gdzie istnieje możliwość zlokalizowania urządzeń przetwarzających
- Odległość od źródła materiałów przeznaczonych do recyklingu
- Rodzaj oraz zaawansowanie uszkodzeń konstrukcji nawierzchni
- Rozległość degradacji nawierzchni
- Obecność smoły węglowej
- Lokalizacja infrastruktury podziemnej/wgłębnej w konstrukcji nawierzchni
- Stan istniejący odwodnienia
- Rodzaj i stan istniejący pobocza

Projekt badawczy *Zrównoważone utrzymanie dróg z zastosowaniem technik recyklingu na zimno*, (SMART -Sustainable Maintenance of Roads Using Cold Recycling Techniques) zaowocował wydaniem nowych specyfikacji, dla technik na miejscu i w wytwórni. W kilkunastu miejscach wybudowano odcinki badawcze, poddane monitoringowi w czasie i po zakończeniu budowy. Rezultaty zostały opisane w *Przewodniku stosowania i specyfikacjach dla recyklingu na zimno nawierzchni drogowych*. [24]. Specyfikacja Robót Drogowych [26] zawiera wymagania dla stosowania recyklingu na zimno w wytwórniach. Dotyczy on nie tylko warstw asfaltowych, ale i innych materiałów pochodzących z rozbiórki nawierzchni. Do recyklingu na zimno wyodrębniano wśród nich cztery grupy tzw. materiałów CRBM (Ex Situ Cold Recycled Bound Material), które przedstawiono w tablicy 3.10 [22].

Tablica 3.10. Materiały używane do recyklingu na zimno w Wielkiej Brytanii [26]

Typ materiału	Symbol	Główne lepiszcze/spoiwo	Uwagi
Szybkie Hydrauliczne	QH	Cement Portlandzki	Wykluczone lepiszcza bitumiczne
Powolne Hydrauliczne	SH	Spoiva hydrauliczne np. popioły lotne z wapnem	Wykluczone lepiszcza bitumiczne i cement portlandzki
Szybkie Lepkosprężyste	QVE	Lepiszczce bitumiczne	Dopuszczony cement portlandzki
Powolne Lepkosprężyste	SVE	Lepiszczce bitumiczne	Wykluczony cement portlandzki

Po upływie 360 dni od wykonania, recyklowana nawierzchnia, musi spełnić Wymagania Projektu mieszanki i Własności końcowych (End Product Requirements). Określają one minimalną sztywność MMA, w zależności od klasy podbudowy, klasy drogi oraz obciążenia ruchem [26] (tablica 3.11).

Tab.3.11.Wymagania końcowe dla mieszanek recyklowanych  
na zimno w Wielkiej Brytanii [26]

Klasa	Moduł sztywności sprężystej [MPa]
B1	1900
B2	2500
B3	3100
B4	4700

#### **4. Podsumowanie**

Z przedstawionych w pierwszej części pracy studiów wynika, że:

1. Wprowadzenie w Polsce do stosowania norm serii PN-EN wymaga dostosowania wymagań materiałowych dla mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych do tych norm. Nie będzie to łatwe, ponieważ niektórych materiałów nie obejmują normy serii PN-EN lub obejmują je pod innym kątem niż wymagane dla mieszanek z recyklingu.
2. Doświadczenia innych krajów pokazują, że określenie wymagań dla mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych wymaga szerszego spojrzenia, ponieważ wpływ na nie mają liczne czynniki, nie zawsze brane pod uwagę w Polsce.
3. W większości krajów do oceny zaprojektowanych mieszanek z recyklingu wykorzystuje się miary sztywności takie jak wytrzymałość na pośrednie rozciąganie oraz moduł sztywności, ponadto często bada się wrażliwość na działanie wody.

Przedstawione studia pokazały, że nie ma jednego podejścia do recyklingu na zimno i do projektowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych. Weryfikacja polskich przepisów wymaga dużej ostrożności i racjonalnego podejścia aby powstały wymagania z jednej strony we właściwy sposób opisujące mieszanki z recyklingu a z drugiej strony aby były przyjazne dla użytkownika i nie zawierały budzących wątpliwości i niejasności zapisów.

**Literatura:**

1. Zawadzkie J., Matras J.: „Warunki techniczne wykonania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo emulsyjnej metodą recyklingu na miejscu”, IBDiM, Zeszyt 53, Warszawa 1997.
2. Zawadzkie J., Matras J., Mechowski T., Sybilski D.: „Warunków technicznych wykonania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo emulsyjnej (MCE)” IBDiM, Zeszyt 61, Warszawa 1999.
3. 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