

Warsaw, 22 - 23 October 2025

II MIĘDZYNARODOWA KONFERENCJA

Nowoczesne nawierzchnie drogowe - recykling i dekarbonizacja

II INTERNATIONAL CONFERENCE

Modern road pavements - recycling and decarbonization

**Ograniczanie spękań mieszanek
MCE stosowanych w warstwach podbudowy**

dr inż. Łukasz Skotnicki

dr inż. Jarosław Kuźniewski

Politechnika Wrocławska, Katedra Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk

Laboratorium Badawcze Obiektów Infrastruktury Transportowej (LBOIT)

grunty



kruszywa



asfalty



metody nieniszczące



betony



mieszanki mineralno-asfaltowe



destrukty



Ograniczanie spękań mieszanek MCE stosowanych w warstwach podbudowy

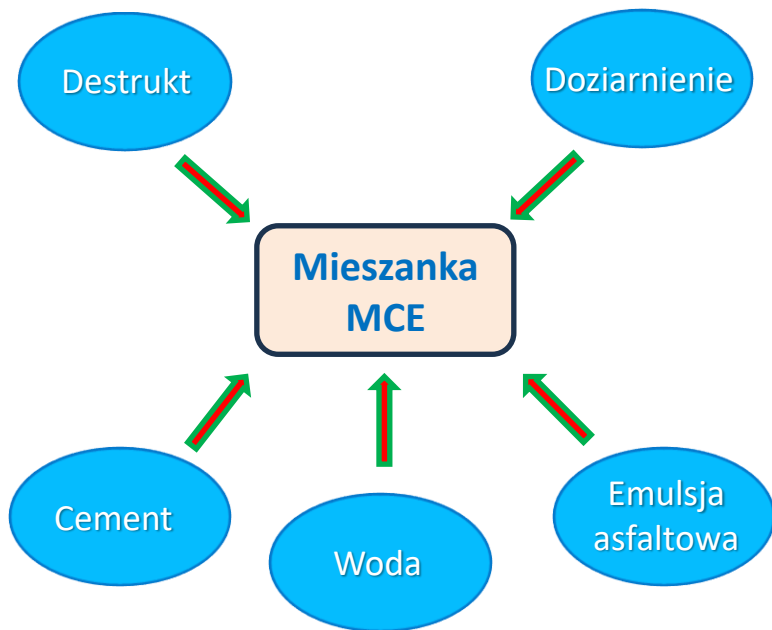
- Recykling nawierzchni drogowych - wymierne efekty środowiskowe i ekonomiczne.
- Ograniczanie zużycia surowców naturalnych i zmniejszanie ilości odpadów.
- Powtórne wykorzystanie materiałów wbudowanych w istniejące nawierzchnie drogowe.
- Jednym ze sposobów utylizacji odpadów budowlanych jest zastosowanie w nawierzchniach drogowych mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE).

Destrukt
asfaltowy



Kruszywo z
recyklingu

Skład mieszanki MCE



- **Mieszanki MCE** składają się z destruktu lub destruktu i kruszywa mineralnego (doziarniającego), wymieszanego na zimno z cementem i emulsją asfaltową w określonych proporcjach, w warunkach optymalnej wilgotności.



Ograniczanie spękań mieszanek MCE stosowanych w warstwach podbudowy

- W mieszankach zastosowano innowacyjne spoiwa drogowe oparte na ubocznych cementowych produktach pylastych (UCPP).
- W przeprowadzonych badaniach wykazano znaczący wpływ spoiw UCPP na właściwości mechaniczne recyklowanych mieszanek MCE.
- Analizy prowadzą do szczegółowego rozpoznania problemu dotyczącego efektywnego stosowania mieszanek MCE z destruktem asfaltowym w konstrukcji nawierzchni drogowych.

Oznaczenie spoiw	Składniki spoiwa [-]		
	Cement	Wapno	UCPP
1V	0.20	0.20	0.60
2V	0.20	0.60	0.20
3V	0.60	0.20	0.20
4C	0.20	0.40	0.40
5C	0.40	0.20	0.40
6C	0.40	0.40	0.20
7C	0.33	0.33	0.33
Ref	1	0	0

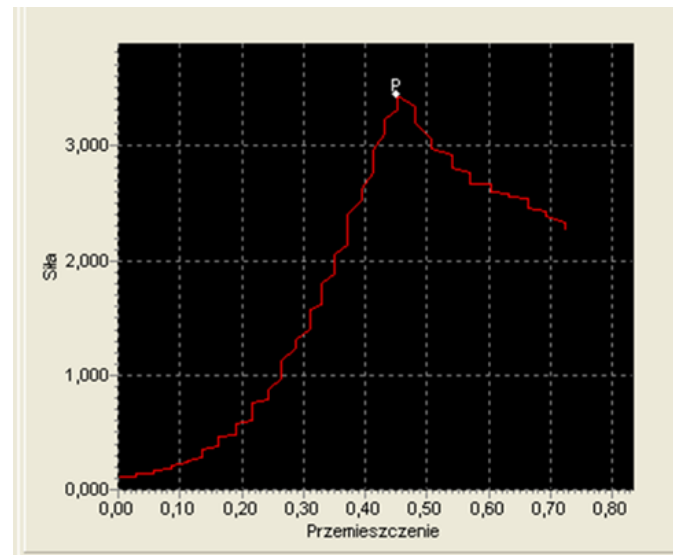
- Istota badań: ocena wpływu innowacyjnego środka wiążącego UCPP na właściwości mechaniczne mieszanek MCE zawierających w swym składzie materiał recyklowany (RAP).
- Spoiwa UCPP mogą ograniczyć sztywność otrzymanego konglomeratu, co wpłynie na zmniejszenie spękań temperaturowych w warstwach podbudowy nawierzchni drogowych.
- Analizowano propagację spękań w badaniach metodą SCB oraz UTST.

Składniki mieszanki	Mieszanka mineralna	Mieszanka mineralno-cementowo-emulsyjna (Ref)
	[%]	[%]
0/10 kruszywo z recyklingu (destrukta asfaltowy 10 RA 0/8 mm)	40	34.40
0/31.5 kruszywo naturalne doziarniające o ciągłym uziarnieniu - melafir	50	43.00
0/2 kruszywo naturalne doziarniające o ciągłym uziarnieniu - piasek	10	8.60
Spoivo	-	3.00
Emulsja asfaltowa C60B10ZM/R	-	5.00
Woda	-	6.00

- Analizy odporności na spękania metodą SCB wg PN-EN 12697-44



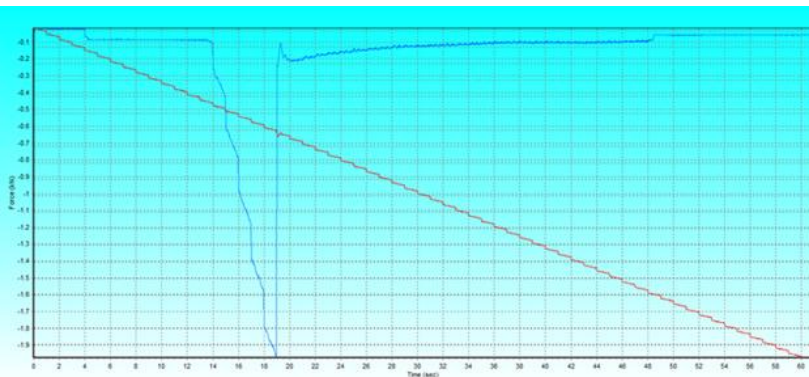
$$\varepsilon_{\max} = \frac{\Delta W_i}{W_i} \cdot 100\% \quad \sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{D_i \cdot t_i} \quad K_{Ic} = \sigma_{\max} \cdot \sqrt{\pi \cdot a_i} \cdot Y_1$$



- Analizy odporności na spękania skurczowe i termiczne metodą UTST wg PN-EN 12697-46

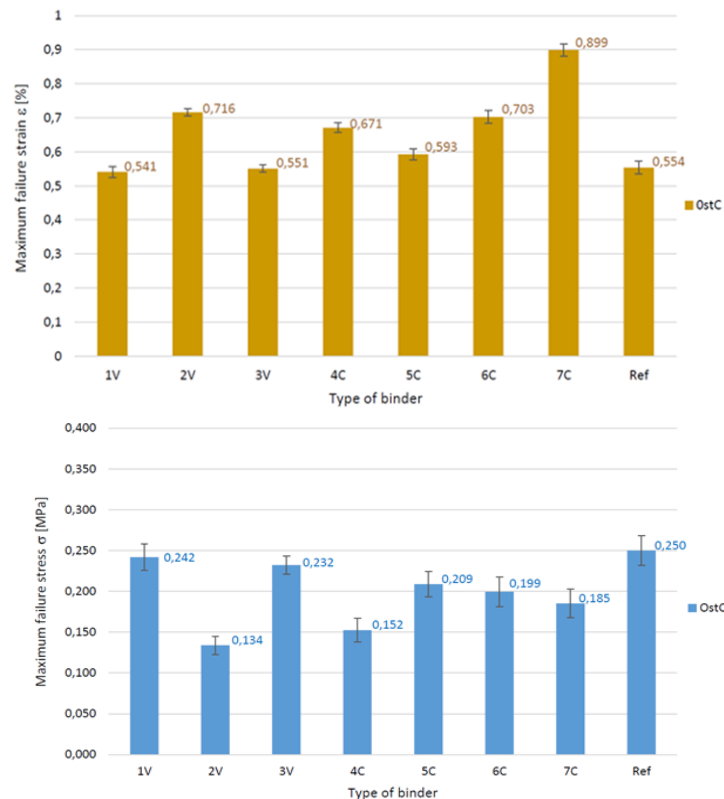
$$\varepsilon_{failure} = \frac{\varepsilon_{max i}}{L_i} \cdot 100\%$$

$$\beta_i = \frac{F_{max}}{a_i \cdot b_i}$$



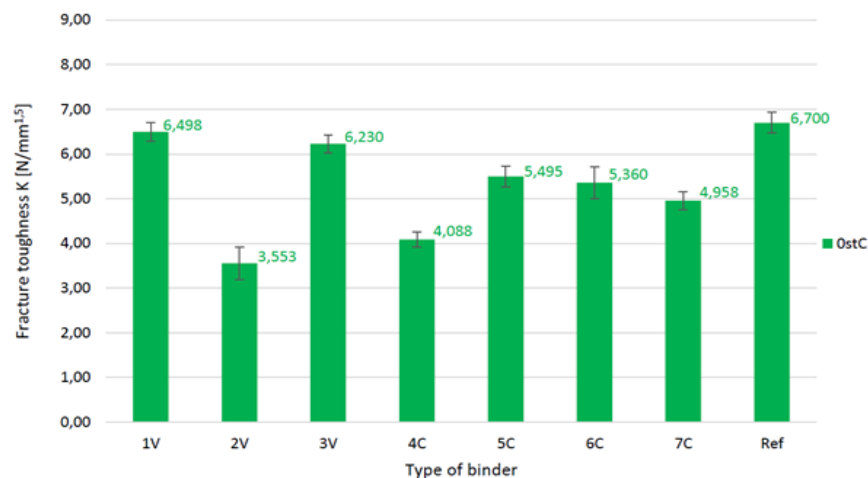
Wyniki badania odporności na spękania metodą SCB

- Zastosowanie spoiw w miejsce standardowego cementu, wpływało na analizowane cechy materiałowe.
- Naprężenia spadały szczególnie dla spoiw 2V, 4C oraz 5C, 6C i 7C.
- Nastąpiło zwiększenie odkształcenia niszczącego dla próbek, szczególnie dla 7C – może to korzystnie wpłynąć na odporność mieszanek MCE na spękania i ograniczyć ich propagację w warstwach podbudowy nawierzchni drogowych.



Wyniki badania odporności na spękania metodą SCB

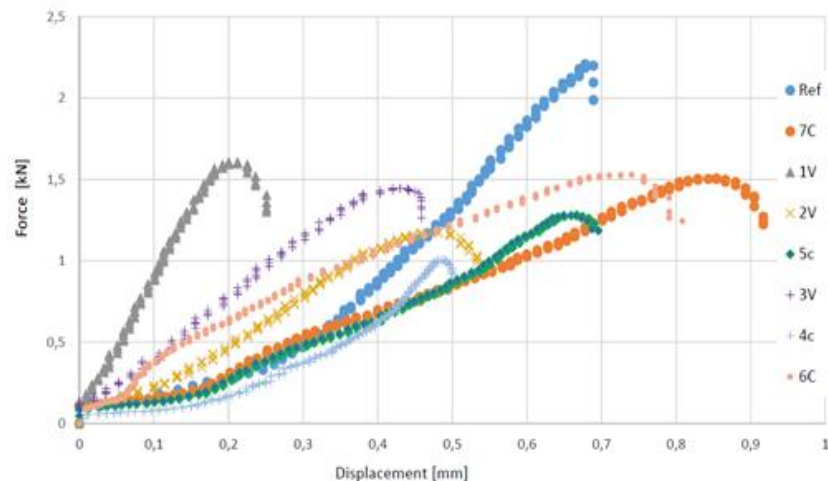
- Współczynnik odporności na pękanie K_{Ic} dla większości mieszanek przyjmuje zbliżone wartości.
- Jedynie mieszanki 2V i 4C charakteryzują się niższymi wartościami – może to sugerować mniejszą odporność tych mieszanek na kruche pękanie oraz gorsze ich zachowanie pod wpływem naprężeń.



Wyniki badania odporności na spękania metodą SCB

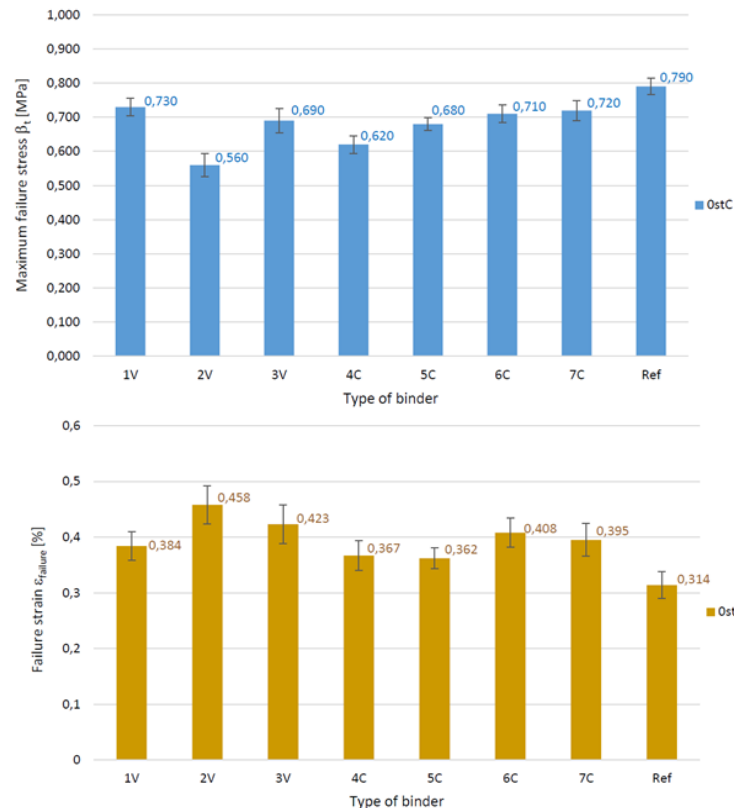
- Analizy prędkości przyrostu odkształceń w badaniach SCB wykazały pozytywny wpływ na ograniczanie spękań.
- Dla mieszanek 6C i 7C redukcja wartości siły niszczącej przy jednoczesnym zwiększeniu przemieszczenia w momencie zniszczenia.
- Dla mieszanki 5C spadek wartości siły niszczącej przy zachowaniu porównywalnego przemieszczenia w momencie zniszczenia jak dla mieszanki Ref.

Zastosowanie spoiw UCPP pozwoliło również na redukcję prędkości narastania naprężeń (kąt nachylenia) w stosunku do mieszanki z klasycznym cementem, za wyjątkiem mieszanki 1V



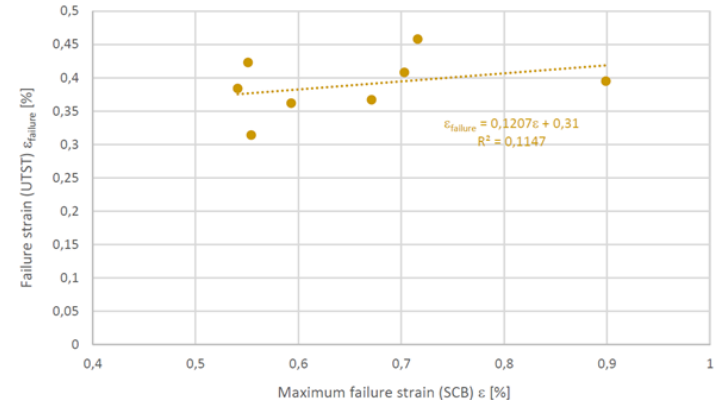
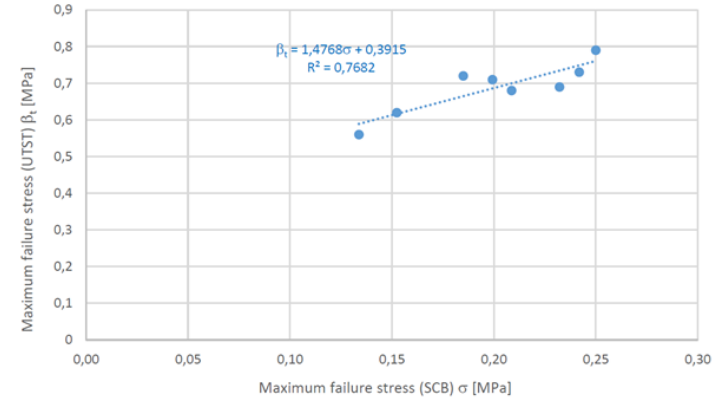
Wyniki badania odporności na spękania skurczowe i termiczne metodą UTST

- Zastosowanie spoiwa UCPP pozwoliło na ograniczenie naprężeń w stosunku do mieszanek referencyjnych – ograniczenie pojawienia się spękań w mieszankach.
- Najniższe naprężenia 2V i 4C (te mieszanki mają zbyt niską sztywność (inne badania)).
- Spoiwa 6C i 7C korzystny efekt w połączeniu ze sztywnością.
- Spoiwa UCPP wpłynęły na zwiększenie maksymalnego odkształcenia niszczącego – zdolność do lepszego przenoszenia obciążeń.



Analiza porównawcza naprężeń niszczących oraz odkształceń przy zniszczeniu – SCB, UTST

- Współczynnik determinacji R^2 dla zależności naprężeń wynosił 0,77.
- Współczynnik determinacji R^2 dla zależności odkształceń wynosił 0,11, gdyż rozrzuty w wynikach dochodziły do 50% - odmienny schemat obciążania próbek i ich pracy podczas zniszczenia.
- Porównania naprężeń niszczących wskazują na dobre właściwości materiałowe oraz na jednorodność mieszanek MCE ze spoiwem UCPP w różnych metodach badawczych.



Wnioski

- Zastosowanie pyłów UCPP wpływa na właściwości odkształceniowe i wytrzymałościowe mieszanek MCE.
- Zastosowanie w warstwach podbudowy mieszanek MCE z zawartością do 40% destruktu asfaltowego wagowo pozwoli na efektywną implementację technologii recyklingu.
- W konstrukcjach warstw podbudowy nawierzchni drogowych możliwe jest zastosowanie mieszanek typu MCE zawierających w swym składzie spoiwo UCPP, zastępujące klasyczny cement.
- W porównaniu do mieszanek opartych na klasycznym cemencie zaobserwowano w mieszankach z zawartością UCPP spadek naprężeń niszczących przy jednoczesnym wzroście odkształcenia w momencie zniszczenia materiału dla mieszanek.

Wnioski – cd.

- Przeprowadzone badania i analizy wskazują na pozytywny wpływ dodatków UCPP na odporność mieszanek MCE na spękania w niskich temperaturach.
- Zastosowanie spoiw na bazie UCPP w zamian klasycznego cementu pozwoli na redukcję sztywności podbudowy drogowej i ograniczenie spękań. Zwiększy to jednocześnie trwałość całej konstrukcji nawierzchni drogowej.
- Zależność wzajemna naprężeń niszczących otrzymanych w metodach SCB i UTST zachowuje charakter liniowy i wskazuje na jednorodność mieszanek MCE zawierających spoiwo UCPP.
- W badaniu SCB analiza prędkości przyrostu odkształceń wykazała pozytywny wpływ na ograniczanie spękań i ich przyrostu.

Wnioski – cd.

- Użycie spoiwa UCPP w mieszankach MCE spowodowało redukcję siły przy zwiększeniu przemieszczeń a także redukcję prędkości narastania naprężeń, co doprowadziło do odłożenia w czasie zjawiska pęknięcia.
- Dodatkową korzyścią będzie utylizacja odpadów po produkcji cementu portlandzkiego a co za tym idzie większa ochrona środowiska naturalnego.
- Wykorzystanie pyłów UCPP w zamian klasycznego cementu do produkcji spoiwa dedykowanego dla mieszanek MCE przyczyni się do dekarbonizacji procesu produkcji mieszanek MCE oraz zwiększy efektywność recyklingu nawierzchni drogowych.

Ograniczanie spękań mieszanek MCE stosowanych w warstwach podbudowy



mrp25.ibdim.edu.pl