



mgr inż. Krzysztof Falkowski

Nawierzchnie z kompozytów cementowych modyfikowanych emulsją bitumiczną



II Wschodnie Forum Drogowe
Suwałki, 15-16.03.2018 r.

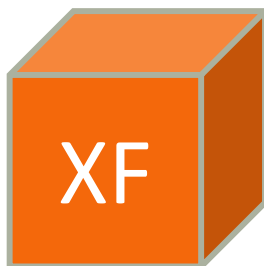
Plan prezentacji

- 1 Problemy z zapewnieniem wymaganej trwałości nawierzchni betonowych w polskich warunkach klimatycznych
- 2 Badania eksperymentalne nad optymalizacją składu betonu nawierzchniowego z zastosowaniem domieszki emulsji bitumicznej w aspekcie podwyższenia trwałości
- 3 Analiza mikrostruktury kompozytów cementowych modyfikowanych emulsją bitumiczną
- 4 Realizacja nawierzchni drogowych i nawierzchni terminala kontenerowego z kompozytów cementowych z emulsją bitumiczną
- 5 Podsumowanie i wnioski

Trwałość konstrukcji jest równie istotna jak jej nośność i funkcjonalność [Eurokod 0:2004]

Korozja betonu

zamrażanie /odmrażanie
XF1÷XF4



XF

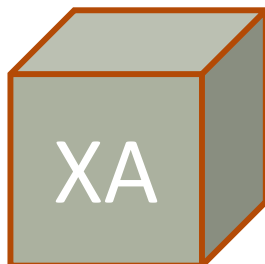
Korozja zbrojenia

chlorki nie pochodzące
z wody morskiej XD1÷XD3

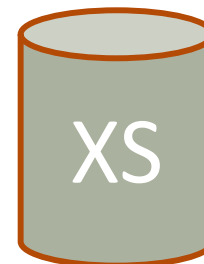


XD

agresja chemiczna
XA1÷XA3



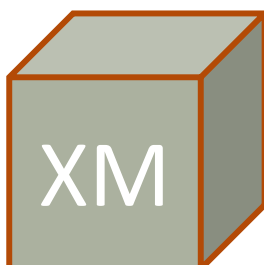
XA



XS

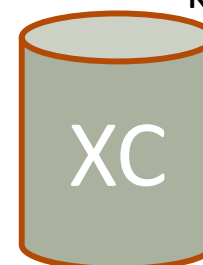
chlorki
z wody morskiej
XS1÷XS3

ścieranie
XM1÷XM3

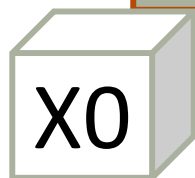


XM

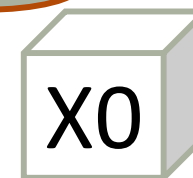
karbonatyzacja
XC1÷XC4



XC



XO



XO

Trwałość
betonu

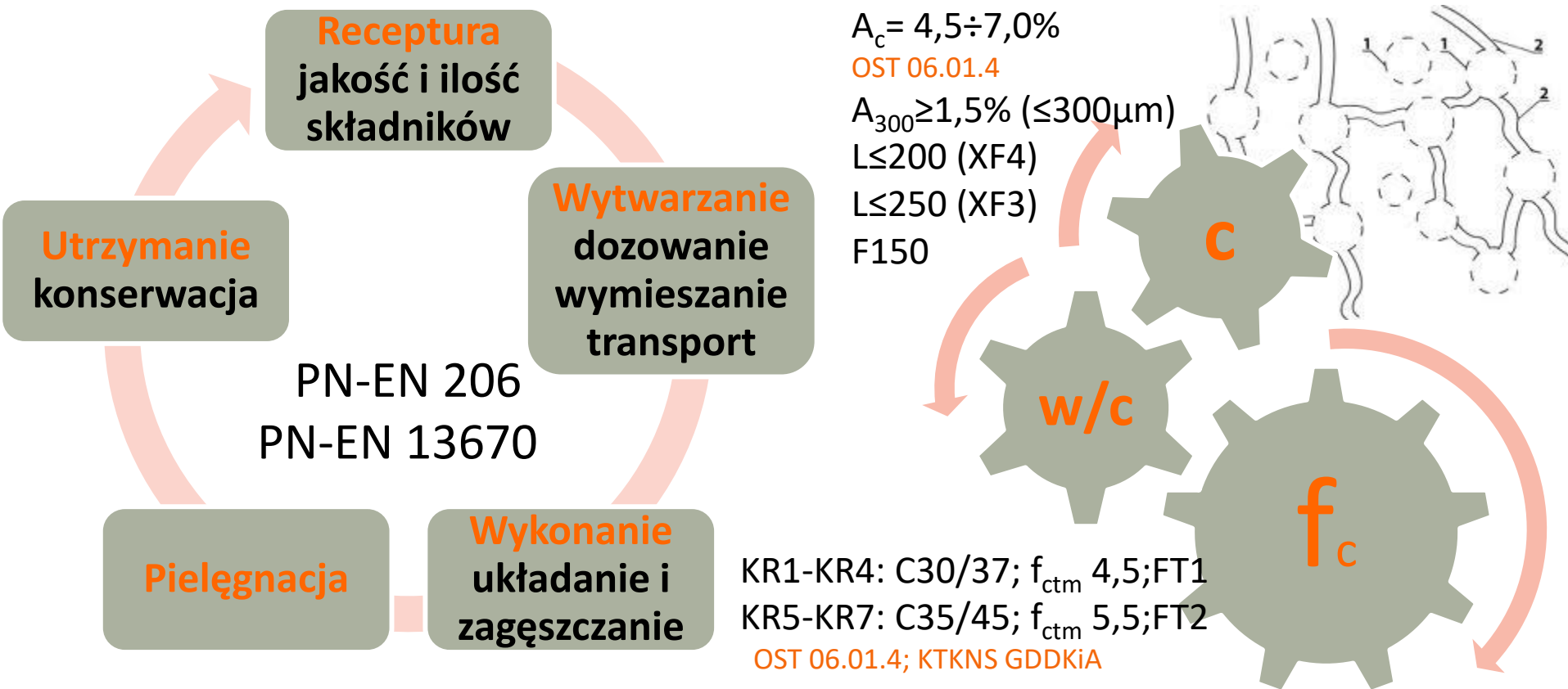
Mikro-
struktura

Składniki
i ich
proporcje

Zagęszczenie
i
pielęgnacja

Trwałość konstrukcji z betonu powinien zapewnić beton odporny na wpływy środowiska
Ten sam beton może być trwały bądź nietrwały w zależności od klasy ekspozycji

Zapewnienie trwałości konstrukcji z betonu w środowisku agresywnym – ujęcie normowe



X	w/c _{max}	f_{cm} min	c_{min} [kg/m ³]	A_{c} min [%]	inne
XF4	0,45	C30/37	340	4,0	kruszywo mrozoodporne
XF3	0,50	C30/37	320	4,0	wg PN-EN 12620

Złuszczenie nawierzchnia z betonu po 2 latach ekspozycji XF4

Zakłady Mleczarskie
MLEKOVITA w Wysokiem
Mazowieckiem



Spełnienie wymienionych w normie [PN-EN 206] zasad powinno być wystarczające, aby konstrukcja przetrwała projektowany okres użytkowania bez dodatkowych napraw.

Jednakże, jak wykazuje praktyka ich spełnienie nie zawsze zapewnia odporność w warunkach rzeczywistych [Flaga 2012, Jasiczak i inni 2014, Czarnecki i inni. 2015].

Ubytki w nawierzchnia z betonu po kilku latach ekspozycji XF4, XA3

Stacja paliw BP przy drodze
krajowej nr 8 w Zabrodziu w
woj. mazowieckim

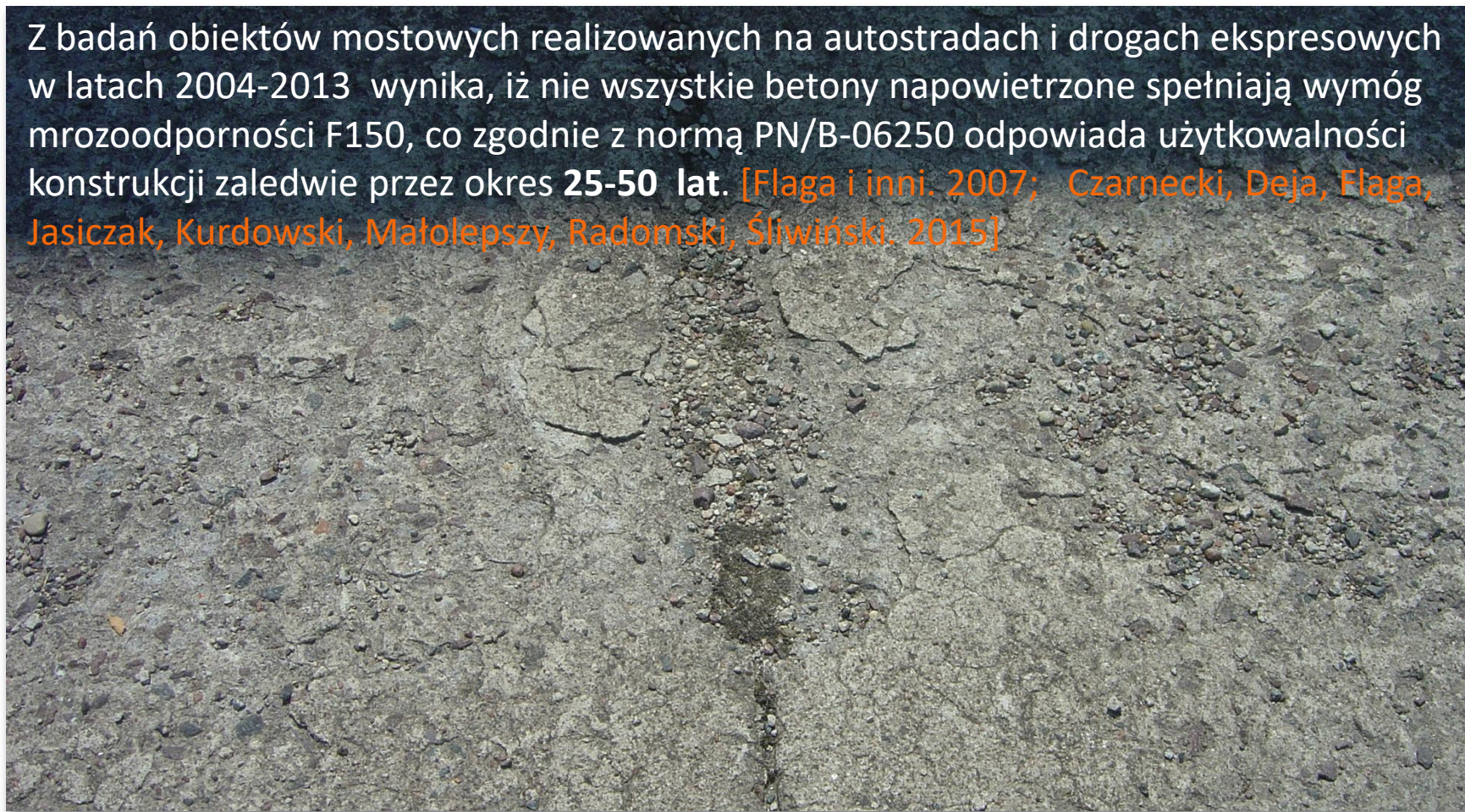


W praktyce uzyskanie właściwego napowietrzenia przysparza wielu problemów [Jowański. 2014] i nie przesądza o jego mrozoodporności [Jasiczak i inni. 2014].

Złuszczenia nawierzchni betonowej po 20 latach ekspozycji XF4

Zakłady „Dolina Łąk” w
Małaszewiczach k. Terespolu

Z badań obiektów mostowych realizowanych na autostradach i drogach ekspresowych w latach 2004-2013 wynika, iż nie wszystkie betony napowietrzone spełniają wymóg mrozoodporności F150, co zgodnie z normą PN/B-06250 odpowiada użytkowości konstrukcji zaledwie przez okres **25-50 lat**. [Flaga i inni. 2007; Czarnecki, Deja, Flaga, Jasiczak, Kurdowski, Małolepszy, Radomski, Śliwiński. 2015]



Nawierzchnia z betonu po roku ekspozycji XF3

Zatoczka w Kleosinie
k.Białegostoku przy drodze
wojewódzkiej 868



Nawierzchnia z betonu po kilkunastu latach ekspozycji XF3

Zakłady PRUSZYŃSKI w
Sokołowie k. Warszawy



Cele przeprowadzonych badań

- ❑ Zapewnienie trwałości betonów cementowych w warunkach oddziaływania środowiska w klasie ekspozycji XF4 i XD3 przez minimum 50 lat;
- ❑ Określenie mechanizmu kształtowania struktury porów betonów cementowych modyfikowanych emulsją bitumiczną
- ❑ Opracowanie i wdrożenie technologii modyfikacji strukturalnej betonów cementowych emulsją bitumiczną;

Rozwój modyfikatorów bitumicznych

Drobno zmielony asfalt
Asfalt drogowy w postaci emulsji

- Chigerowitsch M.I., Korchunowa A.P., Birjuck N.G. **1967**
- Baustoffindustrie. **1974**
- Starczewski M., Małek M. **1974**

Pasta asfaltowa
Pasta asfaltowa + szkło wodne
Zaprawa CONBIT

- Wieczorek G., Bobociński A., Gust J. **1988**
- Wieczorek G., Gust J. **1991**
- Wieczorek G., **1999**

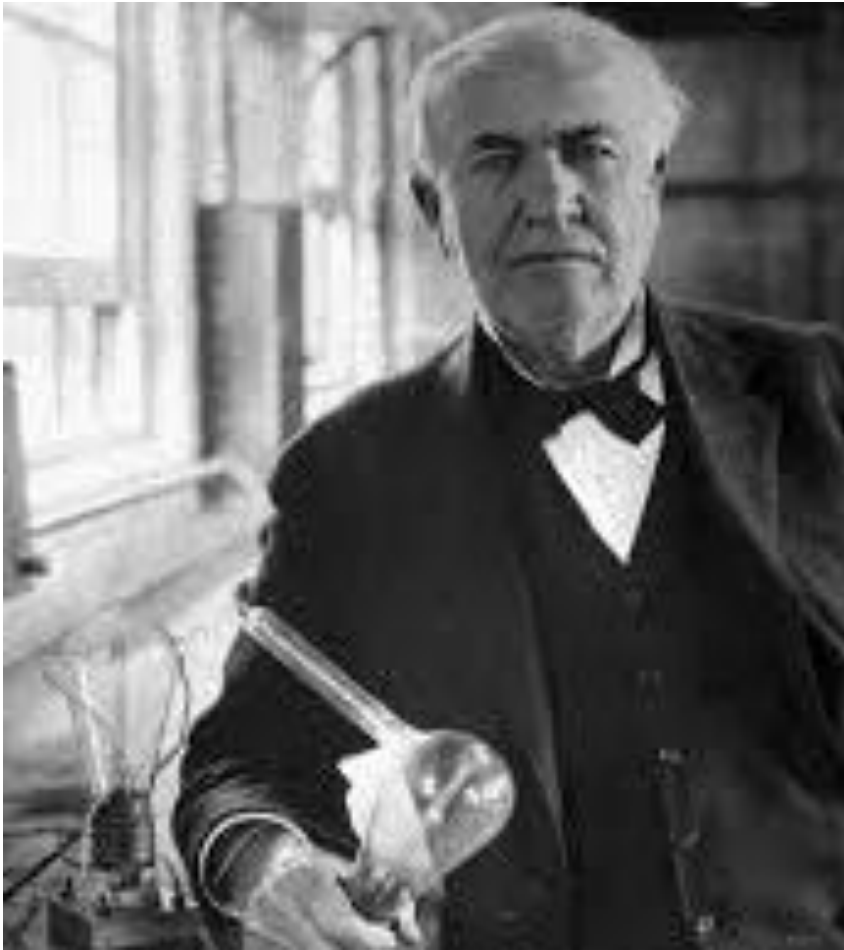
Pasta asfaltowa
Pasta asfaltowa + prasowanie
Pasta asfaltowa/emulsja bitumiczna
+ wibroprasowanie

- **9,5% i 13%, K3, c=450kg** Kosior-Kazberuk M. **2002**
- **5% i 7%, K1÷K3, c=450kg** Wiszniewski J. **2007**
- **2% i 4%, V0, c=500kg** Bołtryk M. i inni **2010**

**Emulsja bitumiczna +
upłynniacze polimerowe
(etry polikarboksylenowe)**

- **0÷4%, S3, c=360kg**
Falkowski K. 2012-2017

Kumulatywny charakter postępu technicznego



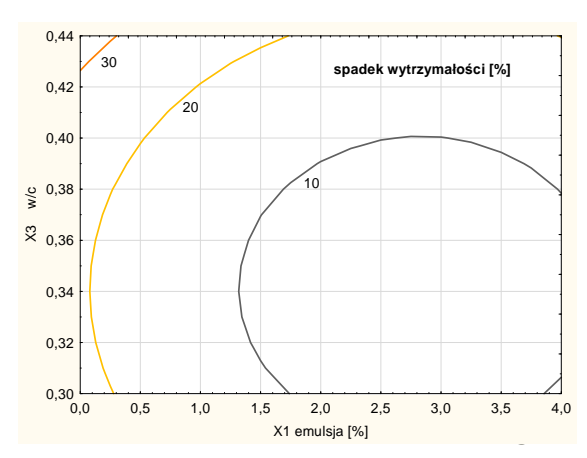
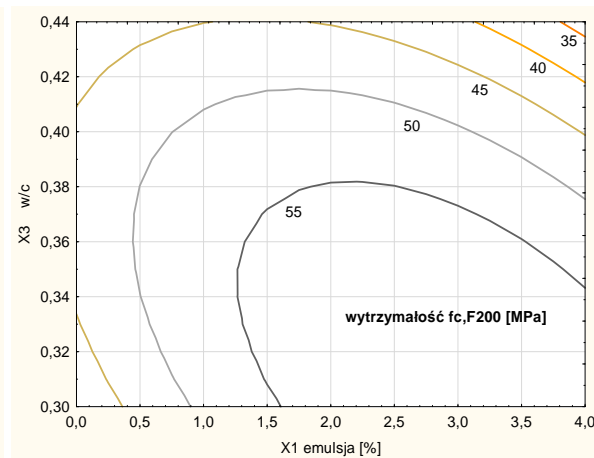
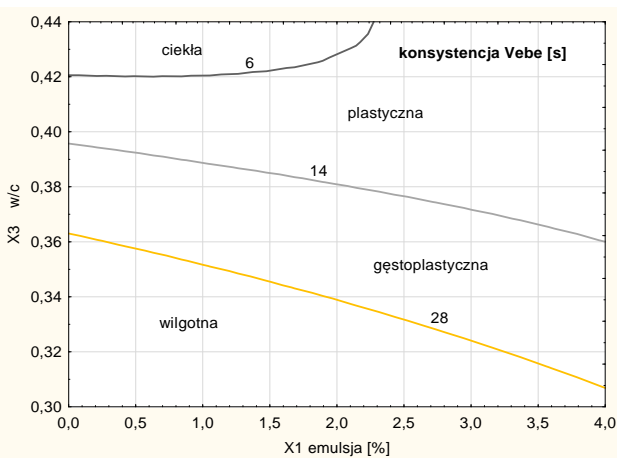
Źródło: Encyklopedia Britannica

„Ponieważ łatwo przyswajam pomysły z różnych źródeł, **często rozpoczynając w miejscach gdzie inni się zniechęcili**, biorąc do ręki nową rzecz zawsze myślę jak ją **ulepszyć**”

Thomas Alva Edison



Badania nad opracowaniem receptur kompozytów cementowych modyfikowanych emulsją bitumiczną do zastosowania w praktyce



Założenia wstępne do badań doświadczalnych

Zastąpienie pasty asfaltowej emulsją bitumiczną umożliwi wytwarzanie mieszanek betonowych z domieszką bitumiczną w istniejących węzłach betoniarskich i prowadzenie badań przemysłowych

Zastosowanie domieszki upłynniającej na bazie eterów polikarboksylenowych pozwoli uzyskać mieszankę zdatną do skutecznego zagęszczenia wibratorem pogrążalnym lub listwą wibracyjną

Zastosowanie dodatkowej frakcji kruszywa 8-16 mm pozwoli na obniżenie punktu piaskowego z 42 do 34%, a w konsekwencji na zmniejszenie ilości cementu z 450÷500 do 360kg/m³

Spełniania wymogu mrozoodporności **F200**, nasiąkliwości $n_w < 4\%$, wodoprzepuszczalności $< 30\text{mm}$ $f_c > 45\text{ MPa}$, $f_{ct,fl} > 5,5\text{ MPa}$ pozwoli zapewnić co najmniej **50 letnią** trwałość konstrukcji z betonu w klasie ekspozycji XF i XD [PN/B-06250]

Obiekt i cel badań stosowanych

- ❑ Obiektem badań były właściwości fizyczne mieszanki betonowej i stwardniałego betonu modyfikowanego domieszką emulsji bitumicznej
- ❑ Celem badań było wyznaczenie funkcji obiektu badania i określenie związków między wszystkimi wielkościami wejściowymi a wielkością wyjściową

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3$$

Uzyskane informacje posłużyły do:

- opracowania optymalnych receptur z uwzględnieniem trwałości w środowisku XF i XD
- wdrożenia kompozytów z emulsją bitumiczną w warunkach przemysłowych.

Wielkości wejściowe i zakres ich zmienności

Kwadraty łacińskie			
Nr	x_1	x_2	x_3
1	$-\alpha$	$-\alpha$	$-\alpha$
2	$-\alpha$	0	0
3	$-\alpha$	$+\alpha$	$+\alpha$
4	0	$-\alpha$	0
5	0	0	$+\alpha$
6	0	$+\alpha$	$-\alpha$
7	$+\alpha$	$-\alpha$	$+\alpha$
8	$+\alpha$	0	$-\alpha$
9	$+\alpha$	$+\alpha$	0

$$\alpha = \sqrt{i} = \sqrt{3} = 1,732$$

0 – centrum planu
 ± 1 - jądro planu
 $\pm \alpha$ – punkty gwiazdne

i – ilość zmiennych wejściowych

Plan Hartleya H_{a_3}			
Nr	x_1	x_2	x_3
1'	-1	-1	+1
2'	+1	-1	-1
3'	-1	+1	-1
4'	+1	+1	+1
5'	$-\alpha$	0	0
6'	$+\alpha$	0	0
7'	0	$-\alpha$	0
8'	0	$+\alpha$	0
9'	0	0	$-\alpha$
10'	0	0	$+\alpha$
11'	0	0	0

Parametry zmienne (wielkości wejściowe)	Kod	Jednostka	Poziomy zmienności				
			-1,732	-1	0	1	+1,732
Zawartość emulsji	x_1	[%]	0,0	0,845	2	3,155	4,0
Zawartość upłynniacza	x_2	[%]	0,0	0,232	0,55	0,868	1,1
Współczynnik w/c	x_3	[-]	0,30	0,33	0,37	0,41	0,44

Wielkości stałe i zakłócające

Do zbioru wielkości **stałych** zaliczono:

- ❑ C_1 - stały rodzaj i ilość cementu, tj. CEM I 42,5 N-SR3/NA 360kg/m³ cement specjalny odporny na siarczan C₃A<3%, o niskiej zawartości alkaliów Na₂O_{eq}<0,6%
- ❑ C_2 - stały rodzaj i proporcje kruszywa: piasek płukany (34%) gryszy granitowe 2-8 (28%) i 8-16 (38%)
- ❑ C_3 - stały rodzaj domieszki upłynniającej na bazie eterów polikarboksylenowych (BASF FM 787)
- ❑ C_4 - stałe warunki przygotowania i dojrzewania betonu

Do zbioru wielkości zakłócających należy zaliczyć:

- ❑ h_1 - niejednorodność struktury betonu
- ❑ h_2 - czynnik ludzki
- ❑ h_3 - niedokładność urządzeń pomiarowych
- ❑ h_4 - próbki nie były przygotowywane jednego dnia

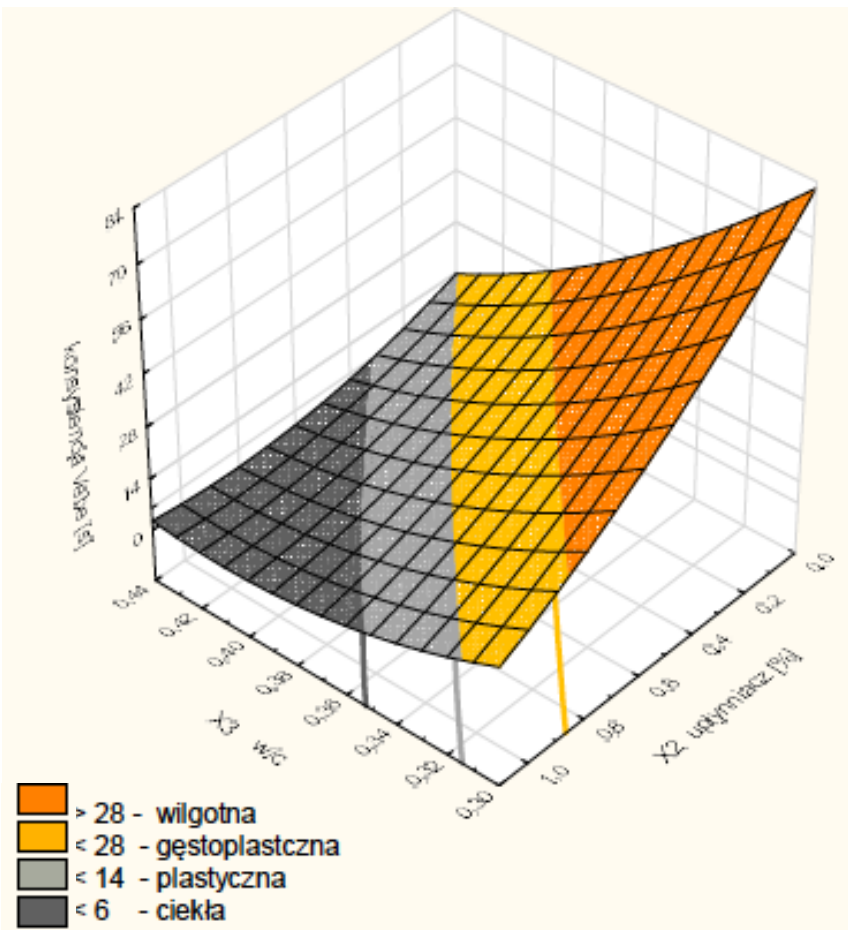
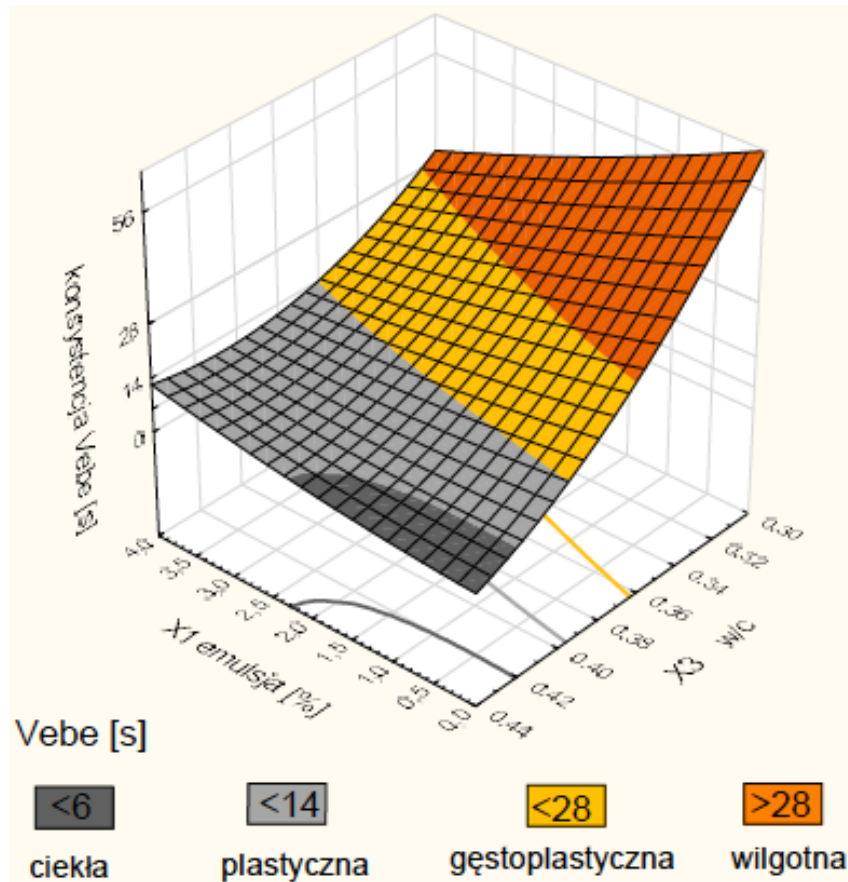
Badane właściwości mieszanki i stwardniałego betonu

Wielkości wyjściowe (zmiennie zależne) w eksperymencie to:

- ❑ y_1 – konsystencja mieszanki Vebe [s]
- ❑ y_2 – gęstość mieszanki D [kg/m³]
- ❑ y_3 – zawartość powietrza w mieszance A_c [%]
- ❑ y_4 – gęstość stwardniałego kompozytu D_c [kg/m³]
- ❑ y_5 – nasiąkliwość wagowa n_w [%]
- ❑ y_6 – wytrzymałość $f_{cm,28}$ [MPa]
- ❑ y_7 - wytrzymałość $f_{cm,120}$ [MPa]
- ❑ y_8 – wytrzymałość $f_{cm,F200}$ [MPa]
- ❑ y_9 – mrozoodporność $\Delta f_{cm, F200}$ [%]

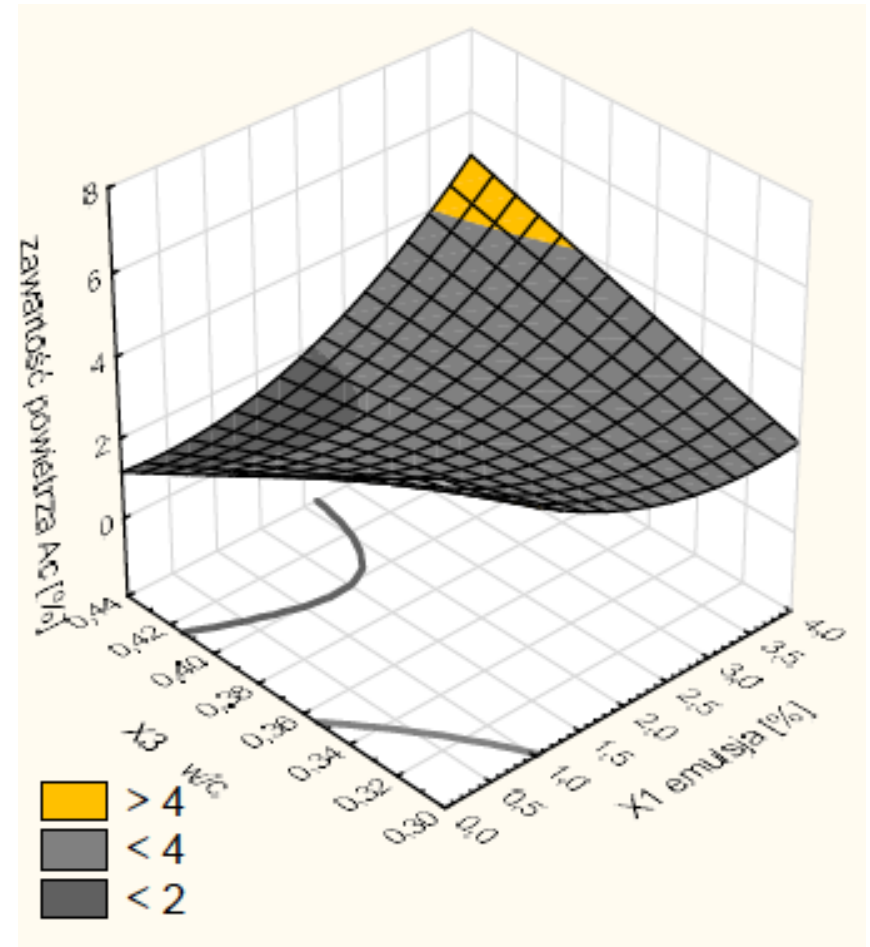
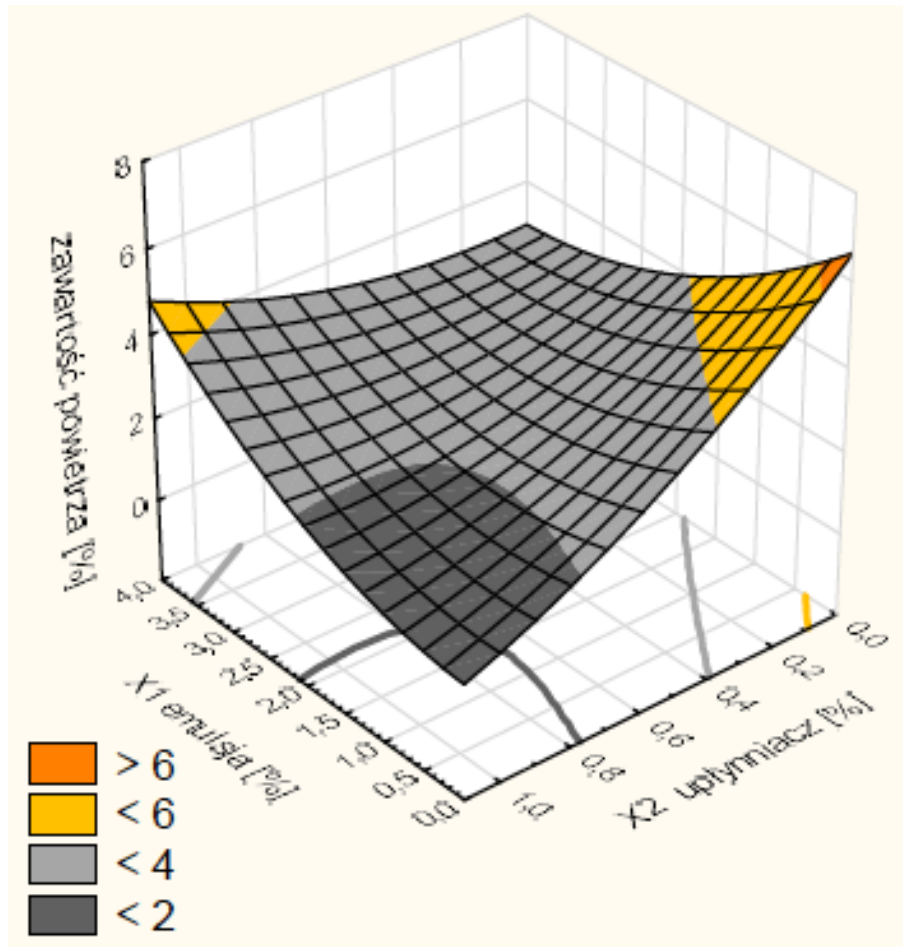
Wielkością optymalizowaną była **mrozoodporność $\Delta f_{cm, F200}$ [%]**

Konsystencja mieszanki Vebe [s]



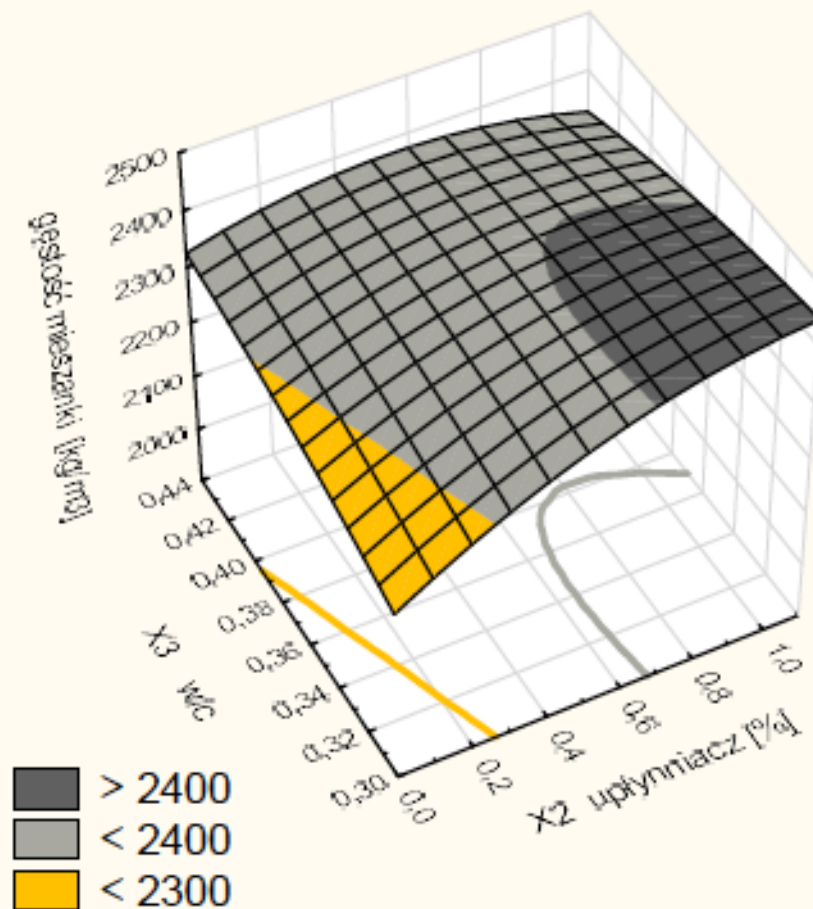
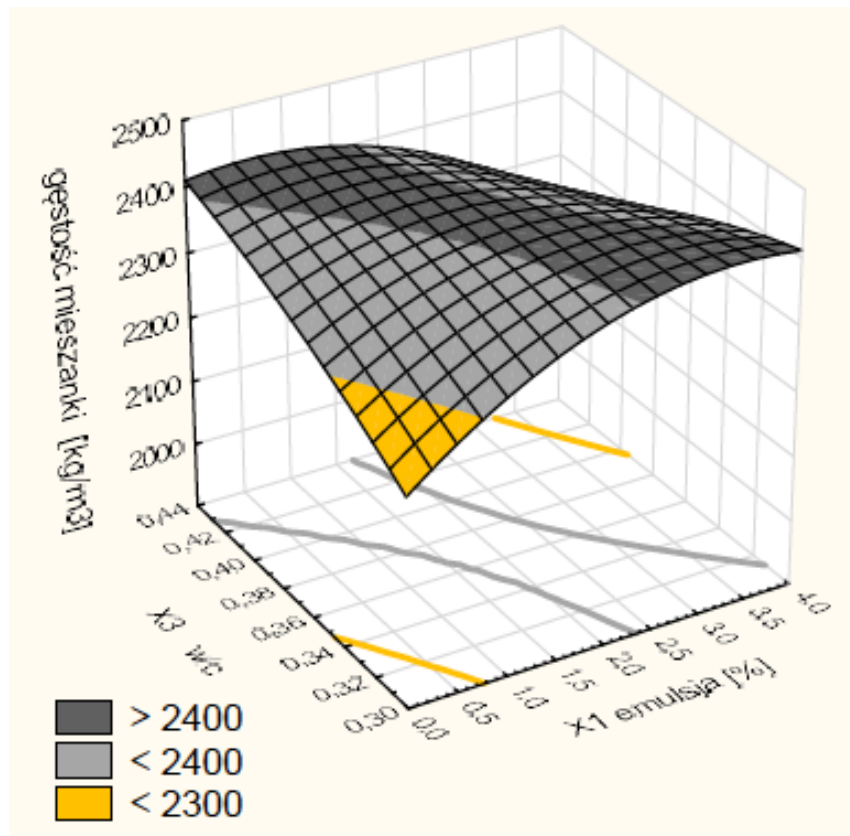
$$y_1 = 442.38 - 9.19x_1 - 199.50x_2 - 1570.82x_3 - 1.67x_1^2 + 13.69x_2^2 + 1253.18x_3^2 - 3.91x_1x_2 + 47.23x_1x_3 + 433.96x_2x_3 \quad R^2 = 0.95$$

Zawartość powietrza w mieszance A_c [%]



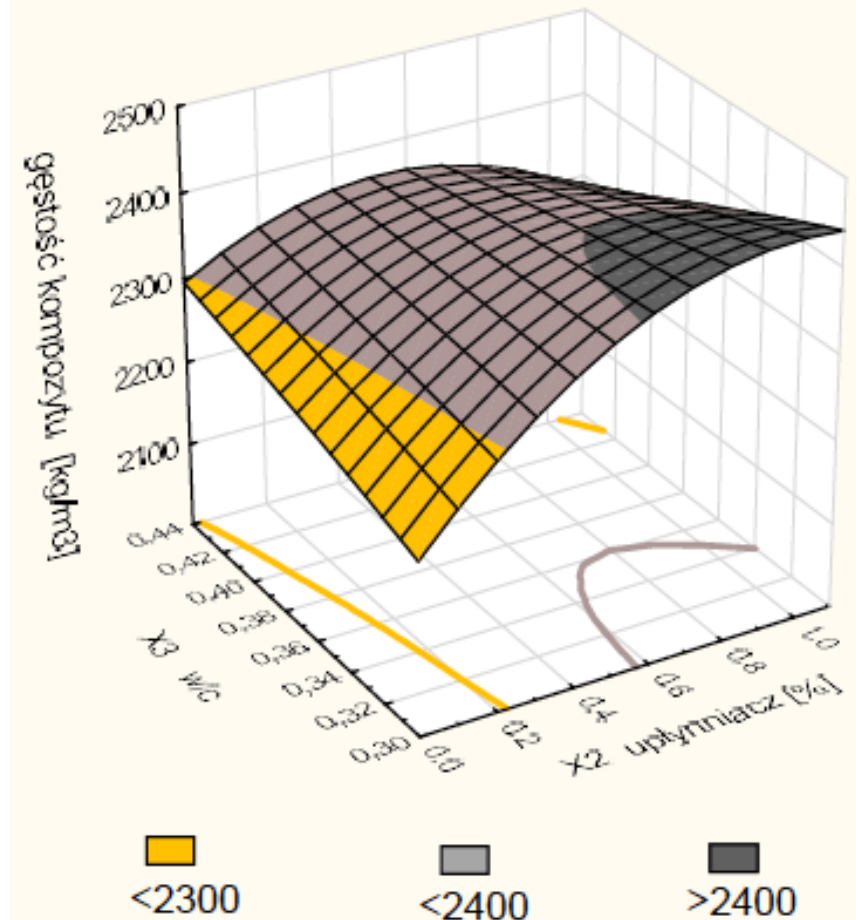
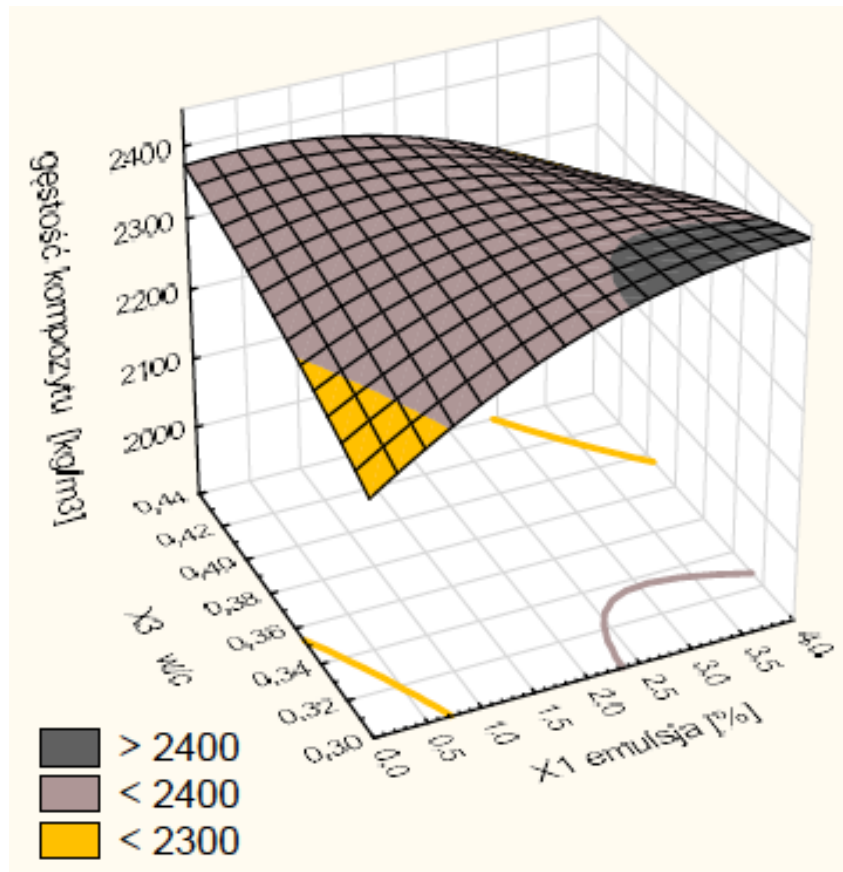
$$y_2 = 31.64 - 4.78x_1 - 11.77x_2 - 114.31x_3 + 0.17x_1^2 + 0.56x_2^2 + 114.48x_3^2 + 1.44x_1x_2 + 9.33x_1x_3 + 19.39x_2x_3 \quad R^2 = 0.92$$

Gęstość mieszanki D [kg/m³]



$$y_3 = 617 + 245x_1 + 973x_2 + 7155x_3 - 7.68x_1^2 - 101x_2^2 - 6975x_3^2 - 35.00x_1x_2 + 538x_1x_3 - 1976x_2x_3 \quad R^2 = 0.90$$

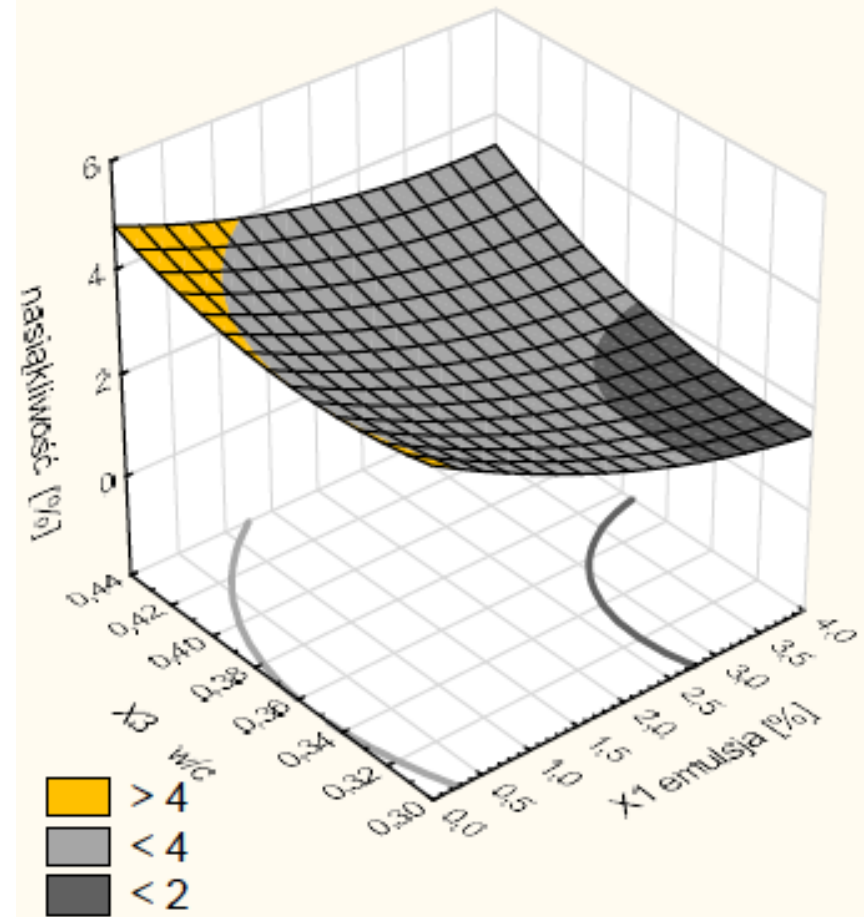
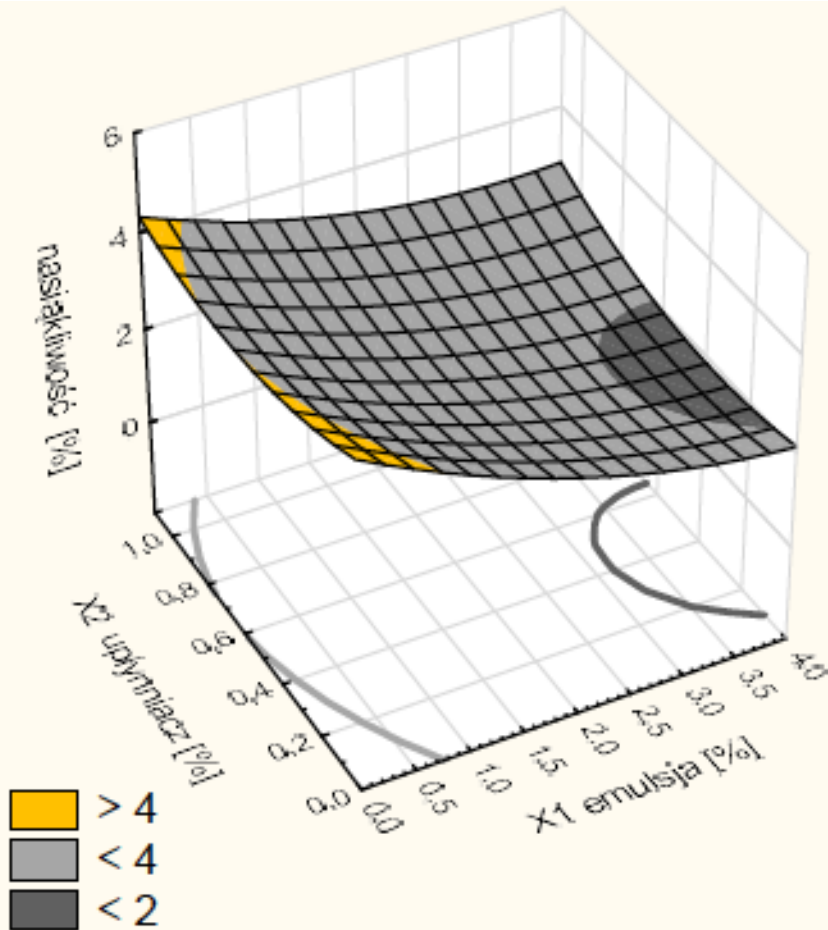
Gęstość objętościowa kompozytu D_c [kg/m³]



$$y_4 = 987 + 195x_1 + 1041x_2 + 5357x_3 - 3x_1^2 - 164x_2^2 - 5097x_3^2 - 34x_1x_2 - 467x_1x_3 - 1962x_2x_3$$

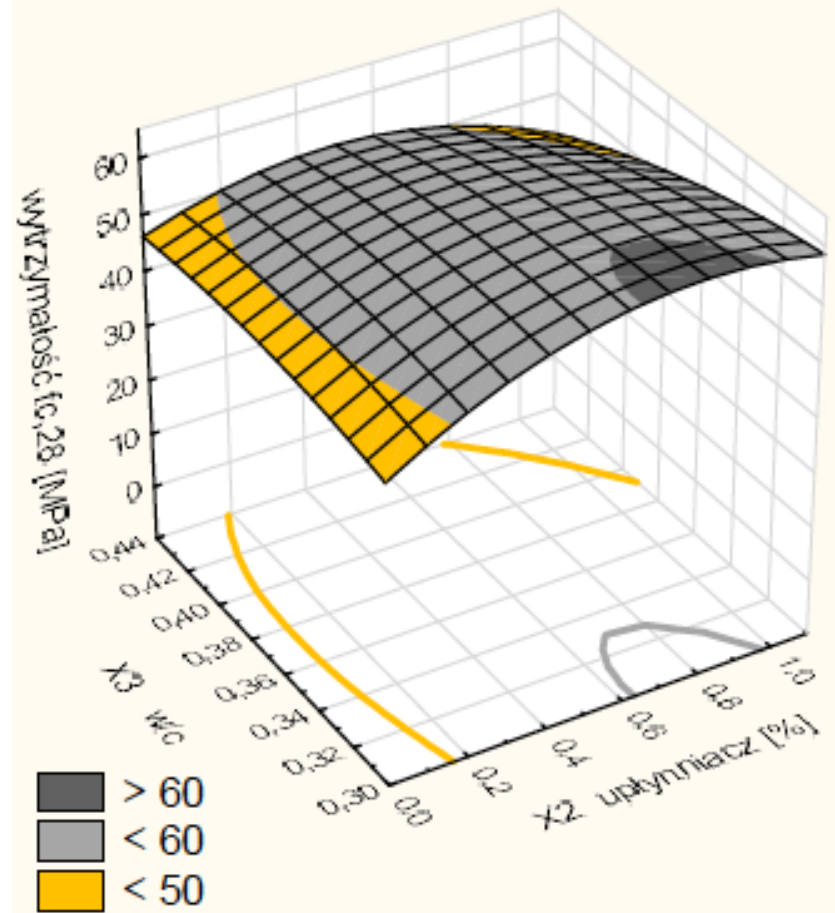
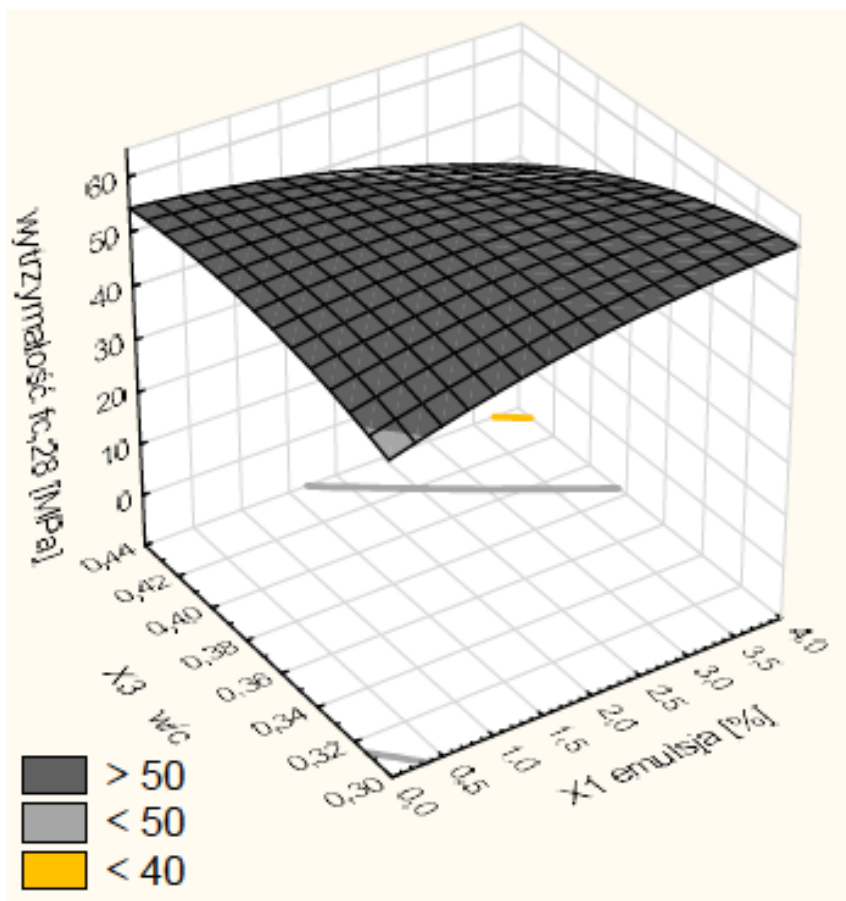
$$R^2 = 0.93$$

Nasiąkliwość masowa kompozytu n_w [%]



$$y_5 = 24.66 - 1.70x_1 - 3.77x_2 - 115.59x_3 + 0.07x_1^2 + 1.02x_2^2 + 165.61x_3^2 + 0.75x_1x_2 + 1.40x_1x_3 + 3.83x_2x_3 \quad R^2 = 0.94$$

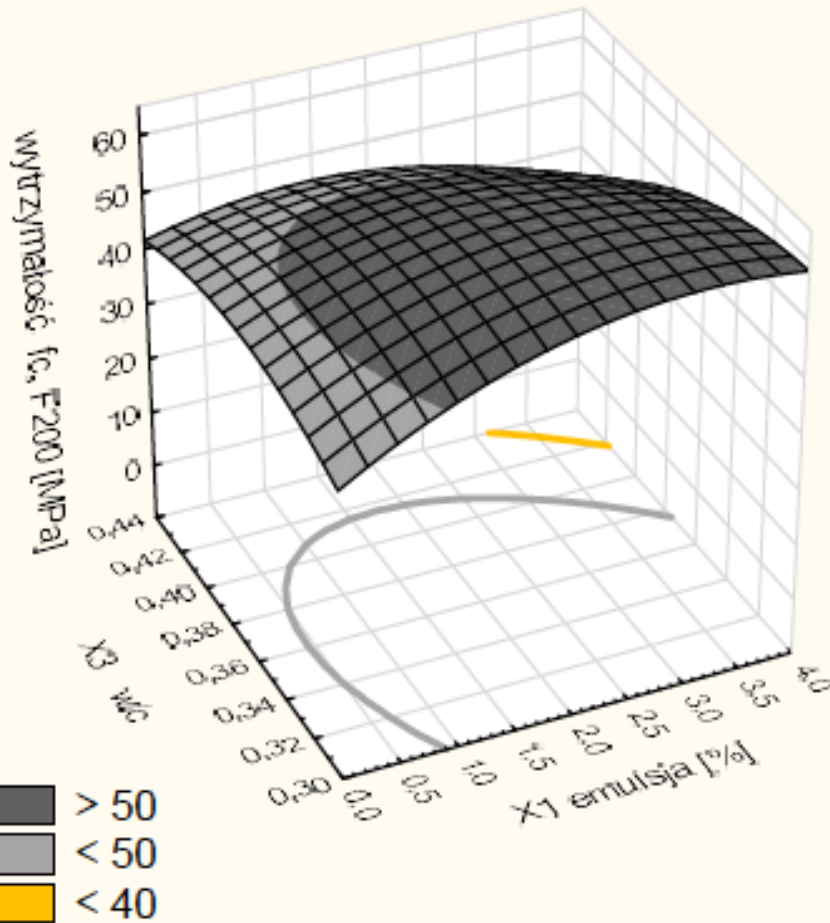
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania $f_{cm,28}$ [MPa]



$$y_6 = -117.73 + 14.19x_1 + 99.86x_2 + 798.42x_3 + 0.27x_1^2 - 20.31x_2^2 - 918.30x_3^2 - 3.24x_1x_2 - 41.50x_1x_3 - 187.18x_2x_3 \quad R^2=0.91$$

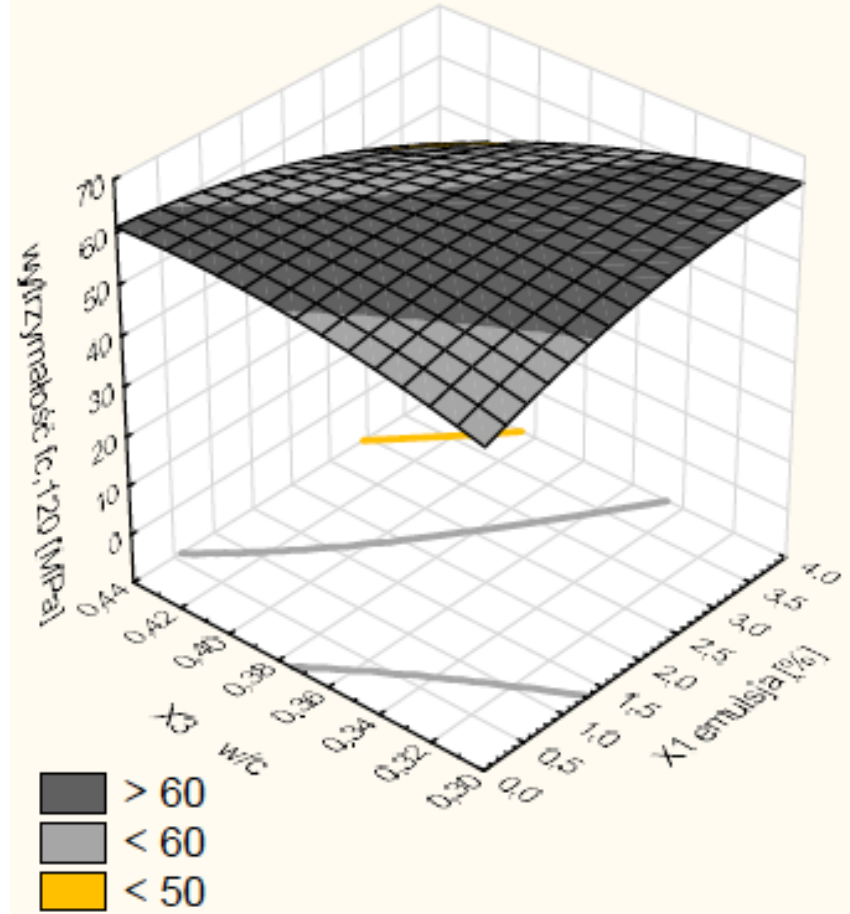
Wytrzymałość na ściskanie

próbek po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania γ_7 [MPa]
oraz próbek porównawczych γ_8 [MPa]



$$\gamma_7 = -144.07 + 19.88x_1 + 98.33x_2 + 921.18x_3 - 0.97x_1^2 - 19.79x_2^2 - 1097.53x_3^2 - 0.38x_1x_2 - 43.22x_1x_3 - 199.40x_2x_3$$

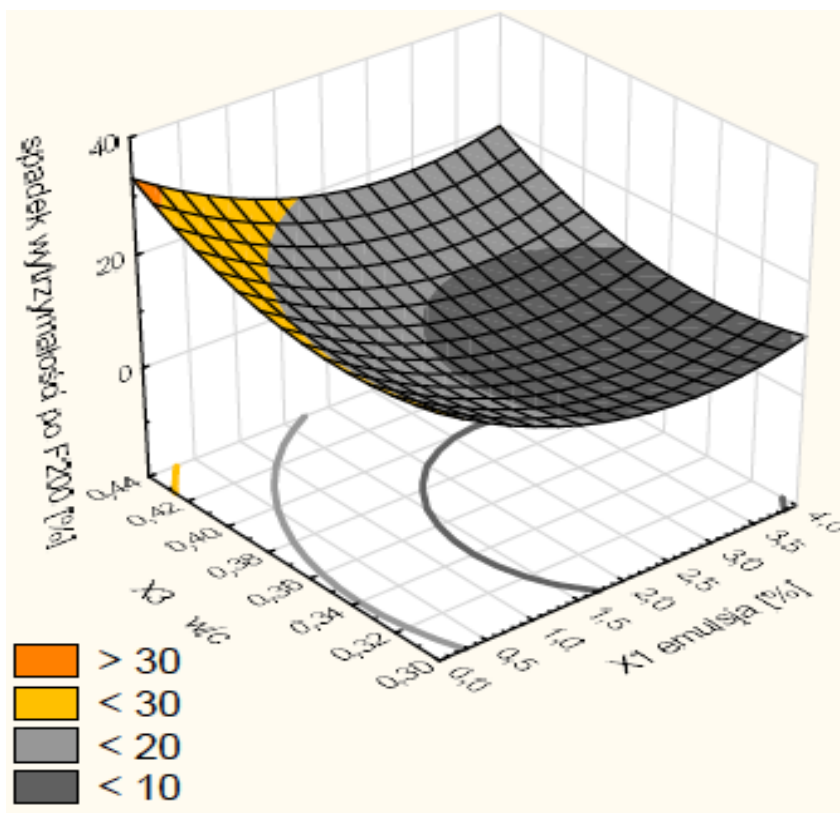
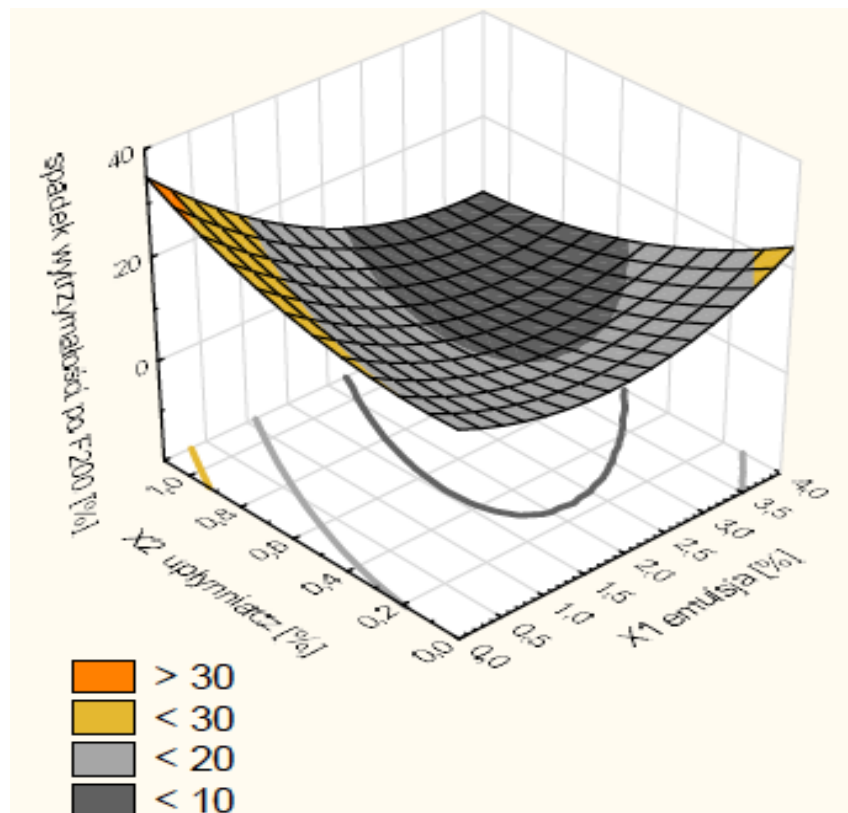
$R^2=0.92$



$$\gamma_8 = -132.07 + 18.20x_1 + 118.64x_2 + 859.19x_3 + 0.22x_1^2 - 16.30x_2^2 - 931.06x_3^2 - 3.97x_1x_2 - 52.16x_1x_3 - 246.53x_2x_3$$

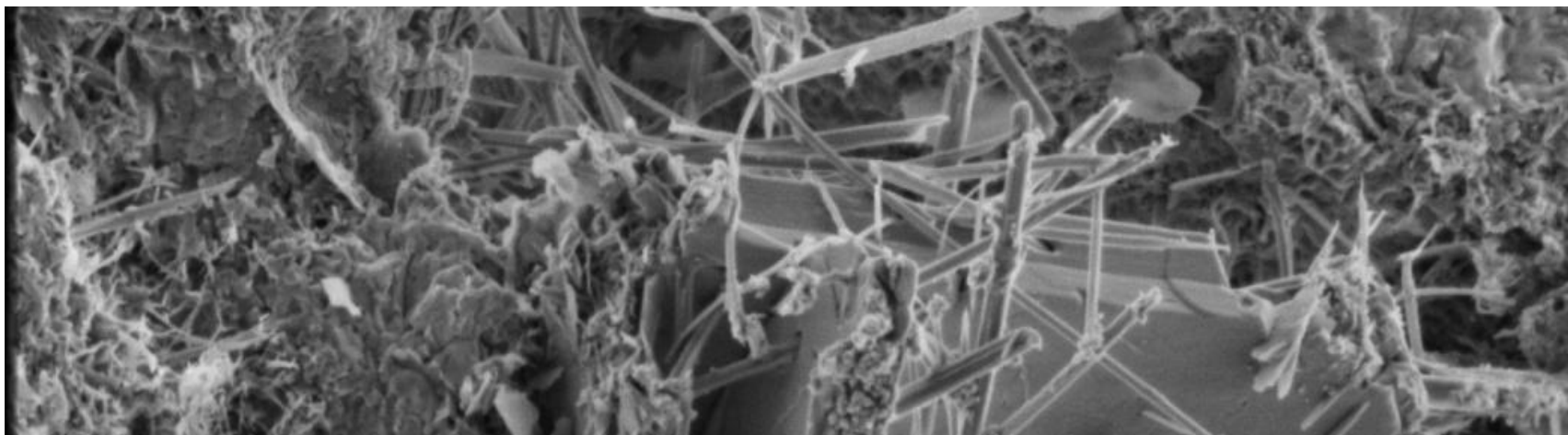
$R^2=0.90$

Optymalizacja spadku wytrzymałości na ściskanie po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania $\Delta f_{cm,F200}$ [%]

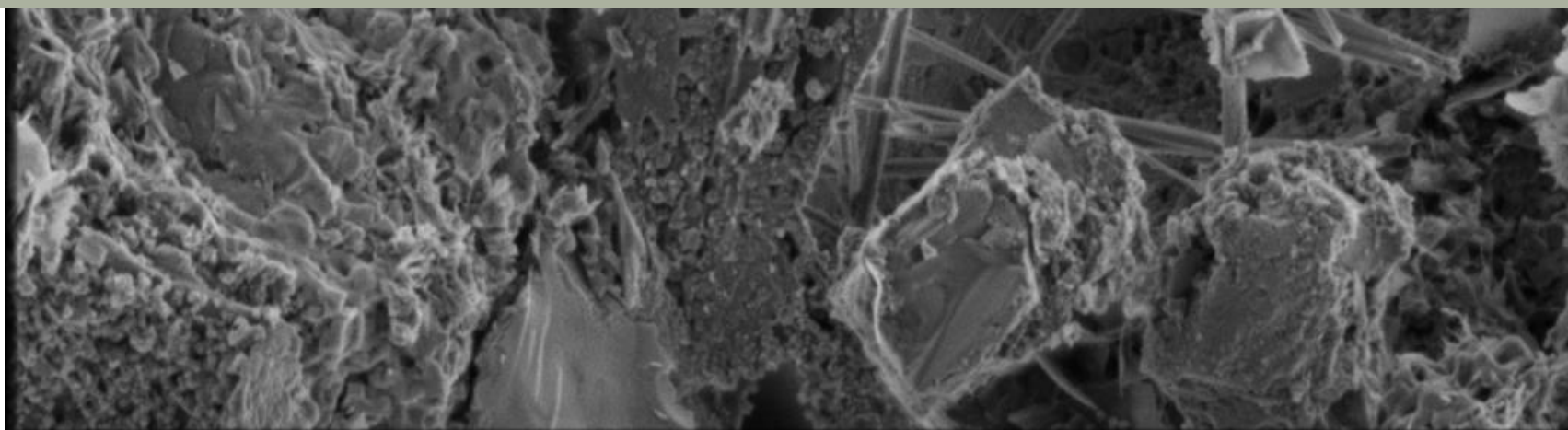


$$y_9 = 93.04 - 7.26x_1 + 1.52x_2 - 448.39x_3 + 1.97x_1^2 + 12.62x_2^2 + 680.17x_3^2 - 5.51x_1x_2 - 2.16x_1x_3 - 16.52x_2x_3 \quad R^2 = 0.88$$

$x_{1,optm}$ emulsja [%]	$x_{2,optm}$ upłynniacz [%]	$x_{3,optm}$ w/c [-]
3,25	0,88	0,35

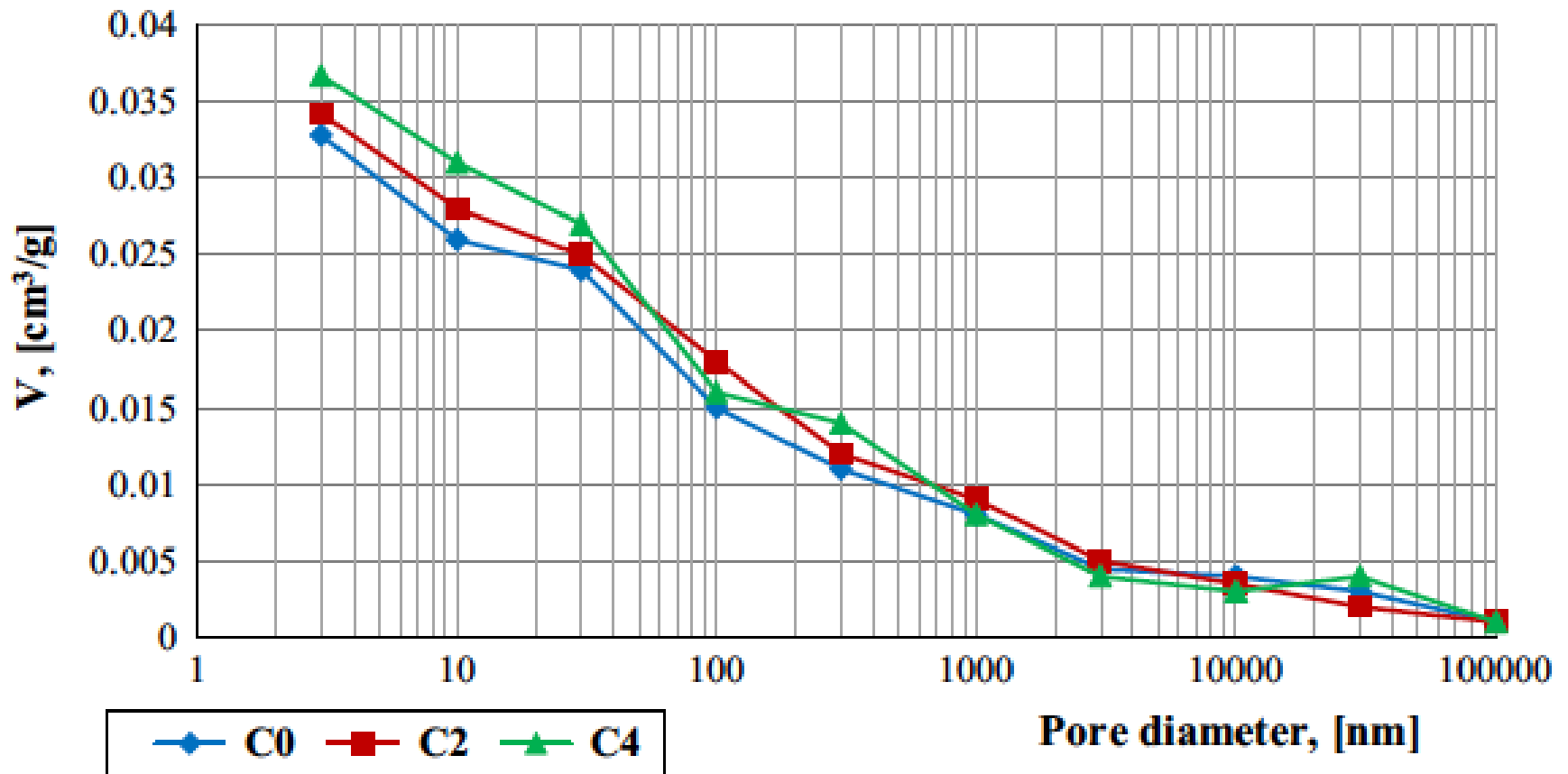


Badania mikrostruktury i składu fazowego kompozytów cementowych modyfikowanych emulsją bitumiczną

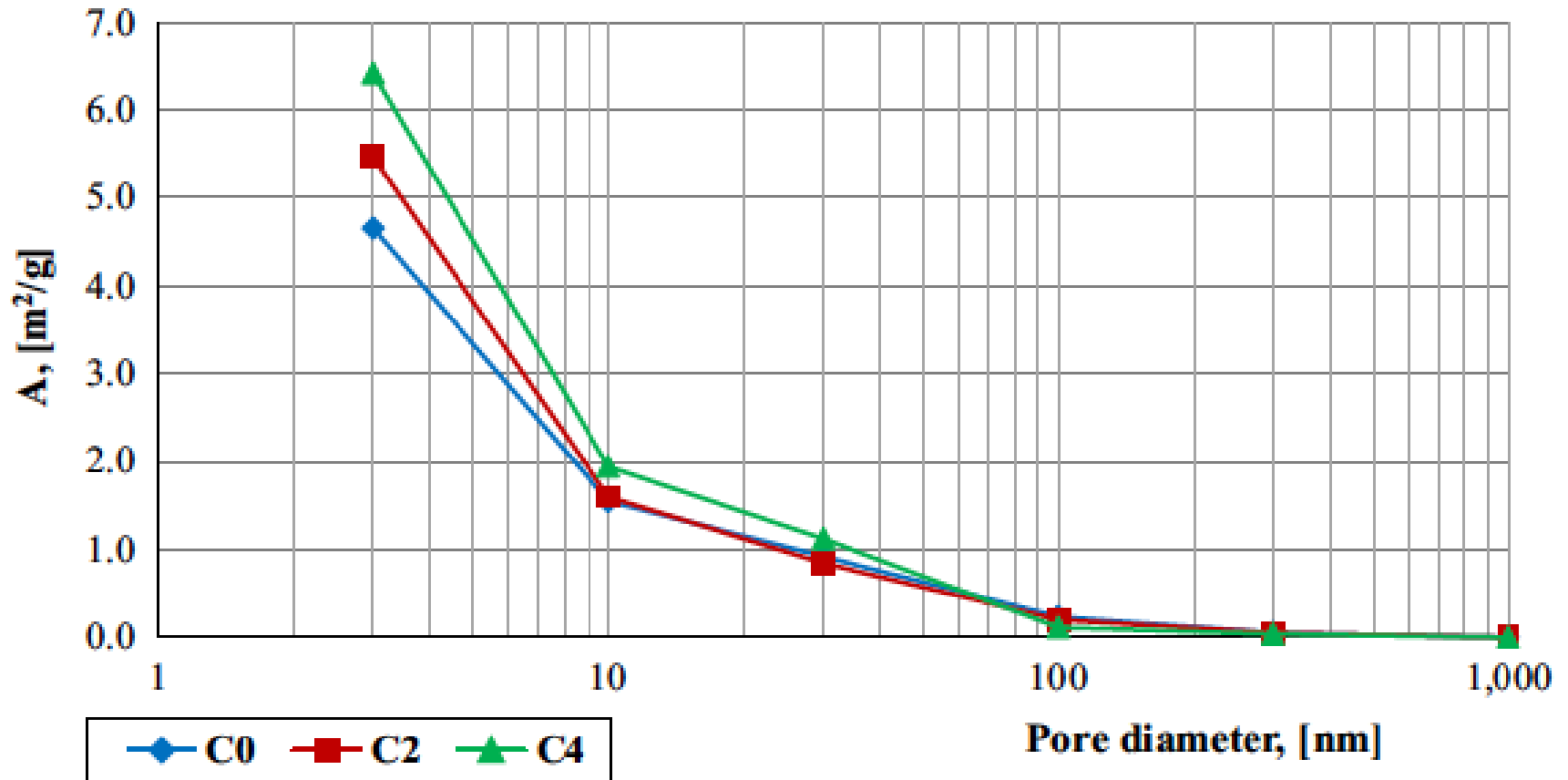


	HV 1.50 kV	det ETD	WD 7.9 mm	mag 只 11 000 x	HPW 11.5 μm	spot 2.0	 5 μm
							Quanta FEG

Całkowita porowatość rtęciowa V [cm^3/g]

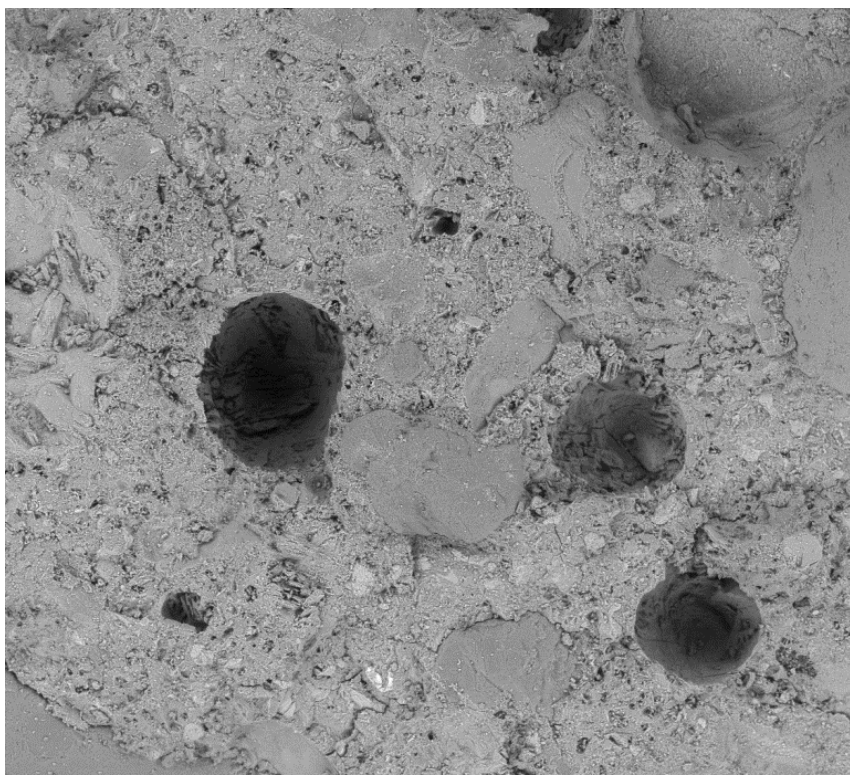


Całkowita powierzchnia porów A [m^2/g]



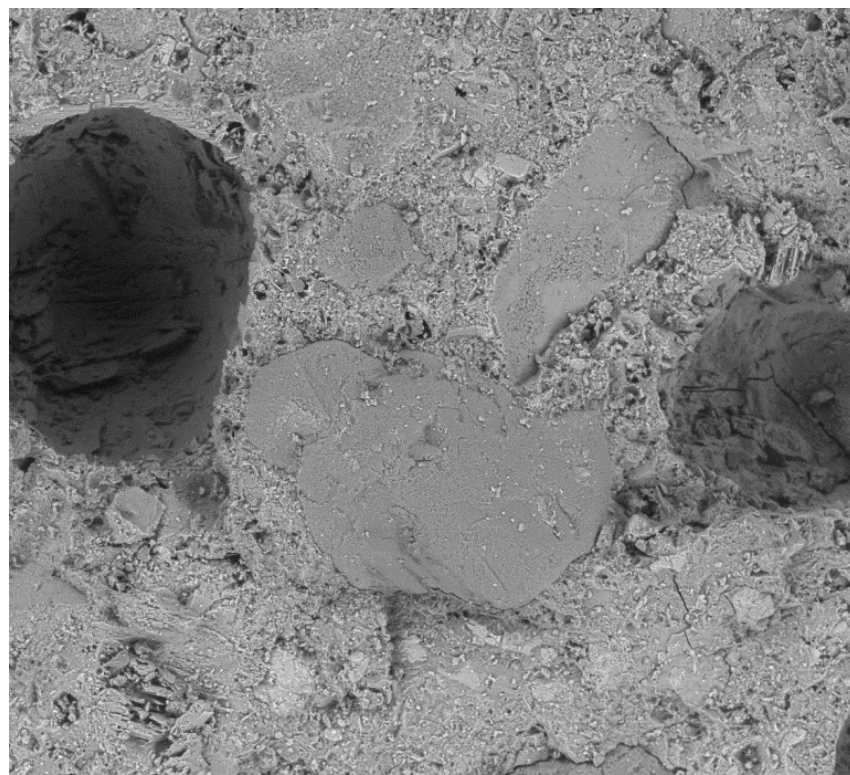
Struktura kompozytu cementowego z emulsją bitumiczną (2%) – widoczne pustki powietrzne o średnicy ok. 100µm

100 ×



det	WD	mag	HFV	spot	pressure	400 µm
CBS	7.1 mm	100 x	1.27 mm	4.0	60 Pa	Quanta FEG

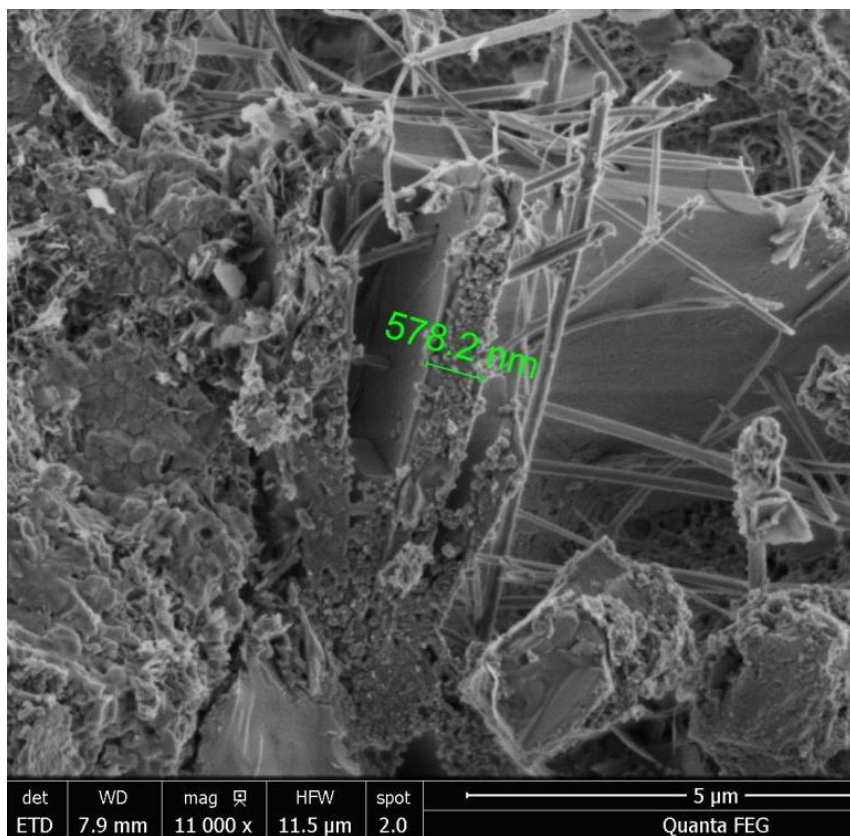
200 ×



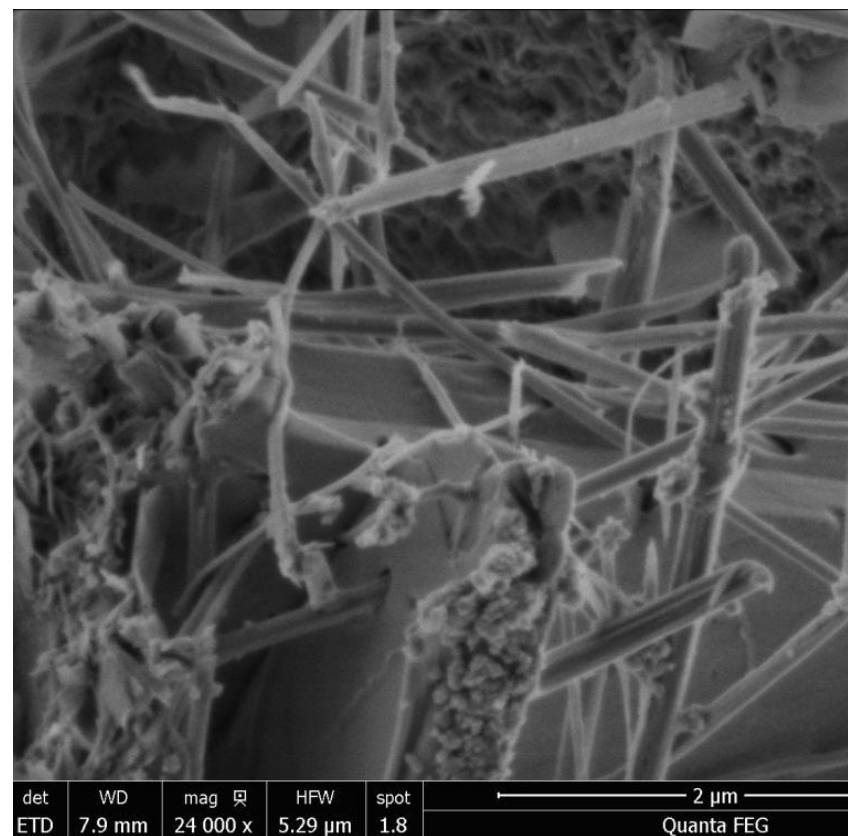
det	WD	mag	HFV	spot	pressure	200 µm
CBS	7.1 mm	200 x	635 µm	4.0	60 Pa	Quanta FEG

Mikrostruktura kompozytu modyfikowanego emulsją bitumiczną (2%) – widoczne igiełki ettryngitu i płytki portlandytu otoczone zwartą fazą CSH

11 000 ×

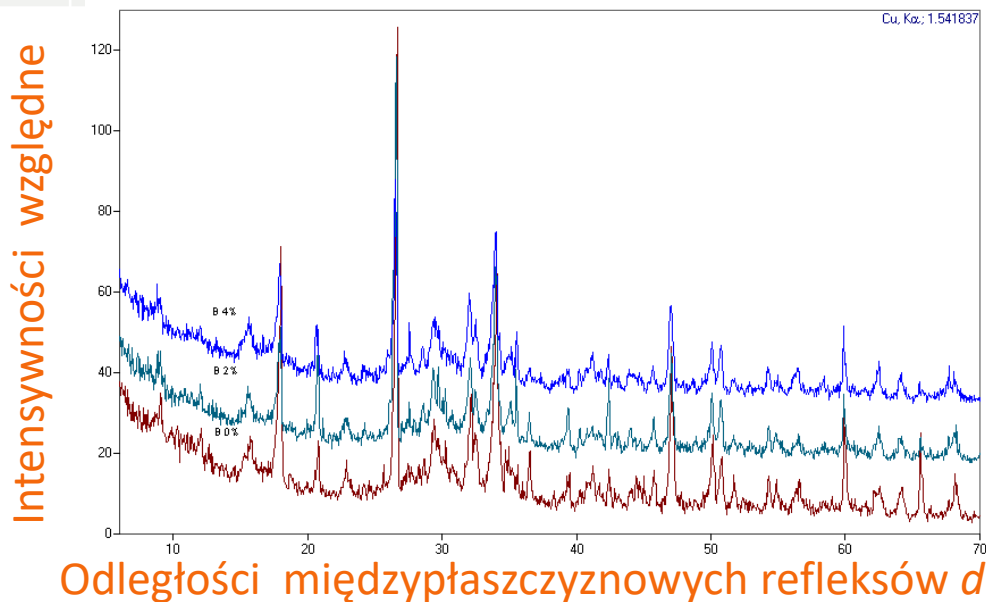


24 000 ×



Skład fazowy i identyfikacja składników krystalicznych za pomocą dyfraktometrii rentgenowskiej

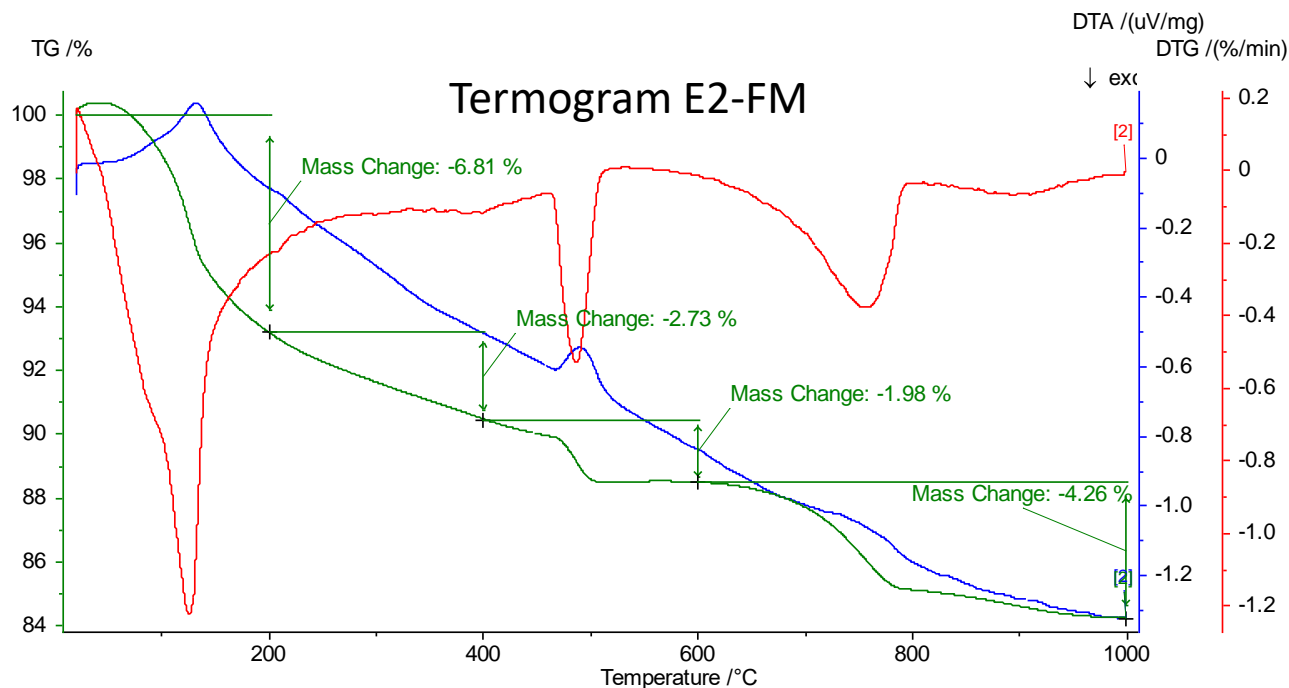
Skład	Intensywności względne refleksów wybranych składników					
	Alit (C ₃ S)	Belit (C ₂ S)	Fazy glinianowe (C ₄ AH ₇ -C ₄ AH ₁₁)	Ettringit (C ₆ AS ₃ H ₃₂)	Portlandyt Ca(OH) ₂	Żel (CSH)
E0-FM	7	2	8	9	11	13
E2-FM	4	3	5	8	13	14
E4-FM	6	8	9	11	19	21



Zestawienie dyfraktogramów rentgenowskich badanych betonów

Zawartość H_2O , $Ca(OH)_2$, $CaCO_3$ określona metodą termicznej analizy różnicowej

Badane betony	Zawartość wybranych składników [%]					
	skład	H_I	H_{CH}	ΣH_2O	$Ca(OH)_2$	$CaCO_3$
bez emulsji	E0-FM	9,23	2,81	12,04	11,55	6,67
z emulsją 2%	E2-FM	9,54	1,98	11,52	8,13	9,67
z emulsją 4%	E4-FM	9,87	2,16	12,03	8,88	14,05





Implementacja wyników badań eksperymentalnych w warunkach realizacji nawierzchni drogowych i nawierzchni terminala kontenerowego

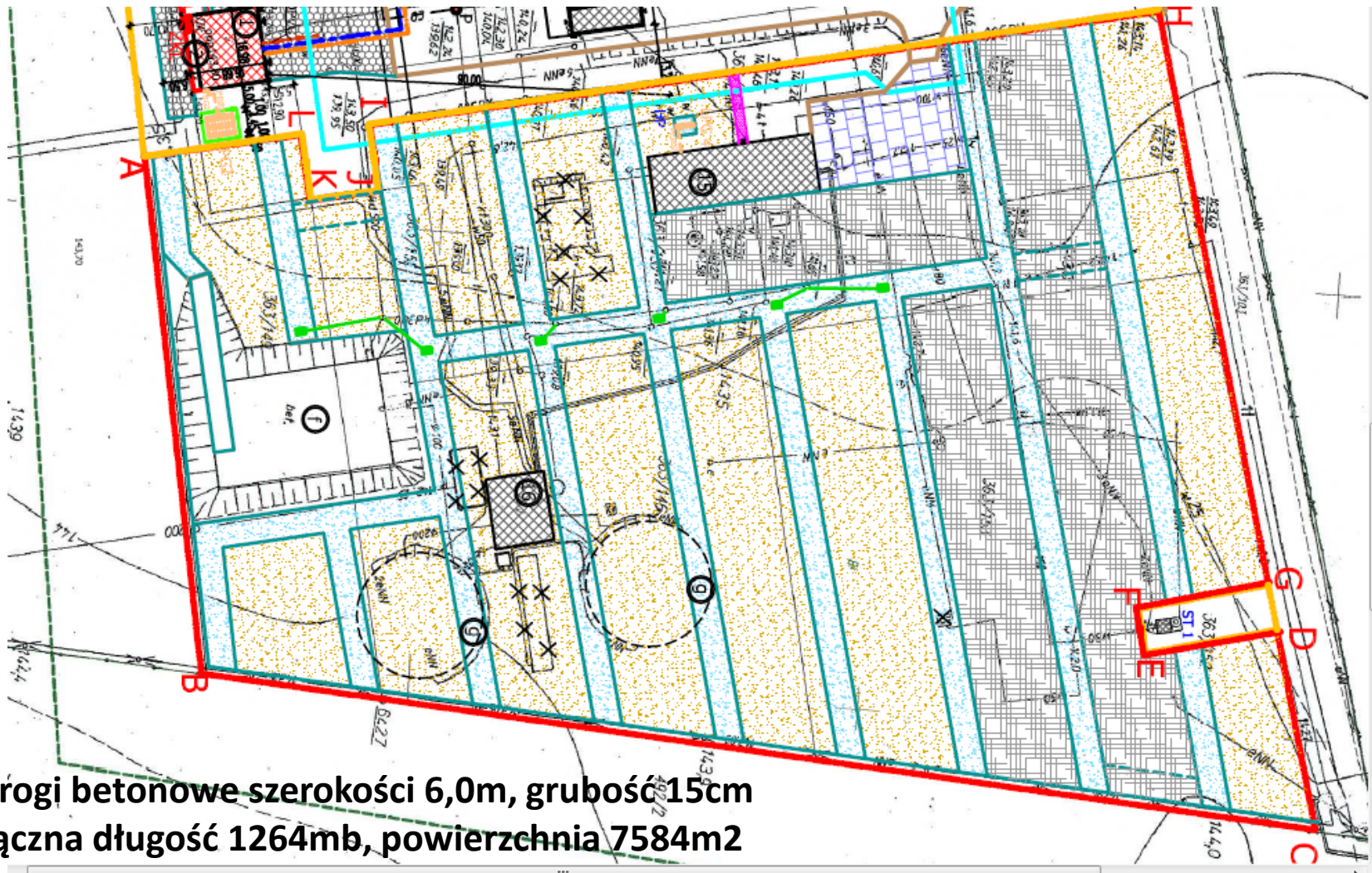


Składy betonów stosowanych przy realizacji nawierzchni drogowych i nawierzchni terminala

skład	Nawierzchnie drogowe - ilość składników, kg/m ³					
	Emulsja	Plastyfikator/ upłynniacz	Domieszka napowietrz.	Piasek płukany	Grys 2-8	Grys 8-16
CC-D	-	3.20/2.48	1.98	641	341	720
CC-E	7.2	3.20/2.50		663	465	743
CC-0	-	3.40/2.50		670	470	750
stałe	Cement 360 kg/m ³ ; w/c=0.37; S 130 mm					

skład	Nawierzchnia terminala - ilość składników, kg/m ³					
	Emulsja	Plastyfikator/ upłynniacz	Domieszka napowietrz.	Piasek płukany	Grys 2-8	Grys 8-16
CC2-E	6.66	3.15/2.45		649	464	743
stałe	Cement 360 kg/m ³ ; w/c=0.35; S 110 mm; włókno RFX54 2kg/m ³					

Badania przemysłowe przeprowadzone w warunkach realizacji nawierzchni drogowych



**Drogi betonowe szerokości 6,0m, grubość 15cm
łączna długość 1264mb, powierzchnia 7584m²**

Technologia formowania nawierzchni betonowej przy użyciu pneumatycznej listwy wibracyjnej



Nawierzchnie betonowe z emulsją i bez emulsji – porównanie właściwości

Beton z emulsją



Beton bez emulsji

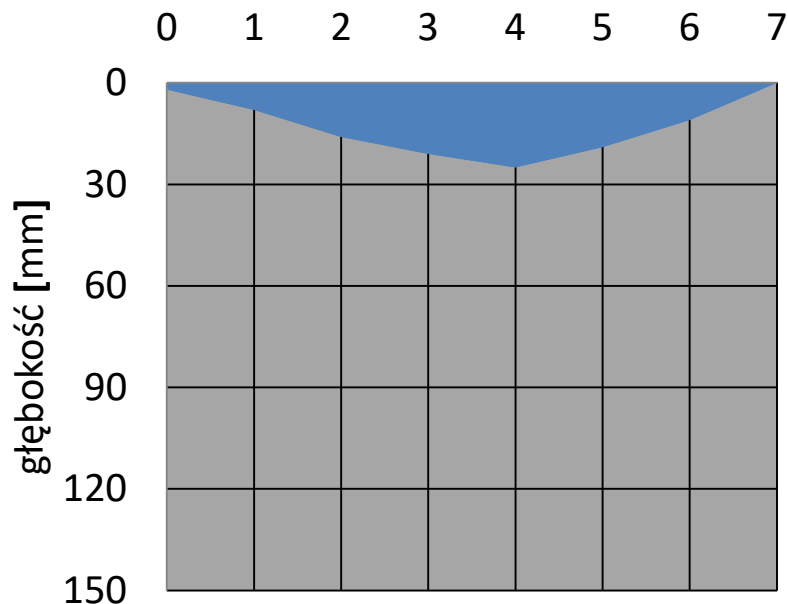


właściwości	z emulsją	bez emulsji
$f_{cm,28}$ [MPa]	>50	<50
$f_{ctm,fl}$ [MPa]	>5,50	<5,50
D_c [kg/m ³]	>2300	<2300
Ścieralność [mm ³ /5000mm ²]	<14 000	>14000
n_w [%]	<4,0	>4,0
W [mm]	<30	>30
F150	TAK	TAK
Rysy skurczowe	NIE	TAK

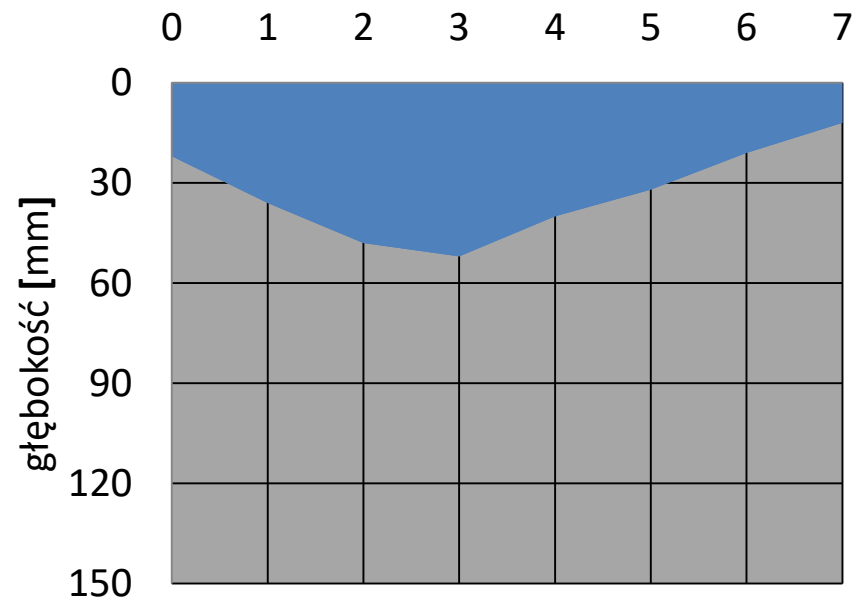
Wyniki badań wodoprzepuszczalności betonu w nawierzchniach [mm]

Maksymalna przepuszczalność wody pod ciśnieniem 0,8 MPa:

Kompozyt z emulsją CC-E



Kompozyt bez emulsji CC-0

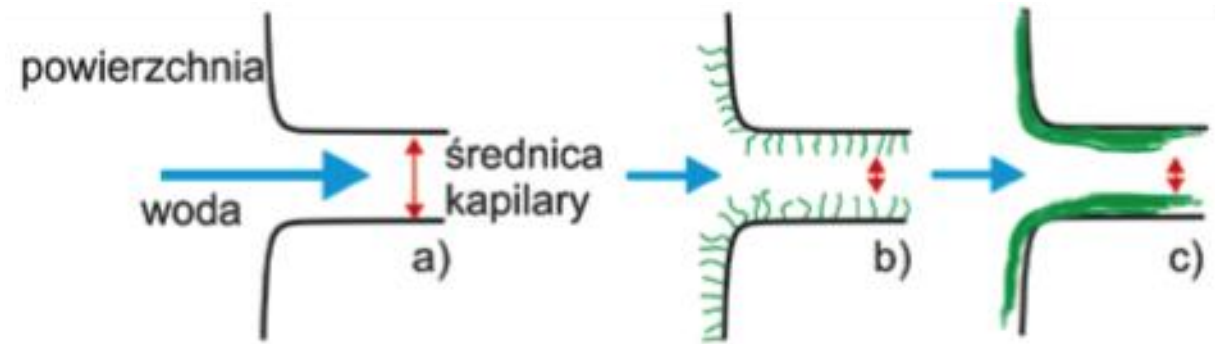


 - część kostki nasiąknięta wodą

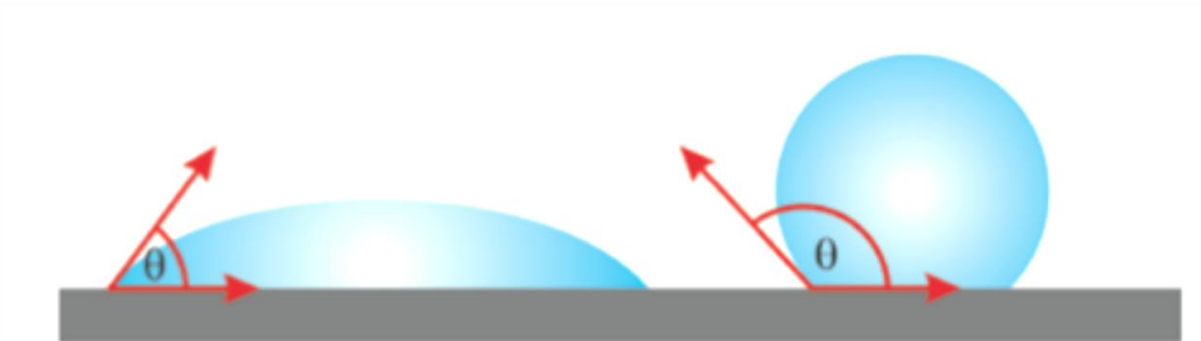
 - część kostki nie nasiąknięta wodą

Mechanizm poprawy szczelności betonu domieszką emulsji bitumicznej

- ◆ Zmniejszenie światła przekroju porów kapilarnych przez przyłączenie do ich powierzchni cząsteczek asfaltu



- ◆ Zwiększenie kąta zwilżania poprzez obniżenie napięcia powierzchniowego kompozytu cementowego



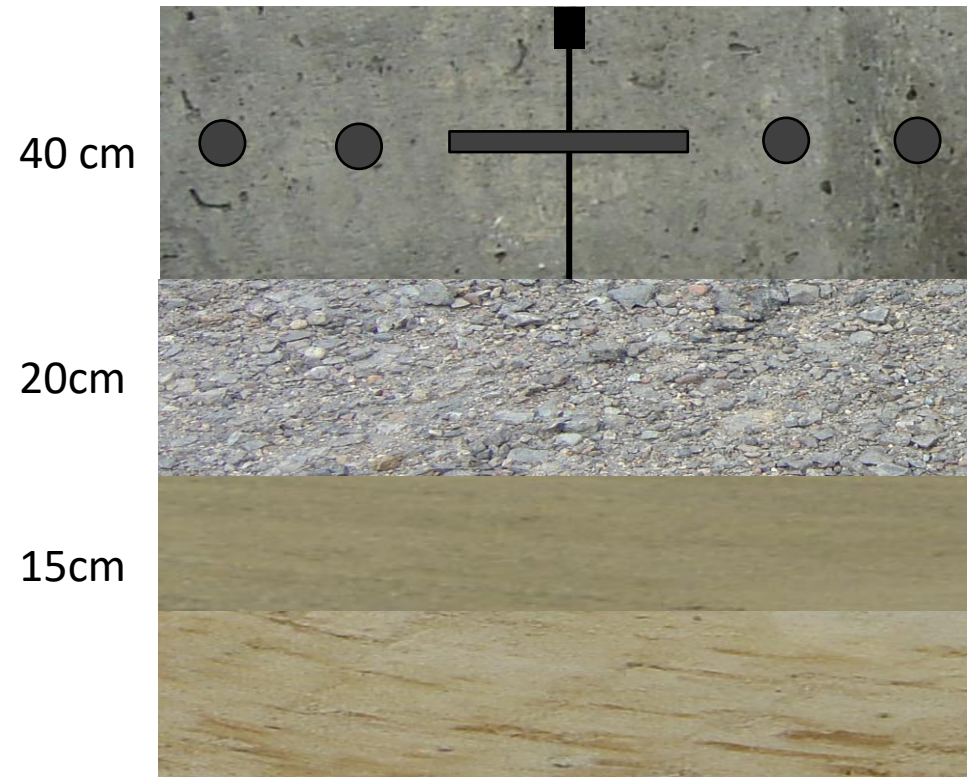
silne zwilżanie $\theta \rightarrow 0^\circ$, słabe zwilżanie $\theta \rightarrow 180^\circ$

Realizacja nawierzchni terminala kontenerowego z betonu modyfikowanego emulsją bitumiczną



Nawierzchnia betonowa **11 076m²** , 4430m³ betonu , 29,5 tys. kg emulsji
5 etapów realizacji w cyklach 4 tygodniowych: wykop, stabilizacja, podbudowa, płyta

Konstrukcja nawierzchni terminala na podbudowie z kruszywa łamanego



Beton modyfikowany emulsją,
 $f_{cm} > 50 \text{ MPa}$; $f_{ctm,fl} > 5,5 \text{ MPa}$
CEM I 42,5 N 3SR/NA, grysy bazalt/granit
Włókno syntetyczne RXF 54 2 kg/m^3

Kruszywo łamane 0-31,5mm, dolomitowe
 $E_{v1} \geq 100 \text{ MPa}$, $E_{v2} \geq 180 \text{ MPa}$, $E_{v2} / E_{v1} \leq 2,2$

Grunt stabilizowany cementem 1,5-2,5 MPa

Podłoże gruntowe P_d
 $E_{v2} \geq 60 \text{ MPa}$

Obciążenia dynamiczne nawierzchni terminala kontenerowego

Reach Stacker SC 4531 TA 5



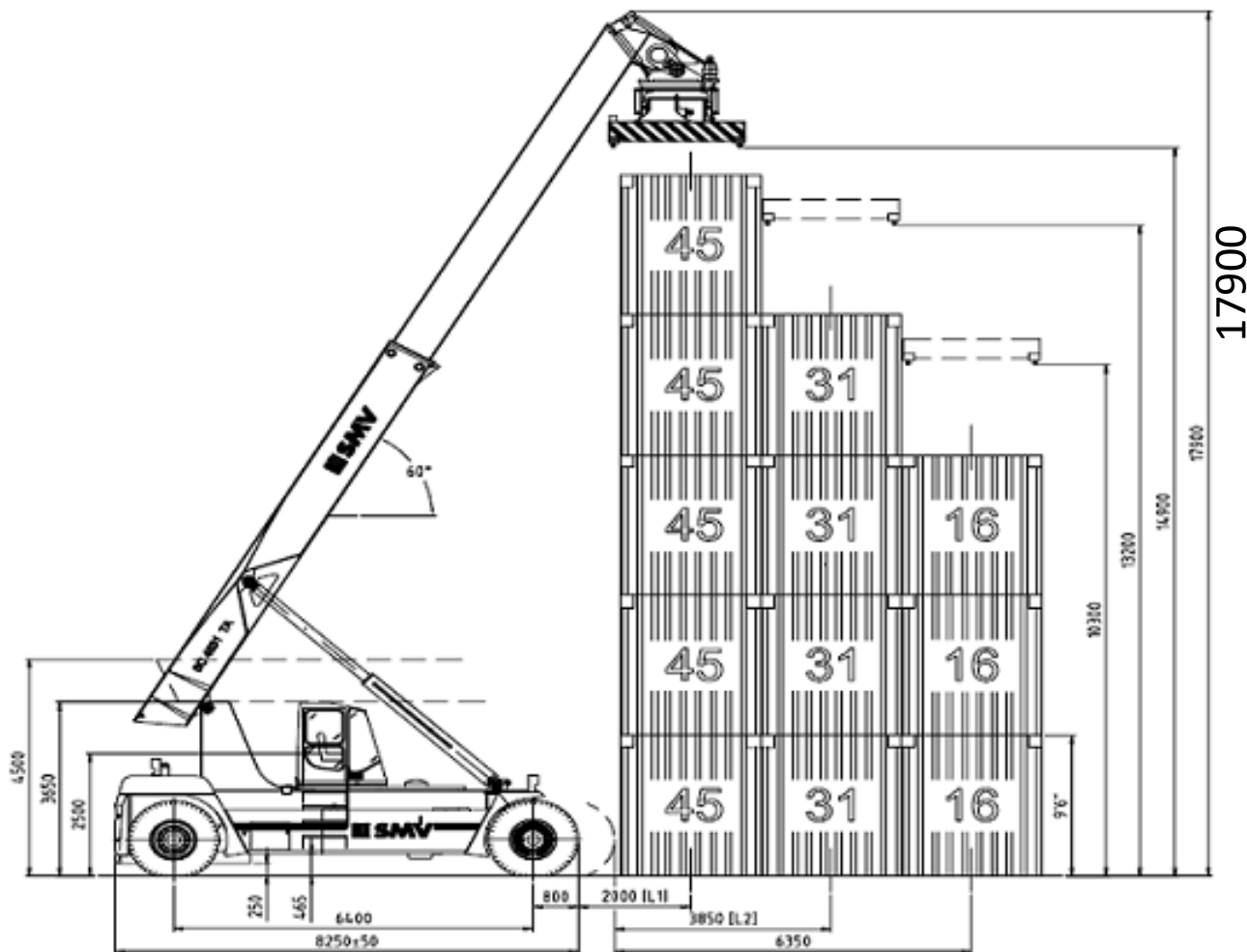
Max nacisk na przednią oś 101,5 t
Max masa z kontenerem 116,1 t

Boeing 787 Dreamliner



Masa własna 101 t
Max waga startowa – 227,93 t

Obciążenie statyczne nawierzchni terminala kontenerowego



Właściwości kompozytu cementowego z emulsją bitumiczną uzyskanego w warunkach przemysłowych

Badane właściwości	Wymagania	Wyniki
Klasa wytrzymałości na ściskanie	C35/45	>60 MPa
Wytrzymałość na zginanie [MPa]	5,50	7,21
Ścieralność [mm ³ /5000mm ²]	18 000	13 575
Nasiąkliwość wagowa [%]	4,0	3,62
Odporność na wnikanie wody [mm]	30	26
Mrozoodporność	F 200	F 200



Podsumowanie badań przemysłowych

Wytrzymałość na ściskanie

Zwiększenie wytrzymałości na ściskanie ponad 10%

- Wg PN-EN 12390-3:2009

Wytrzymałość na zginanie

Zwiększenie wytrzymałości na zginanie ponad 10%

- Wg PN-EN 12390-5:2009

Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

Zmniejszenie głębokości penetracji wody ponad 20%

- Wg PN-EN 12390-8:2009

Nasiąkliwość

Zmniejszenie nasiąkliwości ponad 25%

- Wg PN-88/B-06250 pkt 6.4

Mrozoodporność F200

Ubytek masy $\Delta m=0$, spadek wytrzymałości <20%

- Wg PN-88/B-06250 pkt 6.6

Ścieralność

Zmniejszenie ścieralności o ponad 5 %

- Wg PN-EN 1338 Załącznik H

Wnioski

1. W pracy **wykazano**, że w wyniku modyfikacji betonu cementowego domieszkami i dodatkami bitumicznymi oraz skutecznego sposobu zagęszczenia mieszanki betonowej istnieje **możliwość zapewnienia trwałości konstrukcji z betonu w klasie ekspozycji XF i XD przez minimum 50 lat**, zatem teza rozprawy doktorskiej została udowodniona zaś postawione cele zostały zrealizowane
2. W konsekwencji przeprowadzonego eksperymentu oraz prac rozwojowych, prowadzonych w warunkach przemysłowych, **uzyskano innowacyjny materiał konstrukcyjny o podwyższonej odporności na agresywne oddziaływania środowiskowe w klasach ekspozycji XF4, XD3**
3. Badania strukturalne przeprowadzone na modyfikowanych betonach potwierdziły **korzystną zmianę struktury porowatości** w stosunku do betonów niemodyfikowanych.
4. Szczególnie **korzystny wpływ** emulsji bitumicznej zaobserwowano w przypadku **nasiąkliwości, wodoszczelności, przenikalności chlorków i modułu sprężystości**
5. Emulsja bitumiczna jako domieszka uszczelnia strukturę betonu poprzez **hydrofobizację** systemu kapilar. Pokrywa ściany porów, przez co utrudnia przenikanie wody do wnętrza porów kapilarnych.
6. Ustalono **optymalne parametry składu** betonu, przy których uzyskany kompozyt charakteryzował się największą mrozoodpornością mierzoną spadkiem wytrzymałości po 200 cyklach naprzemiennego zamrażania i rozmrażania: zawartość **emulsji 3,25%**; zawartość **upłynniacza PCE 0,88 %**; współczynnik wodnocementowy **$w/c=0,35$** .
7. **W wyniku zastosowania anionowej emulsji bitumicznej możliwe jest odstępianie od stosowania domieszek napowietrzających, które znacznie obniżają wytrzymałość na ściskanie betonu.**

Wnioski praktyczne

1. **Zastosowanie emulsji bitumicznej** jako zamiennika dotychczas stosowanej pasty asfaltowej **umożliwiło produkcję** mieszanek betonowych modyfikowanych bitumem **w istniejących węzłach betoniarskich**.
2. Przy w/c od **0,30÷0,37** **nie ma możliwości skutecznego zagęszczenia** na stole wibracyjnym, czy wibratorem pogrążalnym bez zastosowania domieszek upłynniających
3. W celu uzyskania **konsystencji K5** umożliwiającej betonowanie przy użyciu pompy do betonu **minimalne w/c wynosiło 0,37**
4. Przy **w/c=0,37 bez upłynniacza** uzyskano konsystencję **K1** mało przydatną w praktyce
5. Przy **w/c=0,3 + upłynniacz w maksymalnej ilości** uzyskano konsystencję mieszanki **K2/K3**, której nie daje się transportować betoniarkami samochodowymi, a jedynie „wywrotkami”.
6. Termin wykonywania **badania kompozytów** cementowych powinien być uzależniony od zastosowanego cementu. W przypadku CEM I (**N**) badania wytrzymałości, nasiąkliwości i mrozoodporności należy przeprowadzać po czasie równoważnym **56 lub 90 dni**.

Wnioski rozwojowe

Mając na względzie dalsze badania nad kompozytami cementowymi z emulsją bitumiczną wydaje się zasadne:

1. rozważenie możliwości dozowania emulsji **proporcjonalnie do ilości wody zarobowej** a nie do masy cementu (sugerowany przedział to 5-15 kg emulsji na 100 litrów wody) i opracowanie linii technologicznej do takiego sposobu dozowania,
2. prowadzenie ewentualnych badań nad wpływem emulsji bitumicznej na parametry zwilżania kompozytu, takie jak **napięcie powierzchniowe i kąt zwilżania**, co pozwoliłoby na szybką na ocenę stopnia hydrofobizacji.



Dziękuję za uwagę

50

