

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

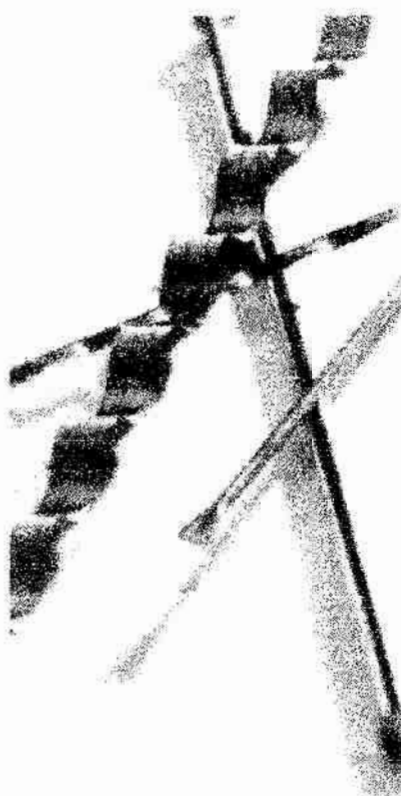
mgr inż. Jacek Katzer

Rozprawa doktorska

Piaskobetony specjalne na bazie piasku odpadowego  
modyfikowane mikrokrzemionką i zbrojeniem rozproszonym

PROMOTOR

prof. dr hab. inż. Zdzisław Piątek



Koszalin 1999

## Spis symboli i oznaczeń

- $A$  - Pole poprzeczne przekroju.  
 $A_c$  - Współczynnik konfiguracji objętościowej ziaren cementu.  
 $A_k$  - Współczynnik konfiguracji objętościowej ziaren kruszywa.  
 $A_m$  - Współczynnik konfiguracji objętościowej ziaren mikrokrzemionki.  
 $b_{0...kk}$  - Współczynniki regresji.  
 $C$  - Masa cementu.  
 $d_{1,2}$  - Długość i wysokość próbki pryzmatycznej.  
 $d_c$  - Średnica ziaren cementu.  
 $d_k$  - Średnica ziaren kruszywa.  
 $d_{mk}$  - Średnica ziaren mikrokrzemionki.  
 $d_e$  - Równoważna średnica włókna stalowego.  
 $E_b$  - Współczynnik sprężystości betonu.  
 $e_N$  - Współczynnik efektywności planu.  
 $F$  - Siła.  
 $f_{1..8}$  - Frakcje kruszywa.  
 $f$  - Ugięcie.  
 $G_{1,2}$  - Średnia masa próbek.  
 $H$  - Ciśnienie atmosferyczne.  
 $h$  - Ciśnienie wody.  
 $j_1$  - Jamistość kruszywa w stanie luźnym.  
 $j_z$  - Jamistość kruszywa w stanie zagęszczonym.  
 $K$  - Masa kruszywa.  
 $k_{0...3}$  - Współczynniki skalujące  
 $k_V$  - Współczynnik prędkości przepływu.  
 $k_{Vi}$  - Współczynnik prędkości przepływu i-tego betonu.  
 $k_{VO}$  - Współczynnik prędkości przepływu po wstępnym obciążeniu.

- $l$  - Długość włókna stalowego.
- $L$  - Rozpiętość pomiędzy rolkami podporowymi.
- $l_c$  - Ilość „wolnych” ziaren cementu
- $l_m$  - Liczba elementów kwarcu otaczających poszczególne ziarna cementu.
- $l_t$  - Odległość pomiędzy punktami zmierzona tuż po rozformowaniu próbki.
- $l_0$  - Odległość pomiędzy punktami zmierzona po okresie wysychania próbki.
- $n$  - Liczebność próby.
- $N$  - Liczba pomiarów dowolnego planu.
- $N_c$  - Liczba ziaren spoiwa.
- $N_m$  - Liczba ziaren mikrokrzemionki.
- $N_k$  - Liczba ziaren kruszywa.
- $N_K$  - Liczba pomiarów wymagana do realizacji planu kompletnego.
- $N_{wk}$  - Nasiąkliwość wagowa.
- $N_{wi}$  - Nasiąkliwość wagowa i-tego betonu.
- $N_{wo}$  - Nasiąkliwość wagowa betonu porównawczego.
- $m$  - Masa.
- $p$  - Ciśnienie.
- $P$  - Porowatość kruszywa.
- $p_i$  - Procentowy udział frakcji w stosie okrucowym.
- $r_{ci}$  - Promień ziarna spoiwa.
- $r_{ki}$  - Promień ziarna kruszywa.
- $r_m$  - Promień ziarna mikrokrzemionki.
- $R$  - Wytrzymałość.
- $R_{KS28}$  - Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania.
- $R_{KR28}$  - Wytrzymałość na rozciąganie po 28 dniach dojrzewania.
- $R_{KS120}$  - Wytrzymałość na ściskanie po 120 dniach dojrzewania.
- $R_{KR120}$  - Wytrzymałość na rozciąganie po 120 dniach dojrzewania.
- $R_R$  - Wytrzymałość na rozciąganie betonu żwirowego.
- $R_{R0}$  - Wytrzymałość na rozciąganie porównawczego betonu żwirowego.
- $R_S$  - Wytrzymałość na ściskanie betonu żwirowego.

- $R_{SO}$  - Wytrzymałość na ściskanie porównawczego betonu żwirowego.  
 $s$  - Odchylenie standardowe.  
 $S_e$  - Parametr „effective spacing”.  
 $S_k$  - Szczelność stosu okruszowego.  
 $S_{kb}$  - Szczelność układu ziaren kruszywa.  
 $S_m$  - Szczelność układu ziaren mikrokrzemionki.  
 $S_w$  - Powierzchnia właściwa ziaren kruszywa.  
 $t$  - Czas.  
 $t_{VBK}$  - Czas badania konsystencji świeżej mieszanki kompozytu.  
 $t_{VBM}$  - Czas badania konsystencji świeżej mieszanki matrycy.  
 $U_A$  - Wskaźnik uziarnienia według Abramsa.  
 $U_H$  - Wskaźnik uziarnienia według Hummla.  
 $U_K$  - Wskaźnik uziarnienia według Kuczyńskiego.  
 $V$  - Objętość.  
 $V_b$  - Objętość mieszanki betonowej.  
 $V_f$  - Dodatek włókien.  
 $V_p$  - Zawartość powietrza w świeżej mieszance betonowej.  
 $W$  - Masa wody.  
 $w_{BOLOMEY}$  - Wodozadność stosu okruszowego według Bolomeya.  
 $w_{STERN}$  - Wodozadność stosu okruszowego według Sterna.  
 $w_c$  - Wodozadność cementu.  
 $w_{0k}$  - Wartość centralna czynnika  $w_k$ .  
 $\Delta w_k$  - Jednostkowy zakres zmienności.  
 $W_{ES}$  - Współczynnik efektywności struktury.  
 $W_W$  - Współczynnik wodny.  
 $x_{max}$  - Maksymalna głębokość penetracji wody.  
 $x_{1,2}$  - Czynniki wejścia w wartościach kodowych.  
 $Z$  - Zawartość zanieczyszczeń obcych w kruszuwie.  
 $Z_p$  - Zawartość ziaren pylastych.  
 $\beta$  - Pyłowy wskaźnik urabialności.

- $\delta_m$  - Grubość warstwy wody na ziarnach mikrokrzemionki.
- $\delta_w$  - Grubość warstwy zawiesiny mikrokrzemionki na ziarnach spoiwa.
- $\delta_z$  - Grubość warstwy zawiesiny spoiwa otaczającej ziarno kruszywa.
- $\varepsilon_c$  - Odkształcenie całkowite.
- $\varepsilon_d$  - Odkształcenie doraźne.
- $\varepsilon_S$  - Skurcz.
- $\varepsilon_{SO}$  - Odkształcenie przy ściskaniu osiowym.
- $\phi_p$  - Współczynnik pełzania.
- $\tau$  - wytrzymałość „spoiny”
- $\rho_c$  - Gęstość cementu.
- $\rho_k$  - Gęstość kruszywa.
- $\rho_n^1$  - Gęstość nasypowa w stanie luźnym.
- $\rho_n^2$  - Gęstość nasypowa w stanie zagęszczonym.
- $\rho_{mk}$  - Gęstość mikrokrzemionki.
- $\rho_w$  - Gęstość wody.
- $\rho_{PM}$  - Gęstość pozorna świeżej mieszanki betonowej.
- $\rho_{PB}$  - Gęstość pozorna stwardniałego betonu
- $\sigma_{CU}$  - Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu betonu z dodatkiem włókien.
- $\sigma_m$  - Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu betonu bez dodatku włókien.
- $\sigma_{fu}$  - Wytrzymałość włókna

## SPIS TREŚCI

Spis symboli i oznaczeń.	2
1. Wstęp.	9
2. Teza i cel pracy.	14
3. Stan zagadnienia.	15
3.1. Kruszywa drobnoziarniste.	15
3.2. Piaskobeton.	23
3.2.1. Początek technologii piaskobetonu.	23
3.2.2. Właściwości piaskobetonu.	24
3.2.3. Dotychczasowe próby modyfikacji piaskobetonu.	27
3.2.4. Piaskobeton na bazie piasku odpadowego.	27
3.3. Mikrokrzemionka.	29
3.3.1. Właściwości i pochodzenie mikrokrzemionki.	29
3.3.2. Teoria wiązania mikrokrzemionki w betonie.	37
3.4. Zbrojenie rozproszone.	43
3.4.1. Początki stosowania włókien stalowych do modyfikacji betonu.	43
3.4.2. Elementy teorii i właściwości fibrobetonów.	44
3.4.3. Dotychczasowe zastosowania fibrobetonów.	52
3.4.4. Kierunki i perspektywy rozwoju fibrobetonów.	53
3.4.5. Opłacalność stosowania zbrojenia rozproszonego.	55
3.5. Fibrobetony z dodatkiem mikrokrzemionki	57
4. Program badań.	60
4.1. Badane właściwości oraz liczba próbek.	60
4.2. Wybór metody matematycznego planowania eksperymentów.	62
4.3. Składniki badanego kompozytu piaskobetonowego.	68
4.3.1. Piasek odpadowy.	68
4.3.2. Cement.	70

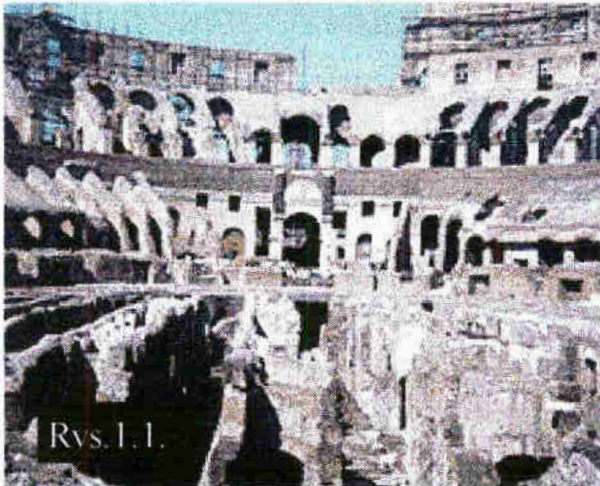
4.3.3. Woda zarobowa.	70
4.3.4. Skład mieszanki piaskobetonowej bez dodatków.	71
4.3.5. Dodatki uplastyczniające.	71
4.3.6. Dodatek włókien stalowych.	71
4.3.7. Dodatek mikrokrzemionki.	73
4.4. Metodyka badań.	74
4.4.1. Oznaczenie gęstości pozornej świeżej mieszanki betonowej.	75
4.4.2. Oznaczenie konsystencji metodą Ve-Be.	76
4.4.3. Oznaczenie zawartości powietrza w mieszance betonowej.	76
4.4.4. Badanie wytrzymałości na ściskanie.	77
4.4.5. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu.	78
4.4.6. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu.	78
4.4.7. Badanie odkształceń przy ściskaniu osiowym.	79
4.4.8. Badanie skurczu.	80
4.4.9. Badanie pełzania.	80
4.4.10. Badanie nasiąkliwości wagowej.	82
4.4.11. Badanie przepuszczalności wody przez beton.	82
5. Wyniki badań.	84
5.1. Badania wstępne.	84
5.2. Badania świeżej mieszanki piaskobetonowej.	89
5.2.1. Konsystencja.	89
5.2.2. Zawartość powietrza.	90
5.2.3. Gęstość pozorna.	92
5.3. Badanie piaskobetonu po 28 dniach dojrzewania.	93
5.3.1. Wytrzymałość na ściskanie.	93
5.3.2. Wytrzymałość na rozciąganie.	95
5.3.3. Wodoszczelność.	96
5.3.4. Nasiąkliwość.	99
5.3.5. Gęstość pozorna.	100
5.4. Badania piaskobetonu po 120 dniach dojrzewania.	101

5.4.1. Badanie odkształceń przy osiowym ściskaniu.	101
5.4.2. Wytrzymałość na ściskanie.	107
5.4.3. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu.	108
5.4.4. Ugięcie przy zginaniu.	109
5.4.5. Wodoszczelność próbek wstępnie obciążonych.	110
5.5. Badanie cech reologicznych piaskobetonu.	112
5.5.1. Skurcz.	112
5.5.2. Pełzanie.	114
6. Analiza uzyskanych wyników.	116
6.1. Konsystencja i urabialność.	116
6.2. Wytrzymałość i kruchość.	120
6.3. Wodoszczelność i nasiąkliwość.	122
6.4. Struktura kompozytu piaskobetonowego.	125
6.5. Analiza wyników po 120 dniach dojrzewania.	128
6.6. Reologia.	133
6.7. Optymalna ilość dodatków.	134
7. Model kształtowania struktury kompozytu piaskobetonowego.	135
8. Wnioski.	154
Bibliografia.	156
Załącznik I	168
Załącznik II	171



## 1. Wstęp.

Słowo puzolanowy pochodzi od nazwy włoskiej miejscowości Pozzuoli, gdzie podobno starożytni Rzymianie pierwszy raz mieszały rozdrobniony kamień wapienny z pyłem wulkanicznym. Uzyskane w ten prosty sposób spoiwo służyło do wytwarzania zapraw murarskich oraz prymitywnych mieszanek betonowych tak potrzebnych do budowy Rzymu. Pozzuoli dało początek dziejom cementu. Wytrzymałość i odporność na czynniki atmosferyczne antycznych zapraw możemy ciągle podziwiać zwiedzając ruiny rzymskich budowli. Dobrym przykładem prawie 2000 letniej trwałości jest rzymskie Koloseum przedstawione na rys 1.1. [211].



Nowożytny beton znany jest od chwili wyprodukowania w Anglii na przełomie lat 1824/1825 spoiwa hydraulicznego nazywanego cementem portlandzkim. W Niemczech i Francji rozpoczęto produkcję tego rodzaju cementu w 1850 roku, w Polsce w 1853 roku, a w USA dopiero w 1875 roku w

Coplay w Pensylwanii [200].

Beton jest od kilkudziesięciu lat głównym materiałem budowlanym i pozostanie nim zapewne nadal ze względu na wszechstronność zastosowania, stosunkowo niski koszt i powszechność występowania jego podstawowych składników, a także prostą technologię wytwarzania w porównaniu z innymi materiałami konstrukcyjnymi. Duże znaczenie betonu w budownictwie nie oznacza bynajmniej, że pozostaje on w niezmienionej postaci. Nowoczesne tendencje do ulepszania betonu i dostosowywania tego materiału do rosnących wymagań obejmują poza stosowaniem dodatków i domieszek oraz różnych zabiegów technologicznych komponowanie materiałów bardziej złożonych przez wprowadzenie dodatkowych składników [4]. Koszt betonu jest istotnym czynnikiem jego stosowania. Okazuje się jed-

nak, że w licznych przypadkach użycie nawet stosunkowo drogiej dodatków jest opłacalne, zwłaszcza przy uwzględnieniu wszystkich składników kosztu. Z obserwacji wynika, że niektóre konstrukcje betonowe zachowują wystarczającą trwałość przez bardzo długi okres czasu, natomiast inne ulegają stosunkowo szybkiemu zniszczeniu. Stosując beton o zwiększonej odporności lub trwałości, zwiększamy jednostkowy koszt inwestycji ale jednocześnie znacząco obniżamy koszt eksploatacji dzięki rzadszym naprawom, mniejszym stratom z powodu przerw w ruchu czy produkcji i dłuższemu okresowi technicznej żywotności samej konstrukcji [30].

Dobrym przykładem użycia dodatku o dużej cenie jednostkowej którego zastosowanie do betonu w pełni się kalkuluje po uwzględnieniu wszelkich kosztów i zysków jest mikrokrzemionka. Dodatek 15% mikrokrzemionki do betonu podnosi cenę  $1\text{m}^3$  od kilku do kilkunastu procent (w zależności od rodzaju) ale otrzymujemy za to beton niskonasiąkliwy, o zwiększonej wytrzymałości na ściskanie oraz szczelności kilkudziesięciokrotnie większej niż produkt wyjściowy [103, 132, 133]. Uzyskanie takiego wzrostu szczelności betonu innymi metodami jest praktycznie niemożliwe. Podobnie ma się rzecz z włóknami stalowymi. Betony modyfikowane włóknami są droższe od betonów zwykłych ale uzyskana dzięki temu zabiegowi zwiększona odporność na zginanie czy obciążenia dynamiczne całkowicie rekompensują poniesione koszty. Jedną z rodzin kompozytów są fibrobetony - czyli betony zbrojone krótkimi włóknami stalowymi. Na szeroką skalę badane i stosowane od lat sześćdziesiątych udowodniły swoją przydatność do budowy nawierzchni lotnisk i autostrad, tuneli, kopalń oraz części elementów konstrukcyjnych.

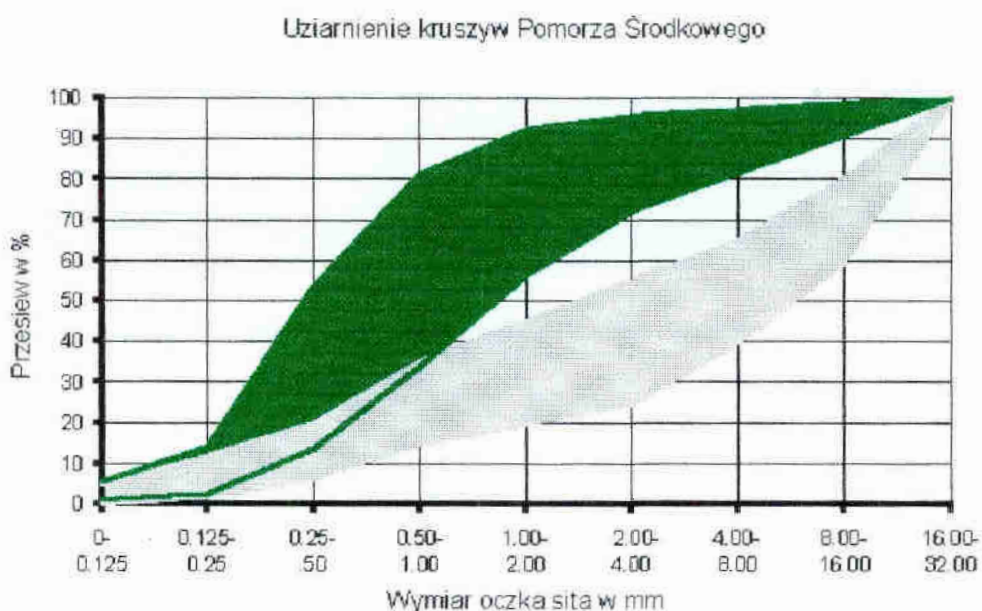
Podstawę racjonalnego wykorzystania materiałów budowlanych stanowi zasada odpowiedniości między wymaganiami w zakresie stosowania i użytkowania a właściwościami technologicznymi i użytkowymi tych materiałów. Zastosowanie materiału o właściwościach zaniżonych w stosunku do wymagań jest błędem technicznym, natomiast o właściwościach zawyżonych - błędem ekonomicznym. Realizacja zasady odpowiedniości wymagań i właściwości w odniesieniu do wszystkich materiałów sprowadza się do trafnego wyboru materiału budowlanego i sformułowania zaleceń co do warunków jego użytkowania [8].



Nowoczesne budowle i przedsięwzięcia inżynierskie wymagają coraz większej ilości coraz bardziej wysokowytrzymałych, szczelnych, a jednocześnie mniej nasiąkliwych betonów. Zbudowana ostatnio w Norwegii największa na świecie morska platforma wiertnicza Troll (rys. 1.2.) mająca przez najbliższe 50 lat zaopatrywać Europę Zachodnią w gaz z Morza Północnego jest imponującym przykładem coraz wyższych wymagań konstrukcyjnych stawianych betonom. Na budowę Trolla zużyto 245 000 m<sup>3</sup> betonów najwyższej jakości, w których ilość dodatków na 1 m<sup>3</sup> dochodziła do 1000 kg (w tym duże ilości mikrokrzemionki) [212]. Szacuje się, że sama budowa polskich autostrad wschód-zachód A2 i A4 pociągnie za sobą realizację sześciuset mostów, kładek i wiaduktów. Coraz szerszy front robót stanowią wszelkiego rodzaju oczyszczalnie ścieków i stacje ujęć oraz uzdatniania wody. Betony o bardzo dużej wytrzymałości, wodoszczelności i odporności na korozję są również potrzebne do realizacji zapór, tam, jazów, płyt lotnisk i specjalistycznych elementów konstrukcyjnych. Szeroko rozumiana ochrona środowiska wymaga stosowania materiałów bardzo wytrzymałych, szczelnych i nienasiąkliwych przez co odpornych na mróz i agresję chemiczną.

W dotychczasowej praktyce inżynierskiej betony specjalne (o dużej wytrzymałości, szczelności czy mrozoodporności) były wykonywane na bazie kruszyw żwirowych o normowej krzywej uziarnienia. Niestety złoża kruszyw grubych w przeważającej większości znajdują się na południu Polski, a takie rejony kraju jak na przykład Pomorze Środkowe (dawne woj. koszalińskie, słupskie, pilskie) obfitują w kruszywa plejstocenyjskie o pochodzeniu lodowcowym lub wodnolodowcowym. Wspólną cechą osadów lodowcowych i wodnolodowcowych jest mała zawartość składników żwirowych i gruboziarnistych, przy jednoczesnej dużej zawartości piasku drobnego [130]. Osady te są drobniejsze od zalecanego uziarnienia kruszywa do betonów zwykłych co przedstawiono na rys. 1.3. Kruszywa te są w

większości przypadków bądź sprzedawane jako pospółka, bądź frakcjonowane na piasek 0-2 mm i żwir 2-32 mm. Żwir, który stanowi 20-25% całości pospółki jest zagospodarowywany, a odsiany nadmiar frakcji piaskowych pospółki zalega od lat na ciągle powiększających się hałdach przy kopalniach kruszyw (rys.1.4.). W ciągu ostatnich 30 lat były podejmowane różnorakie próby zagospodarowania tego piasku poprzez wykorzystanie go do produkcji piaskobetonów. Niestety materiał ten ma wiele wad od dużej cementochłonności począwszy a na dużej nasiąkliwości, skurczu i pełzaniu skończywszy. Próby modyfikowania piaskobetonu popiołami lotnymi, mikrosferami czy plastyfikatorami nie dały w pełni zadowalających rezultatów.



Rys.1.3. Uziarnienie kruszyw Pomorza Środkowego (pole zielone) na tle wymagań normowych dla kruszyw do betonów (pole szare) [27,130,137].

Rosnące koszty transportu oraz przyszłe duże zapotrzebowanie w regionie na betony konstrukcyjne i specjalne związane chociażby z budową drogi ekspresowej Szczecin - Gdańsk każą ponownie się zastanowić nad możliwością wykorzystania do produkcji betonu miejscowych piasków odpadowych. Duże nadzieje w tej kwestii dają nowe domieszki do betonów takie jak mikrokrzemionka oraz

zastosowanie mało jeszcze w Polsce rozpowszechnionego zbrojenia rozproszonego.



Rys.1.4. Jedna z wielu hałd piasku odpadowego na Pomorzu Środkowym.

## 2. Teza i cel pracy.

**Autor tej pracy uważa, że można skomponować beton na bazie miejscowych piasków odpadowych modyfikowany mikrokrzemionką i zbrojeniem rozproszonym, który będzie w pełni spełniał wymogi konstrukcyjne i eksploatacyjne stawiane betonom zwykłym bądź specjalnym.** Dotychczasowe badania prowadzone nad betonami żwirowymi z dodatkiem mikrokrzemionki oraz nad fibrobetonami pozwalają przypuszczać, że dzięki zastosowaniu tych materiałów w piaskobetonie na bazie piasku odpadowego można będzie wyeliminować takie niekorzystne parametry piaskobetonu jak dużą nasiąkliwość, małą wodoszczelność, ograniczoną wytrzymałość oraz niekorzystne zjawiska reologiczne jak duży skurcz czy pełzanie. Jest prawdopodobne, że nie uda się jednocześnie znacząco poprawić wszystkich wymienionych cech ale polepszenie choć kilku z nich pozwoli na uzyskanie pełnowartościowego betonu specjalnego o ściśle określonym przeznaczeniu co jest w pełni zgodne z cytowaną w tej pracy zasadą odpowiedności.

Ewentualna przyszła produkcja kompozytów piaskobetonowych na Pomorzu Środkowym pomimo użycia drogich dodatków (mikrokrzemionka, włókna stalowe) była/by w pełni uzasadniona ekonomicznie. Zbrojenie rozproszone stanowi od 1 do 3% objętości betonu, a mikrokrzemionkę dozuje się w ilości 1-2% masy całego betonu. Zamiast ponosić koszty transportu 2 ton drogiego żwiru (na  $1\text{m}^3$  betonu) z odległości kilkuset kilometrów można transportować kilkadziesiąt kilogramów mikrokrzemionki i tyle samo zbrojenia rozproszonego.

W trakcie prowadzonych badań Autor zamierza określić minimalny, maksymalny oraz optymalny dodatek włókien stalowych i ich wpływ na poszczególne cechy piaskobetonu na bazie piasku miejscowego. Zaroby uznane za najbardziej optymalne będą dalej modyfikowane mikrokrzemionką. Celem badań będzie określenie najbardziej optymalnego lub optymalnych składów kompozytów betonowych na bazie piasku miejscowego, których cechy pozwolą na stosowanie ich zamiast zwykłych betonów konstrukcyjnych bądź żwirowych betonów specjalnych.

Badania będą prowadzone przy użyciu tylko i wyłącznie materiałów produkcji krajowej.

### 3. Stan zagadnienia.

#### 3.1. Kruszywa drobnoziarniste.

Rozmieszczenie zasobów kruszyw na terenie kraju jest bardzo nierównomierne. Najwyższy procent złóż udokumentowanych bo aż 70% znajduje się w strefie południowej Polski, w której występuje również poważna baza surowcowa w postaci kruszyw łamanych [37]. Zdecydowanie deficytowym w kruszywo jest rejon Polski środkowej i północnej. Na rysunku 3.1.1. przedstawiono mapę Polski z trzema strefami występowania kruszyw według Śliwończuka (patrz też tab.3.1.1.). Przytoczone dane dotyczą zasobów kruszywa naturalnego w ujęciu globalnym tj. łącznie żwirów, pospółek i piasków. Punkt piaskowy w poszczególnych strefach kruszywowych wynosi:

- strefa południowa 40%
- strefa środkowa 64%
- strefa północna 53%
- **na Pomorzu Środkowym od 55 do 95%**

Zawartość drobnych frakcji w krajowych pospółkach kopalnianych i rzecznych określona przez wysokość punktu piaskowego, który wynosi średnio [37]:

- **dla pospółek pomorskich i poznańskich - 75%**
- dla pospółek warszawskich i podgórskich - 52%
- dla pospółek z terenu całej Polski - 63%

Kruszywa na Pomorzu Środkowym są pochodzenia polodowcowego i występują jako piaski naturalne oraz pospółki zapiaszczone. Osobną grupę stanowią piaski odpadowe z odsiewek. Najbogatsze zasoby kruszyw występują w postaci zapiaszczonych pospółek a następnie piasków z odsiewek. Uziarnienie plejstocenijskich sypkich osadów pochodzenia lodowcowego i wodnolodowcowego wykazuje bardzo duże zróżnicowanie [162]. Piaski naturalne i pospółki zapiaszczone wykazują w obrębie złoża niekorzystne wskaźniki zmienności uziarnienia (patrz rys.3.1.2. oraz tab.3.1.2.) natomiast piaski z odsiewek posiadają korzystne wskaźniki zmienności uziarnienia. Wspólną cechą osadów lodowcowych i wodnolodowcowych jest

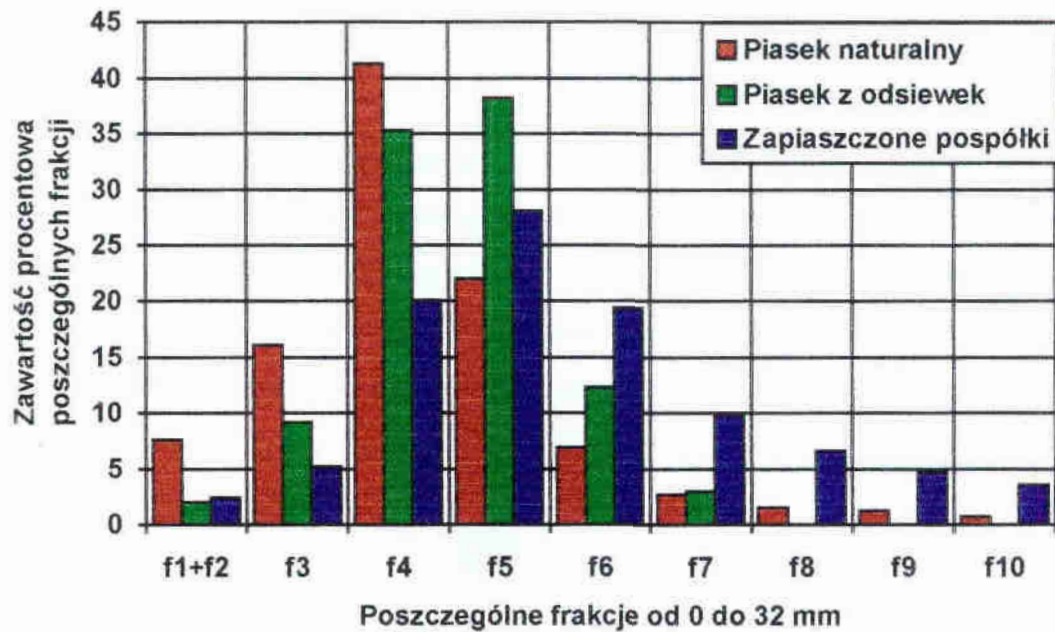




eksploatacji dokonuje się hydroklasyfikacji i uzyskuje w ten sposób tak zwany piasek odpadowy (piasek z odsiewek)

Tab.3.1.1. Wykaz całkowicie udokumentowanych i eksploatowanych złóż kruszyw naturalnych Pomorza Środkowego [27]. Wytluszczoną kursywą przedstawiono dane dotyczące kopalń w których w wyniku hydroklasyfikacji pospółki uzyskiwany jest piasek „odpadowy”

L.P.	Nazwa złoża	Gmina	Województwo	Rodzaj kruszywa	Zasoby w 1000 ton
<b>1</b>	<b><i>Sepólno Wiel</i></b>	<b><i>Biały Bór</i></b>	<b><i>Koszalińskie</i></b>	<b><i>pospółka</i></b>	<b><i>31572</i></b>
2	Włościbórz	Dygowo	Koszalińskie	pospółka	13321
3	Węgorzewo	Sianów	Koszalińskie	piasek	10294
<b>4</b>	<b><i>Drawsko Pom</i></b>	<b><i>Drawsko Pom</i></b>	<b><i>Koszalińskie</i></b>	<b><i>piasek+pospółka</i></b>	<b><i>5744</i></b>
<b>5</b>	<b><i>Parsecko</i></b>	<b><i>Szczecinek</i></b>	<b><i>Koszalińskie</i></b>	<b><i>pospółka</i></b>	<b><i>5340</i></b>
6.	Biały Dwór	Biały Bór	Koszalińskie	pospółka	4166
7	Kalisz Pom.	Kalisz Pom.	Koszalińskie	piasek	4080
8	Woliczno	Drawsko Pom	Koszalińskie	piasek+pospółka	3380
9	Rzesznikowo	Rymań	Koszalińskie	pospółka	2938
10	Długie I	Biały Bór	Koszalińskie	pospółka	2648
11	Lipie	St. Chwalim	Koszalińskie	pospółka	2317
12	Mielenko II	Drawsko Pom	Koszalińskie	pospółka	1871
13	Kuźnica Cz.	Trzcianka	Pilskie	pospółka	1581
14	Miełecin	Człopa	Pilskie	pospółka	1446
15	Mielenko I	Drawsko Pom	Koszalińskie	pospółka	1379
16	Ratajki	Sianów	Koszalińskie	pospółka	755
17	Mierzym	Świeszyno	Koszalińskie	piasek	695
18	Jeleń	Silnowo	Koszalińskie	piasek+pospółka	601
19	Strachomino	Będzino	Koszalińskie	pospółka	585
20	Rzeczyca	Polanów	Koszalińskie	pospółka	544
21	Kaliska	Biały Bór	Koszalińskie	pospółka	449
22	St. Chwalim	Barwice	Koszalińskie	pospółka	421
23	Siecino	Ostrowiece	Koszalińskie	pospółka	417
24	Karsno	Czaplinek	Koszalińskie	pospółka	385
25	Ostrowice	Czaplinek	Koszalińskie	pospółka	378
26	Żydowo	Polanów	Koszalińskie	pospółka	366
27	Obroty	Kołobrzeg	Koszalińskie	piasek	303
28	Rozcięcino	Kołobrzeg	Koszalińskie	piasek	288
29	Warblewo	Polanów	Koszalińskie	pospółka	252
30	Chlebowo	Ostrowiec	Koszalińskie	piasek	211
31	Siemianowice	Słupsk	Słupskie	piasek	209
32	Zelkowo	Główczyce	Słupskie	pospółka	195
33	Rąbino	Rąbino	Koszalińskie	pospółka	153
34	Polanów	Polanów	Koszalińskie	pospółka	148
35	Jawory	DebincaKasz	Słupskie	pospółka	106
36	Świdwinek	Świdwin	Koszalińskie	piasek	81
37	Brzeźno	Szczecinek	Koszalińskie	piasek	75
38	Piekary	Czaplinek	Koszalińskie	pospółka	72
39	Sianów	Sianów	Koszalińskie	piasek	60
40	Klepino	Białogard	Koszalińskie	piasek	43
41	Oskowo	Cewice	Słupskie	pospółka	21
				Σ=	99 890



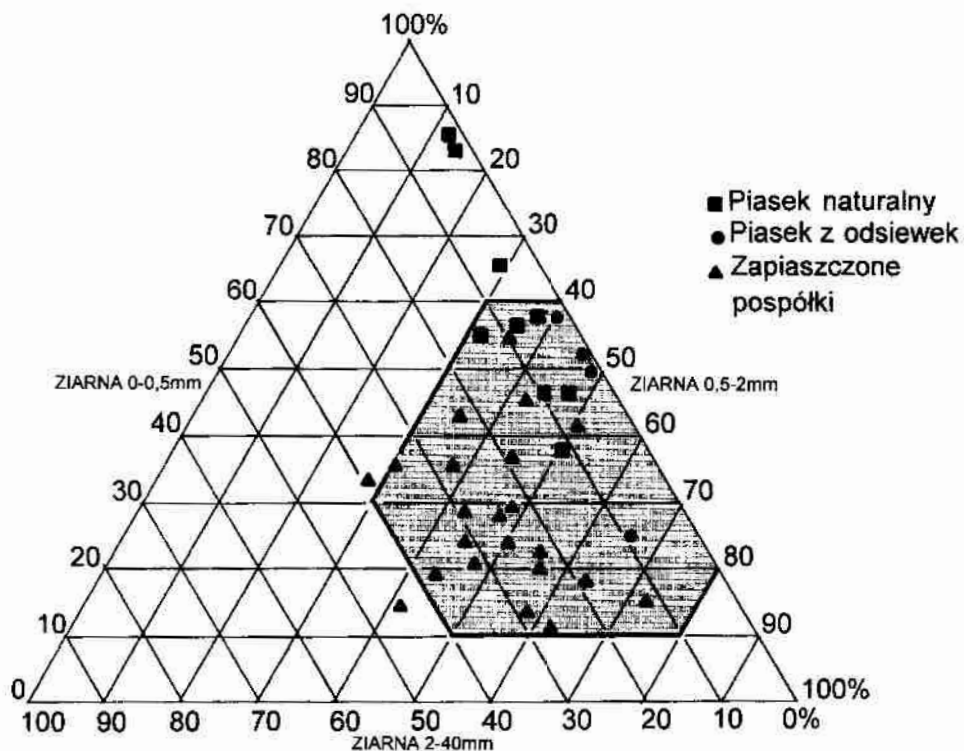
Rys.3.1.2. Histogram uziarnienia kruszyw Pomorza Środkowego [27]

Tab.3.1.2. Średnie wartości parametrów charakteryzujących kruszywa Pomorza Środkowego [27]

Właściwość i jednostka	Piaski naturalne	Piaski z odsiewek	Pospółki zapiaszczone
Gęstość pozorna g/cm <sub>3</sub>	2,56	2,56	2,56
Gęstość nasypowa w stanie utrzęszonym kg/m <sup>3</sup>	1853	1811	1853
Gęstość nasypowa w stanie luźnym kg/m <sup>3</sup>	1641	1638	1641
Jamistość %	27,5	28,5	27,5
Wskaźnik uziarnienia U <sub>k</sub>	4,0	3,6	4,6
Wskaźnik uziarnienia Hummela	66,8	75,4	105,3
Powierzchnia właściwa m <sup>2</sup> /kg	9368	6719	4871
Zapylenie kruszywa %	2,5	1,2	2,1
Wskaźnik zmienności zawartości pyłów	46	23	49
Wskaźnik zmienności uziarnienia frakcji 0-0,5	43,3	14,6	43,3
Wskaźnik zmienności uziarnienia frakcji 0-2,0	14,9	1,3	14,9
Wskaźnik zmienności uziarnienia frakcji > 2,0	52,6	62,4	52,6
Części nierozpuszczalne w HCL %	90,8	89,3	90,8

Udokumentowane złoża kruszyw Pomorza Środkowego wynoszą około 100 mln ton z czego 43% to złoża gdzie w trakcie wydobycia dokonuje się hydroklasyfikacji i uzyskuje się w ten sposób tak zwany piasek z odsiewek (odpadowy).

W celu syntetycznego opisanie uziarnienia kruszyw Pomorza Środkowego sporządzono dwa trójkąty (odpowiedniki trójkąta Fereta). Na rysunku nr 3.1.3. naniesiono uziarnienie w stanie naturalnym dla złoża lub zasobnika w przypadku piasku z odsiewek, a na rysunku 3.1.4. uziarnienie tylko i wyłącznie frakcji piaskowych (dla pospółek i części piasków naturalnych odsiano frakcje powyżej 4 mm)

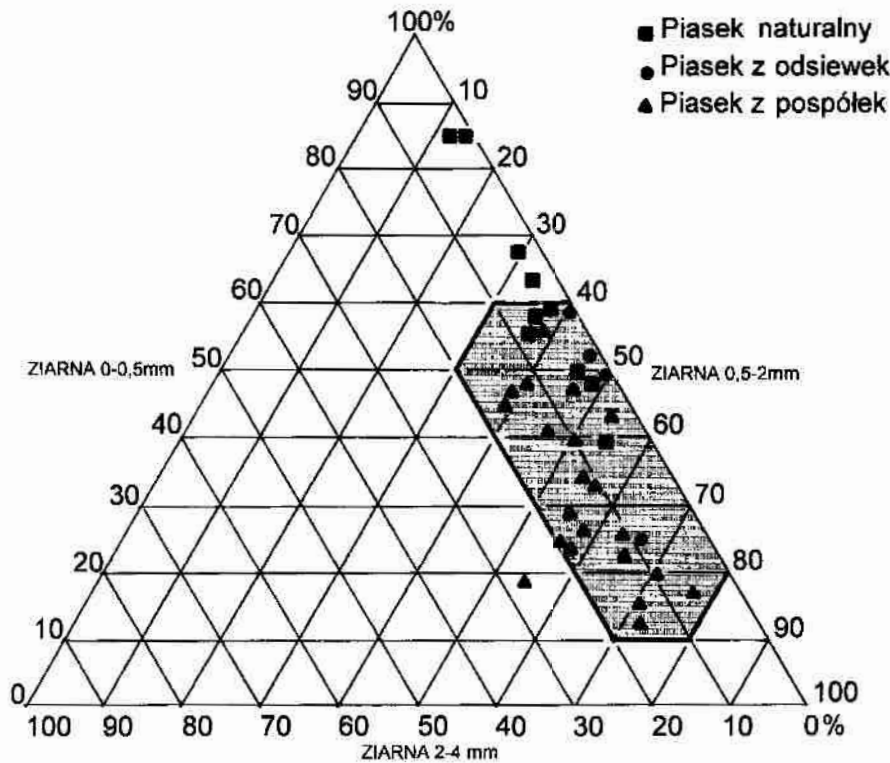


Rys.3.1.3. Uziarnienie kruszyw Pomorza Środkowego w stanie naturalnym [27].

Na rysunku nr 3.1.3. widzimy wyraźną koncentrację wyników w obrębie pola, które zakreślono grubą linią. Stanowi ono 30% pola całego trójkąta. Spośród badanych kruszyw piaski naturalne w największym procencie (ponad 40%) wykraczają poza charakterystyczne pole. Są to piaski drobne lub bardzo drobne o wysokich punktach pyłowo-piaskowych. W górnej części zakreślonego pola koncentrują się piaski z odsiewek i zapiaszczone pospółki.

trują się piaski naturalne i piaski z odsiewek a pospółki rozproszone są po całym polu z przesunięciem w kierunku środka trójkąta spowodowanym 10-40% zawartością frakcji żwirowych 2-40mm.

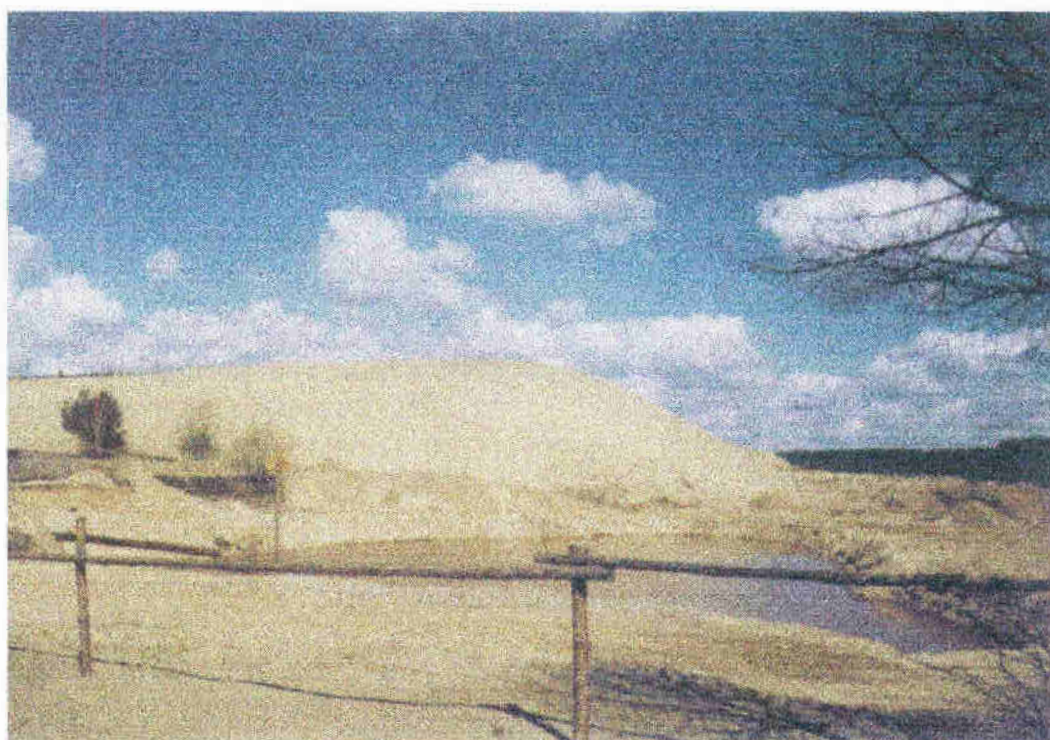
Rysunek 3.1.4. obrazuje układ grup frakcji w kruszywach piaskowych po odrzuceniu frakcji żwirowych powyżej 4 mm. Badane w ten sposób kruszywa wykazują większą koncentrację w trójkącie i zamykają się w polu stanowiącym 18% pola całego trójkąta. Piaski naturalne i piaski z odsiewek koncentrują się w górnej części trójkąta - są to piaski drobne. Piaski odsiane z pospółek posiadają większą zawartość frakcji 2-4 mm w ilości do 20% i wypełniają środkową oraz dolną część oznaczonego pola. Są to piaski o grubszym uziarnieniu.



Rys.3.1.4. Uziarnienie piasku na Pomorzu Środkowym po odrzuceniu frakcji >4 mm [27].

Piaski odpadowe uzyskane przez odsianie nadmiaru frakcji drobnych z wydobywanej pospółki są ciekawym surowcem. Piaski te posiadają mniejsze wskaźniki zmienności uziarnienia i większą zawartość minerałów oraz skał krystalicznych niż pospółki z której je odsiano. Piaski te odsiane w trakcie procesu kwalifikacji

zostają przemyte przez co zostaje odprowadzona znaczna ilość substancji ilastych (rys.3.1.5.) [23, 185]. Ma to ogromne znaczenie ponieważ powierzchnia właściwa piasku w znacznym stopniu zależy od obecnych w nim zanieczyszczeń. Różnica powierzchni właściwej między najgrubszymi, a najdrobniejszymi piaskami wynosi około  $20 \text{ m}^2$  na  $1 \text{ dm}^3$  całkowitej objętości piasku. Należy zaznaczyć, że powierzchnia właściwa  $1 \text{ dm}^3$  cząsteczek minerałów ilastych wynosi około  $2400 \text{ m}^2$ . Biorąc pod uwagę powyższe wartości, różnica 1% w zanieczyszczeniu minerałami ilastymi piasku, zmienia jego powierzchnię właściwą bardzo znacznie bo o około  $24 \text{ m}^2$ .



Rys.3.1.5. Widok hałdy piasku z odsiewek w kopalni kruszyw Sępólno Wielkie.

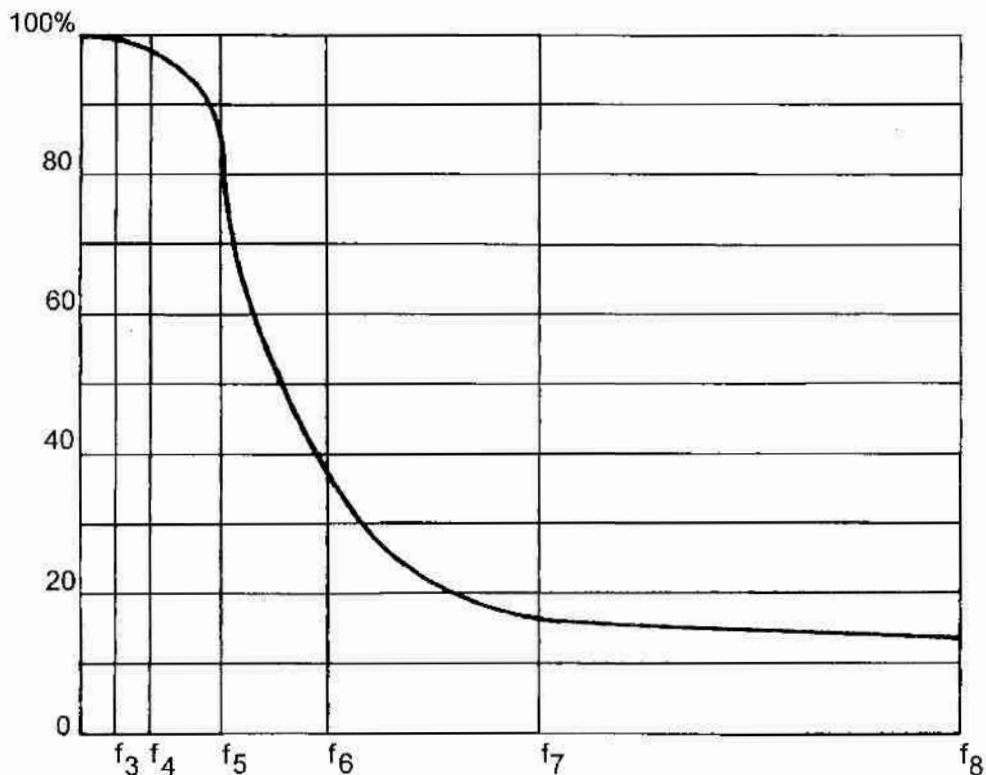
Wraz ze wzrostem rozdrobnienia piasków Pomorza Środkowego zwiększa się udział kwarcu, a wyraźnie zmniejsza udział pozostałych grup mineralno-petrograficznych. Wyraźne zwiększenie ilości kwarcu zauważalne jest już we frakcji  $0,5 - 1,0 \text{ mm}$  potęguje się we frakcjach drobnych [130]. Cechy te pozwalają przynajmniej teoretycznie przypuszczać, że istnieje możliwość opracowania łatwej w stosowaniu i opłacalnej z ekonomicznego punktu widzenia technologii produkcji pia-

skobetonu, który byłby materiałem jednorodnym a co za tym idzie wytrzymałym w szerokim tego słowa rozumieniu.

### 3.2. Piaskobeton.

#### 3.2.1. Początek technologii piaskobetonu.

Za początek badań dotyczących betonu piaskowego należy uznać rok 1920. Przedmiotem systematycznych badań między innymi Talbota i Grafa był wtedy optymalny skład zaprawy, którą uważano za podstawowy składnik każdego betonu [37]. Przez zaprawę rozumiano właściwie beton piaskowy, ponieważ badano stos okruszowy obejmujący ziarna od 0 do 5 mm. Dopiero w 1931 roku W. Paszkowski stwierdził, że kruszywo większe od około 2,5 mm nie wiąże kapilarnie wody (patrz rys. 3.2.1.1.) i wprowadził fizyczne rozróżnienie piasku od żwiru, na podstawie którego należy określać mieszaninę zaczynu z kruszywem zawierającym ziarna o średnicy mniejszej od 2,5 mm jako zaprawę a o średnicy większej od 2,5 mm jako beton [185].



Rys.3.2.1.1. Krzywa wiązliwości wody przez poszczególne frakcje kruszywa.

f<sub>3</sub>: 0,125 - 0,25; f<sub>4</sub>: 0,25 - 0,5; f<sub>5</sub>: 0,5 - 1,0; f<sub>6</sub>: 1,0 - 2,0; f<sub>7</sub>: 2,0 - 4,0; f<sub>8</sub>: 4,0 - 8,0 mm

Dalszych wiadomości na temat technologii betonu piaskowego dostarczyły badania techniki wytwarzania oraz własności mechanicznych konstrukcji siatkobetonowych. Twórcą tych konstrukcji, które pojawiły się w 1943 roku był Nervi (jeżeli nie liczyć łodzi Lambota z 1850 roku)[187].

### 3.2.2. Właściwości piaskobetonu.

Piaskobeton nie poddany żadnym zabiegom technologicznym charakteryzuje się w porównaniu do betonu zwykłego wysoką jamistością i porowatością, małą odpornością na lokalne uszkodzenia mechaniczne i na ścieranie, na działanie wilgoci i agresji chemicznej, a także mniejszą mrozoodpornością i wodoszczelnością a przy samej produkcji dużą cementochłonnością [37, 136, 137, 138,185].

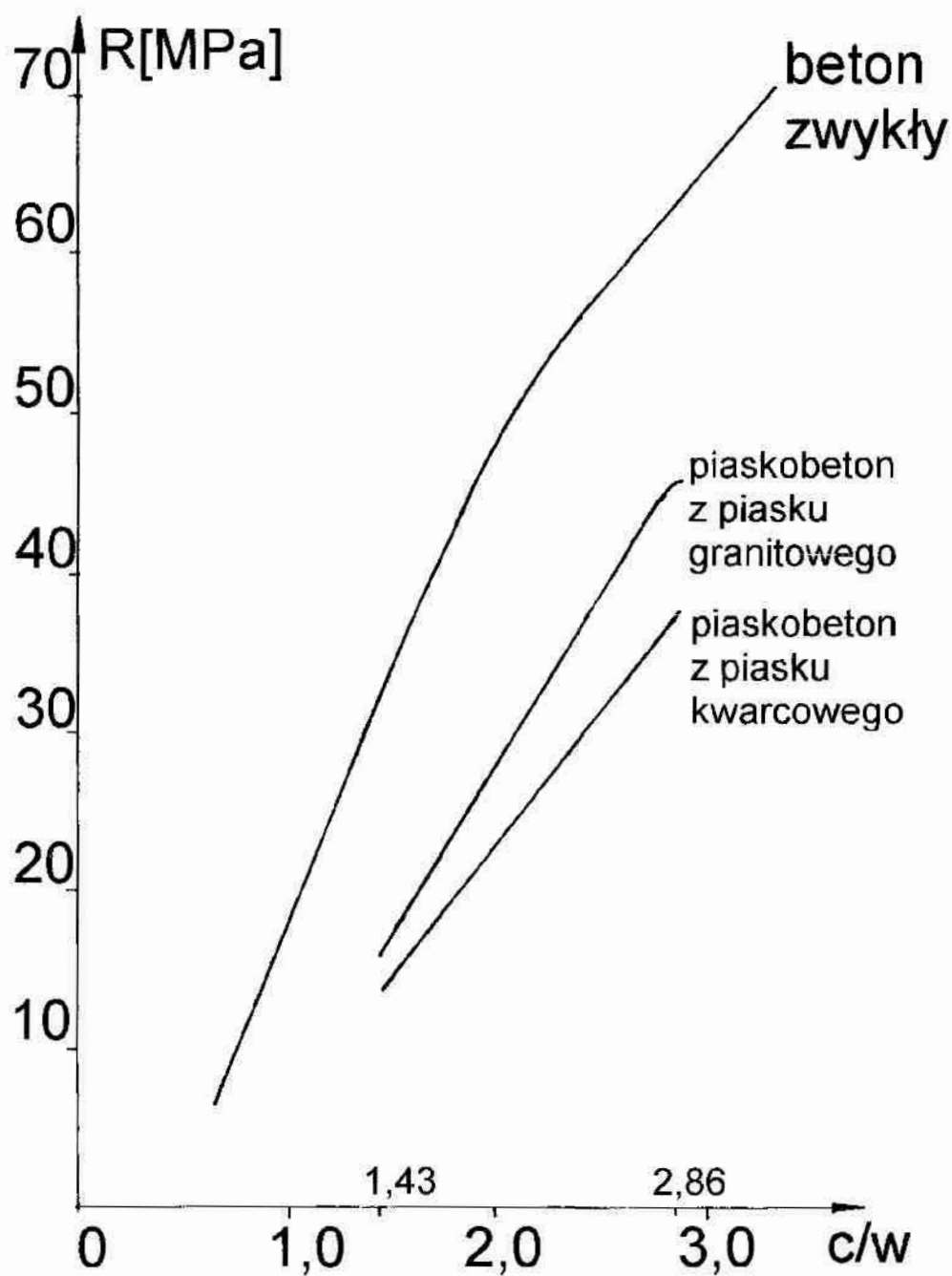
Na podstawie wyników dotychczasowych badań nad piaskobetonami, których obszerny przegląd zawarto w [37] można stwierdzić, że:

**Wytrzymałość piaskobetonu na ściskanie** badana na ogół na kostkach 15\*15\*15 cm wynosi od 9 do 45 MPa co odpowiada klasom betonu B7,5 do B40 (patrz rys 3.2.1.). Dolną wartość graniczną dotyczy piaskobetonów wykonywanych w oparciu o piaski drobne i przy zastosowaniu cementu portlandzkiego 35 w ilości 210 - 300 kg/m<sup>3</sup> a górną osiągnęto w przypadku stosowania piasków gruboziarnistych i cementu w ilości nie mniejszej niż 400 kg/m<sup>3</sup>. Pośrednie wytrzymałości otrzymywano dla wszystkich rodzajów piasków (drobno, średnio i gruboziarnistych) w zależności od ilości cementu wynoszącej od 300 do 400 kg/m<sup>3</sup>. W większości badań krajowych ze względów ekonomicznych i z uwagi na skurcz, ilość cementu portlandzkiego 35 nie przekraczała 450 kg/m<sup>3</sup>, a mieszanie składników odbywało się w betoniarce przeciwbieżnej.

**Wytrzymałość piaskobetonu na rozciąganie** stanowi 8 - 11% wytrzymałości kostkowej na ściskanie i jest o 10-15% niższa w stosunku do wytrzymałości na rozciąganie betonów zwykłych tej samej klasy.

**Nasiąkliwość wagowa piaskobetonu** wynosi od 4,8 do 12% i zależy od rodzaju stosowanego piasku, ilości cementu i konsystencji mieszanki. Wymogi dla betonów zwykłych wynoszą od 4 do 6%.





Rys.3.2.2.1. Porównanie wpływu wskaźnika  $c/w$  na wytrzymałość betonu zwykłego i piaskobetonu [27.37]

**Mrozoodporność piaskobetonu** wyrażona spadkiem wytrzymałości na ściskanie waha się od 6 do 13% a ubytek ciężaru próbki po 25 cyklach zamrażania

i odmrażania wynosi od 0,18 do 1,4%. Wymogi dla betonu zwykłego wynoszą odpowiednio 20% i 5%.

**Wodoszczelność piaskobetonu** badano sporadycznie. W piaskobetonie B20 wykonanym na bazie kruszywa 0/4mm o punkcie piaskowym 70% i cementu portlandzkiego w ilości  $383 \text{ kg/m}^3$  woda pod ciśnieniem 0,7 MPa przesiąknęła przez próbkę o grubości 10 cm po upływie 5 dni. W przypadku piaskobetonu klasy B25 wykonanego z kruszywa 0/4mm o punkcie piaskowym 87% i CP 35 w ilości  $390\text{-}430 \text{ kg/m}^3$  woda pod ciśnieniem 0,7 MPa wniknęła na głębokość od 2 do 5 cm po upływie 5 dni.

**Porowatość piaskobetonu** klasy B7,5 - B20 waha się od 8 do 11%. Wzrost porowatości o 1% powoduje spadek wytrzymałości na ściskanie o 5 do 8%. Struktura piaskobetonu jest bardziej porowata niż betonu zwykłego o czym świadczy także gęstość pozorna piaskobetonu która oscyluje od  $1970 \text{ kg}$  do  $2300 \text{ kg/m}^3$ .

**Moduł sprężystości piaskobetonu** jest o 15-20% niższy niż w betonie zwykłym tej samej klasy i zależy w dużym stopniu od uziarnienia piasku i ilości cementu.

**Przyczepność piaskobetonu do prętów zbrojeniowych** jest niższa niż w betonach zwykłych, ze względu na mniejszą wytrzymałość piaskobetonu na rozciąganie.

**Skurcz piaskobetonu**, który zawiera więcej cementu niż beton zwykły i charakteryzuje się zwiększoną porowatością wynosi od 0,2 do 0,6% i jest dwu, trzykrotnie wyższy niż betonu zwykłego (0,05 - 0,3%), a nierzadko przekracza 1%.

**Współczynnik pełzania piaskobetonu** w większości badań osiągnął wartość 2,1 - 2,7. W wytycznych do projektowania i stosowania piaskobetonu przyjęto dla piasków średnio i gruboziarnistych  $\phi_{p \text{ max}} = 2,5 - 3,2$  a dla piasków drobnoziarnistych  $\phi_{p \text{ max}} = 3,5$ . Współczynnik pełzania piaskobetonu jest więc blisko dwukrotnie większy od współczynnika pełzania betonu zwykłego.

Czynnikiem decydującym o odmiennej charakterystyce wytrzymałościowej piaskobetonów w stosunku do betonu zwykłego jest ich struktura. Strukturę tę

kształtuje ograniczona średnica ziarn kruszywa i zwiększona ilość cementu. W wyniku odsuwania ziarn piasku przez błonki wody jakie wokół tych ziarn tworzą występuje zjawisko pęcznienia masy piasku w miarę jego nawilżania [18].

W konsekwencji otrzymujemy beton o strukturze drobnoziarnistej bardziej porowatej od struktury betonu zwykłego. Wzrost porowatości betonu prowadzi do obniżenia jego wytrzymałości przy tej samej ilości cementu lub też konieczności zwiększenia ilości cementu w celu uzyskania założonej wytrzymałości. Według Nevilla zawartość porów w ilości 5% w stosunku do masy betonu, może zmniejszyć jego wytrzymałość na ściskanie nawet o 30% a 2% porowatości zmniejsza wytrzymałość o około 10%.

### **3.2.3. Dotychczasowe próby modyfikacji piaskobetonu.**

Od lat pięćdziesiątych były prowadzone zarówno w Polsce jak i w USA, RFN oraz Rosji badania nad możliwością poprawy cech piaskobetonu. Próbowano modyfikacji piaskobetonu na drodze próżniowania, autoklawizacji, mechanicznego zwiększenia aktywności cementu przez przemiał w młynach kulowych z dodatkiem miałkiego piasku, poddawano piaskobeton dwuetapowemu wibrowaniu niską i wysoką częstotliwością, stosowano mikrowypełniacze w postaci mączki kamiennej bądź popiołu lotnego oraz prowadzono dojrzewanie piaskobetonu w warunkach adiabatycznych. Każdy z wyżej wymienionych zabiegów (oraz wiele innych nie wymienionych) przynosił poprawę kilku parametrów piaskobetonu, tak że w niektórych przypadkach jego parametry były lepsze od betonu zwykłego. Niestety koszt skomplikowanych technologicznie zabiegów wytwarzania oraz pielęgnacji betonu piaskowego znacznie przewyższał uzyskane korzyści i prace te zarzucano ze względów ekonomicznych [173, 174, 185, 189].

### **3.2.4. Piaskobeton na bazie piasku odpadowego.**

Dzisiaj kiedy dostępne są zupełnie nowe dodatki do betonu jak mikrokrzemionka oraz możliwość zastosowania kształtowanych włókien stalowych, piasek

odpadowy Pomorza Środkowego znowu staje się interesującym surowcem do zagospodarowania we wszelkiego rodzaju betonach.

Stosowanie piasku jako kruszywa do betonu niesie za sobą wiele negatywnych zjawisk rzutujących na jakość gotowego betonu w tym przede wszystkim duże napowietrzenie świeżej mieszanki piaskobetonowej [137]. Fakt ten wpływa na późniejszą dużą nasiąkliwość, małą mrozoodporność oraz niską wodoszczelność. Prowadzone dotychczas przez Autora badania nad betonami szczelnymi [103,133,134] wykazały, że dodatek mikrokrzemionki bardzo uszczelnia beton, którego świeża mieszanka betonowa charakteryzowała się dużą zawartością powietrza. Wysoka reaktywność mikrokrzemionki w czasie sprawia, że pory świeżej mieszanki betonowej są w trakcie wiązania, a następnie dojrzewania betonu zapelniane produktami wiązania wolnego wapna przez mikrokrzemionkę. Proces uszczelniania betonu ma miejsce jeszcze w 180 dniu dojrzewania.

Inną wadą piaskobetonu jest to, że mechanizm niszczenia betonu w dużej mierze zależy od zastosowanego kruszywa. Energia potrzebna do zniszczenia betonu jest tym większa im większa jest średnica ziarn zastosowanego kruszywa. Im mniejsze ziarna tym większa koncentracja naprężeń następuje w zaczynie betonowym a proces zniszczenia przebiega przez zaczyn a nie przez ziarna kruszywa [47]. Autor uważa, że zjawisko to da się znacząco ograniczyć poprzez dodatek zbrojenia rozproszonego, które przejmie dużą część naprężeń gromadzących się w zaczynie i opóźni proces powstawania pierwszych mikropęknięć, które są początkiem procesu zniszczenia betonu.

W świetle przedstawionych powyżej faktów wykonanie kompozytu piaskobetonowego z wykorzystaniem piasku odpadowego, mikrokrzemionki oraz zbrojenia rozproszonego jest w pełni uzasadnione. Zastosowanie mikrokrzemionki oraz włókien stalowych równocześnie może spowodować oprócz opisanych powyżej zjawisk korzystny wpływ na inne cechy piaskobetonu.

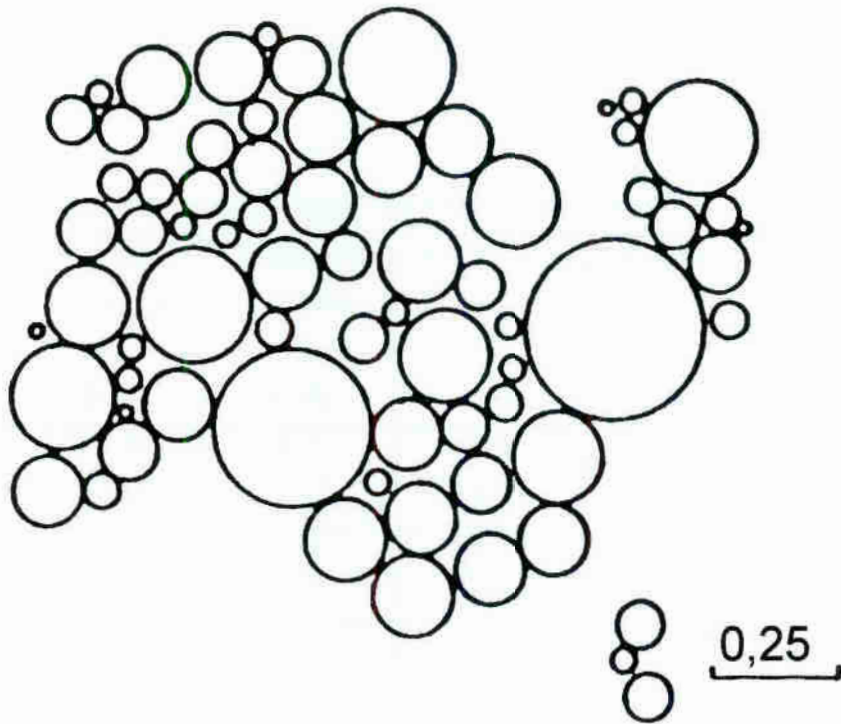
### 3.3. Mikrokrzemionka.

#### 3.3.1. Właściwości i pochodzenie mikrokrzemionki.

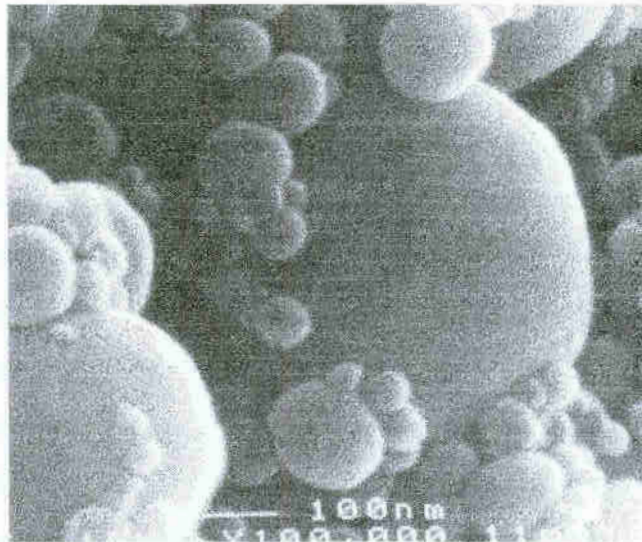
Mikrokrzemionka to produkt kondensacji pary krzemu wydzielanej przy stapianiu żelazokrzemu względnie krzemu w elektrycznych piecach łukowych. Na jedną tonę produkowanego stopu wytwarza się około 300 kg mikrokrzemionki [187, 188, 211]. Tworzy się ona w wyniku utleniania par  $\text{SiO}_2$  w fazie gazowej i strąca w urządzeniach odpylających. W literaturze zagranicznej występuje pod nazwą "silica fume", "condensed silica fume", "micropoz<sup>™</sup>", czy "microsilica<sup>®</sup>" [168]. Początkowo kłopotliwy odpad, obecnie zaczął być z powodzeniem stosowany jako wartościowy dodatek do betonu. Charakteryzuje się on bardzo dużą mialnością. Pyły krzemionkowe składają się z bardzo drobnych sferycznych cząstek bezpostaciowej krzemionki (rys.3.3.1.1. rys.3.3.1.2 ) o przeciętnej powierzchni właściwej około  $20 \text{ m}^2/\text{g}$ . Powierzchnia właściwa obliczona na podstawie absorpcji azotu waha się od 13 do  $30 \text{ m}^2/\text{g}$ , gęstość nasypowa wynosi ok.  $500 \text{ kg/m}^3$  [168]. Tą niezwykłą mialność ilustruje porównanie z innymi, powszechnie znanymi materiałami:

■ mikrokrzemionka	140 000 - 300 000 $\text{cm}^2/\text{g}$
■ popioły lotne	4 000 - 7 000 $\text{cm}^2/\text{g}$
■ cement portlandzki	3 000 - 4 000 $\text{cm}^2/\text{g}$

Rozkład uziarnienia mikrokrzemionki (rys.3.3.1.3.) wskazuje, że większość ziaren jest mniejsza niż  $1 \mu\text{m}$ ., a średni wymiar cząsteczek wynosi około  $0,1 \mu\text{m}$ . i jest w przybliżeniu 100 razy mniejszy od średniego wymiary ziarna cementu. Gęstość mikrokrzemionki w stanie naturalnym wynosi około  $2,2 \text{ g/cm}^3$  (cementu portlandzkiego  $3,1 \text{ g/cm}^3$ ), gęstość objętościowa w stanie luźnym  $130\text{-}430 \text{ kg/m}^3$  (cementu  $1500 \text{ kg/m}^3$ ). Ziarna mikrokrzemionki są szklanymi kuleczkami i łatwo ulegają aglomeracji, dlatego też muszą być dodawane do betonu przy zastosowaniu



Rys.3.3.1.1. Kształt i wielkość ziaren mikrokrzemionki (skala w  $\mu\text{m}$ ) - mikrofotografia wg [187]



Rys.3.3.1.2. Zdjęcie cząsteczek mikrokrzemionki wykonane elektronowym mikroskopem skaningowym (SEM) [202]

energicznego mieszania. W tych warunkach kuleczki mikrokrzemionki zostają równomiernie rozmieszczone między ziarnami cementu i odgrywają rolę wypełniacza.

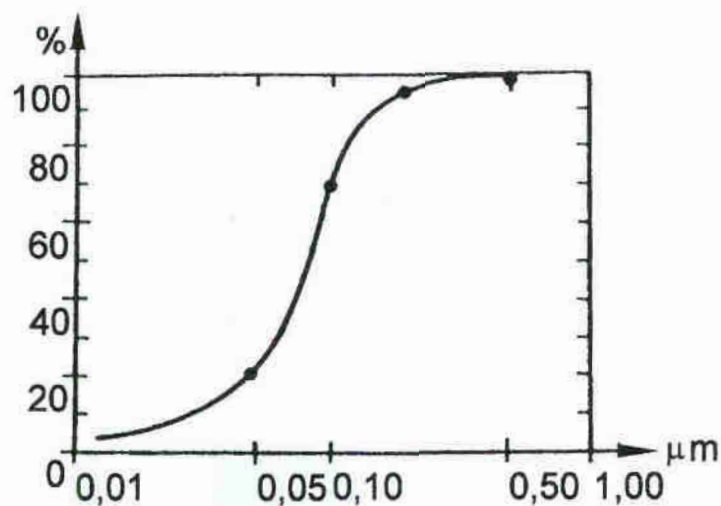
Tab. 3.3.1.1. Skład chemiczny mikrokrzemionki stosowanej na świecie [17, 202, 207, 208, 212].

Składnik	Europa Zachodnia % [17]	Kazachstan Pawłodar % [208]	Micropoz <sup>TM</sup> % [212]	Australia Simcoa % [202]	RPA Rand Carbine % [202]
SiO <sub>2</sub>	88 - 92	94,6	86-96	> 92	88-94
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5 - 2,5	0,4	0,2-2,2	0,3	1,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5 - 2,0	0,24	0,3-2,2	0,1	1,2
CaO	0,1 - 0,3	0,37	0,1-0,6	0,2	0,6
MgO	0,3 - 1,8	0,50	0,3-3,5	0,6	0,6
K <sub>2</sub> O	0,5 - 2,5	0,62	1,5-2,5	0,4	0,6
C	< 2	0,58	0,5-2,5	-	1,4
Na <sub>2</sub> O	-	0,40	0,8-1,8	0,2	0,2
SO <sub>3</sub>	-	-	0,4-1,5	-	-

Historia mikrokrzemionki sięga 1948 roku kiedy to w Norwegii uznano, że można ją stosować jako dodatek do betonu. W 1952 roku użyto mikrokrzemionki pierwszy raz na skalę przemysłową przy budowie tunelu Blindtarmen w Oslo [209]. Na większą skalę zaczęto stosować mikrokrzemionkę do betonu z początkiem lat siedemdziesiątych w Norwegii a następnie w wielu innych krajach. Pierwsze udokumentowane zastosowanie mikrokrzemionki na większą skalę w betonie konstrukcyjnym odnotowano w 1971 roku w hucie Fiskaa w Norwegii. 1978 rok to wprowadzenie na rynek pierwszego gotowego produktu z dodatkiem mikrokrzemionki CORROCEM. W Kanadzie rozpoczęto stosowanie mikrokrzemionki do betonu towarowego w 1981 roku, a w USA w 1983 roku podczas naprawy tamy w Pensylwanii [187]. Lata osiemdziesiąte to również opracowanie technologii dodawania suchej mikrokrzemionki do torkretu [209].

Obecnie znanym dostawcą mikrokrzemionki jest norweska firma o zasięgu światowym "Scancem" [168]. Zakłady „Scancem” znajdujące się w Finn Fjord

(Norwegia), Simcoa (rys.4.1.4., rys.4.1.5.)(Australia) oraz Rand Carbine w RPA produkują dużą część dostępnej na świecie mikrokrzemionki. „Scancem” sprzedaje mikrokrzemionkę w trzech postaciach - densified ( $500-700 \text{ kg/m}^3$ ), undensified ( $<400 \text{ kg/m}^3$ ) i raw ( $<300 \text{ kg/m}^3$ ). Mikrokrzemionka w zależności od potrzeb odbiorcy pakowana jest w papierowe worki po 20kg każdy (rys.3.3.1.6.), bulk bags o wadze 1100kg oraz w kontenery o wadze 20 000 kg (rys.3.3.1.7.).

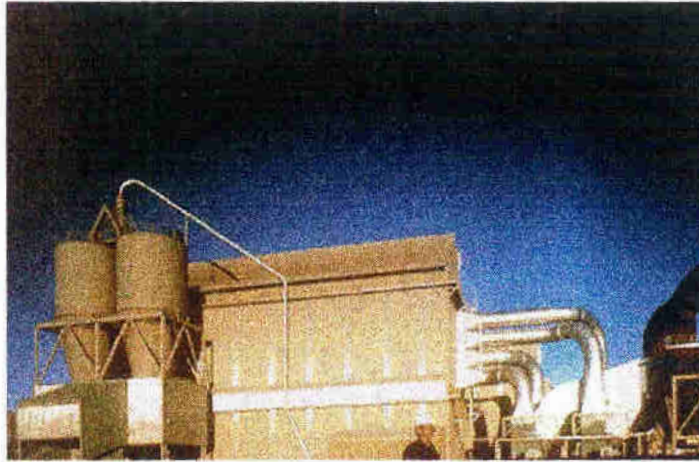


Rys.3.3.1.3. Rozkład uziarnienia mikrokrzemionki [187]



Rys.3.3.1.4. Zakłady w Simcoa w Australii wybudowane kosztem 120 milionów USD rozpoczęły produkcję w styczniu 1990 roku [202]





Rys.3.3.1.5. Pakownia mikrokrzemionki w Simcoa. Na pierwszym planie widoczne silosy z mikrokrzemionką [202].

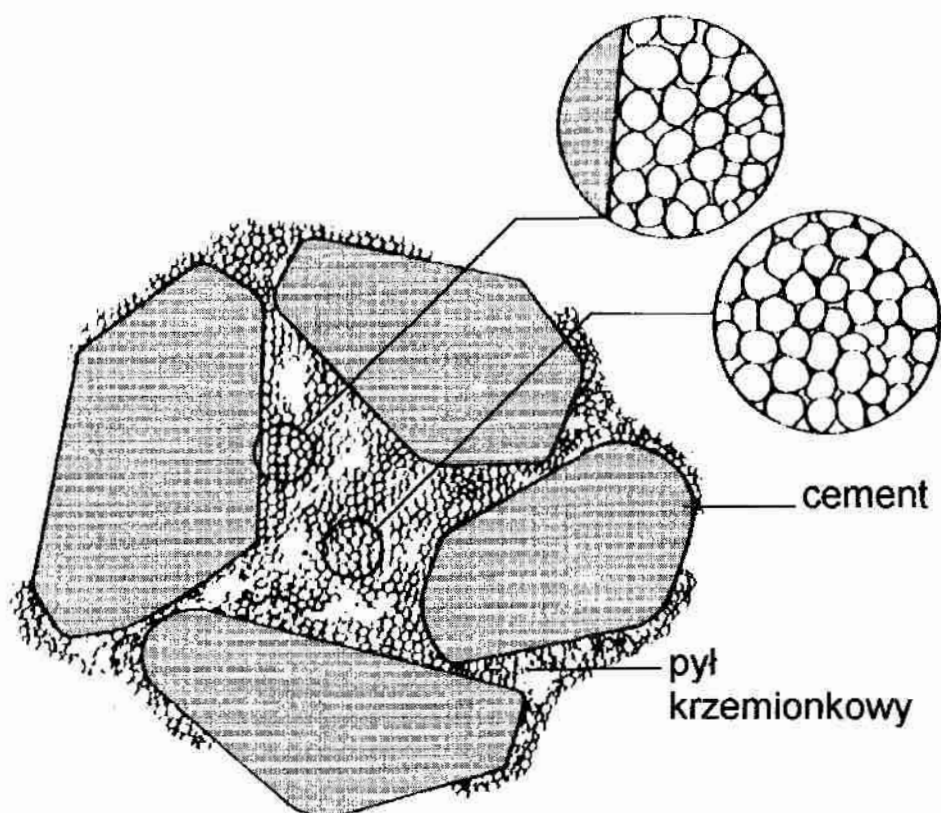


Rys.3.3.1.6. Mikrokrzemionka zapakowana w 20-kilogramowe papierowe worki ułożone na paletach przygotowanych do transportu.[202]



Rys.3.3.1.7. Rozładunek 20-tonowego kontenera z mikrokrzemionką [202]

Pierwsze normowe uregulowanie stosowania mikrokrzemionki do betonu miało miejsce w Szwecji dopiero w 1985 roku, kiedy zostały określone wymagania w formie uzupełniających zaleceń do normy BBK 79 [168]. Dotychczas norma państwowa dla mikrokrzemionki została ustalona w Kanadzie CAN3-A.23.1 i -A.23.5., USA ASTM C1240, w Europie EN 13263 oraz w Australii AS3582.3-1994.



Rys.3.3.1.8. Zaczyn z cementu DSP (zagęszczony układ zawierający równomiernie rozmieszczone drobniutkie cząstki mikrokrzemionki) [17]

Obecnie beton z dodatkiem mikrokrzemionki jest z powodzeniem stosowany w Skandynawii do umacniania nasypów drogowych i kolejowych oraz budowy przyczółków mostowych [139]. W ostatnich latach opracowano w Danii cement o bardzo dużych wytrzymałościach zwany "zagęszczonym układem, zawierającym

równomiernie rozproszony drobniutki cząstki", (DSP - Densified System containing homogeneously arranged ultra-fine Particles). Technologia zaczynów DSP opiera się na dużym dodatku krzemionki (rys.3.3.1.8.), bardzo reaktywnej w stosunku do wodorotlenku wapniowego [17]. Krzemionka ta ma do spełnienia podwójną rolę: materiału zapelniającego pory oraz reagenta wiążącego wodorotlenek wapniowy, powstały w trakcie hydratacji cementu portlandzkiego.

Tab.3.3.1.2. Właściwości krajowej mikrokrzemionki odpadowej z partii użytych w różnych badaniach [158]. Moduł  $M=(SiO_2+Al_2O_3)/(CaO+MgO+Fe_2O_3)$

Właściwości	Pył suchy według badań				
	P.Śląskiej 1971/1973	IMZ 1982	GiG 1988	ITB 1987/1988	Z.Pietrasa 1986/1990
Zawartość w %					
0 - 5 $\mu m$ .	52	-	85,5	93,9 - 99,9	86,3 - 100,0
5 - 50 $\mu m$ .	45	-	14,5	-	0 - 13,7
> 60 $\mu m$ .	3	-	0	0 - 6,1	0 - 3,45
Gęstość w $g/cm^3$	2,19	-	-	2,23	2,17 - 2,29
Zawartość %					
SiO <sub>2</sub>	86,93 - 91,6	89,0	94,0	94,1 - 93,7	91,54 - 92,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,90 - 3,61	1,22	0,55	0,64	0,54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,62 - 2,03	1,63	0,17	0,78	0,37
CaO	0,30 - 0,88	0,89	0,88	0,00	0,50
MgO	0,15 - 1,22	0,93	0,02	0,38	0,81
Na <sub>2</sub> O	-	-	0,11	0,75	0,37
K <sub>2</sub> O	-	1,28	0,31	1,98	1,49
SO <sub>3</sub>	0,94 - 1,12	-	0,83	0,07 - 0,63	1,35
Straty prażenia	1,26 - 4,47	1,2 - 1,5	2,64	0,63 - 0,74	1,26
Moduł M.	29,52	26,15	88,36	81,47	55,10

Pyłów krzemionkowych jest mało, ogółem 1,2 miliona ton na świecie, z czego 30% przypada na USA, Japonię i Norwegię. Polskie zasoby mikrokrzemionki szacuje się na 10 000 do 30 000 ton [17]. Z tego względu są one materiałem droгим. Duże rozdrobnienie i mała gęstość stwarzają równocześnie kłopoty

transportowe. Z tych powodów zainteresowanie mikrokrzemionką sprowadza się przede wszystkim do jej wykorzystania w betonach specjalnych.

Mikrokrzemionka dostępna w kraju jest sprzedawana w postaci suchego pyłu krzemionkowego zapakowanego przez producenta w plastikowe worki dwudziestokilogramowe. Mikrokrzemionka w postaci pyłu jest postacią najbliższą kolidowi powietrznemu, złożonemu z fazy rozproszonej z makrocząsteczek i cząsteczek krzemionki oraz z fazy rozpraszającej powietrza, mogących pozostawać przez dłuższy czas w specyficznej równowadze dzięki zjawiskom elektrostatycznym.

W kraju można również uzyskać ustabilizowaną wodną zawiesinę krzemionkową szczególnie przydatną przy stosowaniu mikrokrzemionki do betonów natryskowych (torkretu) [139].

W Polsce głównym producentem mikrokrzemionki jest Huta "Łaziska" [158], gdzie uzyskuje się ją przez wytrącenie w filtrach w ciągu oczyszczania spalin pieców do wytopu żelazokrzemu. Skład chemiczny polskiej mikrokrzemionki charakteryzuje się dużą stabilnością; ilość krzemionki utrzymuje się na wysokim poziomie, a pozostałe składniki, tj. tlenki żelaza, glinu, wapnia, magnezu i siarki, a także straty prażenia występują w niewielkich ilościach. Wysoka jakość polskiej mikrokrzemionki powoduje, że jest ona przedmiotem zainteresowania kontrahentów zagranicznych, a eksport obejmuje ponad 60% produkcji [187]. Wychwycony pył krzemionkowy podawany jest do stanowiska rozdzielczego, z którego wędruje do punktu workowań lub do zbiornika betonowego wypełnionego wodą. Ilość suchego pyłu, który można zaworkować wynosi maksymalnie ok. 60-70% obecnej ilości mikrokrzemionki odpadowej, natomiast do produkcji zawiesiny można skierować do 99% tej ilości. Zawiesina wodna mikrokrzemionki jest tak ustabilizowana, aby stężenie substancji krzemionkowej wynosiło 490-520g/kg zawiesiny a wartość pH utrzymywana jest na poziomie ok. 7 [158].

Mikrokrzemionka odpadowa należy do cennych surowców ponieważ nie ma właściwości toksycznych, kancerogennych i radioaktywnych, jest niepalna, nierozpuszczalna w wodzie, kwasach, reaguje tylko z wybranymi zasadami. Ekstrakty wodne pyłu krzemionkowego po sklarowaniu nie wykazują stężenia sub-

stancji uznanych za niebezpieczne i szkodliwe większego niż dopuszczalne dla wód powierzchniowych I klasy. Wszystko to pozwala klasyfikować mikrokrzemionkę jako surowiec odpadowy klasy IV [158] - uciążliwy dla środowiska wg tymczasowej klasyfikacji odpadów. Uciążliwość ta wiąże się przede wszystkim z bardzo drobnym uziarnieniem i ewentualnymi możliwościami wtórnego pylenia nie zabezpieczonych składowisk oraz migracji z wodą odpływową. Mikrokrzemionka w postaci zawiesiny nie stwarza takich zagrożeń, ale wymaga szczelnych i zabezpieczonych przed rozchłapywaniem środków transportu.

Prowadzone na świecie i w kraju badania wskazują, że najbardziej efektywnym i ekonomicznym dodatkiem mikrokrzemionki do betonu jest 15% wagi cementu [17,139,158]. Zastąpienie 15% cementu mikrokrzemionką zwiększa wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie o 20-30%, wodoszczelność wzrasta nawet kilkudziesięciokrotnie, zmniejsza się nasiąkliwość i ujednorodnia cała masa cementu [132,133].

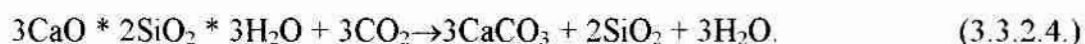
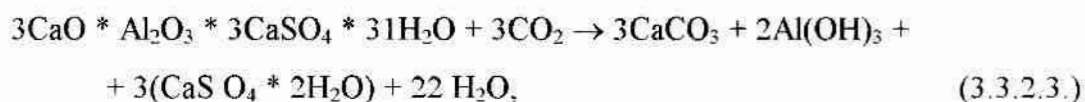
### **3.3.2. Teoria wiązania mikrokrzemionki w betonie.**

Pozytywny wpływ mikrokrzemionki na wytrzymałość, nasiąkliwość i prześlakliwość betonu daje się łatwo uzasadnić teoretycznie. Właściwości, a szczególnie wytrzymałość na ściskanie, takiego materiału kompozytowego jak beton, zależą od właściwości składników, a więc zaczynu i kruszywa, oraz od siły wiązań między tymi składnikami. W betonie tradycyjnym najmniej odkształcalne jest kruszywo, w nim koncentrują się naprężenia i przenoszą się na strefę kontaktową kruszywa z zaczynem. Pęknięcia biegną po powierzchni ziaren kruszywa, przez zaczyn, który ma mniejszą wytrzymałość. Oczywiście jeżeli wiązanie między zaczynem a ziarnami kruszywa ma dużą wytrzymałość, kruszywo hamuje rozprzestrzenianie się pęknięć. Wiązanie zaczynu z kruszywem odgrywa więc istotną rolę w pękaniu betonu. Badania rentgenowskie [17] strefy kontaktowej kruszywo-zaczyn wykazały, że wokół ziaren kruszywa powstaje strefa przejściowa, zwana "aureolą". Barnes i inni stwierdzili, że w tej strefie przejściowej krystalizuje wodorotlenek wapniowy, a następnie faza CSH.

"Aureola" stanowi najsłabszą strefę betonu, jest porowata i składa się z dużych jednakowo zorientowanych kryształów. Porowatość strefy przejściowej wynika z akumulacji wolnej wody wokół ziaren kruszywa oraz trudności z upakowaniem cząstek przy jego powierzchni (tzw. efekt ściany). W tym też obszarze gromadzi się więcej kryształów portlandytu, które są słabsze niż uwodnione krzemiany wapniowe CSH, oraz formują się duże kryształy  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (które stanowią 20% obj. zhydratyzowanego cementu) zorientowane równolegle do powierzchni kruszywa bądź zbrojenia. Objętościowy skład faz zhydratyzowanego cementu przedstawia się następująco [8]:

- 55% to amorficzna faza (żel) C-S-H, przy czym ok. 25% objętości tej fazy to pory żelowe,
- 20% to duże (<1 mm) kryształy CH,
- 10% to kryształy etryngitu (<10  $\mu\text{m}$ ) i monosulfitu (<1  $\mu\text{m}$ ),
- 15% to pory kapilarne powstałe po odparowaniu wody.

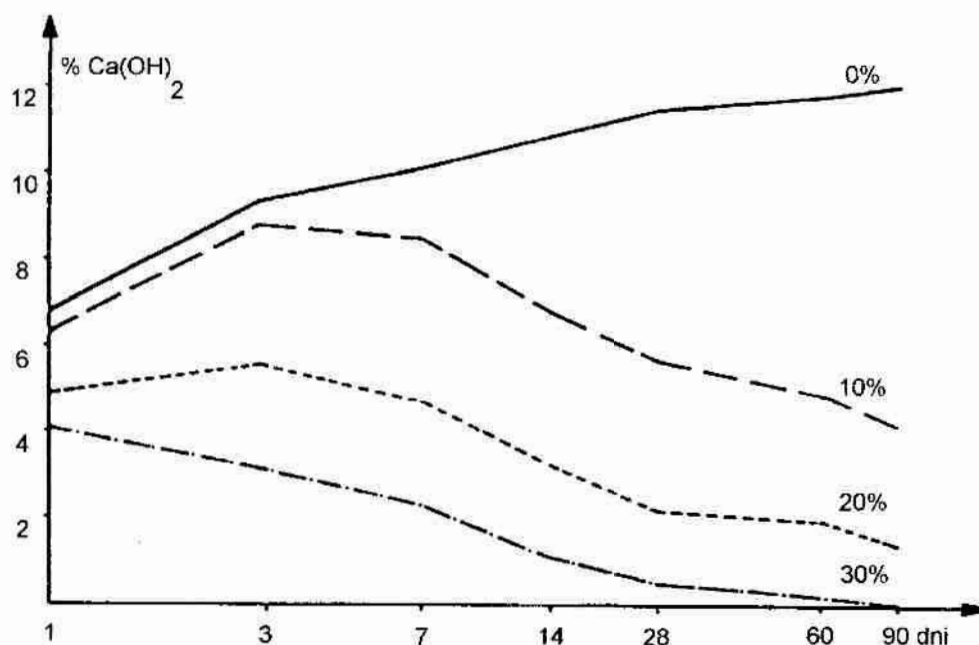
Trzeba przy tym pamiętać, że  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - jako łatwo rozpuszczalny i bardzo zasadowy składnik jest czynnikiem odpowiedzialnym za obniżenie trwałości stwardniałego zaczynu, zwłaszcza w środowisku kwaśnym. Z upływem czasu, w przypadku środowiska wilgotnego, składniki stwardniałego zaczynu cementowego łączą się z  $\text{CO}_2$  z powietrza. Jest to proces karbonizacji:



Proces ten jest powolny, można przyjmować, że w ciągu roku ulega karbonizacji warstewka betonu o grubości 0,5 - 1 mm. W wyniku karbonizacji zmienia się sze-

reg właściwości betonu, m.in. zmniejsza się zdolność ochrony antykorozyjnej betonu wobec stali zbrojeniowej [8].

Dodatek pyłów krzemionkowych kilkakrotnie zmniejsza porowatość strefy przejściowej poprzez zagęszczenie jej struktury i wypełnienie wolnych przestrzeni (następuje znaczne zmniejszenie porowatości w obszarze porów kapilarnych od 1000 do 10 000  $\mu\text{m}$ . [187]). Dzięki temu zmniejsza się wielkość kryształów portlandytu, jak i stopień ich orientacji względem kruszywa. W konsekwencji następuje redukcja samoczynnie oddawanej wody, zmniejszenie porowatości strefy przejściowej oraz poprawa przyczepności zaczynu do kruszywa i stali.



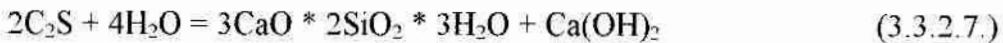
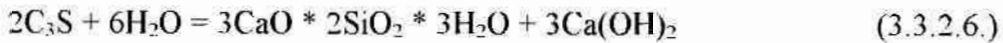
Rys. 3.3.2.1. Zmiana ilości wodorotlenku wapniowego w zaprawach z różną ilością dodatku MK w czasie [187].

Bardzo drobne uziarnienie i rozwinięta powierzchnia ziaren bezpostaciowej mikrokrzemionki decydują o wysokich właściwościach pucolanowych (wskaźnik aktywności pucolanowej mikrokrzemionki wynosi 359%, a popiołów lotnych od 139 do 180%) i pozytywnym jej wpływie na cechy betonu. Krzemionka w takiej postaci łatwo wchodzi w reakcje z wodorotlenkiem wapniowym uwalnianym w

procesie hydratacji cementu (rys.3.3.2.1.), zwiększając tym samym ilość uwodnionych krzemianów wapniowych typu CSH w wyniku reakcji (3.3.2.5.) wg. [187], a nie zhydratyzowane jądra ziaren cementu stanowią mikrowypełniacz o dużej wytrzymałości [17].



Około 70% cementu portlandzkiego stanowią dwie fazy krzemianowe (tab), dwa główne minerały : alit - zbudowany na osnowie sieci przestrzennej krzemianu trójwapniowego ( $\text{C}_3\text{S}$ ) i belit - oparty na strukturze odmiany ortokrzemianu wapniowego ( $\beta - \text{C}_2\text{S}$ ). Model stechiometryczny realnie odwzorowujący chemizm pełnej hydratacji obu krzemianów wygląda następująco [8]:



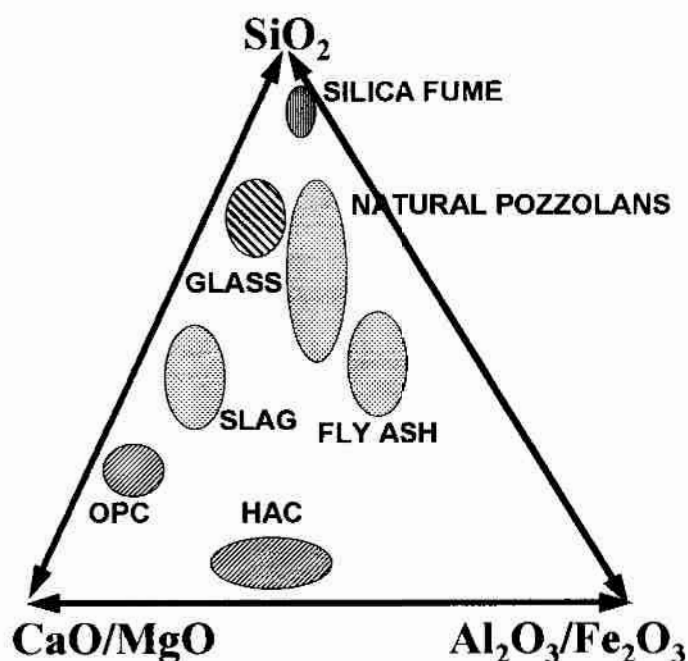
Tab.3.3.2.1. Skład mineralogiczny cementu portlandzkiego [8].

Nazwa Mineralu	Główny składnik chemiczny			Zawartość % wag.	
	nazwa chemiczna	symbol chemiczny	oznaczenie skrótowe	globalnie cementy portlandzkie	cement ogólnego stosowania
ALIT	krzemian trójwapniowy	$3\text{CaO} * \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	30-65	50
BELIT	krzemian dwuwapniowy	$2\text{CaO} * \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	15-45	20
	glinian trójwapniowy	$3\text{CaO} * \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	5-15	10
BRAUN- MILLERYT	glinożelazian czterowapniowy	$4\text{CaO} * \text{Al}_2\text{O}_3$ $* \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	5-15	7
GIPS	siarczan wapniowy dwuwodny	$\text{CaSO}_4 * 2 \text{H}_2\text{O}$	$\text{CSH}_2$	2-5	5



W masie produktów hydratacji alitu zawiera się ok. 39% wodorotlenku wapniowego, a hydratacja belitu daje produkty zawierające niecałe 18%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Każdy gram alitu daje po przereagowaniu z wodą około 0,49g  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , natomiast jeden gram belitu około 0,21 g  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Tak powstały  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dzięki reakcji z mikrokrzemionką włączany jest do sieci przestrzennej uwodnionych krzemianów wapniowych CSH.

Ta nowo utworzona faza CSH charakteryzuje się mniejszym stosunkiem C/S (nawet do 1,4) niż CSH wynikająca z hydratacji cementu. W konsekwencji ma ona zdolność do przyłączania innych jonów, szczególnie alkaliów, co ma istotne znaczenie ze względu na wykorzystanie mikrokrzemionki do redukcji ekspansji spowodowanej reakcjami alkalia-kruszywo.



Rys. 3.3.2.2. Diagram Rankina dla różnych materiałów [202]

Gdzie: silica fume - mikrokrzemionka, natural pozzolans - pucolany naturalne, glass - szkło, slag - żużel, fly ash - popiół lotny, OPC (ordinary portland cement) - cement portlandzki zwykły, HAC (high alumina cement) - cement glinowy.

Według Kurdowskiego [17] mikrokrzemionka, w wyniku dużej aktywności pucolanowej reaguje z wapnem już po jednym dniu, a wzrost wytrzymałości za-

prawy z cementem z dodatkiem pyłów krzemionkowych zaznacza się po dziesięciu dniach.

Dodatek do cementu mikrokrzemionki przesuwa cement na diagramie Rankina w kierunku materiałów ceramicznych (rys 3.3.2.2.)

W Polsce beton modyfikowany mikrokrzemionką zastosowano dotychczas do budowy dwóch sztolni hydrotechnicznych zapory wodnej w Świnnej Porębie i do remontu tunelu kolejowego w Tunelu pod Krakowem [101]. W 1991 roku ITB wydał świadectwo 869/91 dopuszczające do powszechnego stosowania cement SG-45 (specjalny górniczy) produkowany przez Cementownię „Odra” w Opolu zawieraiacv dodatek mikrokrzemionki [135].

### 3.4. Zbrojenie rozproszone.

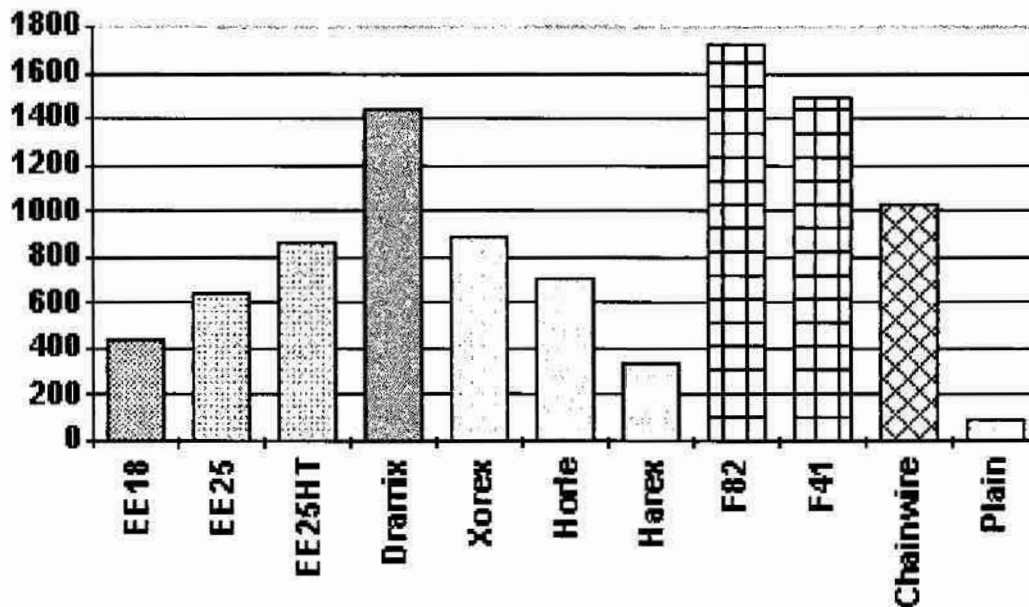
#### 3.4.1. Początki stosowania włókien stalowych do modyfikacji betonu.

Zbrojenie rozproszone to krótkie kawałki cienkiego drutu stalowego nazywane umownie włóknami stalowymi [11] dodawane do betonu oprócz podstawowych składników. Beton uzbrojony włóknami stalowymi nazywany jest *fibrobetonem* [3,4,13], *drutobetonem* [11] lub *SFRC* (*steel fibre reinforced concrete*) [30]. Korzystny wpływ dodatków o wydłużonej budowie na niektóre właściwości materiałów budowlanych stwierdzono już bardzo dawno temu. Kiedyś dodawano ciętej słomy i sierści bydłej do wyrobów z gliny a następnie włókien azbestu do zaczynu cementowego.

W 1910 roku Porter jako pierwszy wspomniał o stosowaniu do betonu krótkich drutów, które miały poprawić „jednorodność właściwości betonu”. W 1938 roku N. Zitkewic opatentował sposób na „zwiększenie wytrzymałości i udarności betonu przez dodanie ciętych kawałków drutu z miękkiej stali”. Zainteresowanie takimi betonami poparte badaniami datuje się dopiero na rok 1960 [11]. W 1963 roku Romualdi i Baston przedstawili pierwszą teorię drutobetonu i rozpoczęli jego wdrożenie. Technologię tego betonu opatentowano pod nazwą „Wirand”, stosując do niego włókna stalowe o długości 25 mm i kruszywo drobnoziarniste [11]. Pierwsze normy dotyczące betonu zbrojonego włóknami stalowymi powstały w Japonii (JSCE SF4 ) i w Anglii (BS 1881-83) w 1983 roku. W 1984 roku została wprowadzona norma amerykańska ASTM C-1018-84 (ostatnio zmodyfikowana jako ASTM C 101894b). Zalecenia holenderskie CUR 10 ukazały się dopiero w 1986 roku, norma belgijska NBN B 15-238 w 1992 a norma francuska P 18-409 w 1993 roku. Cały szereg zaleceń niemieckich dotyczących zbrojenia rozproszonego w betonie pod nazwą DBV-Mergblätter wydano w latach 1992/1993 [99].

### 3.4.2. Elementy teorii i właściwości fibrobetonów.

Betony uzbrojone stalowymi włóknami rozproszonymi stanowią najważniejszą grupę kompozytów, poza klasycznym betonem, przeznaczonych do konstrukcji budowlanych i komunikacyjnych. Elementy uzbrojone w ten sposób nabierają niektórych właściwości żelbetu lub siatkobetonu o bardzo skutecznie rozmieszczonym systemie cienkich siatek. Skuteczność uzbrojenia włóknami rozproszonymi zależy od wielu czynników, z których najważniejsze trzy omówiono poniżej [4]:

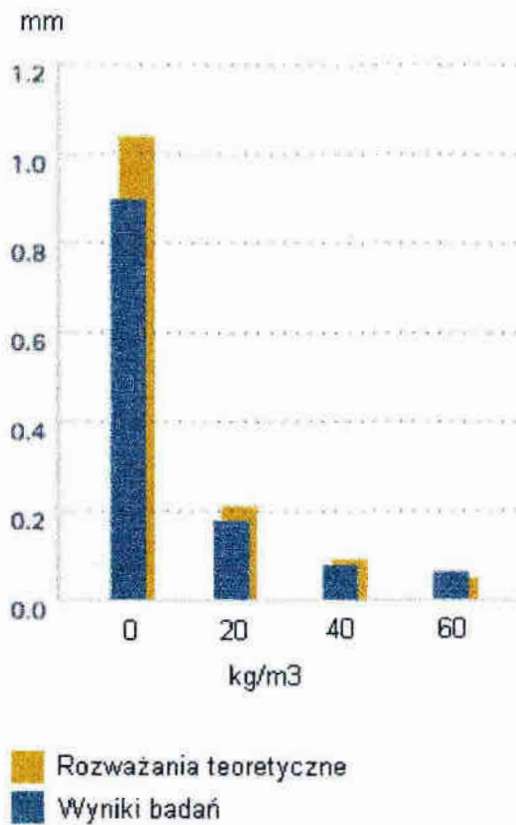


Rys.3.4.2.1. Efektywność różnego rodzaju włókien stalowych (wyrażona za pomocą bezwymiarowego współczynnika) stosowanych w Australii przy badaniu absorpcji energii podczas niszczenia cmentu fibrobetonowego [202]

1. Procentowa zawartość włókien w kompozycie i ich rzeczywiste rozmieszczenie w elemencie.

Objętość włókien stalowych ze względów technologicznych nie może przekraczać 3% objętościowo aby nie powodować plątania się włókien podczas mieszania - tak zwane powstawanie „jeży” (balling) [4]. Dodatek zbrojenia rozproszonego rów-

niez w widoczny sposób zmniejsza urabialność mieszanki betonowej, w przybliżeniu o jeden przedział wielkości, np. z K-4 na K-3.

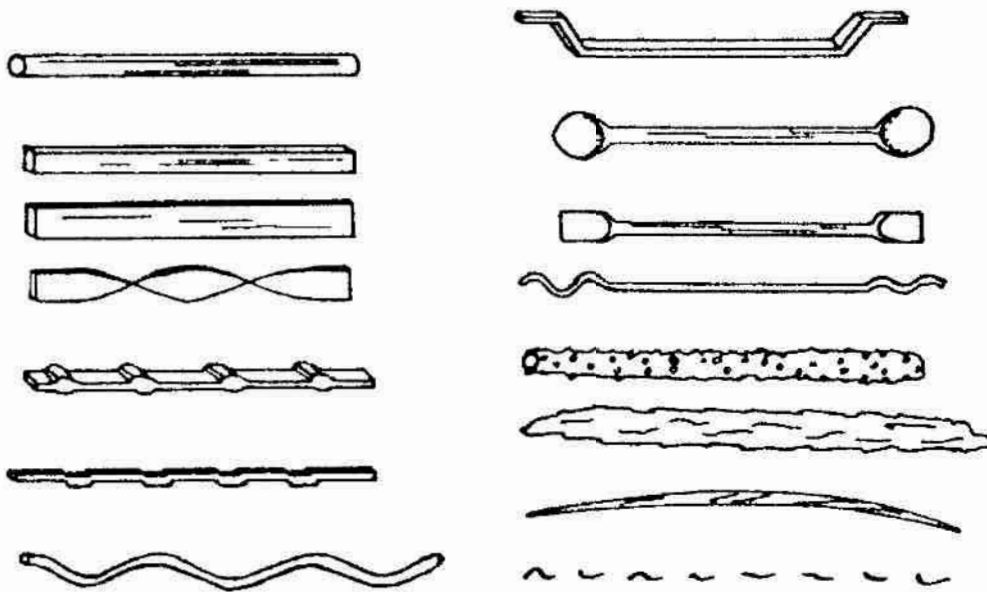


Rys.3.4.2.2. Średnie rozwarście rys w zależności od zawartości włókien w betonie [213].

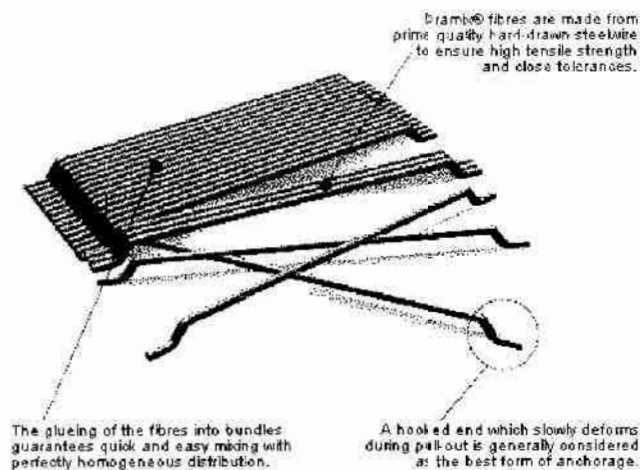
## 2. Kształt włókien i ich przyczepność do matrycy.

Oprócz włókien ciętych z gładkiego drutu często stosowane są włókna o zwiększonej przyczepności, nagniatane albo zaopatrzone w wygięcia. Kształt geometryczny jest tak dobierany, aby wpływał na siłę zakotwienia włókien w betonie. Na rys.3.4.2.1 przedstawiono efektywność różnych włókien stalowych. Rysunek 3.4.2.2. przedstawia najczęściej spotykane kształty produkowanych włókien. Są to włókna o przekroju kołowym, kwadratowym lub prostokątnym, gładkie o przekroju prostokątnym lekko skręcone, o chropowatej powierzchni wywołanej prowokowaną korozją lub przez wyżarzanie, karbowane przez nałożenie innego materiału, karbowane przez nagniatanie, faliste, o niejednorodnym przekroju i kształcie

uzyskiwane przez rozbryzg żeliwa lub przez struganie bloków stalowych, zakończone obustronnie haczykami, zgrubieniami, spłaszczeniami lub falami. Każdy z wymienionych typów jest dodatkowo różnicowany średnicą i długością. Stwierdzono, że ze względu na urabialność mieszanki betonowej smukłość włókien l/d powinna wynosić do 150.



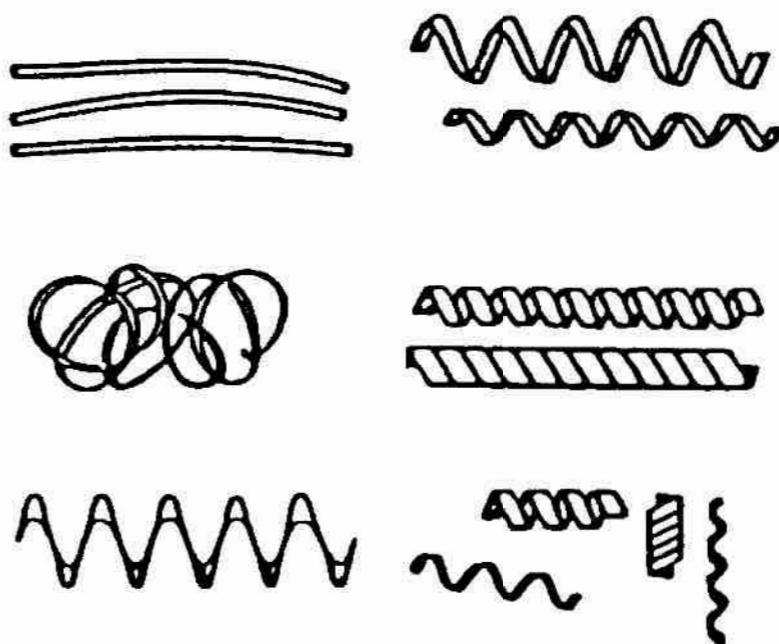
Rys.3.4.2.3. Przykłady kształtów włókien produkowanych (opis w tekście) [11].



Rys.3.4.2.4. Włókna stalowe do betonu Dramix [210].

Najbardziej renomowanym producentem włókien stalowych do betonu jest belgijska firma Bekaert założona w 1880 roku przez L.L.Bekaert'a, która od lat dwudziestych XX wieku zasięgiem swego działania obejmuje cały świat [210]. Produkuje ona włókna kilku rodzajów pod wspólną nazwą Dramix. Włókna Dramix dostarczane są w formie włókien sklejonych w pasma (rys.3.4.2.4.), co według producenta zapewnia łatwe zmieszanie włókien z innymi składnikami betonu oraz ich równomierne rozmieszczenie w mieszance betonowej. Fibrobetony z dodatkiem włókien Dramix są z powodzeniem stosowane na całym świecie do budowy tuneli, kopalń, metra, posadzek przemysłowych, chodników, pali fundamentowych, torkretu oraz betonowania podwodnego.

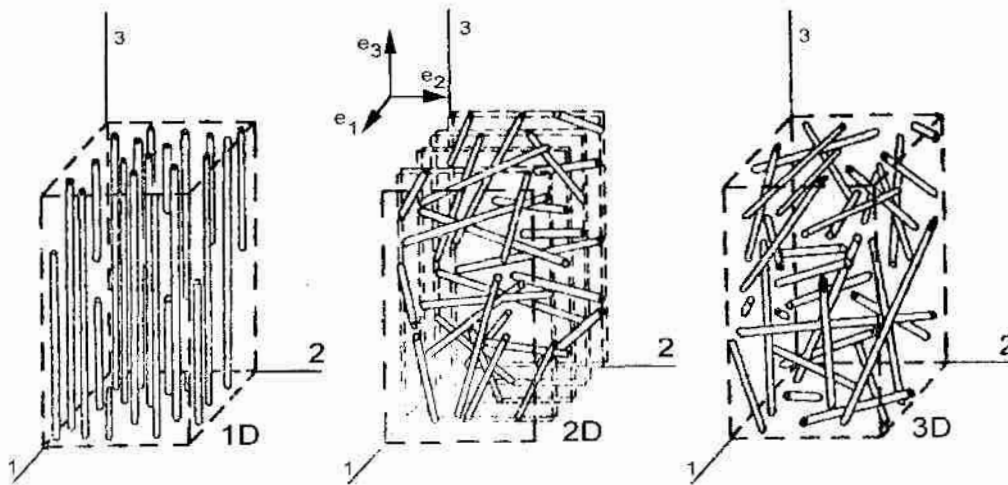
Czasami zamiast włókien produkowanych stosuje się włókna stalowe odpadowe [111]. Są to przeważnie odpady po skrawaniu, toczeniu lub innej obróbce elementów metalowych. Najczęściej spotykane kształty takich włókien przedstawiono na rys 3.4.2.5.



Rys.3.4.2.5. Przykłady kształtów włókien odpadowych wg [111]

3. Ułożenie włókien w stosunku do kierunków głównych naprężeń rozciągających w różnych obszarach elementu.

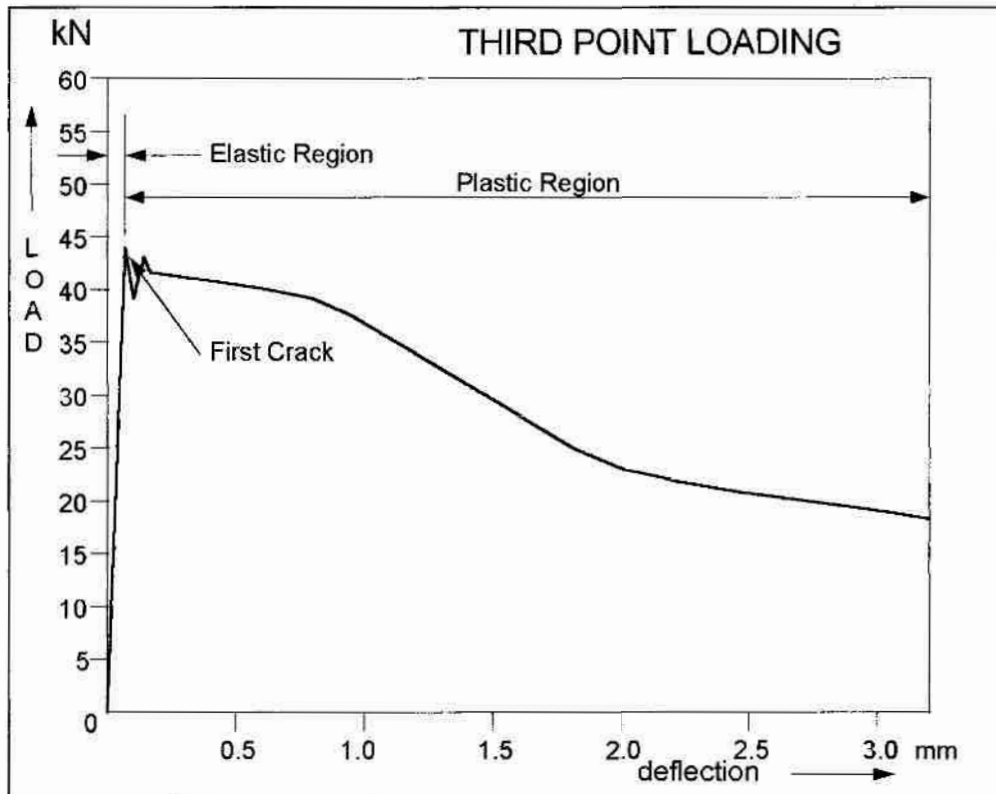
Ze względu na ukierunkowanie włókien w betonie wyróżnia się układ przestrzenny - 3D, to znaczy taki, w którym włókna są ukierunkowane równomiernie we wszystkich kierunkach; układ płaski - 2D, w którym wszystkie włókna są równoległe do jednej płaszczyzny oraz układ liniowy - 1D w którym wszystkie włókna są równoległe do siebie [11]. Na rysunku nr 3.4.2.6. przedstawiono wszystkie trzy formy orientacji zbrojenia rozproszonego [13]. W dotychczasowych badaniach i praktyce budowlanej stosowano betony o uziarnieniu kruszywa do 4 lub do 8 mm choć stwierdzono, że wielkość ziaren kruszywa wpływa na rozkład włókien w betonie i lepsze wyniki uzyskuje się przy zastosowaniu kruszyw drobniejszych [126]. Włókna stalowe ulegają najlepszemu rozkładowi w betonie wykonanym z kruszyw o uziarnieniu do 4 mm co obrazuje rysunek nr 3.4.2.8. Prace nad tymi kompozytami betonowymi porzucono na rzecz betonów wykonywanych z kruszyw grubszych ze względu na ich dużą cementochłonność [11].



Rys.4.4.2.6. Typy orientacji włókien (opis w tekście) [4.13].

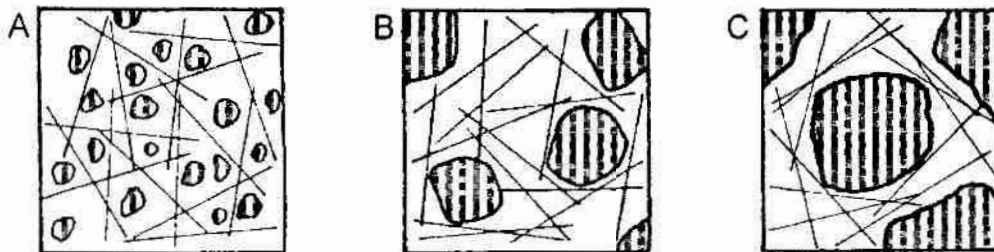
Poprawnie wykonany fibrobeton wykazuje dużą wytrzymałość na zginanie (rys.3.4.2.7.), lepszą niż beton niezbrojony, i prawie niezmienną wytrzymałość na ściskanie. Może natomiast ulegać dość znacznym odkształceniom, przy których zamiast szerokich rys pojedynczych pojawia się siatka rys drobniejszych [13].





Rys.3.4.2.7. Przykładowa zależność odkształcenie-obiężenie przy trzypunktowym zginaniu dla fibrobetonu [202]

Wpływ włókien określić można przy pomocy pojęcia efektywności wyrażonej w procentach, która wyraża przyrost danej cechy w drutobetonie w stosunku do betonu niezbrojonego. W tabeli 3.4.2.1. zestawiono efektywność dodania włókien prostych o średnicy  $d = 0,25$  mm i długości  $l = 25$  mm w ilości 1,5% objętościowo do betonu zwykłego.



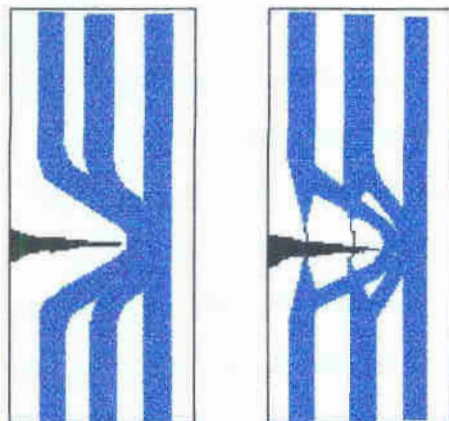
Rys.3.4.2.8. Rozkład włókien w układzie 2D w zależności od wielkości ziaren kruszywa:  
A - 4mm, B - 8 mm, C - 16 mm [11]

Tabela 3.4.2.1.

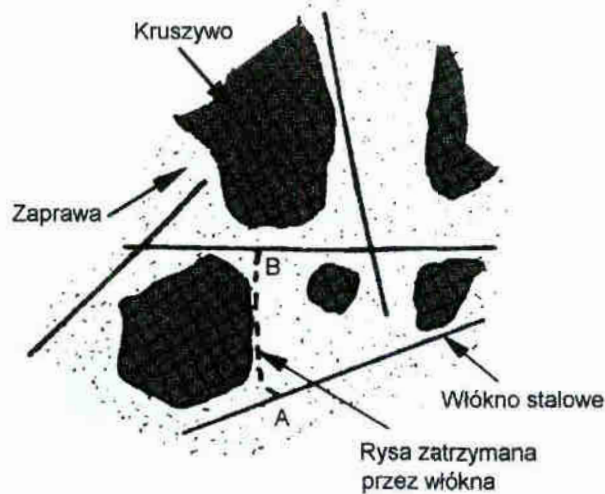
Efektywność zmian właściwości betonu w wyniku dodania włókien stalowych [11].

<b>Właściwość</b>	<b>Efektywność [%]</b>
Wytrzymałość na ściskanie	15
Wytrzymałość na rozciąganie	20
Wytrzymałość na zginanie	200
Wytrzymałość na ścinanie	80
Wytrzymałość na docisk miejscowy	35
Wytrzymałość na dwukierunkowe ściskanie	40
Wytrzymałość zmęczeniowa przy zginaniu	250
Wytrzymałość zmęczeniowa przy ściskaniu	15
Udarność	600
Moduł sprężystości	-10
Naprężenia rysujące przy zginaniu	150
Pełzanie	-20
Skurcz	-30
Odkształcalność graniczna	60
Odkształcalność termiczna	0
Współczynnik przewodności cieplnej	5
Mrozoodporność	55
Nasiąkliwość	10
Odporność na wysokie temperatury	200
Ścieralność	50
Odporność na erozję	40
Przyczepność do zbrojenia w żelbecie	5
Urabialność mieszanki betonowej	-40

Korzystny efekt dodawania włókien do betonu wynika stąd, że włókna utrudniają powstawanie mikronapięć skurczowych wewnątrz betonu; przejmują naprężenia, które uwalniają się przy powstawaniu mikronapięcia w betonie podczas obciążania betonu; zwiększają odkształcalność betonu do chwili zarysowania; niwelują różnice naprężeń wewnętrznych w betonie przez bezpośredni udział w pracy lub przez przenoszenie tych naprężeń na dalsze strefy betonu wciągając je do współpracy z miejscem przeciążonym lub słabszym; modyfikują rozkład naprężeń w obciążonym elemencie przez wywołanie dodatkowych naprężeń stycznych, gdy w betonie bez dodatku włókien występują w zasadzie tylko naprężenia normalne. Ponadto włókna przenoszą obciążenia wraz z betonem na zasadzie materiału kompozytowego - jest to tak zwany kompozyt z kruchą matrycą. Zadaniem zbrojenia rozproszonego w matrycach kruchych jest powstrzymanie propagacji rys i częściowe przenoszenie sił wewnętrznych po zarysowaniu. Tam gdzie rysa została zatrzymana przez włókno, zapewnia ona zespolenie materiału co przedstawiono na rysunku nr 3.4.2.9. Wydłużony kształt włókien powoduje, że w większości przypadków pęknięty elementy z drutobetonu nie rozpada się i do całkowitego jego rozdzielenia wymagana jest jeszcze dodatkowa energia i dodatkowe odkształcenie (rys.3.4.2.10.) [11]. Zbrojenie rozproszone jeżeli jego udział w kompozycie przekracza wartość krytyczną „przekształca” beton z ciała kruchego w materiał quasi-podatny, który po przekroczeniu naprężeń niszczących nie pęka



Rys.3.4.2.9. Model rozkładu naprężeń w elemencie, w którym propaguje się rysa. Po lewej beton niemodyfikowany, po prawej fibrobeton [202].



Rys.3.4.2.10. Mechanizm zatrzymywania rys w fibrobetonie [7]

dalej, ale się odkształca utrzymując swoją nośność. Kruchy materiał w którym powstaje jedna powierzchnia pęknięcia, a energia niezbędna do jej wytworzenia jest mała zamienia się w pseudoplastyczne tworzywo, które może przenieść krótkotrwale przeciążenie bez widocznych uszkodzeń [17].

### 3.4.3. Dotychczasowe zastosowania fibrobetonów.



Rys.3.4.3.1.

Pierwsze inwestycje budowlane z użyciem drutobetonu były prowadzone już w latach sześćdziesiątych ale na szerszą skalę zalety tego materiału zostały dostrzeżone w latach siedemdziesiątych przez amerykańskie przedsiębiorstwa budowlane wykonujące płyty lotnisk oraz nawierzchnie autostrad i mostów [126]. Od 1972 do 1980 roku wykonano łącznie w USA 28 pasów startowych z betonu z dodatkiem od 50 do 150 kg/m<sup>3</sup> (0,3 do 2,0%) włókien stalowych różnych typów. Pierwsza nawierzchnia płyty lotniska z wykorzystaniem dodatku włókien stalowych została wykonana w 1972 roku w Tampa International Airport na Florydzie. Najbardziej znanym lotniskiem z pasami

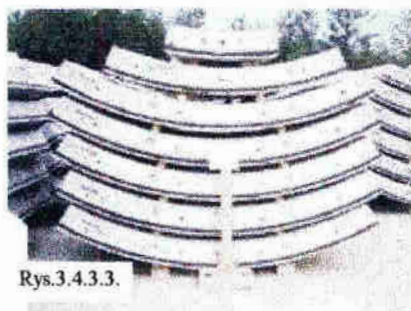
startowymi wykonanymi z drutobetonu jest JFK International Airport w Nowym Jorku [126]. W trakcie 14 lat obserwacji tych obiektów stwierdzono tylko nieliczne rysy i lokalne uszkodzenia nawierzchni. W tym samym czasie inne kraje wysoko rozwinięte jak Kanada, Japonia, Australia, Anglia i Nowa Zelandia również zaczęły stosować fibrobeton na skalę przemysłową [126]. Na rys.3.4.3.1. widzimy fibrobetonową nawierzchnię pasa startowego podczas budowy.



Rys.3.4.3.2.

Z równym powodzeniem kompozyty betonowe z włóknami stalowymi stosowane są do budowy nawierzchni przemysłowych przenoszących obciążenia punktowe wielkości kilkudziesięciu ton (tak jak na przykład w zakładach BMW w Karolinie Południowej gdzie do wylania posadzki fibrobetonowej zastosowano urządzenia z laserowymi czujnikami poziomu - rys.3.4.3.2.). Obudowy tuneli kolejowych i drogowych wykonane są zarówno z prefabrykowanych elementów fibrobetonowych przedstawionych na rys.3.4.3.3.

jak i metodą natryskową [213].



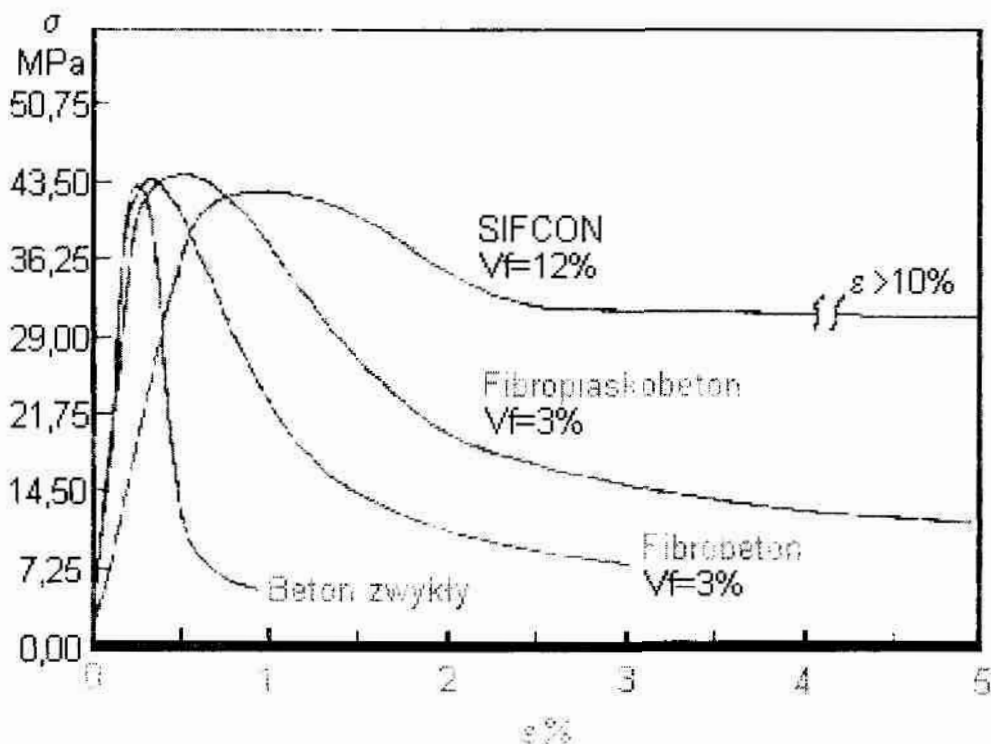
Rys.3.4.3.3.

Kompozyty SFRC wykorzystuje się również do budowy elementów konstrukcyjnych budowli inżynierskich. W USA fibrobeton wykorzystuje się również do napraw nawierzchni autostrad i lotnisk oraz budowy zapór, przepustów i kanałów [126].

#### 3.4.4. Kierunki i perspektywy rozwoju fibrobetonów.

Technologia SFRC zmierza aktualnie na świecie w kierunku HPFRC (high Performance Fiber Reinforced Concrete) - czyli kompozytów o dużej i bardzo dużej zawartości włókien stalowych - czyli więcej niż 3% [204]. Duża zawartość włókien wymaga stosowania coraz drobniejszego kruszywa oraz dużych ilości

plastyfikatora, co w dużej części pokrywa się z tematyką badań przedstawionych w niniejszej pracy. Ciekawym przykładem technologii HPFRC jest SIFCON (Slurry Infiltrated Concrete), w których zawartość włókien stalowych waha się od 12 do 16%. Kompozyty SIFCON są wykonywane na bazie piasku. Dla zobrazowania efektywności fibrobetonów opartych na kruszywach drobnych na rys.3.4.4.1. zestawiono przebieg zależności  $\sigma$ - $\epsilon$  dla wybranych kompozytów fibrobetonowych.



Rys.3.4.4.1. Zależność ugięcia od naprężenia belek wykonanych z różnych kompozytów betonowych przy trzypunktowym podparciu [190]. Badanie wykonano zgodnie z normą ASTM C 1018.

Najnowszym osiągnięciem w dziedzinie HPFRC jest technologia SIMCON [201] (Slurry Infiltrated Mat Concrete). Jest to system, w którym rolę rozproszonych włókien pełni gęsta mata wykonana z włókien stalowych. Mata wykonana jest z włókien o średnicy od 0,25 do 0,50 mm i długości 241 mm. Mata produkowana na razie w skali laboratoryjnej jest zwijana w rolki, które można łatwo transportować, a na miejscu budowy dowolnie ciąć, formować i układać (rys.3.4.4.2.). Tak przygotowane „zbrojenie” wypełnia się poprzez technikę iniekcji bardzo płyn-

ną zaprawą cementową. Uzyskany w ten sposób kompozyt nabiera o wiele więcej niż zwykły fibrobeton cech quazi plastycznych. Uważa się, że tego typu technologia będą w



Rys.3.4.4.2. Dr Neven Krustulovic-Opara trzyma matę SIMCON wykonaną z włókien ze stali nierdzewnej [210].

przyszłości szeroko stosowane na terenach sejsmicznych, ponieważ charakteryzują się bardzo dużymi wytrzymałościami, a proces ich zniszczenia przebiega w sposób bardzo „bezpieczny”. Prace nad SIMCON prowadzone są pod naukową opieką profesora Jamesa Romualdi twórcy pierwszej teorii drutobetonu.

### **3.4.5. Opłacalność stosowania zbrojenia rozproszonego.**

Liczne dotychczas zrealizowane inwestycje oraz przeprowadzone rozważania teoretyczne dowiodły opłacalności stosowania betonów modyfikowanych włóknami stalowymi. Ekonomika stosowania betonów typu SFRC zależy w dużej mierze od projektanta konstrukcji, który przy zastosowaniu tego droższego od zwykłego betonu materiału potrafi w pełni wykorzystać jego bardzo dobre parametry mechaniczno-wytrzymałościowe. W tab.3.4.5.1. opracowanej na podstawie książki „Steel Fibre Reinforced Concrete” autorstwa B.R. Maidla zestawiono typy konstrukcji w których zastosowanie fibrobetonów jest najbardziej opłacalne.

Tab. 3.4.5.1. Przykładowe oszczędności możliwe do uzyskania dzięki zastosowaniu betonów SFRC do wykonania konstrukcji.

Element konstrukcyjny lub rodzaj konstrukcji	Obciążenia			Uzyskanie oszczędności dzięki:					
	Decydująco sily wewnętrzne	Rodzaj	Możliwość zastąpienia zbrojenia prętowego	Zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie	Zwiększenie trwałości	Zwiększenie odporności na działanie wody i mrozu	Ograniczenie wymiarów przekroju elementu	Ograniczenie szerokości rys	
Rury betonowe	M, N	statyczne	tak	tak	tak	tak	tak	tak	
Ściany oporowe	M, N, Q	udarowe	nie	nie	tak	nie	nie	tak	
Fasady i elewacje	N	statyczne	tak	tak	w o z	nie	tak	tak	
Schody prefabrykowane	M, N	statyczne	w o z	w o z	w o z	tak	tak	tak	
Prefabrykowane słupy	M, N	statyczne/dynamiczne	tak	tak	tak	tak	tak	tak	
Płyty lotnisk	M, N	statyczne/dynamiczne	tak	tak	w o z	tak	w o z	tak	
Garaze	M, N, Q	statyczne	w o z	w o z	w o z	tak	tak	tak	
Stabilizacja zboczy	M, N, Q	statyczne	tak	tak	tak	tak	tak	tak	
Posadzki przemysłowe	M, N	statyczne	tak	tak	w o z	tak	tak	tak	
Elementy obciążone punktowo	N, Q	statyczne	w o z	tak	tak	nie	w o z	tak	
Fundamenty maszyn	M, N, Q	statyczne/dynamiczne	nie	w o z	tak	nie	nie	tak	
Pale wbijane	M, N	dynamiczne	nie	w o z	tak	nie	nie	w o z	
Komory reaktorów	M, N, Q	statyczne/dynamiczne	nie	nie	tak	tak	nie	tak	
Konstrukcje lupinowc	M, N, Q	statyczne	w o z	tak	w o z	w o z	tak	tak	
Konstrukcje w szalunkach traconych	M, N	statyczne	w o z	tak	nie	nie	tak	tak	
Kadłuby statków	M, N	statyczne/dynamiczne	w o z	tak	tak	tak	tak	tak	
Górnice konstrukcje torkretowe	M, N	statyczne	w o z	tak	tak	nie	tak	w o z	
Tunelowe konstrukcje torkretowe	M, N	statyczne	w o z	tak	tak	nie	tak	tak	
Belki wstępnie sprężone	M, N, Q	statyczne	nie	w o z	nie	nie	w o z	tak	
Zabezpieczenie osiwisk	M, N	statyczne/dynamiczne	w o z	tak	tak	tak	w o z	w o z	
Nawierzchnie drogowe	M, N	statyczne/dynamiczne	tak	tak	tak	tak	tak	tak	
Sejfy bankowe	M, N, Q	dynamiczne	nie	nie	tak	nie	tak	w o z	
Górnice tubingi	M, N	statyczne	w o z	tak	w o z	w o z	tak	tak	
Słupy stalowo-betonowe	M, N	statyczne	tak	tak	nie	nie	nie	tak	
Zbiorniki	M, N	statyczne	w o z	tak	tak	nie	tak	tak	
Falochrony	M, N, Q	dynamiczne	tak	tak	tak	tak	w o z	w o z	

w o z - w ograniczonym zakresie



### 3.5. Fibrobetony z dodatkiem mikrokrzemionki.

Rozwój betonów konstrukcyjnych na świecie, a w tym i kompozytów fibrobetonowych zmierza aktualnie w kierunku betonów typu HPC (High Performance Concretes). Są to kompozyty betonowe jednocześnie modyfikowane dużą ilością różnych dodatków i domieszek na przykład takich jak: włókna stalowe, włókna polipropylenowe, mikrokrzemionka, popiół lotny, superplastyfikatory, dodatki spowalniające wiązanie oraz dodatki napowietrzające. Uzyskiwane w ten sposób kompozyty betonowe są drogie, ale bardzo odporne na działanie czynników atmosferycznych, korozję, powstawanie rys, ścieranie, czy napór wody. Charakteryzują się one wysoką wytrzymałością na ściskanie (powyżej 50 MPa), małymi odkształceniami (skurcz, pęcznienie) i bardzo długą żywotnością. Betony typu HPC są bardzo często używane do budowy dużych mostów i innych odpowiedzialnych konstrukcji inżynierskich. Konstrukcje mostowe wykonane z betonów typu HPC projektuje się na 100 lat użytkowania. W tabeli 3.5.1. zestawiono największe mosty zbudowane z betonów typu HPC. Kompozyty betonowe HPC są następcami betonów wysokowartościowych, w których głównym kryterium oceny ich konstrukcyjnej przydatności była wytrzymałość na ściskanie. Obecnie równie dużą wagę przykładają się do odporności kompozytów betonowych na obciążenia dynamiczne, działanie mrozu, przesiąkanie wody, odporności na działanie substancji chemicznie agresywnych oraz na docisk. Tylko kompleksowe stosowanie wielu dodatków i domieszek, precyzyjne dozowanie, mieszanie, układanie oraz pielęgnacja twardniejącego betonu pozwala uzyskać beton o dużej wytrzymałości, a jednocześnie trwały i odporny na oddziaływanie środowiska oraz użytkowników konstrukcji.

Badania zaplanowane w niniejszej pracy przez autora wychodzą tym tendencją na przeciw. Jednoczesne stosowanie dodatku włókien stalowych, mikrokrzemionki i superplastyfikatora stwarzają potencjalne możliwości dowolnego modelowania cech docelowego kompozytu - tak wytrzymałościowych, jak i reologicznych czy użytkowych.. W dalszej perspektywie czasu można myśleć o

Tab.3.5.1. Największe mosty wzniesione z zastosowaniem HPC [190].

Nazwa mostu	Lokalizacja	Rok budowy	Wytrzymałość w MPa
Nitta Highway Bridge	Japonia	1968	59
Kaminoshima Highway Bridge	Japonia	1970	59
2 <sup>nd</sup> Ayaragigawa Bridge	Japonia	1973	60
Iwahana Bridge	Japonia	1973	89
Ootatable Railway Bridge	Japonia	1973	79
Fukamitsu Highway Bridge	Japonia	1974	69
Akkagawa Railway Bridge	Japonia	1976	79
Kylesku Bridge	Szkocja	1977	53
Deutzer Bridge	Niemcy	1978	69
Tower Road Bridge	USA	1981	62
East Huntington Bridge	USA	1984	55
Annacis Bridge	Kanada	1985	55
Sylans Viaduct	Francja	1986	60
Re Island Bridge	Francja	1987	60
Braker Lane Bridge	USA	1987	66
Pont du Joigny	Francja	1988	60
Pont du Pertuiset	Francja	1988	65
Arc sur la Rance	Francja	1989	60
Giske	Norwegia	1989	55
Sanhornoya	Norwegia	1989	55
Boknasundet	Norwegia	1990	60
Helgelandsbrua	Norwegia	1990	65
Kwung Tong By Pass	Hong Kong	1990	65
Roize	Francja	1990	89
Laval	Kanada	1992	70
Mirabel	Kanada	1993	80
CNT	Japonia	1993	122
Normandie	Francja	1994	60
Elorn	Francja	1994	97
Great Belt	Dania	1997	70
SR18 King County	USA	1997	69

zastosowaniu dodatkowo do omawianych kompozytów fibropiaskobetonowych takich dodatków jak włókna polipropylenowe, popiół lotny, czy mączka bazaltowa.

## **4. Program badań.**

### **4.1. Badane właściwości oraz liczba próbek.**

Badania zostały zaplanowane jako globalne rozpoznanie możliwości wykonania piaskobetonów specjalnych na bazie piasku odpadowego, mikrokrzemionki i zbrojenia rozproszonego. Wykorzystując doświadczenie zdobyte w trakcie badań żwirowych betonów mikrokrzemionkowych [100, 103, 132, 133] oraz opierając się na studiach literaturowych autor określił maksymalne zawartości poszczególnych dodatków. Badania prowadzono na zarobach o zawartości MK od 0% do 25% oraz o zawartości ZB od 0% do 2%. Badania obejmowały tak badania świeżej mieszanki betonowej, jak i stwardniałego betonu. Oprócz cech wytrzymałościowych badania obejmowały swym zakresem przede wszystkim pomiary odkształceń kompozytu piaskobetonowego jako zjawisko kluczowe do opisu jego struktury, mechaniki zniszczenia i wytrzymałości. Beton po poddaniu go obciążeniom ulega odkształceniom, jak każde ciało stałe. Odkształcenia te mają charakter częściowo sprężysty, częściowo zaś plastyczny. Ponadto beton nie obciążony ulega też odkształceniom takim jak na przykład skurcz.

Przewidziano w związku z tym badanie odkształceń kompozytu piaskobetonowego pod wpływem naprężeń wywołanych ściskaniem osiowym (w tym też pelzanie), skurczu oraz odkształceń elementów zginanych. Program badań obejmował również badanie niektórych cech wytrzymałościowych po 120 dniach dojrzewania ze względu na dużą reaktywność mikrokrzemionki w czasie, co ma istotny wpływ na parametry betonu badane po 28 dniach dojrzewania. Na koniec przeprowadzono również badanie wodoszczelności kompozytów piaskobetonowych poddanych wstępnie cykлом obciążania i odciążania. Przeprowadzono również badanie mrozoodporności wybranych zarobów piaskobetonowych. Szczegółowy wykaz badanych właściwości i liczbę próbek podano w tab.4.1.

Tab.4.1. Program badań pojedynczego zarobu.

Badana właściwość	Symbol	Jednostka	Liczba pomiarów	Wielkość próbki
Badania świeżej mieszanki piaskobetonowej				
Zawartość powietrza	$V_p$	%	3	5 dm <sup>3</sup>
Konsystencja	$V_{cBe}$	s	3	5 dm <sup>3</sup>
Gęstość pozorna	$\rho_{PM}$	kg/m <sup>3</sup>	3	5 dm <sup>3</sup>
Badania stwardniałego betonu po 28 dniach dojrzewania				
Wytrzymałość na ściskanie	$R_{KS28}$	MPa	6	15*15*15 cm
Wytrzymałość na rozciąganie	$R_{KR28}$	MPa	6	15*15*15 cm
Wodoszczelność	$k_V$	10 <sup>-12</sup> m/s	6	15*15*15 cm
Nasiąkliwość wagowa	$N_{wK}$	%	6	15*15*15 cm
Gęstość pozorna	$\rho_{PB}$	kg/m <sup>3</sup>	6	15*15*15 cm
Badania stwardniałego betonu po 120 dniach dojrzewania				
Wytrzymałość na ściskanie	$R_{KS120}$	MPa	6	15*15*15 cm
Wytrzymałość na rozciąganie	$R_{KR120}$	MPa	6	15*15*15 cm
Odkształcenie przy ściskaniu	$\varepsilon_{s0}$	% 10 <sup>-1</sup>	3	φ 15*50 cm
Strzałka ugięcia	$f$	m <sup>-5</sup>	3	10*10*50 cm
Wodoszczelność po obciążeniu	$k_{VO}$	10 <sup>-12</sup> m/s	6	15*15*15 cm
Cechy reologiczne				
Skurecz	$\varepsilon_s$	%	3	10*10*50 cm
Pelzanie	$\phi_1$	%	3	10*10*50 cm

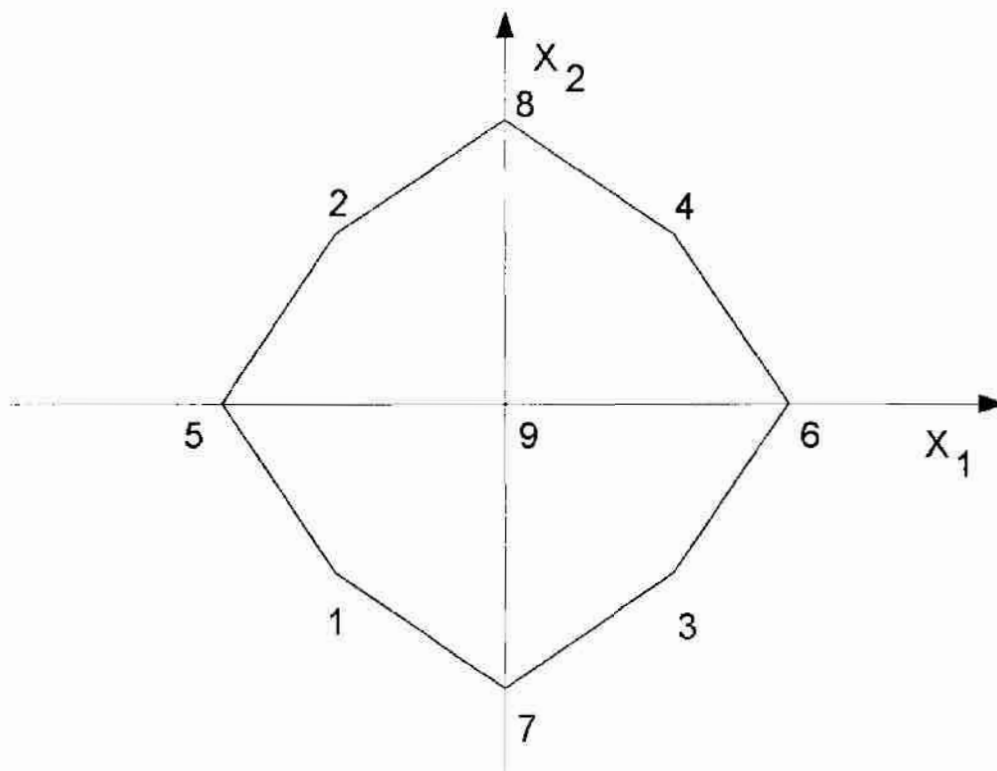
#### 4.2. Wybór metody matematycznego planowania eksperymentów.

Wybór właściwego planu doświadczeń stanowi jedną z ważniejszych decyzji, którą podejmuje się w początkowej fazie badań. Poszczególne plany różnią się między sobą liczbą wymaganych doświadczeń, regularnością, odpornością na występowanie wśród wyników doświadczeń błędów grubych oraz odpornością na pojawienie się błędu systematycznego, wynikającego z pewnej nieadekwatności przyjętego modelu. Według Z. Polańskiego decyzję o wyborze konkretnego planu należy podejmować w oparciu o trzy poniższe kryteria.

1. Kryterium realizowalności - czyli sprawdzenie, czy plan doświadczenia jest możliwy do zrealizowania w odniesieniu do rzeczywistego obiektu badań przy zastosowaniu określonych metod i środków pomiarowych. Oznacza to, że obiekt badań funkcjonuje prawidłowo w przyjętych układach (skojarzeniach) wartości wielkości wejściowych oraz wielkości wyjściowe i wielkości stałe obiektu są mierzalne z dopuszczalną niedokładnością.
2. Kryterium informatywności - czyli sprawdzenie, czy przyjęty do realizacji plan doświadczeń zapewnia uzyskanie informacji niezbędnej do spełnienia celu badań.
3. Kryterium efektywności - czyli sprawdzenie, czy plan doświadczenia możliwy do realizacji i zapewniający informatywność odpowiadającą celowi badań, jest jednocześnie planem minimalizującym nakłady wymagane do realizacji. Do sprawdzenia tego kryterium można używać współczynnika efektywności planu określającego stosunek wymaganej liczby pomiarów  $N$  dowolnego planu do liczby pomiarów  $N_K$  wymaganych do realizacji planu kompletnego

$$0 < e_N = N/N_K \leq 1. \quad (4.2.1.)$$

W oparciu o prace Z.Piasty [156] i A.Świtońskiego [35] za plany spełniające kryterium realizowalności autor uznał wszystkie plany sympleksowe drugiego rzędu. Poszczególne plany były porównywane ze względu na kryterium realizowalności a następnie kryterium efektywności. Ostatecznie na podstawie analizy rozkładu wyników badań wstępnych jako najbardziej odpowiedni wybrany został plan centralny kompozycyjny bazujący na planie Placketta-Burmana, którego punkty pomiarowe są rozmieszczone tak jak to zestawiono w tab.4.2.1. oraz zobrazowano na rys 4.2.1.



Rys.4.2.1. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych (od 1 do 9) dla dwóch czynników wejściowych. Współrzędne poszczególnych punktów zestawiono w tab. 4.2.1.

Obiekt badań rozpatrzony został jako złożony układ, którego struktura wewnętrzna jest nie znana i niedostępna dla obserwatora, natomiast znane są pa-

rametry „wejścia” oraz „wyjścia”. Dla przyjętego planu eksperymentu charakterystykę obiektu badań aproksymujemy funkcją regresji w następującej postaci:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + \dots + b_k \cdot x_k + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + \dots + b_{k-1,k} \cdot x_{k-1} \cdot x_k + b_{11} \cdot x_1^2 + \dots + b_{kk} \cdot x_k^2 \quad (4.2.2.)$$

gdzie:

$b_0, b_1, b_k, b_{12}, b_{13}, b_{k-1,k}, b_{11}, b_{kk}$  - poszukiwane współczynniki regresji,

$x_1, x_2, x_3, x_{k-1}, x_k$  - zmienne wejściowe w wartościach kodowych,

$y$  - zmienne wyjściowe.

Funkcja regresji 4.2.2. jest wielomianem drugiego rzędu, ze współdziałaniami pierwszego rzędu, gdzie całkowita liczba współczynników wielomianu wynosi:

$$N_b = ((i+1)(i+2)) / 2. \quad (4.2.3.)$$

Tab.4.2.1. Plan eksperymentu.

Numer eksperymentu	Czynniki wejścia w wartościach kodowych	
	$x_1$	$x_2$
1	-1,00000	-1,00000
2	-1,00000	1,00000
3	1,00000	-1,00000
4	1,00000	1,00000
5	-1,68179	0,00000
6	1,68179	0,00000
7	0,00000	-1,68179
8	0,00000	1,68179
9	0,00000	0,00000



Występujące w równaniu 4.2.2. czynniki  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{k-1}, x_k$  wyrażone w wartościach kodowych, związane są z ich wartościami fizycznymi  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_{k-1}, w_k$  za pomocą relacji:

$$x_i = (w_k - w_{0k}) / \Delta w_k, \quad (4.2.4)$$

gdzie  $w_{0k}$  jest wartością centralną czynnika  $w_k$ , zaś  $\Delta w_k$  jego jednostkowym zakresem zmienności. Ustalając  $w_{0k}$  i  $\Delta w_k$  dla poszczególnych czynników, określa się dziedzinę eksperymentu (tab.4.2.2.). Przeprowadzone przez Z.Piastę badania z zakresu technologii betonu świadczą o tym, że przy odpowiednim doborze dziedziny eksperymentu uzyskuje się dobrą zgodność z danymi eksperymentalnymi.

Tab. 4.2.2. Dziedzina eksperymentu.

Czynnik	Oznaczenie kodowe	Jednostka miary	Wartość centralna	Jednostkowy zakres zmienności
Dodatek MK	$x_1$	%	12,5	7,5
Dodatek ZB	$x_2$	%	1,0	0,6

Wyniki pomiarów poddane zostały statystycznemu opracowaniu, w którym wartości obarczone błędem grubym oceniono na podstawie kryterium Smirnowa-Grabbsa [34]:

$$\zeta\{\bar{y}, s'\} = (\bar{y} - y_{\min}) : s', \quad (4.2.5.)$$

gdzie:

$$s' = s\{y\} \sqrt{\frac{n-1}{n}}, \quad (4.2.6.)$$

- $\bar{y}$  - średnia wartość,  
 $n$  - liczebność próby,  
 $s$  - odchylenie standardowe.

Wartości  $y_{min}$  zostały uznane za przypadkowe i wyeliminowane z dalszej analizy obliczeniowej, z ryzykiem  $\alpha=0,05$ , w tym przypadku gdy parametr  $\zeta > \zeta_{tab}$ .

Tab.4.2.3. Wielkość parametru  $\zeta_{tab}$  w zależności od liczebności próby [34].

Liczebność próby n	Parametr $\zeta_{tab}$
3	1,412
4	1,689
5	1,869
6	1,996
10	2,294
20	2,623
30	2,792
40	2,904
50	2,987

W analizie regresyjnej wyników badań wartości błędu odtworzenia określone zostały na podstawie czterokrotnego niezależnego powtórzenia doświadczenia w punkcie nr 9, który znajduje się w środku obszaru zmienności czynników (tab.4.2.1.). Obiektywny charakter przeprowadzenia doświadczeń zapewniony został poprzez wybór kolejności realizacji poszczególnych eksperymentów z tablicy liczb losowych. Całość obliczeń związanych z wyznaczaniem współczynników regresji równań oraz graficzną interpretację uzyskanego modelu matematycznego przeprowadzono przy wykorzystaniu programu Statistica.

Test istotności Fiszera ( $F < F_{tab}$ ) stanowi podstawę do stwierdzenia, że przyjęty model matematyczny z ryzykiem  $\alpha = 0,05$  adekwatnie opisuje badane ce-

chy betonu w zakresie zmienności czynników, a wpływ obydwu oddziaływań jest wzajemnie od siebie niezależny.

Tab.4.2.4. Całkowita populacja próbek konieczna do wykonania podczas badań.

Zarób numer	Dodatek		Liczba próbek			Świeża mieszanka	
	MK %	ZB %	15*15*15	φ15*50	10*10*50		
1	5	0,4	48	3	6	45 dm <sup>3</sup>	
2	5	1,6	48	3	6	45 dm <sup>3</sup>	
3	20	0,4	48	3	6	45 dm <sup>3</sup>	
4	20	1,6	48	3	6	45 dm <sup>3</sup>	
5	0	1,0	48	3	9	45 dm <sup>3</sup>	
6	25	1,0	48	3	6	45 dm <sup>3</sup>	
7	12,5	0,0	48	3	9	45 dm <sup>3</sup>	
8	12,5	2,0	48	3	6	45 dm <sup>3</sup>	
9	12,5	1,0	192	12	27	180 dm <sup>3</sup>	
10	0	0	48	3	9	45 dm <sup>3</sup>	
			Σ =	624	39	96	540 dm <sup>3</sup>
			Σ =	2106 dm <sup>3</sup>	345 dm <sup>3</sup>	480 dm <sup>3</sup>	585 dm <sup>3</sup>
			Σ =	3516 dm <sup>3</sup> = 3,52 m <sup>3</sup>			

W tab.4.2.4. zestawiono całkowitą liczbę próbek konieczną do wykonania badań według centralnego planu kompozycyjnego z zaplanowaną ufnością wyników. Przedstawiona liczba próbek pozwala na pełną realizację wybranego planu oraz obszerną obróbkę statystyczną. Ilość mieszanki betonowej koniecznej do wykonania tak próbek w formach jak i badań świeżej mieszanki betonowej wszystkich zarobów wynosi 3,52 m<sup>3</sup>.

### 4.3. Składniki badanego kompozytu piaskobetonowego.

#### 4.3.1. Piasek odpadowy.

Do wykonania wszystkich zarobów użyto piasku odpadowego z kopalni Sępólno Wielkie. Piasek poddano kompleksowym badaniom laboratoryjnym, których wyniki zestawiono w tabeli 4.3.1.1.

Tab. 4.3.1.1. Cechy fizyczne piasku odpadowego z kopalni Sępólno Wielkie.

Badana cecha	Symbol	Wielkość
Gęstość nasypowa w stanie luźnym	$\rho_n^l$	1631 kg/m <sup>3</sup>
Gęstość nasypowa w stanie zagęszczonym	$\rho_n^z$	1805 kg/m <sup>3</sup>
Zawartość ziaren pylastych	$Z_p$	0,8 %
Wskaźnik uziarnienia według Kuczyńskiego	$U_k$	3,279
Abramsa	$U_A$	2,205
Hummla	$U_H$	66,37
Jamistość kruszywa w stanie luźnym	$j_l$	38 %
Jamistość kruszywa w stanie zagęszczonym	$j_z$	32 %
Zawartość zanieczyszczeń obcych	$Z$	0,00 %
Porowatość	$P$	3,39 %
Szczelność stosu okruchowego (w stanie zagęszczonym)	$S_k$	68 %
Pyłowy wskaźnik urabialności	$\beta$	0,216

W tab. 4.3.1.2. zestawiono skład granulometryczny piasku odpadowego oraz średni wymiar ziaren w poszczególnych frakcjach oraz wodożądność piasku. Wodożądność zależy od powierzchni zewnętrznej ziaren. Według Grzelaka przy założeniu, że ziarna kruszywa mają kształt kulisty, powierzchnię właściwą określa następujący wzór:

$$S_w = 6/(d_v \rho). \quad (4.3.1.1.)$$

Tab. 4.3.1.2. Skład granulometryczny oraz wodoządnosc piasku opałowego.

Fracja w mm	Udział frakcji		Przesiew		Średnie ziarno w danej frakcji		Wodoządnosc wg Bolomeya		Wodoządnosc wg Sterna	
	$p_i$ %	$p_i$ %	%	3	wg. Andersena	$(d_{ki1} - d_{ki2})/2$	dla Andersena	dla $(d_{ki1} + d_{ki2})/2$	dla Andersena	dla $(d_{ki1} + d_{ki2})/2$
1	2		3	4	5	6	7	8	9	
0,000 - 0,125	1,1	0,057	1,1	0,062	0,062	0,540	0,510	0,144	0,140	
0,125 - 0,250	11,6	0,173	12,7	0,187	0,187	0,257	0,244	0,092	0,090	
0,250 - 0,500	29,0	0,346	41,7	0,375	0,375	0,162	0,154	0,070	0,068	
0,500 - 1,000	35,1	0,693	76,8	0,750	0,750	0,102	0,097	0,053	0,051	
1,000 - 2,000	18,8	1,386	95,6	1,500	1,500	0,064	0,061	0,040	0,039	
2,000 - 4,000	4,4	2,770	100,0	3,000	3,000	0,040	0,038	0,030	0,029	
	$\Sigma = 100,0$		Wodoządnosc stosu okruszowego		$W_{\text{BOLOMEY}}=0,132$	$W_{\text{BOLOMEY}}=0,125$	$W_{\text{STERN}}=0,059$	$W_{\text{STERN}}=0,058$		

Wodoządnosc obliczono dla sredniego ziarna w danej frakcji z zaleznosci:  $W_{\text{BOLOMEY}} = 0,08/d_k^{2/3}$ ,  $W_{\text{STERN}} = 0,046 d_k^{-0,4}$ . W porownaniu z wartościami zalecanymi wodoządnosc obliczona przez autora plasuje się na granicy przedziału konsystencji wilgotnej i gestoplastycznej.

Dla okreslenia sredniego wymiaru ziaren kruszywa w literaturze podanych jest kilka propozycji. Z badan [181] wynika, ze najblizsza rzeczywistosci jest srednia obliczona za wzoru:

$$\bar{d}_k = \exp \sum_1^n \left( p_i \ln \frac{d_{ki1} + d_{ki2}}{2} \right), \quad (4.3.1.2.)$$

Przyjmujac dane z tabeli 4.3.1.2. sredni wymiar ziarna  $d_k$  rozpatrywanego stosu okruszowego wynosi 0,615 mm

Tab. 4.3.3. Powierzchnia właściwa stosu okruszowego piasku odpadowego.

Fracja w mm	Udział frakcji	$S_w$ dla Abramsa	$S_w$ dla $(d_{ki1} + d_{ki2})/2$
$d_{ki1} - d_{ki2}$	$p_i$ %	$\text{cm}^2/\text{g}$	$\text{cm}^2/\text{g}$
1	2	3	4
0,000 - 0,125	1,1	397,21	362,26
0,125 - 0,250	11,6	130,87	121,07
0,250 - 0,500	29,0	65,43	60,37
0,500 - 1,000	35,1	32,67	30,19
1,000 - 2,000	18,8	16,33	15,09
2,000 - 4,000	4,4	8,17	7,54
	$\Sigma = 100,0$	$S_{w1} = 53,42$	$S_{w2} = 49,30$

#### 4.3.2. Cement.

Do wszystkich zarobów użyto cementu portlandzkiego 35 bez dodatków. W tabeli 4.3.2.1. zestawiono wszystkie parametry cementu przyjmowane do dalszych obliczeń.

Tab.4.3.2.1. Cechy fizyczne cementu przyjęte do dalszych obliczeń.

Cecha		Wielkość
Powierzchnia właściwa według Blaine'a		2500 $\text{cm}^2/\text{g}$
Gęstość	$\rho_c$	3,1 $\text{g}/\text{cm}^3$
Wielkość ziaren	$d_c$	20 - 30 $\mu\text{m}$ .
Wodozadność	$w_c$	0,25

#### 4.3.3. Woda zarobowa.

Do zarobów użyto wody wodociągowej odpowiadającej wymaganiom technicznym określonym normą PN-88/B-32250 „Woda do betonów i zapraw”. Woda spełniała wymogi stawiane „odmianie I”

#### 4.3.4. Skład mieszanki piaskobetonowej bez dodatków.

Skład mieszanki piaskobetonowej ustalony wstępnie metodą analityczną skorygowano na zarobie próbnym. Ostateczny skład wykonywanej mieszanki bez dodatku mikrokrzemionki i włókien stalowych zestawiono w tabeli 4.3.4.1.

Tab.4.3.4.1. Skład mieszanki piaskobetonowej.

Ilość składników na 1m <sup>3</sup>			w/c
Cement	Woda	Kruszywo	
kg	dm <sup>3</sup>	kg	-
400	200	1780	0,5

Sprawdzenie warunku szczelności:

$$C/\rho_c + K/\rho_k + W/\rho_w = 1000 \text{ dm}^3$$

$$400/3,1 + 1780/2,65 + 200/1 = 1000$$

#### 4.3.5. Domieszki uplastyczniające.

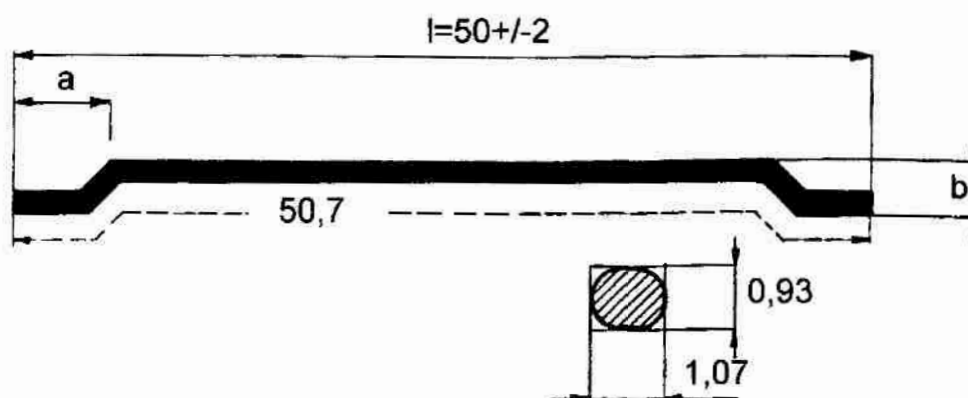
Do wszystkich zarobów dozowano superplastyfikator „Betoplast 1”. Jest to ciecz barwy brązowej o gęstości 1,16 g/cm<sup>3</sup> i wskaźniku pH = 7,0 - 7,5. „Betoplast 1” stanowi czterdziestoprocentowy roztwór wodny mieszaniny związków organicznych w których głównym składnikiem są sulfonowe pochodne naftalenu. Producent zaleca dozowanie od 1 do 2% w stosunku do masy cementu. Ze względu na specyfikę badanych betonów autor dozował do wszystkich zarobów maksymalny 2 procentowy dodatek.

#### 4.3.6. Dodatek włókien stalowych.

Do badań Autor użył włókien stalowych kształtowanych EKOMET (produkcja krajowa) o długości 50mm i średnicy 1mm. Włókna te są produkowane

zgodnie z amerykańską normą ASTM A820 z drutu stalowego ciągnionego (PN-67/M-80026) o wytrzymałości na rozciąganie 1000 MPa (-5%; +10%). Producent pakuje je w kartony po 25 kg netto. Ładunek jednej palety EURO stanowią 32 opakowania (800 kg). Włókna EKOMET posiadają Aprobataę Techniczną ITB nr K-2095/95, z terminem ważności do 30 listopada 2000 oraz Atest Higieniczny PZH nr B-1218/95.

Szczegółowe wyniki badań włókien EKOMET przedstawiono w [5]. Stwierdzono, że przeciętna rzeczywista długość włókien wynosi  $l = 50,70$  mm. Włókna EKOMET w wyniku stosowanych przy produkcji zabiegów technologicznych nie są idealnie okrągłe lecz w przekroju lekko spłaszczone. Bezpośrednie pomiary śrubą mikrometryczną dały wyniki 0,95mm i 1,09mm w kierunkach wzajemnie prostopadłych. Geometrię włókien EKOMET przedstawiono na rys. 4.3.6.1.



Rys. 4.3.6.1. Kształt włókien EKOMET 50/1.00. Podane przez producenta wartości nominalne  $a$  oraz  $b$  wynosiły odpowiednio  $5 \pm 2$  i  $3 \pm 1$  mm.

Ponieważ włókna EKOMET mają w przekroju kołowym kształt nieregularny w związku z czym obliczono równoważną średnicę włókien  $d_e$ . Przez równoważną średnicę włókna Autor rozumie średnicę przekroju włókna posiadającego identyczne pole przekroju co badane włókno ale o przekroju idealnie kołowym. W wypadku pola poprzecznego  $A$  średnica równoważna wynosi:



$$d_e = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (4.3.6.1)$$

Tak wyznaczona równoważna średnica włókien EKOMET wynosi 1,022 mm.

#### 4.3.7. Dodatek mikrokrzemionki.

Zaroby modyfikowano mikrokrzemionką z Huty Łaziska w postaci suchego pyłu. W tabeli 4.3.7.1. zestawiono parametry mikrokrzemionki przyjmowane do dalszych obliczeń.

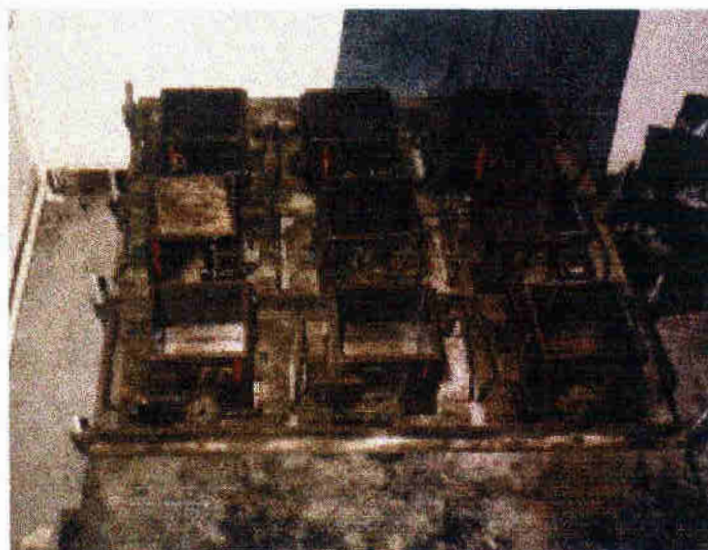
Tab.4.3.7.1. Cechy fizyczne mikrokrzemionki przyjęte do dalszych obliczeń.

Cecha		Wielkość
Powierzchnia właściwa		140000 cm <sup>2</sup> /g
Gęstość	$\rho_{mk}$	2,23 g/cm <sup>3</sup>
Wielkość ziaren	$d_{mk}$	0 - 1 μm.

#### 4.4. Metodyka badań.

Składniki kompozytu betonowego były wsypywane do bębna betoniarki przeciwbieżnej (rys.4.4.2.) i mieszane na sucho przez dwie minuty, a następnie po dolaniu wody z dodatkiem plastyfikatora przez kolejne trzy minuty. Dodatek włókien stalowych dozowano w trakcie mieszania składników na mokro w sposób uniemożliwiający powstawanie tak zwanych „jeży”.

Wszystkie próbki niezależnie od ich wymiarów i przeznaczenia były wibrowane mechanicznie na stole wibracyjnym o częstotliwości drgań  $50\pm 5\text{Hz}$  i średniej amplitudzie 0,5 mm. Formy były zawsze sztywno przymocowane do stołu (rys. 4.4.1.), a formowanie próbek odbywało się w dwóch turach po 2 minuty wibrowania. Po zaformowaniu próbki dojrzewały w warunkach laboratoryjnych do momentu badania.



Rys.4.4.1. Formy 15\*15\*15 cm przymocowane do stołu wibracyjnego za pomocą szyn stalowych .



Rys.4.4.2. Betoniarka przeciwbieżna o pojemności 135 dm<sup>3</sup>. W bębnie betoniarki widoczne składniki kompozytu betonowego przed mieszaniem na sucho.

#### 4.4.1. Oznaczenie gęstości pozornej świeżej mieszanki betonowej.

Badanie gęstości pozornej mieszanki betonowej polega na pomiarze objętości zagęszczonej próbki mieszanki betonowej w dm<sup>3</sup> z dokładnością do 0,3% oraz jej masy w kg z dokładnością do 0,2%. Masę próbki określa się jako różnicę masy próbki wraz z cylindrem i masy samego cylindra. Badanie to nie jest objęte normą. Do badania autor użył cylindra o objętości 10 dm<sup>3</sup> (rys.4.4.3.1.). Gęstość pozorną zagęszczonej mieszanki betonowej wyznaczono ze wzoru:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V}, \quad (4.4.1.1.)$$

gdzie:  $m_1$  - masa pustego cylindra,

$m_2$  - masa próbki wraz z cylindrem,

$V$  - objętość mieszanki w cylindrze.

Badanie wykonywano trzykrotnie dla każdej mieszanki.

#### 4.4.2. Oznaczenie konsystencji metodą Ve-Be.

Badanie konsystencji metodą Ve-Be polega na oznaczeniu czasu w sekundach potrzebnego dla rozplięcia się mieszanki w aparacie Ve-Be (rys.4.4.3.1.) do równej poziomej powierzchni pod wpływem określonych drgań. Badanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-88/B-06250 „Beton zwykły” i wykonywano trzykrotnie dla każdej mieszanki.

Tab.4.4.2.1. Ocena konsystencji metodą VeBe.

Symbol konsystencji	Rodzaj konsystencji	Czas wibrowania w sekundach
K-1	Wilgotna	30-50
K-2	Gęstoplastyczna	12-30
K-3	Plastyczna	5-12
K-4	Półciekła	0-5
K-5	Ciekła	-

#### 4.4.3. Oznaczenie zawartości powietrza w mieszance betonowej metodą ciśnieniową.

Metoda ciśnieniowa polega na oznaczeniu ilości powietrza w mieszance betonowej przy wykorzystaniu zjawiska ściśliwości powietrza w tej mieszance i praktycznie nieściśliwości innych jej składników. Badanie wykonana zgodnie z normą PN-88/B-06250 „Beton zwykły”. Zawartość powietrza  $p_p$  w mieszance betonowej w procentach obliczono według wzoru:

$$p_p = \frac{p \cdot \Delta V_p}{p - H} \cdot 100, \quad (4.4.3.1.)$$

gdzie:

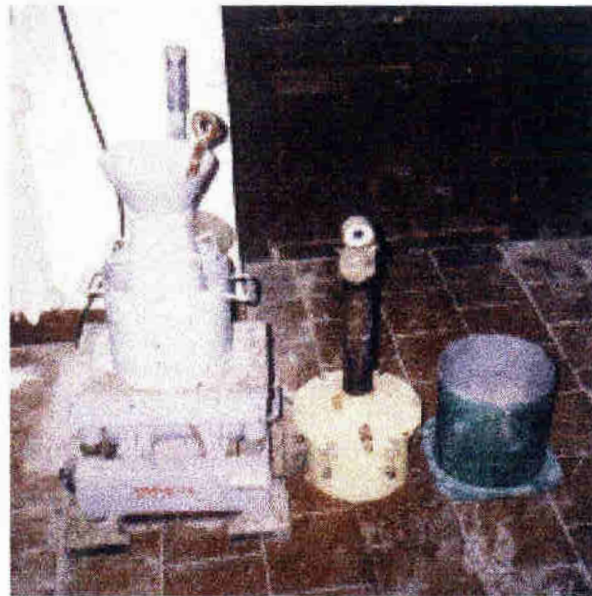
$p$  - ciśnienie całkowite powietrza w aparacie  
(atmosferyczne i nadciśnienie) w kPa,

$\Delta V_p$  - zmiana objętości powietrza w mieszance betonowej w %;

$$\Delta V_p = (h_1 - h_2)/5000,$$

$H$  - ciśnienie atmosferyczne w kPa.

Badanie wykonywano trzykrotnie dla każdej mieszanki



Rys. 4.4.3.1. Aparaty do badania cech świeżej mieszanki betonowej. Od lewej widoczny aparat Ve-Be na stoliku wibracyjnym o częstotliwości drgań 50 Hz i średniej amplitudzie 0,5 mm. Pośrodku widoczny aparat ciśnieniowy o objętości 5 dm<sup>3</sup> z rurą pomiarową do oznaczania zawartości powietrza w świeżej mieszance betonowej. Z prawej widoczny cylinder metalowy o średnicy 210 mm i wysokości 300 mm służący do oznaczania gęstości pozornej świeżej mieszanki betonowej.

#### 4.4.4. Badanie wytrzymałości na ściskanie.

Badanie wytrzymałości na ściskanie polega na oznaczeniu siły niszczącej próbkę betonową w kN oraz powierzchni ściskanej przekroju próbki w cm<sup>2</sup>. Badanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-88/B-06250 „Beton zwykły”. Badanie przeprowadzono na dziewięciu próbkach 15\*15\*15 cm dla każdego zarobu. W trakcie badania próbki były obciążane równomiernie wzrastającą siłą odpowiadającą prędkości przyrostu naprężeń 0,5 - 0,1 MPa/s.

#### 4.4.5. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu.

Badanie polega na oznaczeniu wytrzymałości na rozciąganie przez rozłupywanie próbek sześciennych wzdłuż przeciwległych tworzących podczas ich ściskania. Badanie wykonano zgodnie z instrukcją ITB nr 194 „Wytyczne badania cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach”. Badanie przeprowadzono na dziewięciu próbkach 15\*15\*15 cm dla każdego zarobu. W trakcie badania próbki były obciążane równomiernie wzrastającą siłą odpowiadającą prędkości przyrostu naprężeń 0,05 - 0,01 MPa/s. Wytrzymałość kompozytu betonowego na rozłupywanie obliczono z dokładnością do 0,1 MPa ze wzoru:

$$R = \frac{2F}{\pi d_1 d_2} \cdot 10, \quad (4.4.5.1.)$$

gdzie:  $F$  - siła powodująca rozłupanie próbki w kN,  
 $d_1, d_2$  - długość i wysokość próbki pryzmatyczne.

#### 4.4.6. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu.

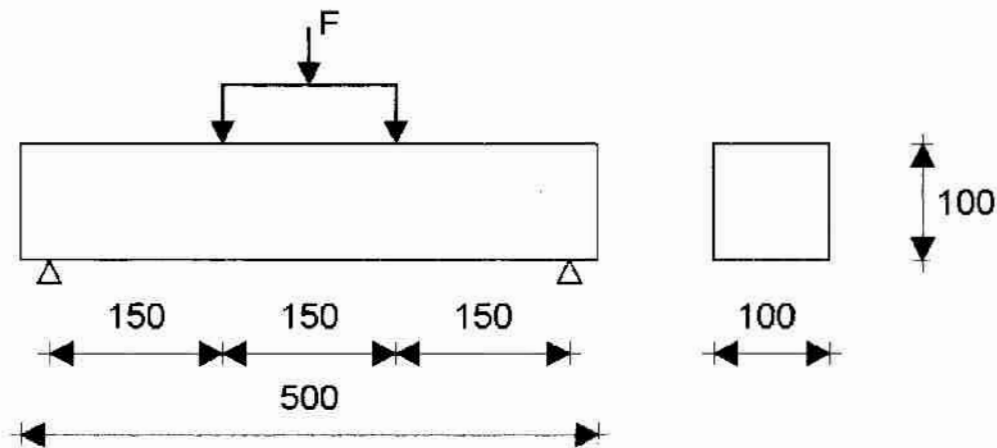
Badanie polega na określeniu naprężeń rozciągających w pryzmatycznej próbce betonowej poddanej zginaniu. Próbki obciąża się dwiema siłami skupionymi o rozstawie 1/3 rozpiętości. Badanie wykonano opierając się na Instrukcji ITB nr 194 oraz normie ASTM C-1018-89. Schemat obciążenia belki próbnej przedstawiono na rys.4.4.6.1.

Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu obliczano ze wzoru:

$$R = \frac{2F \cdot L}{d_1 \cdot d_2^2} \cdot 10, \quad (4.4.6.1.)$$

gdzie:

- $F$  - siła niszcząca w kN,  
 $L$  - rozpiętość belki między rolkami podporowymi w cm,  
 $d_1, d_2$  - wymiary przekroju poprzecznego belki w cm.



Rys.4.4.6.1. Schemat obciążenia belki o wymiarach 500\*100\*100mm.

#### 4.4.7. Badanie odkształceń przy ścisnaniu osiowym.

Badanie polega na obciążeniu próbki z pomiarem odkształcenia. Badanie przeprowadzono na walcach o średnicy 15cm i wysokości 50 cm. Na pobocznicę próbek walcowych naklejono na trzech przeciwległych miejscach repery do pomiaru odkształceń o bazie pomiarowej 10 cm. Urządzenie pomiarowe miało zdolność odczytu  $1 \cdot 10^{-6}$  m. Próbki obciążano od 0 kN do zniszczenia przy zachowaniu stałej prędkości przyrostu naprężeń równej 0,5 MPa/s w skokach co 40 kN w czasie dokonywania odczytów. Badanie przeprowadzono na sześciu próbkach dla każdego zarobu.

#### 4.4.8. Badanie skurczu.

Badanie polega na określeniu różnicy pomiędzy długością próbki zmierzonej bezpośrednio po rozformowaniu, a długością jaką ma ta próbka w następstwie wysychania w okresie jej przechowywania. Badanie wykonano zgodnie z instrukcją ITB nr 194 „Wytyczne badania cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach”. Badanie wykonano na próbkach pryzmatycznych o wymiarach 10\*10\*50 cm na aparacie Amshlera. Odkształcenie skurczowe obliczano ze wzoru:

$$\varepsilon_s = \frac{(l_0 - l_t)}{l_0}, \quad (4.4.8.1.)$$

gdzie:

$l_0$  - odległość pomiędzy punktami pomiarowymi zmierzona tuż po rozformowaniu próbki,

$l_t$  - odległość pomiędzy punktami pomiarowymi zmierzona po okresie wysychania próbki.

Badanie było przeprowadzane na serii sześciu próbek dla każdego zarobu.

#### 4.4.9. Badanie pełzania.

Badania próbek pod obciążeniem działającym długotrwale zostały przeprowadzone na pełzarkach mechanicznych. Próbki były mocowane w pełzarkach pojedynczo. Przez cały czas badania była utrzymywana stała siła obciążająca z dokładnością +/- 5%. Do pomiaru odkształceń stosowano przyrządy pomiarowe o zdolności odczytu nie mniejszej niż  $2,5 \cdot 10^{-5}$ . Baza pomiarowa 10 cm spełniała warunek przynajmniej trzykrotnego nominalnego wymiaru maksymalnego ziarna kruszywa. Tensometry nasadowe w trakcie pomiaru były umieszczane na dwóch przeciwległych liniach pomiarowych rozmieszczonych na poboczniczy próbki. Od-



czyty zmierzone wzdłuż linii pomiarowych rozmieszczonych na poboczniczy próbki nie różniły się od siebie więcej niż 10%. Pierwszego pomiaru dokonano po 5 minutach od przyłożenia obciążenia długotrwałego, 1,3 i 6 godzinach a następnie raz dziennie przez pierwsze trzy miesiące, raz w tygodniu przez kolejne trzy a następnie dwa razy w miesiącu do końca badania.

Charakterystykę pełzania betonu określa się ze wzoru:

$$\phi_t = \frac{\varepsilon_p(t)}{\varepsilon_d}, \quad (4.4.9.1.)$$

gdzie:

$\varepsilon_p(t) = \varepsilon_c(t) - \varepsilon_s(t) - \varepsilon_d$  - odkształcenie pełzania w czasie t,

$\varepsilon_c(t)$  - całkowite odkształcenie betonu w próbce

poddanej długotrwałemu działaniu obciążenia w czasie t,

$\varepsilon_s(t)$  - odkształcenie skurczu w czasie t,

$\varepsilon_d$  - odkształcenie doraźne.

Przy naprężeniach długotrwałych  $\sigma_d < 0,4R_b$  wartość odkształcenia doraźnego można określić ze wzoru:

$$\varepsilon_d = \varepsilon_e = \frac{\sigma_d}{E_b}, \quad (4.4.9.2.)$$

gdzie:

$E_b$  - współczynnik sprężystości określony według  
odpowiednich wytycznych.

#### 4.4.10. Badanie nasiąkliwości wagowej.

Badanie polega na określeniu ilości masy wody, jaką jest zdolny wchłonąć beton z otaczającego środowiska do jego masy w stanie suchym. Badanie wykonano zgodnie z normą PN-88/B-06250 „Beton zwykły”. Badanie wykonano na próbkach 15\*15\*15 cm w ilości sześciu sztuk dla każdego zarobu. Nasiąkliwość wagową betonu w % z dokładnością do 0,1% obliczono ze wzoru:

$$N_{wk} = \frac{G_2 - G_1}{G_1} \cdot 100, \quad (4.4.10.1.)$$

gdzie:  $G_1$  - średnia masa próbek suchych,

$G_2$  - średnia masa próbek nasyconych wodą.

#### 4.4.11. Badanie przepuszczalności wody przez beton.

Badanie polega na określeniu głębokości na jaką wniknęła woda w badaną próbkę podawaną pod stałym ciśnieniem w określonym czasie. Wodoprzepuszczalność kompozytu piaskobetonowego badano na urządzeniu skonstruowanym w ITB, pozwalającym na badanie próbek pod ciśnieniem od 0,2 MPa do 1,2 MPa. Badania prowadzono pod stałym ciśnieniem 1,2 MPa w ciągu 72 godzin. Po tym czasie próbki rozłupywano i mierzono głębokość wniknięcia wody. Próbki były przygotowane do badania zgodnie z PN-88/B-06250. Stanowisko do badania wodoprzepuszczalności betonu wraz z założonymi próbkami przedstawiono na rys.4.4.11.1.



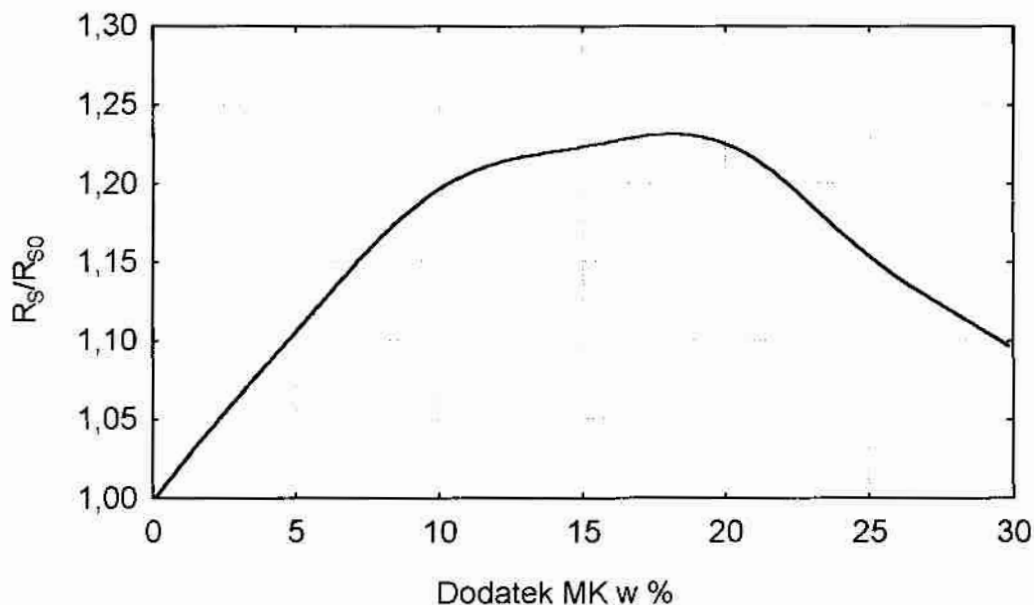
Rys.4.4.11.1. Urządzenie do badania przepuszczalności wody przez beton skonstruowane w ITB.

## 5. Wyniki badań.

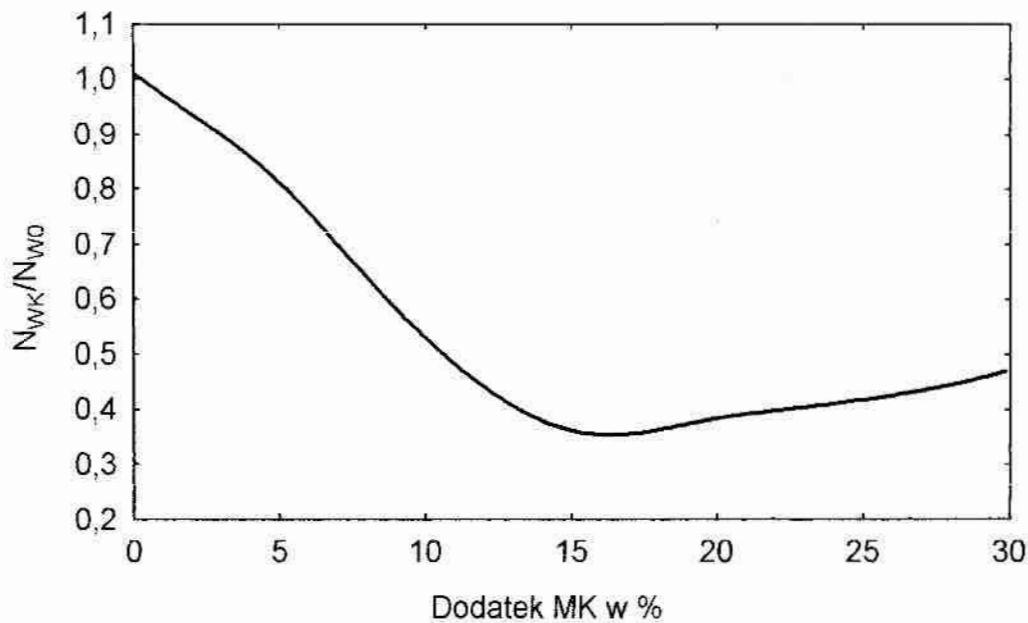
### 5.1. Badania wstępne.

Teoretyczny bardzo pozytywny wpływ dodatku MK na wybrane cechy betonów został przez autora potwierdzony w trakcie badań wstępnych w których modyfikowano mikrokrzemionką betony żwirowe o normowej krzywej przesiewu. We wszystkich omawianych badaniach MK była dozowana jako zamiennik masy suchego cementu.

Wytrzymałość na ściskanie betonu żwirowego przedstawiona na rys.5.1.1. wzrasta wraz z ilością cementu zastąpionego przez MK. Dodatek 5% MK powoduje 10% przyrostu wytrzymałości, a 10% MK daje aż 20% wzrostu wytrzymałości na ściskanie. Po przekroczeniu 20% dodatku MK następuje wyraźny spadek wytrzymałości.



Rys.5.1.1. Zależność wytrzymałości na ściskanie betonu żwirowego od dodatku mikrokrzemionki.

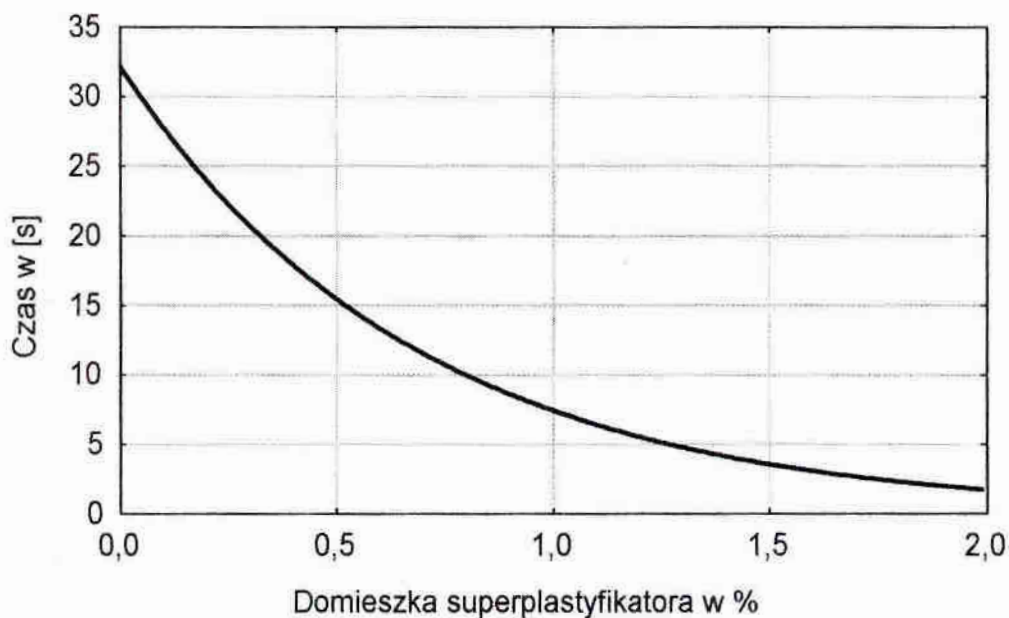


Rys.5.1.2. Zależność nasiąkliwości wagowej betonu żwirowego od dodatku mikrokrzemionki.

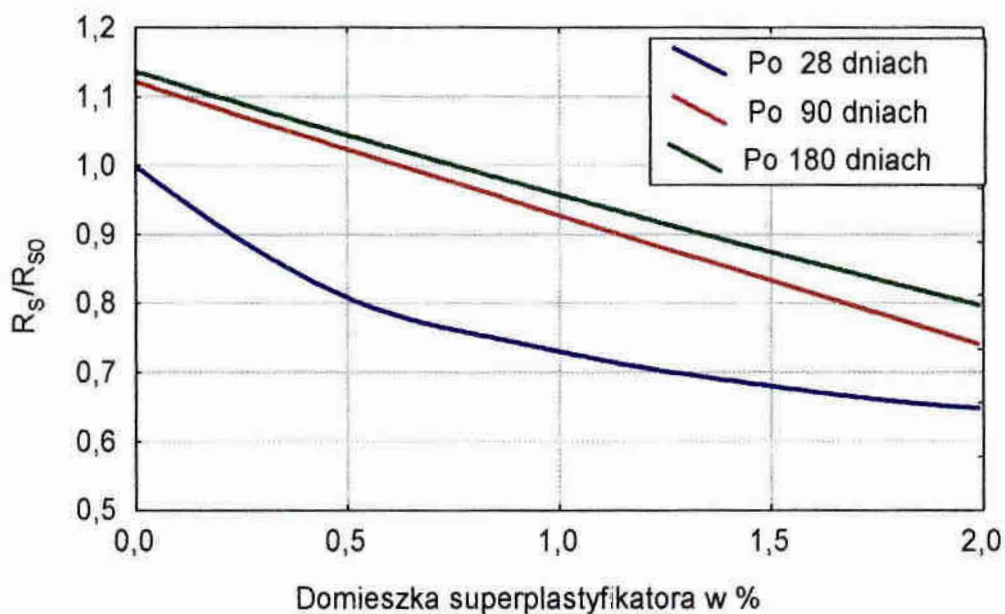
Nasiąkliwość betonu żwirowego modyfikowanego różnymi ilościami MK zobrazowano na rys.5.1.2. Wraz ze wzrostem dodatku MK maleje nasiąkliwość wagowa betonu żwirowego. Nasiąkliwość maleje tak gwałtownie, że przy dodatku 15% MK osiąga mniej niż 40% nasiąkliwości zarobu bez dodatku MK. Po przekroczeniu 15% dodatku MK nasiąkliwość utrzymuje się na bardzo niskim poziomie ale jest już większa od wielkości minimalnej. Na podstawie studiów literaturowych oraz przeprowadzonych przez autora badań nad betonami żwirowymi modyfikowanymi mikrokrzemionką [103,105,132,133] można uznać, że najbardziej optymalnym dodatkiem MK jest 15%.

Stosowanie mikrokrzemionki jako dodatku do betonów żwirowych przedstawia jeden istotny problem. Przy optymalnym 15-procentowym dodatku mikrokrzemionki zastępującej cement, konsystencja świeżej mieszanki betonowej spada o jeden a nawet dwa stopnie (konsystencja mierzona na aparacie VeBe), a sama mieszanka staje się trudno urabialna. Taki stan rzeczy niejako zmusza do zastosowania superplastyfikatora. Autor przeprowadził cykl badań nad betonami żwirowymi modyfikowanymi 15% MK oraz od 0 do 2% superplastyfikatora Betoplast 1. Domieszka superplastyfikatora sprawiła, że konsystencja zarobu żwirobe-

tonowego z wilgotnej spadła do gęstoplastycznej przy dodatku 0,5% superplastyfikatora, plastycznej przy dodatku 1,0% oraz półciekłej przy dodatku 1,5% i 2,0%. Wyniki badania konsystencji przedstawiono na rys.5.1.3.

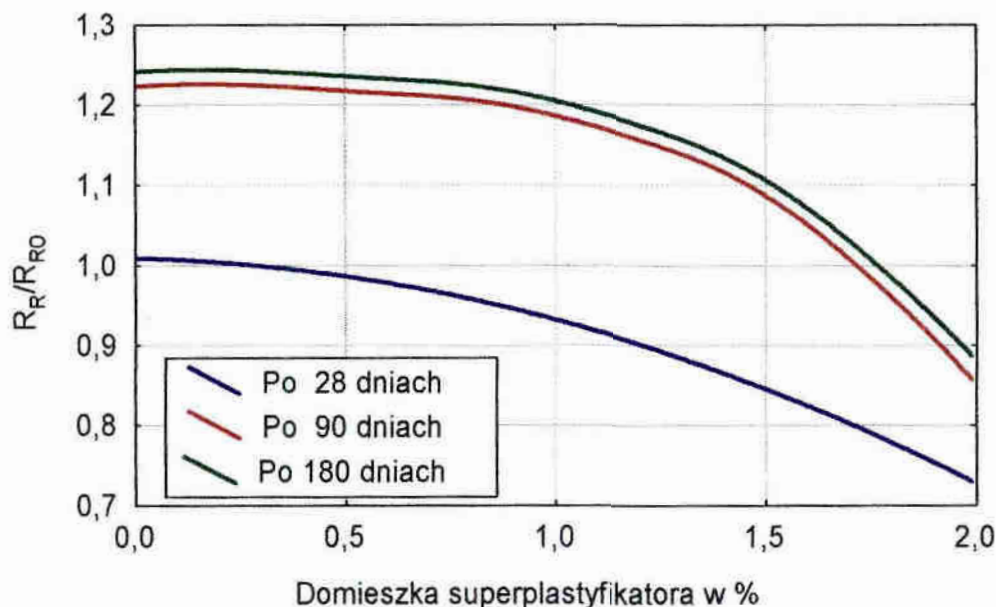


Rys.5.1.3. Konsystencja świeżej mieszanki żwirobotonowej z dodatkiem 15% MK.



Rys.5.1.4. Wytrzymałość na ściskanie betonu żwirowego z dodatkiem 15% MK w zależności od czasu dojrzewania i ilości superplastyfikatora.

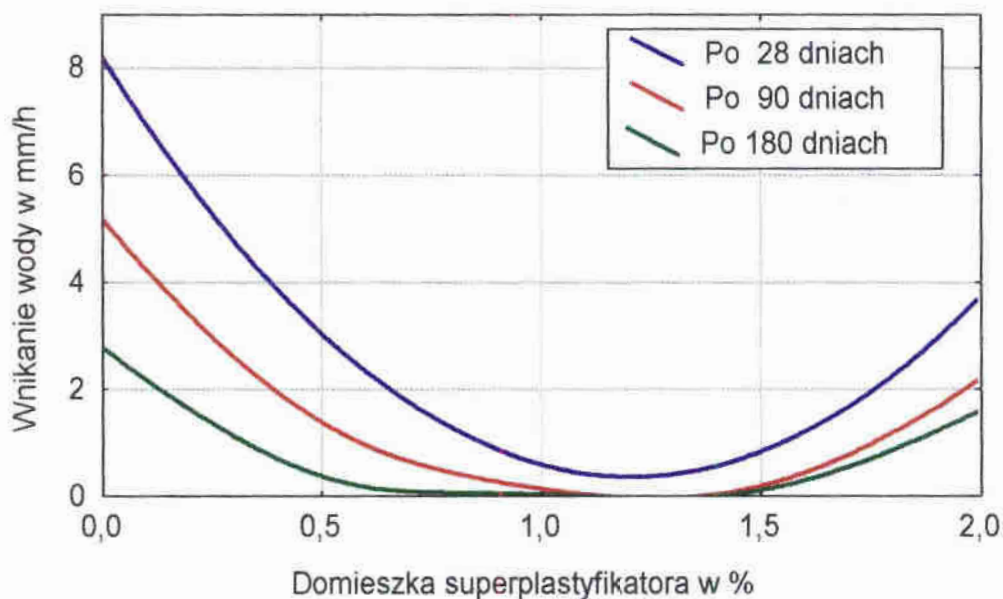
Po 28, 90 i 180 dniach dojrzewania przeprowadzono badania wytrzymałościowe na próbkach 15\*15\*15 cm. Wyniki badania na ściskanie żwirobotonu z dodatkiem 15% MK przedstawiono na rys.5.1.4. Wytrzymałość, która w zarobie bez domieszki PL jest największa spada wraz ze wzrostem jego zawartości aby osiągnąć swoje minimum przy dodatku 2%. W ten sposób tracimy niejako cały przyrost wytrzymałości uzyskany dzięki 15-procentowemu dodatkowi MK. Między wytrzymałością po 28 dniach i po 90 dniach jest różnica kilkunastu procent, a między wytrzymałością po 90 dniach i po 180 dniach tylko kilku. Wynik ten jest tym bardziej ciekawy, że teoretycznie MK jest bardzo reaktywna w betonie i można się było spodziewać znaczącego wzrostu wytrzymałości również po 180 dniach dojrzewania. Podobnie do zależności na ściskanie wygląda zależność wytrzymałości na rozciąganie badanej poprzez rozłupywanie zobrazowanej na rys.5.1.5.



Rys.5.1.5. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu żwirowego z dodatkiem 15% mikrokrzemionki w zależności od czasu dojrzewania i ilości superplastyfikatora.

Badanie wodoszczelności przeprowadzono na próbkach 15\*15\*7,5 cm poddanych działaniu wody o ciśnieniu 1,2 MPa w ciągu 168 godzin. Jako miarę

szczelności przyjęto prędkość wnikania wody w beton. W ten sposób opracowane wyniki zestawiono na rys.5.1.6., gdzie wyraźnie widać dwa zjawiska. Pierwsze to gwałtowny przyrost szczelności żwirobetonu z dodatkiem MK wraz ze wzrostem zawartości PL. Zjawisko to uzyskuje swoje maksimum przy dodatku od 1 do 1,5%. Drugie zjawisko to bardzo duży przyrost szczelności betonu między 28 i 90 dniem dojrzewania oraz podobny przyrost szczelności między 90 i 180 dniem. Beton żwirowy po 90 i 180 dniach dojrzewania jest tak szczelny, że w przedziale od 1,1 do 1,4% PL można go uznać za całkowicie szczelny.



Rys. 5.1.6. Wodoszczelność wyrażona za pomocą prędkości wnikania wody do betonu żwirowego z dodatkiem 15% mikrokrzemionki w zależności od czasu dojrzewania i ilości superplastyfikatora.

Jak widać z powyższych rozważań superplastyfikator, skądinąd bardzo przydatny i pożądana domieszka do betonów mikrokrzemionkowych nie może być stosowany bezkrytycznie w szczególności ze względu na ich wytrzymałość. Wodoszczelność żwirobetonów mikrokrzemionkowych, o rząd wielkości większa od żwirobetonów szczelnych uzyskiwanych tradycyjnymi metodami może zostać jeszcze podwyższona przez umiejętne stosowanie superplastyfikatora. W świetle otrzy-



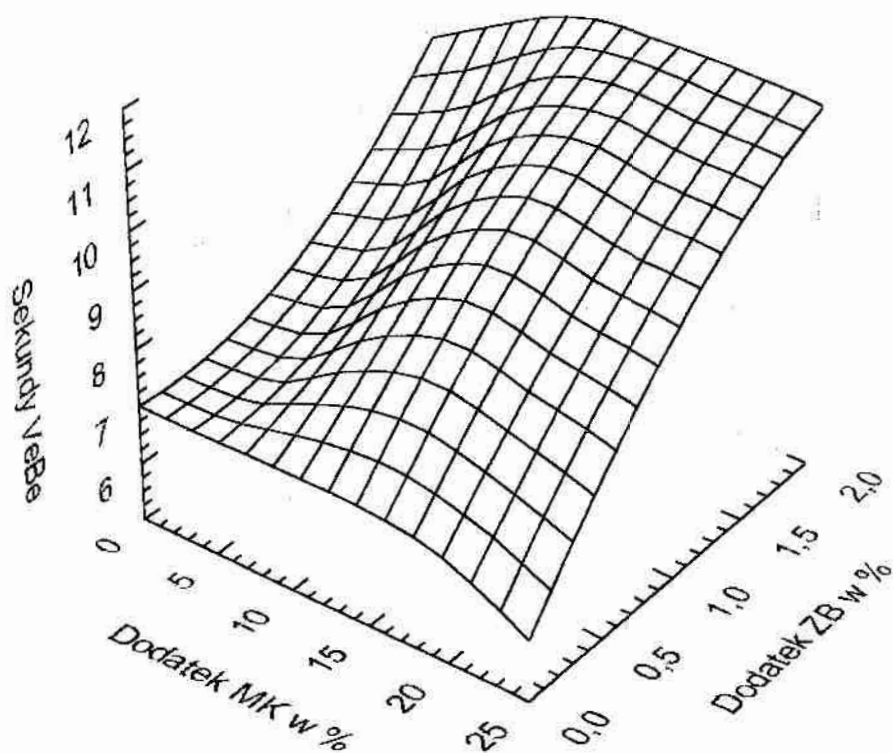
manyh wyników optymalną ilością superplastyfikatora Betoplast-1 stosowaną w betonie z dodatkiem 15% MK jest 1%.

## **5.2. Badania świeżej mieszanki piaskobetonowej.**

Cykl badań świeżej mieszanki piaskobetonowej prowadzono na zarobach w czasie nie dłuższym niż 10 minut od ich wykonania. Każde badanie było wykonywane na osobnej porcji świeżej mieszanki, która po zbadaniu była usuwana.

### **5.2.1. Konsystencja.**

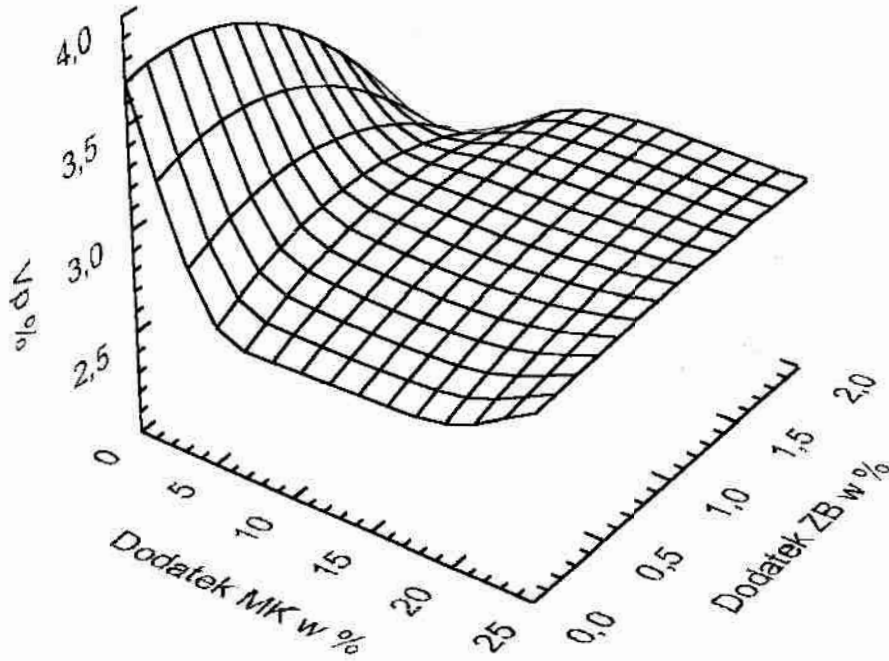
Konsystencję świeżej mieszanki piaskobetonowej badano na aparacie Ve-Be zgodnie z procedurą podaną w rozdziale 4. Wyniki badania konsystencji przedstawiono na rysunku nr 5.2.1.1. Dzięki stosunkowo dużemu dodatkowi superplastyfikatora zdołano utrzymać prawie wszystkie zaroby w granicach od 7 do 11 sekund co odpowiada normowej konsystencji plastycznej K-3. Na rys.5.2.1.1. można zauważyć wyraźne gęstnienie konsystencji wraz z dodatkiem zbrojenia i niezależnie od ilości dodawanej mikrokrzemionki. Dodatek mikrokrzemionki również powoduje gęstnienie konsystencji przy ilościach od 0 do 15%, a w zakresie od 15 do 25% następuje powtórne upłynnienie zarobów. Trzeba tutaj zaznaczyć, że mierzona konsystencja w miarę zwiększania ilości tak mikrokrzemionki jak i zbrojenia w świeżej mieszance betonowej coraz bardziej nie odzwierciedlała urabialności wykonywanego zarobu. Zjawisko to narastało tak gwałtownie, że zaroby o zawartości 20-25% MK i 1,5-2% ZB pomimo plastycznej konsystencji (11sekund) były w ogóle nie urabialne i nie wykonano z nich żadnych próbek.



Rys.5.2.1.1. Konsystencja świeżej mieszanki piaskobetonowej w zależności od dodatku mikrokrzemionki MK i zbrojenia rozproszonego ZB.

### 5.2.2. Zawartość powietrza.

Zawartość powietrza w świeżej mieszance piaskobetonowej badano metodą ciśnieniową w sposób opisany w rozdziale 4. Wyniki badania przedstawiono na rysunku 5.2.2.1.

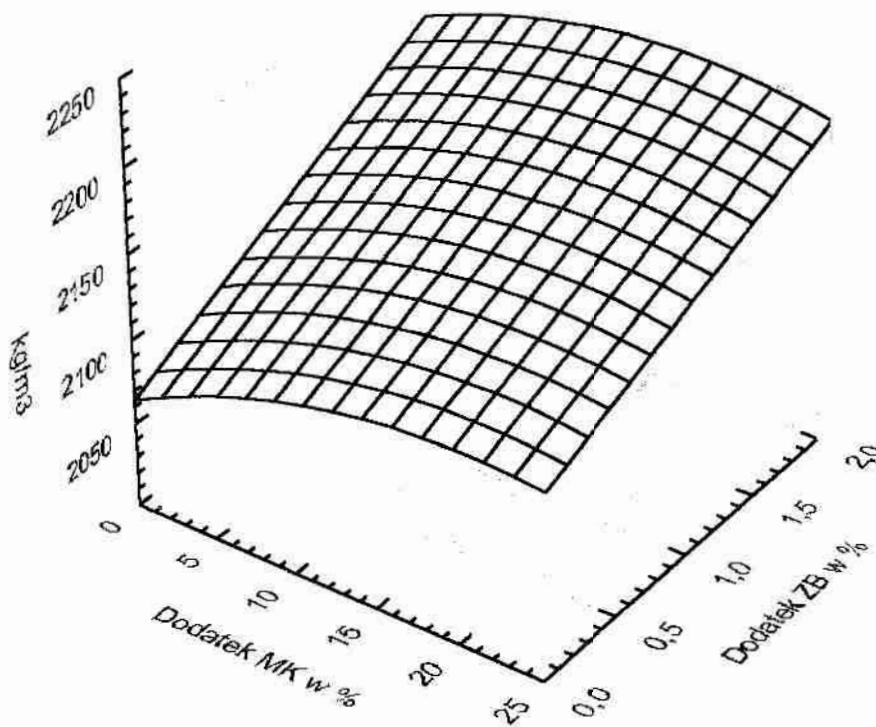


Rys.5.2.2.1. Zawartość powietrza w świeżej mieszance piaskobetonowej  $V_p$  w zależności od dodatku mikrokrzemionki MK i zbrojenia rozproszonego ZB.

Zawartość powietrza w badanych zarobach piaskobetonowych kształtowała się poniżej 4%, a dla większości zarobów wynosiła od 2,5% do 3%. Tylko zaroby modyfikowane niewielką ilością mikrokrzemionki oraz włókien stalowych charakteryzowały się zawartością powietrza większą od 3%. Wraz ze wzrostem dodatku mikrokrzemionki spadła zawartość powietrza w świeżej mieszance betonowej. Wielkość dodatku włókien stalowych nie miała znaczącego wpływu na omawianą cechę dla zarobów o dodatku mikrokrzemionki większym od 5%.

### 5.2.3. Gęstość pozorną.

Gęstość pozorną świeżej mieszanki piaskobetonowej zbadano zgodnie z procedurą podaną w rozdziale 4.



Rys.5.2.3.1. Gęstość pozorną świeżej mieszanki piaskobetonowej  $\rho_{PM}$  w  $\text{kg/m}^3$ .

Wyniki badania gęstości pozornej przedstawiono na rysunku 5.2.3.1. Zależność zobrazowaną na rysunku 5.2.3.1. opisuje równanie 5.2.3.1.

$$\rho_{PM} = 2064,215 + 4,978x + 51,308y - 0,124x^2 - 0,487xy + 0,414y^2, \quad (5.2.3.1.)$$

gdzie:  $x$  - dodatek MK w %,

$y$  - dodatek ZB w %,

Gęstość pozorna świeżej mieszanki piaskobetonowej wzrasta wraz z dodatkiem włókien stalowych. Zarób niemodyfikowany ma gęstość  $\rho_{PM} = 2064 \text{ kg/m}^3$ , a zaroby modyfikowane maksymalną ilością 2% włókien stalowych po  $2200 \text{ kg/m}^3$ . Dodatek mikrokrzemionki ma bardzo niewielki wpływ na tą cechę świeżej mieszanki piaskobetonowej.

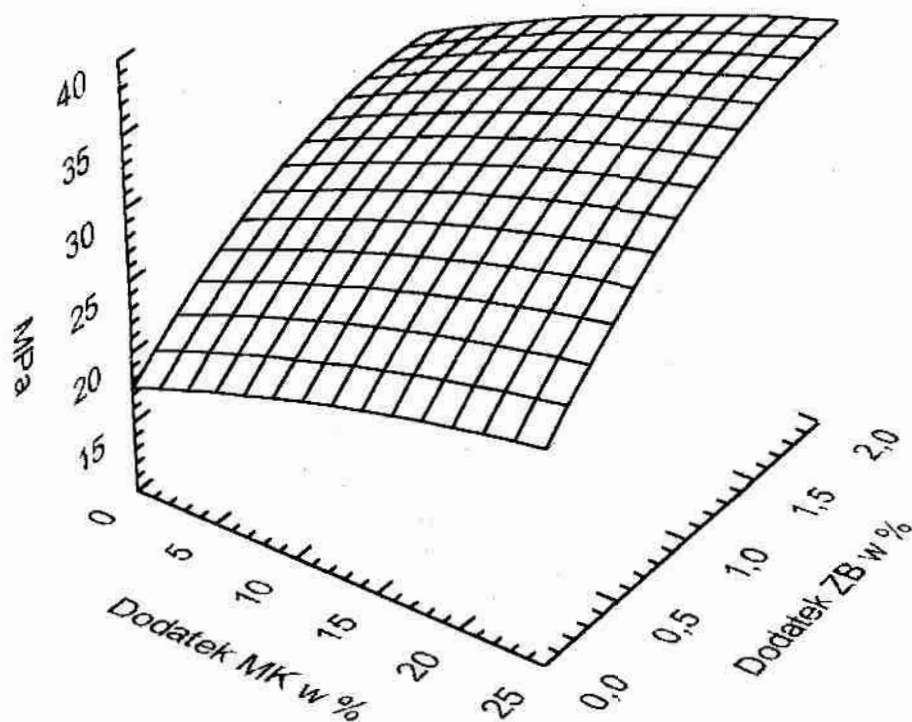
### 5.3. Badania piaskobetonu po 28 dniach dojrzewania.

Badania opisane w niniejszym punkcie przeprowadzono po 28 dniach dojrzewania betonu w warunkach laboratoryjnych ( $18^\circ\text{C} \pm 2^\circ$ ). Próbkę magazynowano w ciemnym pomieszczeniu, a same próbki były zapakowane w worki plastikowe. W dniu badania próbki rozpakowywano i poddawano badaniu. W przypadku badania wodoszczelności próbki rozpakowywano w 26 dniu dojrzewania i przygotowywano do badania wodoszczelności w 29 dniu dojrzewania. Próbki przeznaczone do badania nasiąkliwości wagowej wkładano do kuwet wypełnionych wodą po 28 dniach dojrzewania. Ostateczne ustalenie nasiąkliwości następowało w 35 dniu dojrzewania.

#### 5.3.1. Wytrzymałość na ściskanie.

Wytrzymałość na ściskanie badano według procedury podanej w rozdziale 4. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie przedstawiono na rys.5.3.1.1. Jak widać na rysunku 5.3.1.1. zarówno mikrokrzemionka jak i zbrojenie rozproszone wpływają na zwiększenie wytrzymałości na ściskanie piaskobetonu a ich wpływ na tą cechę kumuluje się. Płaszczyzna wytrzymałości na ściskanie podnosi się w obu kierunkach i to prawie z jednakową dynamiką. Wytrzymałość wzrasta od 19,7 MPa dla zarobu porównawczego (bez dodatku MK i ZB) do 36 MPa (co stanowi wzrost o 83%) dla zarobów o zawartości domieszek 20% MK i 1% ZB i większej.

Należy jednocześnie zauważyć, że wytrzymałość piaskobetonu modyfikowanego samym zbrojeniem rozproszonym osiąga swoje maksimum przy dodatku 2% i wynosi wtedy 26,7 MPa (co stanowi wzrost o 35%), a modyfikowanego samą mikrokrzemionką przy dodatku 25% i wynosi wtedy 23,9 MPa (co stanowi wzrost o 21%). Zależność przedstawioną na rys.5.3.1.1. opisuje równanie 5.3.1.1.



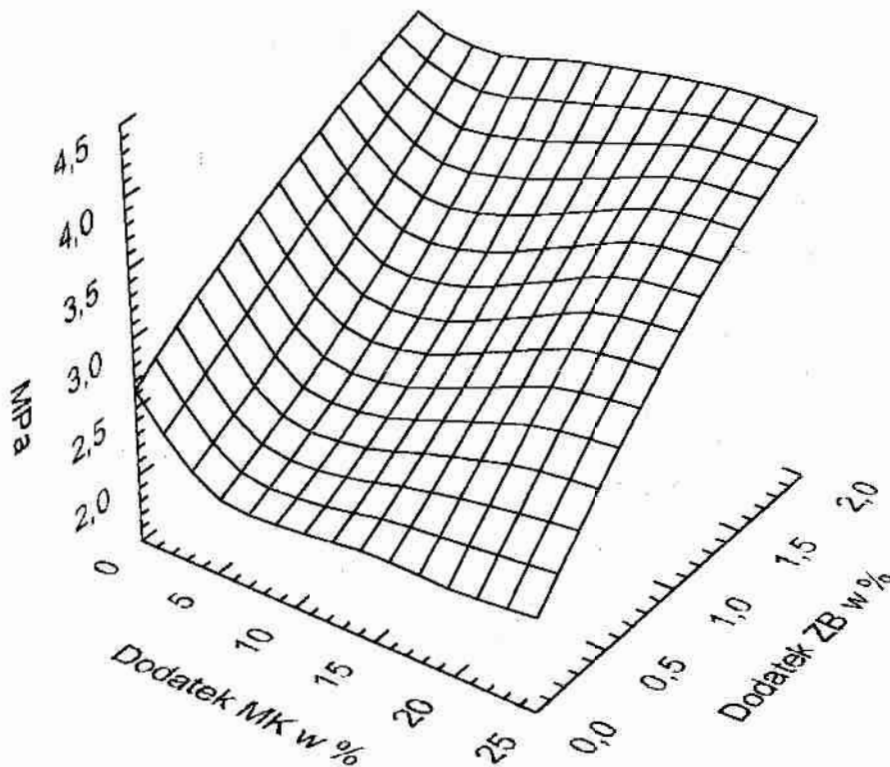
Rys.5.3.1.1. Wytrzymałość na ściskanie kompozytu piaskobetonowego  $R_{KS28}$  w zależności od dodatku mikrokrzemionki MK i zbrojenia rozproszonego ZE.

$$R_{KS28} = 17,500 + 0,431x - 0,005x^2 + 10,681y - 2,838y^2 + 0,065xy, \quad (5.3.1.1.)$$

gdzie:  $x$  - dodatek MK w %;  $y$  - dodatek ZB w %.

### 5.3.2. Wytrzymałość na rozciąganie.

Wytrzymałość na rozciąganie badano według procedury podanej w rozdziale 4. Wyniki wytrzymałości na rozciąganie badanej poprzez rozłupywanie przedstawiono na rysunku 5.3.2. Wytrzymałość na rozciąganie piaskobetonu wzrasta w miarę dodawania zbrojenia od 2,6 MPa dla zarobu zerowego do 3,6 MPa dla zarobu o maksymalnej 2% zawartości zbrojenia, co stanowi wzrost o 38%. Zaroby



Rys. 5.3.2.1. Wytrzymałość kompozytu piaskobetonowego na rozciąganie  $R_{KTR,28}$  w zależności od dodatku mikrokrzemionki MK i zbrojenia rozproszonego ZB.

modyfikowane tylko i wyłącznie mikrokrzemionką mają niższą wytrzymałość na rozciąganie od betonu porównawczego. Najniższa wytrzymałość występuje przy dodatku 5% MK i wynosi wtedy 1,9 MPa (co stanowi 73% wytrzymałości zarobu zerowego). Wytrzymałości pozostałych zarobów modyfikowanych mikrokrzemionką utrzymują się w granicach od 2,2 do 2,3 MPa. Maksymalną wytrzymałość na rozciąganie wynoszącą 4 MPa osiągają zaroby o zawartości 2% ZB i od 10% MK oraz o zawartości 1,5% ZB i od 20% MK.

Kształt powierzchni wytrzymałości na rozciąganie wyraźnie wskazuje, że na tę cechę piaskobetonu ma generalnie wpływ wielkość dodatku zbrojenia rozproszonego. Mikrokrzemionka, choć w małych ilościach obniża wytrzymałość badanych betonów, nie ma wyraźnego wpływu na tę cechę przy większej ilości.

### 5.3.3. Wodoszczelność.

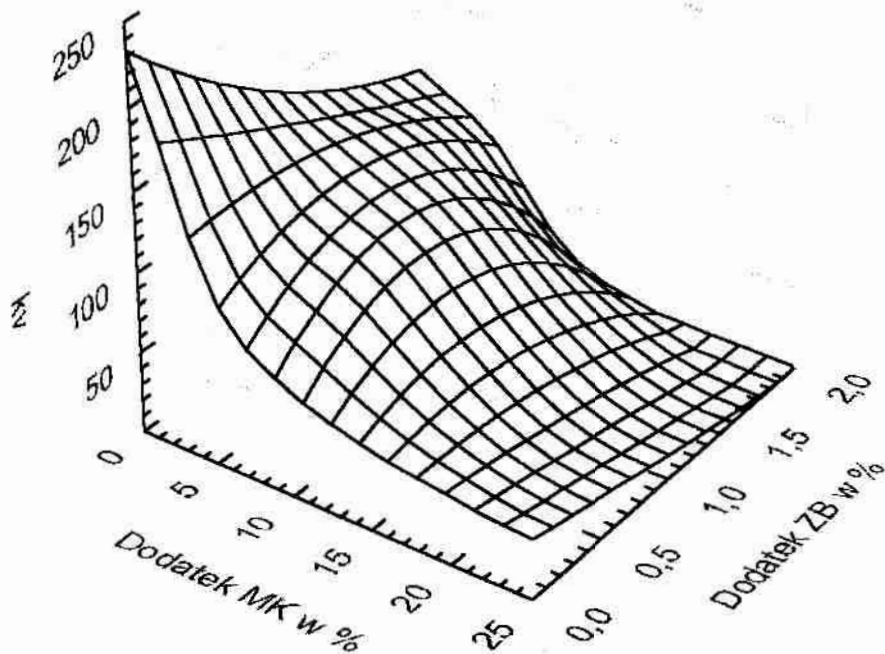
Wodoszczelność piaskobetonu badano na urządzeniu skonstruowanym w ITB szczegółowo opisanym w rozdziale 4. Badania prowadzono pod stałym ciśnieniem 1,2 MPa w ciągu 72 godzin. Po tym czasie próbki rozlupywano i mierzono głębokość wniknięcia wody. Wyniki przedstawiono za pomocą współczynnika prędkości przepływu  $k_v$  [177] obliczonego według zależności (5.3.3.1.):

$$k_v = \frac{x_{max}}{2 \sum h_i t_i}, \quad (5.3.3.1.)$$

gdzie:  $x_{max}$  - maksymalna głębokość penetracji wody w metrach,  
 $h_i$  - ciśnienie wody w metrach  $H_2O$ ,  
 $t_i$  - czas trwania ciśnienia  $h_i$  w sekundach.

Wyrażenie wodoszczelności za pomocą współczynnika  $k_v$  pozwala na porównywanie wodoszczelności próbek, przez które w trakcie badania przesączyła się woda i tych, które pozostały do końca badania szczelne. Można również porównać wodoszczelność próbek badanych w różny sposób.





Rys.5.3.3.1. Wodoszczelność kompozytu piaskobetonowego  $k_v \cdot 10^{-12}$  m/s w zależności od dodatku mikrokrzemionki MK i zbrojenia rozproszonego ZB.

Wodoszczelność betonu porównawczego, wyrażona za pomocą współczynnika  $k_v$  wynosząca  $230 \cdot 10^{-12}$  m/s odpowiada stopniowi wodoszczelności W-14 według PN-88/B-06250. Współczynnik  $k_v = 150, 100$  i  $50 \cdot 10^{-12}$  m/s odpowiada hipotetycznym stopniom wodoszczelności W-18, W-22 oraz W-32 (patrz tab.5.3.3.1.) wyznaczonym według zasady opisanej w normie. Modyfikacja piaskobetonu samym zbrojeniem rozproszonym pozwoliła uzyskać szczelność rzędu  $103 \cdot 10^{-12}$  m/s,

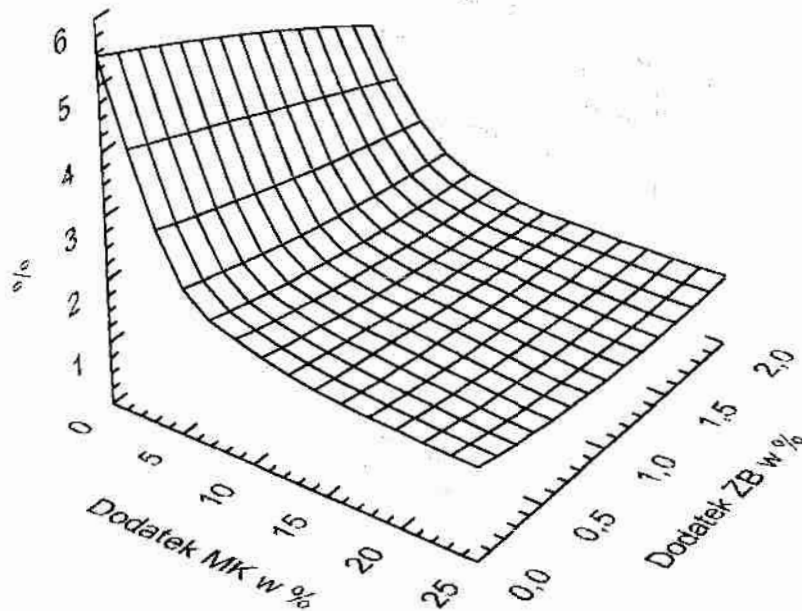
czyli W-20. Modyfikacja zarobu tylko i wyłącznie mikrokrzemionką pozwoliła osiągnąć wielkość  $39 \cdot 10^{-12}$  m/s, czyli W-36.

Tab.5.3.3.1. Tablica przeliczeniowa stopni wodoszczelności wyznaczonych według reguły podanej w normie „Beton zwykły” na współczynnik przepływu  $k_v$

Stopień wodoszczelności	$h_i t_i$ gdzie $t_i = 86400$ [s]	$\Sigma h_i t_i$ [m.*s]	$k_v 10^{-12}$ [m/s]
W2	ciśnienie 0,2 MPa	1 728 000	6510,4166
W4	ciśnienie 0,4 MPa	3 456 000	2170,1383
W6	ciśnienie 0,6 MPa	5 184 000	1085,0694
W8	ciśnienie 0,8 MPa	6 912 000	651,0416
W10	ciśnienie 1,0 MPa	8 640 000	434,0277
W12	ciśnienie 1,2 MPa	10 368 000	310,0198
W14	ciśnienie 1,4 MPa	12 096 000	232,5148
W16	ciśnienie 1,6 MPa	13 824 000	180,8449
W18	ciśnienie 1,8 MPa	15 552 000	144,6759
W20	ciśnienie 2,0 MPa	17 280 000	118,3712
W22	ciśnienie 2,2 MPa	19 008 000	98,6426
W24	ciśnienie 2,4 MPa	20 736 000	83,4668
W26	ciśnienie 2,6 MPa	22 464 000	71,5430
W28	ciśnienie 2,8 MPa	24 192 000	62,0039
W30	ciśnienie 3,0 MPa	25 920 000	54,2534
W32	ciśnienie 3,2 MPa	27 648 000	47,8707
W34	ciśnienie 3,4 MPa	29 376 000	42,5517
W36	ciśnienie 3,6 MPa	31 104 000	38,0726
W38	ciśnienie 3,8 MPa	32 832 000	34,2653
W40	ciśnienie 4,0 MPa	34 560 000	31,0019
W42	ciśnienie 4,2 MPa	36 288 000	28,1836
W44	ciśnienie 4,4 MPa	38 016 000	25,7328
W46	ciśnienie 4,6 MPa	39 744 000	23,5884
W48	ciśnienie 4,8 MPa	41 472 000	21,7013
W50	ciśnienie 5,0 MPa	43 200 000	20,0320

Na rys.5.3.3.1. wyraźnie widać, że dodatek zbrojenia pogarsza szczelność osiągniętą dzięki mikrokrzemionce gdy jej ilość nie przekracza 10%. Przy zwiększaniu ilości mikrokrzemionki szczelność kompozytu piaskobetonowego zwiększa się szczególnie w zarobach o dużej zawartości zbrojenia. Przy dodatku mikrokrzemionki większym od 15% wszystkie zaroby wykazują bardzo dużą szczelność, która stabilizuje się na poziomie  $25-23 \cdot 10^{-12}$  m/s, czyli odpowiednio W 44÷46.

### 5.3.4. Nasiąkliwość.



Rys.5.3.4.1. Nasiąkliwość wagowa  $N_{wk}$  kompozytu piaskobetonowego w zależności od dodatku mikrokrzemionki MK i zbrojenia rozproszonego ZB.

Na rys.5.3.4.1. zobrazowano wyniki badania nasiąkliwości wagowej kompozytu piaskobetonowego. Badanie nasiąkliwości przeprowadzono zgodnie z procedurą opisaną w rozdziale 4. Zarób porównawczy bez dodatku MK i ZB miał największą ze wszystkich badanych zarobów nasiąkliwość wynoszącą 5,5%. Wraz ze wzrostem dodatku mikrokrzemionki nasiąkliwość gwałtownie spada aby ustabilizować się na poziomie poniżej 1,5%. Dodatek samych włókien stalowych spowodował obniżenie nasiąkliwości do 3% przy maksymalnym 2% ich dodatku. Nasiąkliwość zarobów modyfikowanych zarówno mikrokrzemionką jak i włóknami

stalowymi kształtowała się na poziomie 1%. Na uwagę zasługuje fakt, że dodatek tylko i wyłącznie 5% MK spowodował spadek badanej cechy do 1,5%. Dalsze zwiększanie dodatku MK do 25% włącznie wpłynęło na zmniejszenie nasiąkliwości zaledwie o 0,5%.

### 5.3.5. Gęstość pozorna.

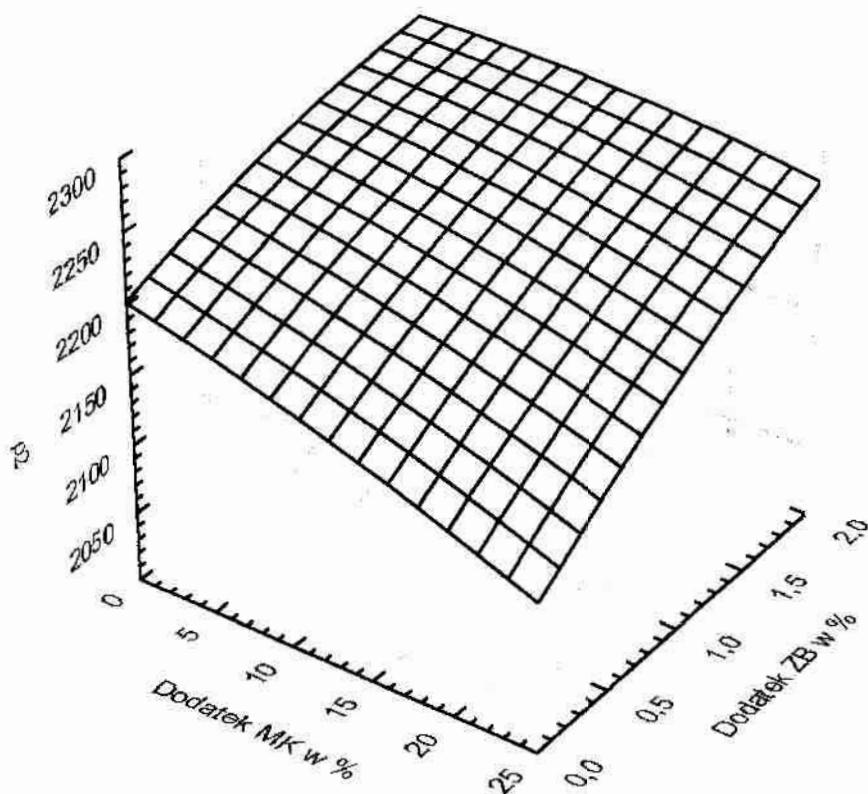
Gęstość pozorną stwardniałego kompozytu piaskobetonowego po 28 dniach dojrzewania zbadano według metodyki podanej w rozdziale 4 niniejszej pracy. Wyniki tego badania zobrazowano na rysunku 5.3.5.1. Zależność gęstości pozornej stwardniałego kompozytu piaskobetonowego od dodatku MK i ZB opisuje równanie (5.3.5.1.)

$$\rho_{PB} = 2201,728 - 2,709x - 0,042x^2 + 49,433y - 9,849y^2 + 1,514xy, \quad (5.3.5.1.)$$

gdzie:  $x$  - dodatek MK w %,

$y$  - dodatek ZB w %.

Gęstość pozorna stwardniałego kompozytu wyraźnie spada wraz ze wzrostem dodatku MK aby osiągnąć swoje minimum dla zarobu o maksymalnym 25% dodatku. Dodatek ZB wpływa na zwiększenie gęstości pozornej omawianych zarobów ale nie w tak gwałtowny sposób jak mikrokrzemionka. Gęstość pozorna zarobów o dodatku ZB większym od 1,5% stabilizuje się na poziomie około 2250 kg/m<sup>3</sup> i to bez względu na wielkość dodatku MK.

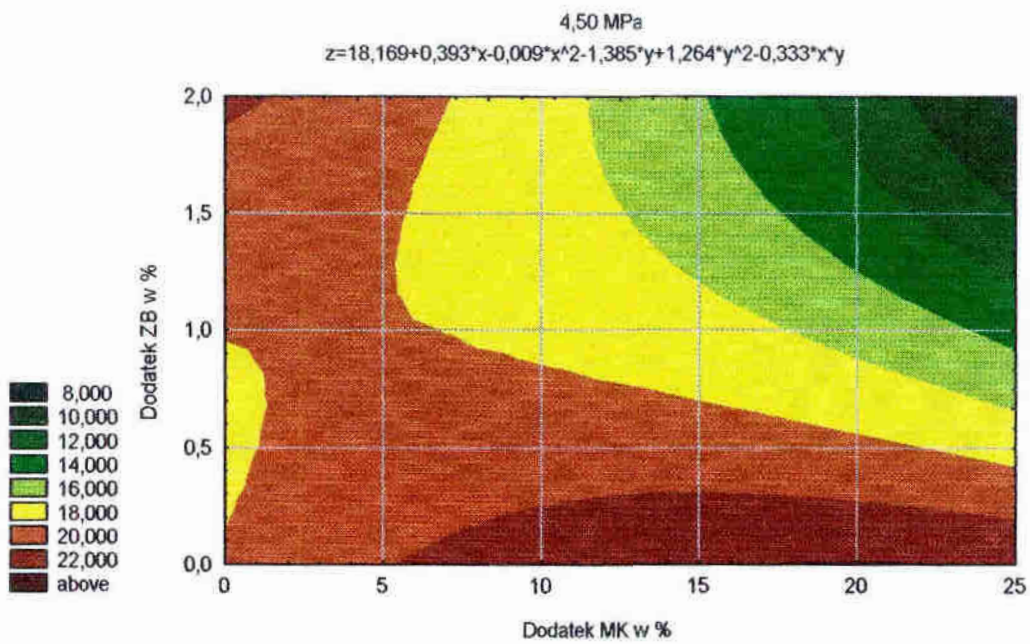


Rys.5.3.5.1. Gęstość pozorną  $\rho_{PB}$  w  $\text{kg/m}^3$  kompozytu piaskobetonowego w zależności od dodatku mikrokrzemionki MK i zbrojenia rozproszonego ZB.

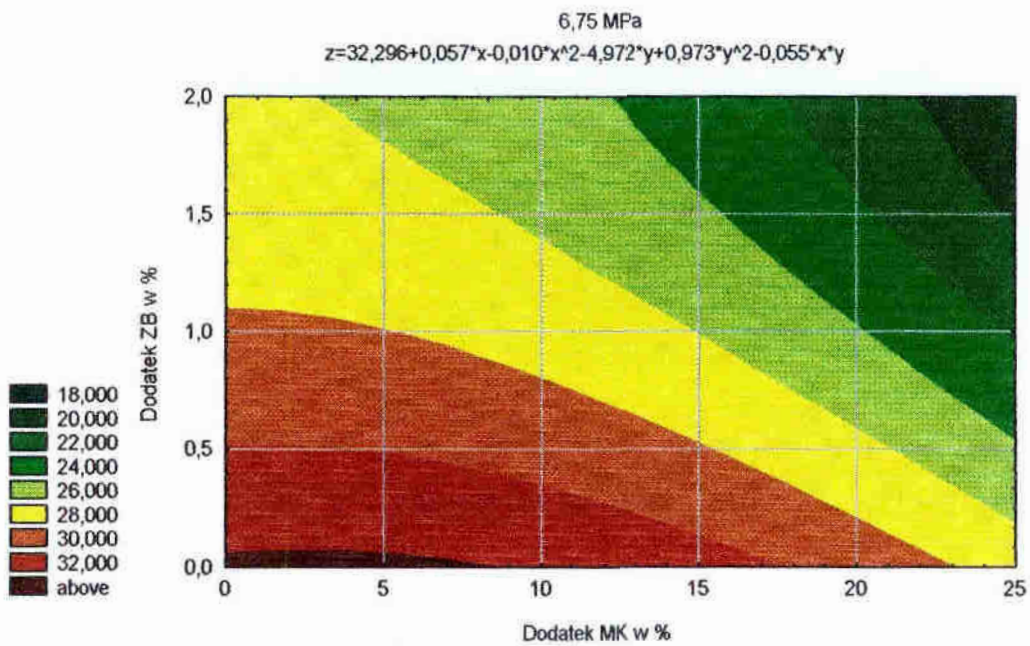
#### 5.4. Badania piaskobetonu po 120 dniach dojrzewania.

##### 5.4.1. Badanie odkształceń przy osiowym ściskaniu.

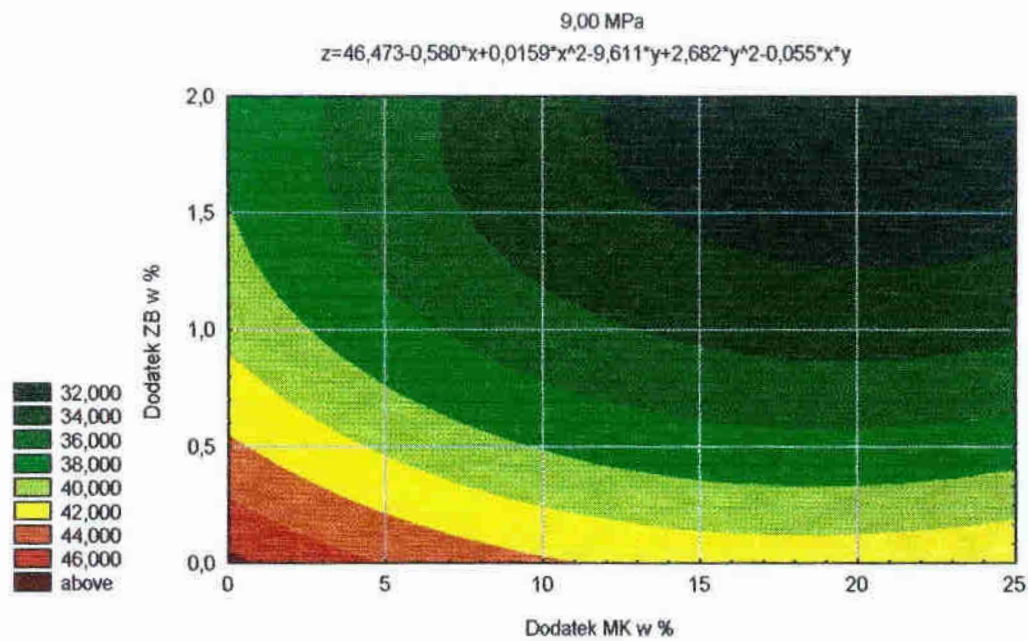
Badanie przeprowadzono zgodnie z procedurą opisaną w rozdziale 4. Na rysunkach 5.4.1.1. do 5.4.1.6. przedstawiono odkształcenie kompozytu piaskobetonowego w zależności od dodatku MK i ZB przy naprężeniach ściskających 4,50; 6,75; 9,00; 11,25; 13,50 oraz 15,75 MPa. W miarę przyrostu naprężeń



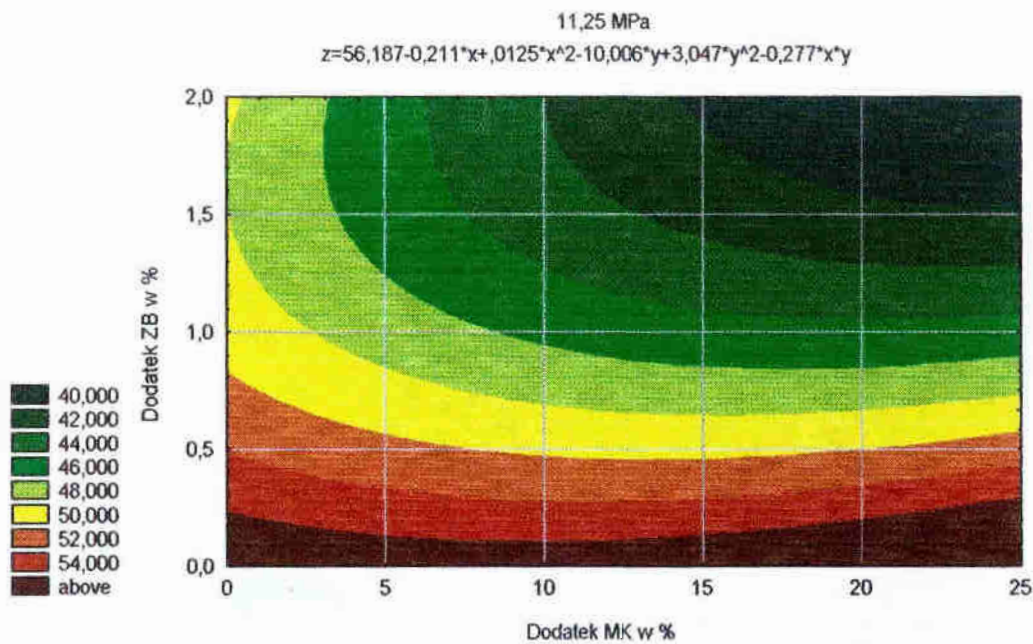
Rys.5.4.1.1. Odkształcenie kompozytu piaskobetonowego przy osiowym naprężeniu ściskającym 4,50 MPa w zależności od MK i ZB. Odkształcenia  $\epsilon_{80} \cdot 10^4$  wyrażone jest w %



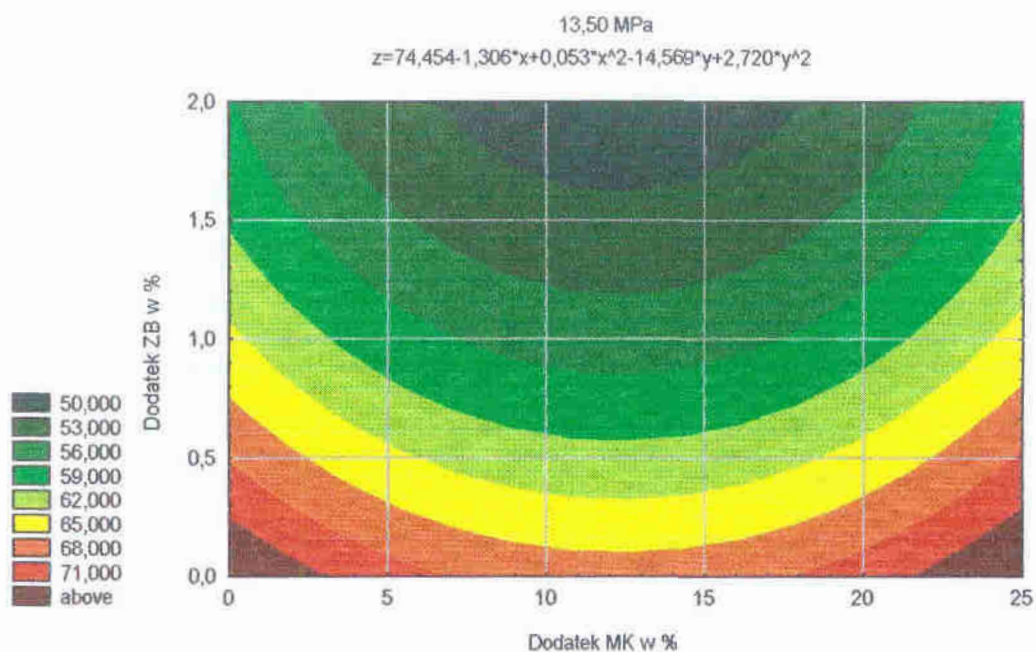
Rys.5.4.1.2. Odkształcenie kompozytu piaskobetonowego przy osiowym naprężeniu ściskającym 6,75 MPa w zależności od MK i ZB. Odkształcenia  $\epsilon_{80} \cdot 10^4$  wyrażone jest w %.



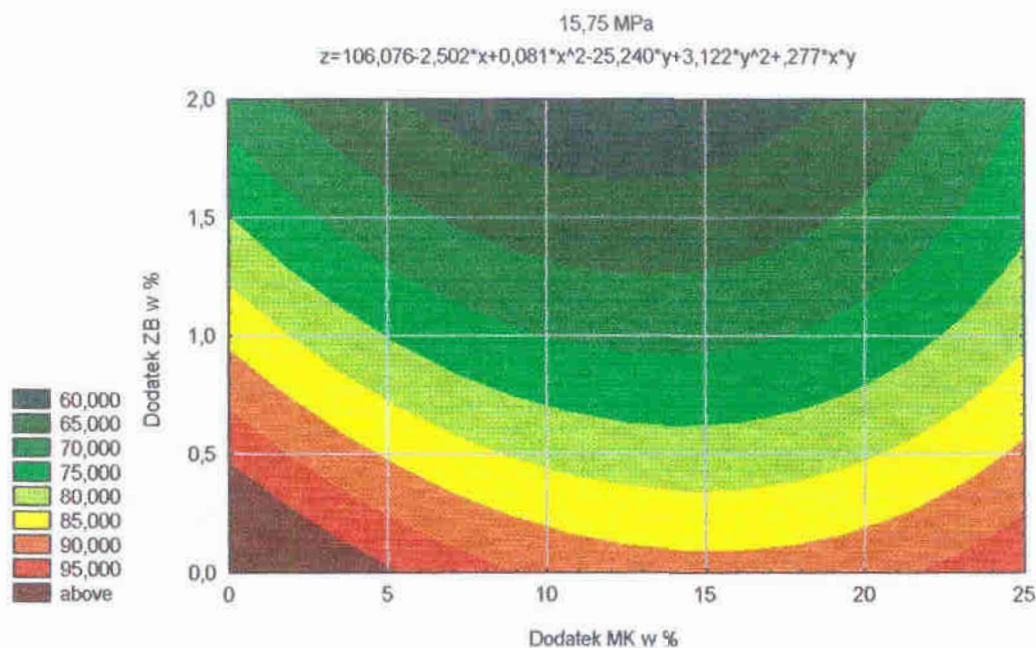
Rys. 5.4.1.3. Odkształcenie kompozytu piaskobetonowego przy osiowym naprężeniu ściskającym 9,00 MPa w zależności od MK i ZB. Odkształcenia  $\epsilon_{80} * 10^4$  wyrażone jest w %.



Rys. 5.4.1.4. Odkształcenie kompozytu piaskobetonowego przy osiowym naprężeniu ściskającym 11,25 MPa w zależności od MK i ZB. Odkształcenia  $\epsilon_{80} * 10^4$  wyrażone jest w %.



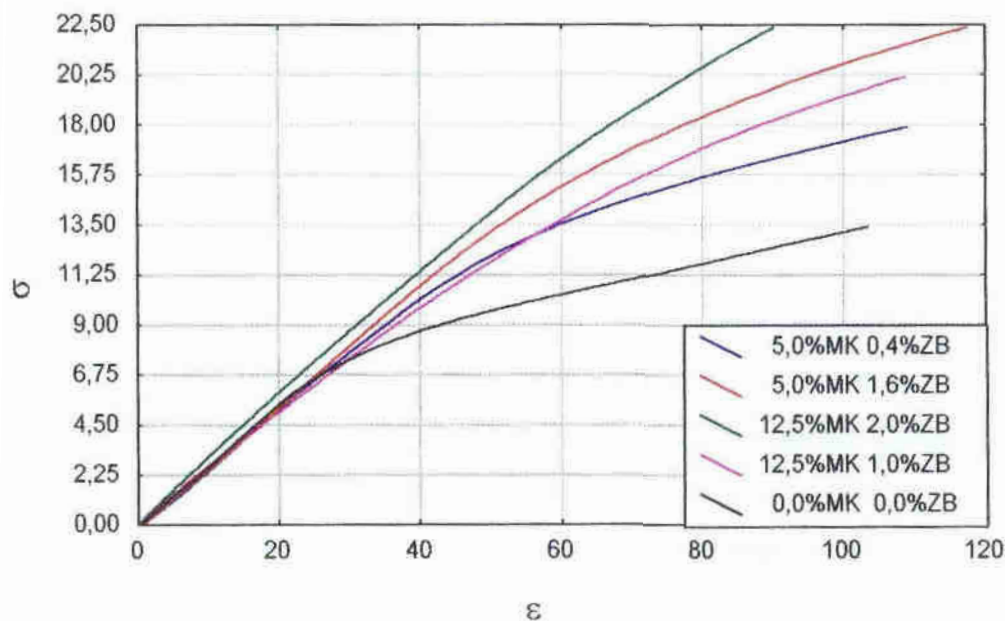
Rys.5.4.1.5. Odkształcenie kompozytu piaskobetonowego przy osiowym naprężeniu ściskającym 13,50 MPa w zależności od MK i ZB. Odkształcenia  $\varepsilon_{SO} * 10^4$  wyrażone jest w %.



Rys.5.4.1.6. Odkształcenie kompozytu piaskobetonowego przy osiowym naprężeniu ściskającym 15,75 MPa w zależności od MK i ZB. Odkształcenia  $\varepsilon_{SO} * 10^4$  wyrażone jest w %.



zwiększają się odkształcenia. Proces przyrostu odkształceń nie przebiega jednakowo dla wszystkich badanych kompozytów. Przy małych naprężeniach (4,5 MPa) różnice w odkształceniach są jeszcze stosunkowo niewielkie, a dla większości zarobów kształtują się na podobnym poziomie. W miarę zwiększania naprężeń (6,75; 9,00; 11,25 MPa) różnice w odkształceniach poszczególnych zarobów stają się coraz większe, tak ze względu na dodatek ZB jak i MK. W omawianym przedziale naprężeń zarobami o najmniejszym odkształceniu są zaroby o maksymalnym dodatku MK i ZB, a cała zależność  $\sigma$ - $\epsilon$  ma kształt bardzo podobny do wytrzymałości na ściskanie zobrazowanej na rys.5.3.1.1. Przy dalszym wzroście naprężeń układ odkształceń zmienia nieco swój charakter i przy naprężeniach 13,50 MPa oraz 15,75 MPa obszar najmniejszych odkształceń przesuwa się w kierunku zarobów o maksymalnej zawartości ZB i 10-15 procentowej zawartości MK. Należy przy tym pamiętać, że dla tych naprężeń zniszczeniu uległa już część badanych próbek reprezentująca zaroby niemodyfikowane i o małych zawartościach dodatków.



Rys.5.4.1.7. Zależność pomiędzy naprężeniem a odkształceniem przy ściskaniu próbek z piasko-betonu modyfikowanego różną ilością MK i ZB. Naprężenia wyrażono w MPa, a odkształcenia w  $\% \cdot 10^4$ .

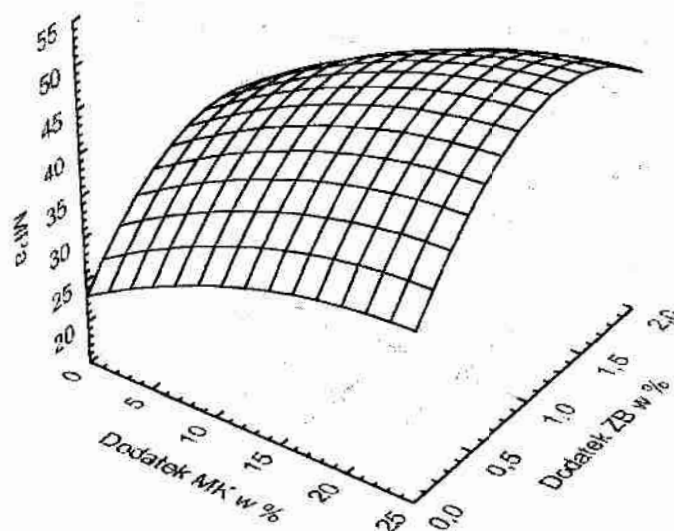
Zależność  $\sigma$ - $\epsilon$  dla wybranych zarobów przedstawiono w sposób bardziej tradycyjny na rys. 5.4.1.7. Wyraźnie widzimy tu, że właściwości mechaniczne kompozytów piaskobetonowych modyfikowanych włóknami stalowymi w zakresie odkształceń liniowych tylko nieznacznie różnią się od właściwości matrycy nie uzbrojonych. Dopiero po wystąpieniu rys w matrycach wpływ uzbrojenia staje się decydujący. W kompozycie niemodyfikowanym włóknami stalowymi zaraz po pojawieniu się widocznych rys na powierzchniach próbki zniszczenie następuje gwałtownie. W kompozytach modyfikowanych włóknami stalowymi rysy nie propagują się swobodnie i nie prowadzą do gwałtownego zniszczenia ponieważ są powstrzymywane przez włókna, których wyciągnięcie z matrycy wymaga znacznej pracy sił wewnętrznych. Liczne powstające mikrorysy wpływają na nieliniowy kształt zależności  $\sigma$ - $\epsilon$ , nawet jeżeli uznać za słuszne stwierdzenie o niewielkiej zdolności betonów do odkształceń plastycznych w ścisłym znaczeniu tego określenia.

Według A.M.Brandta obciążenie ściskające przyłożone osiowo odpowiadające nawet 30% wytrzymałości nie powoduje jeszcze wyraźnego rozwoju zarysowania, a wykres  $\sigma$ - $\epsilon$  jest w tym zakresie zbliżony do liniowego. W miarę powiększania obciążenia od 30% do 55% wytrzymałości rozpoczyna się proces wzrostu i propagacji rys, a na wykresie  $\sigma$ - $\epsilon$  pojawiają się wskutek tego odkształcenia nieliniowe i nieodwracalne. Po osiągnięciu 80% wytrzymałości raptownie wzrasta liczba rys przechodzących przez matrycę i łączących rysy pierwotne. Tworzy się układ rys ciągłych a pozorna objętość badanego elementu wzrasta.

Wywołane w badanych przez autora próbkach naprężenia stanowią dla każdego zarobu nieco inny procent wytrzymałości, ale ujmując całe zjawisko na pewnym stopniu uogólnienia możemy prześledzić opisane przez A.M.Brandta procesy na wykresach od 5.4.1.1. do 5.4.1.6. W takim ujęciu problemu rys. 5.4.1.1 oraz 5.4.1.2. odpowiadają naprężeniom mniejszym od 30% wytrzymałości, rys. 5.4.1.3. oraz 5.4.1.4. odzwierciedlają naprężenia od 30 do 55% a rys. 5.4.1.5 i 5.4.1.6. naprężenia od 55 do 80%.

Odształcenia dla naprężeń 4,5 i 6,75 MPa odpowiadają odkształceniom sprężystym co zresztą dobrze widać na rys. 8.1.7. Kształt zależności zobrazowanych na rys. 5.4.1.1 oraz 5.4.1.2. pozwoliłyby na aproksymowanie ich za pomocą płaszczyzn. Wpływ dodatków choć widoczny na omawianych rysunkach nie jest jeszcze tak znaczący jak w dalszych fazach zwiększania naprężeń. Rys. 5.4.1.3. oraz 5.4.1.4. odpowiadają umownie naprężeniom do 55% wytrzymałości - czyli procesowi wzrostu i propagacji rys. Wyraźnie widoczny jest już wpływ dodatków na pojawienie się odkształceń w poszczególnych rodzajach betonów, a w szczególności ze względu na dodatek ZB. Dla tych naprężeń najmniej odkształcalne są betony o maksymalnym dodatku ZB i MK. Przy dalszym zwiększaniu naprężeń do 13,50 i 15,75 MPa wpływ dodatków na wielkość odkształceń staje się jeszcze bardziej widoczny. Obszar betonów o najmniejszej odkształcalności obejmuje kompozyty o maksymalnym udziale zbrojenia ZB i 10-15% dodatku MK.

#### 5.4.2. Wytrzymałość na ściskanie.



Rys. 5.4.2.1. Wytrzymałość na ściskanie kompozytu piaskobetonowego  $R_{KS120}$  w zależności od dodatku mikrokrzemionki MK i zbrojenia rozproszonego ZB.

Badanie wykonano według procedury podanej w rozdziale 4, a wyniki badania przedstawiono na rys. 5.4.2.1. Zależność przedstawioną na rys.5.4.2.1. opisuje równanie 5.4.2.1.

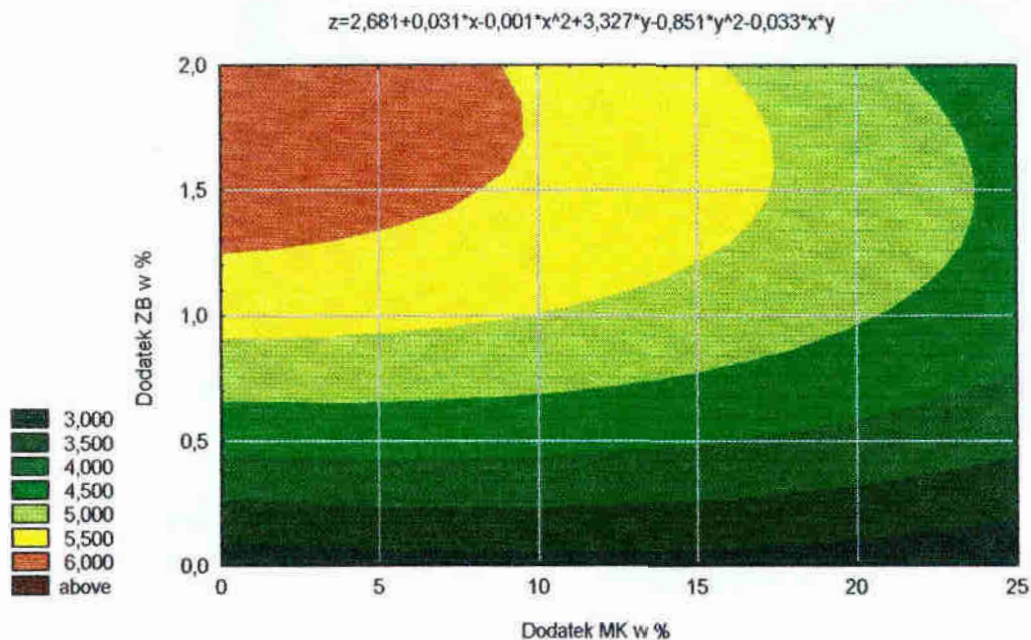
$$R_{KS120} = 23,173 + 0,947x - 0,018x^2 + 21,413y - 9,685y^2 + 0,086xy, \quad (5.4.2.1.)$$

gdzie: x - dodatek MK w %,

y - dodatek ZB w %.

Zarówno mikrokrzemionka, jak i włókna stalowe wpływają na zwiększenie wytrzymałości na ściskanie, a ich wpływ na tą cechę kumuluje się. Powyżej pewnej optymalnej wartości dodatku włókien stalowych, którą można ocenić na 1,5% wytrzymałość badanych kompozytów nieznacznie maleje. Wzrost wytrzymałości występuje przede wszystkim ze względu na dodatek włókien stalowych.

### 5.4.3. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu.



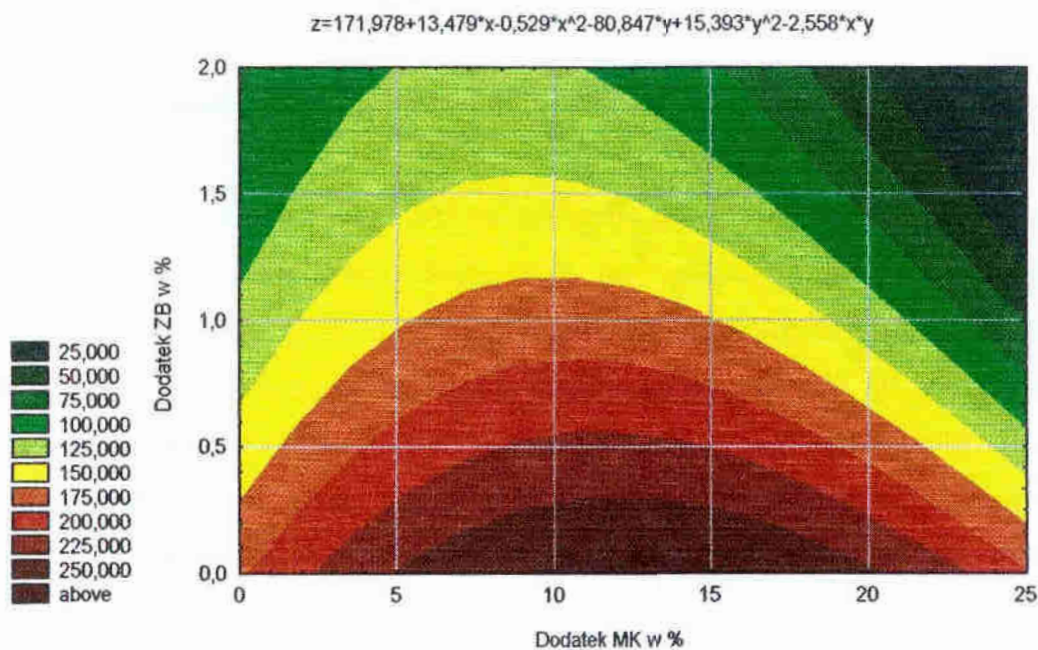
Rys.5.4.3.1. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu po 120 dniach dojrzewania w MPa.

Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu przeprowadzone na próbkach 10\*10\*50 cm zobrazowano na rys. 5.4.3.1.

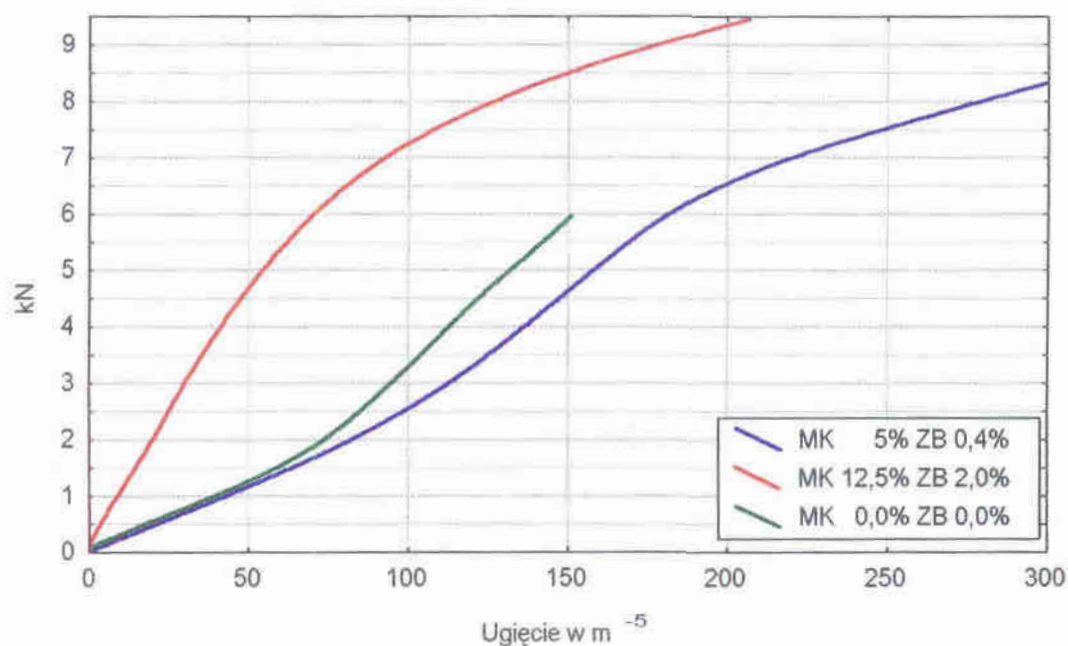
Kształt omawianej powierzchni najlepiej obrazuje duży wpływ dodatku włókien stalowych na nabieranie przez kompozyt cech quaziplastycznych. Największą wytrzymałość ma beton bez dodatku mikrokrzemionki. Jak wiadomo z badań dodatek mikrokrzemionki w niektórych przypadkach zmniejsza wytrzymałość na rozciąganie kompozytów betonowych, co wyraźnie widać na rys. 5.4.3.1.

#### 5.4.4. Ugięcie przy zginaniu.

Podczas badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu parą sił zmierzono ugięcie przy  $2F = 5,5$  kN. Wyniki tego badania zobrazowano na rys. 5.4.4.1. i rys. 5.4.4.2.



Rys. 5.4.4.1. Ugięcie belek poddanych obciążeniu parą sił  $2F = 5,5$  kN w  $m^{-5}$  w zależności od dodatku MK i ZB.



Rys.5.4.4.2. Ugięcie belek przy zginaniu w zależności od wielkości pary sił obciążających 2F wybranych kompozytów piaskobetonowych.

#### 5.4.5. Wodoszczelność próbek wstępnie obciążonych

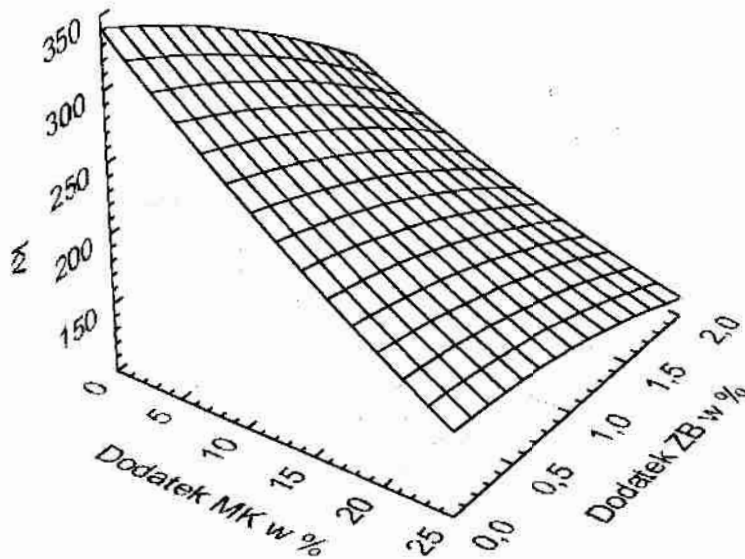
Badanie wodoszczelności próbek po ich rozformowaniu nie odzwierciedla rzeczywistej wodoszczelności kompozytu betonowego w gotowej konstrukcji. Każda nawet najprostsza konstrukcja pracuje w warunkach obciążenia wielokrotnie pojawiającego się i zanikającego w czasie. Wpływ zmienności obciążeń statycznych w czasie na parametry betonu znany jest od dawna w szczególności jeśli chodzi o jego wytrzymałość na ściskanie. Powyższe fakty skłoniły autora do przeprowadzenia badań wodoszczelności kompozytów fibropiaskobetonowych po cyklu obciążeń.

Opierając się na wynikach badań opisanych w [127] próbki poddano obciążeniu do momentu wywołania naprężeń 17,5 MPa, a następnie je odciążano. Taki cykl obciążeń powtórzono ośmiokrotnie dla każdej próbki. Próbki obciążano siłą wzrastającą równomiernie i odpowiadającą prędkości przyrostu naprężeń 0,5 +/- 0,1 MPa/s. Uzyskana w tych warunkach częstotliwość pulsacji wynosiła 1/35 Hz.

Próbki po cyklu obciążeń były poddane badaniu wodoszczelności opisanym już szczegółowo w punkcie 5.3.3.

Na rys.5.4.5.1. przedstawiono wodoszczelność kompozytu piaskobetonowego wyrażoną za pomocą współczynnika  $k_{VO}$ . Zależność zobrazowaną na rys.5.4.5.1. opisuje równanie 5.4.5.1.

$$k_{VO} = 341,635 - 8,651x + 0,058x^2 - 51,088y - 9,412y^2 + 1,821xy. (5.4.5.1.)$$



Rys.5.4.5.1. Wodoszczelność kompozytu piaskobetonowego  $k_{VO}$   $10^{-12}$  m/s po wstępnym obciążeniu w zależności od dodatku MK i ZB.

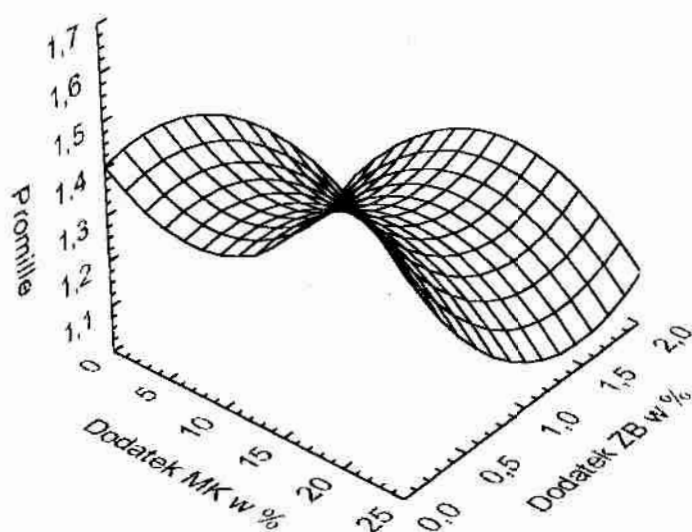
Współczynnik  $k_{VO} = 150, 200, 250$  i  $300 \cdot 10^{-12}$  m/s odpowiadają hipotetycznym stopniom wodoszczelności W18, W16, W14 i W12. Wodoszczelność badanych kompozytów rośnie tak ze względu na dodatek MK jak i ZB. Przyrosty szczelności są w obu kierunkach równomierne i bardzo zbliżone do zależności liniowej. Zarób

porównawczy ma  $k_{170} = 340 \cdot 10^{-12}$  m/s a najbardziej szczelny o maksymalnych dodatkach MK i ZB  $k_{170} = 120 \cdot 10^{-12}$  m/s.

## 5.5. Badania cech reologicznych piaskobetonu.

### 5.5.1. Skurcz

Rys.5.5.1.1. przedstawia wyniki badania skurczu kompozytów piaskobetonowych w 365 dniu dojrzewania w zależności od dodatku MK i ZB. Powierzchnię zobrazowaną na rys.5.5.1.1. opisuje równanie 5.5.1.1.



Rys.5.5.1.1. Skurcz kompozytów piaskobetonowych w 365 dniu dojrzewania w zależności od dodatku MK i ZB.

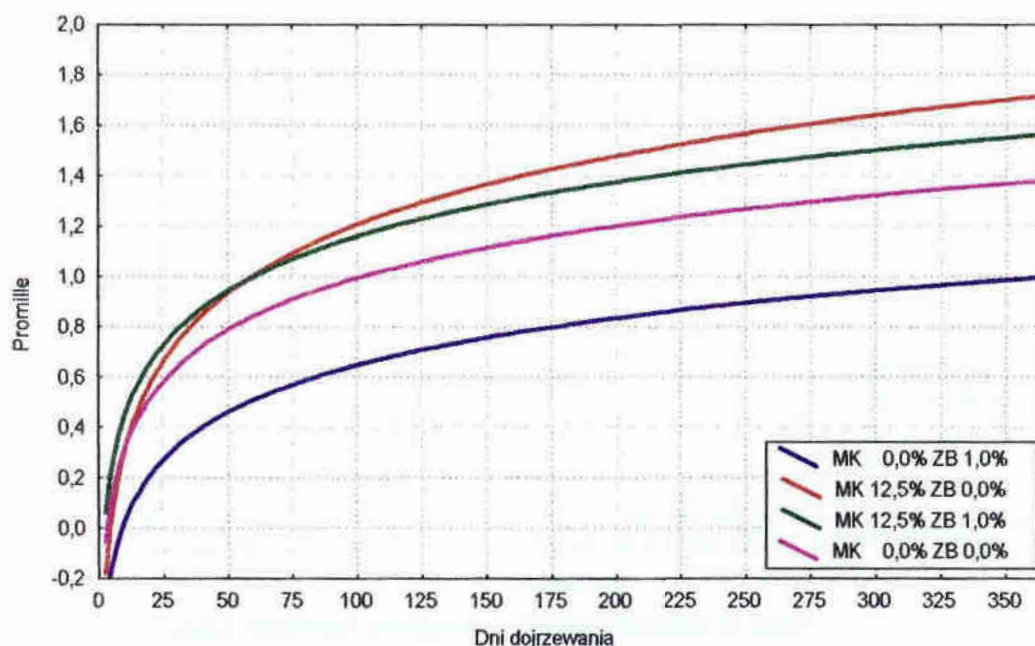
$$\varepsilon_s = 1,403 + 0,034x - 0,001x^2 - 0,566y + 0,192y^2, \quad (5.5.1.1.)$$



Dodatek włókien stalowych wpływa na zmniejszenie wielkości skurczu badanych kompozytów piaskobetonowych. Przy dodatku ZB od 0 do 1% skurcz badanych kompozytów wyraźnie maleje. Dla dodatku ZB=1% jest o 15% mniejszy niż dla zarobów nie modyfikowanych włóknami. Dodatek ZB od 1 do 2% nie wpływa w wyraźny sposób na wielkość skurczu, który dla wszystkich zarobów stabilizuje się na poziomie dla dodatku ZB=1%.

Mikrokrzemionka w ilości od 0 do 15% wpływa na zwiększenie skurczu, a po przekroczeniu tej wartości dalsze dozowanie MK powoduje zmniejszanie się skurczu. Skurcz zarobu porównawczego i modyfikowanego 25% MK jest bardzo zbliżony. Najmniejszy skurcz ze wszystkich zarobów posiada kompozyt modyfikowany 2% włókien stalowych bez dodatku MK.

Na rys.5.5.1.2. przedstawiono przebieg skurczu w czasie wybranych kompozytów piaskobetonowych. Zobrazowane krzywe były aproksymowane za pomocą funkcji logarytmicznych o podstawie naturalnej.



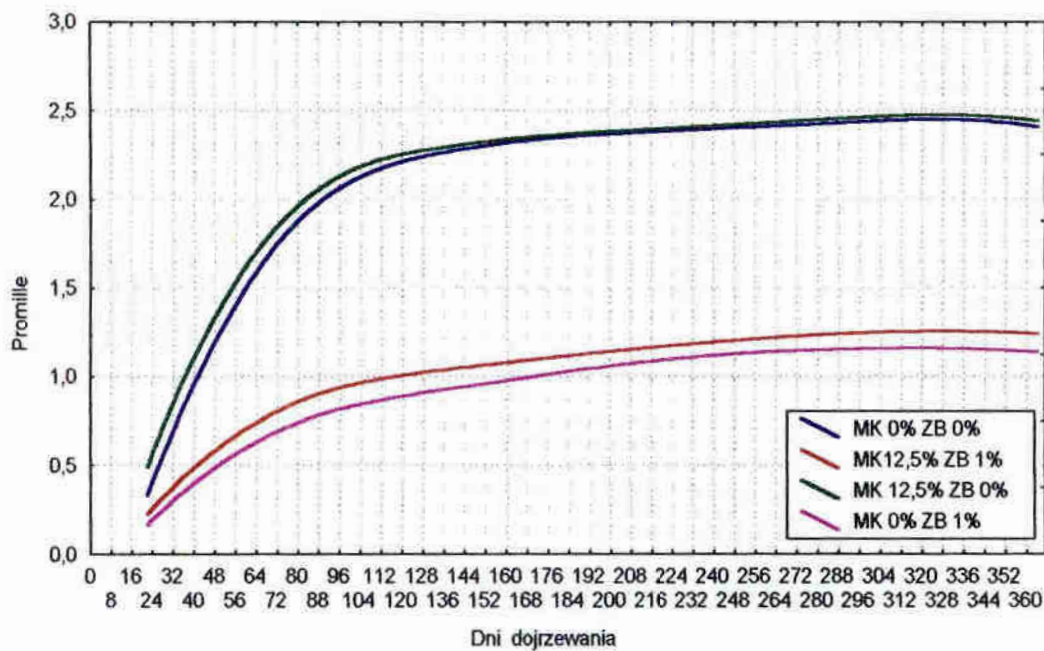
Rys.5.5.1.2. Skurcz wybranych kompozytów piaskobetonowych w czasie.

Jak widzimy na rys.5.5.1.2. kompozyty z dodatkiem MK charakteryzują się dużym przyrostem skurczu w pierwszych 25 dniach dojrzewania. Wraz z upływem

czasu tempo przyrostu skurczu w czasie wszystkich kompozytów jest bardzo podobne. Dodatek włókien stalowych wpływa na wyraźne zmniejszenie przyrostu skurczu w pierwszych 25 dniach dojrzewania betonów oraz na znaczne zmniejszenie skurczu całkowitego. Dodatek mikrokrzemionki na przyrost skurczu jest na tyle duży, że dozowane włókna stalowe tylko w niewielkim stopniu zmniejszają skurcz kompozytów modyfikowanych zarówno MK, jak i ZB. Wpływ dodatku włókien stalowych na zmniejszenie skurczu jest najbardziej widoczny w zarobach modyfikowanych tylko i wyłącznie mikrozbroyeniem.

### 5.5.2. Pełzanie

Na rys.5.5.2.1. zobrazowano przebieg pełzania wybranych zarobów piaskobetonowych w czasie.



Rys.5.5.2.1. Pełzanie wybranych kompozytów piaskobetonowych w czasie.

Na wykresie wyraźnie widać różnice pomiędzy zarobami modyfikowanymi włóknami stalowymi oraz zarobami bez zbrojenia rozproszonego. Największy przyrost odkształceń ma miejsce w trakcie pierwszych 120 dni dojrzewania. Po tym okresie

czasu odkształcenia przyrastają bardzo powoli, a po 300 dniach dojrzewania ulegają stabilizacji.

Zaroby bez dodatku włókien ulegają ponad dwukrotnie większym odkształceniom niż fibrobetony. Dodatek MK ma bardzo mały wpływ na zachowanie się badanych betonów. Biorąc pod uwagę fakt, że na rys.5.5.2.1. przedstawiono odkształcenia całkowite należy przy jego analizie odwołać się do rys.5.5.1.2., na którym przedstawiono przyrost skurczu tych samych zarobów w czasie.

## 6. Analiza uzyskanych wyników.

### 6.1. Konsystencja i urabialność.

Mieszanka betonowa powinna charakteryzować się dobrą urabialnością oraz właściwą konsystencją gdyż cechy te decydują o stopniu zagęszczenia składników oraz umożliwiają osiągnięcie projektowanych właściwości stwardniałego betonu. Próby matematycznego opisu konsystencji mieszanek fibrobetonowych były podejmowane już w latach siedemdziesiątych i tak w 1976 roku Hughes i Fattuhi [80] określili, że decydujący wpływ na konsystencję ma zawartość włókien oraz ich smukłość a zależność ta ma charakter logarytmiczny:

$$\log(t_{VBK}) - V_f (l_f/d)^2. \quad (6.1.1.)$$

gdzie:

$t_{VBK}$  - czas badania konsystencji kompozytu betonowego na aparacie Ve-Be,

$V_f$  - dodatek włókien,

$l_f/d$  - długość włókna/średnica włókna - smukłość.

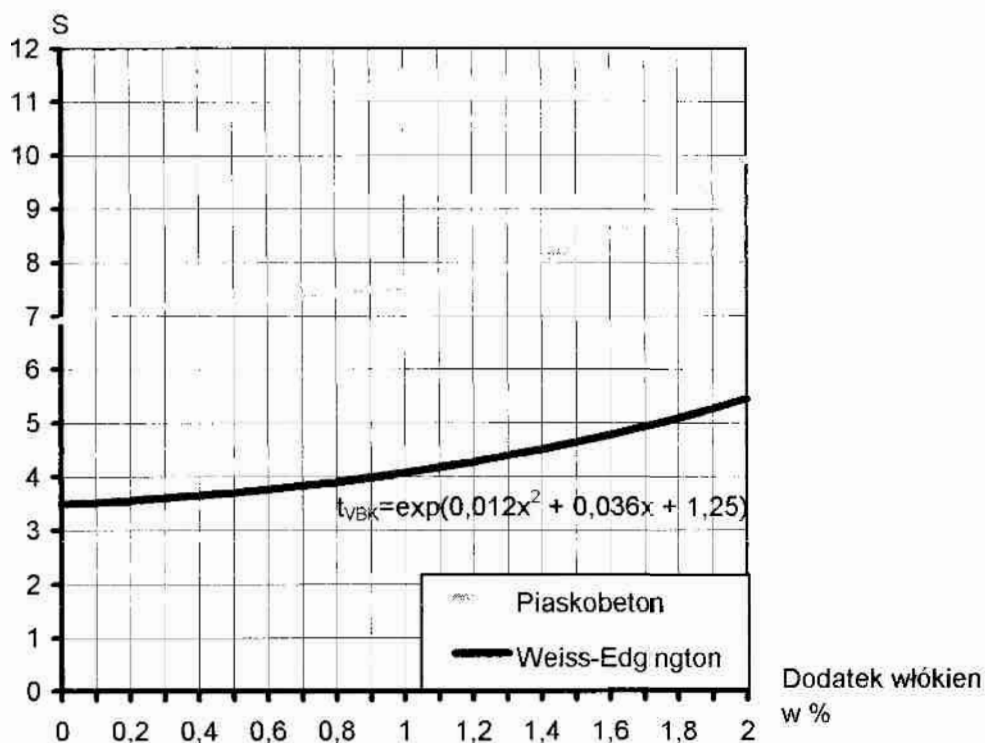
Pełną matematyczną zależność opisującą konsystencję betonów modyfikowanych zbrojeniem rozproszonym podali dopiero w 1987 roku Weiss i Edgington [184]. Równanie Weissa i Edgingtona zgodnie z wnioskami Hughesa i Fattuhiego ma charakter funkcji logarytmicznej, chociaż przyjęli oni zależność logarytmów naturalnych a nie dziesiętnych jak wnioskowali ich poprzednicy:

$$t_{VBK} = \exp(0,012x^2 + 0,036x + 1,25), \quad \text{gdzie } x = V_f(l_f/d)^{1,4}. \quad (6.1.2.)$$

Weiss i Edgington w swoich badaniach podobnie jak Hughes i Fattuhi stwierdzili, że konsystencja, a co za tym idzie urabialność mieszanki betonowej praktycznie w ogóle nie zależy od kształtu włókna ani szorstkości jego powierzchni. Parametrami

decydującymi są w tym wypadku zawartość włókien w zarobie  $V_f$  oraz smukłość włókna  $l_f/d$ .

Na rysunku nr 6.1.1. dla porównania z wynikami uzyskanymi przez autora przedstawiono teoretyczną krzywą konsystencji wyliczoną według zależności podanej przez Weissa i Edgingtona. Zależność Weissa-Edgingtona wskazuje, że teoretycznie konsystencja mieszanki fibrobetonowej powinna być bardziej ciekła od uzyskanych wyników badań laboratoryjnych ale trzeba tu zaznaczyć, że badania Weissa i Edgingtona były prowadzone nad betonami o stosie okruszowym opartym na kruszywie gruboziarnistym a badania autora zostały przeprowadzone na piaskobetonie. Jak wiadomo urabialność mieszanek fibrobetonowych spada wraz ze zmniejszaniem się ziarnistości kruszywa a najmniej urabialne są zaprawy fibrobetonowe. Charakter obu krzywych przedstawionych na rys.6.1.1. pozostaje jednak bardzo zbliżony co zachęciło autora do próby wyskalowania zależności Weissa-Edgington dla potrzeb piaskobetonu na bazie piasku odpadowego.



Rys.6.1.1. Rzeczywista konsystencja fibropiaskobetonu na tle teoretycznej zależności podanej przez Weissa i Edgingtona

Skalowanie zależności Weissa-Edgingtona polegało na założeniu, że dla piaskobetonu bez dodatku włókien stalowych:

$$t_{VBK} = t_{VBM}, \quad (6.1.3.)$$

gdzie:

$t_{VBM}$  - konsystencja VeBe matrycy betonowej (bez dodatku włókien) wyrażona w sekundach.

Dla samej matrycy  $V_f = 0$  a co za tym idzie  $x = V_f(l_f d)^{1,4} = 0$ . W takim przypadku zależność Weissa-Edgingtona upraszcza się do postaci (6.1.4.):

$$t_{VBK} = e^{1,25}. \quad (6.1.4.)$$

Zastępując zgodnie ze wcześniejszym założeniem  $t_{VBK}$  przez  $t_{VBM}$  i znając rzeczywisty czas badania konsystencji  $t_{VBM}$  możemy zapisać:

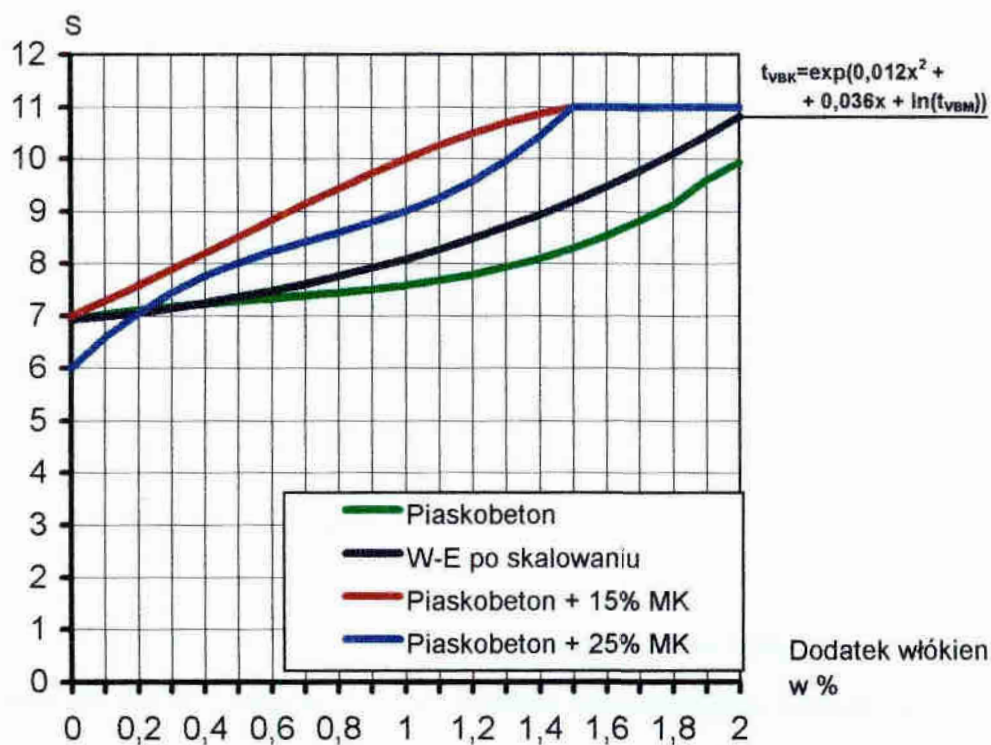
$$t_{VBM} = \exp(\ln t_{VBM}), \quad (6.1.5.)$$

skąd ostatecznie otrzymujemy zmodyfikowaną zależność Weissa i Edgingtona :

$$t_{VBK} = \exp(0,012x^2 - 0,036x + \ln(t_{VBM})). \quad (6.1.6.)$$

Wynik skalowania zobrazowano na rysunku nr 6.1.2., na którym widać, że wyskalowana zależność Weiss-Edington bardzo dobrze odzwierciedla rzeczywistą konsystencję mieszanki fibropiaskobetonowej, która waha się od 7 do 10 sekund i odpowiada normowej konsystencji plastycznej K-3. Należy tutaj zwrócić uwagę, że pomimo tak płynnej konsystencji mieszanka fibropiaskobetonowa przy zawartości włókien powyżej 1,5% stawała się trudnourabialna, a dla zarobów o zawartości włókien powyżej 2% była w ogóle nie urabialna i nie udało się z tych zarobów uformować żadnych próbek.

Problem konsystencji i urabialności mieszanek fibropiaskobetonowych staje się jeszcze bardziej złożony gdy weźmiemy pod uwagę zaroby dodatkowo modyfikowane mikrokrzemionką. Wyniki badania konsystencji piaskobetonów modyfikowanych zarówno włóknami stalowymi jak i mikrokrzemionką zestawiono na rysunku nr 5.2.1.1.. Zaroby piaskobetonowe modyfikowane tylko i wyłącznie mikrokrzemionką nie zależnie od wielkości jej dodatku mają stałą konsystencję na poziomie 7 s. Taki stan rzeczy wywołany jest dodatkiem superplastyfikatora w ilości 2%, którego działanie upłynniające w zupełności równoważy wpływ dodatku mikrokrzemionki [103,105]. Stwierdzono także iż dodatek mikrokrzemionki w ilościach powyżej 5% zapobiega niekorzystnemu zjawisku powstawania lustra wody na powierzchni masy betonowej po zakończeniu zagęszczania.



Rys.6.1.2. Rzeczywista konsystencja fibropiaskobetonu w zestawieniu z konsystencją teoretyczną po wyskalowaniu zależności podanej przez Weissa i Edgingtona oraz konsystencjami wybranych zarobów fibropiaskobetonowych modyfikowanych dodatkowo 15% i 25% mikrokrzemionki.

Wyraźny wpływ dodatku mikrokrzemionki na konsystencję i urabialność badanych piaskobetonów można zauważyć dopiero w zarobach fibrobetonowych

z dodatkiem włókien większym od 0,5%. W takich zarobach mikrokrzemionka powoduje gęstnienie konsystencji przy ilościach od 0 do 15%, a w zakresie od 15 do 25% następuje powtórne upłynnienie zarobów. Konsystencja ogółu zarobów niezależnie od lokalnych tendencji gęstnieje wraz ze wzrostem dodatku zbrojenia rozproszonego. W miarę zwiększania zawartości mikrokrzemionki w zarobach mierzona konsystencja coraz bardziej nie odzwierciedlała urabialności wykonywanego zarobu. Zjawisko to narastało tak gwałtownie, że zaroby o zawartości mikrokrzemionki powyżej 20% i zbrojenia powyżej 1,5% pomimo plastycznej konsystencji (11 sekund) były w ogóle nie urabialne i nie wykonano z nich żadnych próbek.

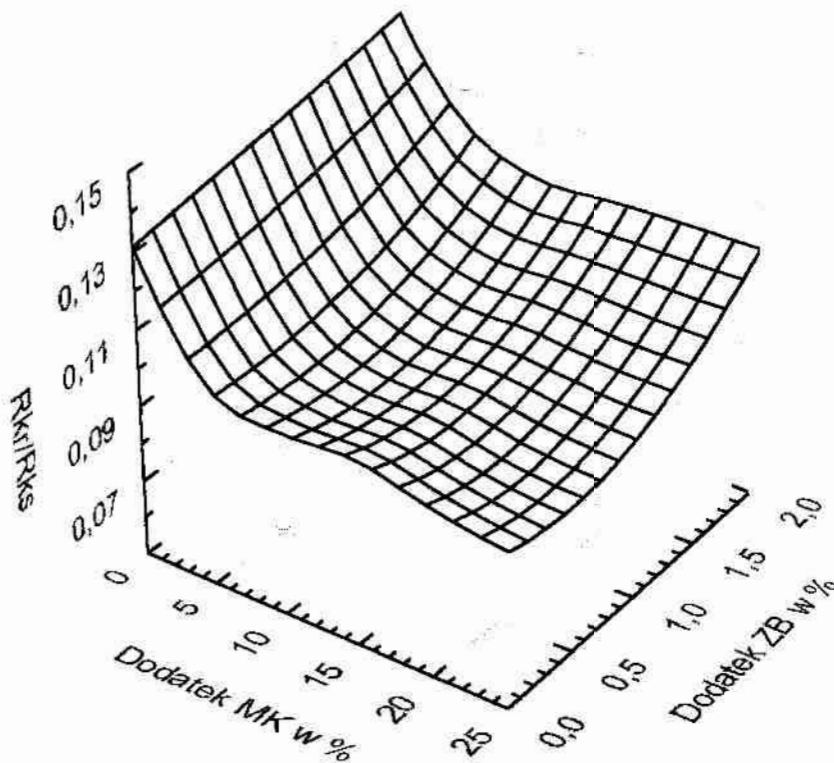
Przeprowadzone badania potwierdziły niezbędność stosowania dodatków uplastyczniających przy wykonywaniu kompozytów fibrobetonowych z dodatkiem mikrokrzemionki na bazie matrycy piaskobetonowej. Jednocześnie można stwierdzić, że istnieje ściśle określony przedział stosowania dodatku włókien stalowych i mikrokrzemionki jednocześnie, w ramach którego można uzyskać zaroby urabialne. W przypadku piaskobetonów na bazie piasku odpadowego przedział ten można ograniczyć do  $20\% \geq MK$  oraz  $1,5\% \geq ZB$ , gdzie MK - dodatek mikrokrzemionki jako wagowy procent cementu nią zastąpionego, ZB - objętościowy dodatek włókien stalowych.

## 6.2. Wytrzymałość i kruchość.

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie gdzie uzyskano tak znaczący wzrost tej cechy i osiągnięto wytrzymałości odpowiadające klasom betonu B35 przy zastosowaniu cementu portlandzkiego 35 bez dodatków w ilości  $400 \text{ kg/m}^3$  dowodzą, że istnieją możliwości uzyskania jeszcze znacznie większych wytrzymałości piaskobetonów modyfikowanych mikrokrzemionką i zbrojeniem rozproszonym. Efektywność samego zbrojenia rozproszonego wynosi około 35% i jest znacznie większa niż w betonach żwirowych gdzie kształtuje się na poziomie około 15% [11]. Można tłumaczyć to zjawisko poprzez mechanizm niszczenia betonu. Wiadomo, że im mniejsze ziarna kruszywa tym większa koncentracja na-



prężen następuje w zaczynie a proces zniszczenia przebiega przez zaczyn a nie przez ziarna kruszywa. Dodatek włókien stalowych, które w piaskobetonie są rozprowadzone bardzo równomiernie w całej strukturze masy betonowej przejmują dużą część tych naprężeń i wpływają tak znacznie na wzmocnienie piaskobetonu. Dodatek mikrokrzemionki, wpływa na wytrzymałość na ściskanie w sposób analogiczny jak w betonie żwirowym i kształtuje się na poziomie 20%. Bardzo obiecujący jest natomiast fakt kumulacji wpływu dodatku ZB i MK na wytrzymałość piaskobetonu dający ostatecznie wzrost wytrzymałości na ściskanie o ponad 80%.



Rys.6.2.1. Kruchość  $R_{kr}/R_{ks}$  kompozytu piaskobetonowego w zależności od dodatku mikrokrzemionki MK i zbrojenia rozproszonego ZB.

Wytrzymałość na rozciąganie zobrazowana na rys.5.3.2.1. jest odzwierciedleniem wszystkich tendencji jakie mają miejsce w badanych zarobach. Z jednej strony mamy zbrojenie rozproszone, które w oczywisty sposób zwiększa wytrzy-

małość na rozciąganie, z drugiej strony mikrokrzemionkę, której wpływ na tę cechę betonu ujawnia się dopiero po dłuższym czasie i w badaniach 28 dniowych nie jest jeszcze tak widoczny. Jednocześnie wszystkie zaroby są modyfikowane superplastyfikatorem BETOPLAST 1, który obniża wytrzymałość na rozciąganie betonów modyfikowanych mikrokrzemionką nawet o 20% [103]. Kształt prezentowanej powierzchni wskazuje, że będzie ona jedną z decydujących przy wyborze zarobów optymalnych.

Jako kruchość autor rozumie stosunek wytrzymałości na rozciąganie do wytrzymałości na ściskanie badanego zarobu betonowego. Obliczoną w ten sposób kruchość dla badanych zarobów piaskobetonowych przedstawiono na rys. 6.2.1..

Kształt powierzchni  $R_{kr}/R_{ks}$  wyraźnie wskazuje, że na cechy wytrzymałościowe kompozytu piaskobetonowego zdecydowany wpływ miała wielkość dodatku włókien stalowych. Dodatek mikrokrzemionki w ilości 5% spowodował spadek stosunku  $R_{kr}/R_{ks}$  do wielkości 0,1. Dalsze zwiększanie dodatku mikrokrzemionki do 25% nie spowodowało jednak dalszego spadku stosunku  $R_{kr}/R_{ks}$  i utrzymał się on na poziomie 0,1.

### 6.3. Wodoszczelność i nasiąkliwość.

Wyniki badania nasiąkliwości wagowej kompozytu piaskobetonowego zobrazowano na rys.5.3.4.1. Zarób porównawczy bez dodatku MK i ZB miał największą ze wszystkich badanych zarobów nasiąkliwość wynoszącą 5,5%. Wraz ze wzrostem dodatku mikrokrzemionki nasiąkliwość gwałtownie spada aby ustabilizować się na poziomie poniżej 1,5%. Dodatek samych włókien stalowych spowodował obniżenie nasiąkliwości do 3% przy maksymalnym 2% ich dodatku. Nasiąkliwość zarobów modyfikowanych zarówno mikrokrzemionką jak i włóknami stalowymi kształtowała się na poziomie 1%. Na uwagę zasługuje fakt, że dodatek tylko i wyłącznie 5% MK spowodował spadek badanej cechy do 1,5%. Dalsze zwiększanie dodatku MK do 25% włącznie wpłynęło na zmniejszenie nasiąkliwości zaledwie o 0,5%. Tak mała nasiąkliwość pozwalała spodziewać się dużej wo-

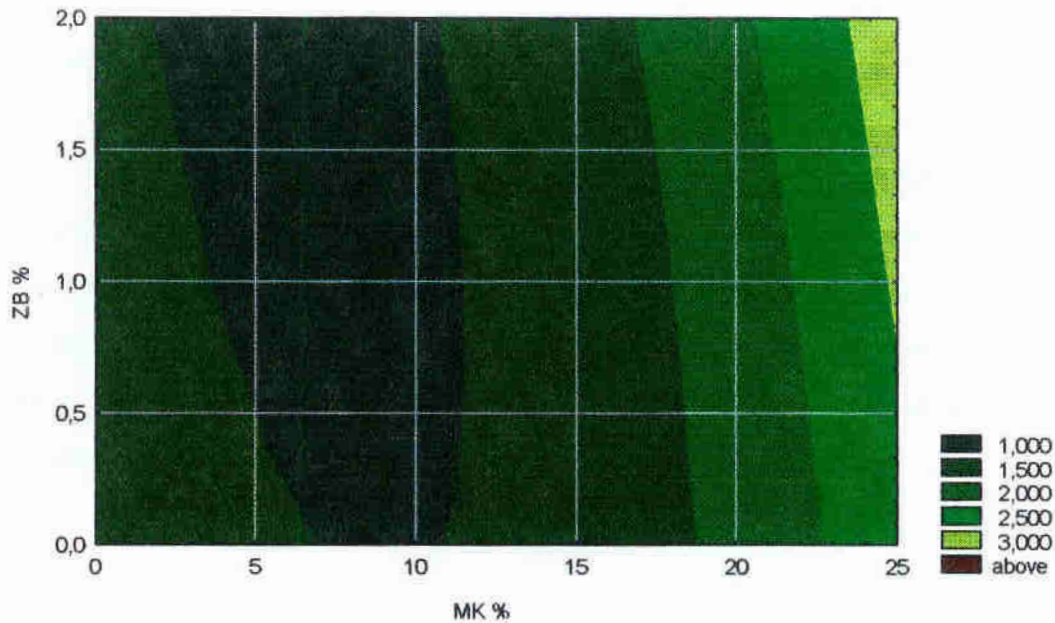
doszczelności badanych kompozytów piaskobetonowych, co potwierdziły wyniki badań tej cechy.

Wodoszczelność piaskobetonów badano dotychczas sporadycznie wychodząc z założenia, że jego porowata struktura nie daje szans na osiągnięcie wysokich szczelności, a badane dotychczas na wodoszczelność nieliczne zaroby piaskobetonowe nie spełniały stawianych wymogów wodoszczelności.[37]. Wyniki badań wodoszczelności prezentowane na rys.5.3.3.1. udowadniają fakt, że przy starannie wykonanych zarobach, z piasku o bardzo dobrej jakości i przy użyciu mikrokrzemionki, zbrojenia rozproszonego i superplastyfikatora można uzyskać piaskobetony o wysokiej i bardzo wysokiej wodoszczelności. Wielkość przyrostu szczelności jest tu analogiczna jak w betonach żwirowych modyfikowanych samą mikrokrzemionką [105]. Ponad dziesięciokrotne zmniejszenie prędkości przepływu wody i uzyskanie wodoszczelności na poziomie  $W_{44}$  należy uznać za wynik więcej niż zadowalający. Tak znaczący przyrost szczelności pozwala z optymizmem myśleć o stosowaniu w przyszłości piaskobetonu w elementach narażonych na silne oddziaływanie czynników atmosferycznych. Piaskobeton był dotychczas uważany za materiał niepełnowartościowy między innymi ze względu na dużą nasiąkliwość a co za tym idzie - małą mrozoodporność [37]. Otrzymanie w trakcie badań piaskobetonów o bardzo dużych wodoszczelnościach pozwala uważać ten problem za rozwiązany. Oczywiście kształt płaszczyzny obrazującej wodoszczelność zmusza do dokładnego zastanowienia się nad wyborem obszaru zarobów optymalnych szczególnie w zestawieniu z wynikami uzyskanymi przy badaniu innych cech.

W celu syntetycznego opisu wodoszczelności kompozytów piaskobetonowych autor sformułował współczynnik, który umownie nazwał współczynnikiem wodnym - w skrócie  $W_W$ ;

$$W_W = (N_{Wf}/N_{W0})/(k_{Vf}/k_{V0}). \quad (6.3.1.)$$

Zależność współczynnika  $W_w$  od dodatku MK i ZB opisuje równanie 6.3.3. Graficzna postać tej zależności przedstawiono na rys.6.3.1.



Rys.6.3.1. Współczynnik wodny  $W_w$  w zależności od dodatku mikrokrzemionki MK i zbrojenia rozproszonego ZB.

$$W_w = 1,404 - 0,096x - 0,212y + 0,005x^2 + 0,014xy + 0,03y^2 \quad (6.3.3.)$$

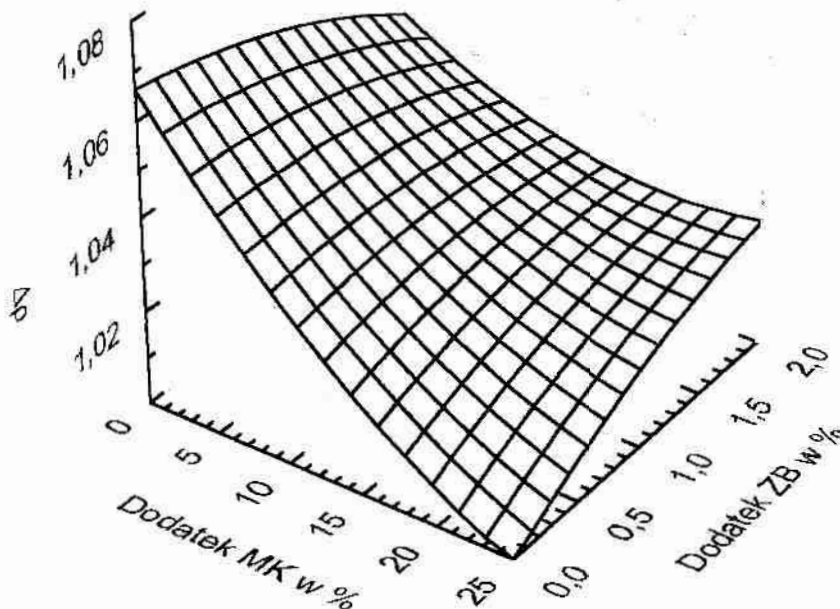
Bezwymiarowy parametr  $W_w$  waha się w badanych kompozytach od 1,0 do 3,0. Wartość 1,0 mówi nam, że zmniejszenie się wartości nasiąkliwości oraz zwiększenie wodoszczelności przebiega w takich samych proporcjach.  $W_w = 3,0$  wskazuje, że przyrost wodoszczelności nastąpił trzykrotnie szybciej w porównaniu do zarobu zerowego niż zmniejszenie się nasiąkliwości w stosunku do zarobu zerowego. Nasiąkliwość możemy w tym przypadku rozumieć jako miarę bardzo niskociśnieniowej wodoszczelności.

Pozytywny wpływ dodatku włókien stalowych na wodoszczelność kompozytu piaskobetonowego ujawnia się w pełni dopiero przy badaniu wodoszczelności po wstępnym obciążeniu zobrazowanej na rys. 5.4.5.1. Zależność wodoszczelności przyjmuje w tym przypadku kształt bardzo zbliżony do płaszczyzny. Wodoszczel-

ność po wstępnym obciążeniu wzrasta równomiernie tak ze względu na dodatek MK, jak i ZB. Dodatek włókien stalowych ma decydujący wpływ na utrzymanie wodoszczelności przez badane kompozyty po cyklu obciążeń.

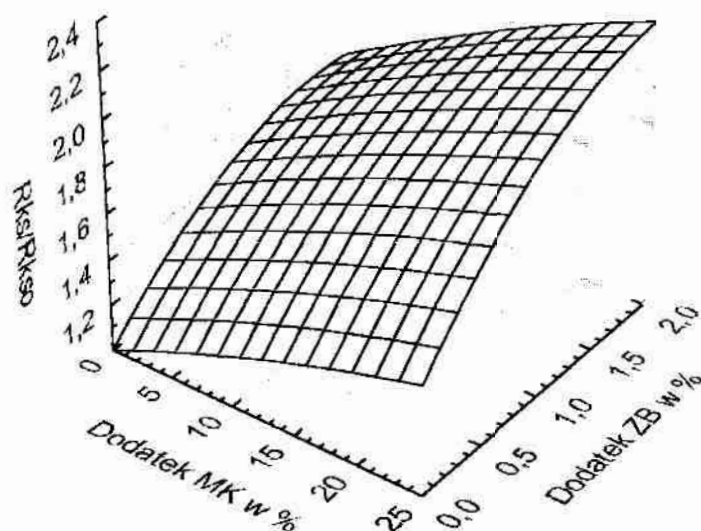
#### 6.4. Struktura kompozytu piaskobetonowego.

W literaturze istnieje zgodny pogląd, że właściwości fizyczne betonu wynikają z jego struktury wewnętrznej, która jest niejednorodna i złożona. Proces jej rozwoju rozpoczyna się od zarobienia cementu wodą. W ustalonych warunkach dojrzewania mieszanki podstawowym czynnikiem kształtującym właściwości kamienia cementowego jest porowatość struktury, uwarunkowana udziałem objętościowym fazy ciekłej (wody).



Rys.6.4.1. Przyrost gęstości pozornej  $\Delta\rho = \rho_{PB} / \rho_{PM}$

Rys.6.4.1. obrazuje stosunek gęstości pozornej stwardniałego betonu po 28 dniach dojrzewania  $\rho_{PB}$  do gęstości pozornej świeżej mieszanki piaskobetonowej  $\rho_{PM}$ ;  $\Delta\rho_1 = \rho_{PB} / \rho_{PM}$ . Stwardniały kompozyt piaskofibrobetonowy ma generalnie większą gęstość od świeżej mieszanki betonowej. Parametr  $\Delta\rho$  zamyka się w granicach od 0 do 3%. Przyrost gęstości pozornej świadczy o tym, że w trakcie wiązania i twardnienia w kompozycie piaskobetonowym pory zostają wypełnione produktami reakcji hydratacji. Należy przy tym zwrócić uwagę na fakt, że największy przyrost gęstości ma miejsce w zakresie porównawczym, aby maleć tak ze wzrostem dodatku MK jak i ZB z tym że decydującym czynnikiem dla tej cechy jest dodatek MK. Dla zarobu o dodatku 25% MK nie zanotowano żadnego przyrostu gęstości pozornej. Można przyjąć, że przy tak dużym dodatku MK świeża mieszanka betonowa została prawie całkowicie uszczelniona, a co za tym idzie twardniejący beton nie wypełnia praktycznie rzecz biorąc nie istniejących porów.



Rys. 6.4.2. Przyrost wytrzymałości na ściskanie w stosunku do wytrzymałości betonu porównawczego.

$$\Delta\rho_1 = 1,066 - 0,004x - 0,004y + 0,001xy - 0,004y^2 \quad (6.4.1)$$

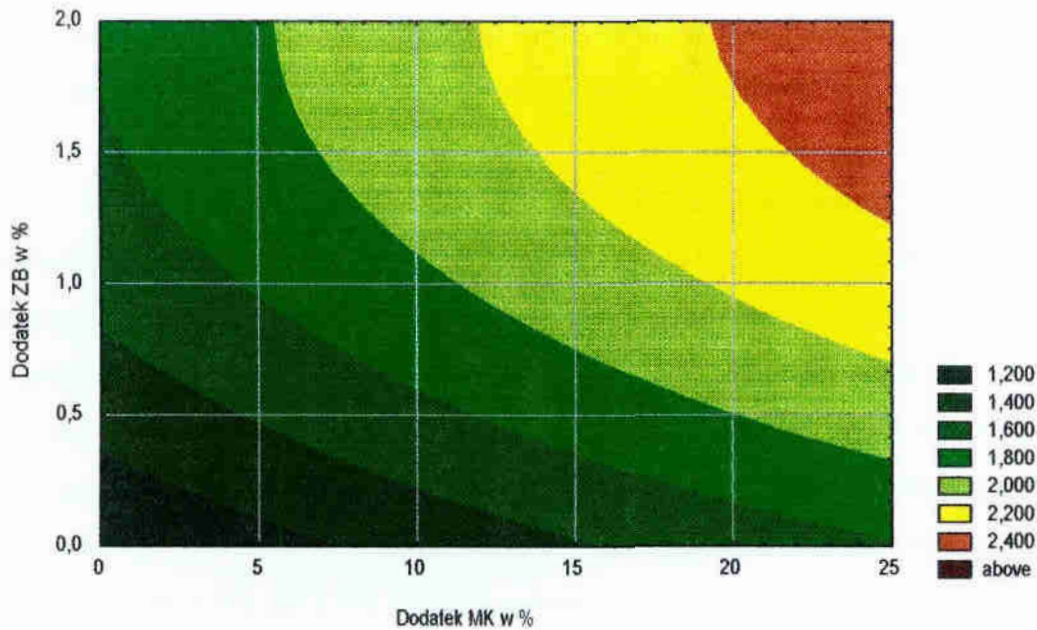
gdzie: x - dodatek MK w %; y - dodatek ZB w %

Dla celów dalszych rozważań autor przyjął, że przyrost gęstości pozornej  $\Delta\rho_1$  kompozytu piaskobetonowego można uważać za miarę zwartości jego struktury. W takim układzie przyrost wytrzymałości na ściskanie można traktować jako efekt stopnia zwartości struktury. Przyrost wytrzymałości na ściskanie jako stosunek wytrzymałości i-tego zarobu do zarobu porównawczego przedstawiono na rys. 6.4.2.

Tak przyrost gęstości pozornej  $\Delta\rho_1$  jak i przyrost wytrzymałości na ściskanie  $\Delta R_{KS}$  są wielkościami bezwymiarowymi więc możemy je zestawić w zależność:

$$W_{ES} = \Delta R_{KS} / \Delta\rho_1, \quad (6.4.2.)$$

gdzie:  $W_{ES}$  - współczynnik efektywności struktury kompozytu piaskobetonowego.



Rys.6.4.3. Współczynnik efektywności struktury  $W_{ES}$  w zależności od dodatku MK i ZB

Tak zdefiniowana zależność zobrazowana została na rys.6.4.3. Wzrost  $W_{ES}$  następuje tak ze względu na dodatek MK jak i ZB. Sam dodatek MK powoduje wzrost  $W_{ES}$  od 1 do 1,65 a sam dodatek włókien stalowych od 1 do 1,7. Oba dodatki łącznie pozwalają na osiągnięcie wartości  $W_{ES} = 2,35$ . Mówiąc najprościej współczynnik  $W_{ES}$  opisuje nam proporcję wzrostu wytrzymałości na ściskanie kompozytu piaskobetonowego w stosunku do wzrostu jego gęstości pozornej.  $W_{ES} > 1$  wskazuje, że wzrost wytrzymałości na ściskanie, przy danej ilości dodatków był większy od wzrostu gęstości pozornej, czyli że w stosunku do zarobu porównawczego badany beton przenosi większe obciążenia niżby na to wskazywała jego gęstość pozorna. Innymi słowy dzięki modyfikacjom kompozytu piaskobetonowego jego struktura stała się bardziej efektywna i przenosi duże obciążenia przy małym wzroście gęstości pozornej.

#### **6.5. Analiza wyników badań po 120 dniach dojrzewania.**

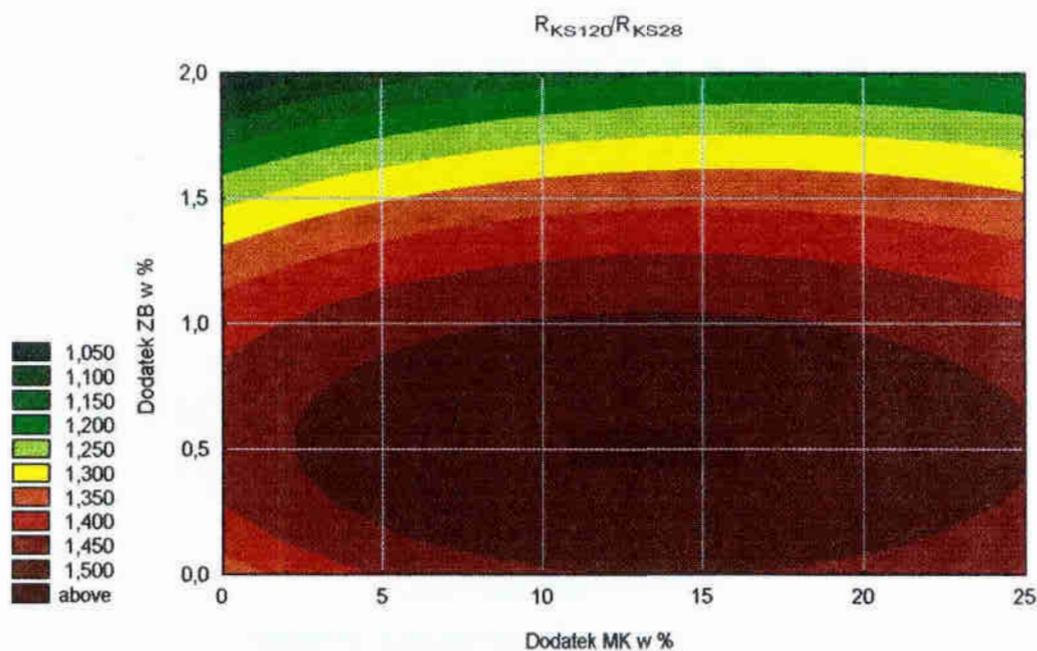
Podczas badania wytrzymałości na ściskanie po 120 dniach dojrzewania uzyskano znaczący wzrost tej cechy (o ponad 100%) od 24 MPa dla betonu niemodyfikowanego do 50 MPa dla kompozytów najbardziej optymalnych. Dla tej cechy współpraca obydwu dodatków w gotowym kompozycie jest bardzo efektywna.

Wyniki badania wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu po 120 dniach dojrzewania w pełni ujawniają efektywność działania dodatku włókien stalowych przy tym rodzaju obciążenia. Beton porównawczy osiąga wytrzymałość 2,75 MPa, a modyfikowany 2% włókien 6 MPa. Dodatek mikrokrzemionki pomimo upływu 120 dni dojrzewania w widoczny sposób pogarsza wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu osiągniętą dzięki dodatkowi samego zbrojenia. Pomimo tej negatywnej tendencji kompozyty o maksymalnym 25% dodatku mikrokrzemionki i dodatku włókien od 1,5% do 2,0% charakteryzują się znacznie wyższą wytrzymałością od betonu niemodyfikowanego.



Pomiar ugięcia, podobnie jak omówiona powyżej wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, dobrze odzwierciedla nabieranie przez kompozyt fibrobetonowy cech quaziplastycznych. Ugięcie kompozytu modyfikowanego 25% mikrokrzemionką i 2% włókien stalowych jest pięciokrotnie mniejsze od kompozytów modyfikowanych samą mikrokrzemionką. Kształt omawianej powierzchni wyraźnie wskazuje, że dodatek mikrokrzemionki nie w każdych proporcjach ma pozytywny wpływ na cechy kompozytu piaskobetonowego.

Porównanie wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania z wytrzymałością na ściskanie po 120 dniach dojrzewania przedstawiono na rys. 6.5.1. jako przyrost wytrzymałości na ściskanie  $\Delta R$ . Największy przyrost wytrzymałości na ściskanie  $\Delta R=1,5$  mają betony modyfikowane mikrokrzemionką w ilości od 5% do 20% i małą ilością włókien stalowych oscylującą w okolicach 0,5%. Wraz ze wzrostem ilości włókien stalowych w kompozycie maleje przyrost wytrzymałości aby ostatecznie w niektórych przypadkach spaść do wielkości 1,05. Mając na uwadze kształt obu powierzchni wytrzymałości - 28 i 120 dniowej można stwierdzić, że dodatek włókien stalowych wpływa na zwiększenie wytrzymałości „od razu” i to w wyraźnie zauważalny sposób.

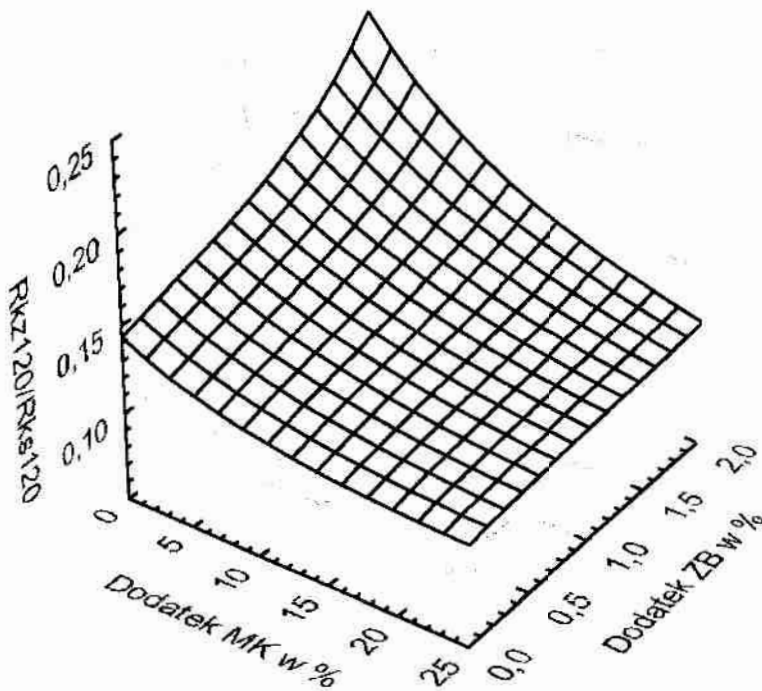


Rys.6.5.1. Przyrost wytrzymałości na ściskanie  $\Delta R$  po 120 dniach dojrzewania do wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania.

$$\Delta R = \frac{R_{KS120}}{R_{KS28}} \quad (6.5.1.)$$

$$\Delta R = \frac{23,173 + 0,947x - 0,018x^2 + 21,413y - 9,685y^2 + 0,086xy}{17,500 + 0,431x - 0,005x^2 + 10,681y - 2,838y^2 + 0,065xy} \quad (6.5.2.)$$

Wraz ze wzrostem dodatku włókien stalowych zjawisko to nasila się tak dalece, że przyrost wytrzymałości w czasie samej matrycy piaskobetonowej, jak i matrycy modyfikowanej dodatkiem MK jest mało widoczny, lub wręcz niezauważalny. Tylko w zarobach modyfikowanych małą ilością włókien stalowych można zauważyć znaczący przyrost wytrzymałości w czasie kompozytu piaskobetonowego.



Rys.6.5.2.  $R_{KS120}/R_{KS28}$  kompozytu piaskobetonowego w zależności od dodatku MK i ZB.

$$\frac{R_{KZ120}}{R_{KS120}} = \frac{2,681 + 0,031x - 0,001x^2 + 3,327y - 0,851y^2 - 0,033xy}{23,173 + 0,947x - 0,018x^2 + 21,413y - 9,685y^2 + 0,086xy} \quad (6.5.3.)$$

W punkcie 6.2. autor przedstawił kruchość kompozytu piaskobetonowego rozumianą jako stosunek wytrzymałości na rozciąganie poprzez rozłupywanie do wytrzymałości na ściskanie. Teraz mamy możliwość przeanalizować kruchość omawianych kompozytów piaskobetonowych rozumianą jako stosunek wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu do wytrzymałości na ściskanie  $\frac{R_{KZ120}}{R_{KS120}}$ . Tak rozumianą kruchość zobrazowano na rys. 6.5.2.

Kształt omawianej powierzchni jednoznacznie wskazuje na decydujący wpływ zbrojenia rozproszonego na tą cechę badanych betonów. Kruchość wzrasta wraz z dodatkiem włókien stalowych od 0,14 dla zarobu niemodyfikowanego do 0,24 dla zarobu o maksymalnym 2% dodatku włókien stalowych. Dodatek mikrokrzemionki wyraźnie pogarsza omawianą cechę kompozytów piaskobetonowych, tak zarobów modyfikowanych włóknami stalowymi jak i bez dodatku włókien.

$\Delta R_{120} = \frac{R_{KZ120}}{R_{KS120}}$  bardzo dobrze opisuje nabieranie przez kompozyt fibrobetonowy cech quaziplastycznych i ujawnia negatywny wpływ mikrokrzemionki na tą cechę.

Swamy i Mangat w swoich pracach [230, 223] opisali wyniki badań kompozytów betonowych wykonanych na bazie piasku kopalnego z 20% dodatkiem kruszywa grubego o średnicy maksymalnej ziarna 10mm. Badane przez nich betony o stosunku  $w/c=0,55$  były modyfikowane włóknami stalowymi o średnicy od 0,15 mm do 1,82 mm oraz długości od 12,5 mm do 50 mm. Smukłość włókien  $l/d$  wahała się od 13,7 do 333,3 a maksymalny ich dodatek wynosił 3,8%. Wynikiem tak szeroko zakrojonych badań było określenie teoretycznej zależności opisującej wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu. Zależność ta w ogólnej postaci przedstawia się następująco:

$$\sigma_{cu} = \sigma_m \cdot (1 - V_f) + 2\tau \cdot \frac{l}{d}, \quad (6.5.4.)$$

gdzie:

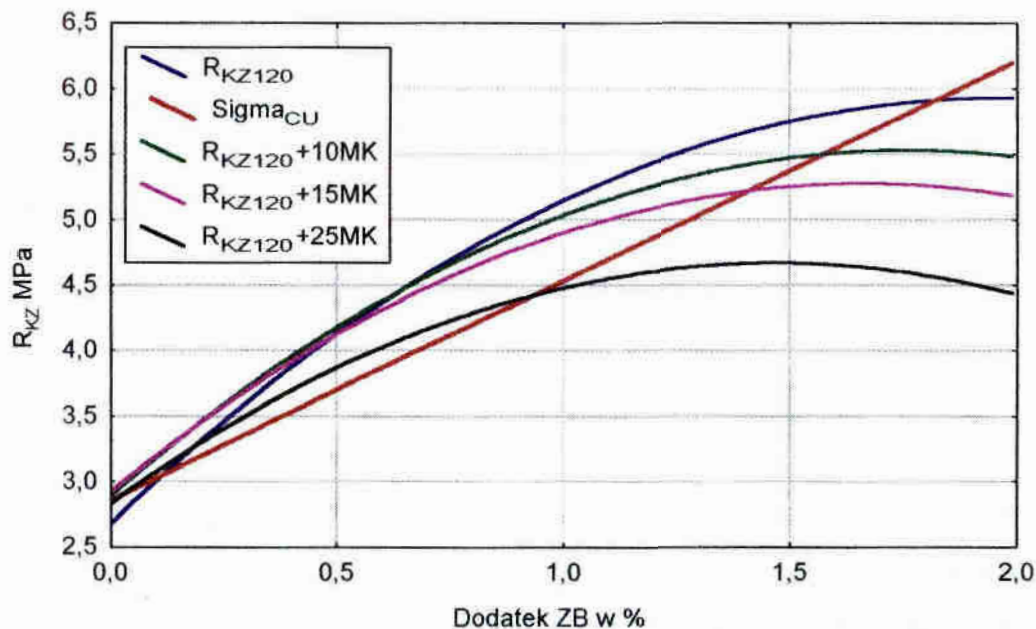
$\sigma_{CU}$  - wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu betonu z dodatkiem włókien stalowych w MPa,

$\sigma_m$  - wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu betonu bez dodatku włókien w MPa,

$V_f$  - dodatek włókien stalowych w %,

$\tau$  - wytrzymałość „spoiny” MPa,

$l/d$  - długość włókna oraz jego średnica (smukłość).



Rys.6.5.3. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu w zależności od dodatku włókien stalowych ZB.

Ze względu na trudność w każdorazowym określaniu wytrzymałości strefy kontaktowej pomiędzy włóknem a matrycą betonową ostatecznie do praktycznego stosowania przedstawiono zależność 6.5.5.

$$\sigma_{CU} = 0,97 \cdot \sigma_m \cdot (1 - V_f) + 3,41 \cdot V_f \cdot \frac{l}{d} \quad (6.5.5.)$$

Na rys.6.5.3. zestawiono wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu wybranych kompozytów piaskobetonowych oraz zależność teoretyczną zaproponowaną przez Swamy'ego i Mangat'a.

Jak widzimy teoretyczna zależność Swamy'ego i Mangat'a mieści się w przedziale wytrzymałości badanych kompozytów, choć jej kształt trochę odbiega od ogólnej tendencji jaką reprezentują zbadane kompozyty. Najprawdopodobniej jest to wpływ specyficznego kruszywa jakim jest piasek odpadowy zastosowany przez autora. Zależność Swamy'ego i Mangat'a jest bardzo dobrym punktem wyjścia do teoretycznej analizy wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu kompozytów fibropiaskobetonowych, ale wymaga jeszcze dalszych badań dla jej uściślenia. Równanie w takiej postaci w jakiej zaproponowali je Swamy i Mangat można stosować do zgrubnej oceny projektowanej wytrzymałości kompozytów fibropiaskobetonowych.

## 6.6. Reologia.

Po 365 dniach dojrzewania skurcz badanych kompozytów piaskobetonowych nie przekraczał 1,7‰. Wielkość ta odpowiada skurczowi zwykłych betonów żwirowych, który waha się od 0,5 do 3‰. Piaskobetony niemodyfikowane w zależności od receptury charakteryzują się skurczem od 2 do 6‰. Pod względem wielkości skurczu kompozyty fibropiaskobetonowe spełniają wymogi stawiane betonom żwirowym. Wpływ włókien stalowych na obniżenie skurczu tak w stosunku do zarobu porównawczego, jak i zarobów modyfikowanych MK kształtuje się na poziomie od 15 do 30%. Jest to wynik podobny do uzyskiwanych podczas badania kompozytów fibrobetonowych Wirand (20%) i Drutobeton (30%).

Uwzględniając wpływ skurczu w czasie można stwierdzić, że odkształcenia przy pełzaniu zarobów fibrobetonowych nie przekraczają 0,5 promilla, a zarobów bez dodatku włókien kształtują się na poziomie 1,0 promilla po 365 dniach dojrzewania. Aby uzyskać pełny obraz wpływu włókien stalowych na pełzanie kompozytów fibropiaskobetonowych należałoby przeprowadzić dodatkowe badania próbek pod różnymi obciążeniami.

### **6.7. Optymalna ilość dodatków.**

Na podstawie studiów literaturowych i przeprowadzonych badań autor za optymalny przedział ilości dodatku MK do omawianych kompozytów fibropiaskobetonowych uważa 5% - 20%, a dodatku ZB 0,5% - 1,5%. Dozowanie mniej niż 5% MK i 0,5% ZB jest nieuzasadnione ekonomicznie ze względu na brak zauważalnego wpływu wymienionych dodatków na cechy stwardniałego kompozytu. Górna granica dozowania MK i ZB została ustalona przede wszystkim ze względu na urabialność uzyskiwanych kompozytów fibropiaskobetonowych.

## 7.0. Model kształtowania struktury kompozytów piaskobetonowych.

Możliwości kształtowania właściwości dowolnego materiału kompozytowego, o złożonej budowie wieloskładnikowej, należy rozpatrywać nie tylko we wzajemnym związku udziałów objętościowych jego składników lecz również w aspekcie geometrii ich rozmieszczenia. Dlatego w odniesieniu do betonu, jako materiału o budowie typowo konglomeracyjnej, interesujące jest przesledzenie w jakim stopniu ilość i jakość tych składników wpływa na kształtowanie struktury otrzymywanego z nich materiału. Ilościowy opis procesów kształtowania struktury projektowanych betonów wymaga sformułowania zależności przestrzennego układu ziaren kruszywa w mieszance betonowej. Ponieważ wynikają one z wzajemnych uwarunkowań pomiędzy objętością zaczynu cementowego i składem granulometrycznego kruszywa, przyjmując założenie, że znane jest uziarnienie oraz szczelność układu ziaren kruszywa można podać relacje wyznaczające objętość zaczynu oraz grubość otulenia ziaren kruszywa wodną zawiesiną cementu.

W swoich rozważaniach autor oparł się o model kształtowania struktury modyfikowanych betonów i materiałów kompozytowych opracowany przez prof. dr hab. inż. Aleksandra Świtońskiego. Model ten szeroko omówiony w [35,181] został niniejszym rozdziale przystosowany przez autora dla specyficznych warunków geometrycznych jakie narzuca kruszywo złożone tylko i wyłącznie z piasku odpadowego.

W opisie przestrzennego układu elementów fazy stałej mieszanki na makroskopowym poziomie dyspersyjności przyjmujemy model geometryczny, w którym ziarna kruszywa otoczone warstwą wodnej zawiesiny spoiwa, o grubości  $\delta_{z_i}$ , zostały losowo rozmieszczone w ośrodku. Uwzględniając ogólną liczbę  $N_k$  oraz indywidualną wielkość promienia ziaren kruszywa  $r_k$ , o konfiguracji objętościowej  $A_k$  określimy geometryczną zależność przestrzennego ich rozmieszczenia z równania objętości w którym  $m_i$  jest masą, a  $\rho_i$  gęstością komponentów mieszanki.

$$A_k \sum_{i=1}^{N_k} (r_{ki} + \delta_z)^3 + \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\rho_i} \cdot j_k = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\rho_i} = V_b. \quad (7.1.)$$

Równanie (7.1.) w prostszej postaci można zapisać dla średniego promienia i średniej liczby ziaren  $\overline{N}_k$ , otoczonych warstwą zaczynu o średniej grubości  $\delta_z$ .

$$A_k \cdot \overline{N}_k \cdot \left( \overline{r}_k + \delta_z \right)^3 = V_b (1 - j_k) = V_b \cdot S_{kb}. \quad (7.2.)$$

Średnią liczbę ziaren kruszywa w równaniu (7.2.) określa zależność:

$$\overline{N}_k = \frac{K}{A_k \cdot \overline{r}_k^3 \cdot \rho_k}. \quad (7.3.)$$

Przyjmując:

$$\overline{d}_k = 0,615mm, \quad \text{zgodnie z tab.4.3.1.2.,}$$

$$\overline{r}_k = \frac{\overline{d}_k}{2} = \frac{0,615mm}{2} = 0,3075mm \approx 0,31mm,$$

$$\rho_k = 2,65 \frac{g}{cm^3},$$

$$A_k = \frac{4}{3} \pi.$$

Otrzymamy:

$$\overline{N}_k = 5,4 \cdot 10^9 \text{ ziaren/m}^3.$$



Z definicji szczelności wiemy, że:

$$\overline{N}_k = \frac{S_{kb}}{A_k \cdot r_k^3} \rightarrow S_{kb} = \overline{N}_k \cdot A_k \cdot r_k^3 \quad (7.4.)$$

gdzie  $S_{kb}$  jest to szczelnością układu ziaren kruszywa. Po podstawieniu wartości liczbowych otrzymamy:

$$S_{kb} = 67\%.$$

Porównując teoretyczne  $S_{kb}$  z rzeczywistym  $S_k = 68\%$  (tab.4.3.1.1.) możemy przyjąć, że obie wartości są sobie równe. Z literatury wiadomo, że  $S_{kb} > S_k$ . Trzeba tutaj zaznaczyć, że w badanych zarobach mamy do czynienia tylko i wyłącznie z kruszywem drobnym, a nie z pełnym stosem okrucowym dla którego zostało zdefiniowane  $S_{kb}$ . Wpływ zawilgocenia kruszywa drobnego do 2mm na jego układ w stosie okrucowym jest bardzo duży. Na podstawie danych literaturowych można stwierdzić, że przy najbardziej niekorzystnym zawilgoceniu piasek ułoży się w stosie o około 30% objętościowo większym niż w przypadku piasku suchego. Piasek całkowicie zalany wodą zajmuje 98% objętości piasku suchego. Mając na uwadze tą specyfikę kruszywa drobnego autor założył, że teoretyczne  $S_{kb}$  wyraża dolną granicę szczelności układu ziaren w gotowym betonie, która to szczelność w rzeczywistości jest znacznie większa.

Porównania zależności (7.2.) i (7.3.) prowadzi do następującego równania

$$\left(r_k + \delta_z\right)^3 = V_b \cdot S_{kb} \cdot \frac{\rho_k}{K} \cdot r_k^3 \quad (7.5.)$$

Rzeczywistym pierwiastkiem równania (7.5.) jest wyrażenie określające średnią grubość warstwy zaczynu na ziarnach kruszywa w następującej postaci:

$$\delta_z = \bar{r}_k \left( \sqrt[3]{V_b \cdot S_{kb} \cdot \frac{\rho_k}{K}} - 1 \right) \quad (7.6.)$$

W wyrażeniu ( 7.6.) objętość mieszanki betonowej  $V_b$  stanowi suma objętości absolutnych kruszywa, cementu, oraz mikrokrzemionki. Przyjmujemy, że  $100\% \geq S_{kb} \geq 67\%$

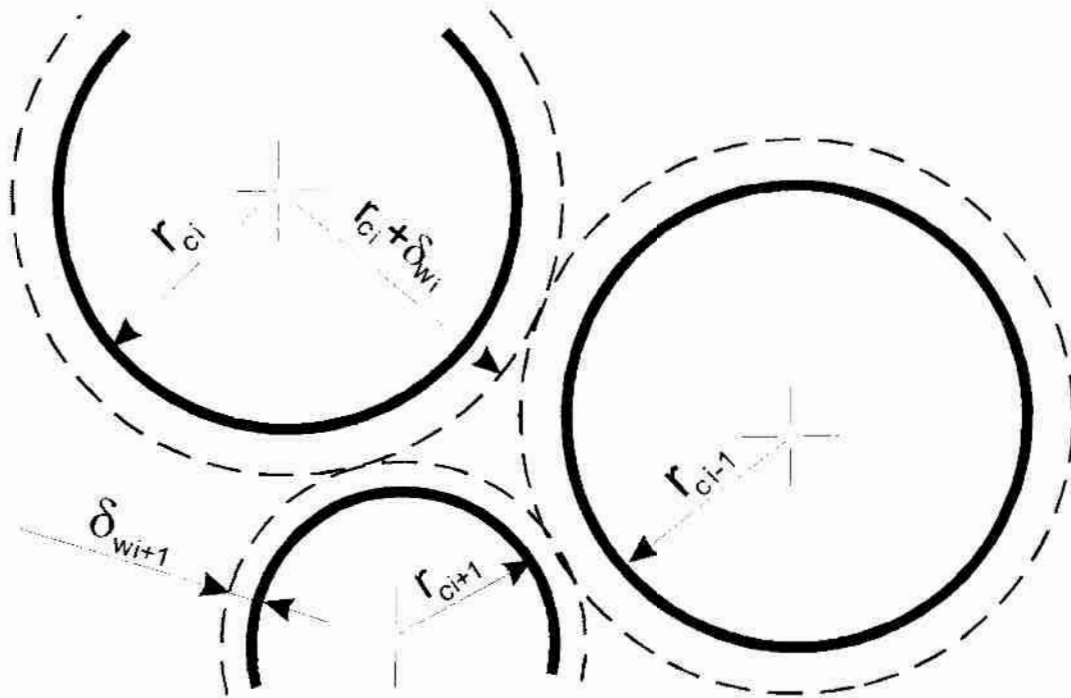
Tab.7.1. Średnia grubość warstwy zaczynu na ziarnach kruszywa  $\delta_z$  w zależności od szczelności układu ziaren kruszywa  $S_{kb}$  dla zarobów bez dodatku MK.

$S_{kb}$ w %	$\delta_z$ w $\mu\text{m}$
100	45
95	39
90	33
85	27
80	20
75	13*
70	6*
67	1*

\* -  $\delta_z$  mniejsze od średniego ziarna spoiwa.

Analizując mechanizm kształtowania struktury materiału kompozytowego na poziomie makroskopowym przyjęte zostało założenie, że zawieszona otaczająca ziarna kruszywa, będąca wodną dyspersją ziaren cementu i mikrowypełniacza (mikrokrzemionki), stanowi fazę ciągłą. W rzeczywistości jest ona ośrodkiem niejednorodnym, składającym się z fazy ciekłej, rozdzielającej ziarna fazy stałej o zróżnicowanej granulacji. Średni wymiar ziaren mikrowypełniacza jest o dwa rzędy wielkości mniejszy od przeciętnego ziarna spoiwa, zatem w mikrolokalnym modelu tego typu dodatek nie został wydzielony z fazy ciekłej układu (rys.7.1.). Ponieważ przestrzenny układ ziarn fazy stałej w zawieszynie otaczającej ziarna kru-

szywa wywiera istotny wpływ na kinetykę reakcji fizykochemicznych i właściwości fizyczne materiału dlatego rozważony zostanie problem przestrzennego rozmieszczenia ziarn spoiwa w zawieszinie. W tym celu przyjęty został model geometryczny, wykorzystujący elementy geometrii fraktalnej, w którym ziarna spoiwa losowo rozmieszczone zostały w zawieszinie mikrowypełniacza (rys.7.1.).



Rys. 7.1. Mikroskalny model układu ziaren fazy stałej w materiale kompozytowym [181]

Stwarza on możliwość przedstawienia mechanizmu kształtowania struktury na mikroskopowym poziomie dyspersyjności fazy stałej w mieszance. Uwzględniając indywidualny rozmiar oraz sumaryczną liczbę ziaren fazy stałej można podać następującą zależność określającą objętość zawiesziny

$$V_c = A_c \sum_1^{N_c} (r_{ci} + \delta_{wi})^3 + \left( \frac{c}{\rho_c} + \frac{m}{\rho_m} + \frac{w}{\rho_w} \right) j = \frac{c}{\rho_c} + \frac{m}{\rho_m} + \frac{w}{\rho_w}, \quad (7.7.)$$

gdzie:

$A_c$  - współczynnik konfiguracji objętościowej ziaren spoiwa,

$r_{c\bar{}}$  - promień ziarna spoiwa,

$\delta_{w\bar{}}$  - grubość warstwy zawiesiny mikrokrzemionki na ziarnach spoiwa,

$\rho_c, \rho_m, \rho_w$  - gęstość cementu, mikrokrzemionki i wody,

$N_c$  - sumaryczna liczba ziaren spoiwa,

$j$  - jamistość układu ziaren cementu w zaczynie.

Dla średniej wielkości promienia  $\bar{r}_c$  i liczby ziaren  $\bar{N}_c$  w jednostce masy cementu wyrażenie (7.7.) przyjmuje postać:

$$\bar{N}_c \cdot A_c (\bar{r}_c + \delta_w)^3 + \left( \frac{1}{\rho_c} + \frac{m}{c\rho_m} + \frac{w}{c\rho_w} \right) j = \frac{1}{\rho_c} + \frac{m}{c\rho_m} + \frac{w}{c\rho_w}. \quad (7.8.)$$

Związek pomiędzy średnią liczbą ziaren i jednostką masy cementu wyraża następująca relacja:

$$\bar{N}_c \cdot A_c \cdot \bar{r}_c^3 = \frac{1}{\rho_c}. \quad (7.9.)$$

Uwzględniając zależność (7.9.) w wyrażeniu (7.8.), po wykonaniu przekształceń otrzymuje się następujące równanie:

$$\delta_w^3 + 3\bar{r}_c \delta_w^2 + 3\bar{r}_c^2 \delta_w = \left( \frac{1}{\rho_c} + \frac{m}{c\rho_m} + \frac{w}{c\rho_w} \right) (1-j) \bar{r}_c^3 \rho_c - \bar{r}_c^3. \quad (7.10.)$$

Wprowadzając następujące oznaczenie:

$$\left( \frac{1}{\rho_c} + \frac{m}{c\rho_m} + \frac{w}{c\rho_w} \right) \rho_c (1-j) = A(w, m), \quad (7.11.)$$

równanie ( 7.10.) przyjmuje postać

$$\delta_w^3 + 3\bar{r}_c \delta_w^2 + 3\bar{r}_c^3 \delta_w - r_c^3 A(w, m) = 0. \quad (7.12.)$$

Rzeczywistym pierwiastkiem równania (7.12.) jest wyrażenie określające grubość warstwy zawiesiny mikrokrzemionki otaczającej ziarna cementu:

$$\delta_w = \bar{r}_c \left[ \sqrt[3]{\left( \frac{1}{\rho_c} + \frac{m}{c\rho_m} + \frac{w}{c\rho_w} \right) \rho_c (1-j) - 1} \right]. \quad (7.13.)$$

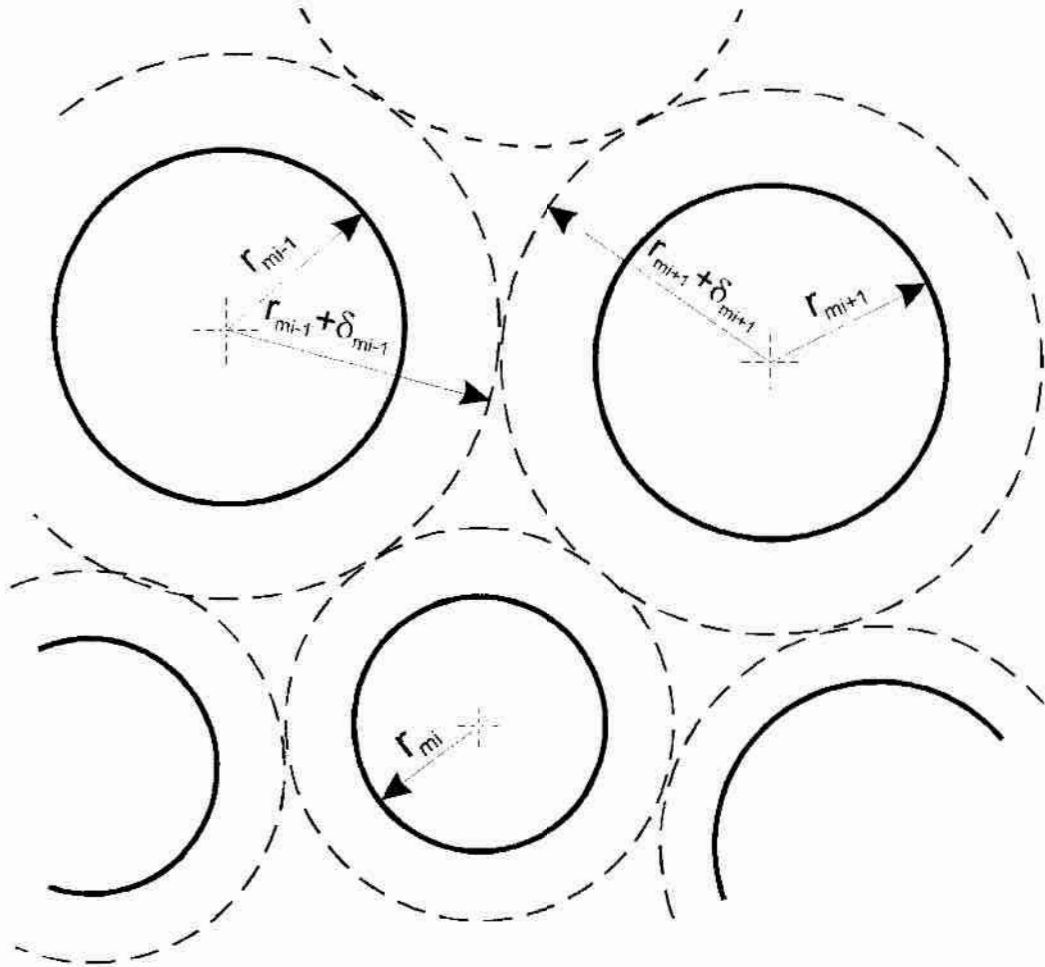
Z danych literaturowych wynika, że szczelność zagęszczenia ziaren spoiwa w zaczynach cementowych wynosi  $s_c = 1 - j = 0,74$ . Przyjmując analogiczną szczelność układu ziaren fazy stałej w zawieszynie materiału kompozytowego zależność ( 7.13.) przyjmuje postać:

$$\delta_w = \bar{r}_c \left[ \sqrt[3]{0,74 \left( \frac{1}{\rho_c} + \frac{m}{c\rho_m} + \frac{w}{c\rho_w} \right) \rho_c - 1} \right]. \quad (7.14.)$$

Wyrażenia (7.14.) stwarza praktyczne możliwości ilościowego opisu efektów kształtowania struktury materiałów kompozytowych pod wpływem plastyfikatora. W dalszej części rozważań przedstawiony zostanie mechanizm kształtowania struktury materiału kompozytowego na submikroskopowym poziomie dyspersyjności fazy stałej w mieszance.

Dla rozpatrywanego przez nas kompozytu piaskobetonowego  $\delta_w = 2,35 \mu m$ . Pamiętając, że  $\bar{d}_c = 20 \mu m$  to przy pojedynczym otuleniu ziaren piasku  $\delta_c = 24,7 \mu m$ , a przy otuleniu podwójną warstwą  $\delta_c = 49,4 \mu m > 45 \mu m$  czyli wykracza poza możliwy do zrealizowania zakres (patrz tab.7.1.). Przyjmujemy, że występuje pojedyncze otulenie.

Formułując problem zagęszczenia struktury zaczynu cementowego w betonach nowej generacji pod wpływem dodatku mikrokrzemionki zawieszinę otaczającą ziarna spoiwa przedstawimy na modelu ośrodka dyspersyjnego, w którym ziarna kwarcu zostały losowo zawieszane w cieczy (rys.7.2.).



Rys.7.2. Submikrolokalny model kształtowania struktury zaczynu cementowego [181].

Tab. 9.2.

Zestawienie teoretycznych parametrów opisujących badane kompozyty piaskobetonowe.

Zarób	c %	m %	c kg/m <sup>3</sup>	m kg/m <sup>3</sup>	$\delta_z$ μm	$\frac{r_k}{\delta_w}$	$\delta_w$ μm	$\frac{r_c}{\delta_w}$	$\delta_m$ μm	$\frac{r_m}{\delta_m}$	$S_{kh}$ %	$\bar{N}_k$ 10 <sup>9</sup>	$\bar{N}_c$ 10 <sup>13</sup>	$\bar{N}_m$ 10 <sup>19</sup>	$\frac{\bar{N}_c}{\bar{N}_k}$	$l_c$	$l_m$ 10 <sup>6</sup>
0% MK	100	0	400	0	24,7	12,55	2,35	4,25	0,000	0,00	83,3	5,4	3,08	0,00	5703	3562	0
5% MK	95	5	380	20	25,2	12,3	2,60	3,84	0,071	0,63	83,7	5,4	2,92	2,35	5407	3266	0,59
10% MK	90	10	360	40	25,8	12,0	2,86	3,55	0,048	0,94	84,1	5,4	2,77	4,70	5129	2988	1,25
15% MK	85	15	340	60	26,3	11,8	3,14	3,18	0,037	1,21	84,5	5,4	2,62	7,05	4851	2710	1,99
20% MK	80	20	320	80	26,8	11,5	3,44	2,91	0,031	1,45	84,9	5,4	2,46	9,39	4555	2414	2,82
25% MK	75	25	300	100	27,6	11,2	3,77	2,65	0,026	1,73	85,5	5,4	2,31	11,75	4277	2136	3,76

Wszystkie zaroby były dodatkowo modyfikowane plastyfikatorem w ilości 1,8% - czyli 7,2 kg/m<sup>3</sup>. $l_c$  - ilość ziaren cementu nie zaangażowanych bezpośrednio w otaczanie kruszywa. Te „wolne” elementy wypełniają przestrzenie między

ziarnami oraz otaczają włókna stalowe, jeżeli takie zostaną wprowadzone do betonu.

 $l_m$  - średnia liczba elementów kwarcu otaczających poszczególne ziarna cementu.

W opisie przestrzennego rozmieszczenia ziaren mikrokrzemionki faza ciekła rozdzielona została na część bezpośrednio otaczającą poszczególne ziarna oraz objętość wypełniającą przestrzeń pomiędzy tak utworzonymi elementami ośrodka. Objętość zawiesiny wyznaczona została na podstawie ogólnej liczby  $N_m$  oraz indywidualnego promienia ziaren mikrokrzemionki  $r_{mi}$  z równania:

$$A_m \sum_{i=1}^{N_m} (r_{mi} + \delta_{mi})^3 + \left( \frac{m}{\rho_m} + \frac{w}{\rho_w} \right) \cdot j_m = \frac{m}{\rho_m} + \frac{w}{\rho_w}. \quad (7.15.)$$

Dla średniej liczby  $\bar{N}_m$  oraz średniego promienia ziaren mikrokrzemionki  $\bar{r}_m$  wyrażenie (7.15.) przyjmuje postać:

$$A_m \cdot N_m \left( \bar{r}_m + \delta_m \right)^3 = \left( \frac{m}{\rho_m} + \frac{w}{\rho_w} \right) \cdot (1 - j_m) = \left( \frac{m}{\rho_m} + \frac{w}{\rho_w} \right) \cdot S_m. \quad (7.16.)$$

Średnią liczbę ziaren mikrokrzemionki w zaczynie cementowym określa zależność:

$$\bar{N}_m = \frac{m}{A_m \cdot \bar{r}_m \cdot \rho_m}. \quad (7.17.)$$

Uwzględniając zależność (7.17.) w wyrażeniu (7.16.) po przeprowadzeniu elementarnych przekształceń otrzymujemy następujące równanie:

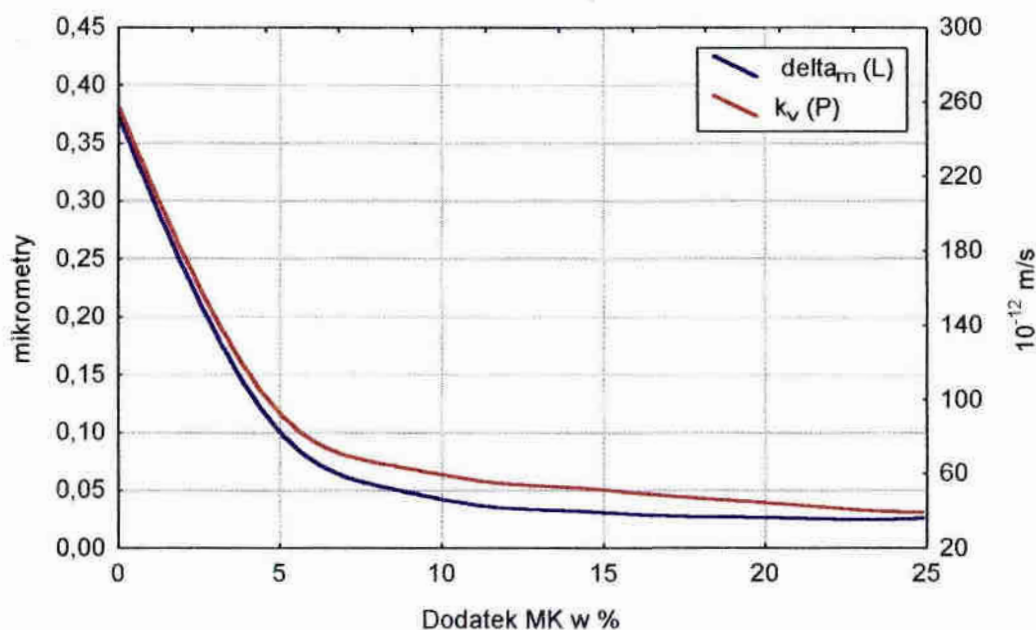
$$\left( \bar{r}_m + \delta_m \right)^3 = \left( \frac{m}{\rho_m} + \frac{w}{\rho_w} \right) \cdot \frac{S_m \cdot \rho_m}{m} \cdot \bar{r}_m^{-3}. \quad (7.18.)$$

Rzeczywistym pierwiastkiem równania (7.18.) jest wyrażenie określające grubość warstwy cieczy na ziarnach mikrokrzemionki w modyfikowanym zaczynie cementowym:



$$\delta_m = \bar{r}_m \left[ \sqrt[3]{\left(\frac{m}{\rho_m} + \frac{w}{\rho_w}\right) \cdot \frac{S_m \cdot \rho_m}{m} - 1} \right] = \bar{r}_m \left[ \sqrt[3]{\left(1 + \frac{w}{m} \cdot \frac{\rho_m}{\rho_w}\right) \cdot S_m - 1} \right]. \quad (7.19.)$$

Teoretyczny parametr  $\delta_m$ , po odpowiednim wyskalowaniu bardzo dobrze odzwierciedla wodoszczelność kompozytów piaskobetonowych. Na rys. 7.3. przedstawiono teoretyczną grubość warstwy cieczy na ziarnach MK oraz rzeczywistą wodoszczelność piaskobetonów modyfikowanych mikrokrzemionką.



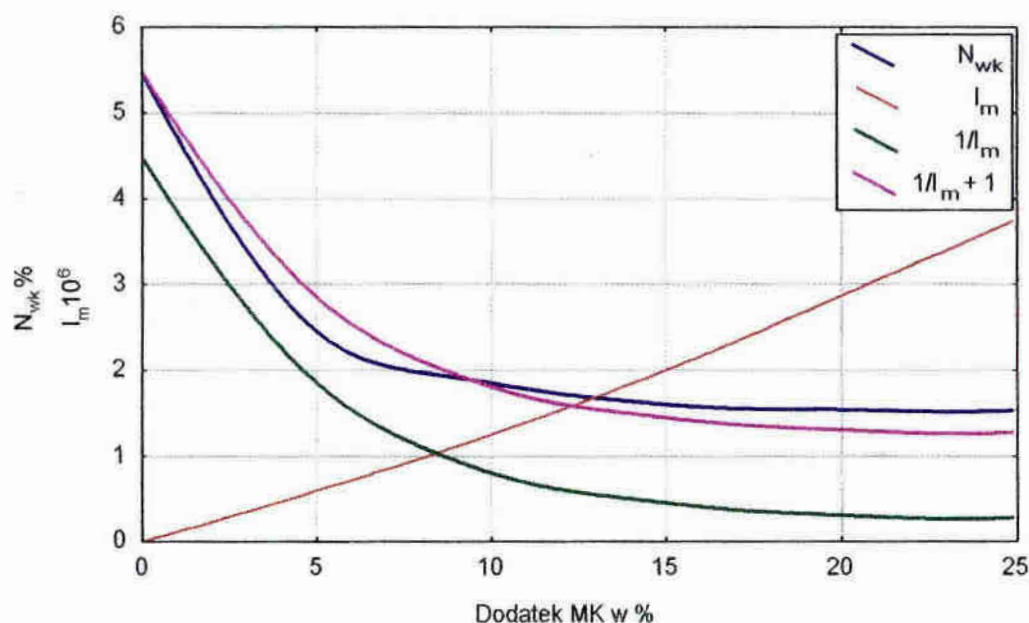
Rys.7.3. Teoretyczna grubość warstwy cieczy na ziarnach mikrokrzemionki (skala po lewej) i rzeczywista wodoszczelność  $k_v$  piaskobetonów modyfikowanych mikrokrzemionką (skala po prawej).

Możemy zatem zapisać:  $k_v = k_0 \cdot \delta_m$ , gdzie  $k_0$  jest współczynnikiem skalującym.

Dla rozpatrywanych kompozytów piaskobetonowych  $k_0 = 667 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{1}{s} \right]$ .

W zaczynie cementowym uplastycznionym superplastyfikatorem szczelność zagęszczenia ziaren kwarcu odpowiada układowi ziaren cementu ( $S_m = 0,74$ ). W celu zobrazowania wpływu mikrokrzemionki na zagęszczenie struktury betonu, na podstawie zależności (7.9) i (7.17), określona została średnia liczba elementów kwarcu  $l_m$  otaczających poszczególne ziarna cementu:

$$l_m = S_m \frac{\bar{N}_m}{\bar{N}_c} = S_m \frac{m}{A_m \cdot \bar{r}_m^3 \cdot \rho_m} \cdot \frac{A_c \cdot \bar{r}_c^3 \cdot \rho_c}{c} = 0,74 \frac{m \cdot \bar{r}_c^3 \cdot \rho_c}{c \cdot \bar{r}_m^3 \cdot \rho_m}. \quad (7.20.)$$



Rys. 7.4. Rzeczywista nasiąkliwość wagowa  $N_{wk}$  betonów modyfikowanych tylko dodatkiem MK oraz teoretyczne zależności:  $l_m$ ,  $1/l_m$ ,  $1/l_m + 1$ .

Zawiesina sporządzona z cementu, mikrokrzemionki i wody, w miarę upływu czasu nabiera wytrzymałości mechanicznej (twardnieje). Powstaje w ten sposób początkowo luźny, a w miarę postępu hydratacji zagęszczający się szkielet, który stanowi podstawę budowy struktury kamienia cementowego w betonie.

Dodatek mikrokrzemionki wraz z domieszką superplastyfikatora istotnie wpływa na uszczelnienie przestrzeni międzyziarnowych spoiwa elementami kwarcu, które w procesie twardnienia betonu wchodzi w reakcję chemiczną z wodorotlenkiem wapnia. W zaczynie wykonanym z cementu o średnim wymiarze ziaren  $20 \mu\text{m}$ , z dodatkiem mikrokrzemionki o rozdrobieniu scharakteryzowanym średnim wymiarem ziaren  $d_m = 0,09 \mu\text{m}$ , poszczególne elementy spoiwa otoczone zo-

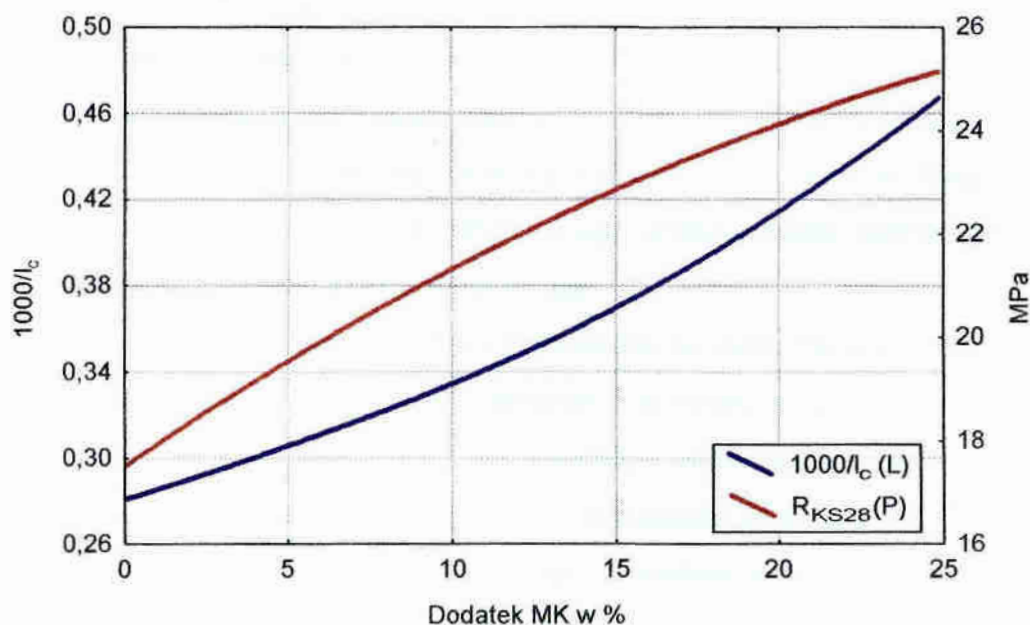
staną powłoką składającą się z  $l_m$  elementów. W otoczce tej ziarna kwarcu rozdzielone są warstwą fazy ciekłej, których średnia grubość jest równa  $2\delta_w$ .

Na rys.7.4. przedstawiono cztery zależności  $l_m$ ,  $1/l_m$ ,  $1/l_m+1$  (w których  $l_m$  wyrażono jako  $1 \cdot 10^6$  sztuk) oraz  $N_{wk}$  w %. Zgodnie z założeniami teoretycznymi im większe  $l_m$  tym większa szczelność struktury kompozytu piaskobetonowego.  $N_{wk}$  jest pośrednią miarą szczelności struktury kompozytu z tym zastrzeżeniem, że im mniejsza nasiąkliwość tym większa szczelność z czego wynika, że wyrażenie  $1/l_m$  byłoby jej teoretycznym odpowiednikiem. Jak widzimy na rys.9.3. zależność  $N_{wk}$  i  $1/l_m$  są do siebie prawie idealnie równoległe. Skalując zależność teoretyczną do wielkości  $1/l_m+1$  otrzymujemy bardzo dobre odzwierciedlenie nasiąkliwości wagowej  $N_{wk}$  badanych kompozytów. Na tej podstawie można przyjąć, że:

$$N_{wk} = \frac{1}{l_m} + 1. \quad (7.21.)$$

Czyli po podstawieniach:

$$N_{wk} = \frac{c \cdot r_m^{-3} \cdot \rho_m}{0,74 \cdot m \cdot r_c^{-3} \cdot \rho_c} \cdot 10^6 + 1 [\%]. \quad (7.22.)$$



Rys.7.5. Rzeczywista wytrzymałość na ściskanie (skala po prawej) oraz teoretyczna zależność

$\frac{1}{l_c} \cdot 1000$  (skala po lewej).

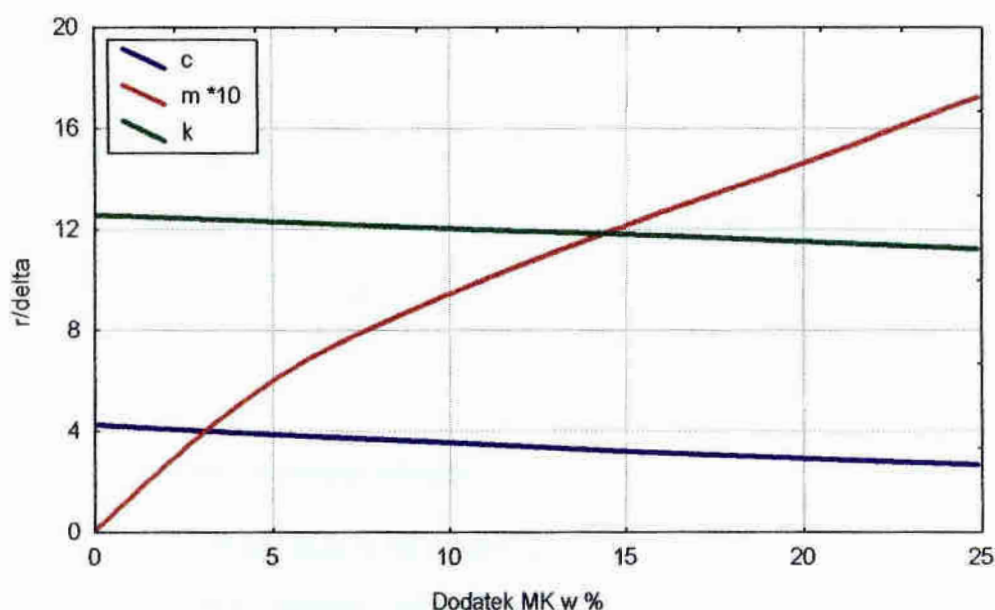
Dla dalszego opisu struktury kompozytu fibropiaskobetonowego autor zdefiniował parametr  $l_c$  - opisany w tab.9.2. Na rys.7.5. zestawiono wytrzymałości na ściskanie kompozytów fibropiaskobetonowych w zależności od dodatku MK i parametr  $l_c/1000$ . Można stwierdzić, że istnieje luźny związek pomiędzy ilością „wolnych” elementów cementu wypełniających przestrzeń między ziarnami kruszywa, a wytrzymałością na ściskanie. Ścisłejsze teoretyczne połączenie tych dwóch czynników wymaga dodatkowych badań laboratoryjnych.

Dla dokładnego przeanalizowania cech geometrycznych omawianych kompozytów piaskobetonowych autor zdefiniował bezwymiarową wielkość  $r/\delta$ . Na rys.7.6. przedstawiono przebieg  $r/\delta$  w zależności od dodatku MK dla ziarna kruszywa, dla ziarna spoiwa oraz dla ziarna mikrokrzemionki. Wiadomo, że dodatek MK uszczelnia strukturę betonów, ale jego pozytywny wpływ na badane betony jest zauważalny dopiero od pewnego momentu. Przekroczenie pewnej optymalnej wartości dodatku powoduje, że nie polepsza on cech stwardniałego betonu, a w wielu przypadkach pogarsza. Dotychczasowe zalecenia dozowania MK opierały się na obserwacjach cech mechanicznych stwardniałych betonów. Autor proponuje aby zakres optymalnego dozowania MK oprzeć na parametrach geometrycznych zobrazowanych na rys.7.6. Stosunek średniego promienia ziarna kruszywa do jego grubości otoczki zaczynem, średniego promienia ziarna spoiwa do grubości jego otoczki wodną zawiesiną mikrokrzemionki oraz średniego promienia ziarna mikrokrzemionki do grubości jego otoczki wodnej dobrze obrazują wewnętrzną strukturę kompozytu betonowego.

Mały dodatek MK nie wpływa zauważalnie na cechy badanych kompozytów. Poszczególne elementy mikrokrzemionki są wtedy otoczone dużą ilością wody. Przy dużych dodatkach MK średnia wodna otoczka staje się coraz mniejsza. W rzeczywistości niektóre elementy mają wystarczającą ilość wody wokół siebie aby dalej reagować, niektóre mają tylko część potrzebnej im wody, a niektóre pozostają całkowicie suche. Dozowanie MK oprócz zmiany grubości otoczki wodnej poszczególnych elementów MK wpływa na grubość otoczki ziaren spoiwa i kruszywa. Z punktu widzenia geometrycznej struktury kompozytu betonowego, za najmniejszy optymalny dodatek MK należy według autora uznać punkt przecięcia

krzywych  $c$  i  $m \cdot 10$ . Jest to miejsce, w którym stosunek promienia ziarna mikrokrzemionki do jego otoczki wodnej i stosunek promienia ziarna spoiwa do jego otoczki zawiesiną są takie same. Punkt maksymalnego optymalnego dozowania MK znajduje się według autora w miejscu przecięcia się krzywych  $k$  i  $m \cdot 10$ . Jest to miejsce w którym stosunek promienia ziarna kruszywa do jego otoczki zaczynem jest taki sam jak stosunek promienia ziarna mikrokrzemionki do jego otoczki wodnej. W Przypadku omawianych w tej pracy kompozytów piaskobetonowych przedział optymalnego dozowania MK znajduje się w granicach od 3% do 15% - co się pokrywa z wynikami obserwacji cech mechanicznych stwardniałego betonu.

Metoda geometrycznego określania przedziału optymalnego dozowania MK ma dodatkowo tą zaletę, że można ją stosować zarówno do zarobów w których część spoiwa jest zastępowana dodatkiem MK, jak i do zarobów, w których po prostu dodajemy mikrokrzemionkę.



Rys. 7.6. Przebieg zależności  $r/\delta$  w zależności od wielkości dodatku MK dla ziarna cementu  $c$ , mikrokrzemionki  $m$  i kruszywa  $k$ .

Przedstawiony model pozwala w prosty sposób wykazać efekty ilościowe kształtowania struktury projektowanego betonu pod wpływem udziałów objętościowych i cech geometrycznych zastosowanych komponentów. Potrzeby prowa-

dzenia takiej analizy wynikają stąd, że bez znajomości określonych tu parametrów nie można formować struktury betonu w poszukiwaniu optymalnych właściwości eksploatacyjnych, unikając pracochłonnych i długotrwałych badań eksperymentalnych.

Romualdi dla opisu struktury kompozytu fibrobetonowego zdefiniował parametr rozstawu włókien (spacing) [13]. Parametr ten jest oparty całkowicie na geometrycznych cechach rozkładu włókien w kompozycie, a opisuje go następująca zależność:

$$S_e = 1,38 \cdot d \sqrt{\frac{1}{V_f}} \quad (7.23.)$$

Mangat i Swamy zmodyfikowali tą zależność co szczegółowo opisali w pracach [223,230]. Modyfikacja Swamy'iego i Mangat'a polegała na uwzględnieniu oprócz cech geometrycznych włókien ich przyczepności do matrycy oraz wytrzymałości samego włókna. Zmodyfikowany w ten sposób parametr został nazwany „effective spacing” i opisuje go poniższe równanie:

$$S_e = 15,3 \sqrt{\frac{\sigma_{fu} \bar{d}^2}{\tau}} \cdot \sqrt{\frac{d}{V_f l}} \quad (7.24.)$$

gdzie:

$\sigma_{fu}$  - wytrzymałość włókna,

$\bar{d}$  - średnia wzorcowa średnica włókna,

$\tau$  - przyczepność włókna do matrycy (średnia wartość naprężeń stycznych wynikających z prób bezpośredniego wyrwania włókna z matrycy),

$d, l$  - średnica i długość włókna,

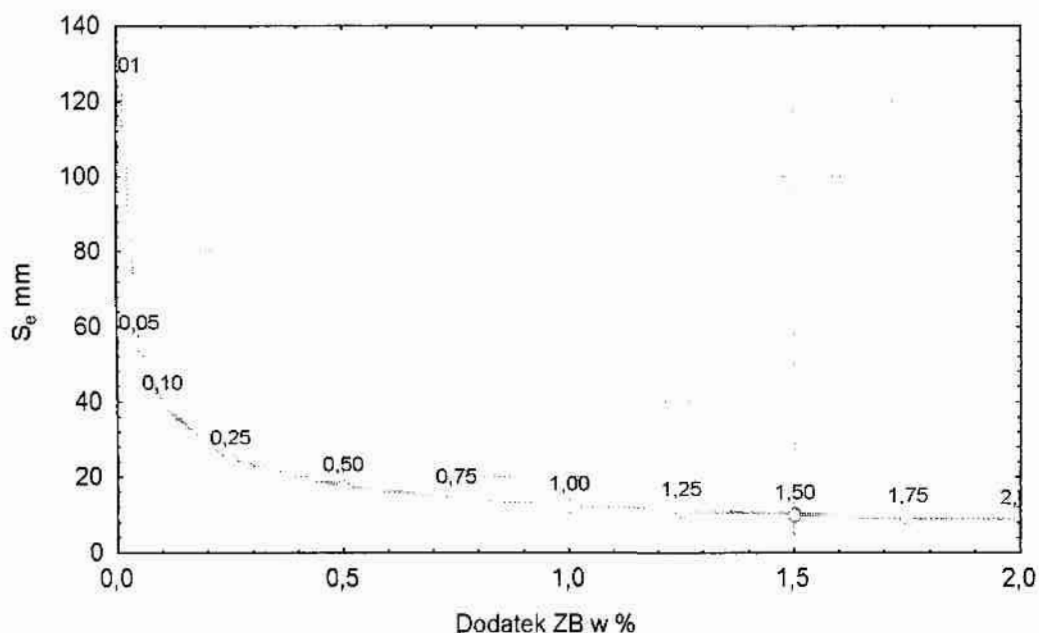
$V_f$  - zawartość włókien.

Dla włókien o przekroju okrągłym  $\tau = 1 \frac{N}{mm^2}$ , a sama zależność ( 7.24.)

przyjmuje postać:

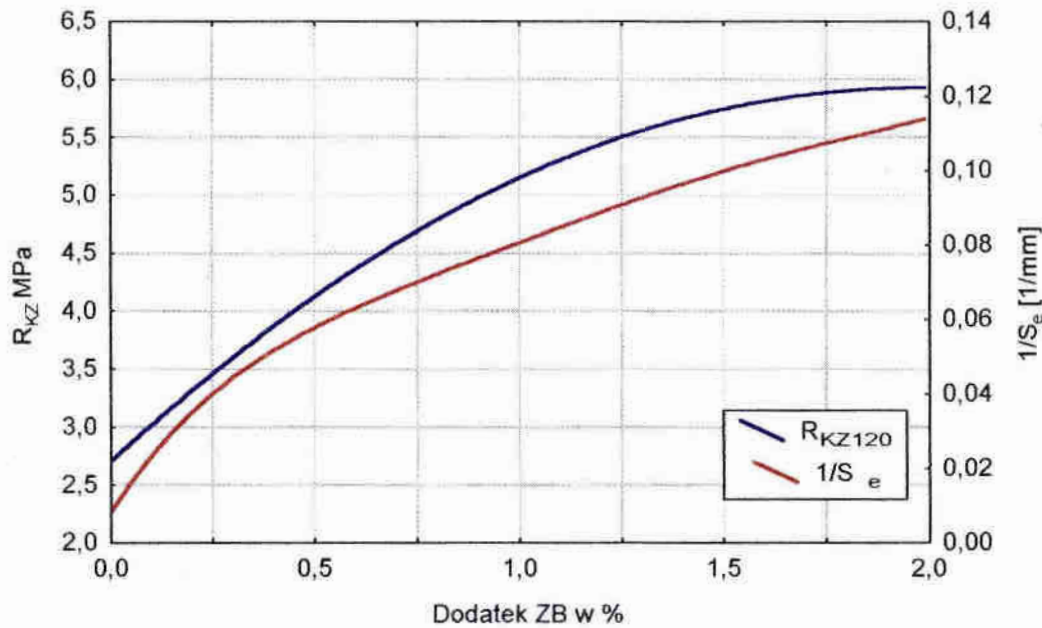
$$S_e = 87,4 \sqrt{\frac{d}{V_f I}} \quad (7.25.)$$

Na rys. 7.7. przedstawiono przebieg  $S_e$  w zależności od dodatku włókien stalowych dla badanych przez autora kompozytów.



Rys. 7.7.  $S_e$  (effective spacing) w mm w zależności od dodatku ZB dla badanych mieszanek fibropiaskobetonowych.

Jak wiemy z literatury i opisanych w niniejszej pracy badań, włókna stalowe ze wszystkich cech kompozytów betonowych najbardziej wpływają na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu. Na rys. 7.8. zestawiono przebieg  $R_{KZ120}$  i zależność  $I/S_e$ . Jak widzimy obie krzywe mają bardzo podobny kształt. Można stwierdzić, że po wyskalowaniu zależność  $I/S_e$  dla konkretnej matrycy piaskobetonowej bardzo dobrze odzwierciedla wytrzymałość  $R_{KZ}$ .



Rys.7.8. Teoretyczny parametr  $\frac{1}{S_e}$  i rzeczywista wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu fibropiaskobetonów.

Możemy zatem zapisać:

$$R_{KZ} = k_1 \cdot \frac{1}{S_e}, \quad (7.26.)$$

gdzie  $k_1$  - współczynnik skalujący. Dla rozpatrywanych kompozytów piaskobetonowych możemy łatwo obliczyć, że wynosi on około 524 (patrz rys.7.8.).

Czyli po podstawieniu  $k_1$  i równania (7.25.) otrzymamy:

$$R_{KZ} = 524 \cdot \left( \frac{1}{87 \cdot \sqrt{V_f \cdot l}} \right). \quad (7.27.)$$

W badanych zarobach stosowano tylko jeden rodzaj włókien. Mamy więc do czynienia ze stałą smukłością  $d/l = 1/50$ . Po podstawieniach do równania (7.27.) otrzymamy:



$$R_{KZ} = 42,35 \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{V_f}}} \quad (7.28.)$$

Czyli:

$$R_{KZ} = k_2 \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{V_f}}}, \quad (7.29.)$$

gdzie  $k_2$  - współczynnik skalujący w MPa.

Wyrażenie (7.29) można przedstawić również w postaci:

$$R_{KZ} = k_3 \cdot R_{KZO} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{V_f}}}, \quad (7.30.)$$

gdzie:

$R_{KZO}$  - wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu matrycy piaskobetonow,

$k_3$  -bezwymiarowy współczynnik skalujący.

Dla badanych kompozytów  $k_3 = 15,8$ .

Przedstawione w niniejszym rozdziale teoretyczne rozważania na temat modelu kształtowania struktury kompozytu fibropiaskobetonowego pozwalają stwierdzić, że geometryczny model oparty na elementach geometrii fraktalnej uwzględniający wpływ kruszywa, spoiwa, mikrokrzemionki i plastyfikatora dobrze opisuje rzeczywiste parametry badanych kompozytów fibropiaskobetonowych. Uzupełnienie tego modelu o zaproponowane przez autora równania uwzględniające wpływ dodatku włókien stalowych pozwoli na stworzenie w najbliższej przyszłości kompletnego matematycznego modelu kształtowania struktury kompozytów fibropiaskobetonowych.

## 8. Wnioski.

W oparciu o przeprowadzone badania, analizę otrzymanych wyników, rozważania teoretyczne oraz studia literaturowe można sformułować następujące wnioski:

1. Stosowanie dodatku mikrokrzemionki i zbrojenia rozproszonego do piaskobetonów jest uzasadnione i pozwala na uzyskanie kompozytów o zwiększonej wytrzymałości na ściskanie, bardzo dużej wodoszczelności oraz małej nasiąkliwości.
2. Podstawowym problemem w technologii piaskobetonów modyfikowanych zbrojeniem rozproszonym i mikrokrzemionką jest urabialność, która pozostaje w luźnej korelacji z konsystencją.
3. Na podstawie otrzymanych wyników za najbardziej optymalne zaroby można uznać betony o zawartości od 15 do 20% MK i od 1 do 1,5% ZB.
4. Krajowe surowce i dodatki pozwalają na produkcję pełnowartościowych piaskobetonów do konstrukcji budowlanych.
5. Włókna stalowe zdecydowanie poprawiają wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu badanych betonów oraz zmniejszają ugięcie i odkształcenia liniowe.
6. Mikrokrzemionka pomimo 120 dni dojrzewania nie poprawia wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, oraz nie zmniejsza odkształceń przy obciążeniu osiowym.
7. Możliwe jest uzyskanie kompozytów na bazie piasku odpadowego o bardzo wysokich wybranych parametrach.
8. Plan centralny kompozycyjny bardzo dobrze nadaje się do planowania oraz interpretacji wyników badań piaskobetonów modyfikowanych włóknami stalowymi i mikrokrzemionką.

9. Zdefiniowane przez autora współczynniki  $W_H$  i  $W_{ES}$  pozwalają na szybką i dokładną analizę parametrów wodoszczelnościowych i wytrzymałościowych kompozytów fibropiaskobetonowych.
10. Model kształtowania struktury kompozytów betonowych uwzględniający elementy geometrii fraktalnej dokładnie odzwierciedla wpływ kruszywa, spoiwa, mikrokrzemionki i plastyfikatora na właściwości kompozytu.
11. Dla dokładnego matematycznego opisu kompozytów fibropiaskobetonowych model kształtowania struktury kompozytów betonowych zbudowany na podstawie elementów geometrii fraktalnej należy uzupełnić o zaproponowane przez autora równania uwzględniające wpływ dodatku włókien stalowych.

## Bibliografia

### I Publikacje książkowe

- 1 Bleszczik N.P., „*Strukturalno-mechanicheskiye svoystwa i reologija betonnoj smiesi i pressvakuumbetona.*” Nauka i technika, Minsk, 1974.
- 2 Brandt A., „*Badania doświadczalne w mechanice zniszczenia kompozytów o matrycach cementowych*”, Prace IPPT, Warszawa 1979
- 3 Brandt A., Czarnecki L., Kajfasz S., Kasperkiewicz J., „*Podstawy stosowania kompozytów betonowych*”, COIB, Warszawa 1983
- 4 Brandt A., Babut R., Kasperkiewicz J., Marks M., „*Wybrane zagadnienia z mechaniki kompozytów*”, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej 1983
- 5 Brandt A., Kasperkiewicz J., Glinicki M., Marks M., „*Comparison of two types of steel fibers for SFRC*”, Institute of Fundamental Technological Reserch Polish Academy of Sciences Centre for Mechanics, Dept. of Strain Fields, Warsaw 1995
- 6 Brandt A., Kasperkiewicz J., Glinicki M., „*Podstawy stosowania fibrobetonów z włóknami stalowymi*”, PAN Warszawa 1996
- 7 Burakiewicz A., „*Przyczepność włókien do matrycy w kompozytach fibrobetonowych*”, Prace IPPT, Warszawa 1979
- 8 Czarnecki L., Broniewski T., Hennig O., „*Chemia w budownictwie*”, Arkady, Warszawa 1995
- 9 Groth P., „*Steel Fibre Reinforced Concrete - Tests and Evaluations*”, Lulea University of technology, Sweden, 1996
- 10 Groth P., „*Toughness Characteristics of Steel Fibre Reinforced Concrete with Energetically Modified Cement*”, Lulea University of technology, Sweden, 1996
- 11 Jamróży Z., „*Drutobeton*”, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1985
- 12 Kasperkiewicz J., „*Wytrzymałość i odkształcalność fibrobetonu przy rozciąganiu osiowym*”, Prace IPPT, Warszawa 1979
- 13 Kasperkiewicz J., „*Struktura wewnętrzna a procesy pękania w kompozytach z kruchą matrycą*”, Prace IPPT, Warszawa 1983
- 14 Kłedyński Z., „*Integracja i współzależność wybranych kryteriów oceny wodoszczelności betonu*”, Wydawnictwo politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993
- 15 Klucz T., Eymann W., „*Projektowanie betonów*”, Arkady 1969
- 16 Kopyciński B., Florek A., Z. Jamróży., „*Beton zwykły*” Arkady 1978
- 17 Kurdowski W., „*Chemia cementu*”, PWN 1991
- 18 Lewicki B., Wyszynski D., „*Podstawy stosowania piaskobetonu w prefabrykatach betonowych i żelbetonowych produkowanych konwencjonalnie*”, COBPBO, Warszawa 1980
- 19 Marcinkowski S., Macieik L., „*Zbadanie możliwości i opracowanie technologii wykonania betonów piaskowych z dodatkiem kruszyw odsianych w procesie hydroklastyfikacji*”, WSInż Koszalin 1978

- 20 Marcinkowski S., Macieik L., „Wpływ reżimu obróbki cieplnej i dodatku popiołów lotnych na jakość betonów piaskowych”, WSInż Koszalin 1981
- 21 Mattak B., „Kryteria oceny wodoszczelności betonów hydrotechnicznych”, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1984
- 22 Mitzel A., „Reologia betonu”, Arkady, Warszawa 1972
- 23 Petrażycki B., „Betony drobnokruszynowe”, Centralny Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Przemysłu Kruszyw Budowlanych, Warszawa 1979
- 24 Piasta J., Piasta W., „Beton zwykły”, Arkady, Warszawa 1994
- 25 Praca zbiorowa, „Budownictwo betonowe”, Arkady 1972
- 26 Praca zbiorowa, „Poradnik laboranta budowlanego”, Arkady 1967
- 27 Praca zbiorowa, „Beton Piaskowy - rozpoznanie bazy kruszyw piaskowych regionu koszalińskiego”, BPBBO „Miastoprojekt” Koszalin 1979
- 28 Praca zbiorowa, „Mechanika kompozytów betonopodobnych”, Zakład Narodowy Imienia Ossolińskich, Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk 1983
- 29 Praca zbiorowa, „Nowe cementy”, Arkady, Warszawa 1984
- 30 Praca zbiorowa, „Materiały budowlane. Współczesne kierunki badawcze i rozwojowe”, Politechnika Krakowska, Kraków 1990
- 31 Radomski W., „Właściwości fibrobetonu pod obciążeniami uderzeniowymi”, Prace IPPT, Warszawa 1979
- 32 Ratlinow W., Rozenberg T., „Dodatki do betonu”, Arkady, Warszawa 1977
- 33 Schnutgen B., „Berich uber die Prufung von Biegezugbalken aus Stahlfaserbeton”, Ruhr- Universitat Bochum
- 34 Smirnow N.W., Dunin-Barkowski I.W., „Krótki kurs statystyki matematycznej dla zastosowań technicznych”, PWN, Warszawa 1966.
- 35 Światoński A., „Kształtowanie struktury i wytrzymałości betonu”, WSInż w Opolu, Studia i Monografie z.68, 1993
- 36 Szymański E., Kolakowski J., „Materiały budowlane z technologią betonu”, PWN 1980
- 37 Zajac B., „Wpływ parametrów wibrowania na podstawowe cechy piaskobetonu”, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań-Bydgoszcz 1984

## II Artykuły i referaty

- 38 Akihama S., Kobayashi M., „Effect of CFRC specimen geometry on flexural behaviour”, RILEM Symposium FRC, 1986
- 39 Babut R., Kasperkiewicz J., „Wytrzymałość fibrobetonu z włóknem stalowym na rozciąganie przy zginaniu”, Seminarium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej „Aktualne problemy Drutobetonu w Polsce”, 1978
- 40 Bailey J.H., Bentley S., Mayfield B., Pell P.S., „Impact testing of fibre-reinforced concrete stair treads”, Magazine of Concrete Research: Vol. 27, No. 92: September 1975
- 41 Bandurska E., Koper W., „Ocena wartości współczynnika sprężystości  $E_b$  betonów piaskowych w funkcji wytrzymałości na ściskanie”, Materiały Budowlane 6/1982

- 42 Bares R., „*Strength and behaviour of composite materials in failure*”, *Archiwum Inżynierii Lądowej* - Tom XXXIV Z. 3/1988
- 43 Berszakiewicz B., „*Właściwości betonu modyfikowanego mikrokrzemionką dla rekonstrukcji płyty mostowej*”, XI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 1994
- 44 Bielawski J., Bandurska E., Koper W., „*Współczynnik sprężystości betonów piaskowych*”, *Przegląd Budowlany* 2/1984
- 45 Błociszewska G., Kowalski R., Lewandowska S., „*Piaskobeton - tworzywo do wykonywania elementów konstrukcyjnych*”, *Materiały Budowlane* 2/84
- 46 Błociszewska G., Kowalski R., Lewandowska S., „*Piaskobeton - nowe tworzywo do wykonywania konstrukcyjnych elementów w zakładach prefabrykacji*”, II Sympozjum SIT Przemysłu Materiałów Budowlanych, Warszawa 1984
- 47 Bochenek A., Prokopski G., „*Wpływ wielkości ziarn kruszywa na proces niszczenia betonów*”, *Materiały Budowlane* 02/87
- 48 Bochenek A., Prokopski G., „*Badania wpływu wielkości ziarn kruszywa na odporność betonu zwykłego na pękanie*”, *Archiwum Inżynierii Lądowej* - Tom XXXIII Z. 3/1987
- 49 Boltryk M., Malaszkiewicz D., „*Technology and properties of high performance concrete based on waste silica*”, *The eleventh international conference on solid waste technology and management*, Philadelphia PA USA, November 12-15, 1995
- 50 Bonzel J., Schmidt M., „*Distribution and orientation of steel fibers in concrete and their influence on the characteristics of steel fibre concrete*”, *Rilem Symposium FRC 1986*, Volume 1
- 51 Brandt A., „*O składowych energii zniszczenia w zginanych elementach fibrobetonowych (SFRC)*”, *Archiwum Inżynierii Lądowej* - Tom XXVIII Z. 3-4/1982
- 52 Brandt A., „*Uwagi o przyczepności matrycy cementowej do włókien stalowych w fibrobetonach*”, *Archiwum Inżynierii Lądowej* - Tom XXX Z. 2-3/1984
- 53 Brandt A., Marks M., „*Optymalizacja składu i struktury kompozytów betonowych*”, XXXVIII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1992
- 54 Brandt A., Karwacki J., „*Beton kompozytowy z włóknami stalowymi - nowy materiał na nawierzchnie lotniskowe*”, *Materiały Budowlane* 08/95
- 55 Brandt A., Karwacki J., „*Dotychczasowe zastosowanie SFRC do nawierzchni lotniskowych*”, *Materiały Budowlane* 09/95
- 56 Burakiewicz A., „*Rozkład przyczepności matrycy do włókna w kompozytach o matrycy kruchej*”, *Seminarium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej „Aktualne problemy Drutobetonu w Polsce”*, 1978
- 57 Chern J., Young Ch., „*Compressive creep and shrinkage of steel fiber reinforced concrete*”, *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Volume 11, Number 4, 1989
- 58 Czkwianianc A., Nowakowski A. B., „*Zależność  $\sigma$ - $\epsilon$  betonu zwykłego i piaskowego w świetle badań eksperymentalnych*”, *Archiwum Inżynierii Lądowej* Tom XXXVI Z. 1-2/1990
- 59 Desayi P., Rao B., „*Probabilistic analysis of tensile strength of ferrocement*”, *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Volume 10, 1988

- 60 Dondelewski H., Macieik L., „Mikrokrzemionka jako aktywny składnik betonu mikrokruszywowego”. Cement Wapno Gips 6/95
- 61 Dondelewski H., Macieik L., „Efekty zastosowania mikrokrzemionki w betonie przy założonej stałej objętości zaprawy”. XV Konferencja Naukowo-Techniczna Przemysłu Betonów „Jadwisin'95”
- 62 Dondelewski H., „Nasiąkliwość i przesiąkliwość betonów drobnokruszywowych średnich wytrzymałości”. Cement Wapno Beton 1/98
- 63 Dmochowska J., „Nasiąkliwość zwykła betonów piaskowych w zależności od technologii zagęszczenia”. Konferencja Naukowo-Techniczna SIT Przemysłu Materiałów Budowlanych, Szczecin 1972
- 64 Fabiszewicz T., „Dodatki chemiczne poprawiające jakość betonu”. Materiały Budowlane 3/96
- 65 Flaga K., Piwowarczyk K., „Wysoodporność heleczek żelbetonowych zbrojonych dodatkowo włóknami stalowymi”. XLI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB. Kraków - Krynica 1995
- 66 Flaga K., „Dobór uziarnienia kruszywa do betonów zwykłych metodą przepelniania jam piasku i jam kruszywa zaczynem cementowym”. Cement Wapno Beton 4/97
- 67 Gantner E., Osiecka E., „Zastosowanie odpadowej mikrokrzemionki pofiltracyjnej do wytwarzania materiałów budowlanych”. Cement Wapno Gips 4/85
- 68 Giergiczyński Z., „Cementy popiołowe z dodatkiem pyłu krzemionkowego”. Cement Wapno Gips 1/95
- 69 Glinicki A., Radomski W., „Badania postaci płyt fibrobetonowych obciążonych uderzeniami”. Archiwum Inżynierii Lądowej - Tom XXXII Z. 3/1986
- 70 Glinicki M., Marks W., „Optymalizacja wielokryterialna hybrydowego uzbrojenia włóknistego materiału kompozytowego”. XXXVIII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB. Krynica 1992
- 71 Glinicki M., Kasperkiewicz J., Potrzebowski J., „Betony wysokowartościowe (BWW) do konstrukcji inżynierskich”. XLI Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB. Krynica 1995
- 72 Grabiec A., „Wpływ upłynniaczy NB-2 i SK-1 na niektóre własności betonu drobnoziarnistego”. Cement Wapno Gips 11/86
- 73 Grabiec A., „Wpływ upłynniaczy NB-2 i SK-1 na strukturę i skład fazowy betonu drobnoziarnistego”. Cement Wapno Gips 1/87
- 74 Grabiec A., „O domieszkach i dodatkach do betonu stosowanych w Austrii”. Inżynieria i Budownictwo 6/94
- 75 Gradowski J., „Użytkowanie wodoszczelności betonu”. Materiały Budowlane 5/95
- 76 Gopalaratnam V.S., Shah S.P., „Micromechanical model for the tensile fracture of steel fibre reinforced concrete”. Rilem Symposium FRC 1986. Volume 1
- 77 Gustaw K., Włodarczyk A., Brylicki W., Iwanicki J., „Zastosowanie odpadowej krzemionki z produkcji tlenku glinu do wytwarzania materiałów budowlanych”. Cement Wapno Gips 7/82
- 78 Gustaw K., Malolepszy J., „Lekkie materiały budowlane z odpadowego pyłu krzemionkowego”. Cement Wapno Gips 4/83
- 79 Hebda L., Piasta Z., Piasta J., „Dobranie składu betonu z wykorzystaniem eksperymentu z mieszaniną”. Cement Wapno Gips 4/1989
- 80 Hughes B.P., Fattuhi N.I., „The workability of steel-fibre-reinforced concrete”. Magazine of Concrete Research: Vol. 28. No. 96: September 1976

- 81 Huges B.P., Fattuhi N.I., „*Load-deflection curves for fibre-reinforced concrete beams in flexure*”, Magazine of Concrete Research: Vol. 29, No. 101: December 1977
- 82 Jamróży Z., Śliwiński J., „*Struktura drutobetonu wirowanego*”, XXII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB - Krynica 1976
- 83 Jamróży Z., Śliwiński M., „*Własności techniczne betonu zbrojonego ciętym drutem stalowym*”, XVI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii PAN i Komitetu Nauki, PZITB - Krynica 1970
- 84 Jamróży Z., Podgórný Z., Śliwiński M., „*Drutobeton zagęszczony przez próżnio-prasowanie*”, Seminarium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej „Aktualne problemy Drutobetonu w Polsce”, 1978
- 85 Jamróży Z., Sasiadek S., „*Próba podwyższenia cech wytrzymałościowych betonów z odpadowych kruszyw węglanowych przy pomocy dodatku ciętego drutu stalowego*”, Seminarium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej „Aktualne problemy Drutobetonu w Polsce”, 1978
- 86 Jamróży Z., Śliwiński J., „*Technologia i właściwości drutobetonu wirowanego*”, Seminarium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej „Aktualne problemy Drutobetonu w Polsce”, 1978
- 87 Jamróży Z., Szuro Ł., „*Wpływ dodatku włókien stalowych na nośność strefy przypodporowej elementów zginanych*”, Seminarium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej „Aktualne problemy Drutobetonu w Polsce”, 1978
- 88 Jamróży Z., Szaraniec H., „*Zachowanie się w środowiskach agresywnych drutobetonu wykonanego z włókien stalowych sztucznie powierzchniowo korodowanych*”, Seminarium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej „Aktualne problemy Drutobetonu w Polsce”, 1978
- 89 Jamróży Z., Sasiadek S., „*Możliwości wykorzystania do piaskobetonów odpadów kruszywa węglanowego*”, Materiały Budowlane 11-12/1982
- 90 Jamróży Z., „*Drutobeton*”, Materiały Budowlane 09/83
- 91 Jamróży Z., „*Szczególne zagadnienie korozji drutobetonu*”, Warstwy 3/96
- 92 Jamróży Z., „*Z doświadczeń stosowania pyłu krzemionkowego do betonu*”, Cement Wapno Beton 4/97
- 93 Jamróży Z., „*Wpływ dodatku opiłków stalowych na właściwości drutobetonu*”, Warstwy 3/97
- 94 Jeleński A., „*Niektóre wyniki badań nad możliwością zastosowania w budownictwie podziemnym kopalń obudowy zamkniętej z drutobetonu*”, Seminarium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej „Aktualne problemy Drutobetonu w Polsce”, 1978
- 95 Kajfasz S., „*Uwagi o stosowaniu betonu piaskowego za granicą*”, Materiały Budowlane 10/1982
- 96 Karwacki J., „*Betony zbrojone włóknami stalowymi i włóknami syntetycznymi*”, Inżynieria i Budownictwo 02/95
- 97 Karwacki J., „*Beton zbrojony włóknem stalowym stosowany w budownictwie podziemnym*”, Materiały Budowlane 05/95
- 98 Karwacki J., „*Nawierzchnie SFRC*”, Materiały Budowlane 09/95
- 99 Karwacki J., „*Beton zbrojony włóknem stalowym*”, Bautech, Warszawa 1996
- 100 Karwacki J., „*Dodatki i domieszki do betonów stosowanych w budowie posadzek przemysłowych*”, Materiały Budowlane 08/96
- 101 Karwacki J., „*Współczesne kompozytowe betony natryskowe*”, broszura, 1997



- 102 Karwacki J., „Betonowe nawierzchnie przemysłowe nowej generacji”, *Przegląd Budowlany* 01/97
- 103 Katzer J., „Szczelny beton z dodatkiem mikrokrzemionki modyfikowany superplastyfikatorem”, *Materiały Budowlane* 11/96
- 104 Katzer J., „Badania sklerometryczne szczelnych betonów mikrokrzemionkowych”, *Warstwy* 1/97
- 105 Katzer J., „Przyrost szczelności w czasie betonów mikrokrzemionkowych modyfikowanych superplastyfikatorem”, *Przegląd Budowlany* 5/97
- 106 Katzer J., „Krajowe włókna stalowe uszlachetniające beton”, *Warstwy* 4/97
- 107 Katzer J., „Mikrokrzemionka - cenne uzupełnienie betonów specjalnych”, *Warstwy* 2/98
- 108 Katzer J., „Piasek odpadowy - niedoceniony surowiec Pomorza Środkowego”, *Warstwy* 2/98
- 109 Katzer J., Piątek Z., „Mikrokrzemionka i włókna stalowe jako czynniki kształtujące strukturę kompozytu piaskobetonowego”, *Cement Wapno Beton* 2/99
- 110 Kempa Cz., Matlak B., „Metody badań i kryteria oceny wodoszczelności betonów hydrotechnicznych”, *Gospodarka Wodna* 9/88
- 111 Keyvani A., Saeki N., Shimura K., „Applying waste steel shavings in concrete”, *The eleventh international conference on solid waste technology and management*, Philadelphia PA USA, November 12-15, 1995
- 112 Kępiński J., „Skutki techniczno-ekonomiczne stosowania betonu piaskowego w prefabrykacji”, *Materiały Budowlane* 2/1983
- 113 Kicłczyk B., „Domy z fibrobetonu”, *Materiały Budowlane* 10/97
- 114 Kłedyński Z., „Współzależność kryteriów oceny wodoszczelności betonu w ujęciu probabilistycznym”, *Inżynieria i Budownictwo* 5/92
- 115 Kłedyński Z., „Badania wodoszczelności betonu w świetle teorii nasycania ciał kapilarno-porowatych”, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej* 12/92
- 116 Kłedyński Z., „O interpretacji wyników normowych badań wodoszczelności i mrozoodporności betonu”, *Inżynieria i Budownictwo* 12/93
- 117 Kobaka J., Rajewski M., „Wnioski i doświadczenia z przemysłowej produkcji piaskobetonów”, *Materiały Budowlane* 9/82
- 118 Kondratowicz W., „Wpływ uziarnienia kruszywa i dodatku plastyfikatora na właściwości piaskobetonu”, *Cement Wapno Gips* 6/90
- 119 Kothari N.C., Bonel E.A., „Strength Properties of Concrete Reinforced with Epoxy-Coated Fibres”, *ACI Journal*, October 1978
- 120 Kratky J., Trtík K., Vodicka J., „The applications of steel fibreconcrete in Czech Republic”, *XV Konferencja Naukowo-Techniczna Przemysłu Betonów „Jadwisin '95” pt. Beton i Prefabrykacja*
- 121 Kucharska L., „Kontrola właściwości reologicznych układu cement-pył krzemionkowy”, *Przegląd Budowlany* 8-9/94
- 122 Kucharska L., „Kompozyty cementowe zbrojone włóknem węglowym bez i z dodatkiem pyłu krzemionkowego”, *XLI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB*, Krynica 1995
- 123 Kukier Z., „Technologia zagęszczania betonu piaskowego za pomocą wibratora”, *Konferencja Naukowo-Techniczna SIT Przemysłu Materiałów Budowlanych*, Szczecin 1972

- 124 Kurzawa J.: *„Technologia produkcji elementów prefabrykowanych z betonu piaskowego dojrzewających w warunkach adiabatycznych”*, Konferencja Naukowo-Techniczna SIT Przemysłu Materiałów Budowlanych, Szczecin 1972
- 125 Kuzmickowa W.T.: *„Cementy specjalne i cementy z dodatkami”*, Cement Wapno Gips 10/89
- 126 Lankard D.R.: *„Fiber concrete applications”*, Rilem Symposium 1975: The Construction Press LTD
- 127 Lenkiewicz W., Pidck W.: *„Wytrzymałość betonu na ściskanie w elementach debiutujących”*, XVI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii PAN i Komitetu Nauki PZITB - Krynica 1970
- 128 Liqqi G., Guofan Z.: *„A study of the mechanism of fibre reinforcement in short steel fibrous concrete”*, Rilem Symposium FRC, Volume 2. 1986
- 129 Macieik L., Dondelowski H., Plate P.: *„Badania betonów wykonanych z kruszyw o wysokim punkcie piaskowym”*, Prace Instytutu Budownictwa Lądowego, WSInż w Koszalinie 1978
- 130 Macieik L., Dondelowski H.: *„Kruszywa Pomorza Środkowego”*, Materiały Budowlane 9/80
- 131 Maciek L., Dondelowski H.: *„Konsekwencje zastosowania betonu drobnokruszywowego w niektórych konstrukcjach prefabrykowanych”*, Prace Instytutu Budownictwa Lądowego, WSInż w Koszalinie 1981
- 132 Macieik L., Katzer J.: *„Mikrokrzemionka jako dodatek do szczelnych betonów”*, Materiały Budowlane 11/95
- 133 Macieik L., Katzer J.: *„Beton wodoszczelny z dodatkiem mikrokrzemionki”*, Warstwy 2/96
- 134 Maciejewska W.: *„Optymalny skład plastodrutobetonu w świetle badań doświadczalnych”*, Seminarium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej *„Aktualne problemy Drutobetonu w Polsce”*, 1978
- 135 Małecki B., Wider K.: *„Nowy cement SG-45”*, Materiały Budowlane 10/92
- 136 Marcinkowski S., Dondelowski H.: *„Badania sprężystości, skurczu i pelzania betonów drobnokruszywowych”*, Archiwum Inżynierii Lądowej - Tom XXVI Z. 4/1980
- 137 Marcinkowski S., Dondelowski H.: *„Betony piaskowe z kruszyw Pomorza Środkowego”*, Materiały Budowlane 02/84
- 138 Marcinkowski S., Macieik L., Dondelowski H.: *„Przyczynek do badań cech reologicznych piaskobetonów”*, II Sympozjum SIT Przemysłu Materiałów Budowlanych, Warszawa 1984
- 139 Mateja J., Duszyński S.: *„Beton natryskowy z mikrokrzemionką”*, Materiały Budowlane 6/92
- 140 Matyszewski T., Bania A., Mickiewicz D.: *„Właściwości betonów piaskowych z dodatkiem mikrosfer”*, Cement Wapno Gips 3/86
- 141 Matyszewski T., Mickiewicz D.: *„Modyfikowane popioły lotne w betonach piaskowych”*, Materiały Budowlane 10/92
- 142 Mąkosa J.: *„Nowa technologia wykorzystania betonów na bazie mikrokrzemionki”*, Materiały Budowlane 1/92
- 143 Mickiewicz D., Rodzoch M., Rucińska T.: *„Piaskobeton z kruszywem drobnym z miejscowości Nawodna”*, Materiały Budowlane 7/93
- 144 Muszyński W.: *„Ustalanie składu betonu piaskowego”*, Materiały Budowlane 11-12/1982
- 145 Osiecka E., Olechowska A.: *„Odpadowa krzemionka pofiltracyjna jako surowiec do produkcji materiałów budowlanych”*, Cement Wapno Gips 11-12/81

- 146 Otter D., Naaman A.E., „*Steel fibre reinforced concrete under static and cyclic compressive loading*”. Rilem Symposium FRC 1986. Volume 1
- 147 Pachla H., Piechnik S., „*Uogólnione kryteria kruchego zniszczenia*”, Seminarium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej „Aktualne problemy Drutobetonu w Polsce”, 1978
- 148 Petri M., Spisak W., Idzik J., „*Ograniczenie spękań w konstrukcjach betonowych*”, Materiały Budowlane 04/96
- 149 Petri M., „*Włókna do mikrozbrojenia betonu*”, Materiały Budowlane 2/98
- 150 Peukert S., „*Teoretyczne i praktyczne podstawy kształtowania wysokich wytrzymałości cementów*”, Cement Wapno Gips 1/95
- 151 Piątek Z., Katzer J., „*Rozpoznanie możliwości wykonania piaskobetonów specjalnych na bazie piasku odpadowego, mikrokrzemionki i zbrojenia rozproszonego*”, XVI Konferencja Naukowo-Techniczna Jadwisin'98
- 152 Piątek Z., Katzer J., „*Piaskobeton na bazie piasku odpadowego z odsiewek modyfikowane włóknami stalowymi i mikrokrzemionką*”, Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska, nr 13, Politechnika Koszalińska, Koszalin 1998
- 153 Piątek Z., Katzer J., „*Wodoszczelność piaskobetonów modyfikowanych mikrokrzemionką i zbrojeniem rozproszonym*”, II Konferencja Naukowo-Techniczna MATBUD'98, Kraków-Mogilany 1998
- 154 Piątek Z., Katzer J., „*Urabialność i konsystencja piaskobetonów modyfikowanych zbrojeniem rozproszonym i mikrokrzemionką*”, Przegląd Budowlany 6/98
- 155 Pichór W., Dyczek J., „*Granica kontaktowa między włóknami PVA a stwardniałym zaczynem cementowym*”, XLIII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 1997
- 156 Piasta Z., Rusin Z., Piasta J., „*Przykłady wykorzystania planów drugiego rzędu w badaniach doświadczalnych z zakresu technologii betonu*”, Archiwum Inżynierii Lądowej - Tom XXXII Z. 2/1986
- 157 Piechnik S., „*Analiza propagacji uszkodzeń i zniszczenia materiału w jednoosiowym stanie naprężeń*”, Seminarium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej „Aktualne problemy Drutobetonu w Polsce”, 1978
- 158 Pietras Z., Bieganeck S., „*Krajowe uwarunkowania stosowania mikrokrzemionki odpadowej do betonów*”, Materiały Budowlane 4,5/93
- 159 Pietras Z., „*Przesłanki technologiczno-strukturalne wytwarzania betonów wysokiej wytrzymałości z zastosowaniem pyłów krzemionkowych i superplastyfikatorów*”, Inżynieria i Budownictwo 9/93
- 160 Pietras Z., Bieganeck S., „*Własności betonu zwykłego z pucolanowymi dodatkami mineralnymi*”, XL Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 1994
- 161 Potrzebowski J., „*Wpływ mikrokrzemionki i włókien na skurcz fibrobetonu do napraw konstrukcji*”, Materiały Konferencyjne -Krynica 1994
- 162 Racinowski R., „*Charakterystyka mineralno-petrograficzna naturalnego kruszywa pochodzenia lodowcowego i wodnolodowcowego*”, Konferencja Naukowo-Techniczna SIT Przemysłu Materiałów Budowlanych, Szczecin 1972
- 163 Radomski W., „*Przegląd badań kompozytów fibrobetonowych pod obciążeniami uderzeniowymi*”, Seminarium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej „Aktualne problemy Drutobetonu w Polsce”, 1978

- 164 Rajski O. „*Niektóre aspekty technologii betonów wysokowartościowych*”. Inżynieria i Budownictwo 6/96
- 165 Rędziniak J. „*Wytrzymałość na ściskanie betonu piaskowego na kruszywie hydroklasyfikowanym*”. Przegląd Budowlany 3-4/1982
- 166 Rędziniak J. „*Ilość wody zarobowej w betonach piaskowych*”. Materiały Budowlane 8/1983
- 167 Rędziniak J. „*Wytrzymałość betonów piaskowych na rozciąganie przez rozłupywanie*”. Przegląd Budowlany 4/1984
- 168 Roszak W. „*Pył krzemowy - dodatek do betonu*”. Materiały Budowlane 8/86
- 169 Sakai M., Nakamura N. „*Analysis of flexural behaviour of steel fiber reinforced concrete*”. Rilem Symposium FRC 1986. Volume 1
- 170 Sasiadek S. „*Wytrzymałość zmęczeniowa drutobetonu przy zginaniu*”. Seminarium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej „Aktualne problemy Drutobetonu w Polsce”. 1978
- 171 Sasiadek S., Maj R., Kańka S. „*Pył krzemionkowy z Huty 'Łaziska' jako dodatek do betonu*”. Cement Wapno Gips 11/91
- 172 Sikorski Cz. „*Dotychczasowe doświadczenia ze stosowaniem drutobetonu w budownictwie podziemnym kopalni*”. Seminarium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej „Aktualne problemy Drutobetonu w Polsce”. 1978
- 173 Skrzypek J. „*Beton piaskowy*”. Nauka i Badania część A nr 2/1978
- 174 Skrzypek J., Grodzicka A. „*Piaskobeton i jego właściwości*”. Materiały Budowlane 5/1982
- 175 Śliwiński J. „*Spostrzeżenia z badań nad efektywnością obróbki termicznej drutobetonu*”. Seminarium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej „Aktualne problemy Drutobetonu w Polsce”. 1978
- 176 Śliwiński J., Fiertak M. „*Współczynnik filtracji w badaniach betonów cementowych*”. Cement Wapno Gips 3/92
- 177 Śliwiński J., Witek K. „*Metody oceny parametrów charakteryzujących wodoszczelność betonu*”. Inżynieria i Budownictwo 10/94
- 178 Śliwiński J. „*Wpływ zawartości i składu zaprawy cementowej na wodoszczelność zwykłego betonu żwirowego*”. Cement Wapno Beton 4/97
- 179 Śliwiński M. „*Beton zbrojony włóknem stalowym jako tworzywo wielkowymiarowych elementów przestrzennych*”. Seminarium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej „Aktualne problemy Drutobetonu w Polsce”. 1978
- 180 Świtoński A. „*Analityczno-doświadczalny sposób doboru uziarnienia kruszywa w projektowaniu betonu*”. Inżynieria i Budownictwo 7/94
- 181 Świtoński A. „*Zarys modelu kształtowania struktury modyfikowanych betonów i materiałów kompozytowych*”. Międzynarodowa Konferencja „Inżynierskie Problemy Współczesnego Betonu i Żelazobetonu”. Mińska. Białoruś 1997
- 182 Walkus B., Januszkiewicz A. „*O efektywności warstwy zewnętrznej, z mikrobrojeniem dwukierunkowo uporządkowanym, w modyfikowaniu właściwości drutobetonu*”. Seminarium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej „Aktualne problemy Drutobetonu w Polsce”. 1978
- 183 Walkus B. „*Short and long term behaviour of ferrocement subjected to uniaxial tension*”. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Volume 10. 1988

- 184 Weiss H.J., Edgington J., „*On the workability of steel fibre mortar mix*”, *Archiwum Inżynierii Lądowej - Tom XXXIII Z. 1/1987*
- 185 Wiśniewski Z., „*Stan i perspektywy zastosowania piasków naturalnych do betonów zwykłych*”, *Konferencja Naukowo-Techniczna SIT Przemysłu Materiałów Budowlanych, Szczecin 1972*
- 186 Wolska-Kotańska Cz., „*Pyły krzemionkowe - wartościowy dodatek pucolanowy do betonu*”, *Materiały Budowlane 2/91*
- 187 Wolska-Kotańska Cz., „*Kształtowanie właściwości betonu pyłami krzemionkowymi*”, *Inżynieria i Budownictwo 9/93*
- 188 Wońska-Kotańska Cz., „*Kierunki wykorzystania pyłów krzemionkowych w budownictwie światowym*”, *Przeгляд Budowlany 2/95*
- 189 Zamorowski W., „*Wpływ wilgotności otoczenia na wysychanie, skurcz i wytrzymałość betonu piaskowego*”, *Cement Wapno Gips 11-12/89*
- 190 Zia P., Ahmed S., Leming M., „*High-Performance Concretes. A State-of-Art. Report (1989-1994)*”, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, FHWA-RD-97-030.

### III Normy, instrukcje i inne akty normatywne

- 191 Aprobata Techniczna ITB Nr K-2095/95, „*Stalowe włókna 50 \*1,0 mm do zbrojenia betonu*”
- 192 Aprobata Techniczna ITB Nr Z-2117/95, „*Włókna stalowe DRAMIX do zbrojenia betonu*”
- 193 ASTM A820-90, „*Standard Specification for Steel Fiber Reinforced Concrete*”
- 194 Atest Higieniczny PZH Nr B-1218/95, „*Włókna stalowe do wzmacniania betonu*”
- 195 Committee Report, „*Design Considerations for Steel Fibre Reinforced Concrete*”, *ACI Structural Journal*, 1988
- 196 Świadczenie dopuszczenia do stosowania w budownictwie ITB 466/83 „*Piaskobeton*”
- 197 PN-88/B-32250 „*Woda do betonów i zapraw*”
- 198 PN-88/B-06250 „*Beton zwykły*”

### IV Materiały dostępne w INTERECIE.

- 199 van Hauwaert A., Delannay F., Thimus F. F., „*Fracture behaviour of steel fiber reinforced concrete beams revealed by NDT*”, [http://www.gc.ucl.ac.be/geotech/resumes/liv\\_res.html](http://www.gc.ucl.ac.be/geotech/resumes/liv_res.html)
- 200 Howell M., „*The Strength of Concrete*”, <http://www.eng.fsu.edu/~mshowell/concrete.htm>
- 201 Krstulovic-Opara N., „*NC State Engineer Develops Super Strong Concrete System*”, <http://www.coc.ncsu.edu/news.releases/concrete.html>
- 202 Papworth F., „*Production of Silica Fume*”, [http://www.scancem.com.au/download/silica\\_fume.htm](http://www.scancem.com.au/download/silica_fume.htm)
- 203 Sobhan K., Krizek R. J., „*Fiber-reinforced recycled crushed concrete as a stabilized base course for highway pavements*”, <http://iti.acns.nwu.edu/projects/tuc.html>
- 204 Zespół, „*Fiber Reinforced Concrete Technology*”, <http://www.lock-load.com/fiber.htm>
- 205 Zespół, „*Fibercon FAQ Design*”, <http://www.fibercon.com.au/faq-design.htm>
- 206 Zespół, „*Benefits*”, <http://www.fibercon.com.au/benefits.htm>

- 207 Zespól. „*Introducing CSR Readymix Mikropoz Concrete*”. <http://www.buildata.com.au/csrmicro/intro.htm>
- 208 Zespól. „*Microsilica*”. <http://www.downtube.com/microsilica/>
- 209 Zespól. „*Time Line of Silica Fume Use in Concrete*”. <http://www.sfcement.com/timeline/timliner.htm>
- 210 Zespól. „*History of Bekaert*”. <http://www.bekaert.com/about/2hiofbe.htm>
- 211 Zespól. „*How Silica Fume Works...*”. <http://www.norchem.com/appl-works.html>
- 212 Zespól. „*Elkem Microsilica for superior concrete*”. <http://www.elkem.com>
- 213 Zespól. „*Novocon Steel Fiber*”. <http://www.novocon.com>

#### V Noty techniczne.

- 214 Arslan A. „*Mixed-mode fracture performance of fibre reinforced concrete under impact loading*”. *Materials and Structures* 28/1995
- 215 Banthia N., Azzabi M., Pigeon M. „*Restrained shrinkage cracking in fibre-reinforced cementitious composites*”. *Materials and Structures* 26/1993
- 216 Cook D.J. „*The thermal conductivity of fibre-reinforced concrete*”. *Cement and Concrete Research* vol.4, 1974
- 217 Ezeldin A.S., Shiah T.W. „*Analytical immediate and long-term deflections of fibre-reinforced concrete beams*”. *Journal of Structural Engineering* v.121
- 218 Halvorsen G., Kesler C. „*Moment-curvature relationships for concrete beams with plain and deformed steel fibres*”. *Journal of the American Concrete Institute* 6/1979
- 219 Johnston C.D., Skarendahl A. „*Comparative flexural performance evaluation of steel fibre-reinforced concretes according to ASTM C 1018 shows importance of fibre parameters*”. *Materials and Structures* 25/192
- 220 Kronlof A. „*Effect of very fine aggregate on concrete strength*”. *Materials and Structures* 27/1994
- 221 Larrard F., Gorse J., Puch C. „*Comparative study of various silica fumes as additives in high-performance cementitious materials*”. *Materials and Structures* 25/1992
- 222 Li V.C., Stang H., Krenchel H. „*Micromechanics of crack bridging in fibre-reinforced concrete*”. *Materials and Structures* 26/1993
- 223 Mangat P.S. „*Tensile strength of fibre reinforced concrete*”. *Cement and Concrete Research* vol.6, 1976
- 224 Mangat P.S., Manarakis G.S. „*Slipforming with fibre-reinforced concrete for efficient crack control*”. *Materials and Structures* 26/1993
- 225 Nurnbergerova T., Babal B. „*Long-term behaviour of plain and steel fibre reinforced concretes rings*”. *Materials and Structures* 25/1992
- 226 Patton M.E., Whittaker W.L. „*Effects of fibre content and damaging load on steel fibre reinforced concrete stiffness*”. *Journal of the American Concrete Institute* 1-2/1983
- 227 Ramakrishnan V., Brandshaug T., Coyle W.V., Schrader E.K. „*A comparative evaluation of concrete reinforced with straight steel fibres and fibres with deformed ends glued together into bundles*”. *Journal of the American Concrete Institute* 5-6/1980
- 228 Spires J.W., Romualdi J.P., Pichumani R. „*Analysis of steel-fiber reinforced concrete warehouse floor slabs*”. *Journal of the American Concrete Institute* 12/1977

- 229 Stang H., Li V.C., Krenchel H., *„Design and structural applications of stress-crack width relations in fibre reinforced concrete”*, Materials and Structures 28/1995
- 230 Swamy R.N., Mangat P.S., *„Influence of fibre geometry on the properties of steel fibre reinforced concrete”*, Cement and Concrete Research vol.4, 1974
- 231 Visalvanich K., Naaman A.E., *„Fracture model for fibre reinforced concrete”*, Journal of the American Concrete Institute 3-4/1983

### **Załącznik I**

#### **Zestawienie wyników badań świeżej mieszanki betonowej i stwardniałego kompozytu po 28 dniach dojrzewania.**

Przedstawione wyniki są wartościami średnimi wszystkich dokonanych pomiarów po odrzuceniu wyników obarczonych błędem grubym na podstawie kryterium Smirnowa-Grabssa. Wyniki zestawione w tabeli stanowiły podstawę do aproksymacji oraz dalszych obliczeń parametrów wyznaczanych pośrednio.



file: DR\_DANE.STA [ 30 cases with 20 variables ]

1 MK	2 ZB	3 KRUCH	4 SCISK	5 SCI100	6 WODO	7 NASIYK	8 POW	9 KONSY5
0,000	0,000	,128	19,900	1,000	260,000	5,510	3,700	7,000
0,000	,500	,143	22,100	1,111	165,000	4,960	4,100	7,000
0,000	1,000	,134	25,100	1,261	147,000	4,440	3,900	8,000
0,000	1,500	,141	25,900	1,302	111,000	3,730	2,600	8,000
0,000	2,000	,144	26,900	1,352	103,000	2,920	2,600	10,000
5,000	0,000	,094	20,400	1,025	74,000	2,100	2,400	7,000
5,000	,500	,106	23,500	1,181	104,000	1,580	3,000	7,000
5,000	1,000	,100	26,600	1,337	144,000	1,550	2,800	8,000
5,000	1,500	,104	28,900	1,452	99,000	1,500	2,700	8,000
5,000	2,000	,122	31,800	1,598	96,000	1,400	2,700	11,000
10,000	0,000	,101	20,800	1,045	63,000	1,940	2,650	7,000
10,000	,500	,090	26,100	1,312	102,000	1,500	2,800	8,000
10,000	1,000	,096	28,600	1,437	118,000	1,500	2,850	9,000
10,000	1,500	,104	31,400	1,578	76,000	1,160	2,950	11,000
10,000	2,000	,111	36,000	1,809	0,000	1,090	2,950	11,000
15,000	0,000	,106	22,300	1,121	55,000	1,630	2,650	7,000
15,000	,500	,088	31,800	1,598	51,000	1,420	2,800	8,500
15,000	1,000	,097	35,700	1,794	49,000	1,420	2,850	10,000
15,000	1,500	,112	36,000	1,809	45,000	1,130	2,950	11,000
15,000	2,000	,111	36,000	1,809	0,000	1,090	2,950	11,000
20,000	0,000	,102	22,300	1,121	47,000	1,590	2,650	7,000
20,000	,500	,072	31,800	1,598	30,000	1,370	2,800	8,000
20,000	1,000	,100	35,700	1,794	27,000	1,180	2,950	9,000
20,000	1,500	,111	36,000	1,809	0,000	1,090	2,950	11,000
20,000	2,000	,111	36,000	1,809	0,000	1,090	2,950	11,000
25,000	0,000	,098	23,900	1,201	39,000	1,520	2,950	6,000
25,000	,500	,074	33,300	1,673	25,000	1,210	2,950	8,000
25,000	1,000	,097	36,000	1,809	19,000	1,090	2,950	9,000
25,000	1,500	,111	36,000	1,809	0,000	1,090	2,950	11,000
25,000	2,000	,111	36,000	1,809	0,000	1,090	2,950	11,000

10 MASA_M	11 MASA_B	12 MB_MM	13 CIEZAR_M	14 ROZCIAG	15 DELTAR02	16 NAS_OBJ	17 JK	18 NAS_WODO
041,000	2195,000	1,075	2119,000	2,560	1,036	12,094	47,187	1,000
021,000	2226,000	1,049	2211,000	3,170	1,007	11,041	33,266	1,418
021,000	2259,000	1,065	2207,000	3,380	1,024	10,030	33,108	1,425
041,000	2258,000	1,054	2198,000	3,650	1,027	8,422	29,759	1,586
056,000	2258,000	1,047	2213,000	3,850	1,020	6,593	35,274	1,338
086,000	2191,000	1,050	2137,000	1,920	1,025	4,601	35,238	1,339
096,000	2210,000	1,050	2160,000	2,490	1,023	3,492	65,823	,717
116,000	2215,000	1,046	2177,000	2,660	1,017	3,433	92,903	,508
181,000	2250,000	1,031	2241,000	3,000	1,004	3,375	66,000	,715
196,000	2260,000	1,031	2256,000	3,900	1,002	3,164	68,571	,688
116,000	2166,000	1,023	2173,000	2,100	,997	4,202	32,474	1,453
121,000	2200,000	1,037	2182,000	2,360	1,008	3,300	68,000	,694
131,000	2225,000	1,044	2193,000	2,770	1,015	3,338	78,667	,600
181,000	2236,000	1,025	2247,000	3,270	,995	2,594	65,517	,720
196,000	2265,000	1,031	2262,000	4,000	1,001	2,469	0,000	
216,000	2158,000	1,015	2183,000	2,250	,989	3,518	33,742	1,398
216,000	2184,000	1,017	2207,000	2,470	,990	3,101	35,915	1,314
216,000	2213,000	1,024	2224,000	2,990	,995	3,142	34,507	1,367
216,000	2244,000	1,036	2232,000	3,680	1,005	2,536	39,823	1,185
219,000			2262,000	4,000			0,000	
216,000	2143,000	1,012	2173,000	2,280	,986	3,407	29,560	1,596
212,000	2174,000	1,025	2182,000	2,300	,996	2,978	21,898	2,155
214,000	2200,000	1,025	2211,000	3,580	,995	2,596	22,881	2,062

10 MASA_M	11 MASA_B	12 MB_MM	13 CIEZAR_M	14 ROZCIAG	15 DELTARO2	16 NAS_OBJ	17 JK	18 NAS_WODO
96,000			2262,000	4,000			0,000	
01,000	2095,000	,997	2165,000	4,000	,968	3,184	0,000	1,839
31,000	2148,000	1,008	2195,000	2,340	,979	2,599	25,658	2,284
66,000	2185,000	1,008	2232,000	2,480	,979	2,382	20,661	2,707
				3,500			17,431	
				4,000			0,000	
96,000			2262,000	4,000			0,000	

19 XI_DELT	20 WES
,930	,930
1,059	1,059
1,184	1,184
1,235	1,235
1,291	1,291
,976	,976
1,125	1,125
1,278	1,278
1,409	1,409
1,550	1,550
1,022	1,022
1,265	1,265
1,377	1,377
1,539	1,539
1,755	1,755
1,104	1,104
1,571	1,571
1,752	1,752
1,746	1,746
1,107	1,107
1,559	1,559
1,750	1,750
1,205	1,205
1,660	1,660
1,795	1,795

**Załącznik II**  
**Zestawienie wyników badań**  
**stwardniałego kompozytu po 120 dniach dojrzewania.**

Zestawienie obejmuje wyniki parametrów badanych bezpośrednio. Wyniki zestawione w tabeli stanowiły podstawę do dalszych obliczeń, w tym również odrzucenia wyników obarczonych błędem grubym na podstawie kryterium Smirnowa-Grabssa.

file: TAB4.STA [ 10 cases with 19 variables ]

1 MK	2 ZB	3 SILA280	4 SILA240	5 SILA200	6 SILA160	7 SILA120	8 SILA80	9 SILA40
5,000	,400	80,000	57,000	45,000	36,000	27,000	17,000	11,000
5,000	1,600	63,000	50,000	43,000	34,000	26,000	18,000	10,000
20,000	,400	78,000	61,000	48,000	35,000	25,000	18,000	10,000
20,000	1,600	66,000	54,000	41,000	32,000	23,000	13,000	7,000
0,000	1,000	88,000	67,000	53,000	42,000	30,000	19,000	10,000
25,000	1,000							
12,500	0,000	92,000	71,000	60,000	45,000	34,000	23,000	13,000
12,500	2,000	56,000	48,000	40,000	31,000	23,000	15,000	7,000
12,500	1,000	72,000	58,000	48,000	36,000	28,000	18,000	8,000
0,000	0,000							

10 240_S80	11 SCI120	12 ZGIN2F	13 ZGINMPA	14 WOD_SCI	15 SCI	16 UG_55KN	17 UG_95KN	18 RG
40,000	34,400	9,000	4,050	328,000	23,500	167,000	424,000	4,050
32,000	37,100	14,270	6,422	292,000	28,900	121,000	280,000	6,520
43,000	44,600	8,950	4,028	187,000	31,800	132,000	247,000	3,790
41,000	51,000	10,950	4,928	130,000	36,000	101,000	337,000	4,920
48,000	36,800	10,420	4,689	198,000	25,100	137,000	327,000	4,460
	45,800			168,000	36,000			
48,000	32,300	5,750	2,588	208,000	20,800	320,000		2,580
33,000	36,800	10,750	4,838	121,000	36,000	62,000	224,000	4,830
40,000	42,500	10,830	4,874	198,000	28,600	145,000	294,000	4,870
	22,400	6,880	3,096	361,000		150,000		2,947

19 SKURCZ
,970
1,202
1,340
1,132
1,292
1,150
1,253
1,654
1,446
1,300