

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
Politechniki Wrocławskiej

**Wpływ odpadowych włókien  
bazaltowych na właściwości  
mechaniczne fibrobetonu**

**Raport serii PRE nr 13 / 2022**  
**Praca doktorska**

Tomasz Kowalik

Słowa kluczowe:  
Fibrobeton,  
Zbrojenie rozproszone,  
Wytrzymałość betonu

Promotor: dr hab. Inż. Andrzej Ubysz, prof. PWr  
Promotor pomocniczy: dr inż. Dominik Logoń

Wrocław, wrzesień 2022 r.

Autor:

Mgr inż. Tomasz Kowalik

.....

Politechnika Wrocławska

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

Katedra Konstrukcji Budowlanych

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Tel. 508 822 776

e-mail: Tomasz.kowalik@pwr.edu.pl

Raport został złożony w Redakcji Wydawnictw Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej we wrześniu 2022 r.

Lista odbiorców:

Recenzenci	2 egz.
Promotor	2 egz.
CWiINT PWr	1 egz.
Archiwum W-2	1 egz.
Razem	5 egz.

*Pracę dedykuje mojej żonie Natalii  
Bratu oraz Rodzicom. Dziękuje Wam za wszystko.*

*Serdeczne podziękowania składam  
Promotorowi, Promotorowi Pomocniczemu oraz prof. Tomaszowi Trapko  
za inspirację, cenne uwagi, otwartość i ogromną pomoc.*

## Spis treści

1. Wprowadzenie.....	5
2. Charakterystyka fibrobetonów .....	6
2.1. Rys historyczny.....	6
2.1.1. Typy włókien stosowanych do zbrojenia betonów .....	6
2.1.2. Rola włókien w zbrojeniu betonu oraz wytyczne do projektowania fibrobetonów .....	14
2.1.4. Metodyka badań fibrobetonów.....	19
2.1.5. Przykładowe badania włókien pochodzących z recyklingu oraz wyniki .....	31
2.2. Podsumowanie stanu wiedzy .....	40
3. Cele i tezy rozprawy.....	41
4. Część badawcza.....	42
4.1. Metodyka badań .....	42
4.2. Wykorzystane materiały.....	43
4.3. Metoda otrzymania włókien.....	45
5. Badania własne.....	48
5.1. Badanie wytrzymałości na rozciąganie prętów przeznaczonych do wyodrębnienia włókien.....	48
5.2. Badanie wytrzymałości na rozciąganie włókien .....	50
5.3. Zastosowanie otrzymanych włókien do zbrojenia betonu.....	52
6. Badania właściwości mechanicznych betonu.....	54
6.1. Badanie wytrzymałości na ściskanie.....	54
6.1.1. Beton bez dodatku włókien .....	54
6.1.2. Beton z dodatkiem włókien bazaltowych w ilości 1%, 1,5%, oraz 2% .....	55
6.2. Moduł sprężystości.....	59
6.3. Metoda brazylijska .....	69
6.4. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu.....	71
6.5. Badanie skurczu .....	82
6.6. Badania nieniszczące.....	97
7. Podsumowanie .....	103
8. Bibliografia .....	111
9. Streszczenie .....	122
10. Summary .....	122

## 1. Wprowadzenie

W obecnych czasach coraz większą uwagę poświęca się powtórnemu wykorzystaniu materiałów w wielu gałęziach przemysłu. Dużą uwagę przykładą się do ponownego zastosowania różnorodnych materiałów budowlanych w nowopowstających obiektach budowlanych. Jak wynika z szacunków Komisji Europejskiej obecnie odpady budowlane stanowią ok. 30% wszystkich odpadów produkowanych na kontynencie Europejskim. Poziom wykorzystania ponownego materiałów budowlanych stanowi niecałe 50% i dąży się do uzyskania możliwości ponownego zastosowania materiałów budowlanych na poziomie 70% w najbliższych latach [1].

Z biegiem lat i wraz ze wzrostem technologii i różnorodności materiałów stosowanych w branży budowlanej pojawia się wiele nowych koncepcji na możliwość ponownego wykorzystania materiałów w budownictwie. Z uwagi na trudność w oszacowaniu parametrów wytrzymałościowych większości materiałów budowlanych wykorzystujących technologie recyklingu, bardzo często stosuje się je w elementach niekonstrukcyjnych. Przykładem może być ponowne wykorzystanie odpadów w geotechnice [2, 3]. Również za szandarowy przykład ponownego wykorzystania materiałów budowlanych można oczywiście uznać stal zbrojeniową wykonaną z przetopienia odpadów stalowych z różnych gałęzi przemysłu [4, 5, 6, 7, 8]. Obecnie w przypadku fibrobetonu badania przeprowadzone są nad możliwościami zastąpienia większości składników zarówno mieszanki betonowej jak i zbrojenia odpadowymi półproduktami [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. W literaturze można znaleźć szereg publikacji w których podjęto próby wykorzystania ponownego materiałów odpadowych do szeroko rozumianego przemysłu budowlanego. Najciekawsze sposoby oraz zastosowania przedstawiono w [8, 9, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28]. Coraz częściej są to elementy niemetaliczne, które nie wymagają kosztownej obróbki przygotowawczej, umożliwiającej dalsze stosowanie.

Do materiałów recyklingowych, których zastosowania poszukuje się w budownictwie, należą między innymi włókna bazaltowe. Włókna te mają stosunkowo wysoką cenę i głównie z tego powodu są jeszcze najmniej używane oraz rozpoznane. Jako ich główne zalety można wymienić: brak korozji, brak przewodzenia prądu a co za tym idzie brak zakłócania pola elektromagnetycznego. Również ważnym czynnikiem polepszającym stosowanie tych włókien jest ich naturalność – włókna te powstały z przetopienia skały bazaltowej co powoduje że są materiałem nie wpływającym negatywnie na zdrowie człowieka.

Na początku lat 60 XX w. otrzymano włókna, które posłużyły do wytworzenia kompozytów FRP (ang. Fiber Reinforced Polymer). Były to materiały kompozytowe wykonane z

polimerowej matrycy wzmocnionej włóknami. Dzisiaj najczęściej stosowanymi są włókna węglowe, aramidowe, szklane oraz bazaltowe. W związku ze zwiększającymi się wymaganiami stawianymi konstrukcjom, oraz koniecznością eliminacji niedoskonałości włókien stalowych, rozpoczęto badania nad możliwością wykorzystania wspomnianych kompozytów do zbrojenia fibrobetonów. Jako największą zaletę stosowania włókien niemetalicznych w porównaniu do włókien stalowych można wymienić przede wszystkim brak wrażliwości na korozję, brak zakłócania pola elektromagnetycznego w okolicy urządzeń precyzyjnych [29].

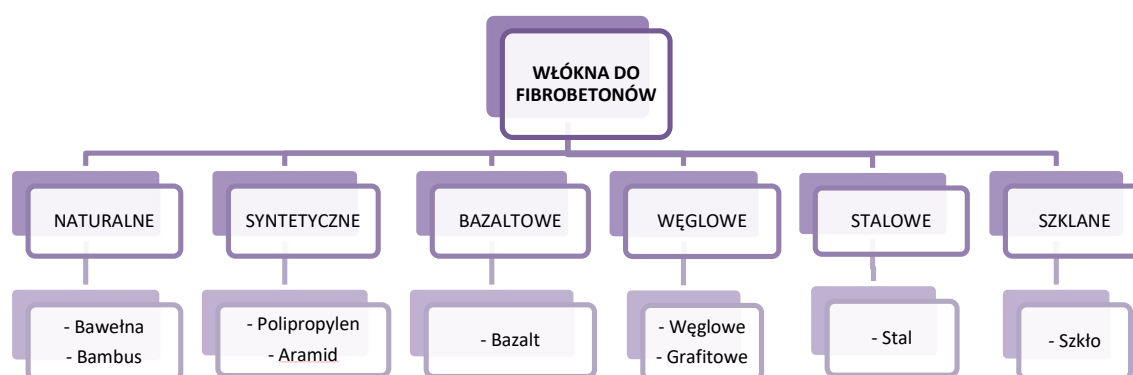
## **2. Charakterystyka fibrobetonów**

### **2.1. Rys historyczny**

Zalety wynikające ze stosowania materiałów o włoskowatym kształcie jako dodatku do kruchych materiałów budowlanych ~~stwierdzone~~ odkryto już w starożytności. W celu eliminacji spękań na wypalanej glinie służącej do budowy budynków stosowano pociętą słomę a do zapraw dodawano pocięte końskie włosie [30, 31, 32]. Można to z pewnością uznać za pierwowzór dzisiejszego zbrojenia rozproszonego. Pod koniec XIX w. otrzymano pierwsze włókna azbestowe które powstały po przetworzeniu surowca kopalnianego. Ich dodatek do zaczynu cementowego spowodował eliminację rys skurczowych i z powodzeniem zaczął być stosowany w budownictwie. Na początku XX wieku, w 1910 roku użyto pocięty drut stalowy jako dodatek do mieszanki betonowej [31]. W latach 30 XX wieku stwierdzono że dodatek włókien do betonu powoduje poprawę jego właściwości mechanicznych [32], jednak dopiero w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku rozpoczęto szczegółowe badania *drutobetonu*. Wykonywane doświadczenia potwierdziły dotychczasowe wyniki badań odnośnie poprawy cech wytrzymałościowych betonu. W 1963 roku-Romualdi i Baston rozpoczęli na dużą skalę modyfikację betonów włóknami stalowymi. Przedstawili teorię, że dodatek krótkich włókien stalowych utrudnia pojawienie się rys w betonie i hamuje ich rozwój [33]. Wspomniani badacze opatentowali technologię dodawania włókien stalowych do betonu, a materiał nazwali *Drutobeton* [30]. W Polsce intensywne badania nad właściwościami fibrobetonów z włóknami stalowymi zaczęto prowadzić w latach 70 XX w [34, 35, 36].

#### **2.1.1. Typy włókien stosowanych do zbrojenia betonów**

Do początku roku 2000 w Polsce (w Unii Europejskiej do roku 1983) najpopularniejszymi włóknami stosowanymi w budownictwie były włókna azbestowe. Zostały one wycofane z powodu stwierdzenia niekorzystnego wpływu na zdrowie człowieka. O ile same włókna nie są szkodliwe, to ich odłamki o średnicy ok. 0,1µm, wbijały się do płuc przy oddychaniu i powodowały ich uszkodzenie a konsekwencji powodowały choroby nowotworowe. Poza włóknami azbestowymi najbardziej rozpowszechnionymi są włókna stalowe. Ich przewagą od innych włókien jest zarówno ich stosunkowo niska cena jak i możliwość ich dowolnego kształtowania w celu poprawienia głównie ich przyczepności do matrycy cementowej a w konsekwencji do poprawy cech wytrzymałościowych całego elementu. Na rysunku 1 przedstawiono podział włókien obecnie stosowanych w przemyśle:



Rys. 1 Włókna stosowane do fibrobetonów [37]

### ***Włókna naturalne***

Są to włókna produkowane z surowców naturalnych, pochodzenia organicznego. Ich główne zastosowanie można znaleźć w przemyśle włókienniczym. Są zbudowane z biopolimerów tj. celulozy i białek. Dzisiejsza technologia pozwala na zastosowanie włókien naturalnych do stosowania w izolacjach – coraz częściej w budownictwie jednorodinnym i mieszkaniowym.

Włókna naturalne są również stosowane w budownictwie. Przykładowo, włókna drewniane są wykorzystywane do wykonywania płyt drzazgowo – cementowych [S9]. Stosowanie włókien naturalnych wiąże się jednak ze znacznym ryzykiem korozji biologicznej przede wszystkim w warunkach wysokiej wilgotności otoczenia. Zarówno nośność trwałość elementów jak i same włókna są mocno narażone na grzyby oraz bakterie organiczne.

### **Włókna stalowe**

Włókna stalowe są obecnie najpopularniejszymi włóknami stosowanymi jako zbrojenie do betonów. Zawdzięczają to zarówno swojej niskiej cenie jak i możliwością dowolnego

doboru kształtu, który zwiększa ich przyczepność do matrycy betonowej. Włókna stalowe mogą być ukształtowane w dowolny sposób. Spośród najpopularniejszych wyróżnia się: włókna haczykowane, haczykowane skleione, z zakończeniami młotkowymi, wioselkowe, faliste okrągłe, faliste płaskie, płaskie haczykowane o zmiennym przekroju, proste gładkie (rys. 2). Długość włókien mieści się w przedziale 25-60 mm, a średnica w przedziale 0,1-1,5 mm. Najbardziej efektywnymi włóknami są włókna o kształcie haczykowatym. Ze względu na słabą przyczepność chemiczną pomiędzy betonem w powierzchnią włókna stalowego, obciążenie jest przekazywane głównie przez mechaniczne zakotwienie. Zakotwienie włókien stalowych było badane przez m. in. [38, 39, 40, 41, 42, 43]. Wadami betonów z dodatkiem włókien stalowych można wyróżnić korozję, przewodnictwo elektryczne co skutkuje zaburzeniami pola elektrycznego. Przy dodawaniu włókien do mieszanki betonowej bardzo ważne jest aby nie dopuścić do powstawania tzw. „jeży”, które powodują skumulowanie włókien w jednym miejscu co niekorzystnie wpływa na urabialność mieszanki jak i brak efektywności w gotowym elemencie betonowym. Aby zapobiec temu zjawisku często stosuje się pasma włókien złączonych ze sobą klejem, który rozpuszcza się w wodzie. Po dodaniu do mieszanki betonowej, klej rozpuszcza się, a włókna zostają równomiernie rozłożone w mieszanke betonowej.



Rys. 2 Przykłady kształtu włókien stalowych przeznaczonych do betonu  
 1 – haczykowane, 2- haczykowane skleione, 3 – z uformowanymi zakończeniami „młotkowymi”, 4 – wioselkowe, 5 – faliste okrągłe, 6 – faliste płaskie, 7 – płaskie, haczykowane o zmiennym przekroju, 8 – proste gładkie [37].

### Włókna syntetyczne



Włókna polipropylenowe produkowane są jako włókna cięte z przędzy i cięte z folii (rys. 3a, 3b). Są one stosowane jako zbrojenie betonu oraz zapraw już od 1960 roku [44]. W początkowym okresie stosowania (w latach 70 XX w.) rozwinięto badania oraz podjęto próbę zastosowania włókien syntetycznych jako zamiennika do włókien azbestowych [45, 46]. Bardzo często są stosowane wraz z innymi typami włókien tworząc zbrojenie hybrydowe. Włókna polipropylenowe z uwagi na niski moduł sprężystości są stosowane głównie służące do ograniczenia skurczu autogenicznego. W związku z ich niskim modułem sprężystości są stosunkowo elastyczne i przy zachodzeniu procesu wiązania betonu od razu wchodzą w interakcje z nie stwardniałą jeszcze matrycą cementową ograniczając jej skurcz. Po osiągnięciu przez beton modułu sprężystego większego niż pojedyncze włókna następuje wyłączenie ich współdziałania, a rolę dominującą przejmują wtedy inne włókna zastosowane w mieszance betonowej.

Włókna polipropylenowe mają stosunkowo niski zakres temperatur roboczych – od -20°C do +100°C co powoduje możliwość ich zastosowania wewnątrz ogrzewanych budynków lub podziemnych elementów budowli. Z uwagi na stosunkowo niski zakres temperaturowy pracy można mówić również o zaletach. Mianowicie w przypadku pożaru, po stopieniu włókien pozostają pustki powietrzne które ułatwiają szybkie odparowanie pary wodnej, co przyczynia się do ograniczenia ciśnienia wewnętrznego rozpierającego beton [37]. W celu zapobiegania destruktywnemu oddziaływaniu pożaru na konstrukcyjne elementy betonowe zaleca się stosowanie włókien polipropylenowych w ilości 2 kg/m<sup>3</sup>.



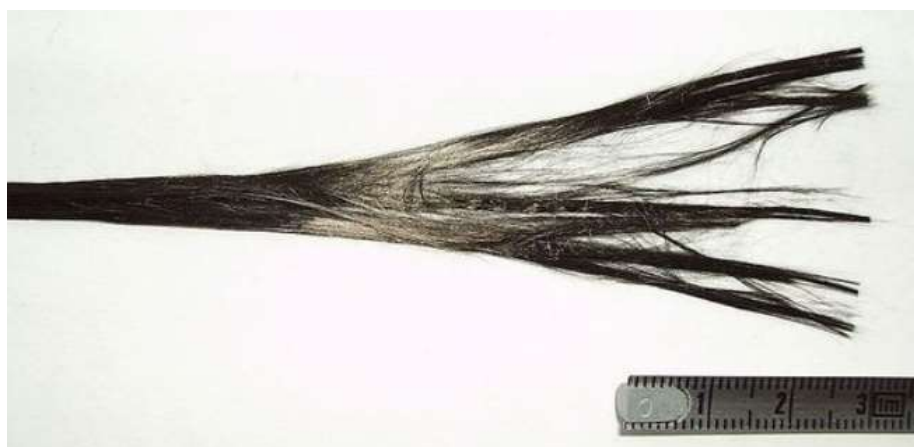
Rys. 3a Włókna polipropylenowe [S1]



Rys. 3b Włókna polipropylenowe [S2]

## Włókna węglowe

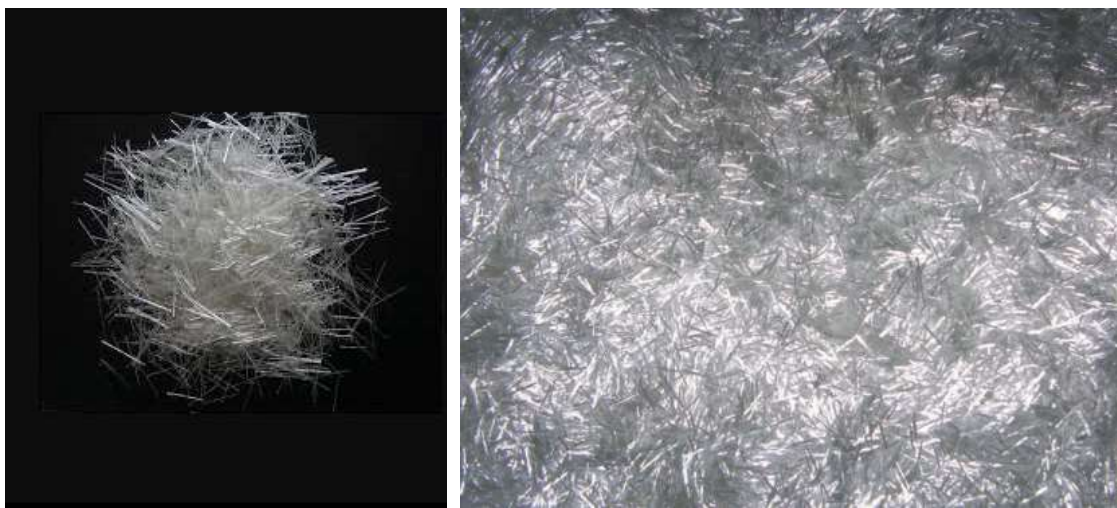
Z uwagi na swoją kruchość włókna węglowe (rys. 4) nie znalazły zastosowania jako składnik kompozytów cementowych. Cechują się małą gęstością, wysoką wytrzymałością na rozciąganie oraz wysokim modułem Younga i wysoką wytrzymałością zmęczeniową. Do wad włókien węglowych można zaliczyć brak możliwości ich powtórnego stosowania ze względu na kruchość oraz stosunkowo wysoką cenę. Obecnie włókna węglowe mają bardzo duże zastosowanie jako składnik kompozytu FRP jako zbrojenie matryc żywicznych. Włókna węglowe jako elementy wzmacniające materiały kompozytowe na osnowach polimerowych znajdują zastosowanie w produkcji taśm do wzmocnień konstrukcji oraz do produkcji zbrojenia z włókien węglowych. Ich relatywnie niska masa oraz odpowiednie właściwości wytrzymałościowe spowodowały że są powszechnie używane w budownictwie [47].



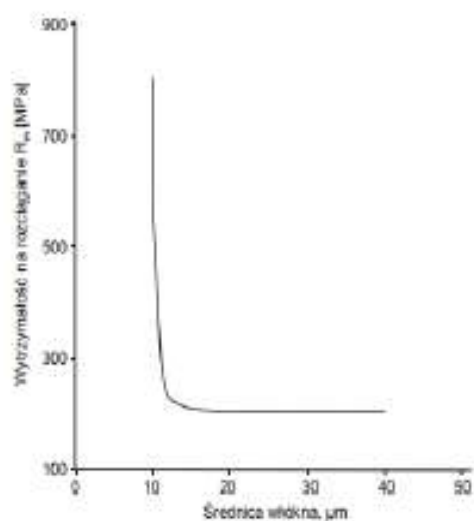
Rys. 4 Włókno węglowe [S3]

### **Włókna szklane**

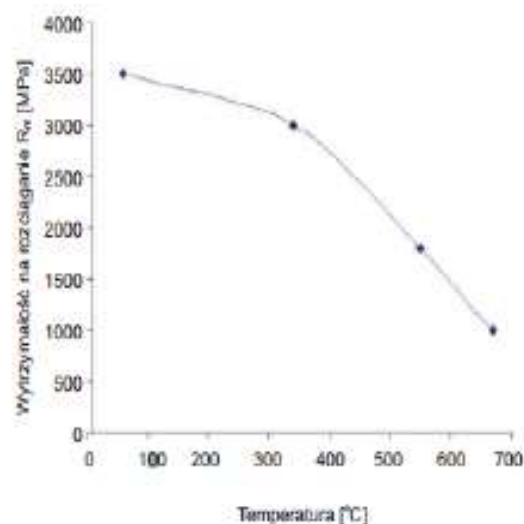
Włókno szklane (rys. 5) jest stosowane w postaci rovingu, to jest pasm włókien połączonych ze sobą bez skrętu i pokrytych preparacją, oraz wykorzystywane jest również w postaci tkanin o różnym splocie, rovingu ciętego, włókien mielonych itd. Cechą charakterystyczną włókien szklanych jest wysoka wytrzymałość na rozciąganie przy stosunkowo niskim module sprężystości (module Younga), natomiast wysokim module sprężystości przy ścinaniu [11, 48, 49] (rys. 6a, 6b).



Rys. 5 Włókna szklane [S4], [S5]



Rys. 6a. Wytrzymałość na rozciąganie pojedynczego włókna



Rys. 6b. Wpływ temperatury na wytrzymałość na rozciąganie włókien szklanych typu E

Cechy wytrzymałościowe włókna szklanego zależą od średnicy i są tym lepsze im mniejsza jest ich średnica. Ze zmniejszeniem średnicy zwiększa się moduł sprężystości i wytrzymałość na rozciąganie ale jednocześnie maleje wydłużenie przy zerwaniu. Odształcenia włókna szklanego są sprężyste, gdyż granica sprężystości jest zgodna z punktem zerwania.

Włókno szklane nie pali się. Dopiero powyżej 400°C następuje znaczny spadek wytrzymałości włókien.

Niewątpliwą wadą jest wrażliwość na działanie wody ze względu na wypłukiwanie soli metali alkalicznych, powodując szczeliny w warstwach wierzchnich [50], [51].

## Włókna bazaltowe

Włókna bazaltowe (rys. 7) są produktem naturalnym, powstałym z przetopienia skały bazaltowej w temperaturze około 1400 °C. Włókna są bardzo cienkie oraz posiadają bardzo wysoką twardość (8,5 w skali Mohsa). Beton z dodatkiem włókien bazaltowych charakteryzuje się dobrymi właściwościami mechanicznymi i wysoką odpornością na ścieranie. Podobnie jak inne włókna niemetaliczne, nie jest wrażliwy na korozję, oraz jest dobrym izolatorem cieplnym i elektrycznym [52, 53].

W porównaniu do włókien szklanych jest odporny na korozję w wodzie morskiej dzięki czemu może być stosowany w konstrukcjach nadmorskich (falochrony, latarnie) [54, 55].



Rys. 7 Włókna bazaltowe [S6]

Początek ciągłych włókien bazaltowych wiąże się z amerykańskim patentem z 1923 roku. Od tego momentu badania nad przetwarzaniem skał bazaltowych prowadzono również w Rosji, Wielkiej Brytanii i Niemczech. Od lat sześćdziesiątych do osiemdziesiątych XX wieku technologia otrzymywania włókna bazaltowego ciągłego była przedmiotem tajnym ze względu na zastosowanie jej wyrobów w przemyśle zbrojeniowym i astronautyce. Od roku 1995 włókna te ciągle znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach. Ze względu na duże złoża skał bazaltowych produkcja ciągłego włókna rozwinęła się na Ukrainie, Rosji, Chinach oraz w Polsce (szczególnie w woj. Dolnośląskim). Włókna bazaltowe mają zazwyczaj średnicę zawierającą się w przedziale 10-20  $\mu\text{m}$  co pozwala na uznanie jako materiał nieszkodliwy dla człowieka przy oddychaniu.

## Produkcja włókien bazaltowych

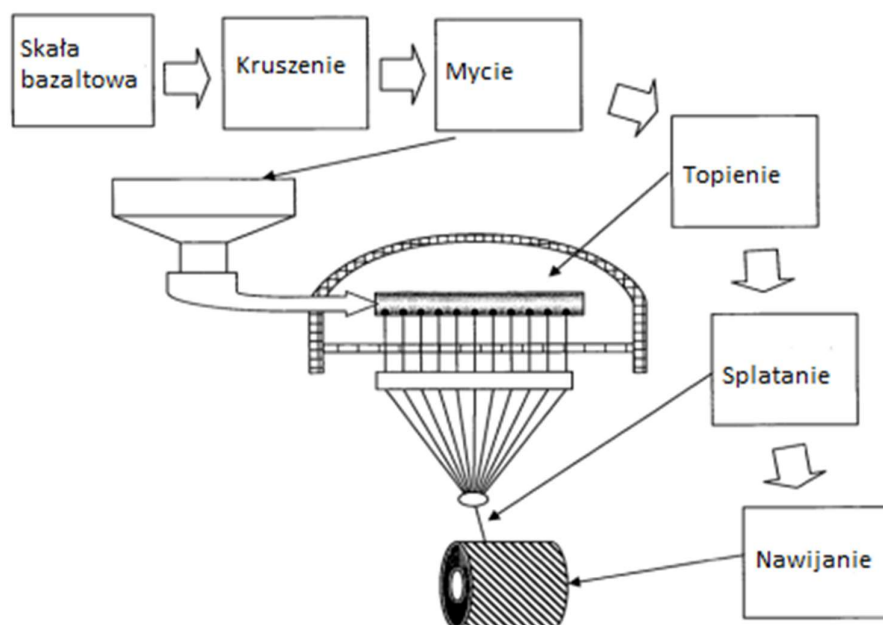
Produkcja włókien bazaltowych jest procesem jednoetapowym, w którym bazalt jest podgrzewany tylko jeden raz. Produkcja odbywa się poprzez kruszenie i mycie skały bazaltowej. Najbardziej pożądanym surowcem jest bazalt o wysokiej zawartości krzemionki oraz niskiej zawartości żelaza. W przeciwieństwie do produkcji innych typów włókien niemetalicznych (jak np. szklanych) przy produkcji włókien bazaltowych nie dodaje się innych materiałów. Produkcja wymaga stopienia przekruszonej i oczyszczonej skały bazaltowej w temperaturze ok. 1500°C a następnie przetłoczenie przez dysze o małej średnicy w celu wytworzenia ciągłych włókien bazaltowych. Ostatnim procesem jest splatanie ze sobą pojedynczych otrzymanych włókien oraz ich nawijanie na krąg [56, 57].

## Porównanie właściwości mechanicznych włókien

W tabeli 1 zestawiono wybrane najważniejsze parametry mechaniczne dla najbardziej popularnych typów włókien stosowanych w budownictwie – zarówno obecnie stosowanych jak stosowanych w poprzednich latach:

Rodzaj włókna	Średnica	Gęstość pozorna	Wytrzymałość na rozciąganie	Moduł sprężystości	Wydłużenie przy zerwaniu
	mm	g/cm <sup>3</sup>	MPa	Gpa	%
Stalowe	0,1-1	7,8	500-2000	200	0,5-3,5
Polipropylenowe	0,02-0,2	0,9	300-700	5	15-25
Szklane	0,012-0,02	2,7	1000-3000	80	1,5-4,5
Węglowe	0,008-0,01	1,9	100-3000	230-400	0,5-1,0
Aramidowe	0,008-0,012	1,4	3000	70-130	2-3,5
Azbestowe	0,0001	2,6	3500	160	2-3
Bazaltowe	0,012-0,018	1,7-2,65	700-1680	70-90	0,5-1,6

Tab. 1 Porównanie parametrów włókien stosowanych w budownictwie



Rys. 8 Schemat produkcji włókien bazaltowych [58]

### 2.1.2. Rola włókien w zbrojeniu betonu oraz wytyczne do projektowania fibrobetonów

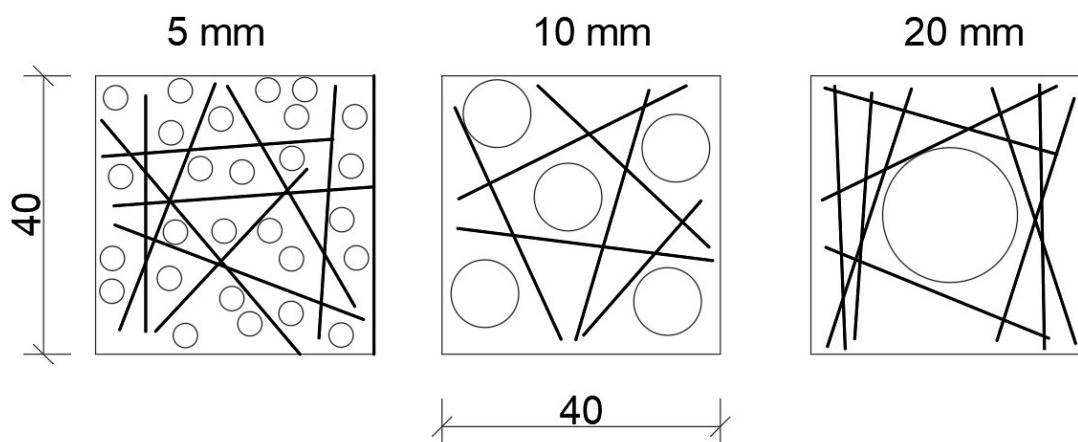
Zbrojenie rozproszone jest obecnie stosowane pod różnymi postaciami – zarówno w elementach z betonu, jak i jako dodatek do zapraw oraz samego zaczynu cementowego. Dodawanie włókien do zapraw, mieszanki betonowej wiąże się przede wszystkim z :

- redukcją zarysowań,
- polepszeniem właściwości wytrzymałościowych poprzez udział w przenoszeniu naprężeń rozciągających.

W przypadku zapraw i klejów włókna – poza poprawieniem właściwości mechanicznych – poprawiają odporność chemiczną na działanie kwasów, zasad oraz soli. Odpowiednie typy włókien (np. celulozowe) pod wpływem wody stają się elastyczne i ciągliwe, dzięki czemu mają znaczący wpływ na właściwości robocze zaprawy – to jest poprawiają reologię zaprawy, ograniczają spływ oraz wydłużają czas otwarty.

Wyłączając włókna, pozostałe składniki fibrobetonu nie różnią się znacząco od składników betonu konstrukcyjnego. Do betonów można stosować te same cementy, to samo kruszywo oraz w większości te same dodatki, co do betonu konstrukcyjnego. Maksymalna wielkość ziaren nie powinna być większa niż  $\frac{1}{3}$  długości włókien. Zapewnia to znacznie lepsze wykorzystanie włókien [37]. Zaleca się, aby w elementach cienkościennych średnica ziarna kruszywa nie przekraczała 8 mm. Maksymalna średnica ziaren kruszywa nie powinna przekraczać 16 mm. Wielkość ta dopuszczalna jest tylko w elementach masywnych jednak zaleca się wtedy zwiększenie długości stosowanych włókien do 60 mm [rys. 9]. Do efektywnego współdziałania włókien w fibrobetonie zaleca się również:

- Stosowanie domieszki uplastyczniającej – szczególnie ważne jest to przy użyciu włókien stalowych. Stosowanie domieszki zapobiega pogorszeniu urabialności mieszanki spowodowane dodaniem włókien. W przypadku niezastosowania domieszki wysoce prawdopodobne jest zwiększenie porowatości betonu oraz nierównomierne rozmieszczenie włókien co w najbardziej niekorzystnym przypadku może doprowadzić do wytworzenia się tzw. „jeży”[37],
- Wskaźnik w/c nie powinien przekraczać 0,55 – warunek ten podyktowany jest wytrzymałością zaczynu. Podstawowym warunkiem na właściwe wykorzystanie włókien jest współdziałanie z zaczynem o dobrej wytrzymałości. W przeciwnym wypadku nawet najmocniejsze zastosowane włókna nie dadzą oczekiwanego rezultatu.



Rys. 9 Wpływ uziarnienia kruszywa na rozmieszczenie włókien w betonie [37]

Głównymi czynnikami charakteryzującymi włókna są:

- materiał włókien,



- wymiary włókien, w szczególności długość, średnica oraz smukłość,
- kształt włókien,
- przestrzenny rozkład włókien (przypadkowy lub regularny),
- zawartość włókien  $V_f$ .

Do opisu struktury fibrobetonu stosuje się średnią zawartość włókien w jednostce objętości, w uśrednionej orientacji włókien. Nominalna zawartość włókien w może być określona za pomocą wzoru:

$$V_f = \frac{W_f}{\rho_f}$$

gdzie:

$W_f$  – zawartość włókien w jednostce masy,

$\rho_f$  – gęstość materiału włókien w  $\frac{kg}{m^3}$

Rozkład włókien w elementach z fibrobetonów najłatwiej jest sprawdzić metodą rentgenowska. W przypadku braku narzędzi, sprawdzenie w elementach poddanych badaniom można przeprowadzić krusząc element na drobniejsze części. Sprawdzenie kontrolne w przypadku produkcji elementów i niestwardnianego betonu można sprawdzić pobierając próbkę o danej jednostce objętości i wypłukując elementy na sicie lub w przypadku włókien stalowych przy wykorzystaniu elektromagnesu za pomocą którego można wyodrębnić włókna stalowe z mieszanki.

Kolejnym czynnikiem który należy brać pod uwagę przy projektowaniu elementów fibrobetonowych jest rozstaw włókien. Jest to warunek konieczny, który zapewnia ograniczenie zarysowania w elemencie ze zbrojeniem rozproszonym. Jest on definiowany jako średnia odległość pomiędzy środkami ciężkości włókien. Na podstawie rozstawu włókien można ocenić współdziałanie włókien. Analogicznie jak w przypadku elementów żelbetowych, zbyt duży rozstaw włókien nie zapewnia współdziałania poszczególnych włókien ze sobą. Pojęcie rozstawu włókien można zapisać za pomocą wzoru:

$$s = \sqrt{\frac{\pi l d^2}{4 V_f}}, \text{ oraz } \frac{s}{l} \leq 0,45$$

gdzie:

$l$  – długość włókna,

$d$  – średnica włókna.



### 2.1.3. Mechanika pracy oraz zniszczenia fibrobetonów

Jednym z najważniejszych czynników kwalifikujących użyteczność wykorzystania kompozytu betonowego z dodatkiem włókien jest odporność na pękanie oraz zdolność do absorpcji energii podczas procesu przykładania obciążeń przed całkowitym zniszczeniem elementu. W materiałach kruchych maksymalna siła jest notowana w momencie wystąpienia pierwszego zarysowania elementu. Energia pękania może być definiowana na różne sposoby, które są związane z odkształceniem pęknięcia, które często są niejednoznaczne oraz wymagają odpowiednich założeń. Zdolność do pochłaniania energii pękania jest nazywana odpornością na pękanie. Można wyróżnić trzy główne grupy znaczeniowe odporności na pękanie [59, 60].

Całościowy opis został zaproponowany przez Japan Concrete Institute, Rilem oraz ASTM. Według źródeł absorpcja energii pękania jest mierzona w ściśle określony sposób i obliczana jako pole powierzchni pod wykresem opisanym jako funkcja obciążenie – przemieszczenie. Jako sposób badania podany jest sposób obciążania próbek za pomocą 4 punktowego zginania, co skutkuje uzyskaniem wyniku wytrzymałości na zginanie lub pochłanianiem energii na zginanie.

Jako drugi sposób, również zaproponowany w ASTM opiera się na wartościach bezwzględnych (bez podawania wymiarów próbek). Uwzględniany jest wtedy stosunek całkowitej powierzchni pod krzywą do momentu wystąpienia pierwszego pęknięcia. Wskaźnik ten nazywany jest wskaźnikiem złamania.

Jako trzecią grupę proponowane jest uwzględnienie wymiarów próbki i niektórych części krzywej naprężenie – odkształcenie lub obciążenie – ugięcie. Odporność na kruche pękanie jest również definiowana, jako wartość krytyczna współczynnika intensywności naprężeń (występujący w literaturze jako  $K_{Ic}$ ) [60, 61]. (Prawdopodobnie propozycja wykorzystania bezwymiarowej wielkości zwanej wskaźnikiem pękania jako możliwej charakterystyki materiału została po raz pierwszy opublikowana w [62].) Zastosowano belkę testową znormalizowaną przez ASTM o przekroju poprzecznym 102 x 102 mm, która została obciążona w środku do całkowitego ugięcia 1,9 mm. Wskaźnik ciągliwości obliczono jako stosunek powierzchni  $a+b$  do powierzchni  $a$ , jak pokazano na figurze 10.29. Dla zwykłego betonu lub zaprawy wartość ta wynosi 1 lub nieco więcej, a dla silnie zbrojonego kompozytu włóknistego może osiągnąć wartości 30 lub nawet 46, jak podano w)

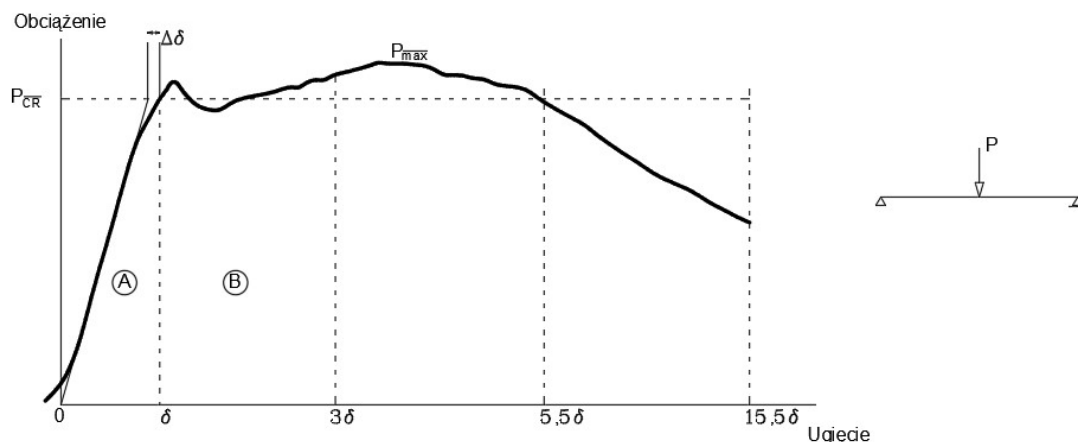
Podobną metodę bazującą na wskaźnikach wytrzymałości na zginanie, niezwiązaną z wymiarami badanych elementów przedstawiono w ASTM [63]. Została ona przedstawiona na rysunku 10–jako funkcja przemieszczenie – siła uzyskane przy obciążaniu za pomocą siły skupionej w środku rozpiętości. Przemieszczenie  $\delta$  odpowiada wystąpieniu

pierwszego zarysowania oraz jest mierzone od stanu początkowego i powiązane z pracą elementu w zakresie sprężystym. Wyszczególnione wskaźniki otrzymuje się dzieląc powierzchnię pod krzywą obciążenie ugięcie przez powierzchnię pod krzywą do pierwszego pęknięcia. Uzyskane wartości wskaźników odporności na pękanie  $I_5$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{30}$  są niezależne od wymiarów przekroju oraz sztywności badanego elementu.

Indeks  $I_5$  jest definiowany jako przemieszczenie  $3d\delta$ ,  $I_{10}$  jako  $5,5d\delta$ , oraz  $I_{30}$  jako  $15,5d\delta$ . Wartości oznaczone jako indeksy (5, 10 oraz 30) odpowiadają wartościom dla idealnego materiału sprężysto – plastycznego. Natomiast dla materiału kruchego wszystkie wskaźniki są równe 1, ponieważ w tym przypadku całkowite ugięcie jest ograniczenie do 1.

Opisana metoda została zaakceptowana również przez ACI Committee 544 [N3]. Próba zginania jest zalecana do określenia wytrzymałości materiału, rozumianej jako zdolność do pochłaniania energii przy obciążeniu statycznym.

Warto jednak podkreślić, że wskaźnik odporności na kruche pękanie nie może być uznawany ~~na~~ za uniwersalną cechę w sensie odporności na pękanie. Główną ze słabych stron jest trudność w identyfikacji wystąpienia pierwszego pęknięcia. Przykładowo rozpatrując element fibrobetonowy z włóknem stalowym o wysokiej zawartości włókien w elemencie, wizualna ocena momentu wystąpienia pierwszego zarysowania jest praktycznie niemożliwa.



Rys. 10 Zależność przemieszczenie – ugięcie z podziałem na fazy pracy fibrobetonu [64]

Jako kolejną wadę wyznaczania wskaźnika ciągliwości można wyróżnić uzyskanie tych samych wartości dla różnych krzywych ugięcie-obciążenie (rys. 10). Również wczesne pojawienie się pęknięcia oraz niska wartość pola powierzchni do momentu uzyskania przemieszczenia  $\delta$  mogą dać wyższe wartości wskaźnika niż podobne krzywe z nieznacznie późniejszym wystąpieniem momentu pęknięcia. Wymienione wady są ściśle powiązane z następującymi cechami charakterystycznymi pęknięcia kruchych kompozytów:

- moment pojawienia się pierwszego pęknięcia jest w dużej mierze związany z odpornością na pękanie matrycy cementowej,
- zachowanie elementu po wystąpieniu pierwszego pęknięcia związane jest głównie z zastosowanym zbrojeniem rozproszonym betonu.

## **Kontrola odkształceń**

Opisane w poprzednich punktach metody wyznaczania odporności na pękanie pozwalają na uzyskanie bezwymiarowych wielkości nie obrazując w pełni charakteru pracy z uwzględnieniem długości włókien. Na przestrzeni wielu lat, podczas przeprowadzania badań zauważono różnice w efektach osiąganych przy zróżnicowaniu długości włókien w różnych badaniach. Zauważono m.in. że krótkie włókna poprawiają pracę próbki w fazie sprężystej – możliwe jest opóźnienie momentu wystąpienia pierwszego zarysowania, które pojawia się przy wyższej wartości obciążenia. Długie włókna natomiast pozwalają kontrolować pracę elementu w fazie quasi kruchej. Powszechnie występujące pojęcie „multicracking” obrazuje fazę wzmocnienia kompozytu w zakresie od wystąpienia siły rysującej  $F_{Cr}$  do momentu osiągnięcia maksymalnej siły  $F_{max}$ . Autorzy publikacji [64, 65] posługują się również pojęciem *efektu liny*.

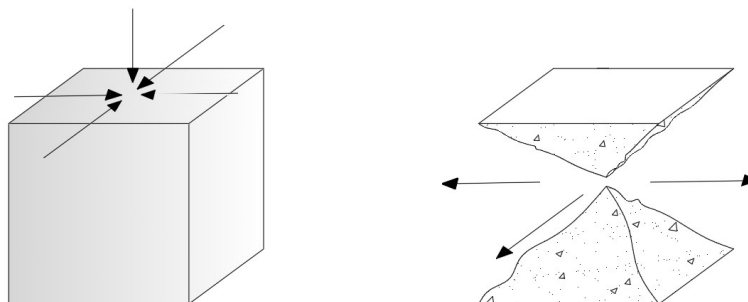
### **2.1.4. Metodyka badań fibrobetonów**

#### **Wytrzymałość na ściskanie**

Wytrzymałość na ściskanie jest najważniejszym badaniem, na podstawie którego można oszacować wytrzymałość stwardniałego betonu. Same wyniki nie zależą tylko od właściwości samego betonu, ale również od metod zagęszczania, pielęgnacji oraz warunków dojrzewania. Wymagania dotyczące betonu są określone w wielu normach, na rynku europejskim główną normą jest [N1].

Wytrzymałość na ściskanie można określić w dwojaki sposób: poprzez badania kostek sześciennych 150 x 150 x 150 mm lub poprzez badania próbek o kształcie walcowym o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. Badanie przeprowadza się po 28 dniach od momentu zabetonowania. Dopuszczalne jest badanie próbek pochodzących z odwiertów w rzeczywistych konstrukcjach o mniejszych wymiarach. Należy jednak wyniki badań skorelować przy uwzględnieniu odpowiednich współczynników podanych w normach [37], z uwzględnieniem, aby wysokość próbki była nie mniejsza od jej średnicy [37].

Na wyniki badań mają wpływ: proporcje i rozmiary próbek, tempo obciążania oraz sposób i dokładność wyrównania powierzchni. Wygląd próbki betonowej po przeprowadzeniu badania na ściskanie kostki przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11 Widok próbek betonowych przed i po badaniu [37]

Na wspomnianym rysunku przedstawiono również próbkę sześcienną z działającymi na nią siłami wynikającymi z tarcia pomiędzy ściskami aparatury badawczej a powierzchnią betonu. Wywołuje ono siły ograniczające równomierne zniszczenie w całej wysokości przekroju. Tworzy się natomiast kształt zbliżony do klepsydry. Wspomniany kształt nie zawsze jest widoczny. Dzieje się tak między innymi w przypadku, gdy w składzie betonu są włókna, co zostanie omówione w dalszej części pracy.

## **Moduł sprężystości**

Istnieje kilkanaście modeli teoretycznych dotyczących kompozytów cementowych z dodatkiem włókien. W pracy [66] przedstawiono wspomniano wcześniej modele. Zgodnie z dostępną literaturą, wartości modułów sprężystości zmieniają się w szczególności w zależności od parametrów matrycy, wśród których można wyszczególnić: porowatość, rodzaj i zawartość ziaren kruszywa oraz zastosowanych dodatków [67].

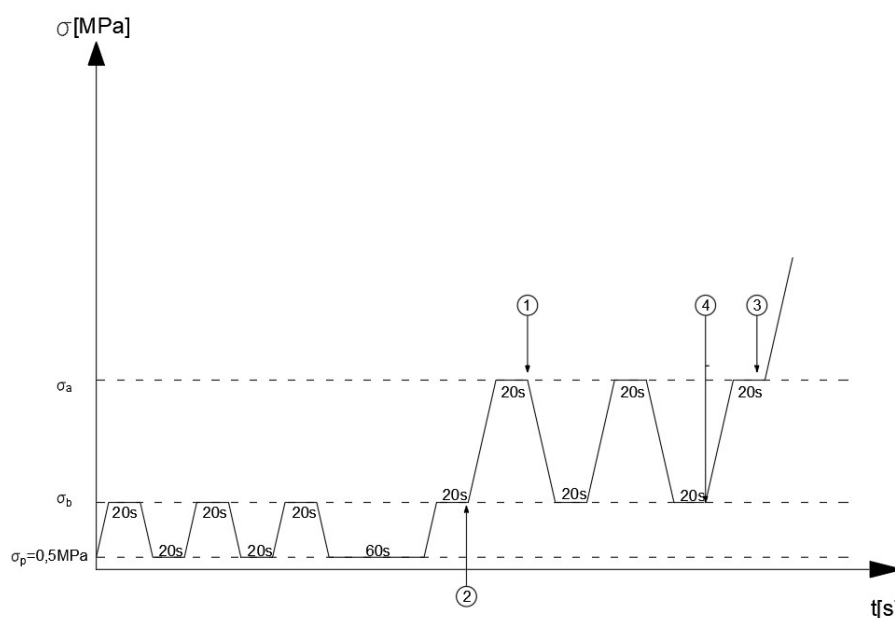
### ***Metoda A***

Oznaczenie modułu sprężystości wykonuje się na próbkach walcowych i wykonanych w formach lub pobranych z istniejących konstrukcji. Stosunek wysokości próbki do jej średnicy powinien zawierać się w przedziale 2-4, natomiast średnica przekroju powinna wynosić co najmniej 3,5 średnicy maksymalnego ziarna kruszywa w betonie. Zaleca się, aby walcowa próbka do badań miała wymiary 150 x 300 mm (odpowiednio: średnica i wysokość) [68, 69].

Z uwagi na to, że moduł sprężystości jest ściśle powiązany z wytrzymałością na ściskanie betonu, przed wykonaniem badań modułu należy w pierwszej kolejności określić wytrzymałość betonu na ściskanie  $f_{cm}$  (wytrzymałość słupowa). Wyniki badania są niezbędne do określenia górnego poziomu naprężenia w próbce  $\sigma_a = \frac{f_{cm}}{3}$ . Badanie w maszynie powinno odbywać się przy prędkości obciążenia równej  $0,6\text{MPa/s} \pm 0,2\text{MPa/s}$  [70].

### ***Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości betonu – metoda A***

W pierwszym etapie badania modułu wykonuje się obciążenie w trzech cyklach do wstępnego poziomu  $\sigma_b = (0,10 - 0,15)f_{cm}$ , a następnie cykle właściwe do poziomu  $\sigma_a = \frac{f_{cm}}{3}$ . Po trzecim cyklu wykonywania obciążeń należy sprawdzić poprawność zamontowania i działania czujników pomiarowych oraz poprawności ustawienia próbki. Po sprawdzeniu wykonuje się dwa cykle obciążeń – od poziomu dolnego wynoszącego  $\sigma_b = (0,10 - 0,15)f_{cm}$  do poziomu górnego równego  $\sigma_a = f_{cm}/3$ . Po każdej z faz osiągnięcia górnego poziomu należy zatrzymać badanie na 20 sekund, natomiast po 3 fazie należy zwiększyć obciążenie do zniszczenia próbki. Schematyczny proces przeprowadzania badania modułu sprężystości pokazano na rysunku 12.



Rys. 12 Schematyczna ilustracja cykli przy wyznaczaniu modułu sprężystości metodą A

[70]

Obliczenie początkowego modułu  $E_{c,0}$  oraz ustabilizowanego modułu  $E_{c,s}$  można wyznaczyć z pomocą wzorów [70]

$$E_{C,0} = \frac{(\sigma_{a,1}^m - \sigma_{b,0}^m)}{(\varepsilon_{a,1} - \varepsilon_{b,0})},$$

$$E_{C,S} = \frac{(\sigma_{a,3}^m - \sigma_{b,2}^m)}{(\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2})},$$

gdzie:

- $\sigma_{a,1}^m$  – naprężenie zarejestrowane przy pierwszym cyklu na poziomie  $1/3 f_{cm}$  (pkt. 1 na rys. 12,
- $\sigma_{b,0}^m$  – naprężenie zarejestrowane przy czwartym cyklu na poziomie  $1/3 f_{cm}$  (pkt. 2 na rys. 12),
- $\varepsilon_{a,1}$  – odkształcenie obliczone przy naprężeniach  $\sigma_{a,1}^m$ ,
- $\varepsilon_{b,0}$  – odkształcenie obliczone przy naprężeniach  $(0,10 - 0,15)f_{cm}$ ,
- $\sigma_{a,3}^m$  – naprężenie zarejestrowane po trzecim cyklu na poziomie  $1/3 f_{cm}$  (pkt. 3 na rys. 11),
- $\sigma_{b,2}^m$  – naprężenie zarejestrowane po drugim cyklu obciążeń na poziomie  $(0,10 - 0,15)f_{cm}$  (pkt. 4 na rys. 12),
- $\varepsilon_{a,3}$  – odkształcenie obliczone dla naprężeń  $\sigma_{a,3}^m$ ,
- $\varepsilon_{b,2}$  – odkształcenie obliczone dla naprężeń  $\sigma_{b,2}^m$ .

### **Metoda B**

Opisywana metoda służy do wyznaczania siecznego, ustabilizowanego modułu sprężystości betonu. W odróżnieniu od metody A, w tym przypadku przeprowadza się trzy cykle, rozpoczynając od poziomu naprężeń wstępnych wynoszących większych niż 0,5MPa, ale mniejszych niż  $\sigma_b = (0,10 - 0,15)f_{cm}$  do poziomu naprężeń górnych wynoszących

$$\sigma_a = f_{cm}/3.$$

W tej metodzie, w odróżnieniu do metody A wykonuje się tylko trzy cykle obciążeń. Po pierwszym cyklu należy sprawdzić poprawność ustawienia próbki, natomiast po drugim cyklu należy sprawdzić powtarzalność odczytów czujników. Za miarodajne badanie uznaje się, gdy odczyty pomiędzy seriami nie różnią się o więcej niż  $\pm 20\%$  [70]. Wyznaczenie siecznego modułu sprężystości można obliczyć ze wzoru:

$$E_{c,s} = \frac{(\sigma_{a,3}^m - \sigma_{p,2}^m)}{(\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{p,2})}$$

Gdzie:

- $\sigma_{a,3}^m$  – maksymalne naprężenie zarejestrowane w 3 cyklu,
- $\sigma_{p,2}^m$  – minimalne naprężenie zarejestrowane po 2 cyklu,
- $\varepsilon_{a,3}$  – średnie odkształcenie obliczone przy  $\sigma_{a,3}^m$ ,
- $\varepsilon_{p,2}$  – średnie odkształcenie obliczone przy  $\sigma_{p,2}^m$ .

## Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu

### Wytrzymałość na rozciąganie wg ITB 294/98

Instrukcja ITB zaleca stosowanie beleczek o kształcie prostopadłościennym, w którym podstawa ma wymiar kwadratu o boku 100 mm lub 150 mm. Długość badanego elementu powinna wynosić  $L = 4d$  (zgodnie z rys. 13). Dopuszczalne jest przykładanie obciążenia za pomocą jednej lub dwóch sił skupionych za pomocą walców.

W przypadku zginania 4 punktowego walec, przez który przykładana jest siła, powinien być odsunięty od podpory na odległość równą  $d$ . Natomiast w przypadku zginania 3 punktowego odległość ta powinna wynosić  $1,5 d$ .

W przypadku czteropunktowego zginania wytrzymałość na rozciąganie oblicza się wg wzoru:

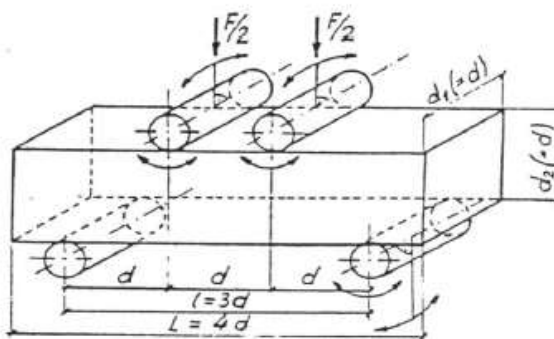
$$f_t^{flex} = \frac{FL}{bh^2}$$

W przypadku trzypunktowego zginania wzór przyjmuje postać:

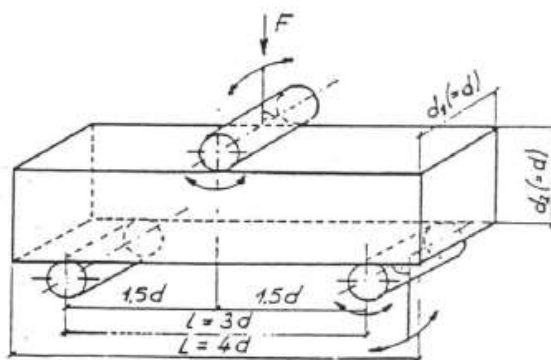
$$f_t^{flex} = \frac{3FL}{2bh^2}$$

gdzie:

- $F$  – maksymalna siła niszcząca (wyrażona w N),
- $b, h$  – wymiary przekroju belki w miejscu zniszczenia (w mm),
- $L$  – rozpiętość w świetle podpór (w mm).



Rys. 1. Schemat obciążenia A z dwiema siłami



Rys. 2. Schemat obciążenia B z jedną siłą

Rys. 13 Wyznaczanie wytrzymałości betonu na rozciąganie w próbie zginania [71]

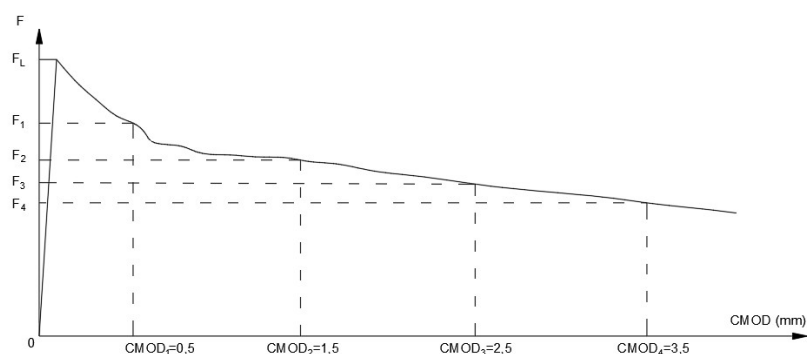
### **PN-EN 14651:2007**

Europejska norma zakłada wykonanie próbek o wymiarach 150 x 150 x 500 mm wraz z nacięciem w środku rozpiętości w celu wymuszenia powstania rysy w konkretnym miejscu. Obciążenie przykładane jest za pomocą jednej siły w środku rozpiętości (3 punktowe zginanie). Wynikiem badania jest wartość resztkowej wytrzymałości na rozciąganie, której określenie polega na pomiarze rozwarcia szczeliny CMOD. W trakcie badania należy również zarejestrować wartość siły dla odpowiednich rozwartości szczeliny wg poniższego schematu:

- wytrzymałość  $F_1$  obliczona dla CMOD = 0,5 mm odpowiada stanu granicznemu użytkowalności,
- wytrzymałość  $F_3$  obliczona dla CMOD = 2,5 mm odpowiada stanu granicznemu nośności.

Wyżej wymienione wartości, z punktu widzenia wymiarowania elementów są parametrami najważniejszymi.





Rys. 14 Wytrzymałość resztkowa [N7]

### Inne zagraniczne normy

Pozostałe zagraniczne normy bazują na zbliżonych modelach postępowania. W tabeli 2 przedstawiono podział przygotowywanych próbek wg rozmiarów przyporządkowanych dla odpowiednich norm (tabela 2).

Nr	Tytuł normy/zaleceń	Wymiar próbki w mm	Wynik badania
1	ASTM C1018-97	100x100x350	Wskaźnik odporności na pękanie
2	JCI-SF-4	150x150x500	Wytrzymałość równoważna na zginanie
3	ACI 544	100x100x350	Wskaźnik odporności na pękanie
4	RILEM TC162-TDF	150x150x550	Wytrzymałość resztkowa na zginanie
5	ASTM C78	100x100x350	Wytrzymałość na zginanie

Tab. 2 Przegląd badań wg norm

Normy wymienione w tabeli bazują na zbliżonym modelu polegającym na zarejestrowaniu siły, przy której wytworzyła się pierwsza rysa (wraz z zarejestrowaniem jej rozwarcia) oraz ugięcia badanego elementu. W normie [N2] wyznacza się wskaźniki odporności na pękanie  $I_5$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{20}$  wg wzorów podanych poniżej (z uwzględnieniem rys. 15).

$$I_5 = \frac{A_{0ACD}}{A_{0AB}}; I_{10} = \frac{A_{0AEF}}{A_{0AB}}; I_{20} = \frac{A_{0AGH}}{A_{0AB}}$$

Odległość  $\delta$  może być wyznaczona również za pomocą wzoru:

$$\delta = 23PL^3 / 1296EI \left[ 1 + \frac{216D^2(1+\mu)}{115L^2} \right]$$

gdzie:

$P$  – siła, przy której nastąpiło pierwsze zarysowanie,

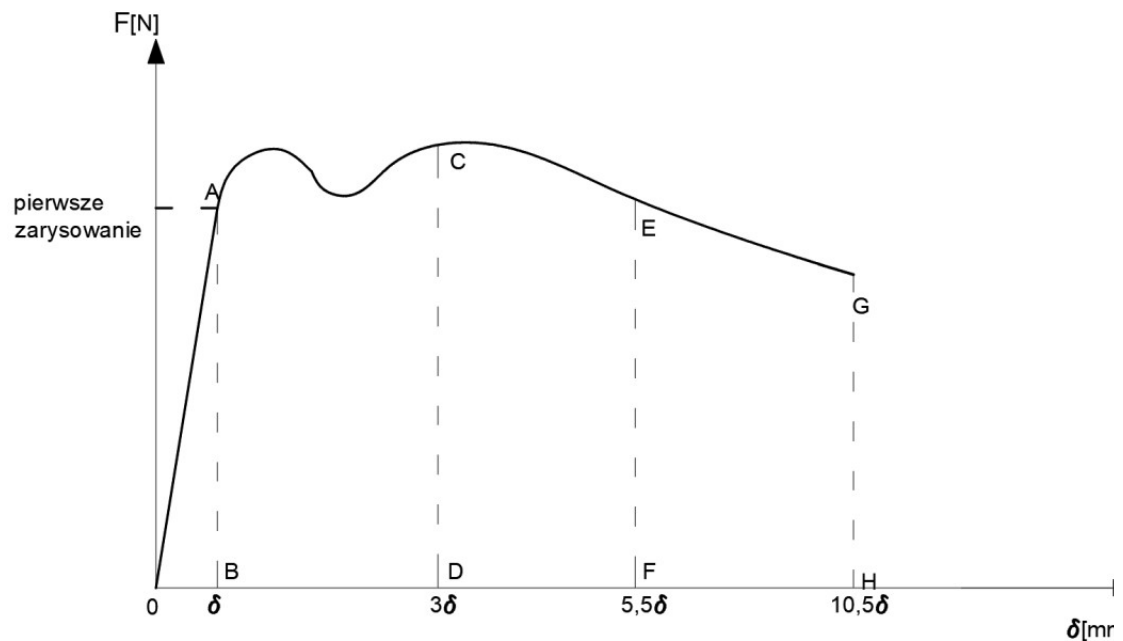
$L$  – rozpiętość badanego elementu,

$E$  – moduł sprężystości,

$I$  – moment bezwładności,

$D$  – szerokość próbki (głębokość),

$\mu$  – współczynnik Poissona.



Rys. 15 Zależność odkształcenia od obciążenia - do obliczenia wytrzymałości wg [N9,N10]

Dla porównania, w normie [N6] przyjmuje się odmienne wartości ugięcia i sił przyjmowanych do obliczeń. Główną wartością jest praca zginania  $T_B$ , która odpowiada powierzchni pod wykresem do osiągnięcia ugięcia równego  $\delta_{ib} = l/150$ . Wskaźnik wytrzymałości równoważnej  $R_e$  jest definiowany jako iloraz równoważnej wytrzymałości na rozciąganie  $f_e$  do wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu  $f_{fl}$ .

W przypadku amerykańskich wytycznych [N3] obliczenia przebiegają analogicznie jak w normie [N2] przy użyciu innych wartości użytych do obliczeń.

Przeprowadzanie badań fibrobetonów dla próbek o wymiarze przekroju równym 150mm przeprowadza się z nacięciem szczeliny w środku rozpiętości elementu. W przypadku próbek o wymiarze podstawy prostopadłościanu równej 100mm szczeliny tej nie powinno się wykonywać z uwagi na możliwość wykorzystania wytrzymałości dla całego przekroju.

Problematyczne staje się wtedy określenie i losowość w wystąpieniu pierwszego zarysowania. W zależności, od miejsca w którym wystąpi rysa w przypadku czteropunktowego zginania norma amerykańska [N5] rozróżnia dwa przypadki:

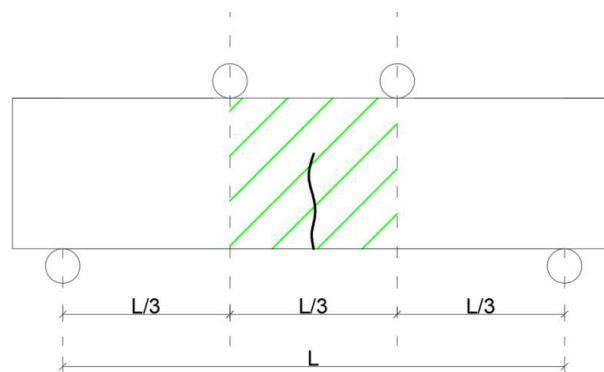
- 1) jeśli rysa wystąpi pomiędzy przyłożonymi siłami, wytrzymałość na zginanie  $R_f$  wyznacza się wg wzoru:

$$R_f = \frac{PL}{bd^2}$$

$b, d$  – wymiary przekroju elementu,

$L$  – rozpiętość elementu (rozstaw pomiędzy podporami),

$P$  – maksymalna zarejestrowana siła.

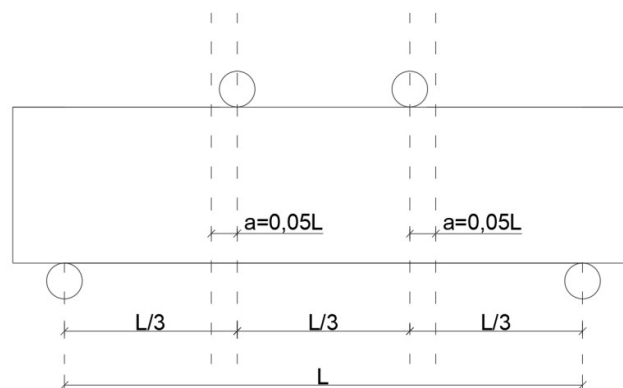


Rys. 16 Obszar możliwości wystąpienia zarysowania mający zastosowanie w podejściu 1 [N5]

- 2) Jeśli pęknięcie wystąpi poza środkową częścią lecz nie dalej niż 5% rozpiętości, wytrzymałość oblicza się ze wzoru:

$$R_f = \frac{3Pa}{bd^2};$$

$a$  – odległość zarysowania od najbliższej przyłożonej obciążenia



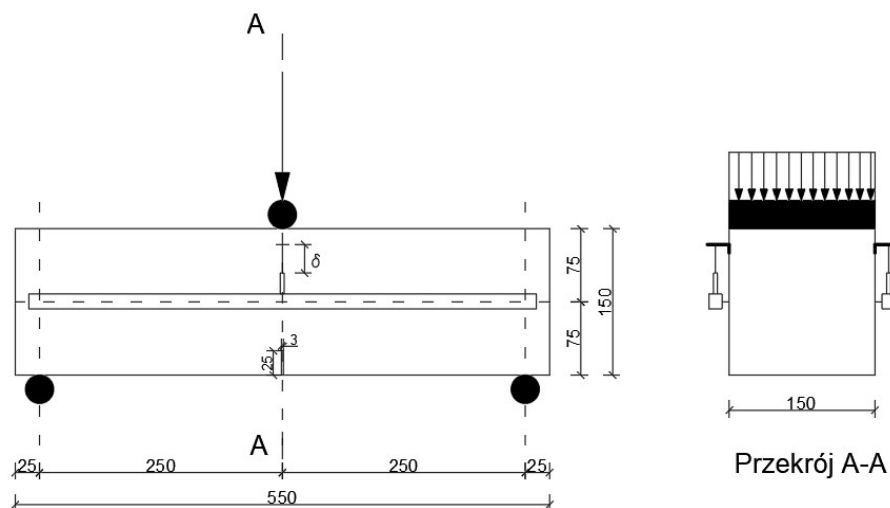
Rys. 17 Obszar dopuszczający wystąpienie pęknięcia poza środkową częścią (zaznaczony maksymalny wymiar) [N5]

Badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu przeprowadza się zazwyczaj na próbkach 150 x 150 x 600 mm [N4]. Dopuszczalne są również inne wymiary próbek (przykładowo, w USA [N2] – 100 x 100 x 500 mm, zalecenia [N3] 100 x 100 x 350 mm). Według normy przyjętej w Polsce [7] przyjęto, że badania należy przeprowadzać na próbkach 150 x 150 x 500 mm z siłą przyłożoną w środku rozpiętości belki. Wszystkie normy bazują na podobnym modelu przeprowadzania badania. Najważniejszą częścią badania jest zarejestrowanie momentu powstania pierwszej rysy oraz siły przy której rysa ta powstała jak również ugięcia elementu.

Uogólnioną zasadę wymiarów próbek przedstawiono na rysunku. Badania mogą być przeprowadzane na betonach, w których średnica największego ziarna kruszywa nie przekracza 32 mm, oraz długość włókien zawartych w próbkach nie przekracza 60 mm [N4]. Próbki do badania powinny być rozformowane po 24 lub 48 godzinach od momentu zabetonowania, a następnie przechowywane w otoczeniu, zapewniającym temperaturę  $+20^{\circ}\text{C}$  i wilgotność względną otoczenia  $> 95\%$ .

W przypadku badania próbek pryzmatycznych o wymiarach 150 x 150 x 600 mm należy wykonać nacięcie w środku rozpiętości. W przypadku próbek o wymiarach 100 x 100 x 400 mm nie zaleca się wykonywania takiego nacięcia [N4].

Próbka umieszczona w maszynie wytrzymałościowej powinna być obrócona o  $90^{\circ}$  względem pozycji zabetonowania tak, aby powierzchnia nie stykająca się z formą podczas wykonywania próby nie miała styku z komponentami maszyny przekazującej siłę lub z podporami. W celu rejestrowania przemieszczenia (ugięcia) badanej próbki należy zamontować czujnik indukcyjny w środku rozpiętości elementu zgodnie z rysunkiem 17 lub od spodu elementu.



Rys.18 Schemat przeprowadzania badania [N4]

## Skurcz

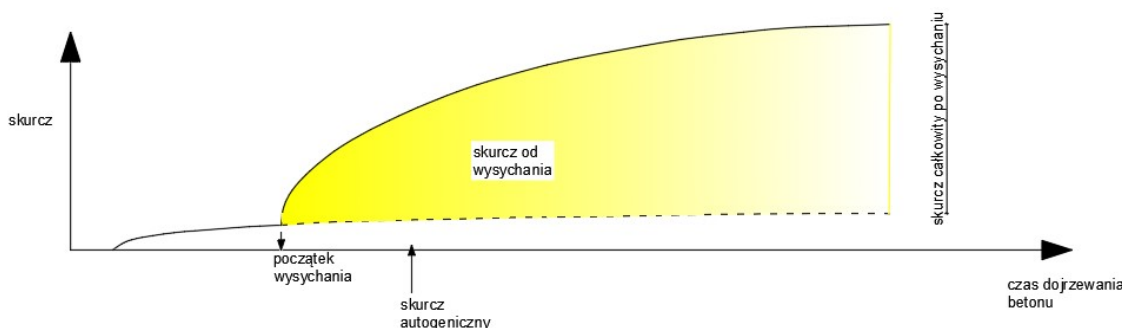
Skurcz jest konsekwencją mechanizmów zachodzących w betonie zarówno z uwagi na kurczenie się samoistne matrycy cementowej oraz ze względu na niekorzystne zazwyczaj otoczenie. Jest on zjawiskiem niepożądanym zarówno ze względu na pogorszone właściwości wizualne, jak i możliwość zniszczenia struktury betonu poprzez na przykład zamarzanie wody w szczelinie skurczowej, jak również zniszczenie stali zbrojeniowej znajdującej się w elemencie poprzez korozję. Ze względu na przyczyny powstawania, rozróżnia się kilka rodzajów skurczu [72, 73, 74, 75]:

- Skurcz autogeniczny – zachodzi podczas odciągania wody z porów kapilarnych podczas hydratacji cementu . Odkształcenia skurczowe podczas skurczu autogenicznego są znacznie mniejsze niż odkształcenia skurczowe od wysychania. Szczególnie wrażliwe na opisywany rodzaj skurczu są betony o niskim stosunku  $w/c$ , masywne elementy betonowe oraz betony wysokich wytrzymałości,
- skurcz od wysychania – spowodowany jest odparowywaniem wody z betonu do otoczenia o mniejszej zawartości pary wodnej. Ma największe znaczenie w konstrukcjach z uwagi na największe odkształcenia. Skurcz autogeniczny jest niemożliwy do wyeliminowania, jednak można ograniczyć jego skutki poprzez właściwą pielęgnację elementów lub poprzez zastosowanie np. zbrojenia rozproszonego,
- skurcz plastyczny – zachodzi gdy beton jest w stanie plastycznym, w elementach wskutek odparowywania wody lub wchłaniania wody z mieszanki przez chłonne podłoże lub otoczenie. Najczęściej obserwowany w posadzkach i elementach powierzchniowych płaskich,
- skurcz chemiczny – zależny od składu mineralnego cementu. Odkształcenia od skurczu chemicznego są znacznie mniejsze niż wartości odkształceń skurczowych podczas skurczu plastycznego.

Ograniczenie skurczu betonu można zrealizować za pomocą poniższych wytycznych:

- obniżenie współczynnika wodno-cementowego ( $w/c$ ),
- zmniejszenie objętości zaczynu cementowego w mieszance betonowej,
- stosowanie kruszywa o jak największym rozmiarze ziaren,
- stosowanie kruszywa płukanego, o jak najniższej nasiąkliwości,
- stosowanie zbrojenia rozproszonego lub domieszek ograniczających skurcz,

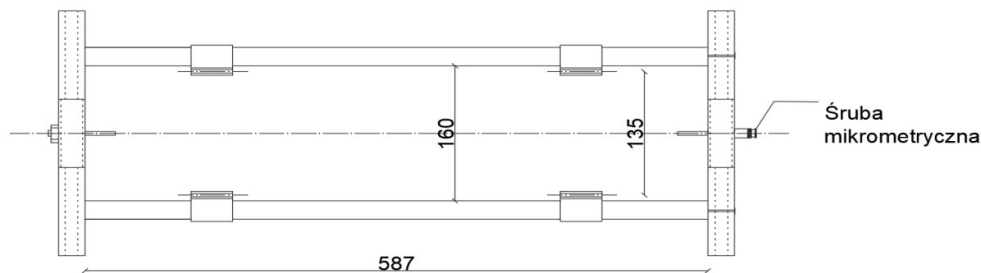
- właściwe przygotowanie podłoża i elementów styku przed betonowaniem,
- przeprowadzanie właściwej pielęgnacji elementów,
- w elementach o dużych powierzchniach wykonanie odpowiednich nacięć dylatacyjnych możliwie najszybciej,
- stosowanie wkładek zbrojeniowych (siatek zbrojeniowych) [77].



Rys. 19. Schematyczne przedstawienie etapów skurczu [76]

Analizując dostępną literaturę [73, 78, 82] można stwierdzić, że skurcz betonu w stosunku do zapraw jest około czterokrotnie mniejszy co potwierdza tezę ograniczenia skurczu betonu poprzez zastosowanie grubego kruszywa. Jednak powołując się na zalecenia dotyczące wykonywania fibrobetonów zawarte w punkcie 2.1.2. niniejszej rozprawy przy stosowaniu zbrojenia rozproszonego nie należy stosować kruszywa o średnicy większej niż 16 mm [79, 80, 81].

Badanie skurczu próbki pozwala na zobrazowanie zmian długości zachodzących w próbce pod wpływem wiązań chemicznych oraz pod wpływem działania czasu. Oznaczanie wielkości skurczu przeprowadza się wg normy [N7]. Urządzenie pomiarowe składa się z ramką ze śrubą mikrometryczną zamocowaną na krótszym boku (rys.20). Dokładność pomiarowa śruby mikrometrycznej wynosi 0,01 mm. Drugim elementem koniecznym do wykonania badania są również ramki stalowe, zakładane na stałe na próbkę wraz z kulkami pomiarowymi o średnicy 20 mm.



Rys. 20 Widok aparatu Amslera (rysunek własny)

Po wykonaniu mieszanki betonowej i ułożeniu jej w formach, należy je umieścić w komorze klimatycznej zapewniającej stałe parametry wynoszącą odpowiednio: temperatura  $18 \pm 2^{\circ}\text{C}$  oraz wilgotność względna powyżej 90%. Próbkę należy rozformować po upływie  $24 \pm 01\text{h}$ . W przypadku gdy wiązanie betonu nie pozwala na rozformowanie lub nie pozwala na zamontowanie ramek pomiarowych, można je przeprowadzić po  $48 \pm 1\text{h}$ . Po rozformowaniu należy umieścić ramki pomiarowe wraz z kulkami i przechowywać w komorze klimatycznej o temperaturze  $18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  oraz wilgotności względnej wynoszącej 65-75 %. Ułożenie próbek nie powinno ograniczać dopływu powietrza z żadnej strony. Próbkę należy oznakować numerami oraz strzałką wskazującą, z której strony jest dokonywany odczyt śrubą mikrometryczną. Przed wykonaniem odczytu Aparat należy umieścić w pomieszczeniu, w którym będzie wykonywany odczyt. Przed wykonaniem pomiaru każdej serii należy wykonać pomiar na wzorcu pomiarowym [N7]. Zmianę długości badanych próbek można obliczyć ze wzoru:

$$\varepsilon_n = \frac{(l_n - l_1) \cdot 1000}{500}$$

gdzie:

$l_n$  – wynik pomiaru próbki po upływie czasu  $n$ ,

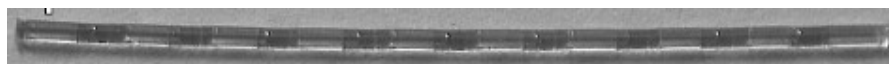
$l_1$  – wynik pierwszego pomiaru próbki po 24h.

#### **2.1.5. Przykładowe badania włókien pochodzących z recyklingu oraz wyniki**

W celu zmniejszenia kosztów oraz oszczędzania energii niezbędnej przy wytwarzaniu materiałów służących do zbrojenia materiałów zastosowano nowatorskie badania nad wykorzystaniem pociętych butelek plastikowych.

##### **Wykorzystanie materiału PET [83]**

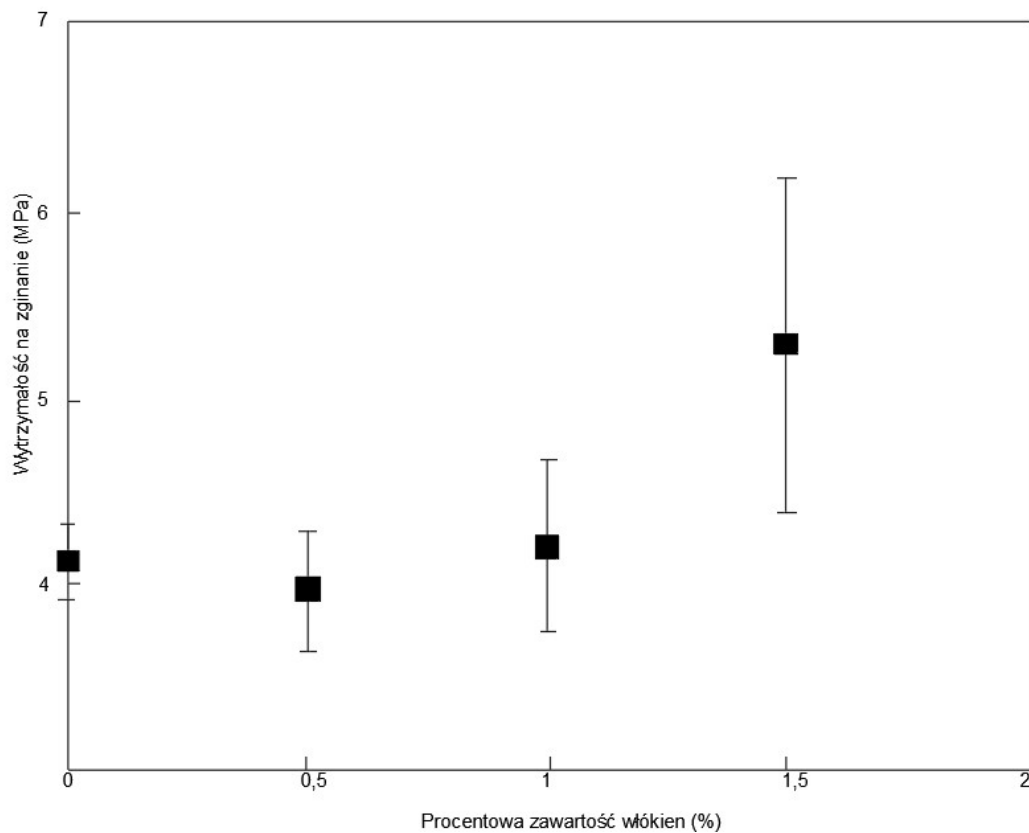
Pierwszym z omówionych badań jest wyprodukowanie włókien powstałych z przetworzonych butelek plastikowych. Efektem było wyprodukowanie cienkich włókien o okrągłym kształcie jak pokazano na rysunku 2.



Rys. 21 Widok powiększonego włókna [83]

W wyniku przetworzenia uzyskano włókna o średnicy 0,7 mm oraz długościach 30 i 40 mm. Długość włókien została dobrana mając na uwadze wytyczne odnośnie optymalnych długości włókien stosowanych do betonów (przede wszystkim utrudnienia związane ze zwiększoną długością włókien w przypadku podawania mieszanki betonowej na miejsce wbudowania).

Przeprowadzono badania próbek na zginanie z trzema różnymi stosunkami w/c: 0,65; 0,60; 0,55 oraz zawartością włókien równą 0%, 0,5%, 1,0% i 1,5%. Badania zostały przeprowadzone na próbkach o wymiarach 100 x 100 x 400 mm. Wytrzymałość na zginanie w przypadku stosunku w/c równego 0,6 oraz różną zawartością włókien została pokazana na rysunku 22.



Rys. 22 Wytrzymałość na rozciąganie dla w/c = 0,6 [83]

Największy wzrost w stosunku do próbki bez dodatku włókien zanotowano dla 1,5% zawartości włókien. Dla zawartości włókien równej 0,5% wytrzymałość na zginanie się pogorszyła. Sytuacja ta znajduje odpowiedź w betonach zbrojonych włóknem stalowym. Wyniki badań dla pozostałych próbek zostały pokazane w tabeli 8.



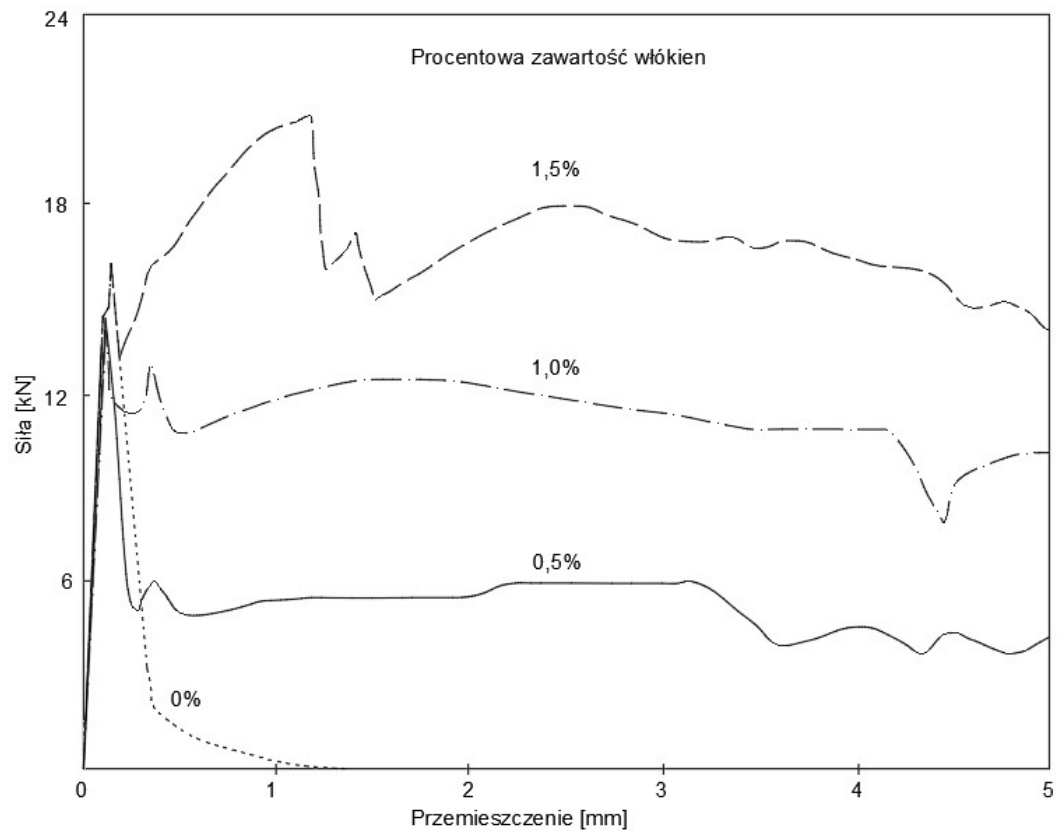
<b>W/C</b>	<b>Procentowa zawartość włókien [%]</b>	<b>Wytrzymałość na zginanie [MPa]</b>
<b>0,65</b>	0	3,82
	0,5	3,75
	1	4,12
	1,5	4,8
<b>0,6</b>	0	4,12
	0,5	3,97
	1	4,21
	1,5	5,29
<b>0,55</b>	0	4,21
	0,5	4,41
	1	4,85
	1,5	5,73

Tab. 8 Wytrzymałość na zginanie w zależności od ilości włókien [83]

<b>W/C</b>	<b>Procentowa zawartość włókien [%]</b>	<b>Wytrzymałość na ściskanie [MPa]</b>	<b>Moduł Younga (10<sup>4</sup> MPa)</b>	<b>Współczynnik Poissona</b>
<b>0,65</b>	0	32,1	2,13	0,2
	0,5	31,4	2,13	0,2
	1	34,8	2,22	0,21
	1,5	34,1	2,23	0,2
<b>0,6</b>	0	34,8	2,65	0,16
	0,5	38,8	2,63	0,28
	1	39,6	2,15	0,2
	1,5	38,8	2,15	0,2
<b>0,55</b>	0	45,1	2,16	0,16
	0,5	45,6	2,09	0,2
	1	47,8	2,33	0,2
	1,5	43,7	2,25	0,2

Tab. 9 Zestawienie wyników badań w zależności od zawartości włókien [83]

Inne badania wykorzystujące butelki zostały przeprowadzone przez D. Foti [9] Różnią się one w stosunku do przedstawionych powyżej tym, że do betonu zostały dodane pocięte części butelek. Do badań użyto pasków o długości 32mm oraz pociętych butelek w kształcie litery „O” (rys.23)



Rys. 23 Zależność siła/odkształcenie dla próbek z różną ilością włókien [9]

Na rysunku 23 pokazano zależność obciążenie – odkształcenie dla wskaźnika w/c równego 0,6. Dla próbki bez dodatku włókien maksymalne ugięcie wyniosło ok. 0,2-0,3mm.

Analizując rysunek można zauważyć, że dla maksymalnej zawartości włókien po pierwszym spadku siły następuje wzrost przenoszanej siły i następnie ponowny spadek. Nawet dla ugięcia równego 5mm element wciąż przenosi siłę równą ok. 14 kN. Po pierwszym zarysowaniu się element dalej przenosi obciążenia tak jak jest to w przypadku włókien stalowych. Podobną zależność zaobserwowano również dla różnych stosunków w/c.

Przeprowadzone zostały również badania wytrzymałości na ściskanie próbek z dodatkiem włókien na próbkach cylindrycznych o wymiarach 100 x 200mm. Uzyskane wyniki modułu Younga i współczynnika Poissona pokazano w tabeli 9.

W celu sprawdzenia połączenia włókien z betonem przeprowadzono również próbę wyciągania z kostki betonowej. Przeprowadzono 10 prób dla każdego włókna dla betonu po 7 dniach. Maksymalna osiągnięta siła dla włókna PET wyniosła 2,8MPa.

Zostały przeprowadzone badania belek o wymiarach 100 x 100 x 400 mm wg poniższego zestawienia (tabela 10).

Próbka	Charakterystyka
1S	Próbka nr 1: Belecзки 100x100x400mm ze zwykłym betonem
1S	Próbka nr 2: Belecзки 100x100x400mm ze zwykłym betonem
1C (0,75%)	Próbka nr 1: belecзки 100x100x400 mm z dodatkiem włókien w kształcie litery "O" o zawartości 0,75% włókien
2C (0,75%)	Próbka nr 2: belecзки 100x100x400 mm z dodatkiem włókien w kształcie litery "O" o zawartości 0,75% włókien
1C (0,50%)	Próbka nr 1: belecзки 100x100x400 mm z dodatkiem włókien w kształcie litery "O" o zawartości 0,50% włókien
2C (0,50%)	Próbka nr 2: belecзки 100x100x400 mm z dodatkiem włókien w kształcie litery "O" o zawartości 0,50% włókien
1FC	Próbka nr 1: belecзки 100x100x400mm z dodatkiem pasków o zawartości 0,50% włókien
2FC	Próbka nr 2: belecзки 100x100x400mm z dodatkiem pasków o zawartości 0,50% włókien

Tab. 10 Zestawienie badań [9]

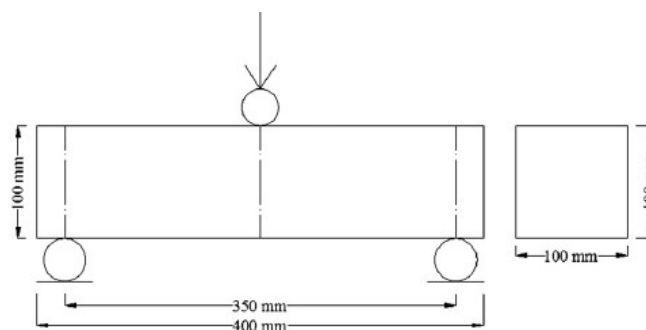


Rys. 24a. Pocięte części butelek w paski [9]



Rys. 24b. Części butelek w kształcie litery „O”[9]

Badania zostały przeprowadzone na zginanie 3P wg poniższego schematu (rysunek 25):



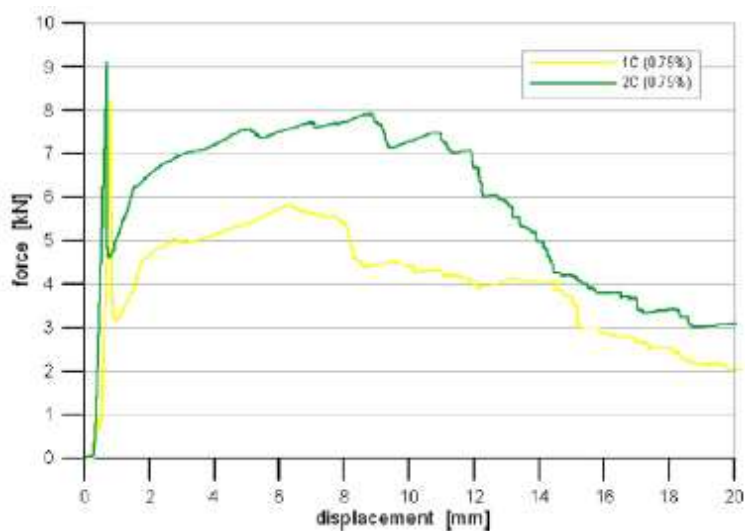
Rys. 25 Schemat obciążenia próbki [9]

Warto zwrócić uwagę na to, że moduł sprężystości materiału PET wynosi  $3100 \text{ N/mm}^2$  i jest mniejszy niż matrycy betonowej.

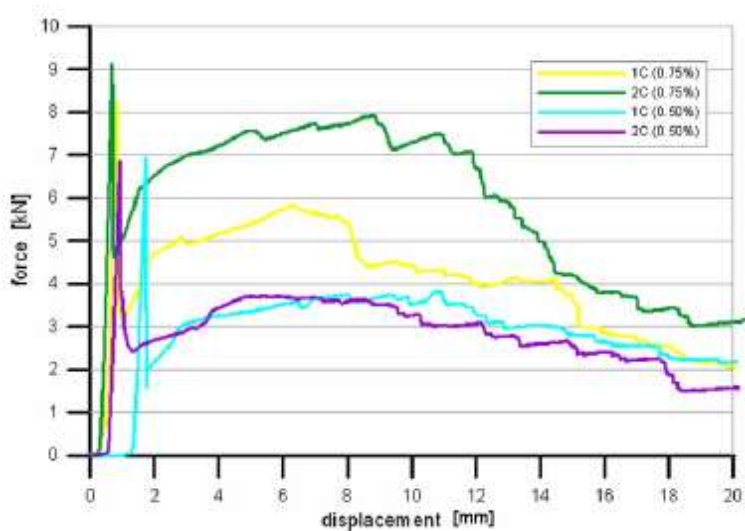
Próbki zostały wykonane z betonu z użyciem CEM II 42,5R z użyciem żwiru i piasku o różnych wymiarach. Do badania wykorzystano pocięte butelki o wymiarach 32 mm długości oraz powierzchni przekroju równej  $2 \times 0,1 \text{ mm}^2$  oraz włókien okrągłych o średnicy  $30 \div 50 \text{ mm}$  i szerokości 5 mm.

Dla betonu z włóknami podczas wzrastającego obciążenia, do momentu zarysowania można zauważyć prawidłowe przenoszenie obciążeń. Po osiągnięciu momenty rysującego następuje spadek przenoszonej siły i większość obciążenia jest przenoszona przez włókna.

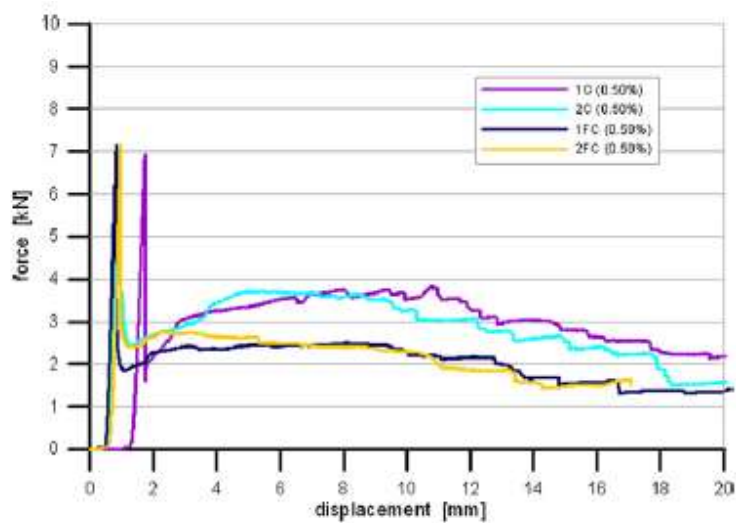
Próbki z włóknami prostokątnymi wykazują niewielki wzrost wytrzymałości, natomiast próbki z włóknami w kształcie litery „O” wykazują większą zdolność do przenoszenia obciążeń. Jest to prawdopodobnie spowodowane ich korzystnym kształtem (posiadają większą przyczepność do betonu spowodowane mniejszą możliwością poślizgu na styku włókna z betonem).



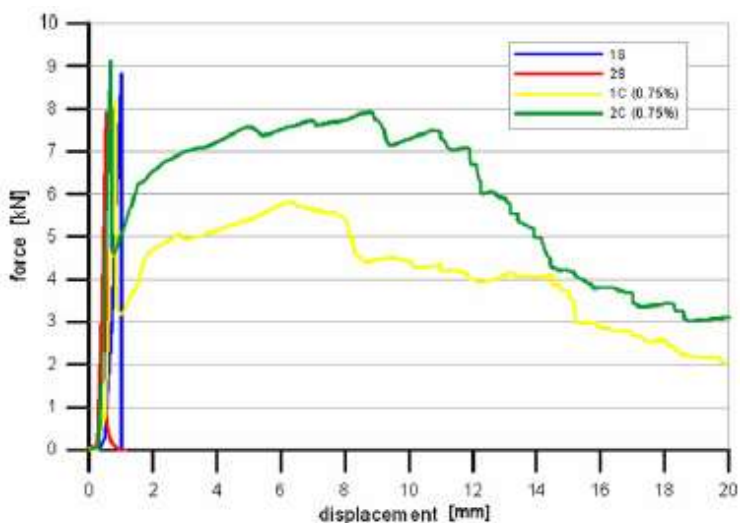
Rys. 26 Zależność siła/przemieszczenie dla próbek z włóknami w kształcie litery „O” przy 0,75% zawartości włókien w próbce [9].



Rys. 27 Zależność siła/przemieszczenie dla próbek z włóknami w kształcie litery „O” przy 0,75% i 0,50% zawartości włókien w próbce [9]



Rys. 28 Zależność siła/przemieszczenie dla próbek z włóknami w kształcie litery „O” i prostych włókien przy zawartości 0,50% [9]



Rys. 29 Zależność siła/przemieszczenie dla próbek bez zbrojenia oraz dla próbek z 0,75% zawartością włókien w próbce [9]

Z powyższych wykresów Autorzy wysnuli wnioski, że dodatek włókien w kształcie „O” daje najlepsze rezultaty w przypadku rozpatrywania pracy elementu po wyczerpaniu nośności w betonie.

Powyższy przykład pokazuje, że dodatek niewielkiej ilości włókien powoduje znaczny wzrost przenoszenia obciążeń po zarysowaniu. Najbardziej jest to widoczne dla włókien „O”.

### Zastosowanie drutów ze zużytych opon jako zbrojenie betonu [7]

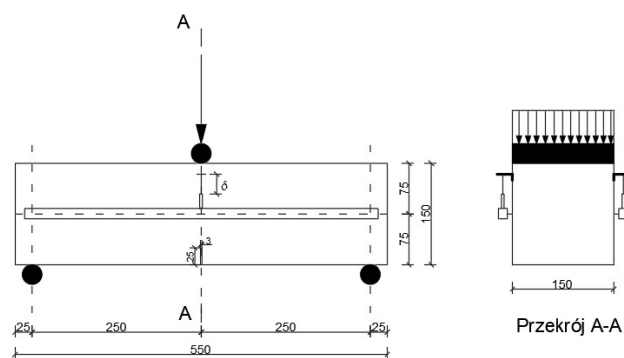
Kolejnym przykładem na zastosowanie materiałów kompozytowych jest umieszczenie drutów powstałych w wyniku recyklingu zużytych opon w betonie. Badania nad tym tematem przeprowadzili również m.in. Zamanzadeh Z, Lourenco L. i Barros J. oraz Łuszczuk K. i Ubysz A. z Politechniki Wrocławskiej [7, 8]. W swoich badaniach użyli oczyszczonego drutu z opon, jak również zanieczyszczonego drutu, jako zbrojenia rozproszonego do betonu i porównali ze zbrojeniem rozproszonym dedykowanym do zbrojenia fibrobetonów. Przeprowadzono badania na kilkunastu próbkach, z różną zawartością włókien stalowych pokazano w tabeli 11.

Głównym celem badań było sprawdzenie postępu propagacji rys oraz jej szerokości w porównaniu do normowych ograniczeń. Tak jak przewidywano włókna zapewniły przenoszenie obciążeń w stanie po zarysowaniu. Zniszczenie nastąpiło w wyniku wyciągnięcia włókien z betonu zarówno w przypadku włókien z recyklingu, jak i włókien produkowanych. Jak można zauważyć na rysunku 31, próbki z dodatkiem włókien z recyklingu osiągnęły mniejsze naprężenia zginające niż próbka z włóknami przeznaczonymi do stosowania do fibrobetonów.

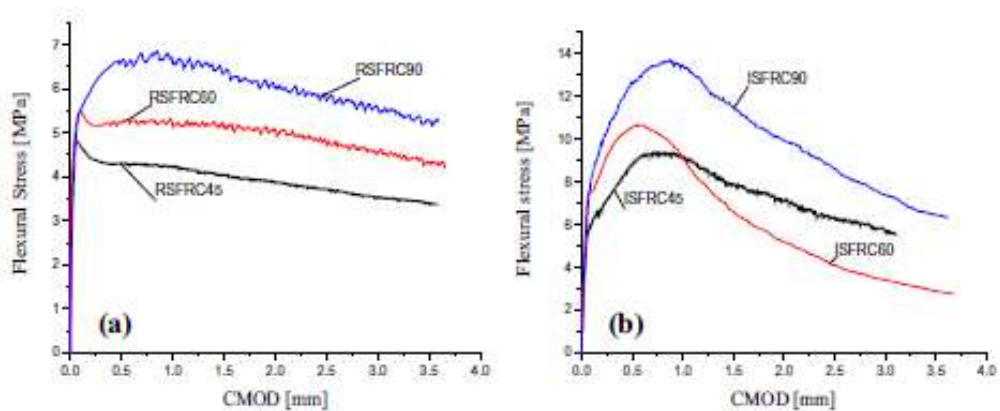
Nazwa serii	Liczba próbek	Zawartość włókien	Procentowa zawartość włókien
		kg/m <sup>3</sup>	%
RSFRC45	10	45	0,57
RSFRC60	10	60	0,77
RSFRC90	4	90	1,15
ISFRC45	4	45	0,57
ISFRC60	4	60	0,77
ISFRC90	4	90	1,15

Tab. 11 Zestawienie badanych próbek [7]

Przeprowadzono badania na zginanie wg poniższego schematu (rysunek 21).



Rys. 30 Schemat obciążenia [7]



Rys. 31 Wykres porównawczy dla włókien z recyklingu (b) oraz dedykowanych do fibrobetonów [7]

## 2.2. Podsumowanie stanu wiedzy

Aktualne badania realizowane na świecie, jak i temat niniejszej pracy doktorskiej wpisują się w ogólnoświatowy nurt gospodarczy dążący do gospodarki *zero waste*. Niniejsze podsumowanie dotyczy stanu wiedzy w wybranych obszarach związanych tematycznie z badaniami realizowanymi w ramach niniejszej dysertacji.

Przegląd literatury wskazuje, na fakt, że wykorzystywanie produktów recyklingowych, jako materiałów konstrukcyjnych jest stosunkowo młodym kierunkiem działań w zakresie ochrony środowiska. Można wskazać tutaj na kilka nurtów działania.

Bierne i aktywne wykorzystanie materiałów recyklingowych. W pierwszym przypadku chodzi o bezpośrednie usunięcie ze środowiska materiałów odpadowych przy zminimalizowaniu skutków ubocznych takich, jak na przykład pogorszenie cech fizycznych materiału konstrukcyjnego. Większość badań zmierza jednak do wtórnego wykorzystania odzyskiwanych materiałów przy możliwie małych nakładach dodatkowych przy recyklingu (np. energetycznych).

Kolejnym nurtem badań jest poszukiwanie materiałów, które można wtórnie wykorzystać jako komponent budowlany. W przeglądzie literatury wskazano tutaj na najczęściej wykorzystywane materiały znajdujące dotychczas zastosowanie w budownictwie. Z uwagi na tematykę pracy ograniczono się do materiałów stosowanych jako komponent w fibrobetonach.

Dalsze badania dotyczą możliwości i sposobu wykorzystania materiałów recyklingowych w elementach konstrukcyjnych, jako materiały izolacyjne i tym podobne. Inne rodzaje zastosowania tychże materiałów nie jest jednak związana tematycznie z niniejszą pracą.

W ramach przeglądu fibrobetonów zwrócono uwagę na metody badawcze, które częściowo zostały wykorzystane przy realizacji niniejszych eksperymentów oraz na istniejące normy i wytyczne do projektowania, które wskazują na istotne dla inżynierów budownictwa parametry konstrukcyjne.

W niniejszej pracy przyjęto jako kierunek działania poszerzenie wiedzy o pochodzących z recyklingu włóknach bazaltowych, jako materiału charakteryzującego się dość dobrymi właściwościami fizykochemicznymi, które z jednej strony mogą spełniać rolę jako wspomagający materiał konstrukcyjny, z drugiej czynią zadość współczesnym wymaganiom dotyczącym ochrony środowiska. Sformułowano przedstawione poniżej zadania i tezy do udowodnienia, które zrealizowano w oparciu o otrzymany materiał badawczy.



### 3. Cele i tezy rozprawy

Rozpoznanie problemu oraz przegląd literatury pozwoliły autorowi na sformułowanie poniższych zadań do zrealizowania w ramach niniejszej pracy doktorskiej:

- |           |  |
|-----------|--|
| Zadanie 1 | Analiza możliwości zastosowania i utylizacji odpadowych włókien bazaltowych na właściwości betonu kompozytowego                        |
| Zadanie 2 | Wpływ zastosowania zbrojenia rozproszonego na zakres quasi kruchych odkształceń betonu, ograniczający katastroficzny proces destrukcji |
| Zadanie 3 | Wpływ odpadowego zbrojenia rozproszonego na możliwość ograniczenia skurczu betonu  |

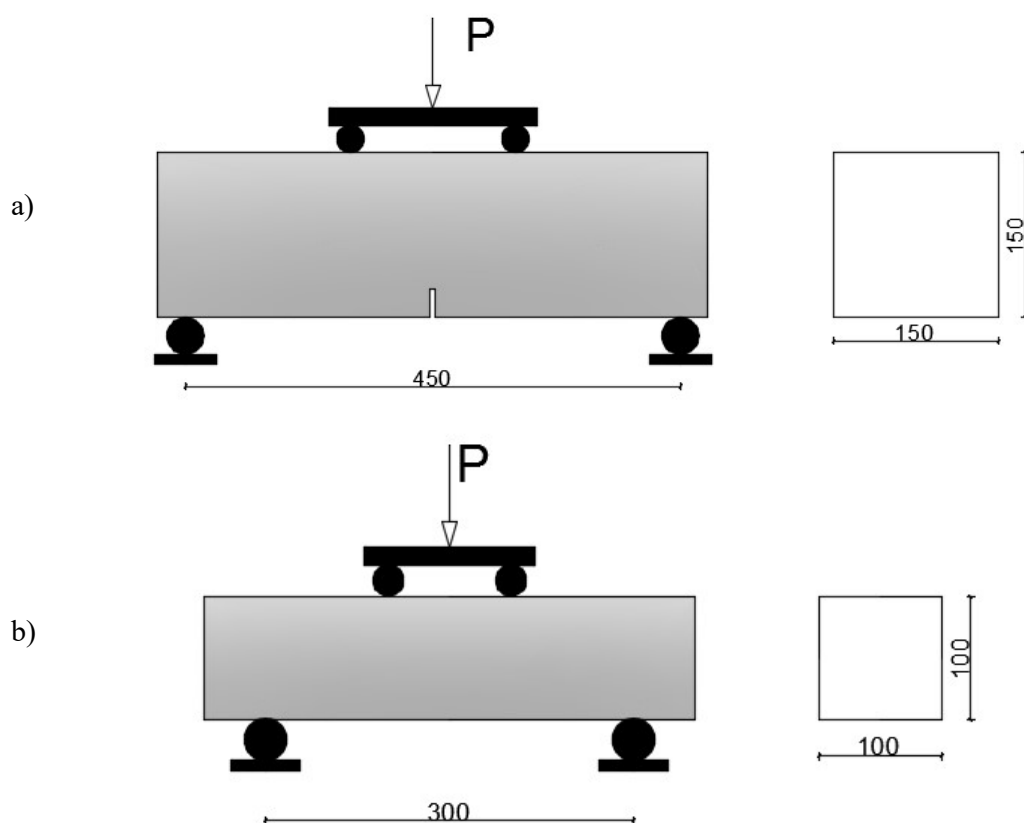
Celem tych zadań jest udowodnienie następujących tez:

1. Odpadowe włókna bazaltowe mogą być wykorzystywane, jako niemetaliczne zbrojenie rozproszone do betonu. W ramach tej tezy postawiono zadanie pozwalające określić optymalny kształt i udział procentowy tych włókien w rozciągany element konstrukcyjnym.
2. Odpadowe włókna bazaltowe spełniają funkcje zbrojenia rozproszonego i ograniczają katastroficzny proces zniszczenia elementu. Przy zastosowaniu tych włókien zniszczenie następuje w sposób kontrolowany.
3. Obróbka termiczna prętów stosowana w celu wyodrębnienia z nich pręcików nie wpływa na wytrzymałość oraz strukturę pręta.

## 4. Część badawcza

### 4.1. Metodyka badań

Wpływ włókien na właściwości betonu przejawia się przede wszystkim zdolnością przeciwdziałaniu powstawania i propagacji rys w betonie. Zastosowanie włókien pozwala również na zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie fibrobetonu, co objawia się wydłużeniem pracy betonu w zakresie sprężystym. Badania przeprowadzone na elementach z dodatkiem m.in. włókien stalowych potwierdzają, że wzrost zawartości włókien w betonie powoduje wzrost jego wytrzymałości. Również cechą charakterystyczną betonów z dodatkiem włókien jest zdolność do przenoszenia naprężeń po osiągnięciu maksymalnego naprężenia rozciągającego (faza pozasprężysta). Z uwagi na trudności w wykonywaniu badań fibrobetonu na rozciąganie wykonuje się badania na rozciąganie przy zginaniu na próbkach 150 x 150 x 500 mm lub na próbkach 100 x 100 x 400 mm. Na rysunku 32 pokazano schemat badania próbek w metodzie czteropunktowego zginania. Badanie wykonuje się za pomocą dwóch sił, w rozstawie L przy jednoczesnym rejestrowaniu siły i ugięcia.



Rys. 32 Schemat badanych próbek

Przeprowadzenie badania musi się odbywać z dużą dokładnością np. poprzez zastosowanie miernika w linii ugięcia wyjściowego położenia osi obojętnej belki lub poprzez rejestrowanie osiadania próbki na podporach (który to sposób został użyty w przeprowadzonych w pracy badaniach). Przy badaniu fibrobetonów na próbkach 150 x 150 x 500 mm zalecane jest wykonanie nacięcia w środku rozpiętości elementu o szerokości nie większej niż 5 mm i wysokości nie większej niż 25 mm. Według normy [N4], w przypadku belek o wymiarach 100 x 100 x 400 mm nie należy wykonywać nacięcia.

Na podstawie wykresu siły zginającej w zależności od ugięcia określa się ilość energii, jaka jest potrzebna do założonego ugięcia. Ugięcie to wynosi 1/150 rozpiętości belki w świetle podpór. Po obliczeniu pracy zginania można obliczyć wytrzymałość równoważną na zginanie, która wyraża się wzorem [N4]:

$$f_{eq} = \frac{T_b}{\delta_{L/150}} \frac{L}{bh^2}$$

gdzie:

- $T_b$  – wyraża pracę zginania obliczoną na podstawie polu powierzchni pod wykresem, ograniczonej rzędną  $\delta_{L/150}$ ,
- $b, h$  – wymiary przekroju poprzecznego belki,
- $L$  – rozpiętość belki.

Wytrzymałość na rozciąganie fibrobetonu  $f_{ft}$  określa się na podstawie maksymalnej siły zginającej. Aby miarodajnie określić wytrzymałość próbki na rozciąganie należy wyniki otrzymane podczas próby zginania próbki porównać z wynikami uzyskanymi podczas zginania próbek betonowych.

#### 4.2. Wykorzystane materiały

Do oceny przydatności materiałów kompozytowych odpadowych jako półproduktu do zbrojenia betonu wykonano odpadowe pręty bazaltowe. Pręty te posiadały następujące defekty:

- nierównomierne i niedokładne pokrycie prętów żywicą, co skutkuje niewłaściwą przyczepnością pręta kompozytowego do betonu oraz brakiem współpracy poszczególnych włókien bazaltowych pomiędzy sobą. Wytrzymałość pręta złożonego z włókien w dużej mierze zależy od sił przyczepności pomiędzy włóknem a żywicą. W niektórych typach prętów powierzchnia włókien jest w odpowiedni sposób preparowana w celu zwiększenia przyczepności pomiędzy włóknem a żywicą (rys. 33) [84], [85],

- pęknięcia wewnętrzne prętów. Pęknięcia te powstały w wyniku połączenia mikropęknięć występujących w wewnętrznej strukturze prętów (rys. 34),
- brak prostoliniowości poszczególnych prętów (rys. 35).



Rys. 33. Nierównomierne rozłożenie i jej przepalenie (fot. Własna)



Rys. 34 Widok pęknięć w przekroju pręta (fot. Własna)



Rys. 35 Brak prostoliniowości prętów (fot. Własna)

### 4.3. *Metoda otrzymania włókien*

Współcześnie wyróżnia się kilka metod recyklingu materiałów kompozytowych. Wśród nich można wyróżnić [86], [87], [88]:

- odzysk chemiczny – możliwość rozkładu odpadów z materiałów kompozytowych na surowce gotowe do ponownego przetworzenia,
- odzyskiwanie fizyczne – metoda kruszenia – bardzo energochłonna i mało ekonomiczna,
- odzysk energii – metoda spalania

Głównym aspektem, którym kierował się autor rozprawy przy wyodrębnieniu włókien z prętów bazaltowych była możliwie najniższa pracochłonność i energooszczędność wybranej metody. Ważne jest, aby przy obróbce materiałów i przystosowaniu ich do ponownego wykorzystania możliwe było zminimalizowanie zużycia energii jak również zminimalizowanie pracochłonności. Te dwa aspekty w dużym stopniu mogą przyczynić się do spopularyzowania i jak większego wykorzystania odpadów kompozytowych do stosowania w budownictwie.

Przygotowanie próbek rozpoczęto od pocięcia prętów kompozytowych na odcinki o długości 50 mm. Długość ta była wynikiem analiz literaturowych dla włókien stalowych oraz warunków między innymi na ograniczenie skurczu (rodz. 2.1.2. niniejszej rozprawy). Również spowodowane było to tym, że w przypadku dodatku włókien do mieszanki betonowej w betonowaniu na obiektach rzeczywistych, w przypadku dłuższych włókien może wystąpić szereg problemów jak odkładanie się włókien na koszu pompy przy podawaniu mieszanki betonowej z włóknami z betonowozu.

Analizę rozpoczęto od ściskania kawałków prętów w prasie wytrzymałościowej zarówno wzdłuż włókien jak i w poprzek. Metodę tą odrzucono ze względu na niszczenie pojedynczych włókien jak również braku kontroli nad powstałym przekrojem poprzecznym nowo powstałych kawałków prętów (rys. 36).

Kolejną rozpatrzoną metodą było umieszczenie pociętych prętów bazaltowych w komorze klimatycznej i poddanie obróbce termicznej w temperaturze 250 °C (rys. 37). Wpływ wysokiej temperatury spowodował zmiękczenie żywicy łączącej włókna i możliwość poddania dalszej obróbce. Kolejnym krokiem było usunięcie „uźebrowania” pręta, służącej do polepszenia połączenia pomiędzy betonem a prętem, która w wysokiej temperaturze odspaja się od pręta. Następnie ponownie wypróbowano miażdżenie prętów na podłożu stalowym jak również na podłożu stalowym z dodatkiem piasku. W obu metodach również nie osiągnięto zamierzonych rezultatów.

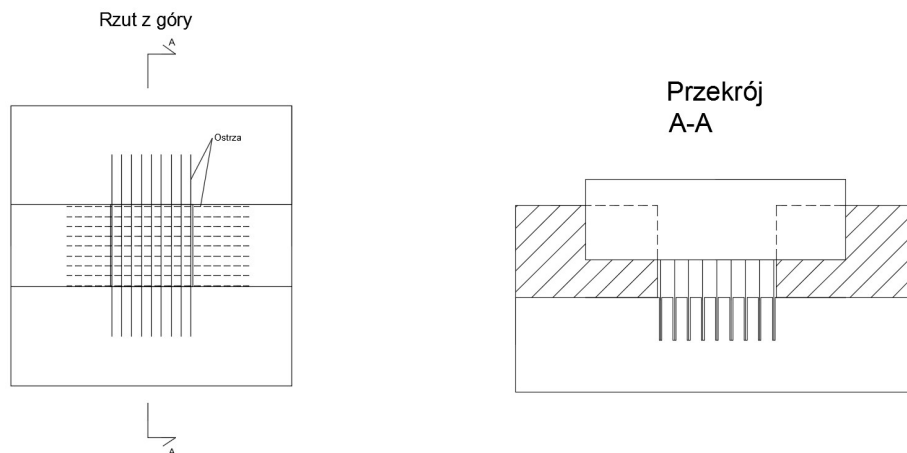


Rys. 36 Widok próbek przy miażdżeniu w prasie pionowo i poziomo (fot. Własna)

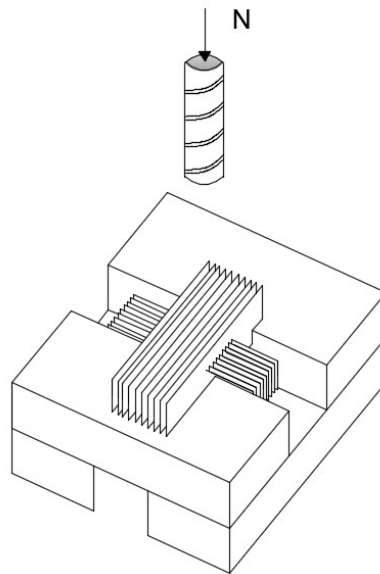


Rys. 37 Próbki umieszczone w komorze termicznej (fot. Własna)

Otrzymanie zamierzonego kształtu jak i struktury rozdrobnionych prętów uzyskano za pomocą „przeciskania” rozgrzanych kawałków prętów przez krzyżowo ustawione ostrza. Wykonane urządzenie przedstawiono na rysunku 38, 39.



Rys. 38 Widok z góry i przekrój urządzenia do rozdrabniania prętów



Rys. 39 Widok urządzenia do rozdrabniania prętów

Przy zastosowaniu „przeciskania” włókien przez ostrza otrzymano kawałki prętów o wymiarach przekroju poprzecznego około 1 x 1 x 50 mm (rys. 40).

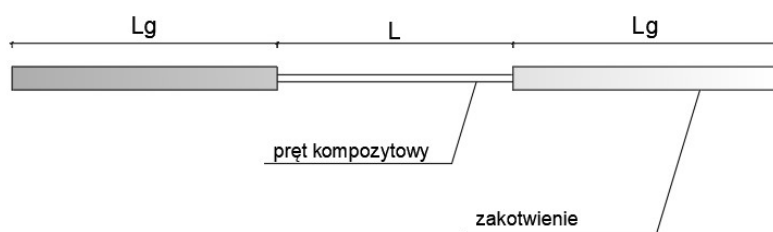


Rys. 40 Widok włókien bazaltowych otrzymanych z rozdrobnienia prętów

## 5. Badania własne

### 5.1. Badanie wytrzymałości na rozciąganie prętów przeznaczonych do wyodrębnienia włókien

W celu sprawdzenie wytrzymałości prętów kompozytowych bazaltowych przed wykonaniem podziału i przed wykonaniem obróbki termicznej, wykonano badanie wytrzymałości na rozciąganie. W celu przeprowadzenia badania wybrano pręty bazaltowe odpadowe o średnicach 6 mm, 8 mm oraz 10 mm. Aby uniknąć zmiężdżenia końcówek prętów poddanych badaniom umieszczono je w tulejach stalowe o średnicy 42,4 mm oraz grubości ścianki równej 4 mm, które w późniejszym etapie zostały zalane żywicą epoksydową zapewniającą właściwą przyczepność zarówno do badanego pręta jak i do rury stalowej [84, 90]. Dodatkowo w celu przeciwdziałania potencjalnemu poślizgowi żywicy epoksydowej na stuku z rurą stalową wykonano wewnętrzne gwintowanie. Następnie element został umieszczony w maszynie rozciągającej w Akredytowanym Laboratorium Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej i przeprowadzono statyczną próbę rozciągania. W trakcie badania rejestrowano zarówno siłę działającą na element oraz przemieszczenie szczęk. Schemat wykonania próbki przedstawiono na rysunku 41. W tabeli 12 natomiast przedstawiono przyjęte wartości długości elementów stanowiących zakotwienie oraz długość bazową pręta kompozytowego (po uwzględnieniu normy [N8]).



Rys. 41 schemat pręta użytego do badań

Średnica pręta	$L_g$	$L$
mm	mm	mm
6	300	240
8	300	320
10	300	400

Tab. 12 Zestawienie badanych średnic



Wytrzymałość pręta  $f_u$  została określona jako stosunek siły niszczącej do nominalnego pola przekroju. Sprawdzono również moduł sprężystości oraz graniczne odkształcenie przy zerwaniu wg poniższych wzorów [89]:

$$f_u = \frac{F_u}{A_f}$$

$$E_f = \frac{(F_2 - F_1)}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot A_f}$$

$$\varepsilon_u = \frac{F_u}{E_f \cdot A_f}$$

gdzie:

$f_u$  – wytrzymałość na rozciąganie,

$F_u$  – siła niszcząca próbkę,

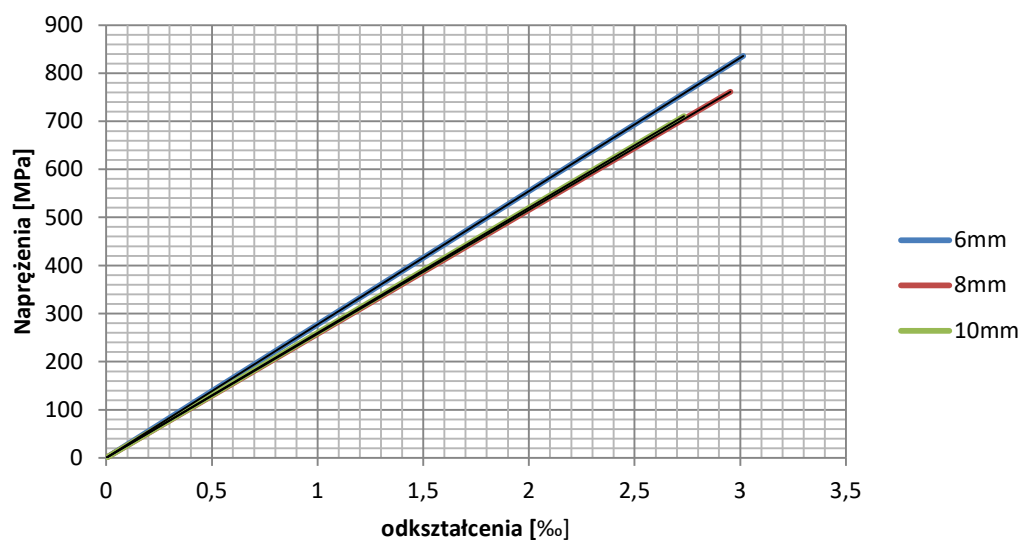
$A_f$  – nominalne pole przekroju,

$E_f$  – moduł sprężystości,

$F_1, \varepsilon_1$  – siła oraz odkształcenie odpowiadające naprężeniu równemu 20% wytrzymałości przy rozciąganiu (zerwaniu próbki),

$F_2, \varepsilon_2$  – siła oraz odkształcenie odpowiadające naprężeniu równemu 50% wytrzymałości przy rozciąganiu (zerwaniu próbki),

## Wytrzymałość na rozciąganie



Rys. 42 Średnia wytrzymałość na rozciąganie prętów bazaltowych z podziałem na średnice

Na rysunku 42 przedstawiono zależność otrzymanych maksymalnych naprężeń oraz odkształceń. Maksymalne naprężenia osiągnięte podczas badania są do siebie mocno zbliżone. W literaturze [91, 92] można uzyskać informację o wytrzymałości na rozciąganie prętów bazaltowych. Porównując wyniki badań z literatury [93] z wynikami badań przeprowadzonymi przez autora można stwierdzić, że mimo licznych defektów poprzez które badane pręty zostały zakwalifikowane jako odpadowe, ich wytrzymałość na rozciąganie praktycznie się nie pogorszyła.

W odróżnieniu od prętów stalowych można zauważyć brak charakterystycznej „fazy płynięcia” – przyrostu odkształceń podczas stałych naprężeń. Zgodnie z przewidywaniami i specyfiką badanych prętów zniszczenie nastąpiło nagle, bez wspomnianej wcześniej fazy wydłużenia.

### **5.2.   *Badanie wytrzymałości na rozciąganie włókien***

W celu uzyskania parametrów wytrzymałościowych otrzymanych włókien przeprowadzono statyczną próbę rozciągania. Przebadano włókna o długości 120 mm o wymiarach przekroju około 4 x 4 mm. W celu zabezpieczenia przed zgnieceniem włókien w prasie wytrzymałościowej umieszczono włókna w tulejach wewnątrz gwintowanych a następnie wypełniono żywicą epoksydową Sikafloor 156. Ciekła konsystencja zastosowanej żywicy zapewniła właściwe wypełnienie tulei jak również włókien, co zaowocowało brakiem wysuwania się „włókna” z tulei umieszczonej w szczękach maszyny wytrzymałościowej.



Rys. 43 Widok próbek do badania wytrzymałości na rozciąganie (1 partia)



Rys. 44 Próbką umieszczoną w maszynie wytrzymałościowej

Następnie próbki umieszczono w maszynie wytrzymałościowej i przy przykładaniu obciążenia przeprowadzono statyczną próbę rozciągania. Zgodnie z przewidywaniami, po osiągnięciu maksymalnej wytrzymałości następowało pękanie badanego elementu w sposób nagły – z pominięciem jak w przypadku badania elementów stalowych fazy plastycznej. Obraz zniszczonej próbki przedstawiono na rysunku 45.

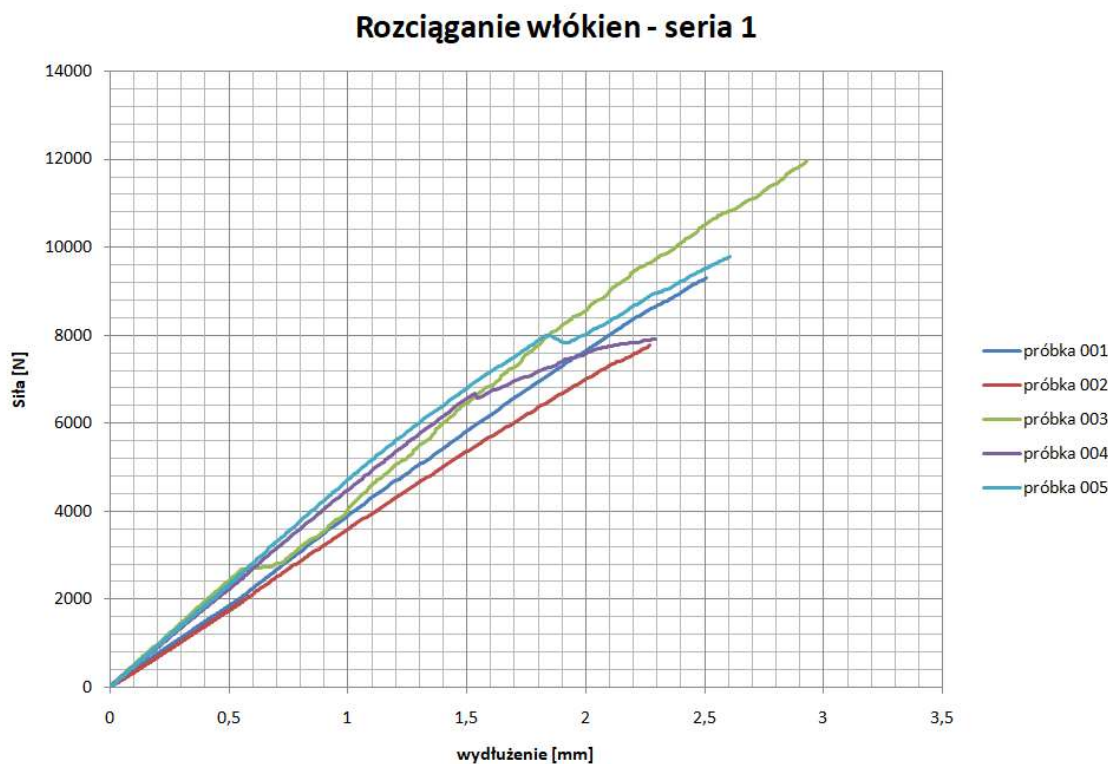


Rys. 45 Obraz zniszczonej próbki

W wyniku badań uzyskano następujące rezultaty (tabela 13)

Lp.	Nr próbki	Powierzchnia	Sila	Wytrzymałość
		mm <sup>2</sup>	N	MPa
1	101	18,4938	9746,28	527,01
2	102	16,3809	7846,22	478,99
3	103	15,1952	12002,10	789,86
4	104	15,9626	8001,12	501,24
5	201	16,3008	9837,32	603,49
6	202	15,4027	9245,87	600,28
7	203	16,0243	9074,00	566,26
8	204	16,2521	9436,00	580,60
9	301	15,7214	9604,00	610,89
10	302	16,8505	10353,00	614,40
11	303	16,8351	10701,00	635,64
12	304	17,1600	10140,00	590,91
13	401	16,8835	9880,00	585,19
14	402	16,8330	10730,00	637,44
15	403	16,9253	9750,00	576,06
16	404	16,0533	9920,00	617,94

Tab.13 Wyniki rozciągania włókien odpadowych



Rys. 46 Wydłużenie badanych włókien w odniesieniu do działającej siły (badania własne)

Analizując wykres wytrzymałości w funkcji (rys. 46) wydłużenia można zauważyć brak fazy płynięcia, który jest charakterystyczny dla stali. Jest to spowodowane właściwościami włókien bazaltowych, które po osiągnięciu maksymalnego wydłużenia nagle pękają. Badania pokazują stosunkowo dużą rozbieżność uzyskanych wyników, co związane jest z niedoskonałością użytych materiałów posiadających różne niedoskonałości opisane w poprzednich rozdziałach.

### 5.3. Zastosowanie otrzymanych włókien do zbrojenia betonu.

W celu weryfikacji możliwości zastosowania otrzymanych włókien jako zbrojenia rozproszonego do betonu wykonano próbki betonowe z dodatkiem włókien bazaltowych jak i próbek betonowych. Z uwagi na brak odniesień w literaturze do zbrojenia betonu takim typem włókien wykonano pilotażowe badania na beleczkach o wymiarach 100 x 100 x 400 mm z dodatkiem włókien w ilości 1%.

Obecnie w badaniach i praktyce budowlanej betony ze zbrojeniem rozproszonym wykonywane są na kruszywie o uziarnieniu do 16 mm. Wielkość ziaren kruszywa znacząco wpływa na rozkład włókien w betonie i lepsze wyniki uzyskiwano dla betonów z mniejszą frakcją kruszywa. Stosowanie kruszyw o grubym uziarnieniu powoduje nierównomierne

ułożenie włókien w mieszance betonowej, a wynikiem tego są trudności w uzyskaniu fibrobetonu o zadawalających parametrach wytrzymałościowych. Przykładowo włókna stalowe ulegają najlepszemu rozkładowi w mieszance złożonej z kruszywa o maksymalnym wymiarze 6 mm. Z tego względu zdecydowano się na wykonanie elementów z betonu, w którym maksymalna średnica ziarna kruszywa wynosi 8 mm. Również z uwagi na brak rozpoznania wpływu podobnych typów włókien na właściwości betonu zdecydowano się na wykonanie wszystkich próbek z jednej receptury betonu, bez uwzględniania dodatków i domieszek poza domieszką uplastyczniającą.

Mieszanka betonowa została przygotowana z zachowanym cyklem technologicznym dla typowo wykonywanych mieszanek. W pierwszej kolejności wymieszano ze sobą wszystkie składniki mieszanki betonowej (poza wodą) i po około 2 minutach dosypano włókna bazaltowe. Po dokładnym wymieszaniu wszystkich składników jako ostatni produkt dodano wodę i mieszano przez 2 minuty w celu dokładnego wymieszania wszystkich składników i równomiernego rozłożenia włókien w mieszance.

Po wymieszaniu wszystkich składników mieszanki, ułożono mieszankę betonową w formach a następnie zawibrowano za pomocą stołu wibracyjnego. Pierwsze zagęszczenie odbyło się po wypełnieniu próbek do połowy wysokości, drugie zagęszczenie odbyło się po całkowitym wypełnieniu próbek. Po betonowaniu górna powierzchnia próbek została zatarta. Rozformowanie elementów nastąpiło na następny dzień i próbki zostały umieszczone w komorze klimatycznej w której przechowywano je przez 28 dni w stałej temperaturze i wilgotności.



Rys. 47 Przykładowe próbki z dodatkiem włókien bazaltowych (fot. Własna)





Rys. 48 Mieszanie składników  
(fot. własna)



Rys. 49 Składniki wraz z dodanymi  
włóknami bazaltowymi (fot. własna)

## 6. Badania właściwości mechanicznych betonu

### 6.1. *Badanie wytrzymałości na ściskanie*

#### 6.1.1. Beton bez dodatku włókien

Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono w Akredytowanym laboratorium Politechniki Wrocławskiej wg metody opisanej w punkcie 2.1.4. niniejszej rozprawy. Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym etapie zbadano próbki betonu po 14 dniach od zabetonowania w celu rozpoznania przyrostu wytrzymałości betonu w początkowym czasie. Próbki z każdej serii zostały przebadane po 28 dniach przechowywania w warunkach normowych.



Rys. 50 Widok próbki w prasie  
wytrzymałościowej przed zniszczeniem



Rys. 51 Widok próbki betonowej po  
zniszczeniu

Na podstawie metody A podanej w normie [N9] sklasyfikowano beton jako C30/37.

### 6.1.2. Beton z dodatkiem włókien bazaltowych w ilości 1%, 1,5%, oraz 2%

Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono po 28 dniach. Próbkę przechowywano w komorze klimatycznej z równomiernym dostępem powietrza z każdej strony.

W tabeli 14 przedstawiono poszczególne wyniki wytrzymałościowe dla przebadanych próbek. Zauważalny jest spadek wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem zawartości procentowej włókien w betonie. W celu weryfikacji i porównania wykonano również badania na próbkach z dodatkiem włókien stalowych w ilościach 1% oraz 2%.

Podczas badania widoczna była różnica w samej charakterystyce pracy i zniszczenia elementu. W przypadku betonu bez dodatku włókien zniszczenie nastąpiło w sposób gwałtowny. Na rysunku 50 przedstawiającym próbkę betonową po zniszczeniu można zauważyć charakterystyczną dla tego rodzaju badania klepsydrę.



Rys. 52 Widok zniszczonej próbki z dodatkiem pręcików bazaltowych



Rys. 53 Widok ułożenia włókien w próbce

Dla próbek z dodatkiem włókien bazaltowych oraz stalowych podczas badania, zniszczenie nie nastąpiło w sposób nagły. Zniszczenie następowało powoli, odmiennie niż w przypadku samego betonu. Można pokusić się o stwierdzenie że zniszczenie nastąpiło w skutek zmiażdżenia betonu. Charakterystyka ta była widoczna wraz ze wzrostem ilości włókien w próbce. Dla próbki z zawartością włókien stalowych równą 2% charakterystyczna po badaniu klepsydra była zauważalna po ręcznym oderwaniu zniszczonego betonu.

Wytrzymałość na ściskanie próbek spada wraz ze wzrostem zawartości włókien. Największe wartości odnotowano dla próbek betonowych. Natomiast próbki z dodatkiem włókien zarówno bazaltowych jak i stalowych wykazywały mniejszą wytrzymałość na ściskanie wraz ze wzrostem zawartości włókien. Spadek wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem zawartości włókien spowodowane jest rozluźnieniem struktury betonu poprzez wtrącenia włókien. Analizując literaturę, wzrost wytrzymałości na ściskanie można uzyskać przede wszystkim za pomocą zastosowania krótkich włókien stalowych [94].

Dodatkowo zauważalna jest różnica w powtarzalności otrzymanych wyników. Próbki z dodatkiem włókien bazaltowych mają stosunkowo duży „rozrzut” wyników w porównaniu np. z próbkami z dodatkiem włókien stalowych. Produkcja włókien stalowych podlega dokładnemu reżimowi technologicznemu. Zarówno gatunek stali z którego są one wykonane, jak i kształt jest ściśle ustalony. W przypadku zastosowanych pręcików bazaltowych nie można powiedzieć o znormalizowanym charakterze (wymiarze i wytrzymałości). Sam proces „odzyskiwania” pręcików z prętów bazaltowych daje pewne niedokładności w wymiarach. Również stosunkowo ciężko jest stwierdzić czy w zastosowanych włóknach nie ma większej zawartości żywicy stosunku do pojedynczych włókien bazaltowych stosunku do innych.



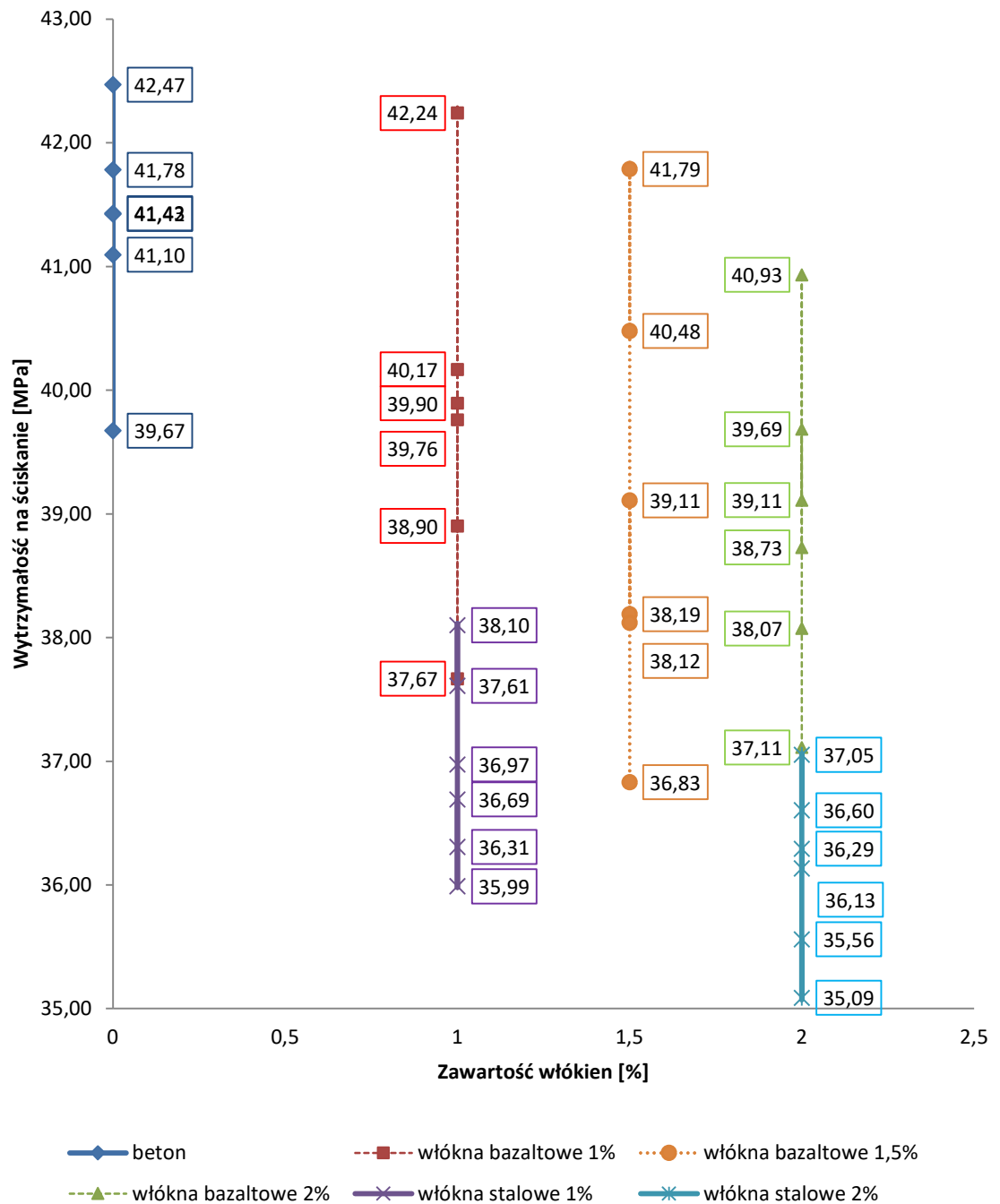
Rys. 54 zniszczona próbka z dodatkiem włókien stalowych



Lp.	Oznaczenie próbki	Zawartość włókien	Pole powierzchni	Okres pielęgnacji	Wytrzymałość na ściskanie	Średnia wytrzymałość
		%	mm <sup>2</sup>	dni	MPa	MPa
0	0	0	22601,23	14	31,41	31,41
1	1	0	22685,05	28	39,67	41,31
2	2		22603,87		42,47	
3	3		22386,63		41,10	
4	4		22084,79		41,43	
5	5		22450,50		41,42	
6	6		22496,99		41,78	
7	B11	1	22635,16	28	39,76	39,77
8	B12		22566,04		37,67	
9	B13		22489,50		42,24	
10	B14		22405,51		40,17	
11	B15		22308,16		39,90	
12	B16		22363,60		38,90	
13	B151	1,5	22479,00	28	40,48	39,09
14	B152		22614,00		41,79	
15	B153		22518,00		38,19	
16	B154		22375,61		39,11	
17	B155		22429,55		38,12	
18	B156		22264,80		36,83	
19	B21	2	22769,48	28	37,11	38,94
20	B22		22456,59		38,07	
21	B23		22475,51		40,93	
22	B24		22500,00		39,11	
23	B25		22426,51		39,69	
24	B26		22464,00		38,73	
25	BS11	1	22467,93	28	37,61	36,94
26	BS12		22441,03		38,10	
27	BS13		22312,81		36,97	
28	BS14		21897,26		36,31	
29	BS15		22507,50		35,99	
30	BS16		22485,00		36,69	
31	BS21	2	22402,60	28	36,60	36,12
32	BS22		22400,92		37,05	
33	BS23		22555,53		36,13	
34	BS24		22594,60		36,29	
35	BS25		22515,00		35,09	
36	BS26		22496,96		35,56	

Tab. 14 Zestawienie otrzymanych wytrzymałości na ściskanie próbek z dodatkiem włókien bazaltowych, stalowych oraz bez dodatków włókien (Oznaczenie B1x, B15x oraz B2x odnosi się do próbek z dodatkiem włókien bazaltowych w ilości 1%, 1,5% oraz 2%. Oznaczenie BS1x oraz BS2x odnosi się do próbek z dodatkiem włókien stalowych w ilości odpowiednio 1% oraz 2%. Oznaczenie samą cyfrą odnosi się do próbek bez dodatku włókien).

## Wytrzymałość na ściskanie



Rys. 55 Wytrzymałość na ściskanie poszczególnych próbek

## 6.2. Moduł sprężystości

Badanie modułu sprężystości zostało przeprowadzone zgodnie z metodą opisaną w punkcie 2.1.4. niniejszej rozprawy na próbkach 150x300mm. Powierzchnie górną oraz dolną, które przylegały do zakończeń prasy maszyny wytrzymałościowej wyrównano za pomocą warstwy gipsu. Badanie przeprowadzono od dolnego poziomu naprężeń wynoszącego  $1/3f_c$  do poziomu górnego wynoszącego  $2/3f_c$ . Wartość wytrzymałości betonu na ściskanie została oszacowana podczas badania wytrzymałości na ściskanie. Dla każdej próbki wykonano trzy cykle obciążanie – odciażanie z chwilowym zatrzymaniem maszyny wytrzymałościowej w celu odnotowania siły oraz odkształceń. Ostatni cykl przeprowadzony był do zniszczenia próbki. Odczyty sił oraz odkształceń podczas przeprowadzania doświadczenia były zapisywane co 0,2 sekundy. Rejestrowanie odkształceń odbywało się za pomocą czujników indukcyjnych.

Lp	Oznaczenie	Wymiar			Masa	Moduł	Średni moduł sprężystości
		D	H	A <sub>śr</sub>		Sprężystość i	
		mm	mm	mm2	g	GPa	
1	B001	150,7	300,4	17704,46	11608,0	38,36	39,15
		150,0	299,8				
		149,8	300,8		0		
2	B002	150,2	300,9	17728,05	11745,0	39,00	
		150,5	301,3		0		
		150,1	301,5				
3	B003	150,3	301,3	17757,96	11740,0	39,89	
		150,4	300,9		0		
		150,4	300,5				
4	B004	150,4	300,0	17757,96	11740,0	39,34	
		150,4	299,6		0		
		150,4	299,2				
5	B005	150,4	298,8	17757,96	11740,0	39,21	
		150,4	298,4		0		
		150,5	298,0				
6	B006	150,5	297,6	17757,96	11740,0	39,12	
		150,5	297,2		0		
		150,5	296,7				

Tab. 15 Zestawienie modułów sprężystości dla próbek betonowych

Lp.	Oznaczenie	Wymiar			Masa	Moduł Sprężystości	Średni moduł
		D	H	A <sub>śr</sub>			
		mm	mm	mm2	g	GPa	GPa
4	WB101	150,10	302,00	17713,11	11655,00	36,89	36,82
		150,20	302,00				
		150,20	301,70				
5	WB102	150,20	299,30	17743,00	11645,50	37,07	
		150,50	299,40				
		150,30	299,60				
6	WB103	150,10	302,80	17724,91	11677,50	36,49	
		150,10	301,20				
		150,50	300,70				
7	WB104	150,61	299,44	17724,91	11677,50	36,59	
		150,80	298,38				
		150,99	297,33				
8	WB105	151,18	296,27	17724,91	11677,50	37,09	
		151,37	198,33				
		151,56	199,10				
9	WB106	151,75	299,42	17724,91	11677,50	36,78	
		150,94	300,11				
		151,13	300,03				
10	WB151	150,94	298,32	17726,34	11685,30	35,69	
		151,06	299,33				
		149,18	299,42				
11	WB152	150,30	300,13	17726,48	11691,25	36,11	
		151,42	300,02				
		150,54	300,10				
12	WB153	149,22	300,22	17726,61	11697,21	36,22	
		149,78	300,15				
		149,26	300,17				
13	WB154	150,11	300,11	17726,75	11703,17	36,42	
		150,21	299,73				
		149,99	299,33				
14	WB155	149,98	300,00	17726,88	11709,12	35,89	
		149,78	297,44				
		149,24	298,99				
15	WB156	150,00	300,02	17727,02	11715,08	35,99	
		150,22	300,00				
		149,26	299,08				

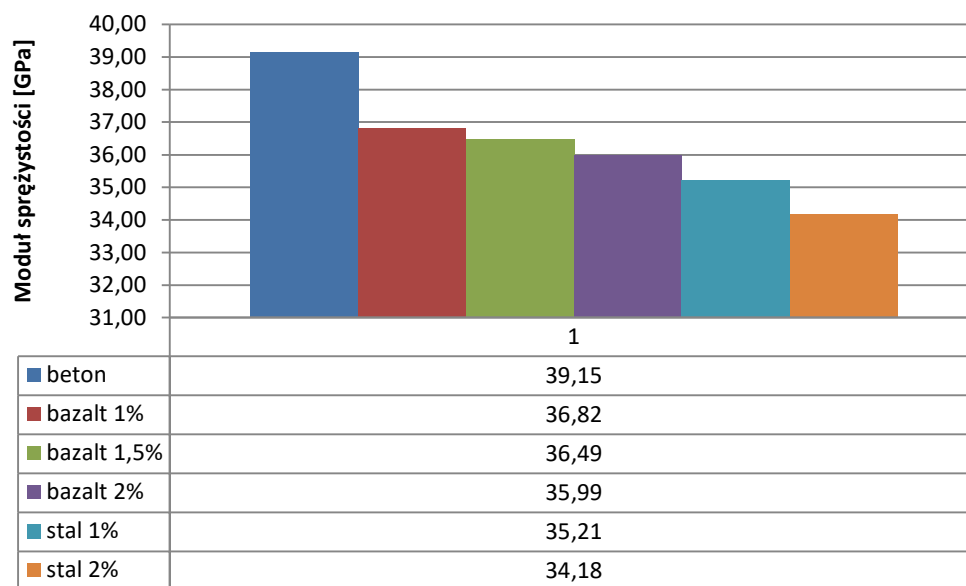
Tab. 44 16 Zestawienie wyników modułów sprężystości dla próbek z dodatkiem włókien bazaltowych w ilości 1% (oznaczenie WB1xx) oraz dla dodatku 1,5% (oznaczenie WB15x)

Lp.	Oznaczenie	Wymiar			Masa	Moduł Sprężystości	Średni moduł
		D	H	A <sub>śr</sub>			
		mm	mm	mm2			
16	WB201	150,11	300,01	17675,06	11718,22	34,78	35,99
		150,00	300,00				
		150,05	300,02				
17	WB202	150,21	300,04	17695,49	11789,21	35,22	
		150,11	300,00				
		150,10	300,02				
18	WB203	149,98	297,44	17656,22	11811,10	34,44	
		149,95	279,89				
		149,99	297,99				
19	WB204	150,00	300,00	17668,00	11793,11	35,00	
		150,04	300,11				
		150,03	300,05				
20	WB205	150,01	299,11	17691,56	1168,22	34,43	
		150,22	299,10				
		150,14	299,89				
21	WB206	149,98	299,97	17648,37	11760,11	34,32	
		149,91	300,00				
		149,93	300,01				
22	WS101	150,00	300,30	17651,83	11780,00	34,58	
		150,00	300,10				
		149,80	300,20				
23	WS102	150,10	300,10	17767,35	11796,28	35,18	
		149,90	300,10				
		149,90	300,10				
24	WS103	150,10	301,00	17661,25	11699,50	34,78	
		149,90	301,10				
		149,90	300,20				
25	WS104	150,54	300,00	17699,76	11704,93	35,78	
		150,30	300,20				
		150,30	300,20				
26	WS105	149,90	300,00	17704,47	11664,68	35,78	
		149,90	300,10				
		150,00	300,00				
27	WS106	150,20	300,10	17709,18	11624,43	35,18	
		150,20	300,20				
		150,20	300,20				

Tab. 17 Zestawienie wyników modułów sprężystości dla próbek z dodatkiem włókien bazaltowych w ilości 2% (oznaczenie WB2xx) oraz dla włókien stalowych w ilości 1% (oznaczenie WS1xx)

Lp	Oznaczenie	Wymiar			Masa	Moduł Sprężystość	Średni moduł
		D	H	A <sub>śr</sub>			
		mm	mm	mm2			
28	WS201	150,20	299,00	17710,75	11611,01	34,50	34,18
		150,10	299,60				
		150,20	300,00				
29	WS202	149,90	300,20	17715,46	11570,76	34,00	
		149,80	300,30				
		149,30	300,20				
30	WS203	151,20	300,10	17720,17	11530,51	33,98	
		151,00	300,20				
		151,00	300,20				
31	WS204	150,30	300,00	17724,88	11490,26	34,21	
		150,40	299,60				
		150,30	299,80				
32	WS205	150,10	300,10	17729,59	11450,01	34,29	
		150,20	300,20				
		150,20	300,20				
33	WS206	150,00	300,20	17734,30	11409,76	34,12	
		149,00	300,10				
		149,50	300,10				

Tab. 13 18Zestawienie wyników modułów sprężystości dla próbek z dodatkiem włókien stalowych w ilości 2% (oznaczenie WS2xx).



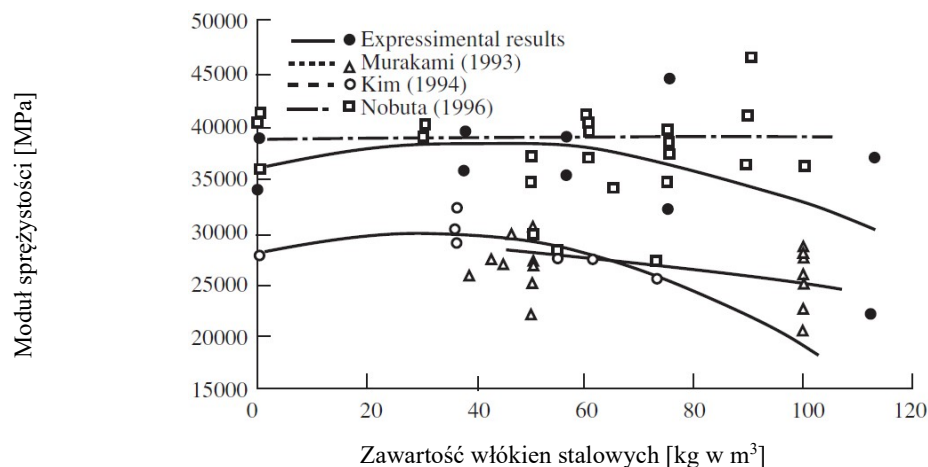
Rys. 56 zbiorcze zestawienie otrzymanych wyników modułów

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć nieznaczny spadek modułu sprężystości próbek wraz ze wzrostem zawartości włókien bazaltowych. Różnica ta nie przekracza 10% co jest wielkością stosunkowo niewielką. W odniesieniu do literatury, w której można znaleźć badania wyników modułu sprężystości betonów z dodatkiem włókien stalowych można wysnuć podobne wnioski [8, 96, 97]. Zastosowanie włókien ogranicza wzrost pęknięć, jak również ogranicza odkształcenia poprzeczne w betonie poprzez ułożenie włókien w sposób prostopadły do działającej siły. W badanych przypadkach wartość modułu sprężystości podczas pierwszego obciążania była mniejsza niż podczas odciążania, co świadczy o uplastycznianiu przekroju w wyniku ściskania. Pozwala to ustalić, że w przypadku zmiany kierunku przyłożenia siły nie dochodzi do całkowitego procesu odwracalności zniszczenia wraz z regeneracją struktury elementu. Na zniszczenie na początkowym etapie ma wpływ zerwanie adhezji pomiędzy kruszywem, włóknami oraz matrycą cementową. Obecność włókien wpływa na odporność, na rozwój mikropęknięć oraz stanowi ograniczenia dla zniszczenia przy ściskaniu dla matrycy betonowej. Jak wspomniano uprzednio mieszanka betonowa użyta do badań wykonana była z kruszywa o uziarnieniu nie przekraczającym 8 mm. Zgodnie z [95]. Stopniowe obniżanie wartości modułów sprężystości oraz – co za tym idzie – wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem zawartości włókien w betonie, może wynikać z różnicy urabialności betonu w mieszance, co w konsekwencji prowadzi do nierównomiernego rozłożenia włókien w próbce, a w szczególności koncentracji grup włókien. Prowadzi to do zmniejszenia wytrzymałość próbki poprzez pustki powietrzne oraz nierównomierne rozłożenie kruszywa.

Według [98] można zauważyć podobne wyniki oraz wysnute wnioski w stosunku do zależności pomiędzy zawartością włókien w mieszance betonowej oraz w stosunku do wytrzymałości na ściskanie. Według badań wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie wzrasta również moduł sprężystości. Natomiast w odniesieniu dodatku włókien stalowych, przy zawartości większych ilości włókien (powyżej 40 kg/m<sup>3</sup>), wartości modułu sprężystości są mniejsze niż przy niższych zawartościach.

Warto zwrócić uwagę na różnicę, która wynika z charakteru pracy betonów z dodatkiem włókien stalowych oraz włókien bazaltowych. Jak wspomniano we

wcześniejszych rozdziałach pracy, specyfika włókien stalowych zapewnia ich bardziej efektywne wykorzystanie w stosunku do zastosowanych włókien bazaltowych.



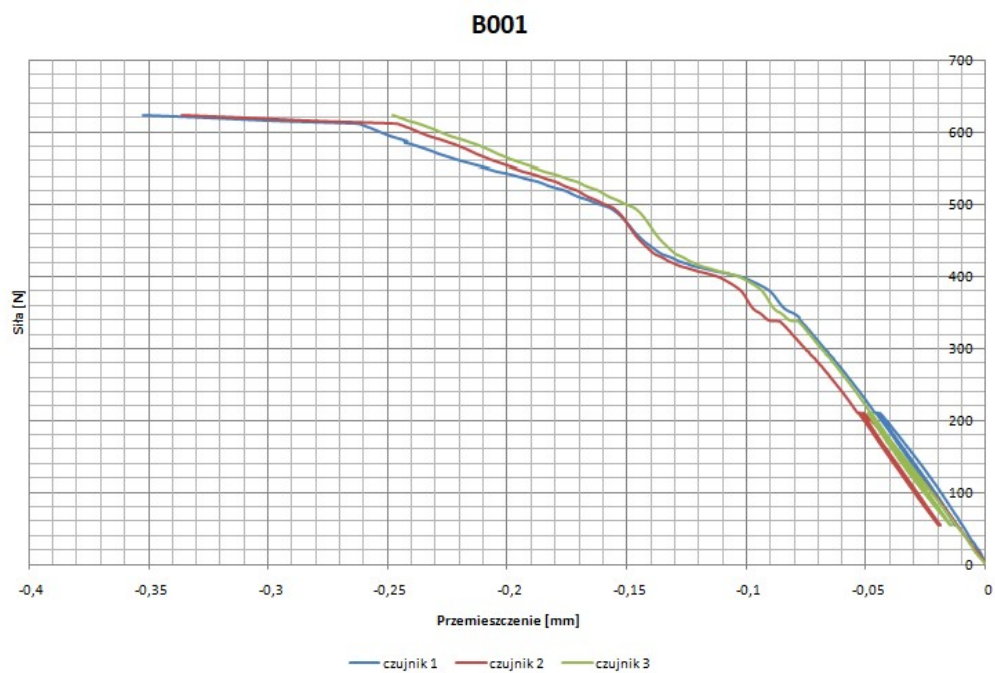
Rys. 57 Wpływ zawartości włókien stalowych na moduł sprężystości [99]

Na rysunkach 58-65 przedstawiono wybrane wykresy zależności przyłożonej siły w stosunku do odkształcenia dla przebadanych próbek. Przedstawiono wykresy pokazujące całkowite osiągnięte siły aż do zniszczenia próbek oraz wykresy pokazujące zachowanie w fazie *obciążanie – odciążanie* we właściwym etapie badań. Podczas badania czujniki były rozmieszczone co  $120^{\circ}$  w rzucie okręgu.

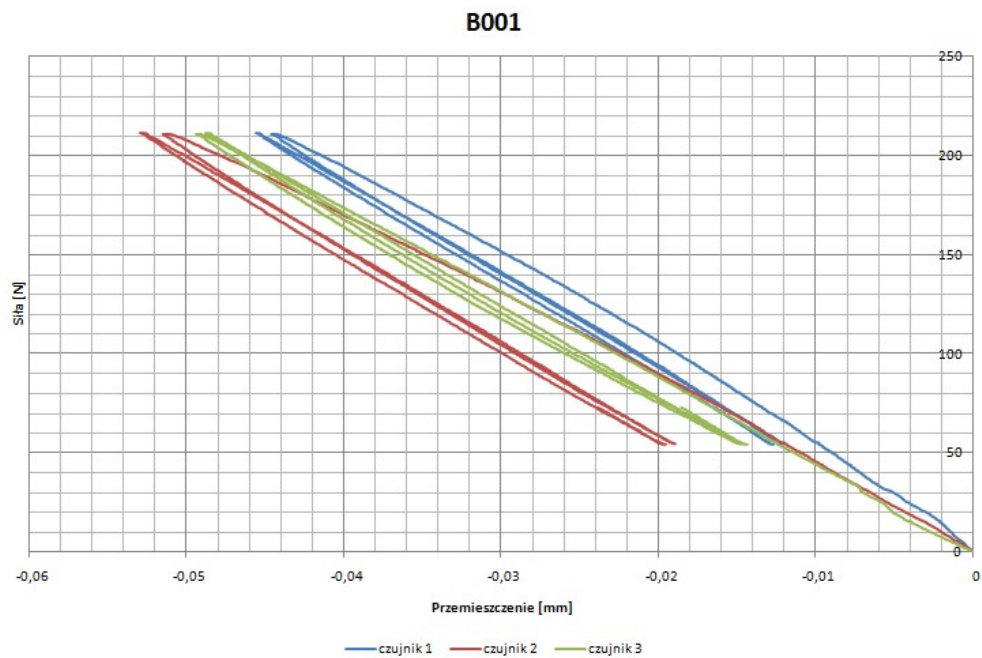


Rys. 58 Widok próbki na stanowisku pomiarowym wraz z czujnikami indukcyjnymi

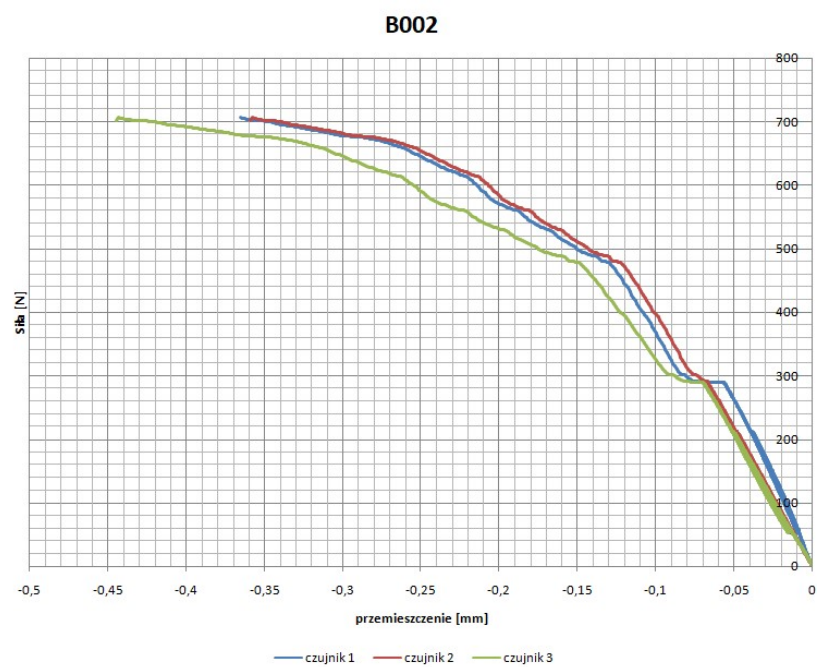




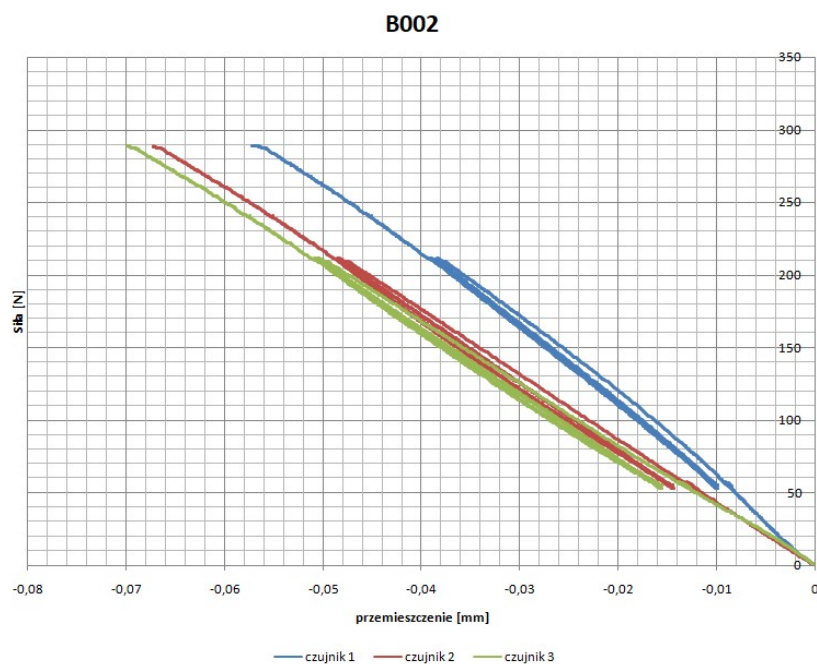
Rys. 59 Odkształcenia próbki betonowej B001



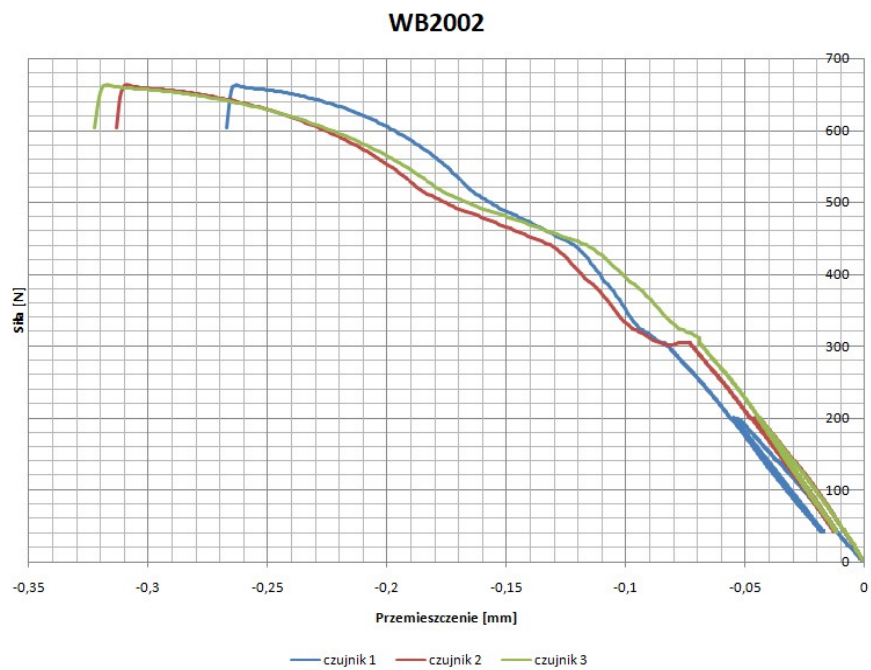
Rys. 60 Odkształcenia próbki betonowej B001 w zakresie  $1/3f_c \div 2/3f_c$



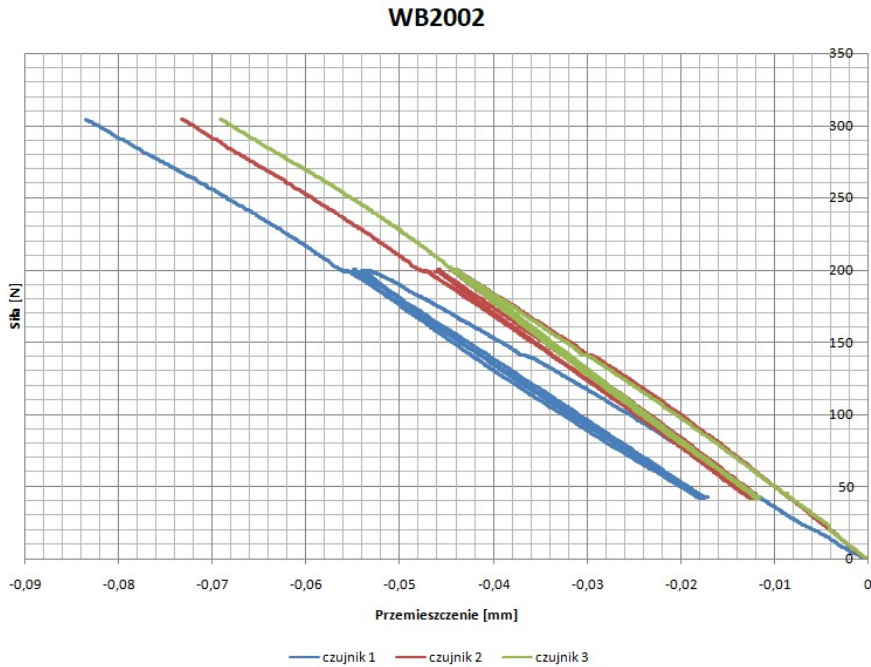
Rys. 61 Odształcenia próbki betonowej B002



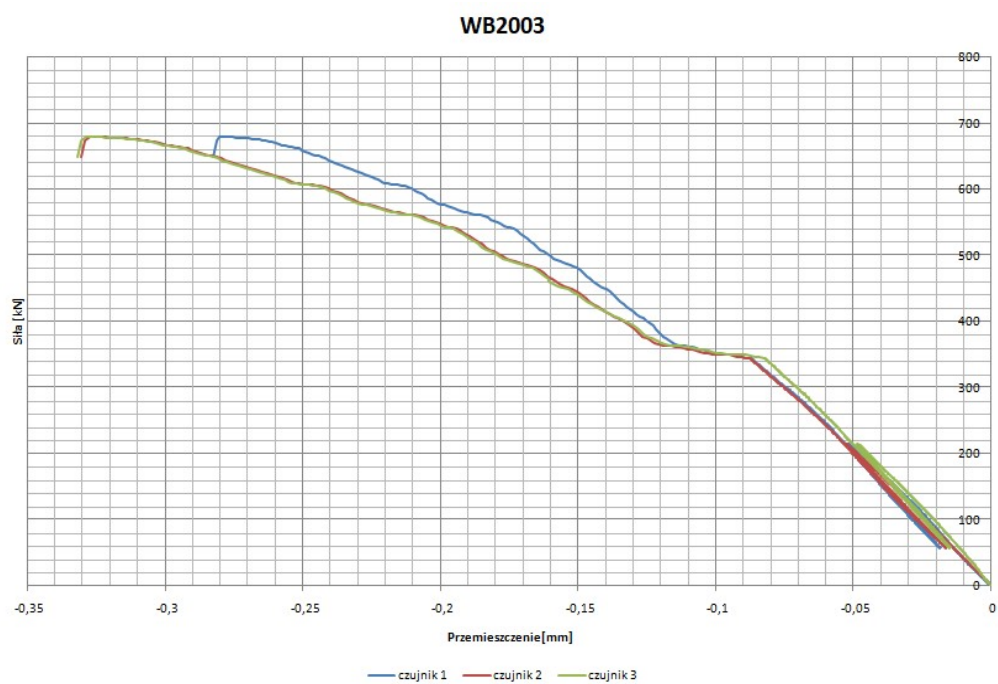
Rys. 62 Odształcenia próbki betonowej B002 w zakresie  $1/3f_c \div 2/3f_c$



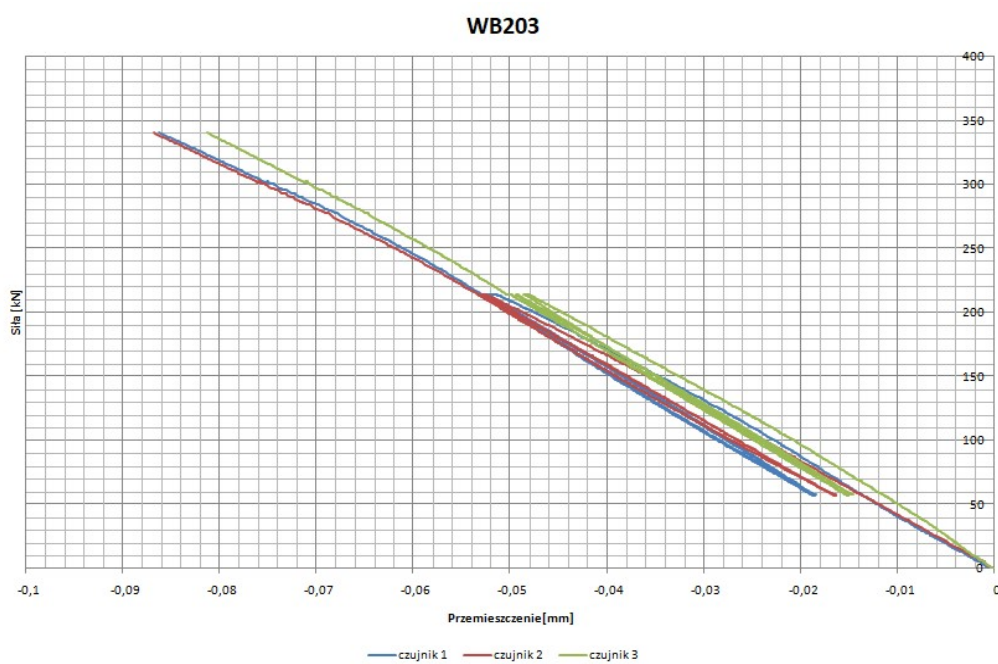
Rys. 63 Odształcenia próbki WB2002 z dodatkiem włókien bazaltowych w ilości 2%



Rys. 64 Odształcenia próbki betonowej WB202 w zakresie  $1/3f_c \div 2/3f_c$



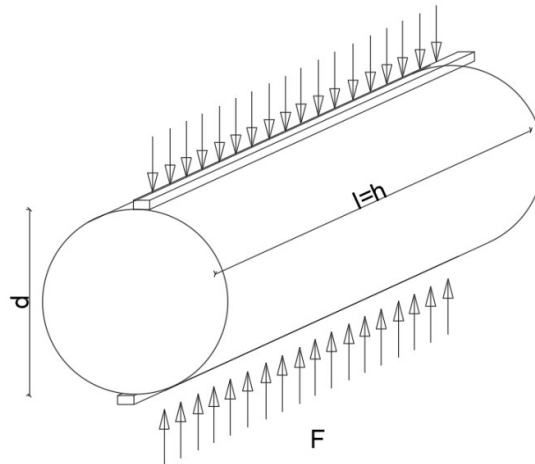
Rys. 65 Odkształcenia próbki WB2003 z dodatkiem włókien bazaltowych w ilości 2%



Rys. 66 Odkształcenia próbki betonowej WB203 w zakresie  $1/3f_c \div 2/3f_c$

### 6.3. Metoda brazylijska

Badanie wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu nazywane jest często metodą brazylijską. Przeprowadza się ją, przykładając siłę przez przekładki o szerokości 0,1d zgodnie z rysunkiem 67. Do badań wykorzystuje się kostki sześciennie o wymiarze boku 150 mm lub walce o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. Próbkę obciąża się w sposób ciągły, wywołując wzrost naprężeń rozciągających w próbce. Obciążenie należy przykładać z prędkością  $0,06 \div 0,04$  MPa/s. Próbkę powinna ulec zniszczeniu w czasie nie większym niż 30 s. Po rozformowaniu próbki były przechowywane w komorze klimatycznej następnie przebadane w maszynie wytrzymałościowej po czasie wyszczególnionym w tabeli 14. Przed badaniem próbki wyciągnięto na około 4h z komory klimatycznej i umieszczono w pomieszczeniu przeprowadzanego badania. Próbki zostały pomierzone a następnie przebadane. W tabeli 14 przedstawiono wyniki uzyskanych badań



Rys. 67 Schemat badania próbki walcowej metodą brazylijską

Analizując przedstawione wyniki badań zauważalny jest wzrost wytrzymałości wraz ze wzrostem zawartości fazy włóknistej. Średnia wyników uzyskanych dla próbek z dodatkiem odpadowych włókien bazaltowych ilości 2% jest większa od betonu bez dodatku fazy włóknistej o 63% natomiast w przypadku dodatku 1% wzrost wynosi tylko

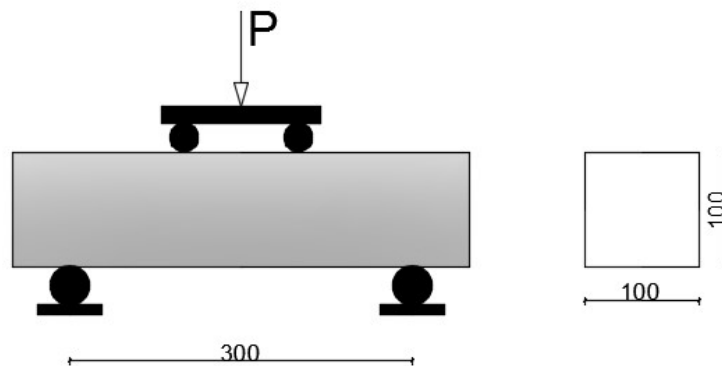
13%. Warto zwrócić uwagę na współczynnik zmienności, który wraz ze wzrostem ilości włókien jest niższy w odniesieniu do próbek betonowych. Oznacza to poprawę współpracy betonu oraz włókien i uzyskanie wyników o mniejszej różnorodności.

Lp.	oznaczenie	Wiek próbki	masa	wytrzymałość	wytrzymałość średnia	Odchylenie standardowe	współczynnik zmienności
		[dni]	[g]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
1	B001	28	22372	1,1	1,16	0,073	6,287
2	B002		22648	1,2			
3	B003		22638	1,1			
4	B004		21637	1,2			
5	B005		21327	1,3			
6	B006		21331	1,1			
7	B007		23996	1,2			
8	B008		23248	1,1			
9	B009		21322	1,1			
10	WB101		22425	1,4	1,31	0,078	5,962
11	WB102		22319	1,2			
12	WB103		22625	1,4			
13	WB104		21999	1,3			
14	WB105		22174	1,4			
15	WB106		22638	1,3			
16	WB107		22351	1,3			
17	WB108		22854	1,3			
18	WB109		22633	1,2			
19	WB201		23010	1,8	1,89	0,078	4,139
20	WB202		23261	1,9			
21	WB203		23157	1,8			
22	WB204		23278	2,0			
23	WB205		23300	1,9			
24	WB206		23268	1,9			
25	WB207		23198	1,9			
26	WB208		22997	1,8			
27	WB209		23100	2,0			

Tab. 14. Zestawienie wytrzymałości wg metody brazylijskiej

#### 6.4. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu

Badania przeprowadzono według procedury opisanej w punkcie wcześniejszym niniejszego opracowania na beleczkach o wymiarach 100 x 100 x 400 mm wykonanych wg poniższego schematu (rys. 67)



Rys. 68 Schemat badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu

W celu możliwości oceny braku przemieszczeń i osiadania na podporach umieszczono czujniki indukcyjne w osiach podpór. Czujnik ugięcia elementu został umieszczony w środku rozpiętości elementu po przyklejeniu od spodu blaszki umożliwiającej poprawny odczyt odkształceń po zarysowaniu. Aby uniknąć uszkodzenia czujnika w szczególności podczas badania próbek betonowych został on umieszczony w pierścieniu stalowym zapobiegającym zniszczeniu czujnika przy nagłym złamaniu elementu.

Próbki zostały przebadane w Akredytowanym Laboratorium Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej. Obciążenie przekazywano na próbkę za pomocą dwóch sił skupionych przy użyciu tłoka przemieszczającego się z prędkością 0,5 mm/min. Badania przeprowadzono w rozstawie podpór 300 mm bez nacięcia w środku rozpiętości zgodnie z zaleceniami [N4].





Rys. 69 Widok próbki na stanowisku pomiarowym



Rys. 70 Widok zniszczonej próbki



## **Opis zniszczenia**

### *Próbki z dodatkiem włókien bazaltowych odpadowych*

Próbki z dodatkiem włókien bazaltowych w ilości 1% zostały przebadane w pierwszej kolejności. W zakresie pracy sprężystej elementu dodatek w znaczący sposób nie wpłynął na charakter pracy elementu. Przede wszystkim nie została poprawiona wytrzymałość w zakresie sprężystym. Natomiast w zakresie pozasprężystym, zgodnie z przewidywaniami obciążenie jest przenoszone przez umieszczone w próbce włókna. Analizując wykres po wystąpieniu pierwszego zarysowania zauważalne jest „poszarpanie wykresu”. Spowodowane jest ono sukcesywnym wyciąganiem włókien z betonu wraz ze wzrostem przyłożonego obciążenia. Pozwala to na wysnucie stwierdzenia, że ilość włókien bazaltowych jest niewystarczająca. Nie współgra ona w całości z betonem. Drugim powodem zaistniałej sytuacji jest zastosowanie włókien bez ulepszeń zwiększających zakotwienie w betonie. W odróżnieniu do włókien stalowych, gdzie jest dostępny cały wachlarz włókien z modyfikacjami polepszającymi zakotwienie w zastosowanej przez autora koncepcji nie zastosowano środków polepszających przyczepność. We wstępnych badaniach autor podjął próby zwiększenia chropowatości powierzchni lub zmianę kształtu szczególnie na końcach włókien. Jednak z uwagi, że każde włókno wymagało praktycznie osobnego podejścia i modyfikacji co zaprzecza głównemu celowi minimalizacji pracochłonności i energochłonności autor podjął decyzję wykorzystania włókien bez modyfikacji. W opisywanym przypadku miało to duże znaczenie na zaistniałą sytuację wyciągania włókien z betonu.

Zastosowane włókna mają również większą masę w przeliczeniu na jedną sztukę niż na przykład włókna stalowe. Wynika z tego stosunkowo mała ilość w przeliczeniu na sztuki zbrojenia rozproszonego bazaltowego.

Na wykresach 71 - 75 Pokazano widok próbek zarówno z dodatkiem bazaltu jak i czysto betonowych. Zniszczenie następowało w wyniku dwóch schematów: poprzez wyciągnięcie włókien z betonu, jak również poprzez zniszczenie (rozerwanie) samych włókien (w mniejszym stopniu).

Oznaczenie	Wymiary		Siła rysująca	Siła niszcząca	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu	Wytrzymałość średnia
-	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	N	N	MPa	MPa
B001	100,04	100,06	-	10833,70	4,33	5,17
	100,08	100,07				
	100,05	100,05				
B002	100,03	100,02	-	14732,10	5,90	
	100,01	99,96				
	99,90	99,97				
B003	100,09	100,07	-	12691,90	5,07	
	100,04	100,05				
	100,05	100,07				
B004	100,05	100,04	-	12789,24	5,11	
	100,02	100,03				
	100,04	100,05				
B005	100,01	100,03	-	13649,37	5,46	
	100,04	100,03				
	100,02	100,02				
WB101	100,03	100,03	10638,22	14521,22	5,80	
	100,02	100,04				
	100,05	100,04				
WB102	99,80	99,91	10847,11	13981,59	5,60	
	100,01	100,02				
	100,02	99,91				
WB103	100,00	100,02	11034,22	14023,22	5,61	
	100,03	100,04				
	100,04	100,02				
WB104	100,14	100,12	10694,89	14228,72	5,67	
	100,10	100,10				
	100,09	100,12				
WB105	100,06	100,07	10984,25	14372,14	5,74	
	100,08	100,09				
	100,10	100,08				

Tab. 15 Zestawienie otrzymanych wyników podczas badania wytrzymałości na rozciąganie wraz z obliczoną wytrzymałością.

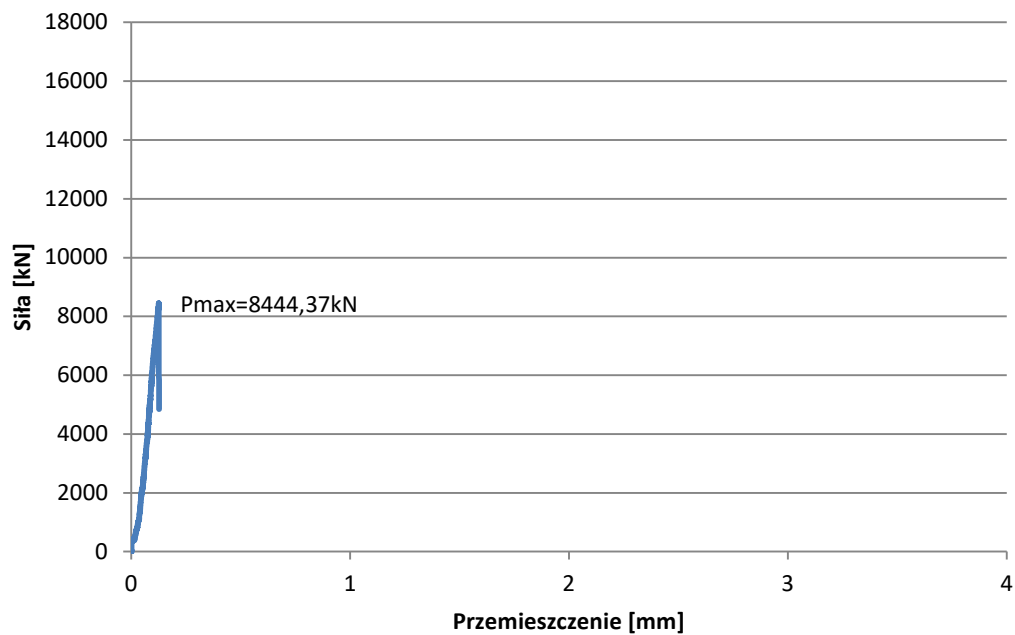
Oznaczenie	wymiary		siła rysująca	siła niszcząca	wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu	wytrzymałość średnia
-	d1	d2	N	N	Mpa	Mpa
WB151	100,13	100,14	14673,22	16472,90	6,57	6,48
	100,14	100,12				
	100,09	100,11				
WB152	100,04	100,06	15232,22	16898,90	6,75	
	100,07	100,06				
	100,05	100,05				
WB153	100,02	100,03	14899,12	16218,24	6,48	
	100,04	100,07				
	100,09	100,06				
WB154	100,08	100,08	14793,22	17472,90	6,98	
	100,07	100,06				
	100,05	100,07				
WB155	100,05	100,04	11383,20	14076,60	5,62	
	100,02	100,04				
	100,05	100,05				
WB201	100,01	100,02	16145,26	18153,21	7,26	
	100,02	100,01				
	100,00	100,01				
WB202	99,98	99,99	16036,25	18002,14	7,20	
	100,00	100,01				
	100,02	100,00				
WB203	100,04	100,02	15947,53	17847,21	7,13	
	100,00	100,01				
	100,02	100,03				
WB204	100,01	100,04	15192,94	16739,22	6,69	
	100,06	100,05				
	100,03	100,02				
WB205	100,04	100,03	16024,21	17979,34	7,19	
	100,01	100,01				
	100,00	100,02				

Tab. 16 Zestawienie otrzymanych wyników podczas badania wytrzymałości na rozciąganie wraz z obliczoną wytrzymałością.

Oznaczenie	wymiary		siła rysująca	siła niszcząca	wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu	wytrzymałość średnia				
-	d1	d2	N	N	Mpa	Mpa				
WS101	99,97	99,99	12257,12	15518,60	6,21	6,48				
	100,00	100,01								
	100,01	99,99								
WS102	100,02	100,03	13290,47	17731,78	7,09		6,48			
	100,03	100,02								
	100,00	100,01								
WS103	99,98	99,99	13480,73	17025,04	6,81			6,48		
	99,99	100,00								
	100,00	99,99								
WS104	100,01	100,02	13202,47	16026,18	6,41				6,48	
	100,02	100,03								
	100,03	100,02								
WS105	100,01	99,98	8472,10	14740,50	5,90					6,48
	99,94	99,96								
	99,97	99,99								
WS201	99,98	100,00	22739,22	32018,22	12,80	12,38				
	100,02	100,03								
	100,03	100,01								
WS202	100,00	100,00	21792,58	30142,12	12,05		12,38			
	100,00	100,01								
	100,02	100,01								
WS203	100,05	100,07	23849,17	31829,52	12,71			12,38		
	100,08	100,08								
	100,07	100,06								
WS204	100,03	100,03	24272,29	29974,69	11,98				12,38	
	100,02	100,01								
	100,00	100,02								
WS205	100,01	100,02	23947,12	30948,88	12,37					12,38
	100,03	100,04								
	100,05	100,03								

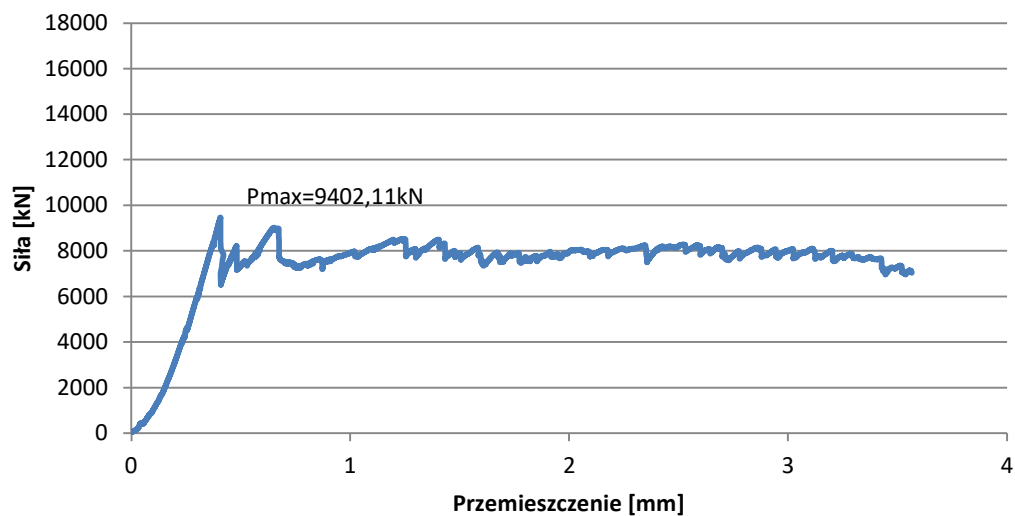
Tab. 17 Zestawienie otrzymanych wyników podczas badania wytrzymałości na rozciąganie wraz z obliczoną wytrzymałością.

## Beton bez dodatku włókien

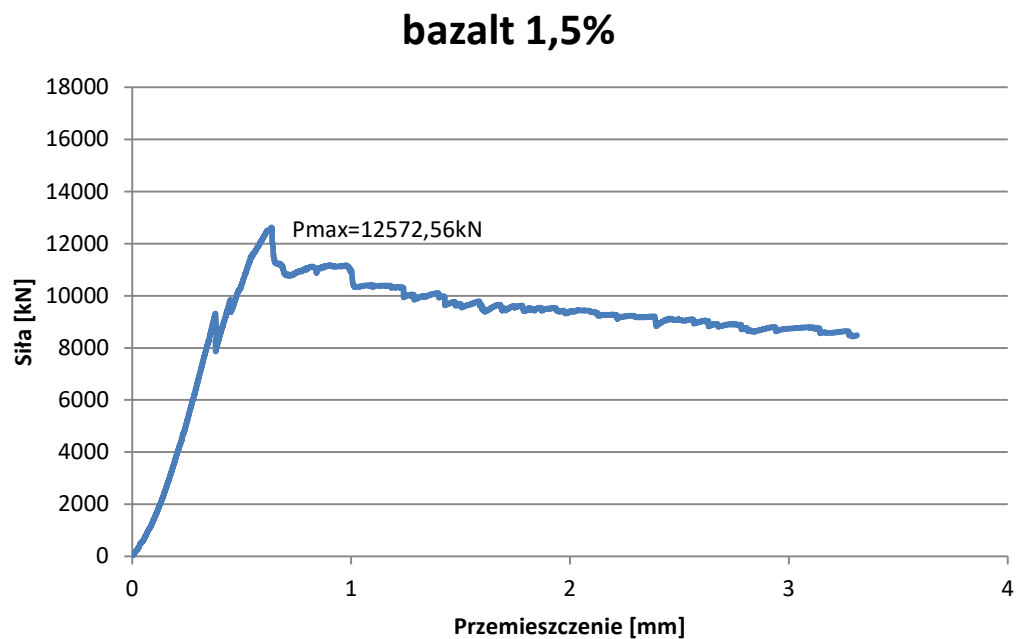


Rys. 71 Zależność siła – przemieszczenie dla przykładowych próbek betonowych

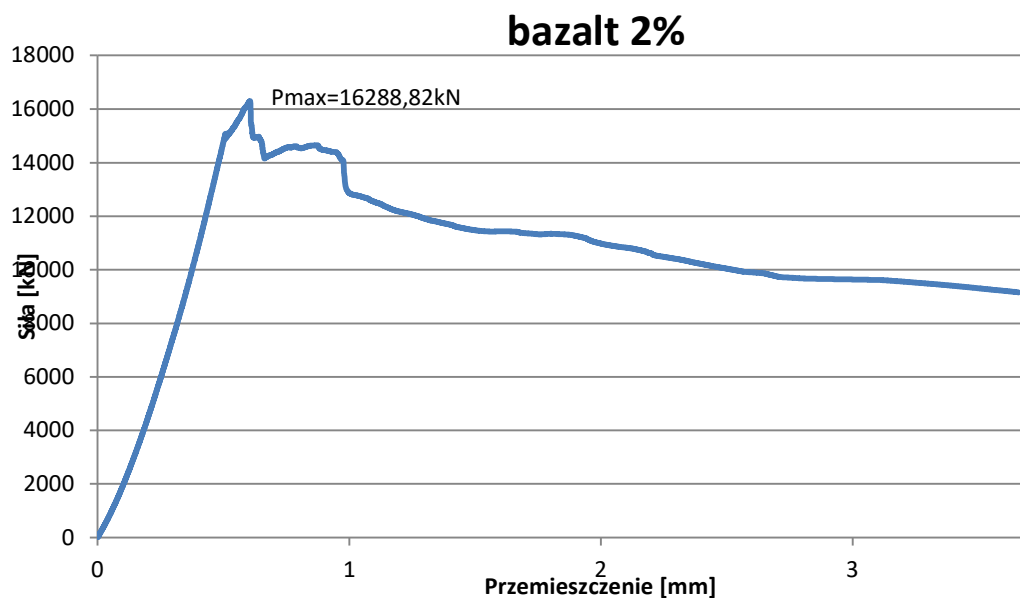
## bazalt 1%



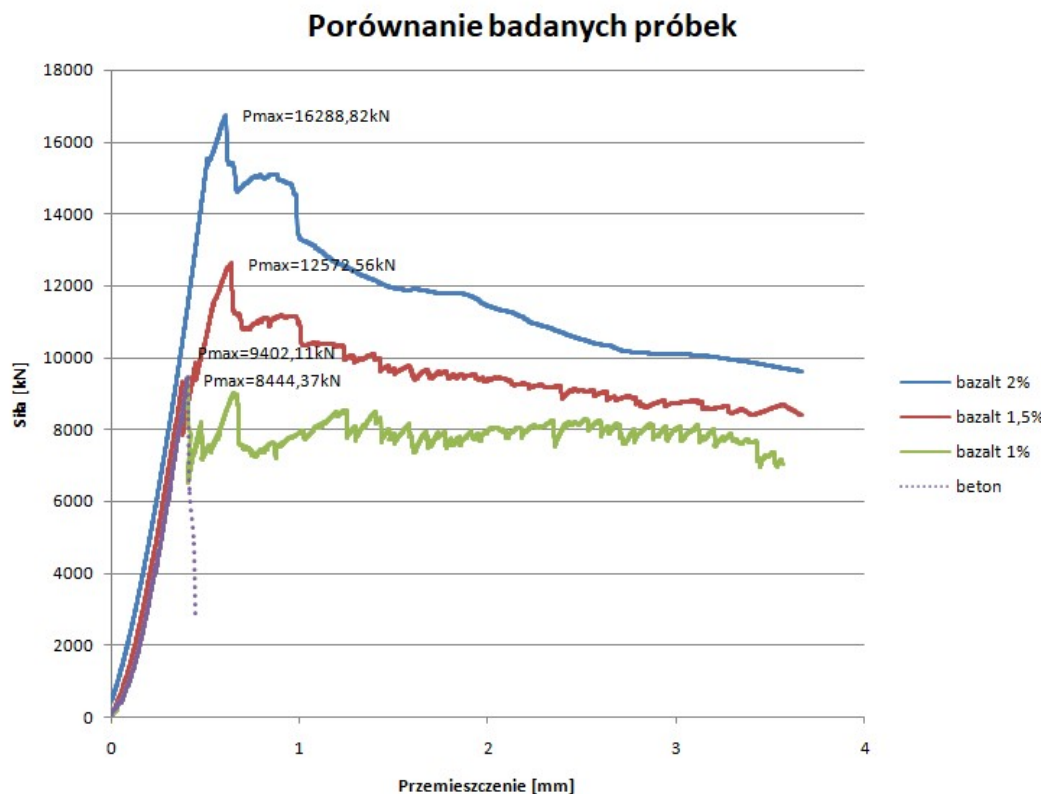
Rys. 72 Zależność siła przemieszczenie dla betonów z dodatkiem włókna bazaltowego odpadowego w ilości 1% - wykres uśredniony spośród wyników badań dla 9 próbek



Rys. 73 Zależność siła przemieszczenie dla betonów z dodatkiem włókna bazaltowego odpadowego w ilości 1,5% - wykres uśredniony spośród wyników badań dla 9 próbek



Rys. 74 Próbką z dodatkiem odpadowych włókien bazaltowych w ilości 2%



Rys. 75 Porównanie wyników przeprowadzonych badań dla próbek z dodatkiem włókien bazaltowych w ilości 1% ( $P_{max}=9402,11\text{kN}$ ), 1,5% ( $P_{max}=12572,56\text{kN}$ ), 2% ( $P_{max}=16288,82\text{kN}$ ) oraz próbek bez dodatku włókien ( $P_{max}=8444,37\text{kN}$ )

W zakresie odkształceń sprężystych zarówno dla próbek betonowych jak i z dodatkiem włókien bazaltowych odpadowych w ilości 1% wykres przebiega po podobnej trajektorii ze zbliżonym kątem nachylenia wykresu *siła – przemieszczenie*. Również maksymalna osiągnięta siła nieznacznie się różni pomiędzy beleczkami z dodatkiem włókien bazaltowych a wykonanymi z betonu bez dodatków.

Warto zwrócić uwagę na wpływ dokładności wykonanych pomiarów ugięcia na obliczenie wytrzymałości równoważnej na zginanie. W przypadku umieszczenia czujnika indukcyjnego w środku rozpiętości próbki za miarodajne można uznać wyniki badań do momentu powstania pierwszego zarysowania i do momentu osiągnięcia maksymalnej siły. Jest to spowodowane tym, że z reguły zarysowanie pojawia się w środku rozpiętości belki. W miarę propagacji rysy w kierunku skrajnych włókien ściskanych, w dolnej części

badanego elementu pojawia się coraz większe rozwarście rysy. Powoduje to zaburzenia w rejestracji ugięć przez czujnik.



Rys. 76 Zniszczenie próbki betonowej



Rys. 77 Zniszczenie próbki z dodatkiem odpadowych włókien bazaltowych  
w ilości 1%





Rys. 78 Widok przeciętej belki z zaznaczonymi włóknami (czerwone miejsca)

W celach porównania osiągniętej wytrzymałości oraz sposobu zniszczenia oraz propagacji rys wykonano badania próbek z dodatkiem włókien stalowych.



Rys. 79 Widok elementu podczas badania

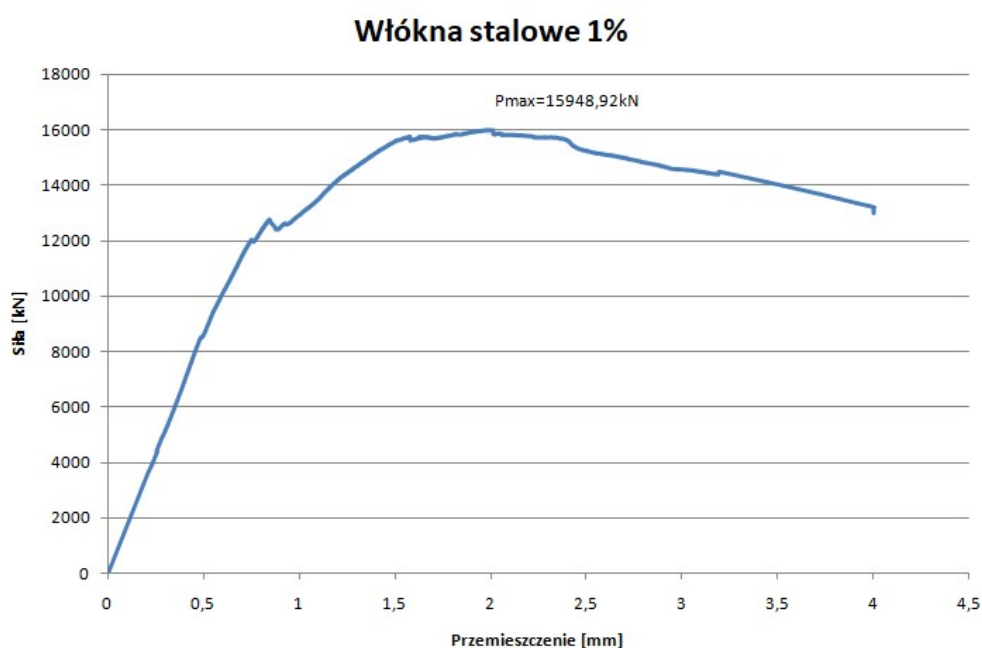


Rys. 80 Pęknięcie elementu wraz z widokiem włókien

Schemat zniszczenia odbiegał od zniszczenia beleczek z dodatkiem włókien bazaltowych. Przebiegało ono w sposób mniej gwałtowny niż w przypadku belek z dodatkiem pręcików bazaltowych. Zauważalna była ciągła praca elementu od

pierwszego zarysowania do momentu całkowitego zniszczenia, które nastąpiło zarówno przez wyciąganie włókien z betonu jak i ich zrywanie.

Na rysunku 78 Pokazano zależność siły od przemieszczenia dla próbek fibrobetonowych. Próbki te mogły przenieść znacznie większe siły niż próbki z dodatkiem włókien stalowych. Ciągły charakter pracy elementu jest również widoczny na przedstawionym rysunku. Po osiągnięciu maksymalnej siły nie spada ona gwałtownie do mniejszej wartości ale opada w bardziej łagodny sposób.



Rys. 81 Zależność siła – przemieszczenie dla próbek z dodatkiem włókien stalowych w ilości 1%.

### 6.5. *Badanie skurczu*

Skurcz betonu, jako zjawisko fizyczne zachodzi w wyniku ubytku wody wolnej z betonu zachodzi również w fibrobetonie. Włókna bazaltowe obniżają skurcz z tego względu, że same nie ulegają skurczowi, a co za tym idzie przeciwstawiają się skurczowi betonu. W miarę wzrostu liczby włókien skurcz jest coraz mniejszy, choć nie jest to

zależność proporcjonalna. Zbyt mała ilość włókien nie wpływa, bądź wpływa tylko w niewielkim stopniu na wielkość skurczu.

Badanie skurczu próbek przeprowadzono na podstawie normy [N7]. Polega ona na określeniu zmiany długości próbki, oznaczonej aparatem badawczym w stosunku do jej długości początkowej. Badanie przeprowadza się na beleczkach o wymiarach 100 x 100 x 500 mm wykonanych przy użyciu kruszyw o uziarnieniu nie większym niż 16 mm. Formy z beleczkami po zabetonowaniu zostały umieszczone w komorze klimatycznej o temperaturze  $18 \pm 2^{\circ}\text{C}$  i wilgotności względnej powyżej 90%. Próbki zostały rozformowane po 24 godzinach od momentu zabetonowania. Następnie próbki były przechowywane w komorze klimatycznej w temperaturze  $18 \pm 2^{\circ}\text{C}$  i wilgotności względnej powietrza  $65 \div 75\%$ . Próbki zostały przechowywane w sposób zapewniający dostęp powietrza ze wszystkich stron (rysunek 55).



Rys.82 widok śruby mikrometrycznej



Rys. 83 Aparat Amslera na badanej próbce



Rys. 84 Widok przechowywanych próbek w komorze klimatycznej

Zmianę długości beleczek po  $n$  dniach obliczono wg wzoru:

$$\epsilon_n = \frac{(l_n - l_1) \cdot 1000}{500}, [N7]$$

gdzie:

$l_n$  – wynik pomiaru próbki po upływie czasu  $n$ , w mm.

$l_1$  – wynik pierwszego pomiaru próbki po 24h twardnienia, w mm.

Wyniki otrzymanych badań skurczu przedstawiono:

- w tabeli 18,19 wyniki badań dla próbek betonowych
- w tabeli 20, 21 dla próbek betonowych z dodatkiem włókien bazaltowych w ilości 1%,
- w tabeli 22,23 dla beleczek betonowych z dodatkiem włókien bazaltowych w ilości 1,5%,
- w tabeli 24, 25 dla próbek betonowych z dodatkiem włókien bazaltowych w ilości 2%,
- w tabeli 26, 27 dla próbek betonowych z dodatkiem włókien stalowych w ilości 1%,
- w tabeli 28, 29 dla próbek betonowych z dodatkiem włókien stalowych w ilości 2%.

Numer próbki	Czas	Odczyt na śrubie mikrometrycznej		Odczyt na śrubie mikrometrycznej po upływie czasu		Korekta odczytu	Wynik po n dniach	średni skurcz
-	Dni	Wzorzec	Próbka	Wzorzec	Próbka	mm	mm/m	mm/m
B001	0	6	10,57	-	-	-	-	-
B002			11,58		-		-	
B003			10,81		-		-	
B004			10,58		-		-	
B005			10,79		-		-	
B006			11,59		-		-	
B007			10,80		-		-	
B008			11,55		-		-	
B009			10,54		-		-	
B001	2	6	10,57	6	10,55	-	-0,04	-0,0556
B002			11,58		11,56		-0,04	
B003			10,81		10,78		-0,06	
B004			10,58		10,55		-0,06	
B005			10,79		10,75		-0,08	
B006			11,59		11,55		-0,08	
B007			10,80		10,77		-0,06	
B008			11,55		11,53		-0,04	
B009			10,54		10,52		-0,04	
B001	7	6	10,57	6	10,52	-	-0,10	-0,1222
B002			11,58		11,52		-0,12	
B003			10,81		10,75		-0,12	
B004			10,58		10,52		-0,12	
B005			10,79		10,73		-0,12	
B006			11,59		11,51		-0,16	
B007			10,80		10,74		-0,12	
B008			11,55		11,49		-0,12	
B009			10,54		10,48		-0,12	
B001	14	6	10,57	6	10,48	-	-0,18	-0,176
B002			11,58		11,49		-0,18	
B003			10,81		10,73		-0,16	
B004			10,58		10,50		-0,16	
B005			10,79		10,71		-0,16	
B006			11,59		11,49		-0,20	
B007			10,80		10,71		-0,18	
B008			11,55		11,46		-0,18	
B009			10,54		10,45		-0,18	

Tab. 18 Zestawienie wartości skurczu dla próbek betonowych

Numer próbki	Czas	Odczyt na śrubie mikrometrycznej		Odczyt na śrubie mikrometrycznej po upływie czasu		Korekta odczytu	Wynik po n dniach	Średni skurcz
		Wzorzec	Próbka	Wzorzec	Próbka			
-	Dni					mm	mm/m	mm/m
B001	28	6	10,57	6	10,47	-	-0,2	-0,222
B002			11,58		11,48		-0,2	
B003			10,81		10,69		-0,24	
B004			10,58		10,48		-0,20	
B005			10,79		10,68		-0,22	
B006			11,59		11,46		-0,26	
B007			10,80		10,68		-0,24	
B008			11,55		11,44		-0,22	
B009			10,54		10,43		-0,22	
B001	56	6	10,57	6	10,43	-	-0,28	-0,300
B002			11,58		11,44		-0,28	
B003			10,81		10,66		-0,30	
B004			10,58		10,45		-0,26	
B005			10,79		10,64		-0,30	
B006			11,59		11,42		-0,34	
B007			10,80		10,63		-0,34	
B008			11,55		11,40		-0,30	
B009			10,54		10,39		-0,30	
B001	84	6	10,57	6	10,40	-	-0,34	-0,358
B002			11,58		11,40		-0,36	
B003			10,81		10,62		-0,38	
B004			10,58		10,43		-0,30	
B005			10,79		10,60		-0,38	
B006			11,59		11,41		-0,36	
B007			10,80		10,61		-0,38	
B008			11,55		11,37		-0,36	
B009			10,54		10,36		-0,36	
B001	165	6	10,57	6	10,39	-	-0,36	-0,382
B002			11,58		11,39		-0,38	
B003			10,81		10,61		-0,40	
B004			10,58		10,41		-0,34	
B005			10,79		10,59		-0,40	
B006			11,59		11,39		-0,40	
B007			10,80		10,60		-0,40	
B008			11,55		11,36		-0,38	
B009			10,54		10,35		-0,38	

Tab. 19 Zestawienie wartości skurczu dla próbek betonowych

Numer próbki	Czas	Odczyt na śrubie mikrometrycznej		Odczyt na śrubie mikrometrycznej po upływie czasu		Korekta odczytu	Wynik po n dniach	Średni skurcz
		Wzorzec	Próbka	Wzorzec	Próbka			
-	Dni					mm	mm/m	mm/m
WB101	0	6	10,85	-	-	-	-	-
WB102			11,53		-		-	
WB103			10,74		-		-	
WB104			10,57		-		-	
WB105			10,78		-		-	
WB106			11,61		-		-	
WB107			10,82		-		-	
WB108			11,57		-		-	
WB109			10,55		-		-	
WB101	2	6	10,85	6	10,82	-	-0,06	-0,0456
WB102			11,53		11,51		-0,04	
WB103			10,74		10,72		-0,04	
WB104			10,57		10,55		-0,05	
WB105			10,78		10,76		-0,04	
WB106			11,61		11,59		-0,04	
WB107			10,82		10,80		-0,04	
WB108			11,57		11,55		-0,04	
WB109			10,55		10,52		-0,06	
WB101	7	6	10,85	6	10,81	-	-0,08	-0,0778
WB102			11,53		11,50		-0,06	
WB103			10,74		10,70		-0,08	
WB104			10,57		10,53		-0,08	
WB105			10,78		10,74		-0,08	
WB106			11,61		11,57		-0,08	
WB107			10,82		10,78		-0,08	
WB108			11,57		11,53		-0,08	
WB109			10,55		10,51		-0,08	
WB101	14	6	10,85	6	10,78	-	-0,14	-0,133
WB102			11,53		11,48		-0,10	
WB103			10,74		10,67		-0,14	
WB104			10,57		10,51		-0,12	
WB105			10,78		10,72		-0,12	
WB106			11,61		11,54		-0,14	
WB107			10,82		10,74		-0,16	
WB108			11,57		11,5		-0,14	
WB109			10,55		10,48		-0,14	

Tab. 20 Zestawienie wartości skurczu - próbki dodatkiem włókien bazaltowych odpadowych w ilości 1%

Numer próbki	Czas	Odczyt na śrubie mikrometrycznej		Odczyt na śrubie mikrometrycznej po upływie czasu		Korekta odczytu	Wynik po n dniach	średni skurcz
-	Dni	Wzorzec	Próbka	Wzorzec	Próbka	mm	mm/m	mm/m
WB101	28	6	10,85	6	10,75	-	-0,20	-0,182
WB102			11,53		11,43		-0,20	
WB103			10,74		10,65		-0,18	
WB104			10,57		10,48		-0,18	
WB105			10,78		10,69		-0,18	
WB106			11,61		11,52		-0,18	
WB107			10,82		10,73		-0,18	
WB108			11,57		11,49		-0,16	
WB109			10,55		10,46		-0,18	
WB101	56	6	10,85	6	10,72	-	-0,26	-0,256
WB102			11,53		11,40		-0,26	
WB103			10,74		10,60		-0,28	
WB104			10,57		10,44		-0,26	
WB105			10,78		10,65		-0,26	
WB106			11,61		11,48		-0,26	
WB107			10,82		10,70		-0,24	
WB108			11,57		11,44		-0,26	
WB109			10,55		10,44		-0,22	
WB101	84	6	10,85	6	10,70	-	-0,30	-0,289
WB102			11,53		11,38		-0,30	
WB103			10,74		10,59		-0,30	
WB104			10,57		10,44		-0,26	
WB105			10,78		10,62		-0,32	
WB106			11,61		11,47		-0,28	
WB107			10,82		10,68		-0,28	
WB108			11,57		11,43		-0,28	
WB109			10,55		10,41		-0,28	
WB101	165	6	10,85	6	10,69	-	-0,32	-0,313
WB102			11,53		11,37		-0,32	
WB103			10,74		10,58		-0,32	
WB104			10,57		10,42		-0,30	
WB105			10,78		10,61		-0,34	
WB106			11,61		11,45		-0,32	
WB107			10,82		10,67		-0,30	
WB108			11,57		11,42		-0,30	
WB109			10,55		10,40		-0,30	

Tab. 21 Zestawienie wartości skurczu dla próbek z dodatkiem włókien bazaltowych odpadowych w ilości 1%



Numer próbki	Czas	Odczyt na śrubie mikrometrycznej		Odczyt na śrubie mikrometrycznej po upływie czasu		Korekta odczytu	Wynik po n dniach	średni skurcz
-	Dni	Wzorzec	Próbka	Wzorzec	Próbka	mm	mm/m	mm/m
WB151	0	6	10,87	-	-	-	-	-
WB152			10,74		-		-	
WB153			11,52		-		-	
WB154			10,60		-		-	
WB155			10,78		-		-	
WB156			11,62		-		-	
WB157			10,55		-		-	
WB158			10,82		-		-	
WB159			10,55		-		-	
WB151	2	6	10,87	6	10,86	-	-0,02	-0,0378
WB152			10,74		10,72		-0,04	
WB153			11,52		11,50		-0,04	
WB154			10,60		10,58		-0,04	
WB155			10,78		10,76		-0,04	
WB156			11,62		11,60		-0,04	
WB157			10,55		10,53		-0,04	
WB158			10,82		10,81		-0,02	
WB159			10,55		10,52		-0,06	
WB151	7	6	10,87	6	10,83	-	-0,08	-0,0756
WB152			10,74		10,71		-0,06	
WB153			11,52		11,48		-0,08	
WB154			10,60		10,56		-0,08	
WB155			10,78		10,74		-0,08	
WB156			11,62		11,58		-0,08	
WB157			10,55		10,52		-0,06	
WB158			10,82		10,79		-0,06	
WB159			10,55		10,50		-0,10	
WB151	14	6	10,87	6	10,82	-	-0,10	-0,104
WB152			10,74		10,70		-0,08	
WB153			11,52		11,46		-0,12	
WB154			10,60		10,54		-0,12	
WB155			10,78		10,73		-0,10	
WB156			11,62		11,57		-0,10	
WB157			10,55		10,50		-0,10	
WB158			10,82		10,77		-0,10	
WB159			10,55		10,49		-0,12	

Tab. 22 Zestawienie wartości skurczu dla próbek z dodatkiem włókien bazaltowych odpadowych w ilości 1,5%

Numer próbki	Czas	Odczyt na śrubie mikrometrycznej		Odczyt na śrubie mikrometrycznej po upływie czasu		Korekta odczytu	Wynik po n dniach	Średni skurcz
-	Dni	Wzorzec	Próbka	Wzorzec	Próbka	mm	mm/m	mm/m
WB151	28	6	10,87	6	10,79	-	-0,16	-0,156
WB152			10,74		10,67		-0,14	
WB153			11,52		11,45		-0,14	
WB154			10,60		10,53		-0,14	
WB155			10,78		10,70		-0,16	
WB156			11,62		11,54		-0,16	
WB157			10,55		10,47		-0,16	
WB158			10,82		10,75		-0,14	
WB159			10,55		10,45		-0,20	
WB151	56	6	10,87	6	10,76	-	-0,22	-0,220
WB152			10,74		10,63		-0,22	
WB153			11,52		11,40		-0,24	
WB154			10,60		10,50		-0,20	
WB155			10,78		10,67		-0,22	
WB156			11,62		11,50		-0,24	
WB157			10,55		10,45		-0,20	
WB158			10,82		10,72		-0,20	
WB159			10,55		10,43		-0,24	
WB151	84	6	10,87	6	10,75	-	-0,24	-0,242
WB152			10,74		10,62		-0,24	
WB153			11,52		11,39		-0,26	
WB154			10,60		10,49		-0,22	
WB155			10,78		10,66		-0,24	
WB156			11,62		11,49		-0,26	
WB157			10,55		10,44		-0,22	
WB158			10,82		10,70		-0,24	
WB159			10,55		10,42		-0,26	
WB151	165	6	10,87	6	10,74	-	-0,26	-0,262
WB152			10,74		10,61		-0,26	
WB153			11,52		11,38		-0,28	
WB154			10,60		10,48		-0,24	
WB155			10,78		10,66		-0,24	
WB156			11,62		11,48		-0,28	
WB157			10,55		10,42		-0,26	
WB158			10,82		10,69		-0,26	
WB159			10,55		10,41		-0,28	

Tab. 23 Zestawienie wartości skurczu dla próbek z dodatkiem włókien bazaltowych odpadowych w ilości 1,5%

Numer próbki	Czas	Odczyt na śrubie mikrometrycznej		Odczyt na śrubie mikrometrycznej po upływie czasu		Korekta odczytu	Wynik po n dniach	Średni skurcz
-	Dni	Wzorzec	Próbka	Wzorzec	Próbka	mm	mm/m	mm/m
BW2001	0	6	11,54	-	-	-	-	-
BW2002			10,64		-		-	
BW2003			10,77		-		-	
BW2004			10,55		-		-	
BW2005			10,87		-		-	
BW2006			11,52		-		-	
BW2007			10,82		-		-	
BW2008			10,53		-		-	
BW2009			10,61		-		-	
BW2001	2	6	11,54	6	11,53	-	-0,02	-0,0333
BW2002			10,64		10,63		-0,02	
BW2003			10,77		10,75		-0,04	
BW2004			10,55		10,53		-0,04	
BW2005			10,87		10,85		-0,04	
BW2006			11,52		11,51		-0,02	
BW2007			10,82		10,8		-0,04	
BW2008			10,53		10,51		-0,04	
BW2009			10,61		10,59		-0,04	
BW2001	7	6	11,54	6	11,51	-	-0,06	-0,0600
BW2002			10,64		10,63		-0,02	
BW2003			10,77		10,73		-0,08	
BW2004			10,55		10,52		-0,06	
BW2005			10,87		10,84		-0,06	
BW2006			11,52		11,49		-0,06	
BW2007			10,82		10,79		-0,06	
BW2008			10,53		10,49		-0,08	
BW2009			10,61		10,58		-0,06	
BW2001	14	6	11,54	6	11,50	-	-0,08	-0,0800
BW2002			10,64		10,62		-0,04	
BW2003			10,77		10,72		-0,10	
BW2004			10,55		10,51		-0,08	
BW2005			10,87		10,83		-0,08	
BW2006			11,52		11,48		-0,08	
BW2007			10,82		10,78		-0,08	
BW2008			10,53		10,48		-0,10	
BW2009			10,61		10,57		-0,08	

Tab. 24 Zestawienie wartości skurczu dla próbek z dodatkiem włókien bazaltowych odpadowych w ilości 2%

Numer próbki	Czas	Odczyt na śrubie mikrometrycznej		Odczyt na śrubie mikrometrycznej po upływie czasu		Korekta odczytu	Wynik po n dniach	Średni skurcz
-	Dni	Wzorzec	Próbka	Wzorzec	Próbka	mm	mm/m	mm/m
BW2001	28	6	11,54	6	11,48	-	-0,12	-0,120
BW2002			10,64		10,58		-0,12	
BW2003			10,77		10,70		-0,14	
BW2004			10,55		10,49		-0,12	
BW2005			10,87		10,82		-0,10	
BW2006			11,52		11,46		-0,12	
BW2007			10,82		10,76		-0,12	
BW2008			10,53		10,47		-0,12	
BW2009			10,61		10,55		-0,12	
BW2001	56	6	11,54	6	11,45	-	-0,18	-0,1800
BW2002			10,64		10,55		-0,18	
BW2003			10,77		10,69		-0,16	
BW2004			10,55		10,46		-0,18	
BW2005			10,87		10,78		-0,18	
BW2006			11,52		11,45		-0,14	
BW2007			10,82		10,73		-0,18	
BW2008			10,53		10,41		-0,24	
BW2009			10,61		10,52		-0,18	
BW2001	84	6	11,54	6	11,44	-	-0,20	-0,211
BW2002			10,64		10,54		-0,20	
BW2003			10,77		10,67		-0,20	
BW2004			10,55		10,45		-0,20	
BW2005			10,87		10,76		-0,22	
BW2006			11,52		11,43		-0,18	
BW2007			10,82		10,71		-0,22	
BW2008			10,53		10,40		-0,26	
BW2009			10,61		10,50		-0,22	
BW2001	165	6	11,54	6	11,44	-	-0,20	-0,224
BW2002			10,64		10,53		-0,22	
BW2003			10,77		10,67		-0,20	
BW2004			10,55		10,44		-0,22	
BW2005			10,87		10,75		-0,24	
BW2006			11,52		11,42		-0,20	
BW2007			10,82		10,70		-0,24	
BW2008			10,53		10,39		-0,28	
BW2009			10,61		10,50		-0,22	

Tab. 25 Zestawienie wartości skurczu dla próbek z dodatkiem włókien bazaltowych odpadowych w ilości 2%

Numer próbki	Czas	Odczyt na śrubie mikrometrycznej		Odczyt na śrubie mikrometrycznej po upływie czasu		Korekta odczytu	Wynik po n dniach	- średni skurcz
-	Dni	Wzorzec	Próbka	Wzorzec	Próbka	mm	mm/m	mm/m
WS1001	0	6	11,53	-	-	-	-	-
WS1002			10,65		-		-	
WS1003			10,78		-		-	
WS1004			11,55		-		-	
WS1005			10,54		-		-	
WS1006			10,78		-		-	
WS1007			10,69		-		-	
WS1008			10,44		-		-	
WS1009			10,57		-		-	
WS1001	5	6	11,53	6	11,51	-	-0,04	-0,0333
WS1002			10,65		10,63		-0,04	
WS1003			10,78		10,77		-0,02	
WS1004			11,55		11,54		-0,02	
WS1005			10,54		10,52		-0,04	
WS1006			10,78		10,76		-0,04	
WS1007			10,69		10,67		-0,04	
WS1008			10,44		10,43		-0,02	
WS1009			10,57		10,55		-0,04	
WS1001	7	6	11,53	6	11,5	-	-0,06	-0,0711
WS1002			10,65		10,62		-0,06	
WS1003			10,78		10,75		-0,06	
WS1004			11,55		11,52		-0,06	
WS1005			10,54		10,51		-0,06	
WS1006			10,78		10,74		-0,08	
WS1007			10,69		10,63		-0,12	
WS1008			10,44		10,40		-0,08	
WS1009			10,57		10,54		-0,06	
WS1001	14	6	11,53	6	11,49	-	-0,08	-0,100
WS1002			10,65		10,60		-0,10	
WS1003			10,78		10,73		-0,10	
WS1004			11,55		11,5		-0,10	
WS1005			10,54		10,5		-0,08	
WS1006			10,78		10,73		-0,10	
WS1007			10,69		10,62		-0,14	
WS1008			10,44		10,38		-0,12	
WS1009			10,57		10,53		-0,08	

Tab. 26 Zestawienie wartości skurczu dla próbek z dodatkiem włókien stalowych w ilości 1%

Numer próbki	Czas	Odczyt na śrubie mikrometrycznej		Odczyt na śrubie mikrometrycznej po upływie czasu		Korekta odczytu	Wynik po n dniach	Średni skurcz
-	Dni	Wzorzec	Próbka	Wzorzec	Próbka	mm	mm/m	mm/m
WS1001	28	6	11,53	6	11,47	-	-0,12	-0,144
WS1002			10,65		10,58		-0,14	
WS1003			10,78		10,72		-0,12	
WS1004			11,55		11,48		-0,14	
WS1005			10,54		10,47		-0,14	
WS1006			10,78		10,7		-0,16	
WS1007			10,69		10,61		-0,16	
WS1008			10,44		10,35		-0,18	
WS1009			10,57		10,5		-0,14	
WS1001	56	6	11,53	6	11,43	-	-0,20	-0,193
WS1002			10,65		10,55		-0,20	
WS1003			10,78		10,69		-0,18	
WS1004			11,55		11,47		-0,16	
WS1005			10,54		10,45		-0,18	
WS1006			10,78		10,69		-0,18	
WS1007			10,69		10,59		-0,20	
WS1008			10,44		10,33		-0,22	
WS1009			10,57		10,46		-0,22	
WS1001	84	6	11,53	6	11,41	-	-0,24	-0,220
WS1002			10,65		10,53		-0,24	
WS1003			10,78		10,67		-0,22	
WS1004			11,55		11,45		-0,20	
WS1005			10,54		10,43		-0,22	
WS1006			10,78		10,68		-0,20	
WS1007			10,69		10,58		-0,22	
WS1008			10,44		10,33		-0,22	
WS1009			10,57		10,46		-0,22	
WS1001	165	6	11,53	6	11,41	-	-0,24	-0,242
WS1002			10,65		10,53		-0,24	
WS1003			10,78		10,66		-0,24	
WS1004			11,55		11,43		-0,24	
WS1005			10,54		10,42		-0,24	
WS1006			10,78		10,66		-0,24	
WS1007			10,69		10,57		-0,24	
WS1008			10,44		10,32		-0,24	
WS1009			10,57		10,44		-0,26	

Tab. 27 Zestawienie wartości skurczu dla próbek z dodatkiem włókien stalowych w ilości 1%

Numer próbki	Czas	Odczyt na śrubie mikrometrycznej		Odczyt na śrubie mikrometrycznej po upływie czasu		Korekta odczytu	Wynik po n dniach	Średni skurcz
-	Dni	Worzec	Próbka	Worzec	Próbka	mm	mm/m	mm/m
WS2001	0	6	11,54	-	-	-	-	-
WS2002			10,77		-		-	
WS2003			10,68		-		-	
WS2004			11,57		-		-	
WS2005			10,49		-		-	
WS2006			10,69		-		-	
WS2007			10,78		-		-	
WS2008			10,45		-		-	
WS2009			10,55		-		-	
WS2001	5	6	11,54	6	11,52	-	-0,04	-0,0311
WS2002			10,77		10,76		-0,02	
WS2003			10,68		10,67		-0,02	
WS2004			11,57		11,56		-0,02	
WS2005			10,49		10,47		-0,04	
WS2006			10,69		10,67		-0,04	
WS2007			10,78		10,76		-0,04	
WS2008			10,45		10,43		-0,04	
WS2009			10,55		10,54		-0,02	
WS2001	7	6	11,54	6	11,51	-	-0,06	-0,0533
WS2002			10,77		10,75		-0,04	
WS2003			10,68		10,66		-0,04	
WS2004			11,57		11,55		-0,04	
WS2005			10,49		10,46		-0,06	
WS2006			10,69		10,65		-0,08	
WS2007			10,78		10,75		-0,06	
WS2008			10,45		10,42		-0,06	
WS2009			10,55		10,53		-0,04	
WS2001	14	6	11,54	6	11,51	-	-0,06	-0,0711
WS2002			10,77		10,74		-0,06	
WS2003			10,68		10,65		-0,06	
WS2004			11,57		11,54		-0,06	
WS2005			10,49		10,45		-0,08	
WS2006			10,69		10,64		-0,10	
WS2007			10,78		10,74		-0,08	
WS2008			10,45		10,41		-0,08	
WS2009			10,55		10,52		-0,06	

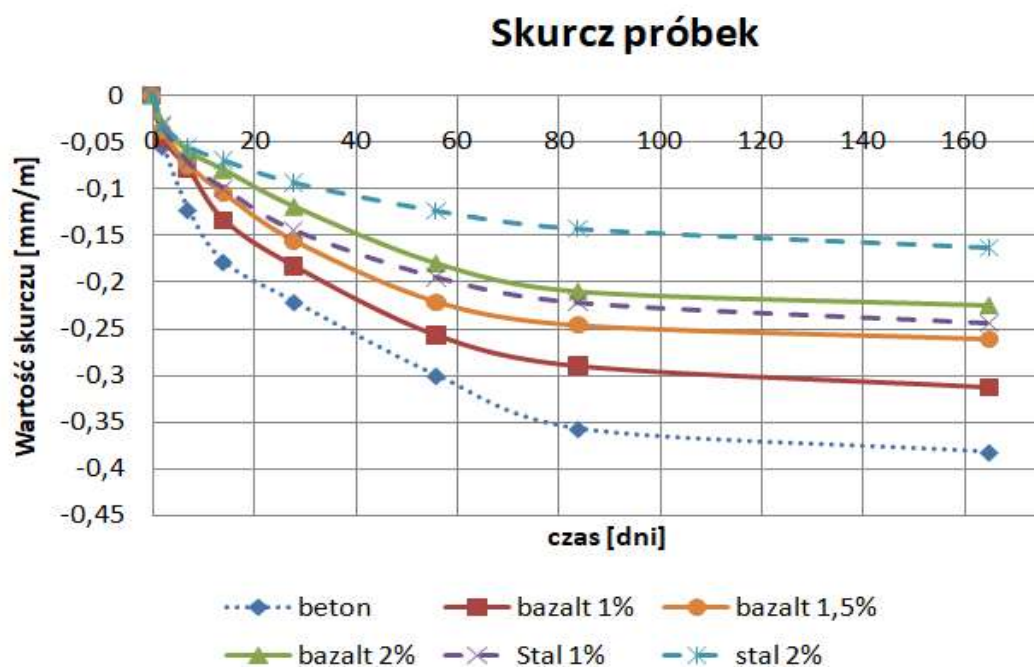
Tab. 28 Zestawienie wartości skurczu dla próbek z dodatkiem włókien stalowych w ilości 2%

Numer próbki	Czas	Odczyt na śrubie mikrometrycznej		Odczyt na śrubie mikrometrycznej po upływie czasu		Korekta odczytu	Wynik po n dniach	Średni skurecz
-	Dni	Worzec	Próbka	Worzec	Próbka	mm	mm/m	mm/m
WS2001	28	6	11,54	6	11,49	-	-0,10	-0,0933
WS2002			10,77		10,73		-0,08	
WS2003			10,68		10,64		-0,08	
WS2004			11,57		11,53		-0,08	
WS2005			10,49		10,44		-0,10	
WS2006			10,69		10,63		-0,12	
WS2007			10,78		10,73		-0,10	
WS2008			10,45		10,4		-0,10	
WS2009			10,55		10,51		-0,08	
WS2001	56	6	11,54	6	11,48	-	-0,12	-0,122
WS2002			10,77		10,72		-0,10	
WS2003			10,68		10,63		-0,10	
WS2004			11,57		11,51		-0,12	
WS2005			10,49		10,42		-0,14	
WS2006			10,69		10,62		-0,14	
WS2007			10,78		10,72		-0,12	
WS2008			10,45		10,38		-0,14	
WS2009			10,55		10,49		-0,12	
WS2001	84	6	11,54	6	11,47	-	-0,14	-0,142
WS2002			10,77		10,71		-0,12	
WS2003			10,68		10,62		-0,12	
WS2004			11,57		11,50		-0,14	
WS2005			10,49		10,41		-0,16	
WS2006			10,69		10,61		-0,16	
WS2007			10,78		10,71		-0,14	
WS2008			10,45		10,37		-0,16	
WS2009			10,55		10,48		-0,14	
WS2001	165	6	11,54	6	11,46	-	-0,16	-0,162
WS2002			10,77		10,70		-0,14	
WS2003			10,68		10,61		-0,14	
WS2004			11,57		11,49		-0,16	
WS2005			10,49		10,40		-0,18	
WS2006			10,69		10,60		-0,18	
WS2007			10,78		10,70		-0,16	
WS2008			10,45		10,36		-0,18	
WS2009			10,55		10,47		-0,16	

Tab. 29 Zestawienie wartości skurczu dla próbek z dodatkiem włókien stalowych w ilości 2%



Wyniki uzyskane w trakcie przeprowadzonych badań pokazują, że próbki betonowe bez dodatku włókien wykazują największy skurcz w każdej fazie badania. Próbki z dodatkiem włókien stalowych, zgodnie z przewidywaniami pozwoliły na ograniczenie odkształceń skurczowych w największym stopniu. Analizując wykres na rysunku 85 można stwierdzić że próbki z dodatkiem włókien bazaltowych w ilości 2% wykazują wartości odkształceń skurczowych najbardziej zbliżonych do próbek z dodatkiem włókien stalowych w ilości 1%. Dla próbek z dodatkiem włókien bazaltowych w ilościach 1,5%, 2% oraz dla próbek z dodatkiem włókien stalowych ilości 1% oraz 2% po 80 dniach badania skurcz wykazywał minimalny przyrost.



Rys. 85 Wykres odkształceń skurczowych dla poszczególnych wartości

#### 6.6. *Badania nieniszczące*

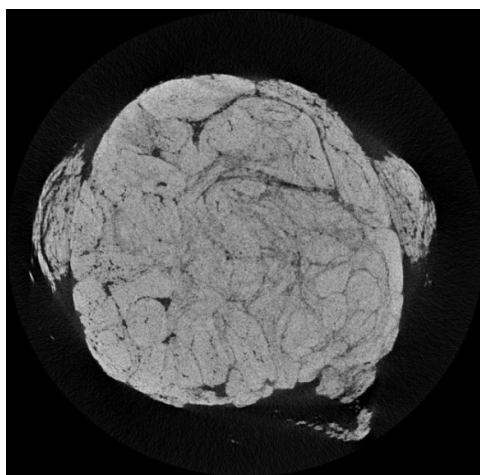
W nawiązaniu do punktu 4.3 niniejszej rozprawy opisującej sposób otrzymywania pręcików bazaltowych z prętów odpadowych, przy współpracy z pracownikami Katedry Geotechniki, Hydrotechniki, Budownictwa Podziemnego i Wodnego dr inż. Macieja Sobótki oraz mgr inż. Michała Pachnicza przeprowadzone zostały badania nieniszczące

obejmujące przeskanowanie próbek prętów oraz włókien bazaltowych w mikrotomografie.

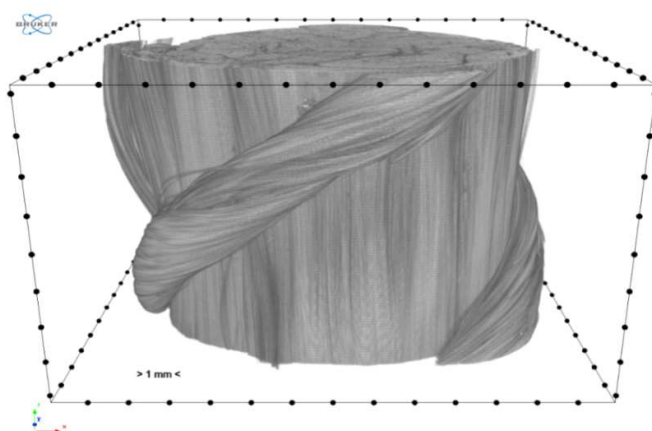
W pierwszym etapie przebadano próbkę pręta o średnicy 10 mm i długości 10 mm.

Badanie przeprowadzono dla próbki przed i po podgrzaniu do 250 °C.

Rekonstrukcja obrazu została przeprowadzona z wykorzystaniem programu NRecon. Na zdjęciu pokazano przykładowy przekrój próbki



Rys. 86 Rekonstrukcja – przykładowy przekrój

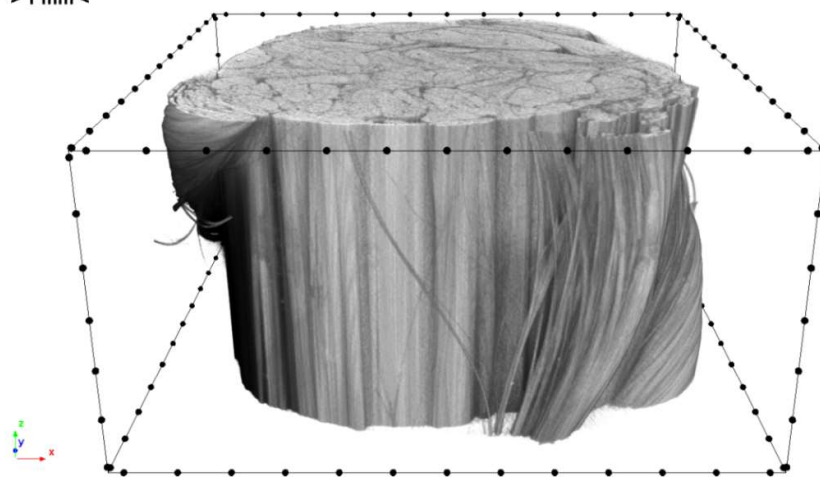


Rys. 87 Widok 3D skanowanego elementu pręta bazaltowego

Skanowanie próbki odbywało się z zastosowaniem takich samych parametrów skanowania oraz rekonstrukcji, co pozwoliło na ocenę zmiany gęstości elementów w wyniku odparowania lub wypalenia niektórych składowych oraz ocenę deformacji.



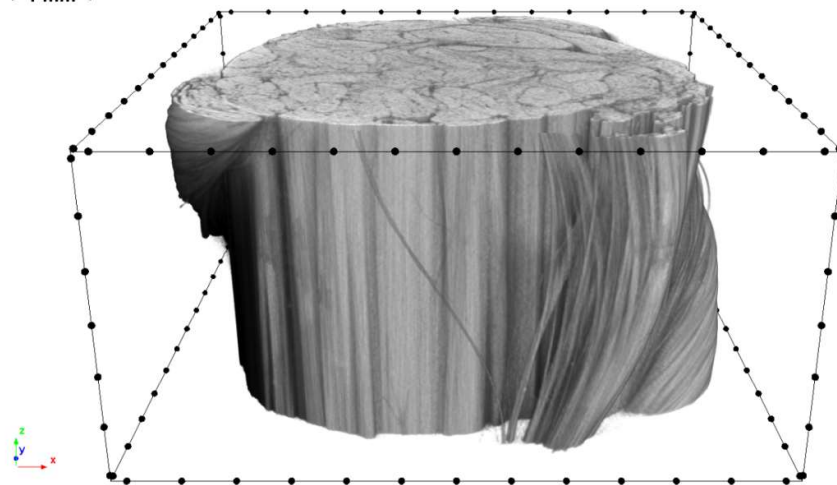
> 1 mm <



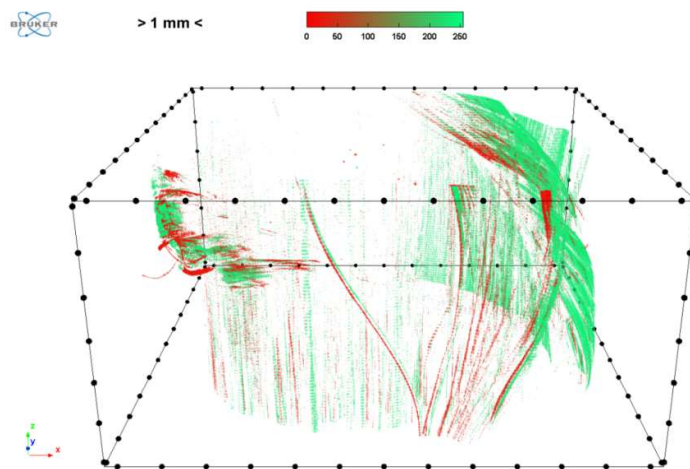
Rys. 88 Widok przed podgrzaniem



> 1 mm <



Rys. 89 Widok po podgrzaniu



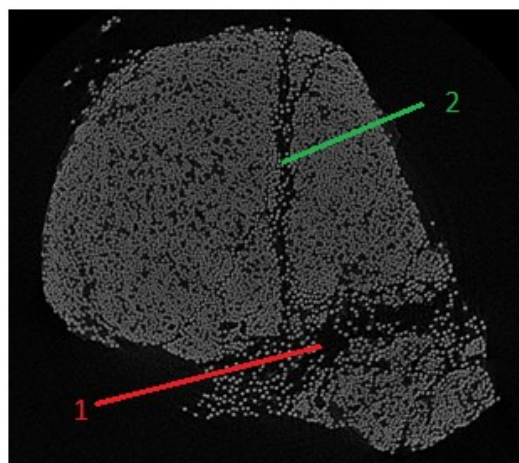
Rys. 90 Obraz różnicowy

Obraz różnicowy przedstawia zmiany w rozmieszczeniu pojedynczych włókien w próbce pręta bazaltowego. Kolor czerwony przedstawia zarejestrowany ubytek w próbce. Największe ilości ubytków znajdują się w uźebrowaniu pręta oraz w warstwie zewnętrznej. Zielonym kolorem przedstawiono przemieszczenia pojedynczych elementów, które również głównie dotyczą uźebrowania oraz zewnętrznej warstwy. Na etapie wyodrębniania pręcików bazaltowych z prętów, odrzucano uźebrowanie pręta z uwagi na jego bardzo małą wytrzymałość, którą można było sprawdzić za pomocą dłoni (przy jej odrywaniu od pręta zauważalne były jej pęknięcia i strzępienia).

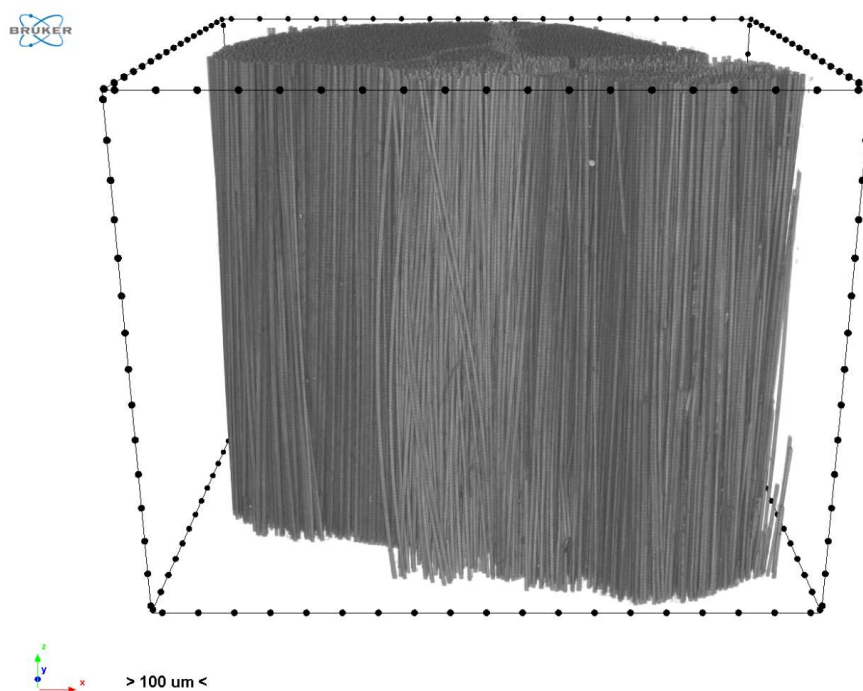
Aby niedoskonałości prętów i ich fragmentów można było lepiej zweryfikować zdecydowano się również na zeskanowanie pojedynczego pręcika służącego do zbrojenia fibrobetonu. Na rekonstrukcji pokazanej na rysunku 91 widać charakterystyczne przerwy pomiędzy pasmami włókien. Miejsca oznaczone jako 1 i 2 są pęknięciami wzdłużnymi powstałymi podczas produkcji, co kwalifikuje pręt jako odpadowy (widoczne również na rys. we wcześniejszej części rozprawy).

W celu sprawdzenia, czy wokół zbrojenia nie występuje nagromadzenie się kruszywa lub nadmiernych pęcherzyków powietrza, z przebadanej próbki fibrobetonowej wycięto fragment (sześciian) o boku długości 1 cm w celu zobrazowania wspomnianego połączenia. Na rysunku 92 przedstawiono trójwymiarowy obraz

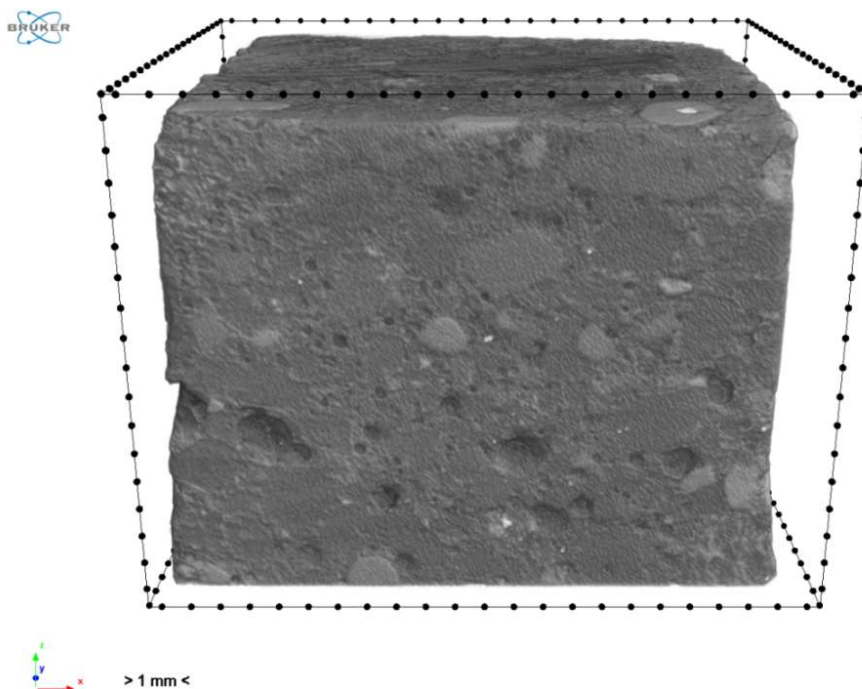
próbki, natomiast na rysunku 93 przedstawiono fragment włókna „zatopionego” w betonie.



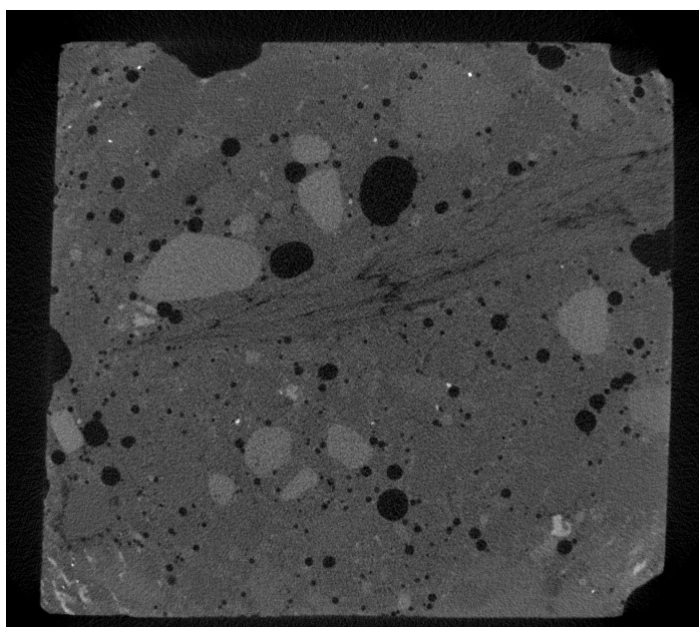
Rys. 91 Przekrój przez próbkę włókna bazaltowego odpadowego



Rys. 92 Rendering – trójwymiarowy obraz próbki bazaltowej



Rys. 93 Rekonstrukcja – rendering trójwymiarowego obrazu próbki bazaltowej



Rys. 94 Rekonstrukcja – przykładowy przekrój przez włókno zatopione w betonie



## 7. Podsumowanie

Prezentowana praca stanowi studium doświadczalno – badawcze. Celem rozprawy była doświadczalna weryfikacja możliwości zastosowania odpadowych włókien bazaltowych jako półprodukt do zbrojenia fibrobetonu. Głównym celem przyświecającym podczas badań było otrzymanie wspomnianego zbrojenia przy możliwie najniższych kosztach i nakładach energetycznych. Sam recykling materiałów powstających z włókien węglowych, szklanych czy bazaltowych jest kosztowny oraz stosunkowo trudny do wykonania z uwagi na niską liczbę wyspecjalizowanych firm podejmujących się tych zadań. W niniejszej pracy przytoczono obecnie trwające prace nad ponownym wykorzystaniem materiałów w budownictwie ze szczególnym uwzględnieniem zbrojenia. Przedstawiono metodologię przeprowadzanych badań oraz porównując ze sobą wybrane sposoby przeprowadzania badań przedstawione w szeroko rozumianej literaturze. Zaprezentowano wyniki badań własnych obejmujące wytrzymałość mechaniczną betonu ze zróżnicowanym dodatkiem fazy włóknistej oraz cechy reologiczne w postaci skurczu.,

W wykonanych badaniach analizowano zmiany parametrów uzyskiwanych przy wyznaczaniu:

- wytrzymałości na ściskanie,
- modułu sprężystości,
- wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu,
- wpływu włókien na wartości skurczu.

Wykonano również badania nieniszczące pokazujące strukturę włókien bazaltowych. Próbki poddane badaniu na skurcz wykorzystano w późniejszym etapie jako elementy do badania wytrzymałości na zginanie metodą FSD.

W pierwszym etapie podjęto próby wyodrębnienia z prętów bazaltowych „pręciki” służące jako półprodukt do zbrojenia betonu. Koncepcję odzyskania *pręcików* dostosowano do jak najmniejszego nakładu energii oraz pracy. Ostatecznie zdecydowano się na pozyskiwanie poprzez podgrzanie kawałków prętów odpowiadających założonej długości w temperaturze 250 °C a następnie pocięcie na pożądane grubości. W kolejnym

etapie przeprowadzono statyczną próbę rozciągania włókien i porównano ją z wytrzymałością na rozciąganie pręta przed poddaną obróbką termiczną.

W celu sprawdzenia struktury pręta i porównanie jej przed oraz po podgrzaniu przeprowadzono przy współpracy z pracownikami Katedry Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej skanowanie w mikrotomografii. Wyniki potwierdzają niedoskonałości mikrostruktury w prętach przed poddaniem obróbce termicznej w szczególności pęknięcia w strukturze. Natomiast porównanie próbek przed oraz po podgrzaniu wykazują brak znacznych różnic w strukturze. Zauważalne różnice można było zauważyć jedynie w elemencie zapewniającym przyczepność do betonu (uzebrowaniu). Jednak różnice tą można pominąć ze względu na brak zastosowania elementu uzebrowania w późniejszym stosowaniu jako zbrojenie w betonie.

W kolejnym etapie wykonano pilotażowe badania sprawdzające przydatność do zastosowania włókien jako półprodukt do zbrojenia elementów fibrobetonowych. W tym celu wykonano próbki z dodatkiem fazy włóknistej i wykonano po 3 próbki elementów niezbędnych do badania wytrzymałości na ściskanie, modułu sprężystości oraz wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu. Badania wykonano przy użyciu jednej receptury betonu, bez domieszek i dodatków aby sprawdzić przede wszystkim zachowanie mieszanki betonowej ze szczególnym uwzględnieniem urabialności. Próbki przebadano po 28 dniach od momentu zabetonowania po przechowywaniu ich w komorze klimatycznej.

Z przeprowadzonych badań na rozciąganie *pręcików* można stwierdzić, że ich wytrzymałość na rozciąganie poszczególnych *pręcików* jest zbliżona do wytrzymałości włókien stalowych. Charakteryzuje się jednak rozrzutem, co może świadczyć o niedokładnie rozłożonymi włóknami w przekroju badanych elementów. Zgodnie z przewidywaniami, zniszczenie następowało nagle, bez wcześniejszych oznak wyczerpywania nośności jak można to zaobserwować w przypadku włókien stalowych.

W kolejnym etapie wykonano:

- próbki z dodatkiem włókien bazaltowych w ilościach 1%, 1,5% oraz 2%,
- porównawczo próbki referencyjne betonowe,
- oraz próbki z dodatkiem włókien stalowych w analogicznych proporcjach.



Przy wykonywaniu próbek zachowano recepturę mieszanki betonowej jak w próbnym etapie za wyjątkiem dodatków. Zdecydowano się na dozowanie domieszki uplastyczniającej w celu poprawienia urabialności mieszanki szczególnie dla próbek z większą zawartością włókien. Analizując wyniki badań można stwierdzić, że dodatek włókien bazaltowych w ilości 1% jest niewystarczający do zapewnienia właściwej współpracy w mieszance betonowej. Wynika to bezpośrednio z wykresu wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu. Po osiągnięciu maksymalnej wytrzymałości próbka dalej przenosiła obciążenia w zakresie pozasprężystym, jednak charakter wykresu pokazywał naprzemiennie skoki wytrzymałości i spadki powodowane wyciąganiem włókien z betonu. Istnieje wiele czynników, które mogły wpłynąć na zaistniałą sytuację. Głównym powodem, zdaniem autora jest zarówno niewystarczająca ilość włókien oraz niewystarczające zakotwienie włókien. Z uwagi na sposób odzyskiwania włókien nie zdecydowano się na opracowanie zwiększenia przyczepności w poszczególnych włóknach. Temat będzie rozwijany przez autora w przyszłych badaniach.

Opracowanie wyników badań dla próbek z większą ilością włókien (1,5% oraz 2%) pozwoliło zaobserwować lepszą pracę elementu. W przypadku próbek z dodatkiem włókien bazaltowych ilości 1,5 % można było zauważyć poprawę w charakterze pracy pozasprężystej. Mianowicie, nie występowały już skoki i spadki wytrzymałości w fazie zarysowanej, które można było zobaczyć w przypadku próbek z 1%. Świadczy to o odpowiedniej ilości. W przypadku dodania włókien w ilości 2% oprócz wspomnianej zależności dla dodatku 1,5% występuje również wzrost wytrzymałości w zakresie obowiązywania prawa Hooke'a. Jest to efekt najbardziej pożądaný w przypadku elementów fibrobetonowych.

W odniesieniu do wytrzymałości na ściskanie, wraz ze wzrostem zawartości fazy włóknistej, wartość wytrzymałości spadała. Największą wytrzymałość otrzymano dla próbek bez dodatku włókien, najmniejszą dla największej zawartości (2%). Analogiczna sytuacja była obserwowana w przypadku badania próbek z dodatkiem włókien stalowych. Spadek wytrzymałości związany jest przede wszystkim z zaburzeniami struktury w elemencie. Zauważalna jest również różnica w samym zniszczeniu elementów z włóknami w stosunku do elementu betonowego. W przypadku betonu zniszczenie następowało gwałtownie, wręcz impulsywnie z powstaniem charakterystycznego kształtu

klepsydry po zniszczeniu. Natomiast w przypadku przeprowadzanych badań z dodatkiem włókien bazaltowych zniszczenie nie nastąpiło w sposób gwałtowny. Zniszczenie przebiegało stopniowo, w sposób zbliżony do zmiążdżenia betonu. Próbką po zgnieceniu dalej miała kształt zbliżony do sześcianu, bez charakterystycznej *klepsydry*.

Określenie modułu sprężystości przeprowadzono po wykonaniu badania na ściskanie. Z uwagi na wykonanie próbek z tej samej mieszanki betonowej, posłużono się wynikami na ściskanie otrzymanymi z próbek sześciennych. Wartości modułu sprężystości okazały się najmniejsze dla największych procentowych zawartości włókien zastosowanych w próbkach, zarówno w przypadku włókien bazaltowych jak i stalowych.

Wartości skurczu próbek otrzymanych podczas badań przeprowadzonych za pomocą aparatu Amslera również dały zadowalające wyniki. Przy zastosowaniu 1% fazy włóknistej w próbce, całkowity skurcz próbek był mniejszy niż w przypadku próbek betonowych. Natomiast przy zawartości 2% włókien bazaltowych wartości skurczu były mocno zbliżone do próbek z włóknami stalowymi w ilości 1%.

Rozkład włókien w próbce wykonany po przebadaniu elementów na rozciąganie przy zginaniu potwierdza poprawne rozmieszczenie włókien w przekroju. Nie wystąpiło w żadnym miejscu niekorzystne ułożenie dużej grupy włókien, brak był również koncentracji włókien przy równoczesnym braku w innym miejscu co potwierdza słuszność użycia domieszek uplastyczniających szczególnie przy większych zawartościach włókien w mieszance.

Niewątpliwie największym atutem zastosowanego zbrojenia, oprócz aspektu utylizacji problematycznych odpadów jest poprawność jego działania oraz współpracy z betonem. Przy niskich nakładach energii oraz niskich kosztach obróbki prętów można stosować zbrojenie z włókien bazaltowych w elementach fibrobetonowych. Włókno bazaltowe, jako pochodna naturalnej skały jest również bezpieczna zarówno dla środowiska naturalnego jak i dla człowieka. Na szczególną uwagę zasługuje zniwelowanie odkształceń skurczowych – co przy jednoczesnym braku podatności na korozję oraz wad związanych z między innymi zakłócaniem pola elektromagnetycznego – co ma miejsce przy zastosowaniu włókien stalowych może znaleźć zastosowanie w zbrojeniach w miejscach, w których wyeliminowanie powyższych niedoskonałości włókien stalowych jest konieczne. Mimo wszystko, wymagane jest prowadzenie dalszych

badan ze szczególnym naciskiem na poprawienie przyczepności do betonu. Pozwoli to na jeszcze bardziej optymalne wykorzystanie zaproponowanego zbrojenia.

#### **Podsumowanie i wnioski końcowe:**

W przedstawionej pracy przedstawiono wyniki doświadczalnych badań nad możliwością zastosowania odpadowych włókien bazaltowych jako możliwe zbrojenie do fibrobetonu oraz jego wpływ na poprawę właściwości mechanicznych fibrobetonów. Na podstawie przedstawionego przeglądu literatury sformułowano cele naukowe rozprawy doktorskiej. W celu potwierdzenia założonych tez wykonano badania doświadczalne na próbkach z dodatkiem włókien bazaltowych odpadowych o zróżnicowanym dodatku ilościowym wspomnianych włókien. W celu oceny skuteczności zastosowanego zbrojenia wykonano dla porównania badania dla próbek bez dodatku włókien oraz z dodatkiem najczęściej stosowanym typem włókien – włóknami stalowymi.

- 1) Wyniki badań przedstawione w niniejszej rozprawie potwierdzają tezę, że odpadowe włókna bazaltowe mogą być wykorzystywane jako niemetaliczne zbrojenie rozproszone do betonu. Największa poprawa badanych właściwości mechanicznych wystąpiła dla zawartości włókien w ilości 2%.. Minimalny zastosowany stopień zbrojenia włóknami (1%) pozwala na uniknięcie katastroficznego zniszczenia elementu poprzez zdolność do przenoszenia obciążeń w zakresie po osiągnięciu maksymalnej siły. Przy dodatku włókien odpadowych w ilości 2% zauważalny jest również wzrost przenoszonych obciążeń w zakresie sprężystym.

Istotnym aspektem jest również możliwość przetworzonego i ponownie użytego materiału. Stwarza to nowe możliwości na wykorzystanie odpadów powstałych z procesu produkcji prętów bazaltowych. Rozwiązuje to problem utylizacji odpadów przy jednoczesnym obniżeniu kosztów produkcji fibrobetonu. Jest to kolejny sposób wykorzystania materiałów powstałych ze skały bazaltowej po stosowaniu „proszku” bazaltowego jako wypełniacza do żywic lub materiałów drogowych [S8]. Mimo niewielkiej średnicy jest również bezpieczny dla zdrowia człowieka z uwagi, iż jest to materiał w pełni naturalny oraz po naukowych

badaniach, w wyniku których stwierdzono, że nie dostaje się do dróg oddechowych człowieka.

- 2) Zastosowane włókna odpadowe spełniające funkcje zbrojenia rozproszonego ograniczają katastroficzny proces zniszczenia elementu. Pokazane badania potwierdzają powyższą tezę zarówno w próbach statycznego ściskania (włączając badanie modułu sprężystości), w badaniach metodą brazylijską, jak również w przypadku badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu. Podczas badania wytrzymałości na ściskanie próbek betonowych zniszczenie następuje w sposób eksplozywny, co w przypadku konstrukcji budowlanych jest zjawiskiem bardzo niebezpiecznym. Przy zastosowaniu włókien bazaltowych odpadowych zniszczenie następowało w sposób kontrolowany przypominający miażdżenie elementu. W przeciwieństwie do elementu betonowego zniszczenie objawiało się obszernymi pęknięciami na powierzchni elementu po których nastąpiło zmiżdżenie elementu.
- 3) W pracy przedstawiono wyniki badań odkształceń skurczowych dla próbek betonowych o wymiarach 100 x 100 x 400 mm. Badania przeprowadzono dla próbek betonowych:
  - bez dodatku włókien,
  - z dodatkiem włókien bazaltowych odpadowych w ilości 1% i 2%
  - oraz dla porównania z dodatkiem włókien stalowych w również w ilości 1% oraz 2%.

Zgodnie z przewidywaniami próbki bez dodatku włókien wykazują największe odkształcenia skurczowe spośród przebadanych próbek. Największe ograniczenie odkształceń skurczowych wystąpiło dla próbek z dodatkiem włókien stalowych w ilości 2%. Dodatek włókien bazaltowych w ilości 1% poprawił odkształcenia skurczowe w stosunku do próbek betonowych o 18%, natomiast dodatek włókien bazaltowych w ilości 2% zmniejszył odkształcenia skurczowe w stosunku do próbek betonowych o 41% i odpowiada odkształceniom skurczowych dla próbek z dodatkiem włókien stalowych w ilości 1%. Analizując wyniki badań

skurczowych można stwierdzić że najbardziej optymalne pod kątem wykorzystania odpadowych włókien bazaltowych jest stosowanie włókien w ilości 2%.

- 4) Obróbka termiczna prętów przed wyodrębnieniem z nich pręcików nie wpływa na wytrzymałość oraz strukturę pręta. W wyniku skanowania mikrotomografem, jedyne różnice w strukturze zaobserwowano na uźebrowaniu pręta, które nie było wykorzystywane do badań. Same włókna również nie mogły zostać uszkodzone, gdyż temperatura topienia skały bazaltowej wynosi około 1500 °C. W porównaniu do temperatur zastosowanych podczas badania jest ona 6-krotnie większa,
- 5) Włókna bazaltowe jako włókna proste nie posiadają wystarczającej przyczepności do betonu. Zauważalne było podczas badań niektórych próbek wyciąganie włókien zamiast ich zrywanie. Konsekwencją tego zjawiska jest niewykorzystanie w pełni wytrzymałości włókien. Z uwagi na kruchość włókien modyfikacja nie powinna być wykonana poprzez mechaniczną modyfikację kształtu gdyż przyczyni się to do utraty wytrzymałości. Należy zwiększyć powierzchnię przyczepności pomiędzy włóknem i mieszanką betonową za pomocą ingerencji chemicznej w powłokę pręcików lub za pomocą zwiększenia chropowatości włókien.
- 6) W odróżnieniu do włókien stalowych, odpadowe włókna bazaltowe nie wykazują tendencji do tworzenia tak zwanych „jeży”.

W procesie wykonywania mieszanki betonowej z dodatkiem włókien stwierdzono, że są one rozmieszczone w sposób równomierny w przekroju próbki, co zostało potwierdzone poprzez rozcinanie elementów po przebadaniu i zliczeniu włókien. Przy wykonywaniu mieszanki betonowej należy używać domieszki uplastyczniającej.

### **Planowane dalsze prace**

Powszechne wykorzystanie materiałów odpadowych w budownictwie jest możliwe dopiero po całkowitym rozpoznaniu zachowania fibrobetonów z półproduktem w postaci odpadowych włókien bazaltowych. Z przeprowadzonych i omówionych badań w

niniejszej rozprawie z pewnością można stwierdzić, że włókna odpadowe bazaltowe mogą być z powodzeniem stosowane w produkcji fibrobetonów. Zaprezentowane wyniki badań są jednak niewystarczające do opracowania parametrów koniecznych do uwzględnienia w projektowaniu mieszanek fibrobetonowych z uwagi na duże zróżnicowanie parametrów pojedynczych *pręcików* odzyskanych z całych prętów. Praktycznie niemożliwe jest uzyskanie identycznych parametrów z uwagi na dokładność wyodrębniania elementów z prętów w stosunku do średnicy pojedynczego włókna bazaltowego. Na uwagę zasługuje przede wszystkim konieczność zwiększenia przyczepności włókien odpadowych do matrycy. Możliwe jest to do osiągnięcia w dwojaki sposób: poprzez modyfikację kształtu pojedynczego *pręcika* co można uznać za bardzo trudne do wykonania z uwagi na konieczność indywidualnego podejścia do pojedynczego pręcika lub poprzez polepszenie przyczepności poprzez chemiczną ingerencję w powierzchnię pręcika. Według autora modyfikacja chemiczna przyczepności jest bardziej wydajna i możliwa do osiągnięcia niższym nakładem pracy niż metoda mechaniczna.

Należy również określić **sposób wpływu** zaproponowanego zbrojenia w zależności od dobranej mieszanki betonowej oraz dodatków i domieszek w niej zawartych. W opisanych badaniach użyto wyłącznie domieszki uplastyczniającej w celu poprawy urabialności. Jednak wykonując mieszankę betonową o różnych wytrzymałościach, z zawartością dodatków i domieszek powszechnie stosowanych w budownictwie można uzyskać różne wyniki.

Warto również określić wpływ zaproponowanego zbrojenia na ścieralność fibrobetonu oraz zbrojenia przeciwskurczowego. Przedstawione badania potwierdzają, że zastosowanie zaproponowanego sposobu zbrojenia mogą znaleźć szczególne zastosowanie w elementach mających ciągłe podparcie – jak np. posadzki. Z tego względu wyżej wymienione badania są konieczne do wykonania.

Zdaniem autora, wcześniej wymienione badania są konieczne do opracowania dokładnego sposobu używania oraz obliczania fibrobetonów z dodatkiem włókien bazaltowych odpadowych. Do realizacji badań należy również włączyć elementy wielkoformatowe lub w miarę możliwości w skali naturalnej. Dadzą one wtedy rzeczywisty obraz pracy konstrukcji.

## 8. Bibliografia

- [1] DYREKTYWA PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY (UE) 2018/851 z dnia 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2008/98/WE w sprawie odpadów (Tekst mający znaczenie dla EOG),
- [2] Kongar-Syuryun Ch., Tyulyaeva Y., Khairutdinov A.M., Kowalik T: Industrial waste in concrete mixtures for construction of underground structures and minerals extraction. W: XXIII International Scientific Conference on Advance in Civil Engineering " Construction - the Formation of Living Environment" (FORM-2020), 23-26 September 2020, Hanoi, Vietnam. [Bristol : IOP Publishing, 2020]. art. 032004, s. 1-9.
- [3] Khayrutdinov A. M., Kongar-Syuryun Ch, Kowalik T., Faradzhov V.: Improvement of the backfilling characteristics by activation of halite waste for non-waste geotechnology. W: Young Scientist 2020 : 12th International Scientific Conference of Civil and Environmental Engineering for PhD. Students and Young Scientists, 15-16 October 2020, High Tatras, Slovakia. [Bristol] : IOP Publishing, 2020. art. 012018, s. 1-6.(IOP Conference Series - Materials Science and Engineering, ISSN 1757-899X; vol. 867),
- [4] Youjiang W., Wu C., Victor C.: Mechanical properties of SFRC using blended Recycled Tyre Steel Cords (RTSC) and recycled Tyre Steel Fibers (RTSF), Construction and Building Materials, 187, p. 553-564
- [5] Mastali, M ; Dalvand, A.: Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete (SCC), Construction and Building Materials 125,
- [6] Simalti, A., Singh, A.P; Comparative study on performance of manufactured steel fiber and shredded tire recycled steel fiber reinforced self-consolidating concrete, Construction and Building Materials, 266,
- [7] Ziaaddin Z., Lourenço L., Joaquim B.: Recycled Steel Fibre Reinforced Concrete failing in bending and in shear, Construction and Buildings Materials, 85, p. 195 – 207,
- [8] Analiza możliwości wykorzystania stalowych włókien z recyklingu opon jako półproduktu do produkcji fibrobetonów Konrad Łuszczuk Autor ; Andrzej

Ubysz Promotor; Politechnika Wrocławska. Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego. Instytucja nadająca stopień, 2019

- [9] Foti D.: Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers, *Constructions and Building Materials*, 25, p. 1906-1915,
- [10] Jeongsoo N., Gyuyong K., Jaechul Y., Gyeongcheol Ch., Hongseop K., Hyeonggil Ch., Youngduck K., Effectiveness of Fiber Reinforcement on the Mechanical Properties and Shrinkage Cracking of Recycled Fine Aggregate Concrete, *Materials* 2016,
- [11] Gómez-Soberón, José M.V.: Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study, *Cement and Concrete Research*, 2002, Vol.32 (8), p.1301-1311
- [12] Agrela F., De Brito J.: *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*, 2019
- [12] Zaetang Y., Vanchai S., Ampol W., Prinya Ch.: Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate, *Concrete and Buildings Materials*, 111, p. 15-21,
- [13] Aslani F., Lijun H.,; Shami N., Junbo S., Samer A.: Experimental analysis of fiber -reinforced recycled aggregate self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates, polypropylene, and steel fibers, *Structural concrete : journal of the FIB*, 2019-10, Vol.20 (5), p.1670-1683
- [14] Yin S.: *Development of Recycled Polypropylene Plastic Fibers to Reinforce Concrete*, Springer Singapore,
- [15] Grzymiski F., Musiał M., Trapko T.: Mechanical properties of fibre reinforced concrete with recycled fibers, *Construction & building materials*, 2019-02-20, Vol.198, p.323-331
- [16] Alida A., Kamarudin H., Mohd Salleh M. A. A., Mustafa Al Bakri A. M.: Strength of concrete based cement using recycle ceramic waste as aggregate. *Advanced Materials Research* Vol. 740 (2013) pp 734-738
- [17] Batayneh M., Marie I., Asi I.: Use waste materials in concrete mixes. *Waste Mang* 2007:27(12):1870-6. Epub 2 Nov. 2006.



- [18] Borg R.P., ; Baldacchino O., Ferrara L.: Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete, *Construction & building materials*, 2016-04-01, Vol.108, p.29-47
- [19] Yazdanbakhsh A., Bank L.C.: A critical Review of Research on Reuse of Mechanically Recycled FRP Production and End-of-Life Waste for Construction, *Polymers* 2014, 6, 1810-1826,
- [20] Bledzki A.K., Goracy K.: The use of recycled fibre composites as reinforcement for thermosets, *Mechanics of Composite Materials* 29(4): 352-356.
- [21] Grause G., Mochizuki T., Kameda T., Yoshioka T.: Recovery of glass fibers from glass fiber reinforced plastics by pyrolysis. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 2013, 15, 122–128.
- [22] Ogi K., Shinoda T., Mizui M.: Strength in concrete reinforced with recycled CFRP pieces. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.* 2005, 36, 893–902.
- [23] Conroy A., Halliwell S., Reynolds T.: Composite recycling in the construction industry. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.* 2006, 37, 1216–1222.
- [24] Ribeiro M.C.S., Meira-Castro A.C., Silva, F.G., Santos J., Meixedo J.P., Fiuza, A., Dinis M.L., Alvim M.R.: Re-use assessment of thermoset composite wastes as aggregate and filler replacement for concrete-polymer composite materials: A case study regarding GFRP pultrusion wastes. *Resour. Conserv. Recycl.* 2013, 2013
- [25] Tittarelli F.: Effect of low dosages of waste GRP dust on fresh and hardened properties of mortars: Part 2. *Constr. Build. Mater.* 2013, 47, 1539–1543.
- [26] Correia J.R., Almeida N.M., Figueira J.R.: Recycling of FRP composites: Reusing fine GFRP waste in concrete mixtures. *J. Clean. Prod.* 2011, 19, 1745–1753.
- [27] Asokan P., Osmani M., Price A.D.F.: Assessing the recycling potential of glass fibre reinforced plastic waste in concrete and cement composites. *J. Clean. Prod.* 2009, 17, 821–829.

- [28] Shahria Alam M., Slater E., Muntasir Billah A.: Green concrete made with RCA and FRP scrap aggregate: Fresh and hardened properties. *J. Mater. Civ. Eng.* 2013, 25, 1783–1794
- [29] Bakis, C. E., Bank Lawrence C., Brown V. L., Cosenza E., Davalos J. F., Lesko J. J., Machida A., Rizkalla S. H., Triantafillou T. C.: Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction -State-of-the-Art Review, *Journal of composites for construction* , 2002-05, Vol.6 (2), p.73-87, American Society of Civil Engineers;
- [30] Jamróży Z.: *Drutobeton*, Kraków 1985.
- [31] Report on Fiber Reinforced Concrete Reported by ACI Committee 544
- [32] Katzer J.: Włókna stalowe stosowane do modyfikacji betonu, „*Budownictwo, Technologie, Architektura*” 3(23)/2003, s. 46–47.
- [33] Dong Ch., Won-Kyu Ch., Romualdi J.P., Batson G.B.: Flexural fracture and fatigue behavior of steel-fiber-reinforced concrete structures, *Behavior of reinforced concrete beams with closely spaced reinforcement 1*, *J. Am. Concr. Inst.* 60 (1%3a) 775-790
- [34] Brandt A., Kasperkiewicz J., Glinicki M.: *Podstawy stosowania fibrobetonów z włóknami stalowymi*, Warszawa 1996
- [35] Kasperkiewicz J.: *Struktura uzbrojenia w kompozytach z włóknami rozproszonymi*, *Mechanika kompozytów betonopodobnych. Konferencja naukowa- Jabłonna 1979*. Ossolineum, Wrocław 1982
- [36] Glinicki M.A.: *Badanie właściwości fibrobetonu z włóknami stalowymi z odpadów przemysłowych*. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 4/1984
- [37] Glinicki M.A.: *Beton ze zbrojeniem strukturalnym*, XXV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk 10-13 marzec 2010,
- [38] Maage, M. *Interaction between steel fi bers and cement based matrices*, *Materials and Structures RILEM*, 10(59), 1997
- [39] Pinchin D.J., Tabor D.J. *Interfacial contact pressure and frictional stress transfer in steel fibre cement*, *RILEM Symp. Testing and Test Methods odFibre Cement Composites*, Sherffield, The Constr. Press, 1978,

- [40] Burakiewicz A., Przyczepność włókien do matrycy w kompozytach fibrobetonowych, Praca doktorska, Warszawa 1979
- [41] Potrzebowski J. Behaviour of the fibre/matrix interface in SFRC during loading, Brittle Matrix Composites 1, Elsevier Applied Science, Jablonna, 1985
- [42] Baggott R., Abdel-Monem, A.E.S. Aspects of Bond in high volume fraction steel fibre reinforced calcium silicates, High performance Fiber Reinforced Cement Composites, Mainz, 1992,
- [43] Banthia N., Trottier J.F., Pigeon M., Krishnadev M.R.: Deformed steel fiber pull – out: materials characteristics and metallurgical processes, 1992.
- [44] Venuat M.: Adjuvants et traitements, Paris 1984
- [45] Krenchel H., Jensen H.W.: organic reinforcing fibers for cement and concrete, Fibrous Concrete CI 80, 1980
- [46] Naaman A.E., Shah S.P., Throne J.L.: Some development in polypropylene fibers for concrete, Fibre Reinforced Concrete, ACI, 1984]
- [47] Morgan P. Carbon fibers and their composites. Boca Raton: CRC Press; 2005. Emmerich FG. Young's modulus, thermal conductivity, electrical resistivity and coefficient of thermal expansion of mesophase pitch-based carbon fibers. Carbon N Y 2014;79:274–93
- [48] Thomason J.L. Glassfibre sizing: A review of the scientific literature. Blurb Inc., 2012, ISBN 9780957381414
- [49] Thomason J.L, Adzima L.J.: Sizing up the interphase: an insider's guide to the science of sizing, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 32, Issues 3–4, 2001, Pages 313-321,
- [50] Gao SL, Mader E, Abdkader A, Offermann P. Sizings on alkali-resistant Glass fibres: environmental effects on mechanical properties. Langmuir 2003;19:2496-506]
- [51] Gao SL, Mader E, Plonka R. Nanostructured coatings of Glass fibers: Improvement of alkali resistance and mechanical properties. Acta Mater 2005;55:1043-52]

- [52] Performance Evaluation of 3-D Basalt Fiber Reinforced Concrete & Basalt Rod Reinforced Concrete Final Report for Highway IDEA Project 45
- [53] Sim J, Park C, Moon DY. Characteristic of basalt fibre as a strengthening material for concrete structures. *Compos: Part B* 2005;36:504–12.; Subramanian RV, Wang TJY, Austin HF. Reinforcement of polymers by basalt fibers. *SAMPE Quart* 1977;8(1).].
- [ 54] Wei B, Cao H, Song S. Degradation of basalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater. *CorrosSci* 2011;53:426–31.
- [55] Fiore V, Di Bella G, Valenza A. Glass-basalt/epoxy hybrid composites for marine applications. *Mater Des* 2011;32:2091–9.]
- [56] Sevostyanov, V S ; Shatalov, A V ; Shatalov, V A ; Golubeva, U V; Processing of basalt fiber production waste, IOP conference series. *Materials Science and Engineering*, 2018-03-01, Vol.327 (4), p.42103
- [57] Lu, Zhongyu ; Xian, Guijun ; Li, Hui; Effects of elevated temperatures on the mechanical properties of basalt fibers and BFRP plater, *Construction & building materials*, 2016-11-30, Vol.127, p.1029-1036
- [58] Kamiya S, Sasaki H, Nakagawa N. Method for manufacturing basalt fiber. *Google Patents*; 2011.
- [59] Brandt A.M. *Cement Based Composites – Materials, Mechanical Properties and Performance*, E&FN SPON, 1992,
- [60] Kasperkiewicz J., Skarendahl A.: *Toughness estimation in FRC composites*, CBI Report, Stockholm 1990 ]
- [61] Bentur A., Mindess S.: *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, Elsevier Applied Science, London, 1990]
- [62] Henager C.H.: *A toughness index of fibre concrete*, 1978.
- [63] Johnston C.D., Gray R.J.: *Flexural toughness and first crack strength of fibre-reinforced concrete*, Rusing ASTM Standard C1018, *Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete*, Sheffield 1986. ].
- [64] Logoń D Safe cement composites SRCC – the rope effect in HPFRC concrete, *Brittle matrix composites* 10, 2013, p.253-263

- [65] Logoń D.: The Rheological and Mechanical Properties of the SRCC Composites, SCMT3: Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Kyoto, Japan, 2013, s. 1-8.
- [66] Najm H.S., Naaman A.E.: Prediction model for elastic modulus of high-performance fiber reinforced cement-based composites, ACI Materials Journal, 92, 1995
- [67] Glinicki M.A.: Mechanizmy kruchości i trwałość kompozytów cementowych z włóknami szklanymi, Warszawa 1999
- [68] Seruga A, Kańska S., Lisowicz T.: Moduł sprężystości betonów na kruszywie granitowym w świetle badań doświadczalnych, Wydawnictwo PK
- [69] Lewicki B.: Diagnostyczna wytrzymałość obliczeniowa betonu i muru, Instytut Techniki Budowlanej, 2002
- [70] Michałek J.: Wyznaczanie modułu sprężystości betonu przy ściskaniu, Materiały budowlane 6, 2015.
- [71] Kubissa W., Kubissa W.: Wyznaczenie wytrzymałości betonu na rozciąganie w próbie zginania, June 2005 Conference: XIII Seminarium polsko – ukraińskie „Theoretical Foundations of Civil Engineering”, Dnepropetrovsk—Warsaw, June 2005
- [72] Neville A. M.: Właściwości betonu. Polski Cement sp. z o.o. Wydanie Czwarte Kraków 2000
- [73] Bywalski Cz., Kamiński M.: Rheological strains in concrete modified with steel fibre reinforcement, , Journal of civil engineering and management, 2013-10-01, Vol.19 (5), p.656-664
- [74] Wittman F.H.: Fundamental Research on Creep and Shrinkage of Concrete, Springer Netherlands, 1982
- [75] Rüsch R., Jungwirth D.: Skurcz i pęcznienie w konstrukcjach betonowych. Arkady, Warszawa 1979
- [76] Vademecum Technologbetonu, Górażdże Heidelberg Cement Group, Chorula 2017

- [77] Weiss W.J., Shah S.P., —Recent trends to reduce shrinkage cracking in concrete pavements, Proceedings of the Airfield Pavement Conference, Aircraft/Pavement Technology: In the Midst of Change, pp. 217-228; 1997]
- [78] Zhou J.H., Xiang H.: Research on Mechanical Properties of Recycled Fiber Concrete, , Applied mechanics and materials, 2011-09-08, Vol.94-96, p.1184-1187,
- [79] Flaga K.: Naprężenia skurczowe i zbrojenie przypowierzchniowe w konstrukcjach betonowych, Monografia 295, Wydawnictwo PK, Kraków 2004
- [80] Flaga K.: Skurcz betonu i jego wpływ na nośność, użyteczność i trwałość konstrukcji żelbetowych i sprężonych, Monografia, Wydawnictwo PK, Kraków 2002
- [81] Jamróży Z.: Beton i jego technologie, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009
- [82] Bywalski C ; Kamiński M ; Maszczak, M ; Balbus, Ł.: Influence of steel fibres addition on mechanical and selected rheological properties of steel fibre high-strength reinforced concrete Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2015-05, Vol.15 (3), p.742-750
- [83] Ochi T., Okubo S., Fukui K.: Development of recycled fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. ScienceDirect, Cement & Concrete Composites 29 (2007), 448-455
- [84] Sim J, Park C, Young Moon D. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. Composites Part B Eng 2005;36:504–15.
- [85] Di Ludovico M, Prota A, Manfredi G. Structural upgrade using basalt fibers for concrete confinement. J ComposConstr 2010;14(5):541–52.
- [86] Forde M.: Recycling od FRP Materials In Construction, ICE Manual of Construction Materials Volume 2 – Metals and Alloys; Polymer Fibre Composites In Civil Engineering; Timber, Glass, Non-Conventional Materials, Appendices. 2009.
- [87] Gharde S., Kandasubramanian B.: Mechanochemical and chemical recycling methodologies for the Fibre Reinforced Plastic (FRP), Environmental Technology & Innovation, 2019-05, Vol. 14,]:

- [88] Baturkin D., Ousmane A.H., Radhouane M., Tagnit-Hamou A., Massicotte L.: Valorization of recycled FRP materials from wind turbine blades in concrete.; Resources, Conservation and Recycling, 2021,;
- [89] Szymczak P.: – Badania fizycznych i wytrzymałościowych właściwości kompozytowych prętów zbrojeniowych w świetle norm, Przegląd Budowlany 6/2017
- [90] Brahim Benmokrane U., Burong Z., Adil Ch.: Tensile properties and pullout behaviour of AFRP and CFRP rods for grouted anchor applications, ISIS-Canada, Department of Civil Engineering, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Quebec, Canada, J1K 2R1, 1991
- [91] Rduch A., Rduch Ł., Walentyński R.: Właściwości i zastosowanie kompozytowych prętów zbrojeniowych, Przegląd Budowlany, 2017
- [92] Grygo R., Kasior-Kazberuk M.: Zbrojenie konstrukcji betonowych niemetalicznymi prętami kompozytowymi FRP, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 8/2017
- [93] Quagliarini E., Monni F., Lenci S., Bondioli F.: Tensile characterization of basalt fiber rods and ropes: A first contribution, Construction and Building Materials 34 (2012) 372-380
- [94] Aldikheeli M.R., Shubber M.S.: The effects of fibre on the mechanical properties of aerated concrete, 3rd International Conference on Engineering Sciences IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 671 (2020)
- [95] Suksawang N., Wtaife S., Alsabbagh A.: Evaluation of Elastic Modulus of Fiber-Reinforced Concrete, March 2018, ACI Materials Journal 115(2)
- [96] Tareq Noaman A., Hisham Abu Bakar B., Hazizan M.D.A.: Investigation on the mechanical properties of rubberized steel fiber concrete, Investigation on the mechanical properties of rubberized steel fiber concrete, Engineering Structures and Technologies, 9:2, 79-92, 2017,
- [97] Chandrashekara A., Palankar N., Durga Prashanth L., Mithun B.M., Ravi Shankar A.U.: A Study on Elastic Deformation Behavior of Steel Fiber-

Reinforced Concrete for Pavements, , J. Inst. Eng. India Ser. A, The Institution of Engineers (India) 2019

- [98] Suksawang, N., Wtaife S., Alsabbagh A.: Evaluation of Elastic Modulus of Fiber-Reinforced Concrete, ACI materials journal, 2018-03, Vol.115 (2), p.239
- [99] Byung-Wan J., Young-Hyun S., Young-Jin K.: The Evalution Of Elastic Modulus for Steel Fiber Reinforced Concrete, Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 37, No. 2, 2001, pp. 152Ð161. Translated from Defektoskopiya, No. 2, 2001, pp. 87Ð96.

#### **Strony internetowe**

- [S1] [http://painpol.com.pl/gmedia/w\\_kno\\_pp\\_01-jpg/](http://painpol.com.pl/gmedia/w_kno_pp_01-jpg/)
- [S2] <http://www.old.bautech.pl/pl/oferta/posadzki-betonowe/wyroby/baucon.html>
- [S3] <https://materialyinzynierskie.pl/wlokna-weglowe/>
- [S4] <https://www.itbud.com.pl/produkt/itfiber-glass-12-mm/>
- [S5] [www.strony.biuropromocji.pl](http://www.strony.biuropromocji.pl)
- [S6] <http://basalttech.pl/produkty/>
- [S7] <http://m.pl.frp-rejillas.com/info/frp-recycling-36403383.html>
- [S8] <https://www.basaltft.com/prop/rec.html>
- [S9] [www.cetris.cz](http://www.cetris.cz)

#### **Normy**

- [N1] PN-EN 206-1;2003/A2;2006 Beton część 1,
- [N2] ASTM C1018-97 Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)
- [N3] ACI Committee 544 State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete. ACI 2002
- [N4] RILEM TC162-TDF Test and design methods for steel fibre reinforced concrete



- [N5] ASTM C78
- [N6] JSCE-SF4 Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete
- [N7] PN-EN 14651:2007. Metoda badania włókien stalowych. Pomiary wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (granica proporcjonalności LOP).
- [N7] pn-84 B-06714/23 – Oznaczanie zmian objętościowych metodą Amslera
- [N8] ACI 440:3R Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures
- [N9] PN-EN 206:2014-04 Beton -- Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność

## **9. Streszczenie**

W pracy przedstawiono analizę możliwości zastosowania odpadowych włókien bazaltowych odseparowanych z odpadowych prętów bazaltowych jako alternatywne zbrojenie fibrobetonów oraz jego wpływ na właściwości mechaniczne. Zastosowane włókna wyodrębniono w odpadowych prętów bazaltowych przy założeniu jak najmniejszego nakładu pracy oraz minimalnej energochłonności. Bardzo istotnym aspektem, który w przyszłości może znaleźć aprobatę przemysłu jest utylizacja zalegających materiałów w zakładach produkcyjnych, co znacznie zmniejsza koszty wytworzenia alternatywnego zbrojenia. Celem pracy jest określenie najważniejszych właściwości fibrobetonu z dodatkiem odpadowych włókien bazaltowych.

Praca ma charakter doświadczalny. W przeglądzie literatury przedstawiono aktualny stan wiedzy dotyczący wykorzystania odpadowych materiałów jako alternatywnego zbrojenia do betonu. Przedstawiono własną koncepcję wyodrębnienia włókien umożliwiających wykorzystanie ich jako zbrojenie rozproszone. Następnie zaprezentowano badania pokazujące wpływ włókien na właściwości betonu oraz badania nieniszczące zarówno włókien jak i przekroju włókien umieszczonych w betonie. W ostatnim rozdziale zamieszczono najważniejsze wnioski oraz spostrzeżenia, które mogą być wykorzystane do praktycznego wykorzystania tych włókien.

## **10. Summary**

The paper presents an analysis of the possibility of using waste basalt fibers separated from waste basalt rods as an alternative reinforcement of fiberconcrete and its influence on mechanical properties. The used fibers were separated in waste basalt rods with the assumption of as little work and energy consumption as possible. A very important aspect that may be approved by the industry in the future is the utilization of residual materials in production plants, which significantly reduces the costs of producing alternative

reinforcement. The aim of the work is to determine the most important properties of fibrobeton with the addition of waste basalt fibers.

The work is experimental. The review of the literature presents the current state of knowledge regarding the use of waste materials as an alternative reinforcement for concrete. The paper presents its own concept of isolating the fibers that enable their use as dispersed reinforcement. Then, the research showing the influence of fibers on the properties of concrete and non-destructive tests of both the fibers and the cross-section of the fibers embedded in the concrete are presented. The last chapter presents the most important conclusions and insights that can be used for the practical use of this fibers.