

Innowacyjne zastosowanie włókien w betonie: Metody badań i projektowania nośności na ścinanie

Innovative applications of fibers in concrete: Research and design methods of shear capacity

Julita Krassowska^{1,*}, Paweł Wolka²

¹Faculty of Civil Engineering and Environmental Sciences, Białystok University of Technology, ORCID: 0000-0001-9209-1285

²Astra Technologia Betonu sp. z o.o., ORCID: 0000-0001-7921-720X

*Corresponding author: J. Krassowska, e-mail: j.krassowska@pb.edu.pl

Streszczenie

Celem przeprowadzonych badań jest ustalenie, modelu zniszczenia dwuprzęsłowych belek ze zbrojeniem rozproszonym w postaci włókien stalowych i bazaltowych. Badania doświadczalne dwuprzęsłowych belek o przekroju 120×300 mm i długości 4150 mm koncentrowały się na określeniu zmian zachowania badanych elementów na ścinanie w zależności od ilości zbrojenia oraz rodzaju włókien. Belki posiadały zróżnicowany rozstaw strzemion. Zawartość włókien stalowych wynosiła 78,5 kg/m³ [1,0%], a włókien bazaltowych 5,0 kg/m³ [0,19%]. Badano także belki betonowe bez włókien. Aby ocenić wpływ dodatku włókien na nośność na ścinanie, wykonano obliczenia nośności belek ze zbrojeniem podłużnym i zbrojeniem rozproszonym w postaci włókien bazaltowych lub stalowych, zgodnie z zaleceniami norm PN-EN 1992-1-1 (1), fib Model Code 2010 (2,3), German Committee for Reinforced Concrete DIN 2012 (4) oraz RILEM TC 162-TDF 2003 (5).

Słowa kluczowe: beton, włókna stalowe, włókna bazaltowe, nośność na ścinanie

Summary

The aim of the conducted research is to determine the failure model of two-span beams with dispersed reinforcement in the form of steel and basalt fibers. Experimental studies of two-span beams with a cross-section of 120×300 mm and a length of 4150 mm focused on observing changes in the behavior of the tested elements depending on the amount of shear reinforcement and the type of fibers. The beams had varied stirrup spacing. The content of steel fibers was 78.5 kg/m³ [1.0%], and the content of basalt fibers was 5.0 kg/m³ [0.19%]. Concrete beams without fibers were also tested. To assess the impact of the presence of fibers on shear capacity, calculations of the load-bearing capacity of beams with longitudinal reinforcement and dispersed reinforcement in the form of basalt or steel fibers were carried out in accordance with the recommendations of standards PN-EN 1992-1-1 (1), fib Model Code 2010 (2,3), German Committee for Reinforced Concrete DIN 2012 (4), and RILEM TC 162-TDF 2003 (5).

Keywords: concrete, steel fibers, basalt fibers, shear load capacity

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach znaczący postęp w technologii materiałów budowlanych skierował uwagę naukowców i inżynierów na innowacyjne zastosowania włókien niemetalicznych w betonie. Włókna stalowe i bazaltowe, stosowane jako zbrojenie rozproszone, stały się przedmiotem licznych badań ze względu na ich zdolność do poprawy właściwości mechanicznych betonu, zwłaszcza w kontekście nośności na ścinanie. Badania te wykazały, że włókna stalowe i bazaltowe mogą znacząco zwiększyć wytrzymałość na rozciąganie oraz odporność na pęknięcia.

1. Introduction

In recent years, significant progress in building materials technology has directed the attention of scientists and engineers to innovative applications of non-metallic fibers in concrete. Steel and basalt fibers, used as dispersed reinforcement, have become the subject of numerous studies due to their ability to improve the mechanical properties of concrete, especially in the context of shear capacity. These studies have shown that steel and basalt fibers can significantly increase tensile strength and fracture resistance.

Steel fibers are widely used in concrete structures because of their ability to improve the load-bearing capacity of concrete without the

Włókna stalowe są szeroko wykorzystywane w konstrukcjach betonowych ze względu na zdolność do poprawy nośności betonu bez procesu układania zbrojenia prętowego. Prace takie jak te autorstwa Barnes'a i jego współpracowników (6) pokazują, że włókna stalowe mogą zwiększać wytrzymałość na ścinanie, jednakże ich stosowanie w belkach zginanych i ciągłych wciąż wymaga dalszych badań. Włókna bazaltowe, będące nowym materiałem w tej dziedzinie, również wykazują obiecujące właściwości mechaniczne (7-9), takie jak zwiększona odporność na korozję, co czyni je atrakcyjnym wyborem do zbrojenia betonu. W szczególności Li i Xu (10) wykazali, że dodatek włókna bazaltowego może znacznie poprawić odkształcalność i zdolność pochłaniania energii przez beton geopolimerowy, bez istotnej poprawy wytrzymałości na ściskanie. Wpływ włókna bazaltowego na fizyczne i mechaniczne właściwości betonów został również oceniony przez Kabaya (11). Batston i in. (12) stwierdzili, że wprowadzenie włókien bazaltowych zwiększało wytrzymałość betonu na pękanie, ale nie miało znaczącego wpływu na odporność na obciążenia udarowe. Dodatkowo, przy większych zawartościach włókien i mikroprętów bazaltowych siła niszcząca i wytrzymałość betonu na rozciąganie wzrastały, ale kompozyt wykazywał cechy materiału plastycznego, co utrudniało ocenę momentu pęknięcia.

Stosowanie tradycyjnych strzemion jest efektywne, ale powoduje znaczące koszty związane ze zużyciem stali zbrojeniowej oraz ich montażem w konstrukcji. Podczas formowania belek, niewielkie odległości między strzemionami powodują też problemy technologiczne z równomiernym rozmieszczeniem kruszywa w mieszance betonowej, co może prowadzić do ubytków i słabych więzi pomiędzy betonem a prętami zbrojenia.

Pierwsze publikacje dotyczące nośności na ścinanie belek wykonanych z betonu z włóknami stalowymi pojawiły się w 1972 roku (12). Potwierdziły one, że zastosowanie betonu z włóknami pozwala ograniczyć niezbędną ilość zbrojenia poprzecznego w postaci strzemion w belkach. Na podstawie badań belek w skali naturalnej Williamson i Knab (13) wykazali wpływ włókien stalowych w ilości 1,5% obj. na zwiększenie nośności na ścinanie. Jednakże w trakcie badań stwierdzono, że belki ze zbrojeniem w postaci włókien stalowych ulegały zniszczeniu przy sile mniejszej w porównaniu do belek, w których zastosowano tradycyjne zbrojenie na ścinanie w postaci strzemion. Podobne wyniki otrzymano podczas badań belek prostokątnych i teowych, przeprowadzonych przez La Fraugh i Moustafa (14). W 1985 roku Swamy i Bahia (15) przeprowadzili badania w celu wyjaśnienia, czy w przypadku belek żelbetonowych swobodnie podpartych włókna stalowe w ilości do 1,2% mogą współpracować ze zbrojeniem podłużnym i poprzecznym przy przenoszeniu obciążeń. Badaniom poddano belki prostokątne i teowe potwierdzając korzystny wpływ włókien stalowych na maksymalną siłę poprzeczną. Wielkość przyrostu siły poprzecznej zależała od przekroju poprzecznego, ilości włókien stalowych w betonie oraz stopnia zbrojenia na rozciąganie.

Sharma (16) jako jeden z pierwszych zaproponował wzory empiryczne do szacowania nośności na ścinanie belek z betonu z włóknami stalowymi [SFRC]. Wzory zostały zweryfikowane na

need for bar reinforcement. Studies such as those by Barnes et al. (6) show that steel fibers can increase shear strength, but their use in flexural and continuous beams still requires further investigation. Basalt fibers, a new material in this field, also exhibit promising mechanical properties (7-9), such as improved corrosion resistance, making them an attractive choice for concrete reinforcement. In particular, Li and Xu (10) showed that the addition of basalt fiber can significantly improve the deformability and energy absorption capacity of geopolymer concrete without significantly improving the compressive strength. The effect of basalt fiber on the physical and mechanical properties of concretes has also been evaluated by Kabaya (11). Batston et al. (12) found that the introduction of basalt fibers increased the fracture toughness of concrete but had no significant effect on the resistance to impact loading. Additionally, with higher contents of basalt fibres and microrods, the breaking force and tensile strength of concrete increased, but the composite showed the characteristics of a plastic material, which made it difficult to assess the fracture moment.

The use of traditional stirrups is effective, but causes significant costs related to the consumption of reinforcing steel and their installation in the structure. When forming beams, small distances between stirrups also cause technological problems with the even distribution of aggregate in the concrete mix, which can lead to losses and weak bonds between concrete and reinforcing bars.

The first publications on the shear capacity of beams made of concrete with steel fibers appeared in 1972 (12). They confirmed that the use of concrete with fibers allows for reducing the necessary amount of transverse reinforcement in the form of stirrups in beams. Based on tests of full-scale beams, Williamson and Knab (13) demonstrated the effect of steel fibers in the amount of 1.5 vol.% on increasing the shear capacity. However, during the tests it was found that beams with steel fiber reinforcement were destroyed at a lower force compared to beams with traditional shear reinforcement in the form of stirrups. Similar results were obtained during tests of rectangular and T-beams conducted by La Fraugh and Moustafa (14). In 1985, Swamy and Bahia (15) conducted research to clarify whether steel fibers in an amount of up to 1.2% can cooperate with longitudinal and transverse reinforcement in transferring loads in simply supported reinforced concrete beams. Rectangular and T-shaped beams were tested and confirmed the beneficial effect of steel fibers on the maximum transverse force. The magnitude of the increase in transverse force depended on the cross-section, the amount of steel fibers in the concrete and the degree of tensile reinforcement.

Sharma (16) was one of the first to propose empirical formulas for estimating the shear capacity of steel fiber reinforced concrete [SFRC] beams. The formulas were verified based on the author's own research results and other results available in the literature. The maximum value of the shear capacity of SFRC beams can be calculated according to the formula [1]:

$$V_{nf} = v_{cf} + v_s \quad [1]$$

podstawie wyników badań własnych autora oraz innych wyników dostępnych w literaturze. Maksymalną wartość nośności na ścinanie belek SFRC można obliczyć zgodnie ze wzorem [1]:

$$V_{nt} = v_{cf} + v_s \quad [1]$$

gdzie: v_s – to naprężenia od ścinania w betonie:

$$v_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad [2]$$

v_{cf} – to naprężenia od ścinania w SFRC:

$$v_{cf} = k f_t' \frac{d^{0.25}}{a} \quad [3]$$

gdzie:

d/a – efektywny wskaźnik ścinania,

f_t' – wytrzymałość na rozciąganie,

k – stała równa 2/3.

Włókna niemetaliczne, takie jak włókna stalowe i bazaltowe, zyskały znaczną uwagę w badaniach nad poprawą właściwości mechanicznych betonu. Wyniki badań belek jednoprzęsłowych SFRC przeprowadzone przez El-Niema (17), Tan i in. (18), oraz Furlana i Bento de Hanai (19) potwierdziły, że zastosowanie betonu z włóknami stalowymi zwiększa nośność na ścinanie oraz zmniejsza ugięcia. Swamy i Bahia (15), Aoude (20), Minelli i Plizzari (21) przeprowadzili badania na elementach belkowych w skali naturalnej, wskazując na istotność efektu skali w badaniach nad nośnością na ścinanie, co zostało również potwierdzone przez Godyckiego-Ćwirko (22). Ważnym czynnikiem jest również wskaźnika ścinania av/d w kontekście nośności na ścinanie belek betonowych. Batson i in. (12) zaproponowali krytyczne wartości tego wskaźnika odpowiednio dla belek SFRC i RC. Pomimo obszernych badań, wiele prac koncentruje się głównie na belkach jednoprzęsłowych. Badania i analizy teoretyczne dotyczące belek dwuprzęsłowych są rzadsze, co stanowi lukę w literaturze, jak zauważono w pracach Swamy i Bahia (23) oraz Minelli i Plizzari (21). W tej dziedzinie brakuje również szczegółowych analiz wpływu różnych proporcji włókien i rozstawu strzemion na zachowanie belek pod obciążeniem.

Celem niniejszego artykułu jest ocena wpływu zastosowania włókien w szczególności włókien stalowych i bazaltowych, na nośność na ścinanie oraz ogólne właściwości mechaniczne dwuprzęsłowych belek betonowych. Przeprowadzone badania mają na celu opracowanie modelu zniszczenia takich belek oraz dostarczenie wytycznych dotyczących efektywnego projektowania zbrojenia rozproszonego. Artykuł dąży do przedstawienia wyników eksperymentalnych oraz teoretycznych analiz, które mogą posłużyć jako podstawa do wdrażania nowych, innowacyjnych metod projektowania konstrukcji betonowych o zwiększonej trwałości i wytrzymałości.

where:

v_s – is the shear stress in concrete:

$$v_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad [2]$$

v_{cf} – is the shear stress in SFRC:

$$v_{cf} = k f_t' \frac{d^{0.25}}{a} \quad [3]$$

where:

d/a – effective shear index,

f_t' – tensile strength,

k – constant equal to 2/3.

Nonmetallic fibers, such as steel and basalt fibers, have received considerable attention in research on improving the mechanical properties of concrete. The results of single-span SFRC beam studies conducted by El-Niema (17), Tan et al. (18), and Furlana and Bento de Hanai (19) confirmed that the use of concrete with steel fibers increased the shear capacity and reduced the deflections. Swamy and Bahia (15), Aoude (20), Minelli and Plizzari (21) conducted studies on full-scale beam elements, indicating the importance of the scale effect in shear capacity studies, which was also confirmed by Godycki-Ćwirko (22). The shear ratio av/d is also an important factor in the shear capacity of concrete beams. Batson et al. (12) proposed critical values of this ratio for SFRC and RC beams, respectively. Despite the extensive research, many works are mainly focused on single-span beams. Studies and theoretical analyses on double-span beams are rarer, which is a gap in the literature, as noted by Swamy and Bahia (23) and Minelli and Plizzari (21). The field also lacks detailed analyses of the effect of different fiber ratios and stirrup spacing on the behavior of beams under loading.

The aim of this article is to assess the effect of using fibers, especially steel and basalt fibers, on the shear capacity and general mechanical properties of two-span concrete beams. The conducted research aims to develop a model of the failure of such beams and to provide guidelines for the effective design of dispersed reinforcement. The article aims to present experimental results and theoretical analyses that can serve as a basis for implementing new, innovative methods of designing concrete structures with increased durability and strength.

2. Experimental

2.1. Research assumptions

In the test program of two-span beams in full scale, three series of test elements were assumed, differing in the distribution of transverse reinforcement. Each series consisted of 3 beams with dimensions of 120×300×4150 mm. The test program is presented in Fig. 1.

2. Badania doświadczalne

2.1. Założenia do badań

W programie badań belek dwuprzęsłowych w skali naturalnej założono trzy serie elementów próbnych różniące się rozkładem zbrojenia poprzecznego. Każda seria składała się z 3 belek o wymiarach 120×300×4150 mm. Program badań przedstawiono na rys. 1.

Projekt zbrojenia belek odnosił się do pierwszej serii C-I-W0, w której założono wymiary poprzeczne przekroju oraz stopień zbrojenia podłużnego,

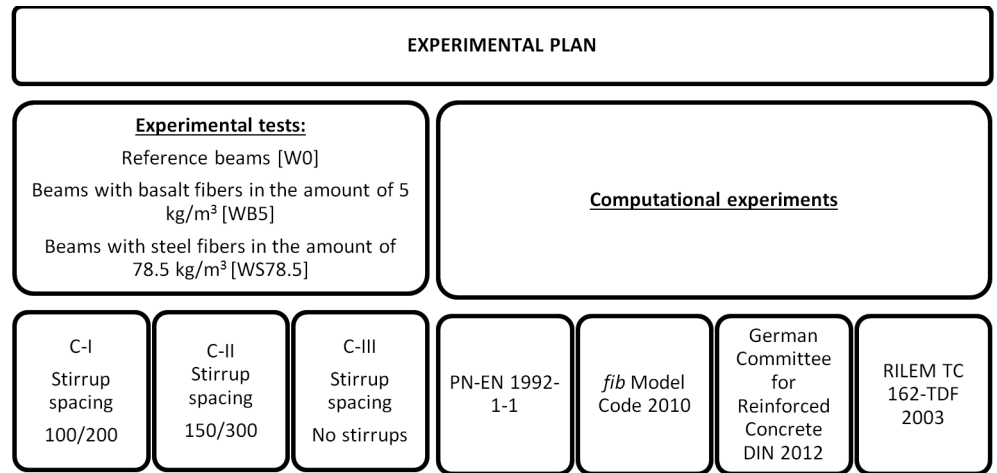
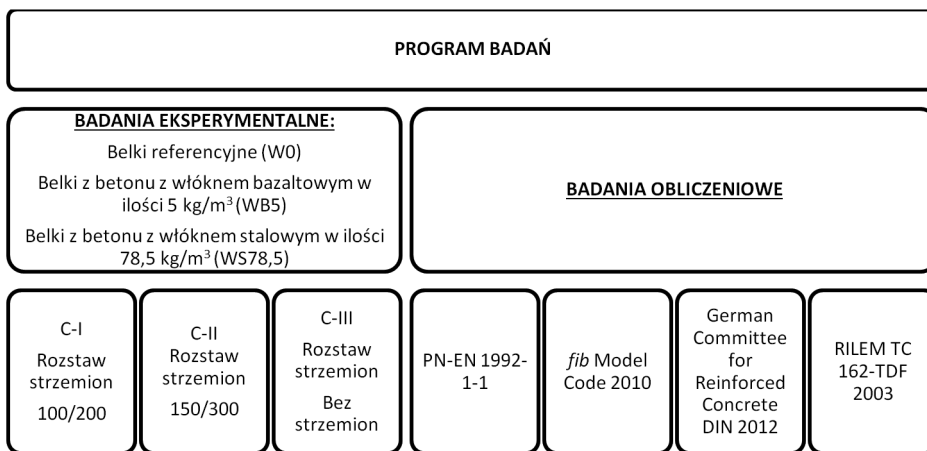


Fig. 1. Experimental plan



Rys. 1. Program badań

który wynosił $\approx 0,65\%$. Wartość maksymalnego momentu zginającego ustalono według metody dokładnej obliczania elementów żelbetowych z betonów zwykłych. Na podstawie maksymalnego momentu zginającego określono wartość siły poprzecznej, na którą zaprojektowano rozstaw strzemion.

Belki zbrojono symetrycznie względem środkowej podpory [rys. 2], zwiększenie rozstawu strzemion w poszczególnych seriach miało na celu wykazanie możliwości zmniejszenia ich liczby dzięki zastosowaniu włóknobetonu. Belki serii C-I zbrojono na ścinanie strzemionami o maksymalnym rozstawie ustalonym wg PN-EN 1992-1-1 (1). W serii C-II strzemiona miały rozstaw dwukrotnie większy niż ustalony z PN-EN 1992-1-1 (1). Belki serii C-III były całkowicie pozbawione strzemion. W strefie ściskanej i rozciąganej zastosowano po 2 pręty $\phi 12\text{mm}$ [$f_{yk} = 500\text{ MPa}$]. Strzemiona i klamry spinające wykonano z prętów o średnicy $\phi 6\text{mm}$ [$f_{yk} = 500\text{ MPa}$]. Stopień zbrojenia rozciąganego wszystkich belek badanych był jednakowy i wynosił $\approx 0,65\%$. Punkty podparcia belek umieszczono w odległości 75 mm od zewnętrznej krawędzi belek, uzyskując rozpiętość w osiach przęseł równą $l_{eff} = 2000\text{ mm}$. Wskaźnik ścinania a/d belek wynosił 3,5.

W trakcie badań określono nośność na zginanie elementu. Stawisko badawcze z oprzyrządowaniem przedstawiono na rys. 3.

The beam reinforcement project design referred to the first series C-I-W0, in which the cross-section dimensions and the longitudinal reinforcement ratio of $\rho_e = 0,65\%$ were assumed. The value of the maximum bending moment was determined according to the exact method of calculating reinforced concrete elements from ordinary concrete. Based on the maximum bending moment, the value of the transverse force was determined, for which the stirrup spacing was designed.

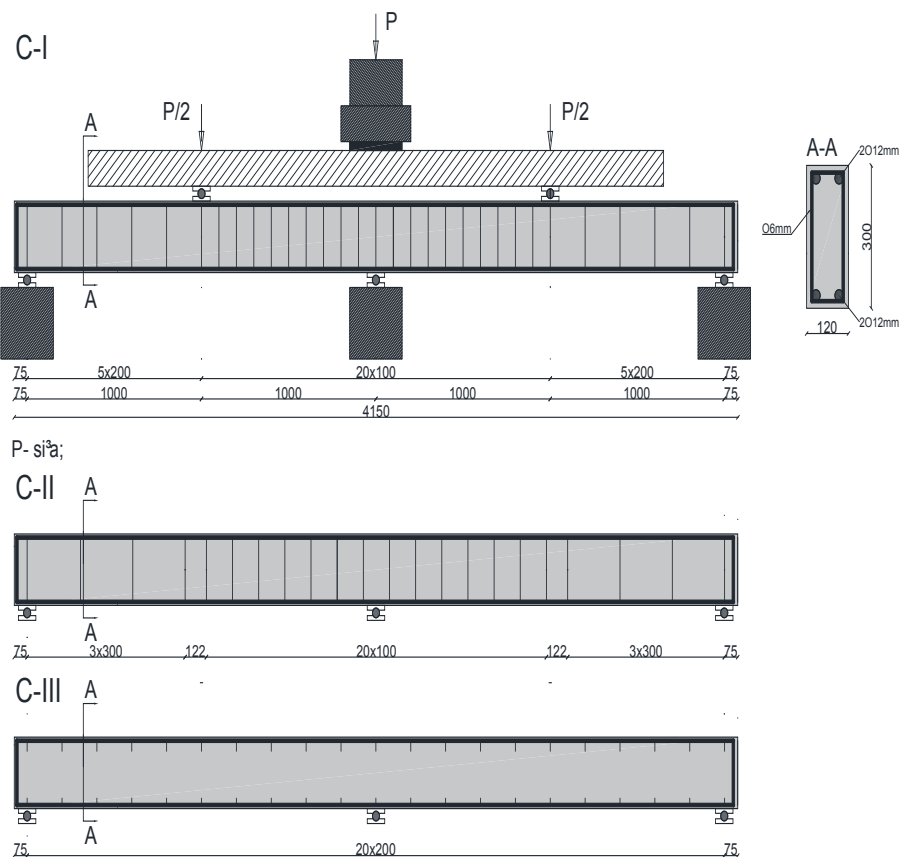
The beams were reinforced symmetrically in relation to the central support [Fig. 2], the increase in the stirrup spacing in

the individual series was aimed at demonstrating the possibility of reducing their number by using fibre concrete. The C-I series beams were reinforced for shear with stirrups with the maximum spacing determined according to PN-EN 1992-1-1 (1). In the C-II series, the stirrups had a spacing twice as large as determined according to PN-EN 1992-1-1 (1). The C-III series beams were completely devoid of stirrups. In the compression and tension zones, 2 $\phi 12\text{ mm}$ bars [$f_{yk} = 500\text{ MPa}$] were used. The stirrups and the connecting clamps were made of $\phi 6\text{ mm}$ bars [$f_{yk} = 500\text{ MPa}$]. The degree of tension reinforcement of all the tested beams was the same and amounted to $\approx 0,65\%$. The beam support points were placed 75 mm from the outer edge of the beams, obtaining a span in the span axes equal to $l_{eff} = 2000\text{ mm}$. The shear ratio a/d of the beams was 3.5.

During the tests, the bending load capacity of the element was determined. The test stand with the equipment is shown in Fig. 3. The load was applied using a controlled hydraulic actuator with a load capacity of 500 kN. The beams were loaded in a 4-point system using a force increase of 5 kN until the element was destroyed.

2.2. Materials

Table 2 presents the average values of: compressive strength obtained using cubic $f_{c,cube,10}$ and cylindrical f_{ck} samples, tensile



Rys. 2. Geometria i schemat podparcia belek w trakcie badania

Fig. 2. Geometry and support scheme of beams during the test



Rys. 3. Widok stanowiska badawczego

Fig. 3. Experimental setup

Obciążenie zadawano za pomocą sterowanego siłownika hydraulicznego o nośności 500 kN. Belki obciążono w układzie 4 punktowym stosując przyrost siły co 5 kN, aż do zniszczenia elementu.

2.2. Materiały użyte do badań

Do wykonania belek w skali naturalnej wykorzystano beton zawierający 300 kg/m³ cementu portlandzkiego CEM I 42,5R. Jako kruszywo zastosowano mieszaninę piasku o uziarnieniu do 2 mm i kruszywa grubego naturalnego o uziarnieniu do 8 mm. Recepturę betonu do wykonania belek referencyjnych podano w tabelicy 2.

strength in bending f_{ctm} , tensile strength in splitting $f_{ctm,s}$, modulus of elasticity E_{cm} and standard deviations of the test results. The increase in tensile strength in bending was 40% in the case of introducing steel fibers into the concrete and 30% in the case of using basalt fibers. Elements made of concrete with basalt fibers were subject to brittle fracture, similarly to ordinary concrete without the addition of fibers. However, the force destroying the sample was much higher.

w/c	Cement 42,5R, kg/m ³	Woda / Water, kg/m ³	Piasek / Sand 0 - 2 mm, kg/m ³	Kruszywo / Aggregate 2 - 8 mm, kg/m ³	Superplastyfikator / Superplasticizer [1% masy cementu / 1% by the mass of cement]
0.5	300	150	1027	987	3.0

Jako zbrojenie rozproszone użyto włókien stalowych lub bazaltowych. Włókna stalowe dozowano w ilości 78,5 kg/m³, a włókna bazaltowe zastosowano w ilości 5 kg/m³. Zbrojeniem rozproszonym zastąpiono objętościowo część kruszywa.

W tablicy 2 przedstawiono średnie wartości: wytrzymałości na ściskanie otrzymane przy wykorzystaniu próbek sześciennych $f_{c,cube,10}$ i walcowych f_{ck} , wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu f_{ctm} , wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu f_{ct} , modułu sprężystości E_{cm} oraz odchylenia standardowe wyników badań.

Przyrost wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu wyniósł 40% w przypadku wprowadzenia do betonu włókien stalowych i 30% w przypadku zastosowania włókien bazaltowych. Elementy z betonu z włóknami bazaltowymi ulegały kruchemu pękaniu, podobnie jak beton zwykły bez dodatku włókien. Jednakże, siła niszcząca próbkę była znacznie większa.

3. Wyniki nośności belek

Zestawienie wartości sił niszczących P_{ult} poszczególne belki przedstawiono w tablicy 3 wraz ze średnią wartością siły niszczącej $\overline{P_{ult}}$ oraz przyrostem wartości obciążenia niszczącego ΔP_{ult} w stosunku do belek z betonu bez włókien odpowiedniej serii.

Wpływ zbrojenia rozproszonego na nośność na ścinanie można określić, porównując wartości sił niszczących w poszczególnych seriach. Belki serii C-I uległy zniszczeniu w wyniku zginania, a wartość siły niszczącej nieznacznie wzrosła dzięki zastosowaniu w betonie włókien bazaltowych lub stalowych.

Wartość siły niszczącej określona dla belek serii C-II-WB jest porównywalna z wartością siły niszczącej w serii C-I-W0. Można przez to rozumieć, że wprowadzenie włókien bazaltowych do betonu spowodowało zwiększenie siły niszczącej, pomimo zastosowania tylko połowy strzemion. W przypadku zastosowania w betonie włókien stalowych taki sam efekt można zaobserwować w serii C-II-WS.

Model zniszczenia poprzez ścinanie uzyskano we wszystkich belkach serii C-III. Belki nie były zbrojone strzemionami, rolę strzemion

Tablica 2 / Table 2

PROPERTIES OF CONCRETE [AVERAGE AND STANDARD DEVIATIONS]

WŁAŚCIWOŚCI BETONÓW [WARTOŚCI ŚREDNIE I ODCHYLENIA STANDARDOWE]

Rodzaj włókien / Type of fibers	V_f	$f_{c,cube,10}$	f_{ck}	f_{ctm}	f_{ct}	E_{cm}
	kg/m ³	MPa	MPa	MPa	MPa	GPa
Bez włókien / No fibers W0	-	52.96 (6.34)	35.19 (0.86)	5.14 (0.33)	3.22 (0.39)	33.29 (1.28)
Włókna bazaltowe / Basalt fibers WB	5,0	46.24 (5.35)	29.08 (2.94)	6.72 (1.22)	4.49 (0.24)	32.86 (2.33)
Włókna stalowe / Steel fibers WS	78,5	52.05 (12.36)	39.12 (4.11)	7.21 (1.06)	5.45 (0.51)	33.71 (0.34)

3. Results of beam load-bearing capacity

The summary of the values of the destructive forces P_{ult} for individual beams is presented in Table 3, together with the average value of the destructive force $\overline{P_{ult}}$ and the increase in the value of the destructive load ΔP_{ult} in relation to the beams made of concrete without fibers of the appropriate series.

The effect of dispersed reinforcement on shear capacity can be determined by comparing the values of the destructive forces in the individual series. The beams of the C-I series were destroyed by bending, and the value of the destructive force increased slightly due to the use of basalt or steel fibers in the concrete.

The value of the destructive force determined for the beams of the C-II-WB series is comparable to the value of the destructive force in the C-I-W0 series. This can be understood as the introduction of basalt fibers into the concrete increased the destructive force, despite the use of only half of the stirrups. In the case of the use of steel fibers in the concrete, the same effect can be observed in the C-II-WS series.

The shear failure model was obtained in all the beams of the C-III series. The beams were not reinforced with stirrups, the role of the stirrups was to transfer the dispersed reinforcement. Using concrete with steel fibers, the destructive force increased by 87%, and in the case of concrete with basalt fibers, this increase was 23%.

Analyzing the measurement results, it can be concluded that the addition of steel or basalt fibers causes an increase in the destructive force compared to the same beams without dispersed reinforcement. Due to the lower stiffness of basalt fibers, the increase in shear capacity was smaller than in the case of steel fibers.

Tablica 3 / Table 3

ZESTAWIENIE WARTOŚCI SIŁ NISZCZĄCYCH BELKI O DŁUGOŚCI 4,15M

SUMMARY OF THE VALUES OF THE DESTRUCTIVE FORCES OF A 4.15 M LONG BEAM

Seria Series	W0			WB				WS			
	P_{ult}	$\overline{P_{ult}}$	Sposób zniszczenia Model of destruction	P_{ult}	$\overline{P_{ult}}$	ΔP_{ult}	Sposób zniszczenia Model of destruction	P_{ult}	$\overline{P_{ult}}$	ΔP_{ult}	Sposób zniszczenia Model of destruction
	kN	kN		kN	kN	%		kN	kN	%	
C-I	194	222	Z	220	229	3	Z	260	258	16	Z
C-I	239		Z	228			Z+Ś	264			Z
C-I	234		Z	240			Z	250			Z
C-II	194	193	Z+Ś	230	228	19	Z+Ś	260	252	31	Z+Ś
C-II	194		Z+Ś	218			Z+Ś	248			Z+Ś
C-II	190		Z+Ś	237			Z+Ś	248			Z+Ś
C-III	140	109	Ś	125	134	23	Ś	220	204	87	Ś
C-III	90		Ś	108			Ś	207			Ś
C-III	98		Ś	169			Ś	185			Ś

Z – zniszczenie poprzez zginanie / destruction due to bending, Ś – zniszczenie poprzez ścinanie / destruction due to shear

miało za zadanie przenieść zbrojenie rozproszone. Stosując beton z włóknami stalowymi, uzyskano wzrost siły niszczącej o 87%, a w przypadku betonu włóknami bazaltowymi wzrost ten wynosił 23%.

Analizując wyniki pomiarów można stwierdzić, że dodatek włókien stalowych lub bazaltowych powoduje wzrost siły niszczącej w porównaniu do takich samych belek bez zbrojenia rozproszonego. Z uwagi na mniejszą sztywność włókien bazaltowych wzrost nośności na ścinanie był mniejszy niż w przypadku włókien stalowych.

3.1. Analiza porównawcza wyników badań doświadczalnych i obliczeń nośności belek na ścinanie

Aby ocenić wpływ obecności włókien na nośność na ścinanie, wykonano obliczenia nośności belek ze zbrojeniem podłużnym i zbrojeniem rozproszonym w postaci włókien bazaltowych lub stalowych, zgodnie z zaleceniami norm PN-EN 1992-1-1 (1), fib Model Code 2010 (2,3), German Committee for Reinforced Concrete DIN 2012 (4) oraz RILEM TC 162-TDF 2003 (5). W założeniach do obliczeń przyjęto schemat statyczny przedstawiony powyżej a parametry wytrzymałościowe betonu, z którego zostały wykonane belki.

Obliczenia nośności na ścinanie zgodnie z German Committee for Reinforced Concrete DIN 2012 elementów bez włókien stalowych przeprowadza się w ten sam sposób jak według PN-EN 1992-1-1 (1), z tą różnicą, że przyjmuje się inną wartość przy określaniu współczynnika $C_{Rd,c}$, równą 0,15. Wpływ włókien przy przenoszeniu naprężeń ścinających jest uwzględniany jako dodatkowa składowa $V_{RD,cf}$ występująca we wzorach na nośność na ścinanie.

3.1. Comparative analysis of experimental test results and calculations of shear capacity of beams

In order to assess the effect of the presence of fibers on the shear capacity, calculations of the load-bearing capacity of beams with longitudinal reinforcement and dispersed reinforcement in the form of basalt or steel fibers were performed in accordance with the recommendations of the standards PN-EN 1992-1-1 (1), fib Model Code 2010 (2,3), German Committee for Reinforced Concrete DIN 2012 (4) and RILEM TC 162-TDF 2003 (5). The assumptions for the calculations were based on the static scheme presented above and the strength parameters of the concrete from which the beams were made.

The calculation of the shear resistance according to German Committee for Reinforced Concrete DIN 2012 for elements without steel fibers is carried out in the same way as according to PN-EN 1992-1-1 (1), with the difference that a different value is assumed for determining the $C_{Rd,c}$ coefficient, equal to 0.15. The influence of fibers in transferring shear stresses is taken into account as an additional component $V_{RD,cf}$ appearing in the formulas for shear resistance.

The calculation of shear capacity according to the RILEM TC 162 – TDF (5) recommendations assumes that the shear capacity V_{Rd} is the sum of three components: the load-bearing capacity of the concrete element V_{cd} , the effect of the stirrups V_{wd} and the effect of the fibres V_{fd} (5). The decisive value is the residual strength $f_{R,4}$, for CMOD 3.5 mm, which takes into account the residual tensile stresses in bending, determined during the three-point bending test of the beam with the primary gap.

According to the fib Model Code 2010, the calculation of elements without the addition of fibers and fiber concrete elements are two

Obliczenia nośności na ścinanie zgodnie z zaleceniami RILEM TC 162 – TDF (5) zakłada, że zdolność do przenoszenia siły ścinającej V_{Rd} to suma trzech składników: nośności elementu betonowego (V_{cd}), wpływu strzemion V_{wd} oraz wpływu włókien V_{fd} (5). Decydującą wartością jest wytrzymałość resztkowa $f_{R,4}$, dla CMOD 3,5 mm, która uwzględnia resztkowe naprężenia rozciągające przy zginaniu, wyznaczane podczas badania w warunkach trójpunktowego zginania belki ze szczeliną pierwotną.

Zgodnie z *fib Model Code 2010* obliczenia elementów bez dodatku włókien oraz elementów włókno betonowych to dwie osobne procedury. Dla elementy z betonu bez dodatku włókien, w zaleceniach normy *fib Model Code 2010* (2,3) w odniesieniu do wymiarowania na ścinanie wyróżnia się trzy poziomy przybliżeń obliczeń, różniące się kompletnością zastosowanej metody i dokładnością uzyskanych wyników:

- *I poziom przybliżenia* bazuje na modelu kratownicy ze zmiennym kątem nachylenia zastrzałów. Przy tym podejściu obliczeniowa nośność na ścinanie jest podana jako $V_{Rd} = V_{Rd,s} V_{Rd,max}$, ale nie może być przyjmowana mniejsza niż nośność tego samego elementu bez zbrojenia na ścinanie.
- *II poziom przybliżenia* bazuje na uogólnionym polu naprężeń. Wartość nośności na ściskanie jest określana jako $V_{Rd} = V_{Rd,s} V_{Rd,max}$. Nie może być przyjmowana mniejsza niż nośność tego samego elementu bez zbrojenia na ścinanie. W tym przypadku wartość kąta jest wybierana z podanego niżej zakresu i może być potwierdzana badaniami doświadczalnymi. Wartość odkształceń podłużnych na początkowym etapie jest równa 0,001. Obliczeniowa nośność na ścinanie przypisana do betonu jest pomijana.
- *III poziom przybliżenia* odpowiada ogólnej formie przekrojowych wzorów ścinania i opiera się na uproszczonej metodzie teorii pola ściskań

W przypadku elementów z betonu ze zbrojeniem rozproszonymi zakłada się wzmocnienie przy rozciąganiu włóknami i rozważane są elementy bez zbrojenia podłużnego i poprzecznego. Główne naprężenie rozciągające σ_1 nie może być mniejsze niż obliczeniowa wytrzymałość włókno betonu na rozciąganie zgodnie z:

$$\sigma_1 \leq \frac{f_{Ftu}}{\gamma_f} \quad [4]$$

gdzie: f_{Ftu} jest charakterystyczną wartością resztkowej wytrzymałości na rozciąganie włókno betonu określoną dla $w_u = 1,5$ mm.

Procedury przedstawiono w tabeli 4. Rysunek 4 przedstawiają stosunek nośności na ścinanie V obliczonej zgodnie z PN-EN 1992-1-1 [2008], *fib Model Code 2010*, German Committee for Reinforced Concrete DIN 2012, RILEM TC 162-TDF 2003 w porównaniu do wartości siły poprzecznej określonej doświadczalnie V_{Exp} , uwzględniającej wpływ współdziałania betonu z włóknami stalowymi oraz bazaltowymi.

Belki serii C-I ulegały zniszczeniu wskutek zginania, stąd obliczone wartości nośności były większe od siły poprzecznej określonej

separate procedures. For elements made of concrete without the addition of fibers, the *fib Model Code 2010* (2,3) standard recommends three levels of calculation approximations for shear design, differing in the completeness of the method used and the accuracy of the obtained results:

- *I level of approximation* is based on the truss model with a variable angle of inclination of the braces θ . In this approach, the design shear capacity is given as $V_{Rd} = V_{Rd,s} \leq V_{Rd,max}$, but it cannot be assumed to be less than the capacity of the same element without shear reinforcement.
- *II level of approximation* is based on the generalized stress field. The value of the compressive capacity is given as $V_{Rd} = V_{Rd,s} \leq V_{Rd,max}$. It cannot be assumed to be less than the capacity of the same element without shear reinforcement. In this case, the value of the angle θ is selected from the range given below and can be confirmed by experimental tests. The value of longitudinal strains at the initial stage is equal to 0.001. The design shear capacity assigned to concrete is neglected.
- *III level of approximation* corresponds to the general form of cross-sectional shear formulas and is based on a simplified method of compression field theory

For concrete elements with dispersed reinforcement, tensile reinforcement by fibers is assumed and elements without longitudinal and transverse reinforcement are considered. The principal tensile stress σ_1 must not be less than the design tensile strength of fiber concrete according to formula [1]:

$$\sigma_1 \leq \frac{f_{Ftu}}{\gamma_f} \quad [4]$$

where: f_{Ftu} is the characteristic value of the residual tensile strength of fiber concrete determined for $w_u = 1.5$ mm. Calculations methodology is presented in Table 4.

Figure 4 shows the ratio of shear resistance V calculated according to PN-EN 1992-1-1 [2008], *fib Model Code 2010*, German Committee for Reinforced Concrete DIN 2012, RILEM TC 162-TDF 2003 in comparison to the experimentally determined shear force V_{Exp} , taking into account the influence of the interaction of concrete with steel and basalt fibers.

The C-I series beams were destroyed by bending, hence the calculated values of the load-bearing capacity were greater than the experimentally determined transverse force. The load-bearing capacity of the C-I series elements with steel fibers was greater than the reference elements by about 20%, and in the case of beams with basalt fibers by 10%. The calculation procedure PN-EN 1992-1-1 (2008) (1) does not assume cooperation between concrete and steel. The shear capacity of beams with transverse reinforcement depends only on the shear capacity of the transverse reinforcement itself. Including the shear capacity of concrete with basalt fibers in the C-I, C-II and C-III series in the calculations allows for a much better reflection of the value of the destructive force at the central support.

Tablica 4

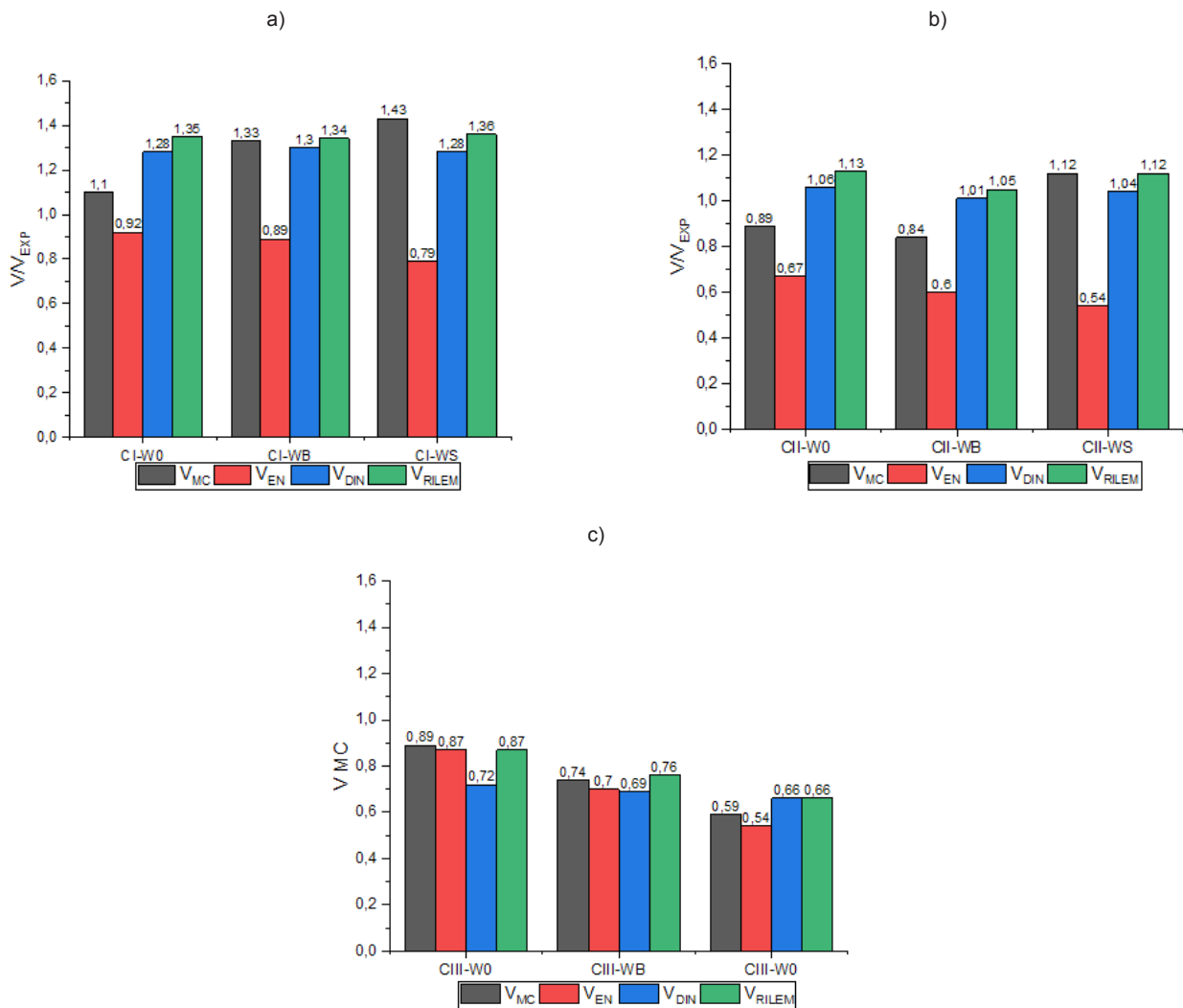
SPOSÓB OBLICZANIA NOŚNOŚCI NA ŚCINANIE ELEMENTÓW Z BETONU Z WŁÓKNAMI

Niemicki Komitet ds. Betonu zbrojonego DIN 2012	Rilem TC 162 – TDF	fib Model Code 2010	
<p>Nośność na ścinanie elementów z betonu z włóknami bez zbrojenia na ścinanie</p> $V_{Rd,ctf} = V_{Rd,c} + V_{Rd,cf}$	<p>Nośność na ścinanie jest sumą trzech składowych</p> $V_{Rd} = V_c + V_{wd} + V_f$	<p>Elementy z betonu bez dodatku włókien</p> $V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s}$	<p>Elementy z betonu z włóknami rozproszonymi</p> $V_{Rd} = V_{Rd,F} + V_{Rd,s}$
<p>Nośność na ścinanie elementu bez zbrojenia na ścinanie</p> $V_{Rd,c} = \{C_{rd,c} k [100 \rho_1 f_{ck}]^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}\} b_w d$ <p>nie mniej niż</p> $V_{Rd,c,min} = (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d$	<p>V_c – nośność na ścinanie betonu bez dodatku włókien</p> $V_c = \left\{ \frac{0.18}{\gamma_c} k [100 \rho_1 f_{ck}]^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \right\} b_w d$ <p>nie mniej niż</p> $V_{c,min} = (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d$	<p><i>l poziom przybliżenia</i></p> <p>Obliczeniowa nośność na ścinanie bez zbrojenia poprzecznego</p> $V_{Rd,c} = k_v \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} z b_w$	<p>Podejście tradycyjne</p> <p>Nośność na ścinanie $V_{Rd,F}$</p> $V_{Rd,F} = \left\{ \frac{0.18}{\gamma_c} k \left[100 \rho_1 \left(1 + 7.5 \frac{f_{Ftu,k}}{f_{ctk}} \right) f_{ck} \right]^{1/3} + \sigma_{cp} \right\} b_w d$
<p>$V_{Rd,cf}$ – nośność na ścinanie z uwagi na dodatek włókien</p> $V_{Rd,cf} = \frac{\alpha_c^f f_{ct0,u}^f b_w h}{\gamma_{ct}^f}$	<p>V_f – nośność na ścinanie uwzględniająca dodatek włókien</p> $V_f = k_f k_{1,rd} b_w d$	<p>Nośność na ścinanie elementu ze zbrojeniem konwencjonalnym na ścinanie</p> $V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s_w} z f_{ywd} \cot \theta$	<p>Nośność na ścinanie $V_{Rd,F}$ jest zakładana nie mniejsza niż minimalna wartość $V_{Rd,Fmin}$, określana jako</p> $V_{Rd,Fmin} = (v_{min} + 0.15 \sigma_{cp}) b_w d$ $v_{min} = 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$
<p>Obliczona nośność na ścinanie elementów ze zbrojeniem poprzecznym</p> $V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s_w} z f_{ywd} \cot \theta$	<p>V_{wd} – nośność na ścinanie elementu ze zbrojeniem konwencjonalnym na ścinanie</p> $V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s_w} 0.9 d f_{ywd} (1 + \cot \alpha) \sin \alpha$	<p>Maksymalna nośność elementu ze względu na zmiażdżenie betonu ściskanego wyrażona jest wzorem:</p> $V_{Rd,max} = K_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} b_w z \sin \theta \cos \theta$	<p>Podejście nowe</p> <p>Model zaleca następujący sposób obliczenia nośności na ścinanie:</p> $V_{Rd,F} = \frac{1}{\gamma_F} (k_v \sqrt{f_{ck}} + k_f f_{Ftu,k} \cot \theta) b_w z$
<p>gdzie:</p> <p>$f_{ctR,u}^f$ – charakterystyczna wartość wytrzymałości na rozciąganie określona dla największego rozwarcia rysy;</p> $f_{ctR,u}^f = \kappa_F \kappa_G^f f_{ct0,u}^f$ $\kappa_F^f = 1.0 + A_{ct}^f 0.5 \leq 1.70$ $A_{ct}^f = b_w d \leq b_w 1.5$ $\kappa_G^f = 0.4$ – wyznaczony w przekroju podporowym belki <p>$f_{ct0,u}^f = f_{ct1k,L2}^f \beta_u$ – wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, po zarysowaniu belki</p> <p>$f_{ct1k,L2}^f$ – wyznaczone dla CMOD = 3.5 mm; $\gamma_c^f = 1.0$ – współczynnik bezpieczeństwa</p>	<p>gdzie:</p> $f_{R,4} = \frac{3 F_{R,4} L}{2 b h_{sp}^2}$ <p>$F_{R,4}$ – siła uzyskana z badań elementów z włóknem stalowym dla CMOD = 3.5 mm;</p> <p>$k_f = 1$ współczynnik dla przekrojów prostokątnych;</p> $k_1 = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$	<p>gdzie:</p> <p>$k_c = k_\epsilon \eta_{fc}$; $k_\epsilon = 0.55$ – współczynnik redukcji wytrzymałości</p> $\eta_{fc} = \left(\frac{30}{f_{ck}} \right)^{1/3} \leq 1.0$ $k_v = \frac{180}{1000 + 1.25 z}$ $k_v = \frac{0.4}{1 + 1500 \epsilon_x} \frac{1300}{1000 + 0.7 k_{dg} z}$ <p>gdy $\rho_w = 0$</p> $k_v = \frac{0.4}{1 + 1500 \epsilon_x} \left(1 - \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}(\theta_{min})} \right) \geq 0$ <p>gdy $\rho_w \geq 0.08 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$</p> $k_\epsilon = \frac{1}{1.2 + 55 \epsilon_1} \leq 0.65$ $\epsilon_1 = \epsilon_x + (\epsilon_x + 0.002) \cot^2 \theta$	<p>gdzie:</p> $k_v = \frac{0.4}{1 + 1500 \epsilon_x} \frac{1300}{1000 + k_{dg} z}$ <p>dla $\rho_w < 0.08 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$,</p> $k_v = \frac{0.4}{1 + 1500 \epsilon_x}$ <p>dla $\rho_w \geq 0.08 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$</p> <p>Wielkość jest odkształceniem podłużnym w środku wysokości efektywnej ścinania. Ograniczenia kąta nachylenia pola naprężeń ściskających θ, w stosunku do podłużnej osi elementu, są następujące:</p> $\theta_{min} \leq 0 \leq 45^\circ$ <p>Przy czym minimalny kąt nachylenia krzywulca ściskanego wynosi:</p> $\theta_{min} = 29^\circ + 7000 \epsilon_x$ <p>Współczynnik zmniejszenia wytrzymałości jest definiowany jako:</p> $k_c = k_\epsilon \eta_{fc}$ $k_\epsilon = 0.55$ $\eta_{fc} = \left(\frac{30}{f_{ck}} \right)^{1/3} \leq 1.0$ $k_v = \frac{180}{1000 + 1.25 z}$ <p>Graniczna szerokość rozwarcia rysy w_u do określenia wartości jest przyjmowana jako:</p> $w_u = 0.2 + 1000 \epsilon_x \geq 0.0125 m$

Table 4

METHOD OF CALCULATING THE SHEAR CAPACITY OF FIBER CONCRETE ELEMENTS

German Committee for Reinforced Concrete DIN 2012	Rilem TC 162 – TDF	fib Model Code 2010	
Load-bearing capacity of fibre-reinforced concrete elements on the wall without shear reinforcement $V_{Rd,cf} = V_{Rd,c} + V_{Rd,cf}$	The shear resistance is the sum of three components $V_{Rd} = V_c + V_{wd} + V_f$	Concrete elements without added fibers $V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s}$	Concrete elements with dispersed reinforcement $V_{Rd} = V_{Rd,F} + V_{Rd,s}$
Shear capacity of an element without shear reinforcement $V_{Rd,c} = \{C_{rd,c} k [100\rho_1 f_{ck}]^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}\} b_w d$ not less than $V_{Rd,c,min} = (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d$	$V_c =$ $\left\{ \frac{0.18}{\gamma_c} k [100\rho_1 f_{ck}]^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \right\} b_w d$ nie mniej niż $V_{c,min} = (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d$	Approximation level I Designated shear capacity without transverse reinforcement $V_{Rd,c} = k_v \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} z b_w$	Traditional approach Shear capacity $V_{Rd,F}$ $V_{Rd,F} =$ $\left\{ \frac{0.18}{\gamma_c} k \left[100\rho_1 \left(1 + 7.5 \frac{f_{Ftu,k}}{f_{ctk}} \right) f_{ck} \right]^{1/3} + \sigma_{cp} \right\} b_w d$
$V_{Rd,cf}$ – shear capacity due to the addition of fibers $V_{Rd,cf} = \frac{\alpha_c^f f_{ct0,u}^f b_w h}{\gamma_{ct}^f}$	V_f – load-bearing capacity on the wall taking into account the addition of fibers $V_f = k_f k_{1fd} b_w d$	Shear capacity of an element with conventional shear reinforcement $V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s_w} z f_{ywd} \cot \theta$	The shear resistance $V_{Rd,F,s}$ assumed to be not less than the minimum value of $V_{Rd,Fmin}$, defined as $V_{Rd,Fmin} = (v_{min} + 0.15 \sigma_{cp}) b_w d$ $v_{min} = 0.035 k^{2/3} f_{ck}^{-1/2}$
Calculated shear capacity of elements with transverse reinforcement $V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s_w} z f_{ywd} \cot \theta$	V_{wd} – shear capacity of an element with conventional shear reinforcement $V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s_w} 0.9 d f_{ywd} (1 + \cot \alpha) \sin \alpha$	The maximum load-bearing capacity of an element due to crushing of compressed concrete is expressed by the formula: $V_{Rd,max} = k_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} b_w z \sin \theta \cos \theta$	New approach The model recommends the following method for calculating shear capacity: $V_{Rd,F} = \frac{1}{\gamma_F} (k_v \sqrt{f_{ck}} + k_f f_{Ftu,k} \cot \theta) b_w z$
where: $f_{ctR,u}^f$ – characteristic value of tensile strength determined for the largest crack opening; $f_{ctR,u}^f = \kappa_F^f \kappa_G^f f_{ct0,u}^f$ $\kappa_F^f = 1.0 + A_{ct}^f 0.5 \leq 1.70$ $A_{ct}^f = b_w d \leq b_w 1.5$ $\kappa_G^f = 0.4$ – determined in the beam's support cross-section $f_{ct0,u}^f = f_{ct1k,L2}^f \beta_u$ – tensile strength in bending, after cracking the beam $f_{ct1k,L2}^f$ – determined for CMOD = 3.5 mm; $\gamma_c^f = 1.0$ – security factor	where: $f_{R,4} = \frac{3 F_{R,4} L}{2 b h_{sp}^2}$ $F_{R,4}$ – force obtained from testing elements with steel fiber for CMOD = 3.5 mm; $k_1 = 1$ coefficient for rectangular cross-sections; $k_1 = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$	where: $k_c = k_\epsilon \eta_{fc}$; $k_\epsilon = 0.55$ – strength reduction factor $\eta_{fc} = \left(\frac{30}{f_{ck}} \right)^{1/3} \leq 1.0$ $k_v = \frac{180}{1000 + 1.25 z}$ $k_v = \frac{0.4}{1 + 1500 \epsilon_x} \frac{1300}{1000 + 0.7 k_{dg} z}$ for $\rho_w = 0$ $k_v =$ $\frac{0.4}{1 + 1500 \epsilon_x} \left(1 - \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}(\theta_{min})} \right)$ ≥ 0 for $\rho_w \geq 0.08 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$ $k_\epsilon = \frac{1}{1.2 + 55 \epsilon_1} \leq 0.65$ $\epsilon_1 = \epsilon_x + (\epsilon_x + 0.002) \cot^2 \theta$	where: $k_v = \frac{0.4}{1 + 1500 \epsilon_x} \frac{1300}{1000 + k_{dg} z}$ for $\rho_w < 0.08 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$, $k_v = \frac{0.4}{1 + 1500 \epsilon_x}$ for $\rho_w \geq 0.08 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$ The quantity ϵ_x is the longitudinal strain at the center of the effective shear height. The limits of the angle of inclination of the compressive stress field θ , relative to the longitudinal axis of the element, are as follows: $\theta_{min} \leq \theta \leq 45^\circ$ The minimum angle of inclination of the compression crosspiece is: $\theta_{min} = 29^\circ + 7000 \epsilon_x$ The strength reduction factor is defined as: $k_c = k_\epsilon \eta_{fc}$ $k_\epsilon = 0.55$ $\eta_{fc} = \left(\frac{30}{f_{ck}} \right)^{1/3} \leq 1.0$ $k_v = \frac{180}{1000 + 1.25 z}$ The limiting crack opening width w_u for determining the value of $w_u = 0.2 + 1000 \epsilon_x \geq 0.0125 m$



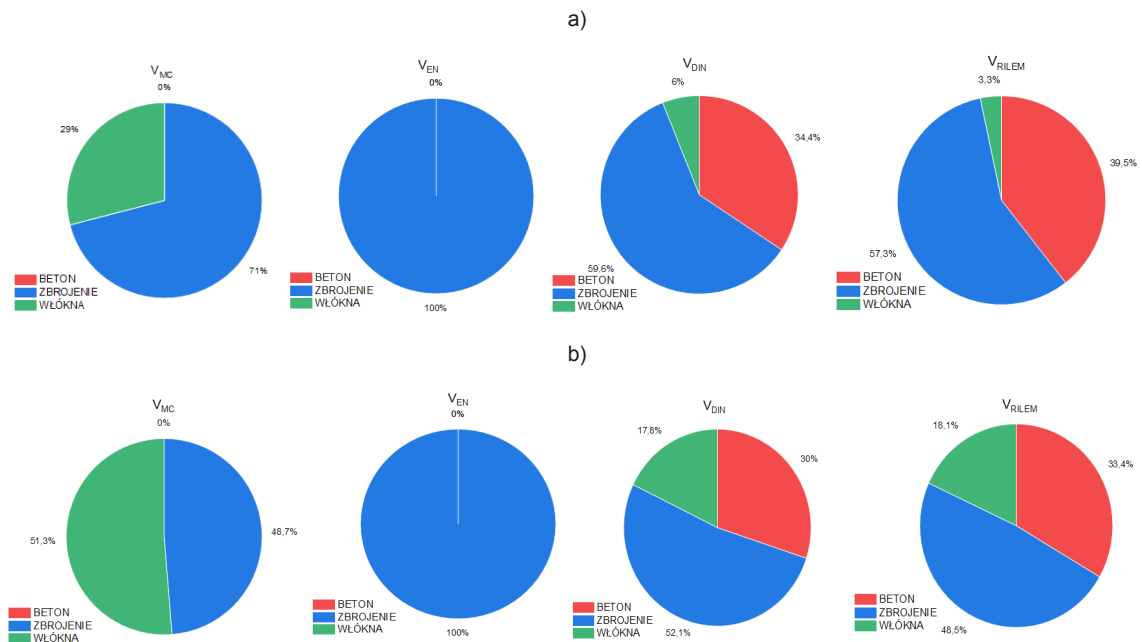
Rys. 4. Porównanie nośności na ścinanie obliczonej V i wyznaczonej doświadczalnie V_{Exp} przy podporze środkowej dla belek serii a) C-I, b) C-II i c) C-III
 Fig. 4. Comparison of the calculated shear capacity V and the experimentally determined V_{Exp} at the central support for the beams of the series a) C-I, b) C-II and c) C-III

doświadczalnie. Nośność elementów z serii C-I z włóknami stalowymi była większa niż elementów referencyjnych o ok. 20%, w przypadku belek z włóknami bazaltowymi 10%. Procedura obliczeniowa PN-EN 1992-1-1 (2008) (1) nie zakłada współpracy betonu oraz stali. Nośność na ścinanie belek ze zbrojeniem poprzecznym zależy tylko od nośności na ścinanie samego zbrojenia poprzecznego. Uwzględnienie w obliczeniach nośności na ścinanie betonu z włóknami bazaltowymi w serii C-I, C-II i C-III pozwala w znacznie lepszym stopniu odzwierciedlić wartość siły niszczącej przy podporze środkowej.

Belki serii C-II ulegały niszczeniu, w pierwszej kolejności w wyniku zginania, a następnie w efekcie ścinania przy podporze środkowej. Należy więc rozpatrywać stosunek obliczonej nośności na ścinanie oraz określonej doświadczalnie przy podporze środkowej. Wszystkie procedury obliczeniowe trafnie prognozują wartości siły poprzecznej. Nośność na ścinanie w przypadku belek ze zbrojeniem podłużnym, poprzecznym i/lub włóknami w głównej mierze uzależniona jest od składowej nośności na ścinanie z uwagi na zbrojenie poprzeczne. Rysunek 5 przedstawia porównanie udziału nośności przypisanej przekrojowi betonowemu, zbrojeniu

The C-II series beams failed first by bending and then by shear at the central support. Therefore, the ratio of the calculated shear capacity to the experimentally determined shear capacity at the central support should be considered. All calculation procedures accurately predict the transverse force values. The shear capacity of beams with longitudinal, transverse and/or fiber reinforcement is mainly dependent on the component of shear capacity due to transverse reinforcement. Fig. 5 compares the contribution of the capacity attributed to the concrete cross-section, transverse reinforcement and the presence of fibers to the total shear capacity of the series with basalt fibers or steel fibers. The addition of steel fibers increases the shear capacity value by 18% and that of basalt fibers by 13%.

In all series C-III, the failure occurred at the central support. The calculated load-bearing capacity values, regardless of the estimation method, were lower than those obtained experimentally, despite the failure to include the safety factor in the calculations. This means that each method assumes a reserve of load-bearing capacity. The values of the forces determined experimentally were higher, depending on the calculation method, by 3-48% for PN-EN



Rys. 5. Udział procentowy poszczególnych składowych nośności na ścinanie belek serii: a) C-II-WB; b) C-II-WS

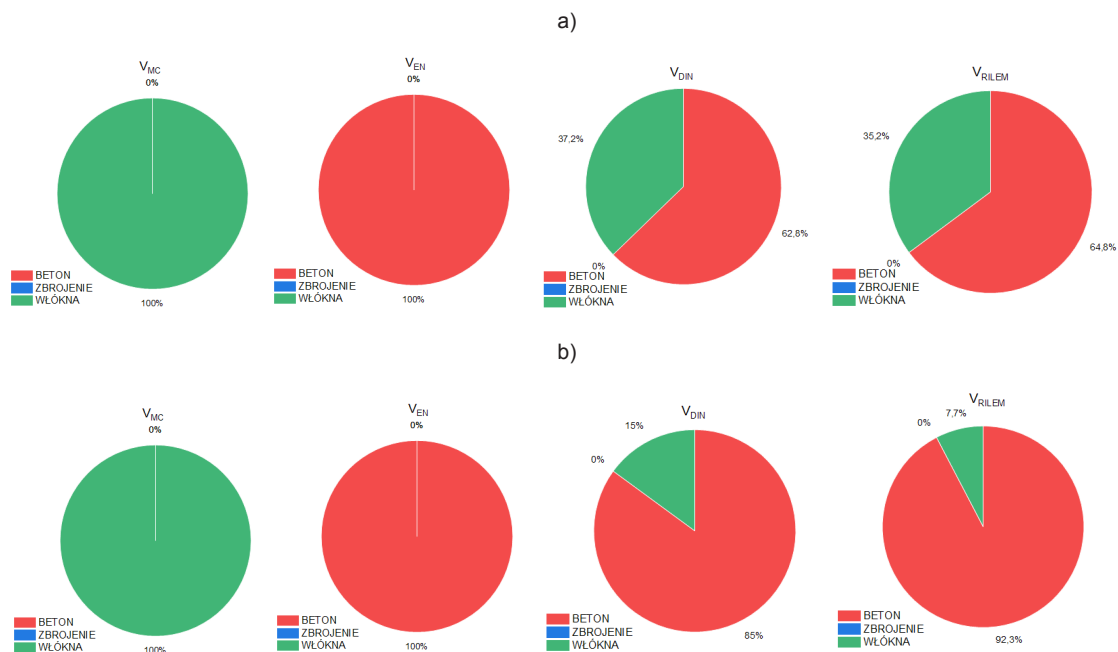
Fig. 5. Percentage share of individual components of shear capacity of beams of the series: a) C-II-WB; b) C-II-WS

poprzecznemu oraz obecności włókien w całkowitej nośności na ścinanie serii z włóknami bazaltowymi lub włóknami stalowymi. Dodatek włókien stalowych zwiększa wartość nośności na ścinanie do 18% natomiast włókien bazaltowych o 13%.

We wszystkich seriach C-III zniszczenie nastąpiło przy podporze środkowej. Wartości nośności obliczone, niezależnie od metody szacowania, były mniejsze niż uzyskane eksperymentalnie, pomimo nieuwzględnienia współczynnika bezpieczeństwa w przeprowadzonych obliczeniach. Oznacza to, że każda z metod zakłada zapas nośności. Wartości sił określonych doświadczalnie były większe, w zależności od metody obliczeniowej, o 3-48% w przypadku PN-EN 1992-1-1 (2008), 11-43% dla *fib* Model Code 2010,

1992-1-1 (2008), 11-43% for *fib* Model Code 2010, 19-48% for German Committee for Reinforced Concrete DIN 2012 and 3-23% for RILEM TC 162-TDF 2003. In the case of C-III-W0 [reference] beams, the PN-EN 1992-1-1 (2008) method and RILEM TC 162-TDF 2003, which use the same formula, gave the best predicted value of the load-bearing capacity. In the case of the C-III-WB series, regardless of the calculation method, capacity reserves of up to 43% were obtained. In the case of the C-III-WS series, the method that most accurately reflected the experimental value of the destructive force was the *fib* Model Code 2010 procedure.

The steel fiber concrete beams had a higher shear capacity than the basalt fiber concrete beams. The basic parameter in the for-



Rys. 6. Udział procentowy poszczególnych składowych nośności na ścinanie belek serii: a) C-III-WB; b) C-III-WS

Fig. 6. Percentage share of individual components of shear capacity of beams of the series: a) C-III-WB; b) C-III-WS

19-48% dla German Committee for Reinforced Concrete DIN 2012 oraz 3-23% dla RILEM TC 162-TDF 2003. W przypadku belek C-III-W0 [referencyjnych] metoda PN-EN 1992-1-1 (2008) oraz RILEM TC 162-TDF 2003, które posługują się tym samym wzorem, dały najlepszą prognozowaną wartość nośności. W przypadku serii C-III-WB, niezależnie od metody obliczeniowej, uzyskano zapasy nośności nawet do 43%. W przypadku serii C-III-WS metodą najtrafniej odzwierciedlającą eksperymentalną wartość siły niszczącej okazała się procedura *fib* Model Code 2010.

Belki z betonu z włóknami stalowymi miały większą nośność na ścinanie niż belki z betonu z włóknami bazaltowymi. Podstawowym parametrem we wzorach na nośność na ścinanie włóknobetonu jest wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu, a w przypadku betonu z włóknami stalowymi jest ona znacznie wyższa niż betonu z włóknami bazaltowymi. W serii C-III (rys. 6) składowa nośności na ścinanie z uwagi na obecność włókien stalowych, niezależnie od metody obliczeniowej, była większa niż w przypadku betonu z włóknami bazaltowymi.

4. Podsumowanie i wnioski końcowe

Celem niniejszej pracy było pokazanie wpływu włókien bazaltowych w ilości 5 kg/m^3 oraz włókien stalowych w ilości $78,5 \text{ kg/m}^3$ na poprawę nośności belek dwuprzęsłowych o długości $L = 4,15 \text{ m}$. Wpływ włókien oceniono w porównaniu do wyników badań elementów z betonu bez zbrojenia rozproszonego. Analiza wyników badań właściwości mechanicznych stosowanych betonów wykazała korzystny wpływ zbrojenia rozproszonego na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu. Obecność włókien bazaltowych lub stalowych w betonie nie wpłynęła na wytrzymałość na ściskanie ani na wartość modułu sprężystości podłużnej.

Analizując wyniki badań nośności belek dwuprzęsłowych o długości $L = 4,15 \text{ m}$, stwierdzono wzrost wartości siły niszczącej belki spowodowany zastosowaniem betonu z włóknami bazaltowymi lub stalowymi. Wartość siły niszczącej belki z betonu z włóknami bazaltowym albo stalowymi o zmniejszonym do połowy rozstawie strzemion była porównywalna do siły uzyskanej w przypadku belek z betonu bez włókien ze zbrojeniem poprzecznym, zaprojektowanym zgodnie z PN-EN 1992-1-1. Oznacza to, że istnieje możliwość zmniejszenia rozstawu strzemion dzięki zastosowaniu do wykonania belek betonu ze zbrojeniem rozproszonym;

Wartości nośności obliczone według różnych metod były niższe od wartości uzyskanych doświadczalnie, co sugeruje, że każda metoda zakłada pewien zapas nośności.

Metody obliczeniowe wg procedury German Committee for Reinforced Concrete DIN 2012, RILEM TC 162-TDF 2003 najlepiej prognozowały nośność doświadczalną, z dokładnością 1-12%.

Metoda *fib* Model Code 2010, wskazując na niższą nośność teoretyczną niż doświadczalną o ok. 10%. Oznacza to, że metoda ta wyznacza pewien zapas nośności. Wynika to z uproszczeń I i II poziomu aproksymacji, polegającą na tym, że nośność na ścinanie

mulas for the shear capacity of fiber concrete is the residual tensile strength in bending, and in the case of steel fiber concrete it is significantly higher than that of basalt fiber concrete. In series C-III [Fig. 6], the component of the shear capacity due to the presence of steel fibers, regardless of the calculation method, was higher than in the case of basalt fiber concrete.

4. Summary and final conclusions

The aim of this work was to show the effect of basalt fibers in the amount of 5 kg/m^3 and steel fibers in the amount of 78.5 kg/m^3 on improving the load-bearing capacity of two-span beams with a length of $L = 4.15 \text{ m}$. The effect of fibers was assessed in comparison to the results of tests of concrete elements without dispersed reinforcement. Analysis of the results of tests of mechanical properties of the concretes used showed a beneficial effect of dispersed reinforcement on the tensile strength in bending. The presence of basalt or steel fibers in concrete did not affect the compressive strength or the value of the longitudinal modulus of elasticity.

Analyzing the results of the load-bearing capacity tests of two-span beams with a length of $L = 4.15 \text{ m}$, an increase in the value of the beam's destructive force was found due to the use of concrete with basalt or steel fibers. The value of the destructive force of a beam made of concrete with basalt or steel fibers with the stirrup spacing reduced to half was comparable to the force obtained in the case of beams made of concrete without fibers with transverse reinforcement, designed in accordance with PN-EN 1992-1-1. This means that it is possible to reduce the stirrup spacing by using concrete with dispersed reinforcement for the construction of beams.

The load-bearing capacity values calculated using different methods were lower than the values obtained experimentally, which suggests that each method assumes a certain reserve of load-bearing capacity.

The calculation methods according to the procedure of the German Committee for Reinforced Concrete DIN 2012, RILEM TC 162-TDF 2003 best predicted the experimental load-bearing capacity, with an accuracy of 1-12%.

The *fib* Model Code 2010 method indicates a lower theoretical load-bearing capacity than the experimental one by about 10%. This means that this method determines a certain reserve of load-bearing capacity. This results from the simplifications of the I and II level of approximation, which consists in the fact that the shear capacity depends on the load-bearing capacity of the transverse reinforcement, while the fact of cooperation between concrete and reinforcing steel is omitted.

The PN-EN 1992-1-1 (2008) method is the safest method, assuming as much as 40% reserve of load-bearing capacity. This is related to the lack of possibility to take into account the influence of fibers and the simultaneous action of concrete and transverse reinforcement in transferring shear forces. The component of shear capacity due to the presence of steel fibers, regardless of

zależy od nośności zbrojenia poprzecznego, natomiast pomijany jest fakt współpracy betonu i stali zbrojeniowej.

Metoda PN-EN 1992-1-1 (2008) jest metodą najbezpieczniejszą zakładając aż 40% zapas nośności. Związane jest to z brakiem możliwości uwzględnienia wpływu włókien oraz jednoczesnego działania betonu i zbrojenia poprzecznego w przenoszeniu sił ścinających. Składowa nośności na ścinanie z uwagi na obecność włókien stalowych, niezależnie od metody obliczeniowej, była większa niż w przypadku betonu z włóknami bazaltowymi.

Decydującą wartością przy określaniu nośności na ścinanie jest wytrzymałość resztkowa $f_{R,4}$, która uwzględnia resztkowe naprężenia rozciągające przy zginaniu, wyznaczone podczas badania w warunkach trójpunktowego zginania belki ze szczeliną pierwotną.

Określenie właściwości mechanicznych włóknobetonu jest procesem wielokryterialnym i zależy od wielu czynników, takich jak: rodzaj włókna, ilość, rozkład w betonie, zastosowana receptura betonu, sposób wbudowania, pielęgnacja betonu, przyczepność między włóknami i matrycą betonową.

Pomimo licznych badań nie stworzono jeszcze ogólnych reguł umożliwiających jednoznacznie opisanie włóknobetonu w sposób matematyczny. Wynika to ze złożonej struktury materiału i jego odmiennych cech w stosunku do betonu zwykłego.

Należy podkreślić, że wszystkie zalecenia normowe związane z określaniem nośności na ścinanie belek włókno betonowych odnoszą się tylko i wyłącznie do włókien stalowych, jak dotąd nie opracowano wytycznych zastosowania innego rodzaju włókien w betonach konstrukcyjnych. Badania doświadczalne opisane w pracy wykazały, że wprowadzenie do betonu włókien bazaltowych do betonu przyczynia się również do zwiększenia nośności belek na ścinanie.

Literatura / References

1. EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2 Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, Polski Komitet Normalizacji, 2008.
2. A. Ajdukiewicz, Pre – norma Konstrukcji Betonowych fib Model Code 2010, t. 1. Kraków: Polska Grupa Narodowa fib SPC, 2014.
3. A. Ajdukiewicz, Pre – norma Konstrukcji Betonowych fib Model Code 2010, t. 2. Kraków.: Polska Grupa Narodowa fib SPC, 2014.
4. DAfStb Richtlinien Stahlfaserbeton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Berlin, German, 2011.
5. RILEM TC 162 – TDF Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, Mater. Struct. **36**, 560–567 (2003).
6. M. A. Glinicki, Beton ze zbrojeniem strukturalnym. XXV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk, 2011, s. 30.
7. M. Kosior-Kazberuk, J. Krassowska, Fracture behaviour of basalt and steel fibre reinforced concrete. Budownictwo i Inżynieria Środowiska **6**(2), 73-80 (2015),
8. J. Krassowska, Effect of fibers reinforcement on shear capacity of double span reinforced concrete beams. Budownictwo, **111**(5), 137-142 (2014).

the calculation method, was greater than in the case of concrete with basalt fibers.

The decisive value in determining the shear capacity is the residual strength $f_{R,4}$, which takes into account the residual tensile stresses in bending, determined during the test in three-point bending conditions of the beam with the primary gap.

Determining the mechanical properties of fiber concrete is a multi-criteria process and depends on many factors, such as: type of fiber, quantity, distribution in the concrete, the concrete formula used, the method of installation, concrete curing, adhesion between fibers and the concrete matrix.

Despite numerous studies, general rules have not yet been developed to unambiguously describe fiber concrete in a mathematical manner. This is due to the complex structure of the material and its different properties compared to ordinary concrete. It should be emphasized that all standard recommendations related to determining the shear capacity of fiber concrete beams refer only and exclusively to steel fibers, and no guidelines have yet been developed for the use of other types of fibers in structural concrete. The experimental studies described in the paper have shown that the introduction of basalt fibers into concrete also contributes to increasing the shear capacity of beams.

9. M. Kosior-Kazberuk, J. Krassowska, A. Vidales Barriguete, C. Piña Ramirez, Fracture Parameters of Basalt Fiber Reinforced Concrete. *Anales de Edificación* **4**(3), 52-58 (2018). <https://doi.org/10.20868/ade.2018.3800>.
10. W. Li, J. Xu, Impact characterization of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete using a 100-mm-diameter split Hopkinson pressure bar. *Mater. Sci. Eng. A*, **513–514**, 145–153 (2009). <http://doi.org/10.1016/j.msea.2009.02.033>.
11. N. Kabay, Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber. *Constr. Build. Mater.* **50**, 95–101 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.040>.
12. G. Batson, E. Jenkins, R. Spatney, Steel Fibers as Shear Reinforcement in Beams. *ACI Struct. J.* **69**(10), 640–644 (1972).
13. G. R. Williamson i L. I. Knab, „Full Scale Fiber Concrete Beam Tests”, zaprezentowano na RILEM symposium on fiber reinforced cement concrete., London: Lancaster, PA: Construction Press, wrz. 1975, s. 209–214.
14. R. W. Lafraugh, S. E. Moustafa, Experimental Investigation of the Use of Steel Fibers for Shear Reinforcement. Concrete Technology Associates, Tacoma, Wash, Technical Report, 1975.
15. R. N. Swamy i H. M. Bahia, The Effectiveness of Steel Fibers as Shear Reinforcement. *Concr. Int.* **7**(3) 35–40 (1985).
16. A. K. Sharma, Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams. *ACI J. Proc.* **83**(4), 624–628 (1986). <https://doi.org/10.14359/10559>.
17. E. I. El-Niema, Reinforced Concrete Beams With Steel Fibers Under Shear. *Struct. J.* **88**(2) 178–183 (1991). <https://doi.org/10.14359/2676>.
18. K. H. Tan, K. Murugappan, P. Paramasivam, Shear Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams. *Struct. J.* **90**(1), 3–11 (1993).
19. S. Furlan, J. B. de Hanai, Shear behaviour of fiber reinforced concrete beams. *Cem. Concr. Comp.* **19**(4), 359–366 (1997), [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(97\)00031-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(97)00031-0).
20. H. Aoude, M. Belghiti, W. D. Cook, D. Mitchell, Response of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams with and without Stirrups, *Struct. J.* **109**(3), 359–368 (2012). <https://doi.org/10.14359/51683749>.
21. F. Minelli, G. A. Plizzari, On the Effectiveness of Steel Fibers as Shear Reinforcement. *Struct. J.* **110**(3), 379–390 (2013). <https://doi.org/10.14359/51685596>.
22. T. Godycki-Ćwirko, Ścinanie w żelbecie. Warszawa: Arkady, 1986.
23. R. N. Swamy, R. Jones, T. P. Chiam, Shear Transfer in Steel Fiber Reinforced Concrete. *ACI Symp. Pap.* **105**, 565–592 (1987). <https://doi.org/10.14359/2217>.