

Szymon ZBYLUT*
Politechnika Krakowska

MINIMALNA ZAWARTOŚĆ WŁÓKIEN STALOWYCH W FIBROBETONIE Z PUNKTU WIDZENIA ZARYSOWALNOŚCI I NOŚNOŚCI

Streszczenie. W pracy określono minimalną zawartość zbrojenia rozproszonego w postaci włókien stalowych w betonie ze względu na kryteria zarysowalności i nośności. W tym celu przeanalizowano badania Prof. Piti Sukontasukkula, Dr. Patrika Grotha oraz Mgr. inż. K. Piwowarczyka. Doświadczenia te dotyczyły trój- lub czteropunktowego zginania beleczek fibrobetonowych o zróżnicowanej zawartości włókien stalowych w betonie. Wszystkie badania wykonano zgodnie normą ASTM C1018. Analizowanymi wielkościami były: siła maksymalna P_u otrzymana w badaniu, siła rysująca, odpowiadająca chwili pojawienia się pierwszej rysy P_{cr} , oraz wskaźniki ciągliwości (toughness index) I_3 . Minimalny poziom zbrojenia fibrobetonu porównano między innymi z wartościami zalecanymi przez producentów, a także z innymi źródłami wyszczególnionymi w niniejszej pracy.

THE MINIMUM OF STEEL FIBRE CONTENT IN CONCRETE FOR THE REASONS SUCH AS SCRATCH AND LOAD CAPACITY

Summary. In the paper determined minimum of steel fibre content in concrete for the reasons such as scratch and load capacity. The main aim was reached by the research analysis three scientists: Prof. Piti Sukontasukkula, PhD Patrika Grotha and MSc. Kazimierza Piwowarczyka. All research was done according to ASTM standard test methods for flexural toughness and first-crack strength of steel fibre reinforced concrete, using beam with third-point loading. During tests fibre content was changing. After the research analysis, was determined three characteristic of toughness: first crack force P_{cr} , ultimate flexural force P_u and toughness index I_3 . The minimum of steel fibre content in concrete was compared with another sources, witch was applied to this paper.

* Opiekun naukowy: Prof. zw. dr hab. inż. Kazimierz Flaga.

1. Wstęp

Celem artykułu jest uściślenie możliwości zastosowania zbrojenia rozproszonego w postaci włókien stalowych w betonie oraz określenie ich minimalnej zawartości ze względu na: nośność – opisaną przez tzw. stabilność nośności i siłę maksymalną, oraz zarysowalność – opisaną przez wartość siły rysującej.

Fibrobeton jest materiałem powszechnie znanym w budownictwie. Stosuje się go między innymi do budowy:

- nawierzchni (posadzki przemysłowe, nawierzchnie parkingów),
- budowli wodnych (jazy, niecki wypadowe),
- prefabrykatów betonowych (rury, kręgi, płyty, ściany oporowe, ściany),
- obudowy tuneli z betonu natryskowego.

Zastosowanie zbrojenia rozproszonego w elementach konstrukcyjnych nie zawsze jest uzasadnione, tym bardziej, że wykonanie elementów jest wówczas trudniejsze.

Jak podaje A. Łagosz w [4], minimalna zawartość włókien stalowych w betonie, np. dla posadzek przemysłowych dylatowanych, wynosi ok. $20\div 25 \text{ kg/m}^3$ ($0,25\div 0,32\%$), natomiast dla posadzek bezdylatacyjnych ok. 40 kg/m^3 ($0,51\%$). Ilości te zdaniem autora [4] pozwalają na przeniesienie obciążeń zewnętrznych oraz obciążeń wywołanych skurczem.

W dalszej części artykułu zostaną przedstawione wyniki badań belek zbrojonych włóknami stalowymi o różnym stopniu zbrojenia, w celu określenia minimalnej ich zawartości w betonie ze względu na dwa kryteria – zarysowalność i nośność.

2. Ciągłość betonu

2.1. Definicja

Pojęciem ściśle związanym z fibrobetonem i charakteryzującym go jest niewątpliwie ciągłość. Na podstawie jej charakterystyk możemy stwierdzić efektywność zbrojenia rozproszonego w betonie.

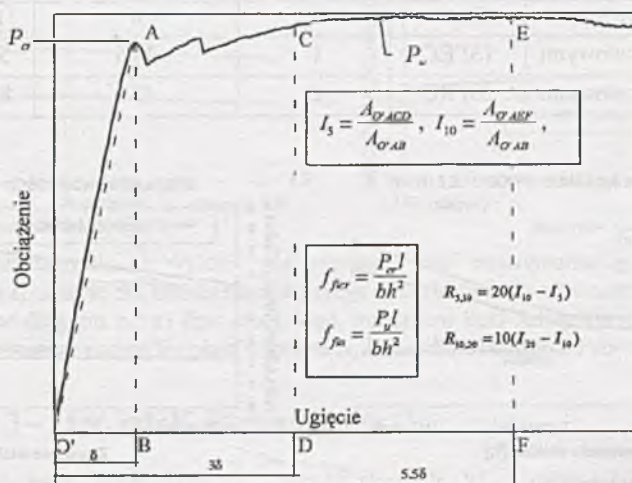
Ciągłość najogólniej zdefiniować można jako odporność materiału na kruche zniszczenie, można ją również zdefiniować, jak podaje [1], jako energię pochłaniania, określaną jako pole powierzchni pod krzywą obciążenie-ugięcie. Charakteryzuje ją najczęściej wskaźnik ciągłości (toughness index), który określany jest na podstawie badań doświadczalnych na próbkach betonowych.

2.2. Metoda wyznaczania ciągliwości – ASTM C1018

Metoda ta polega na trój- lub czteropunktowym teście zginania próbek betonowych o wymiarach 100x100x350 mm. Na jej podstawie określamy względną wartość ciągliwości, zwaną toughness index, czyli wskaźnikiem ciągliwości. Najogólniej wskaźnik ciągliwości zdefiniować można jako stosunek odpowiednich pól powierzchni zawartych pod krzywą na wykresie siła-ugięcie według rys. 1. Wskaźnik określa się najczęściej dla 4 charakterystycznych ugięć δ , 3δ , $5,5\delta$ i $10,5\delta$, z czego pierwsze jest ugięciem sprężystym, mierzonym w chwili pojawienia się pierwszej rysy, a pozostałe są jego wielokrotnościami powstałymi po zarysowaniu próbki.

Oprócz toughness index określa się również tzw. współczynnik wytrzymałości resztkowej $R_{5,10}$, $R_{10,20}$ itd., który przedstawia średni poziom wytrzymałości pozostałej po pojawieniu się pierwszej rysy. Wyraża on procent wytrzymałości w chwili zarysowania f_{fcr} dla różnych zakresów ugięć. Kolejnymi wielkościami wyznaczanymi w tej metodzie są wytrzymałość, odpowiadająca pojawieniu się pierwszej rysy f_{fcr} , i graniczna wytrzymałość na zginanie f_{flu} (rys.1). Dla tej metody jednym z ważniejszych zadań jest prawidłowe określenie punktu, w którym próbka zaczyna się rysować (punkt A na rys. 1).

Temu badaniu poddaje się próbki z betonu niezbrojonego, zbrojonego stalą miękką, a przede wszystkim próbki wykonane z betonu zbrojonego różnymi typami włókien. Badanie to ma na celu określenie odporności betonu na kruche zniszczenie oraz ukazanie pozakrytycznej pracy przekroju betonowego.



Rys. 1. Wyznaczenie parametrów ciągliwości według ASTM C1018 [2]

Fig. 1. Flexural toughness values according to the ASTM C1018 standard [2]

3. Wyniki badań


Poniżej przedstawiono i scharakteryzowano wyniki badań z trzech różnych źródeł. Dla każdego opracowano wykresy zależności zawartości włókien w betonie od siły rysującej, siły maksymalnej oraz od wskaźnika ciągliwości I_5 . Wykresy te posłużyły do oceny efektywności pracy włókien stalowych w betonie, czyli określenia ich minimalnej zawartości ze względu na zarysowalność, której miarą jest wartość siły rysującej oraz nośność, którą opisują siła maksymalna i wskaźnik ciągliwości I_5 .

3.1. Badania nr 1 – Prof. Piti Sukontasukkula [1]

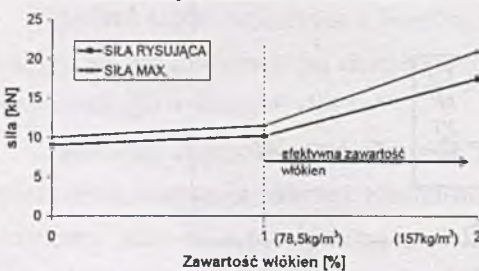
Zespół naukowców pod przewodnictwem Prof. Piti Sukontasukkula z Uniwersytetu w Bangkoku przeprowadził badania ciągliwości na próbkach z betonu niezbrojonego (PLN) i betonu zbrojonego włóknami stalowymi (SFRC) o zawartości od 0 do 2%. Średnia wytrzymałość betonu badanych próbek wynosiła 42 MPa. Badania przeprowadzono za pomocą metody ASTM C1018. Ciągliwość wyznaczono w czterech punktach: T_8 , $T_{3,6}$, $T_{5,56}$, $T_{10,56}$, podając odpowiednie wskaźniki ciągliwości I_5 , I_{10} , I_{20} . Szczegółowe wyniki oraz opis badanych próbek przedstawiono w tab. 1 i na rys. 2.

Tabela 1

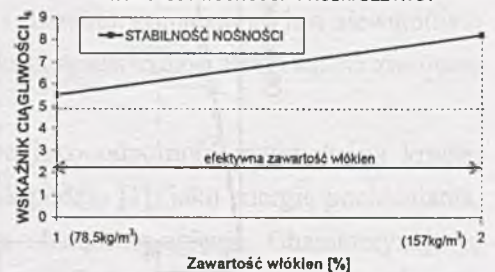
Właściwości włókien, plan badania oraz ciągliwość według ASTM C1018

Materiał	Kształt	Długość [mm]	Kształt przekroju, średnica [mm]		Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	
			O	$\phi 0,5$	1000	
stal		60	O	$\phi 0,5$	1000	
Rodzaj betonu	Oznaczenie	Zawartość [%]	Zawartość [kg/m ³]		Wskaźnik ciągliwości	
niezbrojony	PLN	0	0		I_5	I_{10} I_{20}
zbroj. włóknami stalowymi	1SFRC	1	78,5		5,5	10,4 21,3
zbroj. włóknami stalowymi	2SFRC	2	157		8,2	15,9 26,6

a) SIŁA RYSUJĄCA, SIŁA MAX. - PRÓBKI BEZ RYSY



b) STABILNOŚĆ NOŚNOŚCI - PRÓBKI BEZ RYSY



Rys. 2. Wykresy zależności: a) wykres siła rysująca, siła maksymalna-ugięcie, b) wskaźnik ciągliwości I_5 -ugięcie dla betonu niezbrojonego oraz zbrojonego włóknami stalowymi

Fig. 2. Dependence diagram of: a) first crack load, maximum load-deflection curves, b) toughness index I_5 -deflection curves for plain concrete and steel fibre reinforced concrete

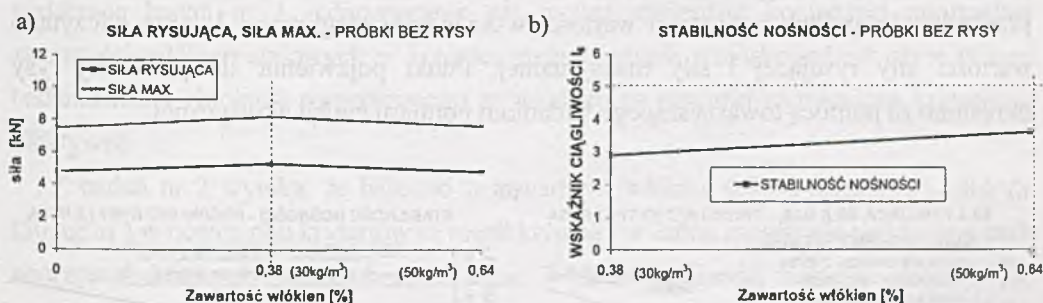
3.2. Badania nr 2 – Dr. Patrika Grotha [2]

Badania przeprowadzone przez Dr. Patrika Grotha na Uniwersytecie w Lulea, w Szwecji, polegały na poddaniu beleczek betonowych czteropunktowemu zginaniu. Całość doświadczeń przeprowadzono według standardów ASTM C1018. Przebadano 28 rodzajów beleczek różniących się m.in. zawartością włókien stalowych (0÷0,64%) oraz ich długością (35 lub 60 mm). Szczegółową charakterystykę poszczególnych próbek oraz wyznaczone charakterystyki ciągliwości zawarto w tabeli 4. Wyniki badań zgromadzono i przedstawiono w formie graficznej. W niniejszym artykule przeanalizowano pięć próbek od B06 do B10.

Tabela 2
Opis badanych belek B06-B10 z włóknami stalowymi wraz z parametrami ciągliwości

Materiał			Kształt		Długość [mm]		Kształt przekroju, średnica [mm]		
stal			—————		35 lub 60		O	φ0,6	
Oznaczenie próbki	$L_f^{(1)}$ [mm]	$V_f^{(2)}$ [%]	m_f [kg/m ³]	$f_c^{(3)}$ [MPa]	δ_{cr} [mm]	f_{fcr} [MPa]	I_5	I_{10}	I_{20}
B06		0	0	25	0,0876	4,8	Beton niezbrojony		
B07	35	0,38	30	25	0,0914	4,6	2,7	4,1	6,5
B08	35	0,64	50	25	0,0859	5,0	3,0	4,7	7,6
B09	60	0,38	30	25	0,0914	5,3	2,9	4,7	8,2
B10	60	0,64	50	25	0,0841	4,8	3,6	6,7	12,8

(1) – Długość włókien, (2) – Zawartość włókien w objętości próbki, (3) – Wytrzymałość betonu na ściskanie



Rys. 3. Wykresy zależności: a) wykres siła rysująca, siła maksymalna-ugięcie, b) wskaźnik ciągliwości I_5 -ugięcie dla betonu niezbrojonego oraz zbrojonego włóknami stalowymi

Fig. 3. Dependence diagram of: a) first crack load, maximum load-deflection curves, b) toughness index I_5 -deflection curves for plain concrete and steel fibre reinforced concrete

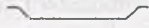
3.3. Badania nr 3 – Mgr. inż. K. Piwowarczyka [3]

W punkcie tym wykorzystano część badań Mgr. inż. K. Piwowarczyka z Politechniki Krakowskiej, które dotyczyły m.in. poddania beleczek betonowych o wymiarach 10x12x60 cm próbie trójpunktowego zginania. Badane elementy były

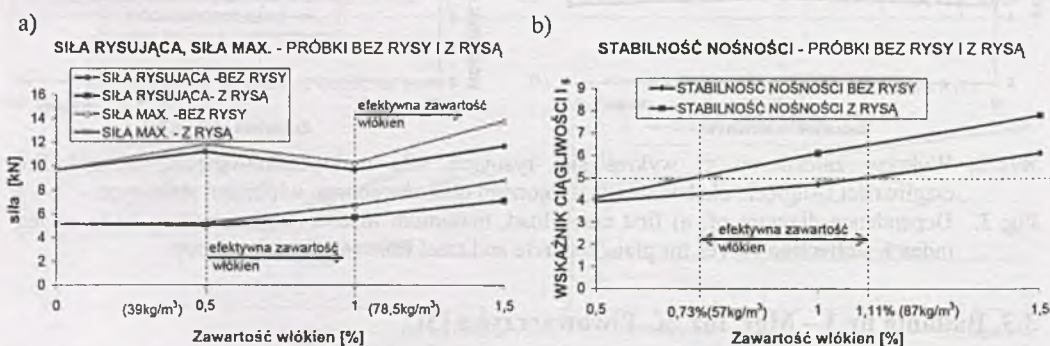
wykonane z betonu o średniej wytrzymałości na ściskanie 48,7 MPa, zbrojone zbrojeniem z włókien stalowych. Badania wykonano na próbkach z rysą (30 mm x 3 mm) i bez rysy. W tabeli 3 przedstawiono szczegółowy opis badanych próbek.

Tabela 3

Właściwości włókien i plan badania

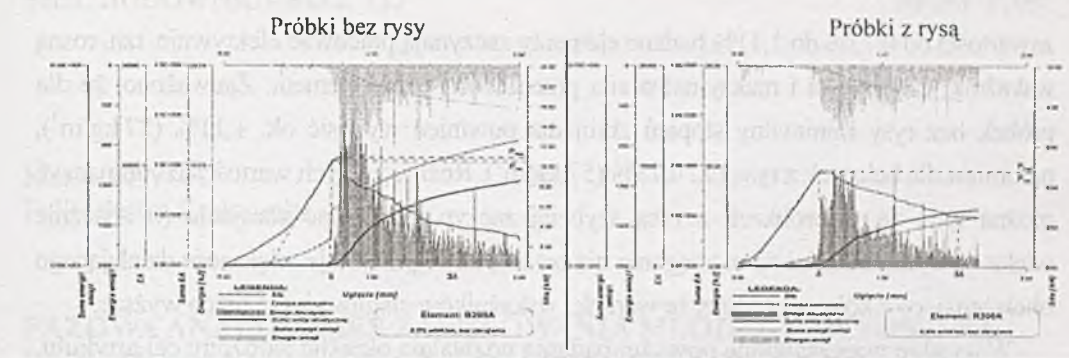
Material	Kształt	Długość [mm]	Kształt przekroju, średnica [mm]			
stal		30	□	0,8x0,5		
Rodzaj betonu	Oznaczenie	Zawartość [%]		Zawartość [kg/m ³]		
Beton niezbrojony	PLN	0		0		
Beton zbrojony włóknami stalowymi	0,5SFRC	0,5		39,3		
Beton zbrojony włóknami stalowymi	1SFRC	1		78,5		
Beton zbrojony włóknami stalowymi	1,5SFRC	1,5		117,8		
Próbki z rysą			Próbki bez rysy			
Oznaczenie	Siła rys. P _{cr} [kN]	Siła max P _u [kN]	Stabilność nośności I ₅	Siła rys. P _{cr} [kN]	Siła max P _u [kN]	Stabilność nośności I ₅
PLN	5,1	5,1	---	9,7	9,7	---
0,5SFRC	5,0	5,2	4,1	11,2	11,8	3,7
1SFRC	5,7	6,7	5,4	9,7	10,3	5,1
1,5SFRC	7,1	8,8	6,0	11,7	13,8	5,5

W trakcie badań sterowano wartością ugięcia, mierząc odpowiadające mu wartości siły. Rezultaty przedstawiono w formie graficznej na wykresie zależności siła-ugięcie. Przykładowe wykresy pokazano na rys. 5, a wartości zamieszczono w tabeli 3. Dla przebadanych próbek wyliczono wartości wskaźników ciągliwości I₅ oraz odczytano wartości siły rysującej i siły maksymalnej. Punkt pojawienia się pierwszej rysy określono za pomocą towarzyszącego badaniom pomiaru emisji akustycznej.



Rys. 4. Wykresy zależności: a) wykres siła rysująca, siła maksymalna-ugięcie, b) wskaźnik ciągliwości I₅-ugięcie dla betonu niezbrojonego oraz zbrojonego włóknami stalowymi

Fig. 4. Dependence diagram of: a) first crack load, maximum load-deflection curves, b) toughness index I₅-deflection curves for plain concrete and steel fibre reinforced concrete



Rys. 5. Wykresy obciążenie-ugięcie dla różnego stopnia zbrojenia betonu – próbki bez rysy i z rysą
 Fig. 5. Load-deflection curves for different fibre content – specimens without gap and with gap

4. Wnioski

W sumie przeanalizowano badania z następującymi ilościami zbrojenia rozproszonego w betonie: 0%; 0,38%; 0,50%; 0,64%; 1,0%; 1,5%; 2,0%. Z badań nr 1 wynika, że ze względu na kryterium nośności zastosowany stopień zbrojenia 1% i 2% działa na beton w sposób efektywny, o czym świadczy wykres stabilności nośności, który leży powyżej prostej poziomej $I_5 = 5$, jak dla materiału idealnie sprężysto – plastycznego. Zauważono więc wzrost stabilności nośności w zakresie od 1% ($78,5 \text{ kg/m}^3$) do 2% (157 kg/m^3). Kryterium zarysowalności opisane przez wartość siły rysującej potwierdziło wnioski z poprzedniego kryterium, tzn. zauważono wzrost siły rysującej dla ilości włókien $\geq 1\%$. Na podstawie badań nr 1 jednoznacznie nie można stwierdzić koniecznej minimalnej zawartości włókien stalowych w betonie, można jedynie wnioskować, iż użyte w tym badaniu ilości zbrojenia rozproszonego ze względu na powyżej wymienione kryteria są efektywne.

Z badań nr 2 wynika, że beleczki o zawartości włókien 0,38% (30 kg/m^3) i 0,64% (50 kg/m^3) w ocenie obu kryteriów są nieefektywne i w żaden sposób nie poprawiają cech wytrzymałościowych badanych elementów. Wykres stabilności nośności znajduje się poniżej prostej $I_5 = 5$. Siła rysująca nie rośnie wraz ze wzrostem ilości zbrojenia, a nawet nieznacznie spada, co świadczy o bardzo szybkim zarysowaniu beleczek, a w konsekwencji ich szybszej degradacji. Badania nr 2 pozwoliły wykluczyć ilości zbrojenia niższe niż 0,64% (50 kg/m^3) z grupy efektywnych zawartości wpływających korzystnie na pracę elementu betonowego w ocenie dwóch powyżej wymienionych kryteriów.

Badania nr 3 pozwoliły ostatecznie na określenie minimalnej ilości zbrojenia rozproszonego. Z kryterium stabilności nośności i maksymalnej siły wynika, że dla

zawartości od 0,73% do 1,11% badane elementy zaczynają pracować efektywnie, tzn. rosną wskaźniki ciągliwości i maksymalna siła przenoszona przez element. Zauważono, że dla próbek bez rysy minimalny stopień zbrojenia powinien wynosić ok. 1,11% (87 kg/m^3), natomiast dla beleczek z rysą ok. 0,73% (57 kg/m^3). Różnicę w tych wartościach tłumaczyć można tym, że w próbkach z rysą szybciej zaczyna pracować zbrojenie (o znacznie większej wytrzymałości na rozciąganie niż beton), które przejmuje większość działającego obciążenia, co z kolei powoduje, że wartości wskaźników ciągliwości są nieco wyższe.

Wszystkie przedstawione powyżej badania pozwalają określić założony cel artykułu, a mianowicie podać w pewnym przybliżeniu minimalny stopień zbrojenia betonu włóknami stalowymi, który, biorąc pod uwagę kryterium nośności i zarysowalności, kształtuje się pomiędzy 0,7% (55 kg/m^3) a 1,1% (86 kg/m^3). Dla porównania, według [6] efektywny stopień zbrojenia kształtuje się na poziomie ok. 1%, a zbrojenie poniżej 0,5% (39 kg/m^3) jest całkowicie nieefektywne. Według [5] ilość ta nie powinna przekraczać 1% ($78,5 \text{ kg/m}^3$). Wnioski z powyższego artykułu dają możliwość innego spojrzenia na sposób doboru ilości zbrojenia rozproszonego w konstrukcji. Na podstawie ww. badań można stwierdzić, że należałoby zwiększyć stopień zbrojenia posadzek przemysłowych dylatacyjnych i bezdylatacyjnych, w których ilości zbrojenia rozproszonego podane w punkcie 1 niniejszej pracy są znacznie mniejsze.

BIBLIOGRAFIA

1. Sukontasukkul P.: Toughness Evaluation of Steel and Polypropylene Fibre Reinforced Concrete Beams under Bending. *Thammasat International Journal of Science*, Vol. 9, No. 3, July-September. 2004, p. 35-41.
2. Groth P.: Fibre Reinforced Concrete – Fracture Mechanics Methods Applied on Self-Compacting Concrete and Energetically Modified Binders. Doctoral Thesis – Lulea Tekniska Universitet, Sweden, January 2000.
3. Piwowarczyk K.: Ciągliwość i rysoodporność drutobetonu z dodatkowym zbrojeniem miękkim. Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego, Kraków 1994.
4. Jagosz A.: Technologia wykonywania posadzek wibrobetonowych. IX Sympozjum Naukowo-Techniczne, pt. „Reologia w Technologii Betonu”, Gliwice 2007, s. 37-51.
5. Karwacki J.M.: Beton zbrojony włóknem stalowym. NV BEKAERT S.A., Belgia.
6. Glinicki M.A., Litorowicz A., Zieliński M.: Interpretacja badań odporności fibrobetonów na pękanie przy zginaniu. Konferencja Naukowa KILiW PAN I KN PZITB, Krynica 2001, s. 1-9.