

Politechnika Krakowska  
Wydział Inżynierii Lądowej  
Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych  
Pracownia Konstrukcji Sprężonych

mgr inż. EWA JAROMSKA

**WPŁYW DŁUGOŚCI TRANSMISJI SIŁY NACIĄGOWEJ  
I ROZSTAWU CIĘGIEN SPRĘŻAJĄCYCH NA STAN  
ODKSZTAŁCENIA W STRUNOBETONOWEJ TARCZY  
Z BETONU WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI**

ROZPRAWA DOKTORSKA

PROMOTOR:  
dr hab. inż. ANDRZEJ SERUGA, prof. PK

KRAKÓW, marzec 2015

*Składam serdeczne podziękowania  
dr hab. inż. Andrzejowi Seruga, prof. PK,  
Promotorowi pracy,  
za poświęcony czas,  
okazane zaangażowanie i cenne rady  
podczas realizacji programu badań doświadczalnych  
i w trakcie redakcji pracy.*

*Ewa Jaromska*

Cracow University of Technology  
Faculty of Civil Engineering  
Institute of Materials and Building Structures  
Prestressed Concrete Division

mgr inż. EWA JAROMSKA

**INFLUENCE OF THE TRANSFER LENGTH OF TENSIONING  
FORCE AND THE PRESTRESSING TENDONS SPACING  
ON THE STRAIN STATE IN THE HIGH-STRENGTH CONCRETE  
PRESTRESSED SHIELD**

DOCTOR THESIS

SUPERVISOR:  
dr hab. inż. ANDRZEJ SERUGA, prof. PK

KRAKÓW, march 2015

# **INFLUENCE OF THE TRANSFER LENGTH OF TENSIONING FORCE AND THE PRESTRESSING TENDONS SPACING ON THE STRAIN STATE IN THE HIGH-STRENGTH CONCRETE PRESTRESSED SHIELD**

## **SUMMARY**

The dissertation concerns the influence of the transfer length of the tensioning force and the prestressing tendon spacing on the strain state in the prestressed concrete shield. The problem is analyzed in terms pertain to the production of the precast prestressed concrete panels used to construction of the tank wall for liquids. Because of the statical behavior of the shield in the exploitation state, the best results is achieved in the case of uniform compressive stress in the longitudinal direction due to the prestressing and at short transfer length. These are possible when the high strength concrete is used.

FEM was applied to numerical analysis of the influence of the number of tendons and their spacing, as well as the tensioning force value and concrete compressive strength on the concrete strains and stress in precast shield. The technological openings were included in the analysis.

Because of the direct transfer length dependence on the concrete bond to the prestressing strand, in experimental investigations the high-strength concrete bond to the prestressing strands  $7\phi 4$  mm and  $7\phi 5$  mm was undertaken. The research project includes analytical study as well as the experimental tests. The concrete samples with six bond effective length: 40, 80, 120, 240, 330 and 460 mm were casted with C 80/95 class concrete. The experimental tests were conducted after 1, 3, 7 and 28 days of the concrete maturity on the samples with and without the pretensioned strand (425 samples). The obtained results were analyzed at seven values of strand slip equals to 0,01; 0,0254; 0,1; 0,254; 1,0; 2,54 and 10,0 mm. Three types of steel strands were used in the analysis:  $7\phi 4$  mm (round wires)  $7\phi 5$  mm (round wires) and  $7\phi 5$  mm (sectional wires).

Prior to construction of the high-concrete strength shield in the Laboratory of the Institute of Materials and Building Structures, the studying and numerical analysis of the concrete stress due to the detensioning of strands were done. The tensioning bed for two tendons was used in the experimental investigations of the concrete shield. The measurements were collected directly after released of the tension and then after 2, 3, 7, 14, 21, 28 and 56 days from casting the shield, in longitudinal and transverse direction of the tested element.

The experimental investigations were also conducted in Precast Plant during the production of the precast panels for prestressed concrete tank type C8. Normal concrete class C40/50 was used to construction of tested elements. The concrete strains measurements were also recorded during the detensioning of prestressing strands type  $7\phi 4$  mm.

Based on the results obtained from the experimental investigations there were formulated some findings concerned to the testing methods and the evaluation of concrete bond to the prestressing strands with and without the pretensioning. The influence of the type of prestressing strands on the concrete strength was evaluated. Moreover it was proved the considerable advantages resulted from applications of high-concrete strength: namely high bond strength and short transfer length of prestressing force.



**PŁYW DŁUGOŚCI TRANSMISJI SIŁY NACIĄGOWEJ  
I ROZSTAWU CIĘGIEN SPRĘŻAJĄCYCH NA STAN ODKSZTAŁCENIA W STRUNOBETONOWEJ TARCZY  
Z BETONU WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI**

**STRESZCZENIE**

Praca podejmuje zagadnienie wpływu długości transmisji siły naciągowej i rozstawu cięgien sprężających na stan odkształcenia w strunobetonowej tarczy, w aspekcie produkcji płyt prefabrykowanych, z których wykonywane są zbiorniki na ciecze. Z uwagi na charakter pracy elementu najkorzystniejszym wariantem jest równomierny stan naprężenia w tarczy przy niewielkiej długości transmisji, co możliwe jest przy zastosowaniu betonu wysokiej wytrzymałości. Badania numeryczne MES pozwoliły na analizę poszczególnych przypadków stanu odkształcenia, przy zmieniającej się geometrii tarczy (uwzględniającej również przypadki otworów technologicznych), rozstawu i liczby splotów sprężających, sile naciągowej i wytrzymałości betonu na ściskanie.

Ze względu na bezpośrednią zależność długości transmisji od przyczepności betonu do splotów sprężających, w projekcie badawczym podjęto problem przyczepności BWW do stalowych splotów  $7\phi 4$  mm i  $7\phi 5$  mm. Przeprowadzono analizę studialną, a następnie wykonano badania doświadczalne. Zastosowane próbki charakteryzowały się sześcioma efektywnymi długościami przyczepności (40, 80, 120, 240, 330 i 460 mm) i wykonane zostały z betonu klasy C 80/95. Badania przeprowadzono na próbkach bez wstępnego naciągu splotów oraz z naciągiem splotów po 1, 3, 7 i 28 dniach dojrzewania betonu (łącznie 425 próbek). Analiza wyników została przeprowadzona na siedmiu poziomach poślizgu (0,01; 0,0254; 0,1; 0,254; 1,0; 2,54 i 10,0 mm) i dotyczyła trzech rodzajów splotów ( $7\phi 4$  mm okrągłe,  $7\phi 5$  mm okrągłe i  $7\phi 5$  mm zamknięte).

Eksperymentalne badania stanu odkształcenia tarczy sprężonej dwoma splotami, poprzedzone analizą studialną i numeryczną MES, zrealizowano w Laboratorium wykorzystując tor naciągowy z badań przyczepności. Pomiaru prowadzono bezpośrednio po zwolnieniu naciągu, a następnie po 2, 3, 7, 14, 21, 28 i 56 dniach dojrzewania betonu w kierunku podłużnym i poprzecznym elementu badawczego. Badania doświadczalne prowadzono również w zakładzie prefabrykacji podczas produkcji prefabrykowanych płyt ściany zbiornika w systemie C8 w chwili zwolnienia naciągu. Płyty wykonywane z betonu normalnego C40/50 sprężono ośmioma splotami  $7\phi 4$  mm.

W wyniku przeprowadzonych badań i analiz sformułowano wnioski dotyczące warunków badania i określania przyczepności betonu do stalowych splotów sprężających bez naciągu i z naciągiem. Określono wpływ rodzaju splotów na naprężenie przyczepności. Ponadto wykazano znaczne korzyści wynikające z zastosowania BWW, co wyraża się dużą przyczepnością i małą długością transmisji siły sprężającej.

# **EINFLUSS DES ABSTANDES UND DER VERBUNDEIGENSCHAFTEN VON LITZEN MIT SOFORTIGEM VERBUND AUF DAS VERFORMUNGSVERHALTEN VON STAHLBETONSCHLEIBEN UNTER VERWENDUNG VON HOCHFESTEM BETON DER FESTIGKEITSKLASSE**

## **ZUSAMMENFASSUNG**

Die Arbeit befasst sich mit der Frage des Einflusses der Spannkrafteinleitung und des Litzenabstandes mit sofortigem Verbund auf das Verformungsverhalten von Stahlbeton-Fertigteilscheiben aus hochfestem Beton für die Herstellung von Flüssigkeitsbehältern. Im Hinblick auf das Tragverhalten der Fertigteilelemente erwies sich ein gleichmäßiger Normalspannungszustand einhergehend mit einer kurzen Einleitungslänge der Spannkraft unter der Verwendung eines hochfesten Betons als die leistungsfähigste Variante.

Zur Analyse des Tragverhaltens wurden zahlreiche numerische Untersuchungen (FE-Analysen) unter verschiedenen Einflussparametern durchgeführt. Variiert wurden die Scheibengeometrie bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Aussparungen, die Anzahl und Abstände der Spannlitzen, die Größe der Spannkraft sowie die Betondruckfestigkeit. Auf Grund der unmittelbaren Abhängigkeit zwischen Einleitungslänge der Spannkraft und den Verbundeigenschaften der Spannlitzen wurde das Verbundverhalten im Rahmen der rechnerischen Analysen und bei den nachfolgenden experimentellen Untersuchungen für die Anwendung der Litzensysteme  $7\phi 4$  mm und  $7\phi 5$  mm untersucht. Die in der Betonfestigkeitsklasse C80/95 hergestellten Versuchskörper wiesen insgesamt sechs verschiedene effektive Verbundlängen von 40, 80, 120, 240, 330 und 460 mm auf.

Die Ausziehversuche erfolgten an Probekörpern ohne und mit Einleitung der Vorspannkraft auf dem eigens für diesen Zweck entwickelten Spannbett. Die Ausziehversuche wurden in Abhängigkeit der Betonfestigkeitsentwicklung nach einem, drei, sieben und nach 28 Tagen durchgeführt (insgesamt 425 Probekörper). Die Auswertung der Verbundeigenschaften erfolgte für die drei Litzenarten ( $7\phi 4$  mm rund,  $7\phi 5$  mm rund i  $7\phi 5$  mm geschlossen) und für insgesamt sieben verschiedene Schlupfniveaus (0,01; 0,0254; 0,1; 0,254; 1,0; 2,54 i 10,0 mm).

Die experimentellen Untersuchungen des Verformungsverhaltens der mit 2 Spannlitzen vorgespannten Stahlbetonscheibe erfolgten in einem Spannbett. Die Messungen wurden erstmals unmittelbar nach der Spannkrafteinleitung und in Abhängigkeit der Betonfestigkeitsentwicklung nach 2, 3, 7, 14, 21, 28 und nach 56 Tagen jeweils in der Längs- und Querrichtung des zu untersuchenden Elementes durchgeführt. Darüber hinaus wurden ergänzende experimentelle Untersuchungen an einer Betonplatte des Systems C8 zu einem Zeitpunkt unmittelbar nach der Spannkrafteinleitung im Fertigteilwerk durchgeführt. Die betreffenden Platten wurden jeweils mit acht Litzen  $7\phi 4$  mm vorgespannt.

Auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen und der numerischen Analysen können Rückschlüsse auf das Verbundverhalten der Spannlitzen mit und ohne Einfluss der Vorspannkraft gezogen werden. Der Einfluss der Litzenart auf das Verbundverhalten wird beschrieben. Aufgrund der günstigen Auswirkung auf eine höhere Verbundfestigkeit und zur Reduzierung der Spannkrafteinleitungslänge wird die Verwendung von hochfestem Beton C80/95 empfohlen.

## Wykaz ważniejszych oznaczeń w tekście

### Małe litery alfabetu łacińskiego

- $avgf_{si}$  – średnie początkowe naprężenie w cięgni, na długości transmisji, po zwolnieniu naciągu
- $c$  – otulina zbrojenia
- $d$  – średnica pręta/splotu
- $d_b$  – nominalna średnica splotu
- $d_p$  – średnica nominalna stali sprężającej
- $f_{bd}$  – wartość obliczeniowa granicznego naprężenia przyczepności
- $f_{bp}$  – naprężenie przyczepności
- $f_{bpd}$  – obliczeniowa wytrzymałość przyczepności
- $f_c$  – wytrzymałość betonu na ściskanie
- $f_{ck,28d}$  – wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach
- $f_{cm}$  – średnia wartość wytrzymałości walcowej betonu na ściskanie
- $f'_{ci}$  – wytrzymałość betonu na ściskanie określana na walcach w chwili zwolnienia naciągu
- $f_{ck}$  – charakterystyczna wytrzymałość walcowa na ściskanie betonu po 28 dniach
- $f_{ckj}$  – charakterystyczna wytrzymałość walcowa na ściskanie betonu po  $j$  dniach
- $f_{ctk}$  – charakterystyczna wytrzymałość betonu na rozciąganie osiowe
- $f_{ctm}$  – średnia wartość wytrzymałości betonu na rozciąganie osiowe
- $f_{ctd}$  – obliczeniowa wytrzymałość betonu na rozciąganie osiowe
- $f_{ptk}$  – charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie zbrojenia sprężającego.
- $f_{ptd}$  – obliczeniowa wytrzymałość na rozciąganie zbrojenia sprężającego.
- $f_R$  – wskaźnik geometrii uźebrowania pręta zbrojeniowego
- $f_{se}$  – naprężenie w stali sprężającej po stratach
- $f_{si}$  – naprężenie w splocie bezpośrednio przed zwolnieniem naciągu
- $f_{pk}$  – obliczeniowa wytrzymałość na rozciąganie stali sprężającej
- $f_{pe}$  – efektywne naprężenie w splocie
- $f_{pk}$  – charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie stali sprężającej
- $f_{pd}$  – granica plastyczności stali sprężającej
- $f_{cmj}$  – wytrzymałość betonu na ściskanie w chwili zwolnienia naciągu
- $f_{pi}$  – naprężenie początkowe,
- $f_{pe}$  – naprężenie efektywne,
- $h$  – skok zwicia
- $l$  – długość odcinka przyczepności, długość czynna (efektywna)
- $l_{ba}$  – długość zakotwienia
- $l_{bp}$  – podstawowa długość zakotwienia, długość zakotwienia
- $l_{bpd}$  – obliczeniowa długość transmisji
- $l_{bpt}$  – długość transmisji
- $l_t$  – długość transmisji

- $l_{pt}$  – długość transmisji
- $s$  – poślizg splotu względem betonu
- $u$  – obwód pręta zbrojeniowego
- $w/c$  – wskaźnik wodno-cementowy

#### **Małe litery alfabetu greckiego**

- $\alpha$  – współczynnik doświadczalny
- $\alpha$  – kąt zwicia
- $\alpha_p$  – współczynnik doświadczalny
- $\delta$  – przemieszczenie pręta zbrojeniowego względem betonu
- $\delta_e$  – wartość wślizgu
- $\epsilon_c$  – odkształcenie betonu
- $\epsilon_s$  – odkształcenie stali
- $\phi$  – średnica nominalna pręta/splotu
- $\phi$  – średnica pręta zbrojeniowego
- $\varphi(\infty, t_0)$  – końcowa wartość współczynnika pełzania
  
- $\eta_1$  – współczynnik zależny od jakości warunków przyczepności i pozycji pręta w czasie betonowania
- $\eta_2$  – współczynnik zależny od średnicy pręta
- $\nu$  – współczynnik zmienności
- $\tau_b$  – naprężenie przyczepności
- $\tau_{b,s}$  – naprężenie przyczepności przy poślizgu  $s$
- $\tau_b'$  – normalizacja naprężeń przyczepności względem wytrzymałości na rozciąganie, wskaźnik przyczepności
- $\tau_{b,max}$  – graniczne naprężenie przyczepności
- $\rho$  – gęstość
- $\sigma_s$  – naprężenia w stali
- $\sigma_p$  – naprężenia od sprężenia
- $\sigma_{pm0}$  – wytrzymałość betonu na ściskanie w chwili zwolnienia naciągu, naprężenie efektywne
- $\sigma_{pmt}$  – naprężenia w stali sprężającej po stratach
- $\sigma_{p0}$  – naprężenie początkowe

#### **Duże litery**

- $A$  – współczynnik uzależniony od rodzaju kruszywa, marki cementu oraz wszelkich domieszek i dodatków
- $A$  – przekrój poprzeczny
- $A_p$  – przekrój nominalny splotu lub drutu

$C$	-	parametr (Bruggeling)
$D$	-	średnica rdzenia splotu
$E$	-	styczny moduł sprężystości betonu
$E_{cm}$	-	ściczny moduł sprężystości betonu
$E_p$	-	moduł sprężystości stali sprężającej
$E_{ps}$	-	moduł sprężystości cięgna,
$F$	-	siła działająca na pręt zbrojeniowy
$L_t, L_{tr}$	-	długość transmisji
$N$	-	parametr (Bruggeling)
$P$	-	siła sprężająca
$P_i, P_0$	-	obciążenie początkowe
$P_e, P_{m0}$	-	obciążenie po stratach doraźnych
$P_t, P_{mt}$	-	obciążenie po stratach
$\Delta$	-	wartość poślizgu
$\Delta$	-	średnica splotu

## Spis treści

1	Wprowadzenie.....	7
2	Cel, tezy i zakres pracy.....	9
2.1	Cel.....	9
2.2	Tezy pracy.....	9
2.3	Zakres pracy.....	10
3	Mechanizm przyczepności betonu do stali zbrojeniowej.....	11
3.1	Przyczepność betonu do stali zwykłej.....	11
3.1.1	Przyczepność przylegania.....	11
3.1.2	Przyczepność tarcia.....	12
3.1.3	Przyczepność tnąca mechanicznego zakotwienia.....	12
3.1.4	Udział poszczególnych rodzajów przyczepności w transferze sił.....	15
3.1.5	Mechanizmy zniszczenia przyczepności betonu do stali zbrojeniowej.....	16
3.1.6	Czynniki wpływające na przyczepność betonu do stali zwykłej.....	16
3.1.7	Naprężenia przyczepności betonu do stali zwykłej.....	20
3.2	Przyczepność betonu do cięgien sprężających.....	21
3.2.1	Zarysowana strefa rozciągana.....	21
3.2.2	Strefa wprowadzenia siły sprężającej.....	22
3.2.3	Czynniki wpływające na naprężenia przyczepności.....	25
3.2.4	Sploty.....	26
3.3	Metodyka badań przyczepności betonu do prętów zbrojenia i cięgien sprężających.....	30
3.3.1	Metody typu pull-out.....	30
3.3.2	Metoda badania na belkach.....	33
3.3.3	Metody badawcze uwzględniające sprężenie elementu.....	36
3.4	Badania przyczepności betonu do prętów zbrojenia i cięgien sprężających (wybrane zagadnienia).....	39
3.4.1	Badania Cousins T.E., Badeaus M.H., Moustafa S., (1992). [31].....	39
3.4.2	Badania Bigaj.....	40
3.4.3	Badania niemieckie.....	40
3.4.4	Weryfikacja metod typu pull-out.....	45
4	DŁUGOŚĆ TRANSMISJI SIŁY NACIĄGOWEJ.....	48
4.1	Długość transmisji wg wybranych norm [149].....	48
4.1.1	CEB-FIP MODEL CODE 1990 [N4].....	48
4.1.2	DIN 1045-1 [N6, N7].....	49
4.1.3	PN-EN 1992-1-1:2008 [N10].....	50

---

4.1.4	ACI 318-02 [N3] .....	50
4.1.5	MC 2010 Model Code 2010 [N9] .....	51
4.2	Metodyka badań .....	53
4.2.1	Metoda pomiaru podłużnego odkształcenia betonu / Metoda maksymalnego 95%-owego średniego odkształcenia (95% AMS) .....	53
4.2.2	Pomiar wślizgu końca cięgna .....	54
4.2.3	Metoda pomiaru odkształcenia splotów na jego długości .....	55
4.2.4	Zniszczenie belek siłą skupioną .....	56
4.2.5	Metoda mieszana .....	56
4.2.6	Metoda pomiaru siły w splocie .....	57
4.2.7	Test SSR (Step by Step Release) (A. S. G. Bruggeling 2001) [19] .....	62
4.2.8	Metoda odspojenia (przerwania ciągłości przylegania betonu do splotów) .....	63
4.2.9	A. Nitsch 2001 - Badania na belkach .....	63
4.2.10	Nienormowe metody badań długość transmisji /Badania zmierzające do określenia akceptowanej normowej metody badania długość transmisji [108] .....	64
4.3	Dotychczasowe badania doświadczalne długości transmisji .....	65
4.3.1	Zestawienie w formie banku danych .....	65
4.3.2	Analiza banku danych .....	67
4.3.3	Wybrane zagadnienia z zakresu dotychczasowych badań .....	68
4.4	Zaproponowane wzory na długość transmisji i przyczepności .....	77
5	MATERIAŁY .....	81
5.1	Beton .....	81
5.1.1	Beton do produkcji prefabrykowanych elementów ściany zbiornika w Zakładzie Prefabrykacji Precon Polska sp z o.o. ....	81
5.1.2	Beton wysokiej wytrzymałości do produkcji tarczy w Laboratorium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych (L-1) Politechniki Krakowskiej .....	82
5.1.3	Wyniki badań właściwości mechanicznych betonu .....	85
5.2	Stal sprężająca .....	87
5.2.1	Sploty 7φ4 mm do produkcji prefabrykowanego elementu ściany zbiornika w systemie C8 87	
5.2.2	Sploty 7 φ 5 mm okrągłe .....	90
5.2.3	Sploty 7 φ 5 mm zamknięte .....	92
6	ANALIZA NUMERYCZNA MES ROZKŁADU ODKSZTAŁCEŃ W STRUNO-BETONOWYCH TARCZACH 93	
6.1	Uwagi wstępne .....	93
6.2	Istniejące systemy rozwiązań ścian z prefabrykowanych elementów .....	94

---

6.3	Wpływ rozstawu cięgien sprężających na stan odkształcenia strunobetonowej tarczy .....	97
6.3.1	Uwagi ogólne .....	97
6.3.2	Modele przyjęte w analizie .....	97
6.3.3	Wyniki analizy numerycznej dla tarczy pełnej .....	98
6.3.4	Wyniki analizy numerycznej dla tarczy z otworem .....	102
6.3.5	Wnioski .....	105
6.4	Wpływ długości transmisji na stan odkształcenia strunobetonowej tarczy .....	105
6.4.1	Modele badawcze .....	105
6.4.2	Wyniki badań numerycznych i analiza .....	106
6.4.3	Wnioski .....	107
6.5	Analiza numeryczna stanu odkształceń betonu w płycie C8 .....	107
6.6	Analiza numeryczna stanu odkształceń betonu w tarczy wykonanej w laboratorium IMiKB ..	107
6.6.1	Określenie wymiarów tarczy .....	107
6.6.2	Określenie rozkładu siły sprężającej .....	108
6.6.3	Naprężenia i odkształcenia w badanej tarczy .....	109
6.6.4	Wybór tarczy do badań eksperymentalnych .....	110
7	BADANIA PRZYCZEPNOŚCI .....	111
7.1	Badania przyczepności BWW do splotów bez wstępnego naciągu .....	112
7.1.1	Badania wstępne .....	112
7.1.2	Wyniki badań wstępnych przyczepności BWW dla splotów 7 $\phi$ 5 mm zamkniętych .....	115
7.1.3	Badania zasadnicze .....	119
7.1.4	Przeprowadzenie badań .....	120
7.1.5	Wyniki badań .....	125
7.2	Badania przyczepności BWW do splotów ze wstępnym naciągiem .....	135
7.2.1	Sploty .....	135
7.2.2	Przyjęcie czynnej długości przyczepności .....	135
7.2.3	Element badawczy .....	135
7.2.4	Wykonanie próbek i przeprowadzenie badań .....	136
7.2.5	Wyniki badań .....	139
8	Analiza wyników badań przyczepności .....	144
8.1	Uwagi wstępne .....	144
8.2	Założenia .....	144
8.2.1	Założenia wynikające ze stosowanej metodyki badań .....	144
8.2.2	Wyznaczenie naprężeń przyczepności .....	144
8.2.3	Przyjęte w analizie progi poślizgu .....	146



---

8.3	Wyznaczenie naprężeń przyczepności.....	146
8.3.1	Naprężenia przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm zamkniętych .....	146
8.3.2	Naprężenia przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm bez naciągu.....	147
8.3.3	Naprężenia przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm bez naciągu.....	153
8.3.4	Naprężenia przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm okrągłych z naciągiem .....	159
8.4	Czynniki wpływające na przyczepność BWW do splotów w świetle badań własnych.....	165
8.4.1	Wpływ wieku betonu .....	165
8.4.2	Wpływ rodzaju splotu.....	168
8.4.3	Wpływ sprężenia .....	170
8.4.4	Wpływ efektywnej długości przyczepności .....	174
9	BADANIA DOŚWIADCZALNE DŁUGOŚCI TRANSMISJI.....	176
9.1	Badania elementów systemu C-8 ściany zbiornika.....	176
9.1.1	Produkcja płyt.....	176
9.1.2	Badania odkształceń betonu po zwolnieniu naciągu .....	178
9.1.3	Analiza otrzymanych wyników .....	184
9.2	Badanie strunobetonowej tarczy z betonu wysokiej wytrzymałości.....	191
9.2.1	Przyjęcie elementu badawczego .....	192
9.2.2	Stanowisko badawcze i program badań.....	192
9.2.3	Wykonanie tarczy .....	193
9.2.4	Naciąg splotów i betonowanie elementu.....	194
9.2.5	Przygotowanie i przeprowadzenie badań .....	195
9.2.6	Wyniki otrzymane z badań doświadczalnych.....	197
9.2.7	Analiza otrzymanych wyników z badań doświadczalnych .....	210
10	PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE.....	215
10.1	Rodzaj splotu i efektywna długość przyczepności .....	216
10.1.1	Rodzaj splotu .....	216
10.1.2	Efektywna długość przyczepności .....	216
10.2	Wiek betonu i stopień sprężenia .....	217
10.2.1	Wiek betonu .....	217
10.2.2	Stopień sprężenia .....	217
10.3	Zastosowanie BWW do produkcji płyt strunobetonowych .....	218
ZAŁĄCZNIK A.....		220
ZAŁĄCZNIK B.....		228
ZAŁĄCZNIK C.....		232
ZAŁĄCZNIK D.....		236

ZAŁĄCZNIK E .....	241
LITERATURA.....	256
SPIS RYSUNKÓW .....	267
SPIS TABEL .....	280



## 1 Wprowadzenie

Ściany zbiorników prefabrykowanych na ciecze wykonywane są z żelbetowych lub strunobetonowych płyt o długości równej wysokości zbiornika, która najczęściej zawiera się w przedziale od 4 do 8 m. W Szwecji znane są realizacje, w których wysokość dochodzi do 16 m. Elementy wykonywane są w zakładach prefabrykacji według rozwiązań systemowych i montowane na budowie wzdłuż obwodu zbiornika.

W ostatnich 15 latach na polski rynek wprowadzono kilka rozwiązań systemowych dotyczących prefabrykowanych zbiorników na ciecze. Podstawowym elementem konstrukcyjnym ścian tych zbiorników jest prefabrykowana płyta żelbetowa lub strunobetonowa wykonywana w zakładach prefabrykacji na torze naciągowym.

Dzięki specjalnie ukształtowanym stykom wzdłuż brzegów płyty możliwe jest ich dokładne przyleganie w przypadku styków suchych. W przypadku wariantowych rozwiązań styku pionowego z zastosowaniem betonu, zaprawy lub zaczynu cementowego wypełniających pionowe styki, elementy prefabrykowane są rozsunięte na odległość kilku centymetrów. Po zmontowaniu całego obwodu, ściana sprężana jest w kierunku obwodowym za pomocą stalowych wewnętrznych lub zewnętrznych cięgien obwodowych.

Ważnym kryterium zapewniającym trwałość zbiornika jest jego szczelność w fazie eksploatacji. Szczelność może być utracona w wyniku wadliwego wykonania połączeń pionowych, połączenia poziomego na dolnej krawędzi ściany jak również zarysowania elementów prefabrykowanych, które może nastąpić podczas ich transportu ewentualnie wskutek procesu sprężania ściany zbiornika. W wyniku wprowadzenia sił naciągowych powstają w ścianie zbiornika południkowe momenty zginające, których wartość zależy od rozstawu cięgien sprężających, kolejności ich naciągu i wartości wprowadzonej siły. W przypadku powstania naprężeń rozciągających przekraczających wytrzymałość betonu na rozciąganie mogą wystąpić poziome rysy już podczas sprężania konstrukcji. Wynika z tego fakt, iż bardziej efektywnym jest rozwiązanie, w którym zastosowane są elementy strunobetonowe. W wyniku sprężenia, na torze naciągowym uzyskuje się znaczne naprężenia ściskające w przekroju poprzecznym elementu.

Rozwój naprężeń w elemencie od wprowadzenia siły sprężającej następuje powoli na długości płyty zgodnie z przekazywaniem siły naciągowej na beton wzdłuż długości transmisji począwszy od obu końców płyty. Następnie siła sprężająca rozprzestrzenia się w betonie aż do wystąpienia liniowego rozkładu naprężeń w przekroju (długość dyspersji). Znajomość długości transmisji i dyspersji pozwala na prawidłowe zaprojektowanie elementu płytowego. Uwzględniając charakter pracy zbiornika korzystniejszym jest takie rozwiązanie, w którym długość transmisji jest możliwie najkrótsza, co przyczynia się do bardziej efektywnego wykorzystania płyty z uwagi na zapewnienie równomiernego rozkładu naprężeń ściskających na długości płyty.

Dla projektanta zbiornika o ścianie wykonanej z takich elementów bardzo ważnym czynnikiem jest znajomość długości transmisji, a w szczególności rozwoju naprężeń ściskających począwszy od dolnej krawędzi ściany zbiornika. Rzutuje to bowiem na dobór liczby cięgien sprężających w kierunku obwodowym i ich wzajemne rozmieszczenie na wysokości ściany (prefabrykowanego elementu). Nie przekroczenie przez naprężenia rozciągające od obwodowego sprężenia lub parcia cieczy wartości wprowadzonych naprężeń ściskających w kierunku pionowym zwiększonych o naprężenia ściskające od ciężaru własnego i wytrzymałość betonu na rozciąganie, może być w tym przypadku uznane jako kryterium zarysowania ściany w kierunku południkowym. Z uwagi na malejącą wartość naprężeń ściskających w kierunku południkowym, wynikającą z rozwoju naprężeń przyczepności w strefie zakotwienia splotów, następuje spadek wartości kryterium w tym rejonie ściany zbiornika, co musi być uwzględnione na etapie projektowania.

Element płytowy wykonywany na torze naciągowym w zakładach prefabrykacji należy starannie zaprojektować, aby mógł przenieść obciążenie bez zarysowania w fazie montażu i eksploatacji. Naciąg cięgien w kierunku obwodowym powoduje powstanie południkowych momentów zginających, które mogą doprowadzić do zarysowania elementów prefabrykowanych. Wartość tych momentów jest uzależniona od wartości siły naciągowej w cięgnach obwodowych oraz od przyjętej kolejności sprężania. W celu zwiększenia nośności ściany w kierunku pionowym stosujemy jej sprężenie. Z uwagi na przyjętą technologię produkcji płyt przekazanie siły naciągowej na element prefabrykowany realizowane jest najczęściej po 24 godzinach dojrzwania betonu. Wymaga to zastosowania do produkcji betonów klasy C45/55 lub C50/60.

Wszelkie zaburzenia, do których zaliczamy otwory technologiczne, a zwłaszcza otwór montażowy umożliwiający przejście człowieka, rzutują na rozwój naprężeń. Ogólnie można wyróżnić dwa rodzaje otworów ze względu na ich przeznaczenie:

- otwory małych średnic rzędu 200 - 300 mm służące do przeprowadzenia rurociągu,
- otwory dużych średnic rzędu 800 mm służących jako "włazy" umożliwiające wejście do zbiornika pracownikom obsługi na terenie oczyszczalni ścieków celem dokonania bieżących remontów, usunięcia usterek itd.

W wyniku sprężenia na torze naciągowym uzyskuje się znaczne naprężenia ściskające w przekroju poprzecznym elementu na jego długości. Wartość odkształceń pionowych powstających w ścianie zbiornika w wyniku wprowadzenia sił naciągowych obwodowych, zależy od rozstawu cięgien sprężających, liczby zastosowanych splotów, kolejności ich naciągu i wartości wprowadzonej siły. W wyniku sumowania się tych dwóch rodzajów naprężeń może nastąpić zarysowanie płyty (rysa pozioma) na zewnętrznej lub wewnętrznej powierzchni w procesie sprężania albo w fazie eksploatacji. Rysy w kierunku podłużnym płyty mogą nastąpić podczas jej produkcji czyli w chwili przekazywania sprężania na element.

Dla projektanta zbiornika o ścianie wykonanej z takich elementów bardzo ważnym czynnikiem jest znajomość występujących odkształceń w celu prawidłowego rozmieszczenia zbrojenia poprzecznego, gwarantującego równomierny rozkład naprężeń i zapobiegający zarysowaniu elementu.

## 2 Cel, tezy i zakres pracy

### 2.1 Cel

Celem pracy było określenia na drodze doświadczalnej:

- mechanizmów przyczepności betonów wysokiej wytrzymałości do powszechnie stosowanych trzech rodzajów splotów,
- rzeczywistej wytrzymałości na przyczepność w zależności od poziomu naprężenia splotu,
- rozwoju długości transmisji siły naciągowej w okresie do 28 dni od chwili zwolnienia naciągu w prefabrykowanych płytach strunobetonowych.

Otrzymane wyniki porównano z wartościami określonymi według zależności normowych jak również zależności proponowanych przez innych autorów. Wnioski wyciągnięte z przeprowadzonych analiz stanowią podstawę do sformułowania wytycznych w zakresie projektowania płyt strunobetonowych stanowiących konstrukcje nośną ścian zbiorników sprężonych cięgnami obwodowymi. Przytaczane zależności do określania przyczepności na drodze analitycznej uzależnione są na ogół od wytrzymałości betonu na ściskanie, dotyczą betonów zwykłych i splotów 7φ4 mm.

### 2.2 Tezy pracy

1. Mechanizm przyczepności betonu wysokiej wytrzymałości do splotów sprężających zależy od rodzaju splotu i długości czynnej, przy założeniu dobrych warunków wykonania elementu strunobetonowego.
2. Wytrzymałość na przyczepność betonu wysokiej wytrzymałości do splotu sprężającego zależy od wytrzymałości betonu na ściskanie i poziomu naprężenia splotu.
3. Zastosowanie betonów wysokiej wytrzymałości do produkcji płyt strunobetonowych umożliwia bardziej efektywne projektowanie ścian zbiorników cylindrycznych z elementów prefabrykowanych sprężonych cięgnami bez przyczepności.

### 2.3 Zakres pracy

- Analiza studialna istniejących rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych zbiorników cylindrycznych o ścianie z elementów strunobetonowych sprężonych cięgami bez przyczepności.
- Badania doświadczalne mechanizmów przyczepności betonów wysokiej wytrzymałości do splotów 7φ4 mm, 7φ5 mm (okrągły) i 7φ5 mm (płaski) przy założeniu dobrych warunków wykonania (grubość elementu do 0,30 m).
- Badanie wpływu stopnia naciągu cięgna i długości przyczepności na rozwój naprężeń przyczepności betonu wysokiej wytrzymałości do splotu.
- Analiza obliczeniowa długości transmisji siły naciągowej w płytach strunobetonowych z uwzględnieniem norm DIN, ACI, Model Code 1990 i 2010 oraz EC-2 2008 w odniesieniu do wyników otrzymanych z badań doświadczalnych na obiekcie rzeczywistym w Jastrowiu (2012).
- Badania doświadczalne rozwoju parametrów wytrzymałościowych betonu zwykłego C 45/55 i betonu wysokiej wytrzymałości C 80/95 w okresie do 90 dni.
- Analiza obliczeniowa rozkładu odkształceń betonu w płytach strunobetonowych (elementach ściennych) dla wariantowego rozmieszczenia cięgien sprężających i otworów technologicznych.
- Doświadczalne określenie długości transmisji siły naciągowej w splotach 7φ5 mm (okrągłych) sprężających płytę o przekroju 1,0 x 0,1 x 4,0 m wykonaną z betonu wysokiej wytrzymałości oraz rozkładu odkształceń betonu w obu kierunkach płyty.
- Opracowanie wyników otrzymanych z badań doświadczalnych i analiz obliczeniowych oraz sformułowanie wytycznych do projektowania płyt strunobetonowych z betonu wysokiej wytrzymałości, przeznaczonych do realizacji ścian zbiorników cylindrycznych sprężonych cięgami bez przyczepności.

### 3 Mechanizm przyczepności betonu do stali zbrojeniowej

Nośność strunobetonowych elementów wykonanych z betonu zwykłego i betonu wysokiej wytrzymałości zależy w sposób decydujący od przyczepności betonu do stali zbrojeniowej. Przyczepność ta jest najistotniejszym założeniem w konstrukcjach z betonu zbrojonego i sprężonego. Opiera się na przekazywaniu sił między tymi dwoma materiałami. Ważnym elementem jest różnica w przemieszczeniu między stalą a otaczającym ją betonem. Dobra znajomość fenomenu przyczepności stwarza gwarancje właściwego zastosowania wiedzy w praktyce.

Na podstawie licznych badań opracowano wiele modeli z uwzględnieniem różnych czynników wpływu potwierdzających prawidłowość przedstawionych teorii w oparciu o przeprowadzone badania. Wśród nich jednak nie brakuje wzajemnie sprzecznych podejść. Na przestrzeni lat wielu naukowców zajmowało się problemem przyczepności betonu do zbrojenia w elementach żelbetonowych i z betonu sprężonego, a wyniki badań zostały przedstawione w różnych publikacjach. Podjęto wiele prób w celu wyjaśnienia zjawiska przyczepności, a przedstawione koncepcje niejednokrotnie nie pokrywały się ze sobą.

Duże zasługi na polu badania przyczepności położył między innymi *Rehm* [134 - 137]. W swojej pracy [134] opisał przyczepność jako zjawisko składające się z trzech mechanizmów a mianowicie przylegania, tarcia i przyczepności tnącej (opór ścięcia), które nie wykluczają się nawzajem, ale współistnieją jednocześnie lub występują po sobie ze względu na stan obciążenia i formę powierzchni prętów. Do tej koncepcji przychylił się również *Leonhardt* [94].

Zachowanie się przyczepności i jej mechanizmy w odniesieniu do stali zbrojeniowej i stalowych splotów sprężających różnią się jednak znacznie i zostaną oddzielnie omówione.

#### 3.1 Przyczepność betonu do stali zwykłej

##### 3.1.1 Przyczepność przylegania

Przyczepność przywierania (przylegania) można wytłumaczyć siłami adhezji kontaktujących się materiałów i siłami kapilarnymi twardniejącej zawiesiny cementowej. Adhezja wynika z deformacji warstwy cementu wokół pręta lub cięgna sprężającego i składa się z adhezji chemicznej i fizycznej. Ten efekt „sklejenia” zależy od chropowatości i czystości powierzchni stali, a założeniem podstawowym jest równość wydłużeń stali i betonu i dopuszcza naprężenia przyczepności od 0,5 do 1,0 N/mm<sup>2</sup>. W momencie pojawienia się małych przemieszczeń „sklejenie” zostaje zniszczone i przyczepność przylegania przechodzi w przyczepność ścinającą lub przyczepność tarcia. Klasyczna koncepcja przyczepności opisana przez *Östlund'a* [123] utożsamiała przywieranie z przyczepnością, a zniszczenie przylegania dwóch materiałów uznano za graniczną wytrzymałość przyczepności. Dla prętów uźebrowanych przyczepność przywierania ma znaczenia drugorzędne. W ogólności nie zaleca się uwzględniać tego rodzaju przyczepności w obliczeniach nośności ze względu na przyczepność.

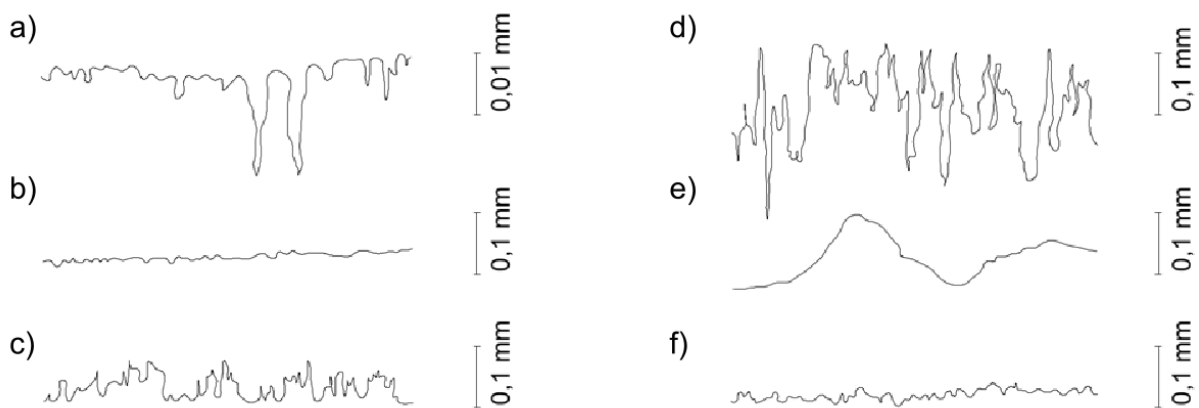


### 3.1.2 Przyczepność tarcia

Przyczepność tarcia uaktywnia się już przy małych przemieszczeniach. Tarcie definiuje się jako opór przeciwstawiający się równoległemu wzajemnemu przemieszczeniu dwóch powierzchni stykowych. Podstawowym założeniem jest wystąpienie sił tarcia przy przemieszczeniu względnym stali i betonu przy równoczesnym zaistnieniu naprężenia normalnego na powierzchni poślizgu. Na parcie poprzeczne składa się siła zewnętrzna, procesy skurczu betonu i ograniczenia wydłużeń poprzecznych.

Pozytywny wpływ na przyczepność tarcia wywiera powierzchniowa chropowatość i nierównomierności na powierzchni stali. Skorodowana lub dotknięta silnymi wżerami powierzchnia stalowych prętów stwarza dobre warunki do wzajemnego zakleszczania się, że nawet dochodzi do pewnego wykształcenia się przyczepności ścinania. Na rys. 3.1 przedstawione są niektóre możliwe formy powierzchni prętów z różnorodnym ukształtowaniem, które zostały wyodrębnione przez Rehma [134] podczas prowadzenia badań. Niedokładności geometryczne na powierzchni stali przy przemieszczeniu zwiększają ściskanie poprzeczne tak samo jak pojedyncze ziarna cementu, które zakleszczają się w powierzchni kontaktowej między stalą a betonem.

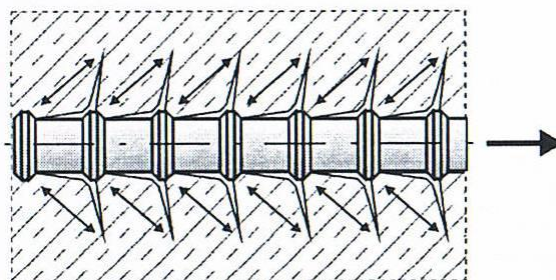
Przy większych przemieszczeniach tarcie przestaje być efektywne. Również w obliczeniach może zostać do pewnego stopnia uwzględnione, ale jedynie pod warunkiem, gdy rzeczywiście występuje wymagana siła poprzeczna lub jest przyłożona w sposób planowy.



Rys. 3.1 Różne powierzchnie stalowych prętów według Rehma [134]

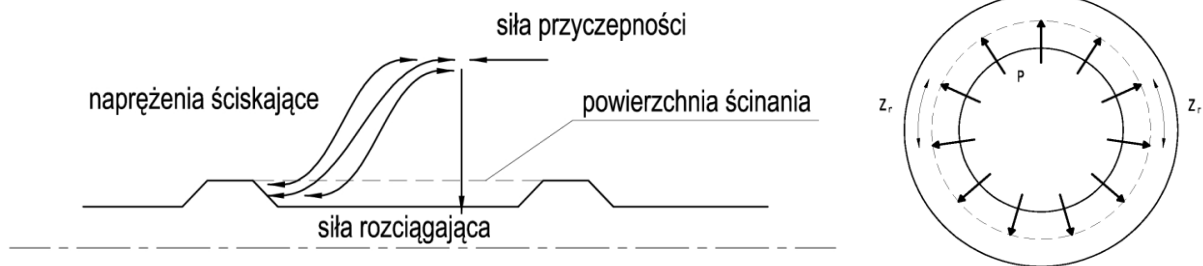
### 3.1.3 Przyczepność tnąca mechanicznego zakotwienia

Przyczepność ścinania jest najskuteczniejszą i niezawodną formą przyczepności, jest spowodowana obecnością żeber na powierzchni stali i przenosi 70 - 75% siły [35]. Mechanizm działania sprowadza się do mechanicznego zazębienia się stali zbrojeniowej i otaczającego betonu, który poglądowo można przedstawić za pomocą modelu kratownicy.

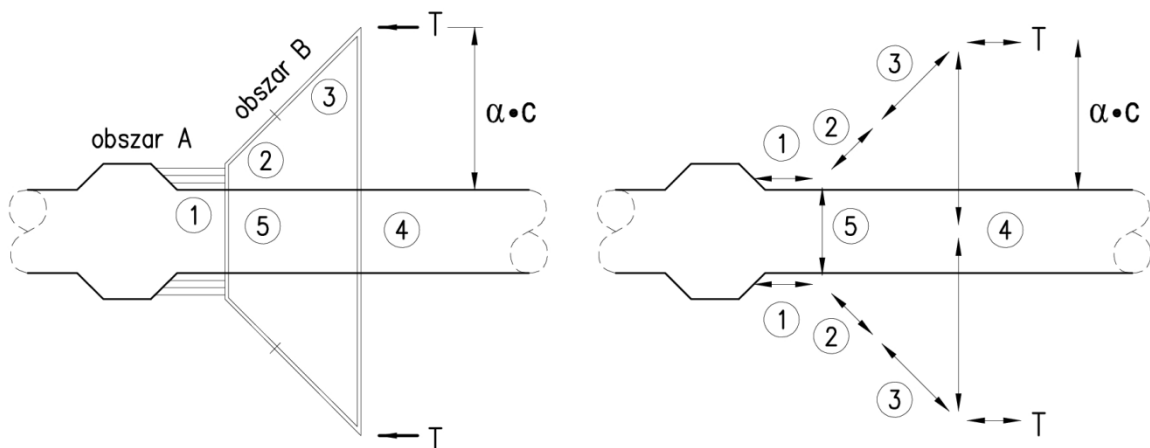


Rys. 3.2 Przenoszenie sił w przypadku przyczepności tnącej [114]

Na rys. 3.2 przedstawiony jest sposób przeniesienia sił. Dzięki wewnętrznemu powstawaniu rys tworzy się przez przemieszczenie względne między stalą a betonem system krzyżulców ściskanych, opierających się na żebrach. Decydującym czynnikiem efektywności tego rodzaju przyczepności jest zdolność ścinania i odkształceń w pobliżu powierzchni betonu a w szczególności w obszarze żeber. Dopiero kiedy wytrzymałość ścinająca wsporników betonowych między żebrami zostanie wyczerpana, następuje poślizg prętów zbrojenia o wysokim oporze tarcia. Forma zniszczenia przez ścięcie wspornika betonowego została opisana w [134] i przedstawiona na rys. 3.3.



Rys. 3.3 Model zniszczenia wspornika betonowego wg Rehma (po lewej) i równowaga w pierścieniu wg Tefersa (po prawej)



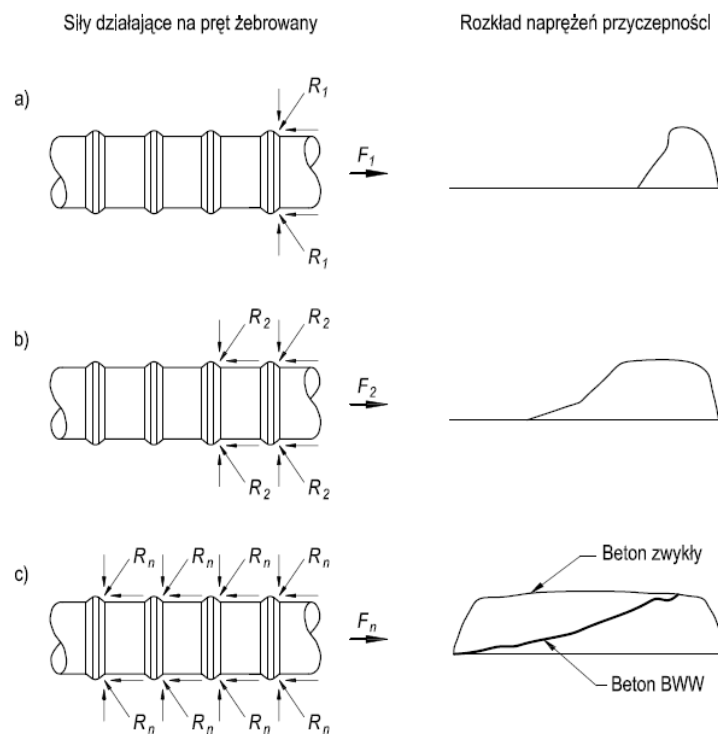
Rys. 3.4 Model prętowy za żebrem stalowego pręta zbrojeniowego (po lewej - Fehling [49]) i model kratownicowy (po prawej - Kurz [85])

Mechanizm przyczepności został opisany pierwszy raz przez *Rehma*, a *Tepfers* [157] uzupełnił go o powstanie pierścienia rozciągającego jako rezultat rozprzestrzeniania się naprężeń przyczepności na otaczający żebro beton (rys. 3.12). W celu utrzymania równowagi w stosunku do radialnych, skierowanych do pręta głównych naprężeń ściskających wymagane jest przejęcie w kierunku obwodowym naprężeń rozciągających w formie pierścienia (rys. 3.3). W przypadku osiągnięcia w pierścieniu naprężeń przekraczających wytrzymałość betonu na rozciąganie, dochodzi do powstania i rozwoju zarysowania, co skutkuje uszkodzeniem przyczepności a nawet jej zniszczeniem. W szczególności realistyczne modelowanie przyczepności musi uwzględniać przeniesienie naprężeń rozciągających, które są najistotniejszym elementem pierścienia rozciągającego. *Van den Veen* [161], *Reinhardt* [138], i *den Uijl* [43] przyczynili się do koncepcji opisującej model pierścienia jako składający się z dwóch części, przy czym wewnętrzna jego część dotknięta jest przez zarysowanie, co jednak nie przenosi się na zewnętrzną powłokę pierścienia. Podstawowym założeniem jest równomierność wydłużenia poszczególnych włókien pierścienia, co nie prowadzi do powstania zginania i stwarza możliwość wyznaczenia naprężeń w niezarysowanej części pierścienia. W zarysowanej części przyjmuje

się liniowo zmieniającą się szerokość otwarcia rysy, a założenie to pozwala określić rozkład naprężeń rozciągających w zarysowanym obszarze pierścienia.

*Noghabai* [118] jako pierwszy odszedł od koncepcji linearnego rozwoju zarysowania. Zależność otwarcia rysy od naprężenia rozciągającego betonu wykazuje wyraźny nieliniowy przebieg i wskazuje na konieczność opracowania nowego modelu.

W celu opisanego stanu naprężenia w obszarze żebra pręta zbrojeniowego, *Fehling* [49] zaproponował model prętowy, przedstawiony dla uproszczenia w płaszczyźnie (rys. 3.4, po lewej), funkcjonujący jednak jako przestrzenny i symetrycznie rotacyjny model, przy czym pręty przebiegają zgodnie z trajektoriami głównych naprężeń. Wprowadzając zależności materiałowe betonu i stali możliwe jest wyznaczenie naprężeń i odkształceń w obrębie pojedynczego żebra. Bazując na tym rozwiązaniu, *Kurz* [85] przedstawił model kratownicy (rys. 3.4, po prawej), ze względu na konieczność stanu równowagi w każdym węźle również bez obciążenia momentem zginającym. Odpowiada to rzeczywistej koncepcji nośności, ze względu na brak obciążenia momentem zginającym wzdłuż trajektorii głównych naprężeń.

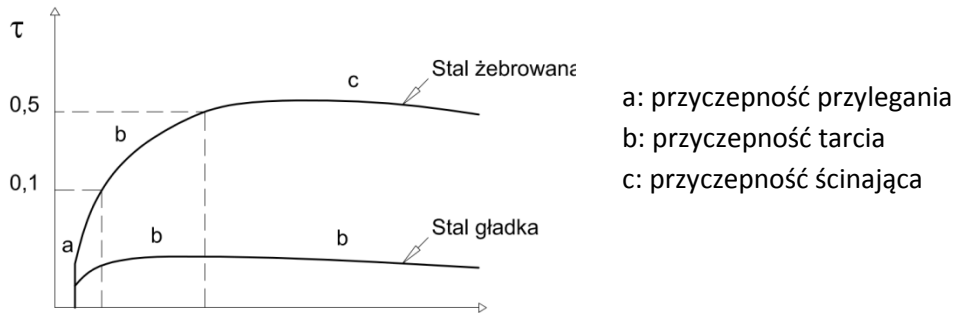


Rys. 3.5 Idealizacja zachowania żebrowanego pręta w bloku betonowym [7].

W ostatnich latach model ten został uzupełniony o badania *Azizinaminiego* i jego współpracowników [7]. Ze względu na przeprowadzone badania na BWW, przyjęto dla nich inny rozkład naprężeń przyczepności wzdłuż osi pręta. O ile w przypadku betonów normalnych równomierny rozkład naprężeń przyczepności nie budzi zastrzeżeń, to jednak w przypadku BWW należy przyjąć inną hipotezę. Przede wszystkim istotna różnica polega na tym, że w BWW największy opór stawia pierwsze żebro pręta zbrojeniowego, a na następne żebra przypada coraz mniejsza siła. Model działania przyczepności zaproponowano jako łańcuch oporów ścięcia poszczególnych żeber poczynając od pierwszego aż do momentu przeniesienia reszty siły przez ostatnie żebro partycypujące jeszcze w transferze sił (rys. 3.5).

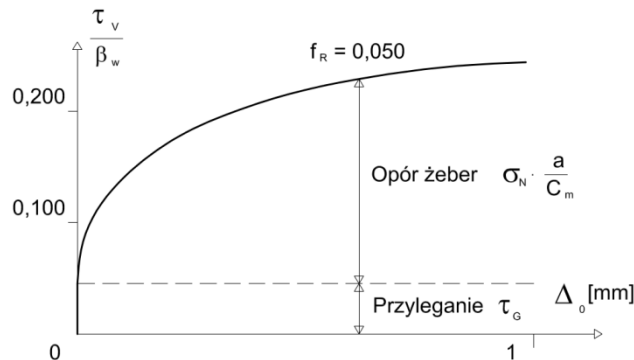
### 3.1.4 Udział poszczególnych rodzajów przyczepności w transferze sił

Wyjaśniając działanie przyczepności dla stali gładkiej jak i uźebrowanej można powołać się na wszystkie trzy rodzaje omówione powyżej mechanizmów, jakkolwiek ich zakres jest różny. W pracy [158] został zobrazowany udział poszczególnych rodzajów przyczepności dla stali gładkich jak i uźebrowanych (rys.3.6).



Rys. 3.6 Udział poszczególnych rodzajów przyczepności (zależność ścinanie poślizg-przemieszczenie na podstawie badań pull-out) [158]

W celu fizykalnego ujęcia przyczepności przylegania i tarcia dla stali gładkiej zostały zaproponowane różne wzory ze względu na przyjęte różne mechanizmy przyczepności stojące u ich podstaw. I tak *Würzner* [165] oparł swoje równanie na siłach kapilarnych, *Nacken* [110] i *Rodt* [140] na siłach adhezji, *Pogany* [128] opisał mechanizm przez wrastanie w siebie nawzajem żeluz cementowego i powierzchni stali (efekt sklejenia). Opisane w ten sposób siły przyczepności przylegania tym się charakteryzują, że wykluczają wystąpienie jakichkolwiek przemieszczeń.



Rys. 3.7 Udział poszczególnych rodzajów przyczepności (zależność ścinanie poślizg-przemieszczenie na podstawie badań pull-out) [136]

W przeciwieństwie do tego w pracy [136] stwierdzono, że naprężenia przylegania są w znacznej mierze niezależne od przemieszczeń. Została zaproponowana inna zależność naprężeń przyczepności dla stali uźebrowanej składająca się ze stałej co do wartości siły przylegania oraz zależnych od przemieszczeń sił docisku żeber stali profilowanej (rys. 3.7).

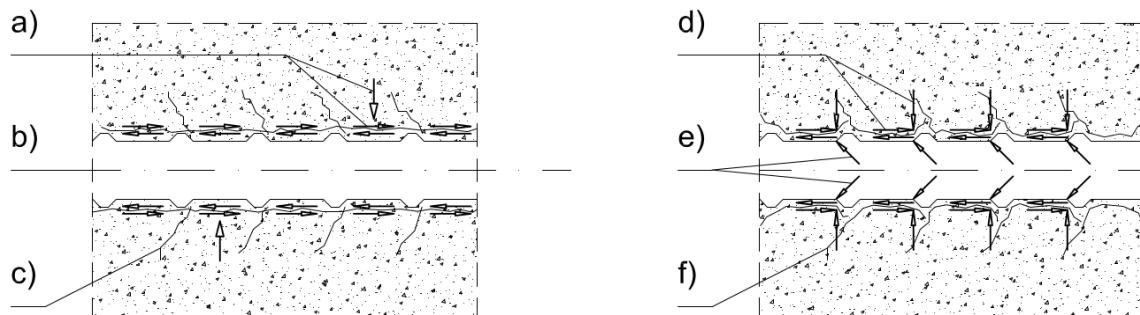
Dalsze badania *Rehma* nad stalą gładką zawarte w pracy [134] wskazywały na brak różnicy w oporze stali na początku przemieszczeń i w zaawansowanym stanie. Na tej podstawie oraz przy założeniu, że przyleganie nie utrzymuje się przy poślizgu 0,01 mm, *Rehm* doszedł do wniosku, że również przy niewielkiej chropowatości, np. w przypadku ciągnionych prętów, nie przyleganie lecz zazębienie się

(mechaniczne zakotwienie) decyduje o przyczepności. Ten opór tarcia bazujący na zakleszczaniu się nierówności i chropowatości powierzchni stali z zaprawą nazwał oporem poślizgu. Stwierdził również, że nawet przy zmniejszeniu wżeru na  $t < 0,003 \text{ mm}$ , opór poślizgu nie zmniejsza się dalej, ale pozostaje na stałej wartości  $0,04 \cdot f_c$ .

O ile mechanizm przyczepności stali uźebrowanej można przyjąć jako wyjaśniony dzięki przyjęciu modelu krzyżulców, mechanizm przyczepności stali gładkiej dalej nie jest jeszcze jednoznaczny, a w szczególności dla cięgien sprężających można przedstawić więcej modeli wyjaśniających mechanizm działania.

### 3.1.5 Mechanizmy zniszczenia przyczepności betonu do stali zbrojeniowej

Mechanizm zniszczenia przyczepności betonu do stali zbrojeniowej przy przekazywaniu siły opiera się na dwóch modelach. Pierwszy polega na wyciąganiu stalowego pręta i został opisany w 1996 przez *den Uijl i Bigaj* (rys. 3.8, po lewej). Drugim zajął się *Goto* i przedstawił go jako rozłupanie betonu w sferze przylegania (rys. 3.8, po prawej).



Wyciąganie pręta wg *den Uijl/Bigaj* (1996) [44]

- a) Siła działająca na beton
- b) Wyciągany pręt
- c) Powierzchnia poślizgu

Rozłupanie betonu wg *Goto* (1971) [54]

- d) Siła działająca na pręt
- e) Siła działająca na beton
- f) Mikrorysy wewnętrzne

Rys. 3.8 Mechanizm zniszczenia przyczepności stali zbrojeniowej

### 3.1.6 Czynniki wpływające na przyczepność betonu do stali zwykłej

Na przyczepność betonu do stali wpływają różne czynniki i nie jest możliwe uwzględnienie wszystkich parametrów w jednym modelu lub badaniu. Zestawienie czynników wpływu unaocznia złożoność tej problematyki.

- Wytrzymałość betonu na ściskanie

Wytrzymałość betonu na ściskanie jest najistotniejszym czynnikiem wpływu. Wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu na ściskanie polepsza się nośność krzyżulców ściskających w modelu kratownicy przyczepności ścinającej. Przy stali uźebrowanej wpływ ten wyraźnie jest większy niż przy stali gładkiej.

Większość prac znanych z literatury [99, 134] sugeruje proporcjonalną zależność między naprężeniami przyczepności a wytrzymałością betonu na ściskanie.

$$\tau_b \sim f_c \quad (3.1)$$

Noakowski/Martin przedstawili w pracy [117] proporcjonalną zależność naprężeń przyczepności przy przemieszczeniach 0,1 mm i wytrzymałością  $f_c$ , dla różnych średnic prętów o słabym uźebrowaniu ( $f_R \approx 0,020$ ). Martin [100] badał rozwój przyczepności w zależności od wieku betonu i stwierdził zwiększoną względną wytrzymałość przyczepności młodego betonu. Wyjaśnił to zjawisko szybszym rozwojem wytrzymałości na rozciąganie w stosunku do rozwoju wytrzymałości na ściskanie (przy zestawieniu względnych wartości).

Prace [98, 117] wskazują na paraboliczny wzrost naprężeń przyczepności w zależności od wytrzymałości na ściskanie. Proporcjonalność jest tutaj zależna od przemieszczeń o wartości  $\tau_{b,s}$  jako naprężeń przyczepności przy poślizgu s.

$$\tau_{b,s} \sim f_c^m \quad \text{gdzie } m < 1 \quad (3.2)$$

To zjawisko stało się punktem wyjścia w wielu normach np. DIN 1045-1, gdzie

$$\tau_{b,s} \sim f_c^{2/3} \quad (f_b \sim f_{ck}^{2/3}) \quad (3.3)$$

Wyniki badań zawarte w [4, 36, 168, 169] potwierdzają również wolniejszy wzrost wytrzymałości na przyczepność niż wzrost wytrzymałości betonu na ściskanie. Propozycje Alavi-Farda i Marzouka [4] zmierzają w kierunku przyjmowania naprężeń przyczepności w przypadku BWW jako wartości jeszcze niższych a mianowicie w postaci pierwiastka trzeciego stopnia z wytrzymałości betonu na ściskanie

$$\tau_{b,s} \sim f_c^{1/3} \quad (f_b \sim f_{ck}^{1/3}) \quad (3.4)$$

a w pracach [36,169,169] sugeruje się w przypadkach bez wzmocnień zbrojeniem poprzecznym wzór

$$\tau_{b,s} \sim f_c^{1/4} \quad (3.5)$$

natomiast ze wzmocnieniem dobrą korelację wykazuje wzór

$$\tau_{b,s} \sim f_c^{3/4} \quad (3.6)$$

- Skład betonu

Przy takiej samej wytrzymałości betonu na ściskanie obserwuje się jednak różne wytrzymałości na przyczepność przy różnych mieszankach betonu. Tym problemem zajmował się m.in. Martin, który w pracy [100] przedstawił wyniki swoich obszernych badań. Doświadczenia przeprowadzone nad wpływem konsystencji na przyczepność różniły się wynikami aż do 100%. Miarodajnymi wielkościami składu betonu są:

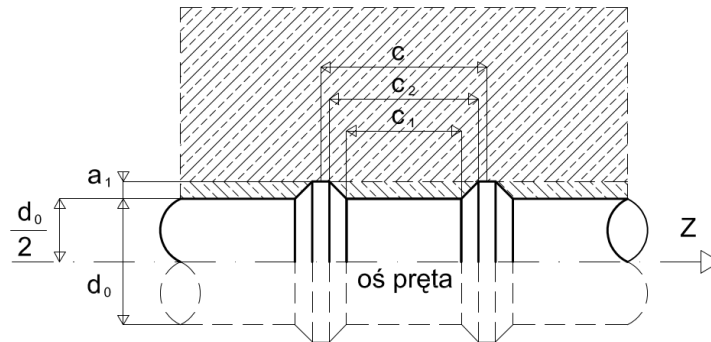
- o rodzaj kruszywa - wyższe wytrzymałości przyczepności osiągają betony o niewielkiej zawartości frakcji drobnoziarnistej (czyli gruboziarniste),
- o konsystencja - wyższe wytrzymałości przyczepności osiągają betony o gęstej konsystencji,
- o stosunek w/c
- o wybór dodatków – zastosowanie pyłów krzemionkowych wywołuje wtórne reakcje puzzolańskie, przez co zwiększa się przyczepność – zwarta matryca betonu prowadzi do zwiększenia przyczepność, następuje wzrost przywierania i polepszenie zazębiania się „żeber” betonowych. Ma to szczególne znaczenie w BWW.

Upatruje się, że przyczyną lepszej przyczepności betonu, w przypadku mieszanki betonowej o gęstej konsystencji i płaskiej krzywej przesiewu jest lepsze przyleganie betonu do stali w obszarze wsporników betonowych (między uźebrowaniem pręta) dzięki czemu uzyskujemy mniejszą sedymentację i wyższe wytrzymałości.

- Ukształtowanie powierzchni stali

Ukształtowanie powierzchni prętów stalowych ma szczególne znaczenie przy tworzeniu się krzyżulców ściskających w modelu kratownicy. Parametrami decydującymi są (rys. 3.9):

- geometria żeber a w szczególności ich wysokość  $a_1$ ,
- odstęp żeber  $c_1$  mierzony w świetle,
- kierunek żeber w stosunku do osi.



Rys. 3.9 Zasady obliczania sprowadzonej powierzchni żeber [53]

Problemem tym zajmował się między innymi *Rehm*, a wyniki swoich poszukiwań zawarł w pracy [134]. Wprowadził pojęcie sprowadzonej powierzchni żebra oznaczając je jako  $f_R$  i udokumentował, że korzystne jest operowanie tą wielkością. Obliczamy ją jako stosunek powierzchni żebra (rzutu na kierunek prostopadły do osi pręta) stali zbrojeniowej do powierzchni ścinania wspornika betonowego zawartego między żebrami.

$$f_R = \frac{\pi \cdot (d_a + a_1) \cdot a_1}{\pi \cdot (d_a + 2a_1) \cdot c_2} \approx \frac{a_1}{c_2} \quad (3.7)$$

Ograniczenie parametru  $f_R$  do wartości 0,15 gwarantuje dobre wykorzystanie „wspornika betonowego” [53], a co jest z tym związane, właściwe ukształtowanie powierzchni pręta stalowego. Już wcześniejsze badania *Rehma* wskazywały na liniowy związek między naprężeniami przyczepności przy poślizgu 0,1 mm  $\tau_{bs,0,1mm}$  odniesionymi do wytrzymałości betonu na ściskanie  $f_c$  i sprowadzoną powierzchnią żeber  $f_R$ :

$$\frac{\tau_{bs,0,1mm}}{f_c} = 0,045 + 1,5 \cdot f_R \quad (3.8)$$

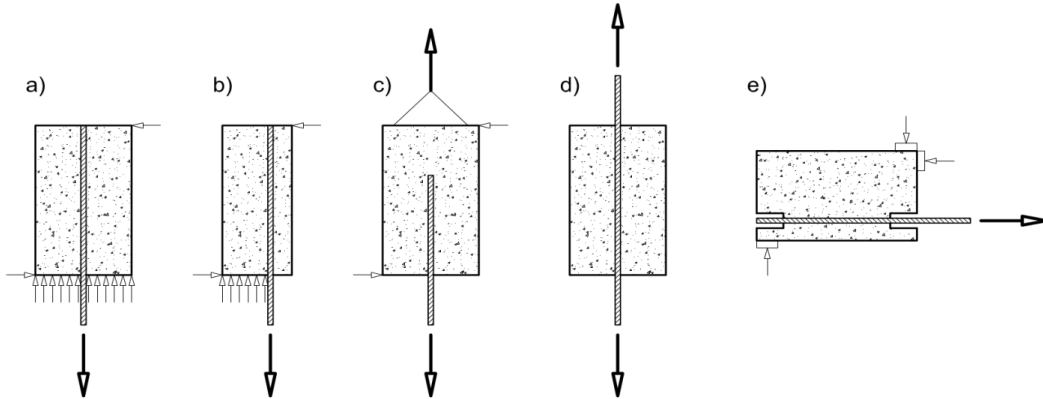
- Średnica prętów

Wpływ średnicy pręta  $d_s$  na przyczepność jest różnie oceniany w literaturze. W wielu pracach badawczych nie stwierdzono istotnego oddziaływania średnicy pręta na przyczepność [134, 158, 117]. Badania prowadzone między innymi przez *Mainza* [98], *Martina* [99], *Noakowskiego* [117] oraz *Rehma* potwierdzają tezę, że przy takiej samej sprowadzonej powierzchni żebra wpływ średnicy prętów na przyczepność ma znaczenie drugorzędne. Należy jednak zaznaczyć, że dla średnicy nominalnej prętów  $d < 12$  mm sprowadzona powierzchnia żeber  $f_R$  zmniejsza się, natomiast dla średnic większych niż 12 mm – pozostaje wartością stałą.

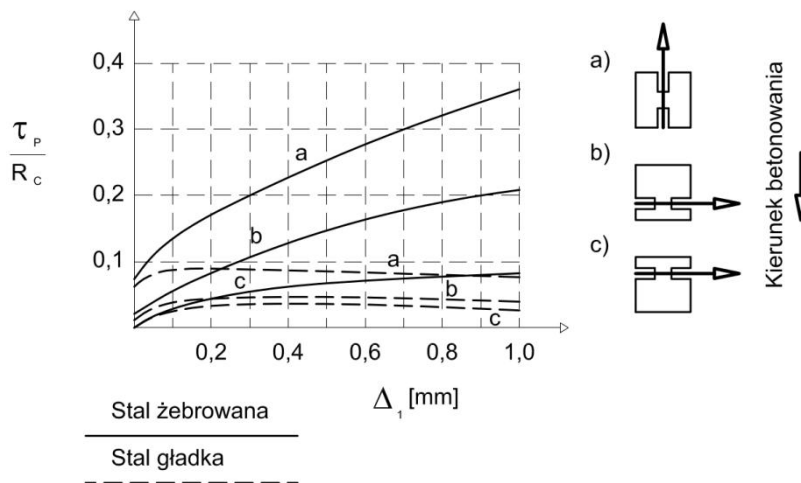
Należy również przytoczyć, że w wielu pracach eksperymentalnych nie został uwzględniony wpływ formy profilowania w analizach wyników. *Mainz* w [98] upatruje tym fakcie uzasadnienie sprzecznych wypowiedzi odnośnie wpływu średnicy pręta na przyczepność.

- Położenie prętów

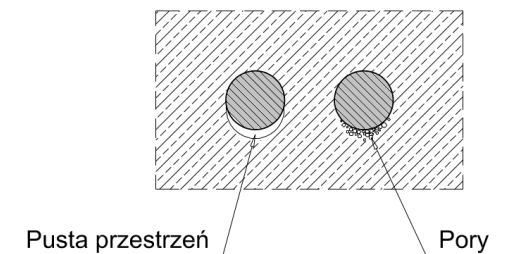
Na przestrzeni lat były prowadzone badania przyczepności na próbkach o różnych kształtach i wymiarach. Sposób przyłożenia obciążenia był również zróżnicowany (rys. 3.10). Została stwierdzona zależność wartości przyczepności nie tylko ze względu na usytuowanie prętów lecz również ze względu na kierunek betonowania (rys. 3.11)



Rys. 3.10 Stosowane w badaniach nad przyczepnością przykładowe próbki i ich obciążenia [53]



Rys. 3.11 Zależność przyczepności od położenia prętów i kierunku betonowania wg Rehma (1961) [134]



Rys. 3.12 Powstawanie pustych przestrzeni i porów pod leżącymi prętami w wyniku sedimentacji i zbierania się wody wg Rehma (1961) [134]

Ze względu na położenie prętów zbrojeniowych istnieją dobre i złe warunki przyczepności określone przez poszczególne normy [N6, N7, N8, N10]. Szczególnie w przypadku znajdującej się pod zbrojeniem stalowym grubej warstwy betonowej może dojść do powstawania przestrzeni niewypełnionych zaprawą betonową podczas osiadania betonu. Nierzadkie są również przypadki powstawania porów (rys. 3.12).



### 3.1.7 Naprężenia przyczepności betonu do stali zwykłej

Zachowanie się przyczepności jest reprezentowane z reguły przez naprężenia przyczepności  $\tau_b$ , przy czym różne jej postacie (przyczepności) nie są specjalnie rozgraniczane (np. na żebrach prętów i między nimi). Tak więc  $\tau_b$  określa idealne naprężenie przyczepności, który jest rozłożone liniowo o stałej wartości na powierzchni przylegania  $A_b$ :

$$\tau_b = \frac{\text{siła}}{\text{powierzchnia przyczepności}} = \frac{F}{A_b} \quad (3.9)$$

O ile określenie działającej siły nie sprawia problemów, obliczenie powierzchni przylegania jest znamionowane przez wiele czynników.

Zachowanie się przyczepności można określić przez zależność między lokalnym naprężeniem przyczepności  $\tau_b(x)$  i przynależnym przemieszczeniem (poślizgiem)  $s(x)$ . W ogólności uwzględniając wytrzymałość betonu na ściskanie można przedstawić **podstawowe prawo przyczepności** w postaci:

$$\tau_b = A \cdot f_c \cdot s(x)^n \quad (3.10)$$

gdzie:  $A, n$  - współczynniki  
 $f_c$  - wytrzymałość betonu na ściskanie

Tabela 3.1 Zestawienie wzorów zaproponowanych przez poszczególnych badaczy [27]

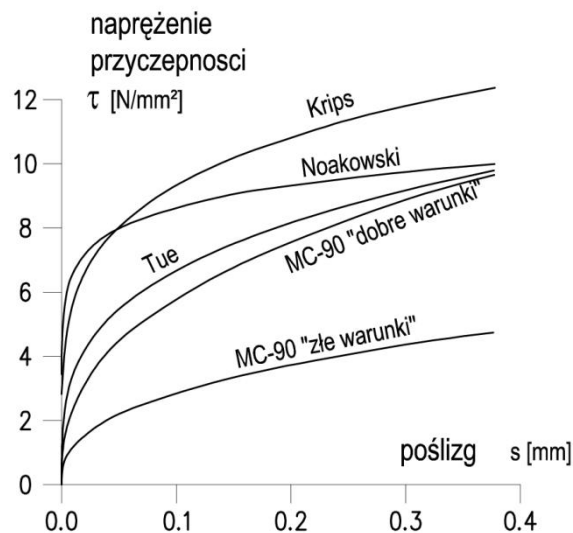
BETON NORMALNY	
Noakowski [115]	$\tau(x) = 0,36 \cdot f_{c,cube} \cdot s(x)^{0,22}$
Noakowski [116]	$\tau(x) = 0,95 \cdot f_{c,cube}^{0,66} \cdot s(x)^{0,12}$
Tue [159]	$\tau(x) = 0,29 \cdot f_{c,cube} \cdot s(x)^{0,3}$
Krips (dobre warunki) [82]	$\tau(x) = 0,60 \cdot f_{c,m} \cdot s(x)^{0,22}$
Krips (słabe warunki) [82]	$\tau(x) = 0,58 \cdot f_{c,m} \cdot s(x)^{0,3}$
Model Code 90 [N4]	$\tau(x) = 2,5 \cdot f_{cm}^{0,5} \cdot s(x)^{0,4}$
BWW	
Farra [72]	$\tau(x) = 0,4 \cdot (f_{ck,zyl} + 8)^{0,95} \cdot s(x)^{0,3}$
Huang [66]	$\tau(x) = 0,554 \cdot (f_{ck,zyl} + 8) \cdot s(x)^{0,3}$
Koenig [90]	$\tau(x) = 1,6 \cdot f_{c,cube} \cdot s(x)^{0,2}$
CEB No. 228 [N12]	$\tau(x) = 0,22 \cdot (f_{ck,zyl} + 8) \cdot s(x)^{0,21}$
BETON SAMOZAGĘSZCZALNY	
Schiessl [155]	$\tau(x) = 2,62 \cdot e^{(f_{ck,zyl} + 8)} \cdot (s(x)/0,5)^{0,27}$

Ogólne prawo przyczepności nie zawiera jednak różnych czynników wpływających na przyczepność (pkt. 3.1.6). Uwzględnienie tych czynników wpływu we wzorach jest zagadnieniem niezwykle trudnym, jak również podanie ogólnego wzoru opisującego zależności naprężenie przyczepności – poślizg, który zadowalałby wszystkie przypadki.

W kolejnych pracach badawczych zostały podane różne zależności naprężenia przyczepności w funkcji poślizgu na podstawie badań pull-out lub badań na rozciąganie dla stali zbrojeniowej, które opierają się na powyższym wzorze tj. ogólnym prawie przyczepności, a różnią się przyjęciem współczynnika  $A$ , wykładnikiem potęgi  $n$  oraz rodzajem zastosowanej wytrzymałości betonu.

W tabelicy 3.1 zestawiono niektóre z tych wzorów proponowane przez poszczególnych naukowców na drodze eksperymentalnej, a na rysunku 3.13 przebiegi zależności naprężenie przyczepności - poślizg wg poszczególnych źródeł.

Założeniem prawie wszystkich powyższych wzorów jest stała przyczepność na całej długości przyczepności, mimo że na podstawie badań została stwierdzona w obszarze zarysowania **strefa zakłóceń** tzw. **długość bez przyczepności**. Można ją wytłumaczyć istnieniem betonowych krzyżulców ściskających, które nie mogą się w całości podeprzeć na brzegu rysy. W literaturze można znaleźć różne propozycje odnośnie tej długości, zawierające się w przedziale od pojedynczej do czterokrotnej średnicy zbrojenia opisującej poziom zniszczenia (1d - 4d).



Rys. 3.13 Zależność naprężenie przyczepności - poślizg wg poszczególnych źródeł [85]

### 3.2 Przyczepność betonu do cięgien sprężających

W elementach strunobetonowych przeniesienie siły sprężającej następuje nie przez elementy kotwiące, ale przez przyczepność między betonem a stalą. Siła w elementach sprężonych osiąga swoją wartość projektowaną (zamierzoną) dopiero na końcu długości transmisji. Sprężenie elementów betonowych ma znaczący wpływ nie tylko na stan graniczny użyteczności (tworzenie się rys, odkształcenie, etc) ale również na stan graniczny nośności.

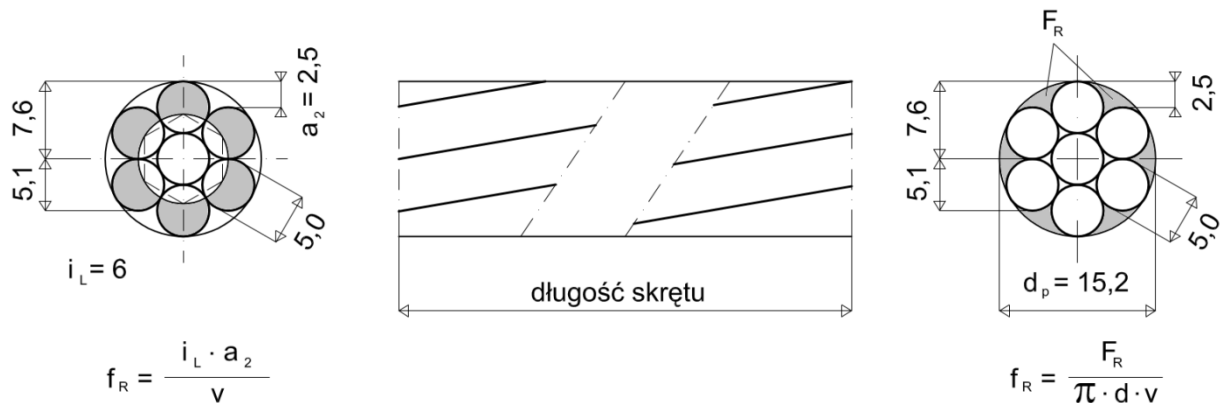
Zachowanie się przyczepności betonu do stali sprężającej określone jest również, jak w przypadku stali zwykłej, sumą przylegania, tarcia i mechanicznego zakotwienia. Podczas gdy o wytrzymałości ze względu na przyczepność uźebrowanej stali sprężającej decyduje składowa mechanicznego zakotwienia, dla splotów sprężających trzeba rozróżnić w mechanizmie przyczepności [27]

- zarysowany obszar rozciągany
- obszar wprowadzenia siły sprężającej

#### 3.2.1 Zarysowana strefa rozciągana

W zarysowanej strefie rozciąganej występuje zazębienie się splotów z betonem (ściananie, przyczepność tnąca). W celu ilościowego ujęcia mechanicznego zakotwienia wprowadzona została „sprawdzona powierzchnia żeber splotu” [158] analogicznie jak w stali uźebrowanej (rys. 3.14). Wystające części splotu można potraktować jak skręcone żebro podłużne, co można uwzględnić

w obliczeniach. W przeciwieństwie do tej propozycji, *Birkenmaier* [15] zakłada przyjęcie tylko 50 % tej wartości jako sprowadzonej powierzchni żeber splotu.



Rys. 3.14 Sprowadzona powierzchnia żeber splotu [158]

### 3.2.2 Strefa wprowadzenia siły sprężającej

*Nitsch* [114] i *den Uijl* [40, 41] w systematycznych badaniach stwierdzają, że ze względu na brakujące skrępowanie skręcenia splotu na swobodnym brzegu jak również ze względu na małą sztywność na skręcenia nie uaktywniają się w tej strefie mechanizmy mechanicznego zakotwienia. Splot dostosowuje się (podąża) do skręconego kanału w betonie. Mechanizm przyczepności w obszarze wprowadzenia siły można tylko sprowadzić przez działanie przylegania i tarcia.

W dalszym ciągu badania *Nitscha* [114] wykazały, że skrępowanie skręcenia – jak to ma miejsce w strefie rozciąganej przy zginaniu – ze względu na małą sztywność na skręcanie wiotkiego na ścinanie splotu dopiero przy przemieszczeniach większych niż 0,25 mm będzie miało wpływ na zachowanie się przyczepności.

Również w obszernej pracy *Stocker i Sozen* [154] sprowadzają mechanizm przyczepności cięgien w strefie transmisji jedynie do przylegania i tarcia. W porównaniu do stali gładkich większa przyczepność tarcia jest uzasadniona nieregularnością (geometria przekroju zmienia się na długości) występującą w geometrii przekroju splotu. Ponieważ przekrój po przesunięciu nie pasuje dokładnie w określone miejsce ("lack of fit"), pojawiają się naprężenia poprzeczne, które zwiększają tarcie.

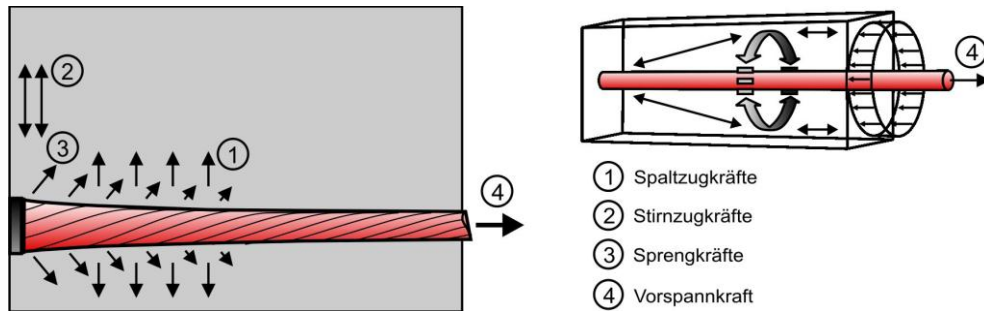
Według pracy [84] mechanizm tarcia wywołuje mikroskopijna chropowatość powierzchni stali oraz powstające podczas przemieszczeń cząsteczki cementu, które zakleszczają się w przestrzeni między stalą sprężającą i betonem. Proces ten uaktywnia znaczne siły tarcia przy jednoczesnym tylko niewielkim parciu poprzecznym. *Rehm* [136] zauważył również pozytywny wpływ naprężeń poprzecznych wywołanym skurczem betonu. Również w innych pracach został udokumentowany wyraźny wpływ ściskających obciążeń poprzecznych na przyczepność tarcia w gładkich prętach i splotach.

#### 3.2.2.1 Efekt Hoyera

Od dawna znany jest fakt, że docisk poprzeczny w wyniku poprzecznego wydłużenia stali w strefie wprowadzenia siły prowadzi do zwiększenia naprężeń przyczepności gładkich stali sprężających (efekt Hoyera) [67, 68].

Polega on na działaniu klinów sił, które powstają podczas wprowadzenia siły sprężającej w wyniku skrócenia splotów i powstania wydłużenia poprzecznego (rys. 3.15). Podczas tego zjawiska występują naprężenia rozciągające obwodowe a więc i grubość otuliny betonowej jest też decydująca na wprowadzenie sił sprężającej. Z tego względu normy regulują minimalną grubość otuliny, która jest

niezbędna, by zapobiec powstaniu rys na długości transmisji i zagwarantować kontrolowane wprowadzenie siły.



Rys. 3.15. Efekt Hoyera gładkiej stali sprężającej w wyniku wprowadzenia siły [142], po prawej zaznaczony pierścień rozciągany

Następstwa tych opisanych czynników wpływu na zachowanie się przyczepności splotów w BWW są prawie niezbadane. Wskazuje się, że w normalnych betonach efekt Hoyera ma tylko nieznaczny wpływ na zachowanie się przyczepności, ponieważ zaprawa cementowa poniżej drutów sprężających zawiera liczne pory jako następstwo procesu osiadania betonu. Zmniejsza się przez to moduł E w strefie przyczepności i zmniejsza się parcie poprzeczne. W BWW oczekuje się, że polepszenie strefy przyczepności dzięki pyłom krzemionkowym wywołuje wyraźny wzrost wytrzymałości ze względu na przyczepność. Zwiększone odkształcenia skurczu w młodym betonie wysokiej wytrzymałości (skurcz autogeniczny) dzięki kurczeniu się na stali sprężającej mogą dodatkowo zwiększać zależną od parcia poprzecznego przyczepność tarcia. Wpływ przedstawionych tu zależności na wytrzymałość ze względu na przyczepność w strefie wprowadzenia siły sprężającej i strefie zarysowania nie jest jeszcze dostatecznie wyjaśniony.

### 3.2.2.2 Składowe przyczepności

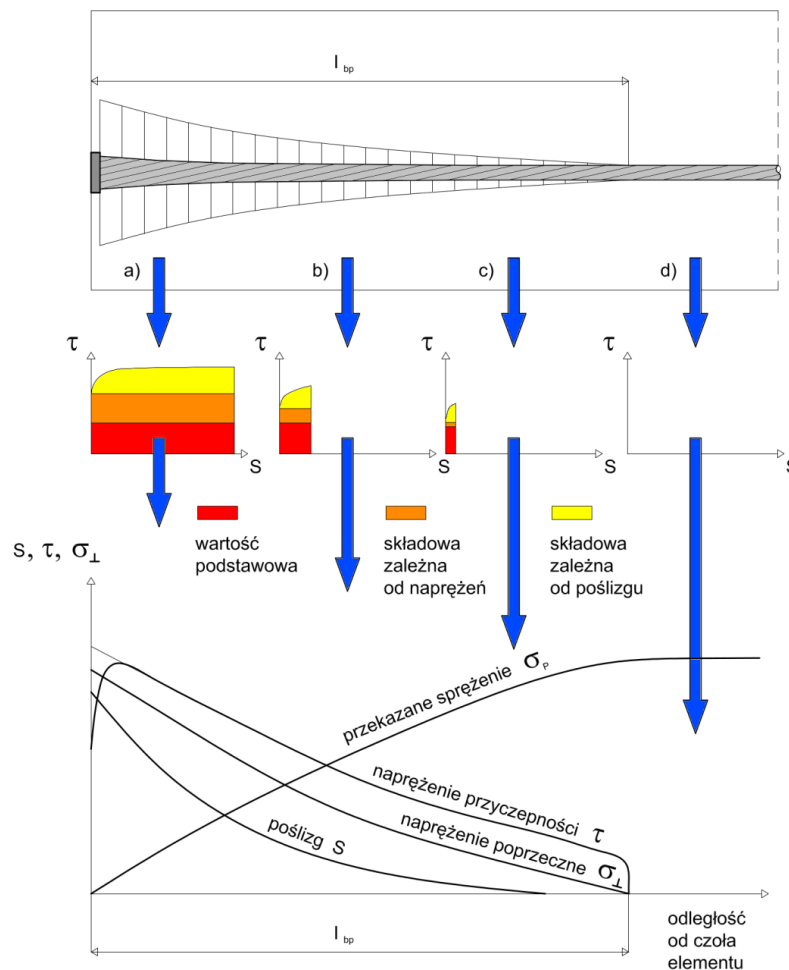
Dotychczasowe badania wykazują obecność 3 zasadniczych składników wytrzymałości ze względu na przyczepność [114]

- o wartość podstawową - zawiera adhezję i tarcie podstawowe wynikające z chropowatości powierzchni stali,
- o część zależną od naprężeń - wynika z efektu Hoyera tzn. dodatkowego tarcia w wyniku parcia poprzecznego między stalą sprężającą i betonem,
- o część zależną od poślizgu - ponieważ stal sprężająca nie może się swobodnie poruszać w kanale ze względu na lekkie nieregularności geometryczne splotów – powstają dodatkowe naprężenia przyczepności.

Na rys. 3.16 zostały wyodrębnione cztery obszary wprowadzenia siły:

- Obszar brzegowy (a)
  - Różnica naprężeń stali i betonu jest tutaj maksymalna
  - Występuje wysokie parcie poprzeczne splotu
  - Występuje maksymalne naprężenie przyczepności
  - W wyniku poślizgu końcowego 1 – 2 mm aktywuje się większa część wytrzymałości na przyczepność
- Obszar środkowy (b)
  - Część sprężenia ze stali została już przekazana na beton

- W celu osiągnięcia stanu równowagi sił przy przekazywaniu sił ze stali na beton występuje mniejsze parcie poprzeczne i mniejszy poślizg
- Składowa wytrzymałości na przyczepność zależna od naprężeń redukuje się
- Ze względu na zredukowany poślizg aktywuje się również mała część zależna od poślizgu
- Obszar końcowy (c)
  - Przekazywana jest tu już mała siła w porównaniu do obszaru początkowego
  - Parcie poprzeczne splotu jest minimalne i w związku z tym składowa przyczepności zależna od parcia poprzecznego ulega redukcji
  - Niewielki poślizg aktywuje tylko niewielką przyczepność
- Obszar poza długością transmisji (d)
  - Panuje równowaga sił bez dalszego przekazywania siły
  - Naprężenia przyczepności między stalą a betonem osiągają pewien poziom również bez parcia poprzecznego, ale do przekazywania siły jest potrzebny poślizg, który nie zaistnieje bez obciążenia zewnętrznego.



Rys. 3.16 Efekt Hoyer'a gładkiej stali sprężającej w wyniku wprowadzenia siły [27]

Widoczne jest od razu, że naprężenia przyczepności zmniejszają się wraz ze zwiększającą się odległością od brzegu płyty czy dźwigara. Już przekazana siła albo lepiej siła jeszcze do przekazania określa naprężenia przyczepności wzdłuż długości transmisji. Zarówno parcie poprzeczne jak również poślizg splotu można wytłumaczyć przez różnicę naprężeń stali i betonu. Tak długo jak te dwa czynniki nie będą w równowadze, stal ulega **odprężeniu**, tak że powstaje poślizg i naprężenie poprzeczne.

### 3.2.3 Czynniki wpływające na naprężenia przyczepności

Nitsch w [114] jako wynik prowadzonych badań określił czynniki wpływające na wartość sił przyczepności.

- Wpływ długości przyczepności

Analizując zależność siła wrywająca splot a poślizg dla betonu o tym samym składzie zaobserwował nieliniową zależność, którą tłumaczy stożkiem zniszczenia przy tulei. Zdaniem autora badań stosowanie w metodzie pull-out mniejszych długości zakotwienia wywołuje mniejsze siły przyczepności i mniejsze odkształcenia stali, co przekłada się na wiarygodność wyników i dalsze badania przeprowadza jedynie dla efektywnej długości przyczepności równiej 50 mm.

- Wpływ geometrii splotu

Przeprowadzone pomiary doświadczalne dla wszystkich zastosowanych mieszanek betonowych wykazały liniową zależność między obrotem splotu a poślizgiem, co potwierdza fakt wykręcanie splotu w metodzie pull-out. Dla pełnego kąta 360° odpowiada poślizg długości skoku splotu (190 mm). Z badań porównawczych w metodzie pull-out przeprowadzonych dla splotu i wiązki drutów gładkich wynika, że siła przyczepności w przypadku wiązki drutów jest w przybliżeniu stała na długości poślizgu. W przypadku splotów zaobserwowano wzrost siły przyczepności wynikający z efektu skrętnego ruchu przy jego wyciąganiu.

- Wpływ wieku betonu

Badania wykazały występowanie niewiele większych sił przyczepności po 14 dniach w porównaniu do sił po 24 godzinach. Stopień wzrostu tych sił jest wyraźnie mniejszy niż stopień wzrostu wytrzymałości betonu na ściskanie w tym czasie. Również w innych badanych BWW siły przyczepności są nadproporcjonalnie duże w betonie po 24 godzinach w porównaniu do 14 dni, w przeciwieństwie do zmierzonego wzrostu wytrzymałości betonu na ściskanie. W dalszych analizach wyniki przyczepności po 24 godzinach uznano jako reprezentatywne.

- Wpływ wytrzymałości betonu i dodatków krzemionki

W mieszankach betonowych bez udziału krzemionki, wytrzymałość betonu na ściskanie ma mniejszy wpływ na wytrzymałość przyczepności w szczególności przy małych poślizgach (do 1 mm). W przeciwieństwie do tego udział krzemionki powoduje większy niż proporcjonalny wzrost siły przyczepności w stosunku do wytrzymałości betonu na ściskanie przy małych poślizgach. Udział krzemionki w ilości do 10% spowodował znaczący przyrost przyczepności betonu, natomiast zastosowanie ilości krzemionki rzędu 14,4 % (do wagi cementu) nie skutkowało dalszym wzrostem sił przyczepności.

- Wpływ wydłużenia poprzecznego

W ogólności można stwierdzić dla wszystkich badanych betonów wyraźną zależność między wartością sił przyczepności a zmianami naprężeń w splotach. Naprężenie podłużne w splotach nie wpływa bezpośrednio na przyczepność, co wskazuje na podwyższenie lub obniżenie sił przyczepności w wyniku wydłużenia poprzecznego splotów przez zmianę naprężeń w stali sprężającej.

- Wpływ skrępowania obrotu splotu

Skrępowanie obrotu splotu (próbki) powoduje wzrost siły przyczepności wraz ze wzrostem poślizgu.

- Wpływ otuliny

Dla przyjętych w badaniach grubości otuliny betonowej w przypadku braku zmiany naprężeń w splotach nie stwierdzono wyraźnego wpływu otuliny betonowej na przyczepność. Przy zmianie

naprężeń w splotach stwierdzono mniejsze siły przyczepności przy otulinie betonowej  $c = 2,0 \phi$ . W tych próbkach dochodziło niezależnie od betonu do tworzenia się rysy rozłupującej o szerokości równej 0,2 mm. Z tego można wnioskować o wzroście siły rozłupującej w kierunku radialnym przy większych siłach przyczepności w wyniku redukcji naprężeń.

Próbki o większej otulinie betonowej nie wykazały widocznych rys rozłupujących. Jednocześnie próbki o otulinie  $c = 3,0 \phi$  wykazały wyraźnie większe siły przyczepności we wszystkich badaniach niż przy otulinie  $c = 5,5 \phi$ . To wskazuje na to, że dolne położenie prowadzi do większych sił przyczepności dzięki mniejszym zjawiskom osiadania świeżego betonu.

Otulina  $c = 3,0 \phi$  jest wystarczająca do przejęcia sił rozłupujących. W przeciwieństwie do splotów, w uźebrowanych prętach mimo otuliny  $c = 5,75 \phi$  dochodziło do gwałtownego zniszczenia wskutek rys rozłupujących. BWW mogą według tego przejąć porównywalnie większe siły przyczepności i siły rozłupujące.

### 3.2.4 Sploty

Wprowadzenie splotów jako zbrojenia konstrukcji sprężonych wyłoniło szereg problemów konstrukcyjnych, które dotyczyły nie tylko obliczeń statycznych i wymiarowania, ale samych splotów jako takich. Wprowadzone zostały pierwszy raz w Stanach Zjednoczonych około roku 1955 w produkcji elementów mostowych, skąd szybko zostały przejęte w Anglii, a następnie rozprzestrzeniły się na całym kontynencie. Liczne prace badawcze wspomagały szybki rozwój technologii. W Polsce zastosowano pierwszy raz sploty w roku 1962 wprowadzając płyty strunobetonowe 12 x 2,40 m typu "Ostrów" oraz w palach dla budownictwa morskiego jako umocnienie nabrzeża portowego w Szczecinie.

#### 3.2.4.1 Wymagania konstrukcyjne

Podstawowe właściwości cięgien jakie muszą zostać spełnione różnią się od wymagań stawianych im w innych dziedzinach (np. urządzeniach mechanicznych), a należą do nich oprócz wysokiej wytrzymałości wg [87]:

- (1) równoczesne zerwanie się wszystkich drutów w ciągnięciu,
- (2) zdolność do przenoszenia dużych sił poprzecznych przy zagięciach w zakotwieniach i zaciskach bez obniżenia wytrzymałości cięgna,
- (3) duża giętkość czyli zdolność zaginania na małym promieniu - właściwość ważna przy transporcie i produkcji,
- (4) krótka długość zakotwienia w betonie,
- (5) zapewnienie trwałości kształtu wyrażające się w nierozkręcalności podczas transportu a przede wszystkim w czasie naciągu.

Przy tak postawionych wymaganiach konstrukcyjnych, gdzie warunki (1) i (3) są przeciwstawne, istnieje potrzeba poszukiwania rozwiązań optymalnej formy splotu. Zapewnienie możliwości przenoszenia dużych sił poprzecznych sugeruje stosowanie splotów o równoległych drutach, w których styk przebiega liniowo na całej długości. Są to tzw. sploty współzвите w przeciwieństwie do splotów przeciwwzitych charakteryzujących się różnym kierunkiem zwicia poszczególnych warstw, w których obserwuje się działanie karbu osłabiające nośność uniemożliwiające stosowanie ich w przypadku kotwienia w zaciskach mechanicznych. Z kolei warunek giętkości splotu wpływa na ograniczenie średnicy drutów wchodzących w skład cięgna sprężającego do 5 - 7 mm, a rozwiązania zwiększające wytrzymałość należy szukać w przyjęciu większej liczby poszczególnych drutów składających się na cięgno jak np. stosowanie splotu splotów czy konstrukcje specjalne typu Seale, Warringtona i innych.

### 3.2.4.2 Problematyka badawcza

Stosowanie splotów w konstrukcjach budowlanych ujawniło już w fazie produkcyjnej na torze naciągowym pewne niepokojące zjawiska, którym projektant musiał stawić czoła. Zaobserwowano poślizg rdzenia splotu i jego zrywanie się w czasie naciągu. Z drugiej strony starano się sprostać kryterium nierozkręcalności stosując deformację mechaniczną po zwinięciu tzw. preformację oraz dodatkową obróbkę termiczną czyli odpuszczenie lub stabilizację, która istotnie wpływa na właściwości mechaniczne cięgna, a efekt końcowy uzależniony jest od stosowanej technologii.

Pojawiła się potrzeba badań, które zapobiegałyby niepożądanym zjawiskom w procesach produkcyjnych i które dokładniej określałyby czy charakteryzowałyby zastosowany splot. Do takich czynników należy m. in.

- średnica stosowanych drutów
- kąt i sposób zwicia
- stosowanie rdzenia

Optymalizacja formy splotu z pełnym wykorzystywaniem/wykorzystaniem cech/właściwości mechanicznych i wytrzymałościowych wymaga rozpatrzenia wielu zagadnień konstrukcyjnych. Analiza geometrii splotu i odpowiadający jej stan naprężenia jest problemem bardzo złożonym. Nie mniej rozważenia wymaga kwestia zakotwienia w betonie splotu rozumianego jako całość, jak również zakotwienie rdzenia w oplocie drutów czy nawet zakotwienie oplotu wewnętrznego w zewnętrznym w przypadku większej ilości warstw oplotu.

Poprawnie przeprowadzone badania doświadczalne powinny zweryfikować założenia przyjęte podczas analizy teoretycznej i zastosowany tok myślenia. Również pomiary podczas wznoszenia konstrukcji i jej eksploatacji powinny potwierdzić trafność naukowych wywodów.

### 3.2.4.3 Geometria splotu

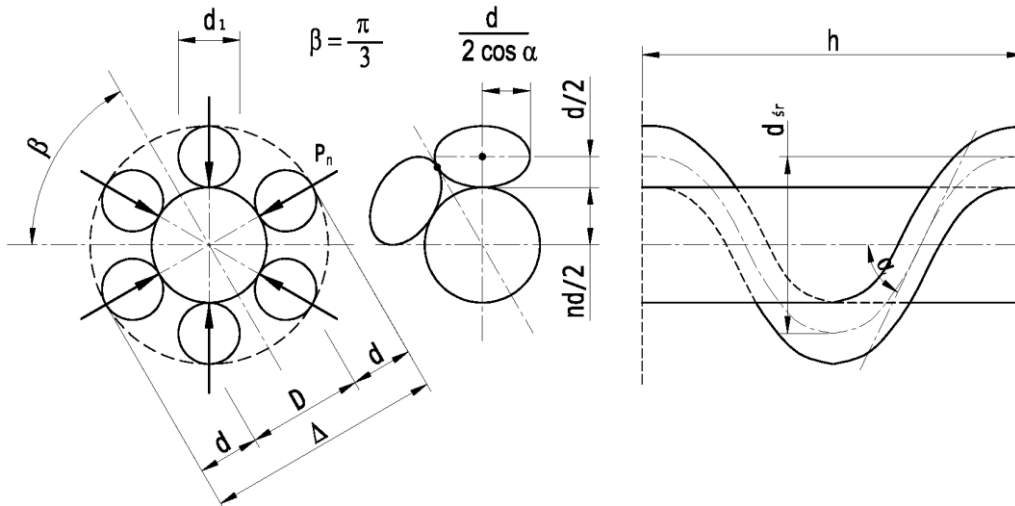
Podstawowym warunkiem geometrycznym prawidłowego funkcjonowania splotu z rdzeniem jest styczność sąsiadujących drutów oplotu ze sobą i z rdzeniem w każdym przekroju, tzn. konstrukcja otwarta. W przeciwnym przypadku tj. konstrukcji zamkniętej, gdy rdzeń nie dolega do drutów okalających, tworzy się tuleja pozwalająca na swobodne przesuwanie się rdzenia uniemożliwiając współpracę w przenoszeniu sił. Przyjmując oznaczenia wg rys. 3.17 w pracy [86] został wyprowadzony wzór na warunek styku drutów oplotu z rdzeniem, który jest założeniem prawidłowo ukształtowanego splotu:

$$n > \sqrt{\frac{3+(\cos\alpha)^2}{(\cos\alpha)}} - 1 \quad (3.11)$$

gdzie:  $\alpha$  - kąt zwicia  
h = skok zwicia  
n = D/d

Przy wzrastającym kącie zwicia  $\alpha$  zmniejsza się skok spirali, a średnicę rdzenia należy również zwiększać w celu uniknięcia wadliwej konstrukcji splotu, gdzie rdzeń ma swobodę ruchu w płaszczyźnie drutów oplotu. Najbardziej korzystne dla cięgien konstrukcji sprężonych są kąty zwicia w zakresie  $6^\circ < \alpha < 12^\circ$  co odpowiada skokom  $h = (10 \div 20) \Delta$  (rys. 3.14).





Rys. 3.17 Oznaczenia i schemat splotu [86]

### 3.2.4.4 Rozkład sił w splocie

Przyjmując założenie, że wszystkie poszczególne druty splotu jednakowo partycypują w przenoszeniu siły sprężającej można napisać [87]:

$$\text{dla jednej warstwy oplotu:} \quad N = N_r + k \cdot N_z \quad (3.12)$$

$$\text{ogólnie:} \quad N = N_r + k_1 \cdot N_{z1} + \dots + k_n \cdot N_{zn} \quad (3.13)$$

gdzie :

- $N_r$  - siła w rdzeniu
- $k$  - liczba drutów oplotu
- $N_z$  - siła w pojedynczym drucie

$$\text{dla splotów 7-drutowych:} \quad N = N_r + 6 \cdot N_z \quad (3.14)$$

$$\text{i składowe wynoszą:} \quad N_{z,n} = N_z \cdot \cos\alpha \quad (3.15)$$

$$N_{z,s} = N_z \cdot \sin\alpha \quad (3.16)$$

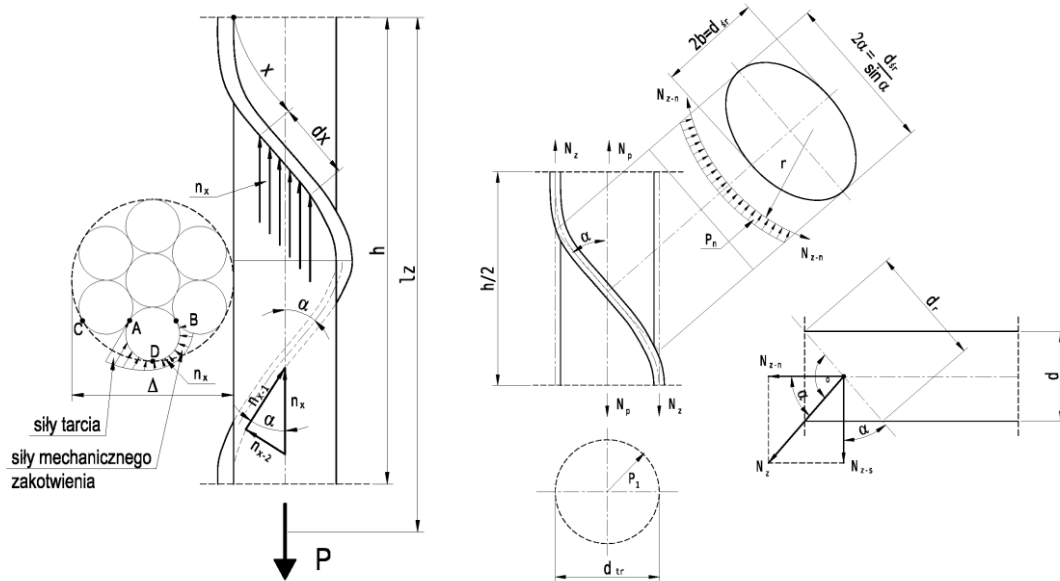
Składowa  $N_{z,n}$  odpowiedzialna jest za rozciąganie i docisk drutu do rdzenia, a składowa  $N_{z,s}$  powoduje skręcanie i zginanie drutu.

W pracy [87] został poddany analizie stosunek pola przekroju rdzenia do pola przekroju drutów oplotu  $f_r/f_z$  jak również stosunek sił w rdzeniu i drutach oplotu  $N_r/N_z$  dla ustalonego  $n = 1,1$  (rys. 3.17). Analiza wykazuje, że wraz ze wzrostem kąta zwicia zmniejsza się udział rdzenia w przekroju splotu tzn. zmniejsza się stosunek pola przekroju rdzenia do pola powierzchni przekroju drutu zewnętrznego w płaszczyźnie prostopadłej do osi podłużnej splotu, a jednocześnie wzrasta w nim siła w stosunku do siły przenoszonej przez druty oplotu w kierunku osi podłużnej splotu, co zostało zaobserwowane podczas produkcji w przypadkach nagłego zerwania rdzenia podczas naciągu.

Analizując złożony stan naprężenia w splocie Kuś [86] przyjął założenia upraszczające:

- teorię sprężystości mimo stwierdzonych podczas badań odkształceń plastycznych
- liniowe wzajemne oddziaływanie drutów w stykach, które w rzeczywistości są dociskami lokalnymi o nieokreślonej strefie uplastycznienia
- wyjściowy stan bez naprężeń, chociaż technologia preformacji i uspokojenia przez obróbkę likwiduje tylko częściowo naprężenia powstałe przy splataniu

oraz przedstawił wzory pozwalające obliczyć naprężenia rozciągające, ściskające i styczne zarówno dla rdzenia jak i drutów oplotu definiując odpowiednie dopuszczalne siły. Komplet wzorów określających naprężenia i wzajemne relacje znajduje się w pracy [87].



Rys. 3.18 Oznaczenie sił działających na splot w czasie kotwienia (po lewej) [88] i rozkład siły podłużnej w splotcie (po prawej) [86]

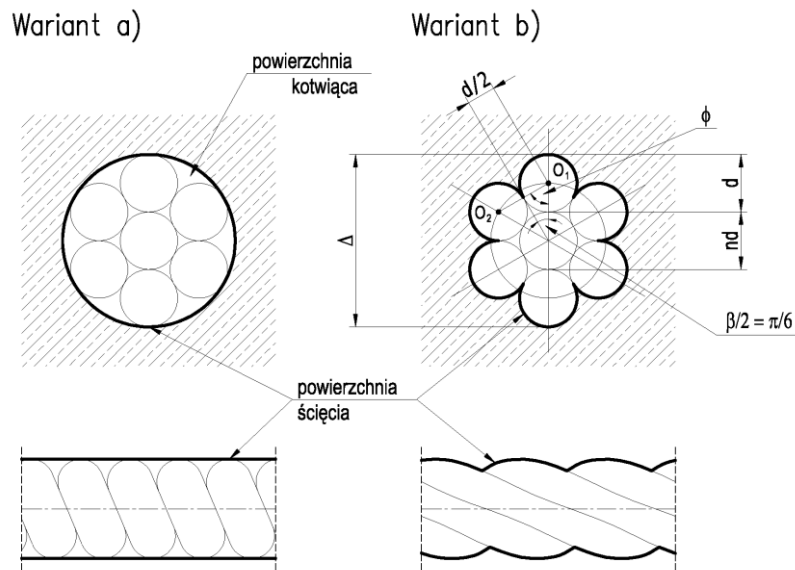
Rdzeń utrzymywany jest w splotcie dzięki siłom docisku występującym między nim a drutami oplotu. Tak jak cały splot jako całość jest zakotwiony w otaczającym betonie, tak również rdzeń dzięki siłom tarcia występującym na styku drutów utrzymywany jest w odpowiednim położeniu. Długość zakotwienia rdzenia w oplotcie drutów zewnętrznych jest znacznie krótsza niż splotu w betonie. Można ją określić wzorem zakładając stałą wartość  $p_n$  oddziaływania drutu zewnętrznego na rdzeń oraz przyjmując stały współczynnik tarcia drutów oplotu do rdzenia  $f_3$ .

W prowadzonych badaniach [86] dla splotów 7 $\phi$ 5 mm wyznaczono graniczne długości zakotwienia splotów dla różnych betonów jak również odpowiadające im zakotwienia rdzenia. Dla kątów zwicia  $\alpha > 5^\circ$  długość zakotwienia rdzenia jest zawsze mniejsza niż długość zakotwienia splotu w betonie. Rdzeń tym samym nie osłabia nośności splotu jako całości.

Wzrost kąta zwicia zmniejsza skok spirali i poprawia docisk oplotu do rdzenia, natomiast naciąg powoduje prostowanie się drutów okalających i zwiększenie skoku, co w konsekwencji prowadzi do zginania i skręcania drutów płaszczka. Analiza przyrostów odkształceń podłużnych i kątów obrotu pozwala wyznaczyć wartości momentów zginających i skręcających [87]. Na rysunku 3.18 zobrazowano rozkład sił działających w splotcie.

### 3.2.4.5 Mechanizm zniszczenia przyczepności / Kotwienie splotu w betonie - modele zniszczenia

Ze względu na konstrukcję splotu [86] możliwe są dwa modele zniszczenia przez zerwanie przyczepności (rys. 3.19). W pierwszym przypadku chodzi o wyrwanie splotu jako całości, a płaszczyzną poślizgu jest powierzchnia boczna walca o średnicy  $\Delta$ . W drugim przypadku następuje wykręcanie się drutów splotu z otaczającego betonu. Pytaniem, które się tu nasuwa, są warunki określające te dwa możliwe warianty zniszczenia. Na rys. 3.9 przedstawiony jest układ sił działający na pręt uwzględniający rozkład na siłę  $n_{x-1}$  oraz siłę  $n_{x-2}$ , przy czym siła  $n_{x-1}$  wywołuje wykręcanie się splotu z betonu w wyniku zniszczenia przyczepności betonu do drutów cięgna, natomiast siła  $n_{x-2}$  powoduje ścinanie betonu po odwodzie o średnicy  $\Delta$ . Badania doświadczalne wykazały, że dla kąta  $\alpha < 20^\circ$  o kotwieniu decyduje składowa  $n_{x-1}$ .



Rys. 3.19 Możliwe warianty zerwania przyczepności między betonem a stalą w splocie w wyniku poślizgu. Grubą linią zaznaczono powierzchnie ścięcia [88].

Analizując kotwienie splotu jako funkcję kąta zwicha i przy założeniu, że obu wariantom zniszczenia odpowiada ta sama wartość wytrzymałości betonu, można analitycznie wyprowadzić wzór dla granicznego kąta  $\alpha$ , powyżej którego zniszczenie nastąpi wg modelu pierwszego, czyli wrywania splotu jako całości [86]. Najmniejszym kątem granicznym, przy którym jest spełniona wyprowadzona nierówność, jest kąt  $\alpha = 34^\circ$ . Dodatkowym warunkiem jest wartość  $n$ , która wyniesie  $n > 1,3172$ . W innych przypadkach tj. dla wartości  $\alpha < 34^\circ$  i  $n < 1,3172$  przy założeniu przekroczenia dopuszczalnych/granicznych wartości naprężeń stycznych  $\tau$ , nastąpi wykręcanie się splotu po spirali. Ten analityczny wynik został wielokrotnie potwierdzony w badaniach doświadczalnych.

W Polsce produkowane są sploty spełniające warunek styczności drutów do rdzenia i względem siebie. Uwzględniając warunek wynikający z geometrii gwarantujący styczność drutów w splocie (3.11), gdzie kątem granicznym jest  $\alpha = 20,10^\circ$ , można powiedzieć, że w praktyce mamy do czynienia zawsze z wykręcaniem się splotu z otaczającego betonu.

### 3.3 Metodyka badań przyczepności betonu do prętów zbrojenia i cięgien sprężających

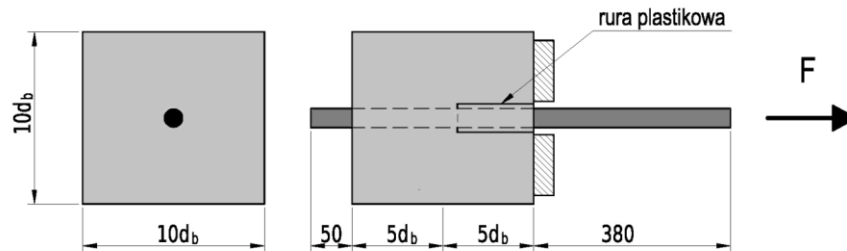
Badania przyczepności betonu do zbrojenia zwykłego i sprężającego oraz badania długości transmisji i zakotwienia są ze sobą powiązane i czasami trudno przeprowadzić linię rozgraniczającą, również ze względu na odnoszenie wyników z testów pull-out na analizę obydwu długości. Typowe badania długości transmisji zostaną przedstawione w rozdziale 4, poniżej zostanie przedstawiona część metod dotyczących wyznaczenia przyczepności.

#### 3.3.1 Metody typu pull-out

Testy pull-out należą do najczęściej stosowanych badań przyczepności. Pomierzona siła wyciągająca jest podstawą do wyznaczenia długości transmisji i zakotwienia oraz przeprowadzenia wielu analiz m. in. wpływu długości zakotwienia na maksymalną i średnią wartość naprężeń przyczepności.

### 3.3.1.1 Badanie wg RILEM

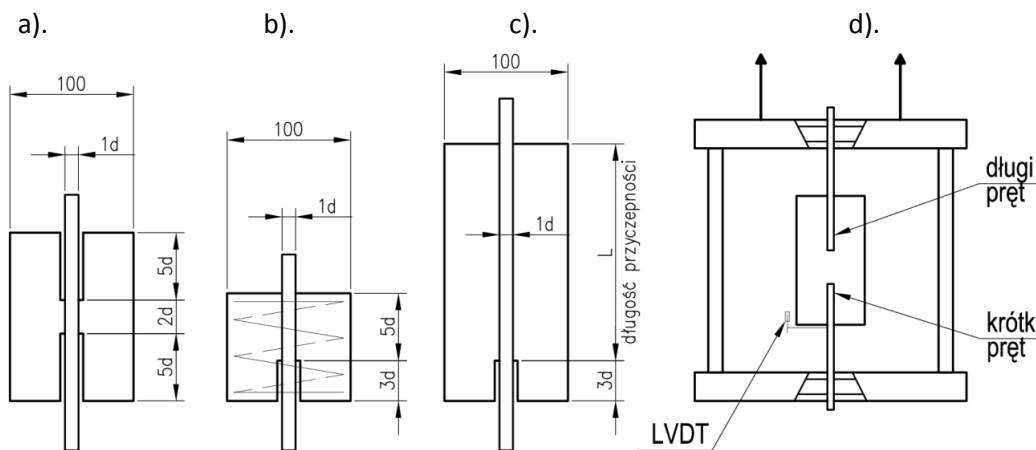
Na rysunku 3.20 przedstawiono schematyczny widok próbek do badań pull-out zalecany przez RILEM [N11]



Rys. 3.20 Schematyczny widok próbek do badań pull-out zalecany przez RILEM [N11]

### 3.3.1.2 Warianty badań pull-out

W metodzie pull-out stosowane są różne warianty przyłożenia siły (osiowe lub ekscentryczne, z jednej lub obydwu stron wystającego pręta, rys. 3.10) jak również próbki o różnej efektywnej długości przyczepności w zależności od rodzaju przeprowadzanego badania (rys. 3.21).



Rys. 3.21 Przykładowe warianty próbek stosowane w badaniach przyczepności betonu do prętów

Zhiming i Zhiman [167] w przeprowadzonych badaniach nad przyczepnością przykładając siłę wyciągającą bezpośrednio do pręta stalowego, przyjęli zróżnicowane próbki i beton wysokiej wytrzymałości. W poszczególnych seriach badań były to albo próbki o niewielkich długościach przyczepności usytuowane w połowie wysokości elementu (rys. 3.21 a)), albo próbki o geometrii zbliżonej do zalecanej przez RILEM zaopatrzonej jednak w spiralę (rys. 3.21 b)) lub z zastosowaniem relatywnie długiego odcinka przyczepności (rys. 3.21 c)).

Badania z zastosowaniem betonu zawierającym włókna przeprowadzili Ezeldin i Balaguru [48] sytuując centrycznie dwa pręty o zróżnicowanej długości w elemencie badawczym (rys. 3.21 d)). Zmiennymi badania były wytrzymałość betonu na ściskanie z uwzględnieniem BWW, średnica pręta, zawartość włókien oraz ich długość.

Taki sam schemat badawczy zastosowali Al-Jahdali, Wafa i Shihata [5], a zmiennymi badania była średnica pręta, efektywna długość przyczepności (90 - 320 mm) i wytrzymałość betonu (również BWW). Ze względu na dużą otulinę betonową i długi odcinek transferu sił, uzyskiwano duże wartości siły wyciągającej, co prowadziło w niektórych przypadkach do osiągnięcia przez stal granicy plastyczności. Stwierdzono redukcję średnich naprężeń przyczepności wraz ze zwiększającą się efektywną długością

pryczepności, natomiast wzrost średnich naprężeń przyczepności zaobserwowano przy wzrastającej wytrzymałości betonu na ściskanie i przy mniejszych średnicach prętów stalowych.

### **3.3.1.3 Nienormowe metody badań przyczepności / Badania mierzące do określenia akceptowanej normowej metody badania przyczepności betonu do splotu [108]**

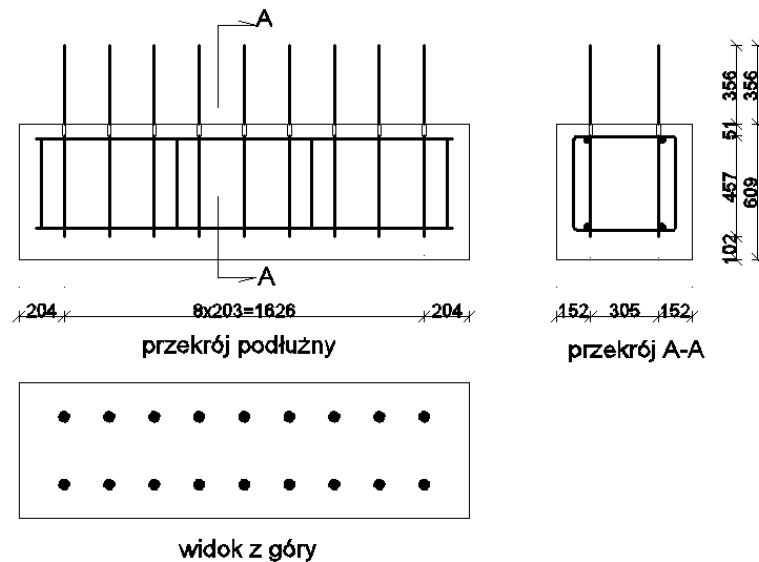
Od połowy lat dziewięćdziesiątych XX wieku zrealizowano kilka programów badawczych, których celem było przebadanie różnych procedur badania przyczepności, aby uzyskać zgodne wyniki z różnych badań i w różnych miejscach. Ostatecznym celem różnych programów badawczych było opracowanie (rozwiniecie) **badania normowego**, które mogłoby dokonać wstępnej kwalifikacji splotu z punktu widzenia akceptowanej wartości przyczepności. W programie badania przyczepności betonu do splotów uwzględniono dwie metody typu pull-out. Pierwsza metoda została opracowana przez producentów splotów na terenie Ameryki Północnej (*The North American Strand Producers - NASP*), a druga metoda *the Large Block Pullout Test* (LBPT) tzw. metoda *Moustafy* zmodyfikowana przez Logana.

W obu metodach badania doświadczalne polegające na wyciąganiu splotów prowadzone są po 24 godzinach od wykonania elementów próbnych. W chwili obecnej żadna z tych metod nie jest traktowana jako normowa, w związku z czym celem prowadzonych badań było sprawdzenie, która z nich jest bardziej pewna (niezawodna) z punktu widzenia kwalifikacji splotów na podstawie przyczepności.

Należy podkreślić fakt, że metoda LBPT jest ciągle rozwijana i aktualnie prowadzone są prace uwzględniające zastosowanie do normowej mieszanki betonowej grubego kruszywa węglanowego, natomiast w metodzie NASP stosowana jest zaprawa, w odniesieniu do której zgłaszane są zastrzeżenia wynikające z jej wytrzymałości i przepływu (betony samozagęszczalne), na co ma niewątpliwie wpływ kanciastość piasku.

- **metoda LBPT (*Large Block Pullout Test*)/Metoda Logana (1997)**

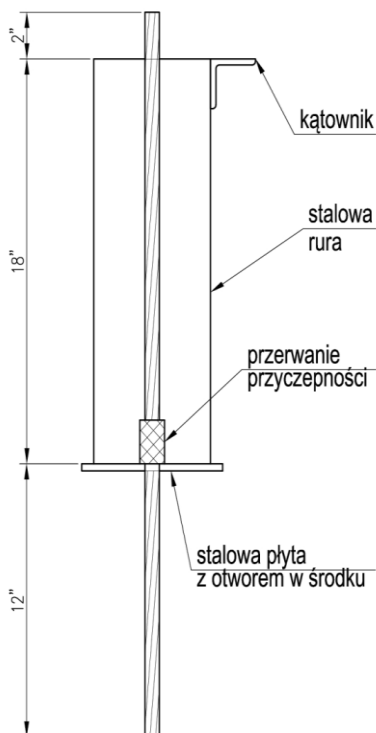
Metoda *Logana* [95], będąca zmodyfikowaną metodą *Moustafy* [107], znana jest jako LBPT i polega na pionowym osadzeniu sześciu splotów o czynnej długości przyczepności 457 mm (18 cali) w betonowym bloku wykonanym na znormalizowanej mieszance betonowej (rys. 3.22). Pielęgnacja bloku prowadzona była całą noc, a następnie za pomocą prasy naciągowej wyciągano każdy splot metodą pull-out do osiągnięcia maksymalnej siły wyciągającej. Głównym celem programu badawczego Logana było opracowanie prostej metody badań typu pull-out nienaciągniętego splotu, która potwierdzałaby wystarczającą jakość przyczepności betonu do stali sprężającej, a otrzymane wyniki wykazywałyby dobrą korelację z wynikami obserwowanego poślizgu końca splotu i badaniami na zginanie sprężonych belek. *Precast/Prestressed Concrete Institute* (2003) zobowiązuje producentów elementów strunobetonowych do stosowania tej metody w celu potwierdzenia jakości przyczepności splotów, mimo że wyniki otrzymane wg tej metody są trudne do powtórzenia w różnych ośrodkach, a wyniki otrzymane wg metody NASP są bardziej wiarygodne.



Rys. 3.22 Układ splotów w badaniu pull-out wg procedury Moustafa

- **metoda NASP (The North American Strand Producers)**

Badania wg metody NASP (rys. 3.23) polegają na wykonaniu sześciu cylindrycznych próbek długości 457 mm (18 cali) o zewnętrznej średnicy 12,7 mm (5 cali).



Rys. 3.23 Próбка do badań wg metody NASP [108]

Wewnątrz próbki koncentrycznie usytuowany jest splot o całkowitej długości 813 mm. Do górnej krawędzi rury służącej jako forma przyspawany jest kątownik 50,8 x 50,8 mm o długości 44,5 mm służący do przymocowania czujnika przemieszczeń LVDT podczas badań. Drut centralny końcówki splotu wystającej z górnej części próbki stanowi oparcie dla czujnika przemieszczeń (LVDT). Po przyłożeniu czujnika przemieszczeń (LVDT) do centralnego drutu w splocie, wywołano obciążenie próbki z prędkością nie większą niż 35,6 kN/min. Pomiary przemieszczeń realizowane były dwukrotnie w ciągu sekundy. Wewnątrz rury na splocie w części przylegającej do dolnej płyty założono opaskę długości 50,8 mm wykonaną z pianki i zabezpieczoną taśmą przyklepną regulującą rzeczywistą długość przyczepności. Elementy badawcze wykonane są ze specjalnej zaprawy, a ponadto badania przeprowadza się dla czterech mieszanek betonowych. O ile typowe badania wg NASP na próbkach z zaprawy oceniają tylko jakość przyczepności splotu, to badania na próbkach betonowych dają pogląd na aktualne zachowanie się przyczepności do splotu konkretnego betonu o określonej wytrzymałości.

### 3.3.2 Metoda badania na belkach

W grupie badań przyczepności na belkach istotę stanowi pomiar poślizgu na obu jej końcach. W badaniach stosuje się belkę wolnopodpartą, która obciążona jest dwoma symetrycznymi siłami skupionymi (rys. 3.24) wywołującymi moment zginający, co powoduje poślizg badanego zbrojenia względem przekroju betonowego lub prowadzi do zniszczenia przekroju stalowego. Eksperyment

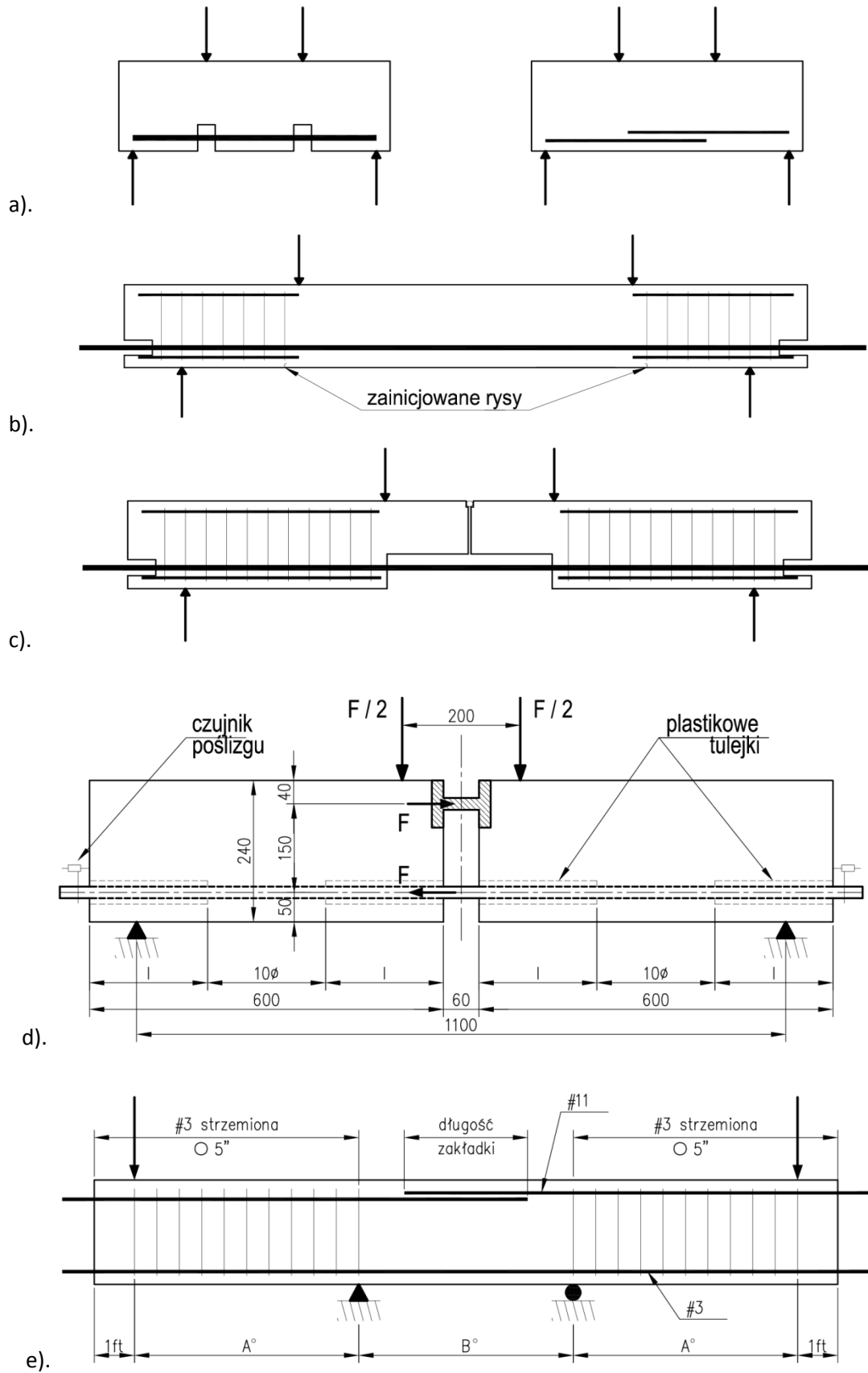
pozwała porównać różne powierzchnie przyczepności i jest niezależny od innych metod określania przyczepności. Na rysunku 3.24 zobrazowano różne warianty przeprowadzenia testów na belkach, łącznie z ostatnim, gdzie do badania zastosowano układ dwóch belek połączonych wspólnym badanym prętem.

Na rysunku 3.24 d) przedstawiono wariant badania wg *de Larrarda, Schalleta i Fuchsa* [39], w których zastosowano dwa bloki betonowe połączone przegubowo, a równoczesne obciążenie eliminowało wzajemne przesunięcie i gwarantowało poprawność układu badawczego. Efektywną długość przyczepności usytuowaną jeszcze o obrębie ściskających krzyżulców idących od obciążenia punktowego, uregulowano plastikowymi tulejami. Wartości pomiarowe dokumentowano tylko do poślizgu końca czoła o wartości 0,1 mm, ze względu na obawy dotyczące wpływu plastikowych tulei na wyniki badań przy większych relatywnych przesunięciach. Otrzymane średnie wartości naprężenia przyczepności dla poślizgu 0,01 mm i 0,1 mm osiągają  $55 \text{ N/mm}^2$  przy  $f_c = 95 \text{ N/mm}^2$ . Wg [85] te wyniki są jednak wątpliwe, ze względu na osiągnięcie naprężeń w stali przekraczających znacznie granicę plastyczności  $f_y = 400 \text{ N/mm}^2$ , przy maksymalnych naprężeniach rozciągających w stali równych  $600 \text{ N/mm}^2$ .

*Azizinamini et al.* prowadził badania [8] przyczepności betonu do prętów stalowych na belce wolnopodpartej obciążonej siłami skupionymi usytuowanymi na końcach dwóch symetrycznych wsporników (rys. 3.24 e)), przy czym średnica pręta jak również otulina betonowa były wartościami stałymi, a zmienną badania była długość zakładki prętów (330 - 2032 mm) oraz wytrzymałość betonu na ściskanie ( $f_c = 35 \div 104 \text{ N/mm}^2$ ). We wszystkich badaniach doszło do zniszczenia otuliny betonowej. Stwierdzono redukcję średnich naprężeń przyczepności przy zniszczeniu belki w zależności od wzrostu długości zakładki prętów. Z wyników wyprowadzono zależność wzrostu średnich naprężeń przyczepności w zależności od pierwiastka kwadratowego z wytrzymałości betonu na ściskanie. Ponadto zaobserwowano większe średnie naprężenie przyczepności prętów leżących wyżej podczas betonowania od prętów zajmujących położenie niższe.

Podobne badania prowadzili *Hwang, Lee i Lee* [64] przy stałej geometrii elementów badawczych i długości zakładki (300 mm) oraz zmieniającym się stosunku w/c i zbrojeniu poprzecznym złącza. W niektórych zarobach do mieszanki betonowej dodawano krzemionkę. Przyjęta otulina betonowa  $c = d_s$  okazała się niedostateczna i doprowadzała każdym przypadku do zniszczenia w obrębie zakładki. Uzyskane średnie naprężenia przyczepności osiągały wartości ponad dwukrotnie większe niż w przypadku badań *Azizinamini* przy tych samych średnicach pręta i prawie identycznej otulinie oraz podobnej geometrii, co można wytłumaczyć [85] zastosowaniem wyraźnie krótszego złącza aktywującego całościową długość przyczepności.

*Kaku* [75] badał zniszczenie otuliny betonowej o wartości  $c = 30 \text{ mm}$  na wspornikach z BWW, przy średnicy pręta  $d_s = 25 \text{ mm}$  lub  $35 \text{ mm}$ , gdzie długość przyczepności usytuowana była w obszarze dużych obciążeń ścinających. Pręty wykonane były ze stali o wysokiej granicy plastyczności ( $900 \text{ N/mm}^2$ ), a zmienną badania była wytrzymałość betonu na ściskanie (40, 60, 80 i  $100 \text{ N/mm}^2$ ), efektywna długość przyczepności ( $15d_s$ ,  $20d_s$  i  $40d_s$ ) i stopień zbrojenia poprzecznego wspornika (0%, 0,6% i 1,2%). W elementach badawczych bez zbrojenia poprzecznego zniszczeniu uległa otulina betonowa. Zaobserwowano spadek średniego naprężenia przyczepności wraz ze wzrostem efektywnej długości, przy czym w przypadkach z zastosowaniem zbrojenia poprzecznego tendencja ta nie zaznaczała się wyraźnie, z czego można wnioskować o dystrybucji naprężeń przyczepności na długość przyczepności przez zbrojenie poprzeczne.



Rys. 3.24 Warianty badań przyczepności na belkach



### 3.3.3 Metody badawcze uwzględniające sprężenie elementu

#### 3.3.3.1 Metoda pull-out zmodyfikowana przez Mahmoud'a/ Metoda Mahmoud'a [97]

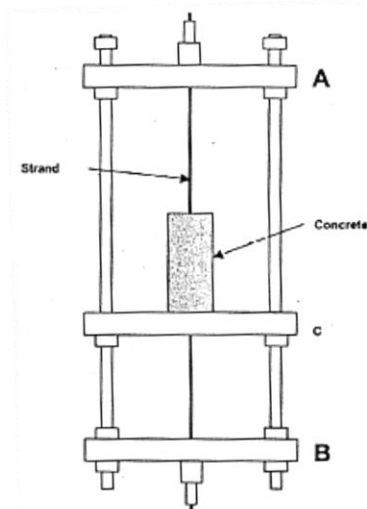
Modyfikacje badań pull-out *Mahmoud'a* i innych polegają na wprowadzeniu pryzmatycznej próbki betonowej składającej się z dwóch części o centralnie usytuowanym cięgnię, połączonych z wydrążonym podnośnikiem i czujnikiem do pomiaru obciążenia. Obie części rozdzielają się po stopniowym zwolnieniu siły sprężającej i jej przekazaniu na beton.

#### 3.3.3.2 Metoda pull-out zmodyfikowana przez Moustafa/ Metoda Moustafa

Modyfikacje badań pull-out *Moustafa* polegają na wprowadzeniu bloczków betonowych i szeregu nierozciąganych próbek cięgien sprężających o dużej długości zakotwienia wrywanych pojedynczo. Siły wrywające otrzymane w testach pull-out dla cięgien sprężających porównuje się do wyników uzyskanych z wyznaczenia długości transmisji i dyspersji uzyskanych na belkach wykonanych z betonu sprężonego. Przeprowadzona symulacja zachowania się zakotwienia przez przyczepność na próbkach do testów pull-out nie odtwarza poprzecznego wydłużenia cięgien sprężających (efekt Hoyera) nie wliczając badania *Mahmuda* i innych.

#### 3.3.3.3 Badanie push-in

W celu symulowania zachowania się przyczepności na długości transmisji stosowana jest metoda push-in zaproponowana przez *Keuninga i innych* (1962) [77].



Rys. 3.25 Schemat badań push-in (*Keuning i inni*) [77]

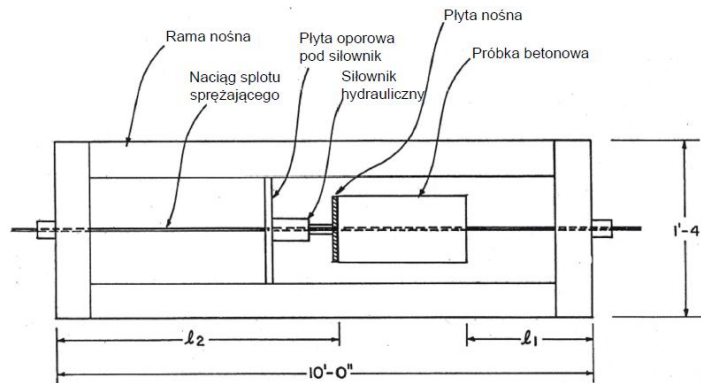
Zaproponowane stanowisko do badania wpływu pęcznienia poprzecznego cięgien sprężających (efektu Hoyera) składa się z dwóch płyt (A i B), między którymi cięgno jest naciągane oraz dodatkowej płytki (C), w pobliżu której betonowana jest próbka. Po osiągnięciu przez beton oczekiwanej wytrzymałości zwalniany jest naciąg od strony płytki A, co powoduje ruch cięgna w kierunku płytki B tworząc naprężenia przyczepności ze względu na unieruchomienie próbki betonowej na płytce C (rys. 3.25).

Modyfikacje wprowadzone przez *Rose'a i Rusell'a* polegały na zastosowaniu ramy testowej z dłuższym swobodnym cięgniem zapewniającym większą kontrolę podczas jego naprężania. Również *Cousins* i inni stosują/wykorzystują tę metodę w celu symulacji długości transmisji i długości przyczepności giętej.

#### 3.3.3.4 Badania Cousins T.E., Badeaus M.H., Moustafa S., (1992). [31]

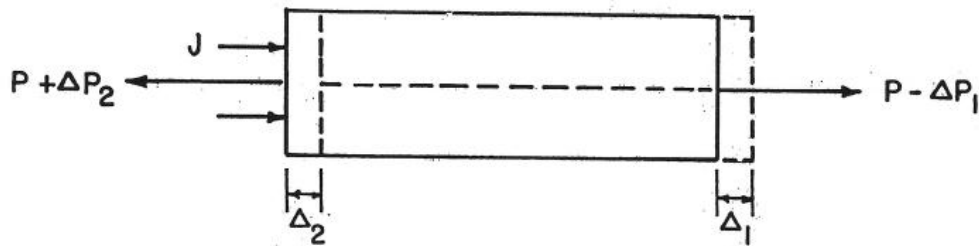
Metoda *Cousins*, *M.H. Badeaus* i *S. Moustafa*, opublikowana w 1992 miała na celu określenie właściwości przyczepności betonu do splotów czystych i z powłoką epoksydową oraz ich odniesienie do badania długości transmisji. Badanie próbuje odtworzyć rzeczywisty mechanizm przyczepności występujący w obszarze transmisji i obejmujący zarówno adhezję i siły tarcia jak również mechaniczne

blokowanie i efekt Hoyera. Polega na przepychaniu krótkiego bloku obetonowanego na wstępnie naprężonym splocie wzdłuż jego osi, przy czym kontakt między tymi dwoma materiałami zachowany jest na całym obwodzie i długości (rys. 3.26).



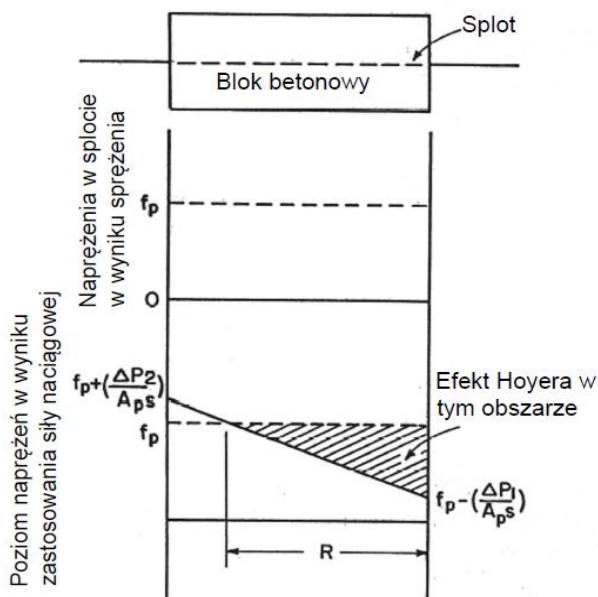
Rys. 3.26 Ogólny widok ramy badawczej [31].

W wyniku przyłożenia siły dochodzi do redukcji naprężeń po stronie splotu zgodnej z ruchem siłownika przy towarzyszącym pęcznieniu splotu sprężającego, natomiast po stronie przeciwnej wzrastają naprężenia w splocie. Układ sił działających na betonowy blok pokazany jest na rys. 3.27.



Rys. 3.27 Układ sił działających na blok betonowy [31]

Przy znanej geometrii i kontroli sił mogą zostać wyznaczone podstawowe zależności opisujące badanie. Kluczowym pytaniem jest wyznaczenie dwóch odcinków splotu wewnątrz bloku betonowego podlegającego pęcznieniu i przewężeniu (rys. 3.28).

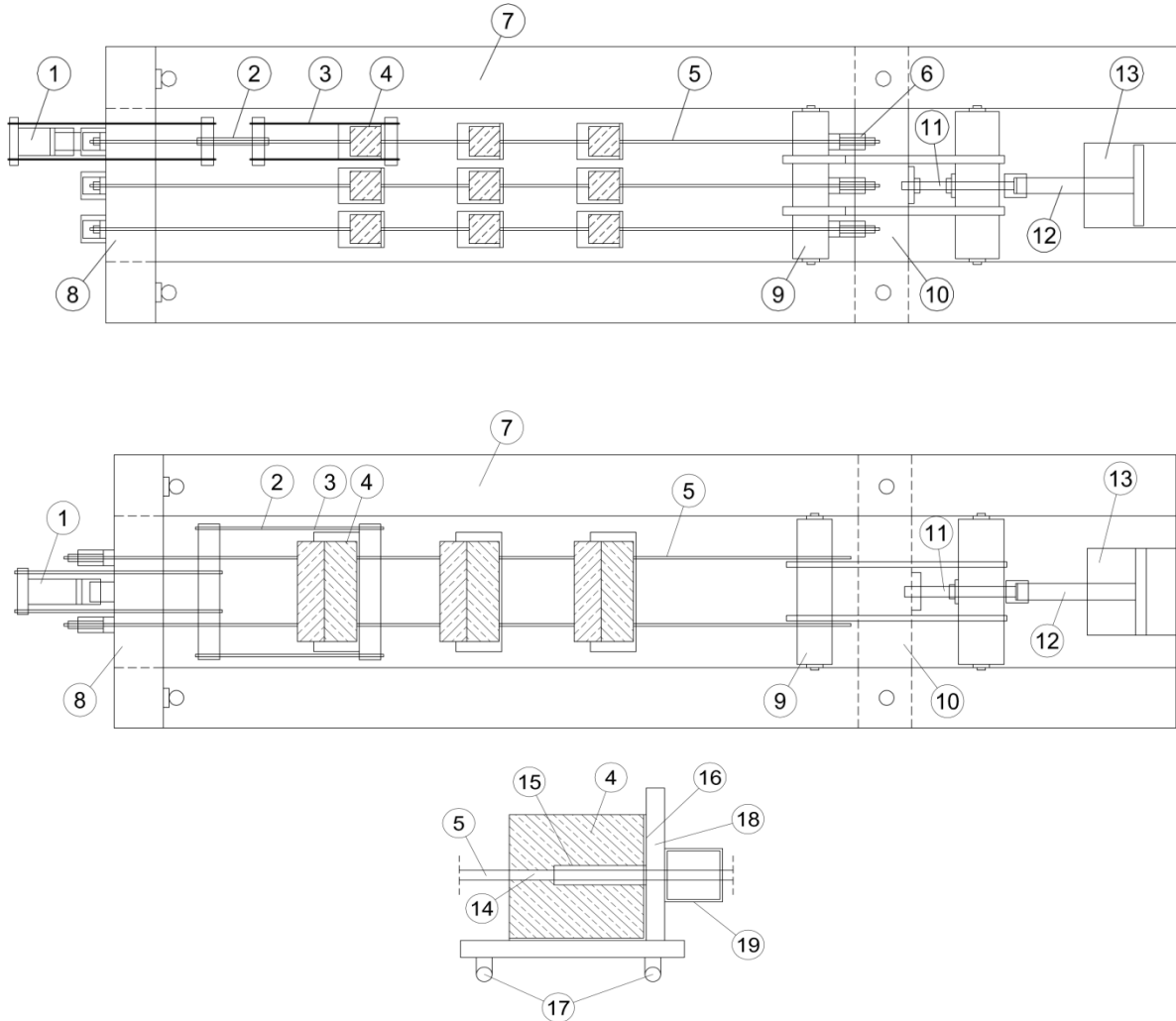


Rys. 3.28 Rozkład naprężeń w splocie na długości bloku betonowego [31].

Efekt końcowym przepychania bloku betonowego o ustalonych parametrach jest zmiana siły w splocie od wartości początkowej do zera na drugim końcu splotu, co powala na ustalenie rozkładu naprężeń w splocie oraz odcinka R, na którym wystąpi zjawisko Hoyera (rys. 3.28). Mimo że badanie jest zaprojektowane w celu odtworzenia mechanizmu przyczepności na długości transmisji, wyniki otrzymane z proponowanej metody badawczej mogą być porównywane z wynikami długości zakotwienia dostępnymi w literaturze.

### 3.3.3.5 Metoda A. Nitscha [114]

Próbki zabetonowano i badano w poziomej ramie z naciągniętymi splotami lub drutami (rys. 3.29). W eksperymentach uwzględniono wpływ sprężenia betonu przez zwalnianie naciągu bezpośrednio przed badaniem o 0%, 50% i około 100%. Dzięki usytuowaniu próbek w środkowym obszarze na torze naciągowym siła sprężająca została wprowadzona w przybliżeniu w równych częściach przez ściskanie (z przodu) i rozciąganie (z tyłu). Tym sposobem osiągnięto bardziej równomierny rozkład naprężeń przyczepności w porównaniu do jednostronnego wprowadzenia siły sprężającej. W celu eliminacji skrępowania przemieszczeń przy zwalnianiu naciągu, próbka została usytuowana na kółkach, a w celu skrępowania obrotu, wytworzono podwójną próbkę o dwóch splotach (rys. 3.26).

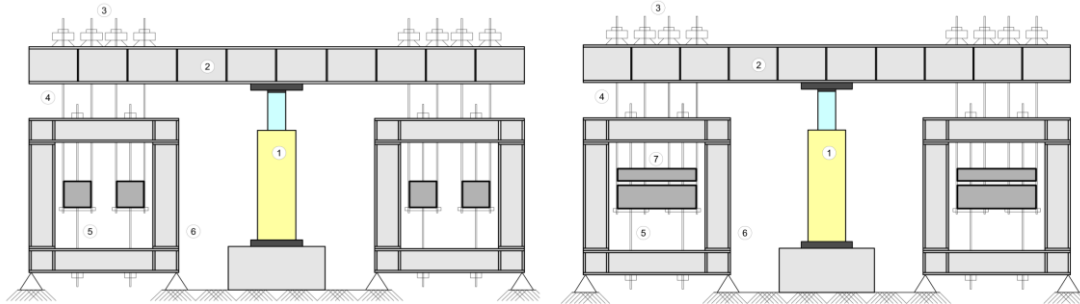


- |                                    |                              |
|------------------------------------|------------------------------|
| 1. Prasa                           | 6. Siłomierz                 |
| 2. Tensometr                       | 7. Rama                      |
| 3. Dźwignie do prób na rozciąganie | 8. Utwierdzenie nieprzesuwne |
| 4. Próbką                          | 9. Utwierdzenie przesuwne    |
| 5. Ciężno naciągowe                |                              |

Rys. 3.29 Schemat badań pull-out bez skrępowania skręcenia (na górze) i ze skrępowaniem skręcenia (na dole) [114]

### 3.3.3.6 Metoda S. Bülte [27]

Metoda została rozwinięta przez S. Bülte do badań dynamicznych próbek znajdujących się pod naciągiem. Układ pionowej ramy (rys.3.30) stwarza możliwość regulacji stopnia sprężenia.



Rys. 3.30 Schemat badań bez skrępowania skręcenia próbek (po lewej) i ze skrępowaniem obrotu (po prawej)

### 3.3.3.7 Metoda "szaszłyków" (2013)

Metoda "szaszłyków" została opracowana w zespole Seruga - Jaromska na Politechnice Krakowskiej i polega na zabetonowaniu kilku elementów badawczych na naciągniętym splotie, po czym po uzyskaniu przez beton odpowiedniej wytrzymałości na ściskanie umożliwiającej zwolnienie naciągu i wprowadzeniu sprężenia w beton, splot jest pocięty na poszczególne próbki. Elementy są wkładane do maszynie wytrzymałościowej i przy utwierdzonym dolnym odcinku splotu w szczekach maszyny, próbka jest zdejmowana ze splotu. Dokładny opis zostanie szczegółowo omówiony w rozdziale 7. Metoda została już z powodzeniem zastosowana w kilku projektach badawczych m.in. w pracy [45].

## 3.4 Badania przyczepności betonu do prętów zbrojenia i cięgien sprężających (wybrane zagadnienia)

### 3.4.1 Badania Cousins T.E., Badeaus M.H., Moustafa S., (1992). [31]

W celu weryfikacji opracowanej metody autorzy przeprowadzili badania, w których przyjęto splot sprężający o średnicy 12,7 mm ze stali niskiej relaksacji i o wytrzymałości charakterystycznej na rozciąganie 1862 MPa. Zmienną był rodzaj zewnętrznej powierzchni: splot czysty (CN), splot lekko skorodowany (LR) i splot z powłoką epoksydową impregnowaną żwirkiem (grysem) (C). Otrzymana zależność obciążenie – poślizg (rozróżniono koniec bierny i czynny) charakteryzuje się nagłym poślizgiem/przemieszczeniem splotu względem betonu przy sile 106,8 kN, a następnie spadkiem siły od 13,3 kN do 17,8 kN, po czym splot ślizga się przy utrzymywanych poziomym obciążeniu.

Po nagłym zwolnieniu siły sprężającej wykonano pomiar odkształceń betonu na powierzchni elementu za pomocą ekstensometru o bazie pomiarowej 203 mm, a punkty pomiarowe usytuowane były co 50,8 mm.

#### Analiza i wnioski

Graniczny poślizg, od którego zaczyna się wyciąganie splotu, zdefiniowano jako 0,0254 mm, a odpowiadające mu obciążenia jako obciążenie niszczące. Naprężenia przyczepności są aktywne na całej długości betonowego bloku i mimo że pęcznienie splotu występuje tylko na części jego długości (rys. 3.25), do wyznaczenia średniego naprężenia przyczepności  $U_s$  przyjęto jednak całą jego długość z uwagi na względnie niewielki odcinek bez efektu Hoyera.

Przy opracowaniu wyników posłużono się wartością sprowadzoną (względną)  $U_s'$ , którą przyjęto jako  $U_s' = U_s/\sqrt{f_c'}$  i odpowiednio  $U_T' = U_T/\sqrt{f_c'}$ , gdzie  $U_T$  jest średnim naprężeniem przyczepności na długości transmisji. W ten sposób zdefiniowane zmienne pozwalają na eliminację wpływu zmian wytrzymałości betonu oraz na porównanie do wyników uzyskanych w badaniach prowadzonych przez innych naukowców.

Sploty o średnicy 12,7 i 15,2 mm wykazują naprężenie przyczepności  $U_s'$  prawie dwukrotnie wyższe w chwili rozpoczęcia poślizgu w przypadku obecności powłoki epoksydowej niż bez niej. Wyjątek stanowią sploty o średnicy 9,5 mm, a wyjaśnieniem tej niezgodności może służyć lekko skorodowana powierzchnia tych splotów. Wrażliwość powierzchni została również potwierdzona w innych badaniach.

Podsumowując autorzy sformułowali wnioski w oparciu o przedstawione wyniki badań o prostocie procedury i powtarzalności badania, porównywalności z innymi badaniami odchylenia standardowego wyników, racjonalności naprężeń przyczepności i wrażliwości powierzchni splotów i stwierdzili konieczność kontynuowania badań ze splotami o średnicy 9,5 mm bez powłoki epoksydowej.

### 3.4.2 Badania Bigaj

*Bigaj* prowadziła badania [14] nad wyciąganiem pręta o dużej długości przyczepności ( $50d_s$ ) w celu określenia naprężeń przyczepności po osiągnięciu przez stal granicy plastyczności. Pomiarom podlegał, oprócz obciążenia, poślizg końca splotów na obciążonym i nieobciążonym końcu, jak również pomiar odkształcenia za pomocą tensometrów elektrooporowych na prętach zbrojenia. Uzyskane pomiary umożliwiały wyznaczenie przebiegu odkształcenia i naprężenia w stali na całej długości przyczepności, a zatem i wyznaczenie zależności naprężenie przyczepności - poślizg. Cylindryczne próbki o długości  $60 d_s$  i średnicy 500 mm wykonywano na betonie normalnym ( $f_c = 27,6 \text{ N/mm}^2$ ) i wysokiej wytrzymałości ( $f_c = 94,5 \text{ N/mm}^2$ ) przyjmując pręty o średnicy 16 i 20 mm. Maksymalne wartości naprężeń przyczepności dla BWW wynosiły około 25 MPa przy poślizgu  $s = 0,2 \text{ mm}$ , a dla normalnego betonu osiągnęły wartość około 17 MPa przy poślizgu 0,3 mm.

### 3.4.3 Badania niemieckie

Badania przyczepności bazujące na metodzie pull-out przeprowadzono m. in. na Uniwersytecie Technicznym w Akwizgranie (*RWTH, Aachen*) w latach 2001 - 2008 (tabela 3.1)

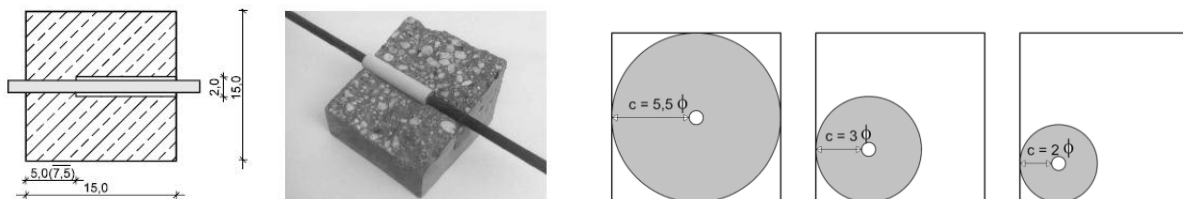
#### 3.4.3.1 Badania Nitscha

Program badawczy *Nitscha* [114] obejmował badanie wpływu wytrzymałości betonu na ściskanie oraz obecności dodatków w mieszance betonowej, zwłaszcza krzemionki polepszającej strefę kontaktową na przyczepność betonu do splotów, jak również wpływ otuliny, stopnia sprężenia, obecności zarysowania i skrepowania obrotu splotów.

Zachowanie się przyczepności stali sprężającej wyznaczono stosując niewielką długość przyczepności we wielkości 4 – 6 krotnej średnicy nominalnej splotu lub pręta, co skutkuje mniejszymi siłami przy wyciąganiu, niż to ma miejsce w przypadku większej efektywnej długości przyczepności, mniejszymi wydłużeniami stali oraz bardziej równomiernymi przemieszczeniami i rozkładem naprężeń przyczepności, który bardziej odpowiada obliczeniowym średnim wartościom wyznaczonym z siły wyciągania. Właściwa długość przyczepności wynosiła 5,0 cm, jedynie w dwóch przypadkach zwiększono długość przyczepności do 7,5 cm (rys. 3.31). Wpływ otuliny badano wprowadzając zmienne ekscentryczne położenia pręta (rys. 3.31).

Tabela 3.2 Zestawienie badań niemieckich

autor	Andreas Nitsch	Sebastian Bülte	Boris Kommer
uniwersytet	RWTH - AACHEN	RWTH - AACHEN	RWTH - AACHEN
rok	2001	2008	2008
recenzenci	Hegger, König	Hegger, Kollegger	Hegger, Tue
beton	BWW	BN	Lekki beton WW (LB WW) Samozagęszczalny (SB WW)
Ilość mieszanek	5 BWW 1 NB	1	3 LC ( $\rho = 1,4; 1,6; 1,8$ ) 3 SCC Wibrobetony NSC/HSC
Klasa betonu	M 45 K, M 65 K, M 85 KS M 105 KS, M 105 BS	C 40/50	LC 35/38, LC 55/60, LC 75/85 C45/55; C35/45; ? C30/37; C 50/60; C90/105
kruszywo	nie łamany żwir kwarcowy łamany grys bazaltowy	Piasek żwir	
Max średnica ziarna	16 mm	16 mm	8 mm
Próby wytrzymałościowe	Kostki 15 cm (n = 3) Cylindry d = 15 cm; h = 30 cm (n = 3)	2 próbki	
Czas badań	24 godziny 14 dni	8 dni – 15 dni 36 dni - 48 dni	24 godziny 3, 6, 14, 25 dni
Badania jakości betonu	28 dni (wg DIN 1048)		
Rodzaj badań (siła obciążenia)	statyczna	Cykliczna do 2 000 0000 cykli	statyczna
Stal – spłoty	0,5" St 1570/1770	0,5" St 1570/1770	0,5" St 1570/1770
Stal – druty	$\varphi = 12$ mm St 1420/1570	$\varphi = 12$ mm St 1420/1570	$\varphi = 12$ mm St 1420/1570
Rodzaj badań (siła obciążenia)	statyczne	Cykliczne pull-out do 2 000 0000 cykli	statyczne
Siła naciągu – spłoty	125 kN – 135 kN	130 kN	125 kN
Siła naciągu – druty	135 kN	130 kN	135 kN
Siła naciągu przy badaniach, podczas których zwiększano naprężenia bezpośrednio przed badaniem	45 kN	-	-
Zmiany naprężenia bezpośrednio przed badaniem	0 % (3 próbki) 50 % (3 próbki) 100 % (3 próbki)	0 % (?próbki) 50 % ( ?próbki) 100 % ( ?próbki)	0 % (3 próbki) 50 % (3 próbki) 100 % (3 próbki)
Efektywna długość przyczepności	5,0 cm lub 7,5 cm (4,0 lub 6,0) · $\varphi$	5,0 cm	5,0 cm
Otulina c	(2,0 / 3,0 / 5,5) · $\varphi$	(2,0 / 3,0 / 5,5) · $\varphi$	(2,0 / 3,0 / 5,5) · $\varphi$
Liczba badań pull-out	150	60	LB: 144 i BS : 234
Układ badań (ramy)	poziomy	pionowy	poziomy
pielęgnacja betonu			1 tydzień



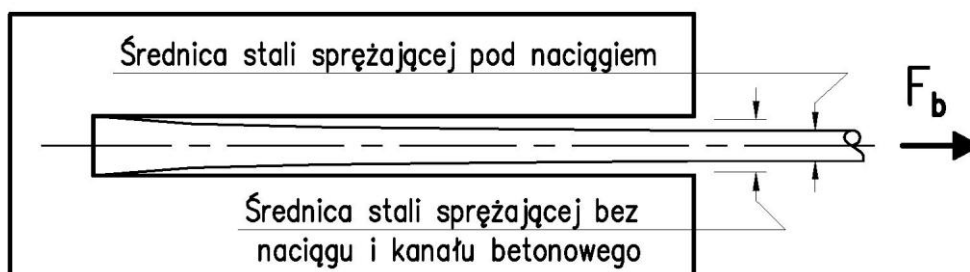
Rys. 3.31 Próbkki użyte do badań przez Nitscha (po lewej) oraz przekroje poprzeczne próbek z różnym przyjęciem otuliny betonowej (po prawej)

Próbki zabetonowano i badano w poziomej ramie z naciągniętymi splotami lub drutami (rys. 3.29). W eksperymentach uwzględniono wpływ sprężenia betonu przez zwalnianie naciągu bezpośrednio przed badaniem o 0%, 50% i około 100%. Dzięki usytuowaniu próbek w środkowym obszarze na torze naciągowym siła sprężająca została wprowadzona w przybliżeniu w równych częściach przez ściskanie (z przodu) i rozciąganie (z tyłu). Tym sposobem osiągnięto bardziej równomierny rozkład naprężeń przyczepności w porównaniu do jednostronnego wprowadzenia siły sprężającej. W celu eliminacji skrępowania przemieszczeń przy zwalnianiu naciągu, próbka została usytuowana na kółkach, a w celu skrępowania obrotu, wytworzono podwójną próbkę o dwóch splotach (rys. 3.29 na dole).

W badaniach przewidziano wyznaczenie wpływu wydłużenia poprzecznego stali sprężającej na zachowanie się przyczepności odpowiednio do zmniejszania się naprężeń w stali podczas przekazywania siły sprężającej na beton. W tym celu cięgna sprężające, na których nałożone były formy kostkowe, zostały naciągnięte z siłą 125 kN do 135 kN na splot lub 135 kN na drut. W badaniach ze wzrostem naprężenia jak to ma miejsce w strefie zarysowania, sploty były naprężone z siłą 45 kN. Bezpośrednio przed zasadniczymi badaniami pull-out zmieniono naprężenie zabetonowanych cięgien sprężonych w celu zbadania oddziaływania zmian naprężeń. W celu osiągnięcia bezpośredniego porównania, sprawdzono kolejno każdorazowo 3 próbki bez uprzedniej zmiany naprężeń, 3 z średnią (50%) i 3 z dużą zmianą naprężeń (około 100%).

Przesunięcie stali sprężających (wślizg) względem betonu zostało ujęte bezpośrednio na stronie czołowej próbki za pomocą 2 indukcyjnych przetworników drogi w odległości 20 mm w kierunku osi sprężenia. Przetworniki drogi zostały usytuowane na uchwycie symetrycznie do osi sprężania, w celu umożliwienia wyrównania ruchów stali sprężającej poprzecznie do osi i utworzenia wartości średniej oraz ujęcia przesunięcia w kierunku osi stali sprężającej względem powierzchni czołowej (rys. 3.4). Siły wyciągające wyznaczono za pomocą dwóch dynamometrów do pomiaru siły rozciągającej oraz leżącymi naprzeciw tensometrami elektrooporowymi o bazie pomiarowej równej 6 mm. Rejestracja pomiarów prowadzona była w sposób ciągły.

Celem badań pull-out jest rzeczywiste ujęcie zachowania się przyczepności stali sprężającej. Ze względu na warunki badań, które odbiegają od panujących w rzeczywistym elemencie budowlanym, nie można bezpośrednio odnieść zmierzonych zachowania się przyczepności podczas badań pull-out na element rzeczywisty. To dotyczy szczególnie strefy wprowadzenia siły sprężającej, w której naprężenia przyczepności są podwyższone ze względu na zależne od naprężeń wydłużenia poprzeczne stali sprężającej. W próbkach w większości używanych w USA do badań pull-out o znacznej długości przyczepności powstają jednak pod wpływem sił wyciągających w przeciwnym kierunku działające wydłużenia poprzeczne i naprężenia przyczepności są zmniejszone (rys. 3.32).



Rys. 3.32 Wydłużenia poprzeczne podczas badań pull-out wg [24]

Obliczone na podstawie badań naprężenia przyczepności bazowały na zredukowanej efektywnej długości przyczepności o 5 mm ze względu na obecność stożka zniszczenia przy tulei. Czynny obwód przyjęto wg wzoru  $u_v = 1,6 \cdot \pi \cdot \sqrt{A}$  [158], a w celu eliminacji wpływu różnych mieszanek betonowych posłużono się naprężeniem przyczepności odniesionym do wytrzymałości betonu na ściskanie.

### 3.4.3.2 *Badania S. Bülte 2008 [27]*

Na podstawie badań pull-out w pionowej ramie został opisany wpływ obciążenia użytkowego (cyklicznego) na zachowanie się przyczepności w różnych obszarach długości transmisji i długości zakotwienia. Obok prawdopodobieństwa przedwczesnego zniszczenia w wyniku cyklicznego obciążenia, został zbadany wpływ obciążenia użytkowego na statyczną wytrzymałość na przyczepność, wykonaną po cyklicznych obciążeniach. *Bülte* zajmował się również wślizgiem splotu oraz tworzeniem się rys podłużnych pod wpływem obciążenia cyklicznego, a celem było ustalenie miary długości zakotwienia, która mimo obciążenia cyklicznego gwarantowałaby wystarczającą nośność.

Kierując się doświadczeniem *Nitscha* przejął od niego zmodyfikowaną w stosunku do RILEM metodę, by lepiej uchwycić efekt Hoyera, polegającą na wprowadzeniu obciążenia w równych częściach przez ściskanie (z przodu) i rozciąganie (z tyłu), rezygnując z jednostronnej siły rozciągającej. Cykliczne obciążenia realizował w pionowej ramie (rys. 3.30), pozostawiając jednak tę samą zasadę pull-out umożliwiającą porównywalność wyników. Badania przeprowadzono przy wprowadzeniu zmian naprężeń o  $1100 \text{ N/mm}^2$  dla obszaru "a" (pkt. 3.2.2.2) i  $550 \text{ N/mm}^2$  dla obszaru "b" (100%, 50% i 0%) oraz bez zmiany naprężenia w celu uzyskania wpływu efektu Hoyera na zakotwienie splotu w betonie.

Przemieszczenie stali sprężającej w stosunku do betonu (poślizg) zostało ujęte bezpośrednio na stronie czołowej próbki za pomocą dwóch przetworników drogi, które zostały umocowane 10 mm od powierzchni czoła na stali sprężającej i umożliwiły wyrównanie ruchów stali sprężającej prostopadle do osi przez utworzenie wartości średniej. Wpływ wydłużenia w stali sprężającej przed próbką w wyniku siły wyciągającej został wyliczony podczas analizy z zanotowanego poślizgu. Dodatkowo została zmierzona rotacja kostki przy wyciąganiu wokół osi stali sprężającej za pomocą indukcyjnego przetwornika drogi usytuowanego w kierunku poprzecznym. Siły wyciągające zostały wyznaczone przez dwa tensometry elektrooporowe w kształcie paska do pomiaru wydłużeń i bazie mierzenia 6 mm.

Poprawność modelu badawczego stwierdzono w statycznych badaniach pull-out, podczas których uzyskano obrót próbki proporcjonalny do poślizgu splotu i równy (metoda ekstrapolacji)  $360^\circ$  dla skoku zwicia (porównywalność do badań *Nitscha*). W przypadku badań pull-out po cyklicznych obciążeniach nie stwierdzono ich istotnego wpływu na wytrzymałość przyczepności niezależnie od poziomu obciążenia, o ile przyrosty przemieszczeń w wyniku badań dynamicznych nie osiągały znaczących wartości.

Testy pull-out z wprowadzeniem siły naciągu cechowały się bardzo niską wrażliwością (niskim przyrostem poślizgu) na cykliczne obciążenia włączając badania, gdzie górna wartość siły osiągała poziom 80% statycznej wytrzymałości na przyczepność.

Badania bez przekazania siły sprężającej na beton charakteryzowały się dużym rozrzutem, z uwagi na, zdaniem autora, dominujący udział adhezji w połączeniu stali sprężającej i betonu. Poślizg zwiększył się do 1 mm i oscylował osiągając wartość graniczną do 1,5 mm lub nawet 2,5 mm. Przy większych wartościach poślizgu ze względu na zjawisko "lack of fit" cykliczna siła przyczepności mogła znowu zostać przejęta.

W badaniach ustalających graniczną wartość górnego poziomu cyklicznego obciążenia uzyskano wielkość odpowiadającą 80% dynamicznej wytrzymałości przyczepności.



### 3.4.3.3 Badania B. Kommera 2008 [79]

Program i metoda badań opierały się na tych samych założeniach, na których przeprowadzał badania Nitsch. Różnica leży w zastosowanych mieszankach betonowych, których punktem ciężkości były wysokowartościowe betony lekkie (LC), betony samozagęszczalne oraz w celach porównawczych BWW i NB. Wnioski z przeprowadzonych badań ujął w niżej przedstawionych spostrzeżeniach.

- Wpływ wydłużenia poprzecznego

Zmiana naprężenia w splocie (zwolnienie naciągu prawie 100%) spowodowała wzrost siły przyczepności prawie dwukrotnie. W przypadku splotów dominującym mechanizmem przenoszenia sił przyczepności jest tarcie, wzrost ten należy tłumaczyć efektem Hoyera. Na efekt ten wpływa wytrzymałość betonu na ściskanie  $f_{lcm}$ , gęstość  $\rho$  oraz moduł sprężystości  $E_{cm}$ , który jest w przybliżeniu zależny do gęstości. W przypadku uźebrowanych drutów sprężających, gdzie przeniesienie siły przyczepności następuje przez mechaniczne zakotwienie, zwolnienie naciągu nie powoduje istotnego wzrostu sił przyczepności. Natomiast w przeciwieństwie do zachowania splotów, przy zwiększającym się poślizgu rosną siły przenoszone przez uźebrowane druty sprężające.

- Porównanie LB WW do NB WW

W badaniach na lekkim betonie w zależności przebiegu siły przyczepności w funkcji poślizgu zaobserwowano po pokonaniu przyczepności przylegania charakterystyczny i niespotykany w normalnych betonach "schodkowy" wykres. Można to tłumaczyć kruchym zachowaniem się ziaren ulegającym zniszczeniu i powodującym poślizg splotu, po czym ustala się nowy stan równowagi.

Beton wysokowartościowy (normalny) przejmuje dwa razy większe siły od betonu lekkiego wysokowartościowego. Mniejsza gęstość własna i powiązana z nią mniejsza sztywność czyli sprężysta podatność wpływa na mechanizmy przyczepności i powoduje wzrost oczekiwanej długości transmisji

- Wytrzymałość betonu na ściskanie/gęstość własna

Nie obserwuje się proporcjonalnego wpływu wytrzymałości betonu na ściskanie na siły przyczepności. Dotyczy to zarówno przypadku bez zwolnienia naciągu jak również stanu po wprowadzeniu siły sprężającej.

- Wpływ wieku betonu

Zaobserwowany wpływ wieku betonu na przenoszenie sił przyczepności w betonach lekkich różni się od wpływu wieku na normalny beton. Nie odpowiada również rozwojowi wytrzymałości na ściskanie. Po 24 godzinach beton lekki osiąga 50% wytrzymałości 14 - dniowej, natomiast przejmuje prawie takie same siły przyczepności i to niezależnie od stopnia wprowadzenia siły sprężającej. Wyjaśnienia może należy szukać w rozwoju wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości lekkiego betonu wysokiej wytrzymałości. Wyjątkiem jest lekki beton LC 35/38 o gęstości  $\rho = 1,4 \text{ kg/dm}^3$ , który wykazuje podobny do betonu normalnego przebieg w czasie .

- Wpływ zastosowanych domieszek

W przypadku sytuacji bez zwolnienia naciągu siły przyczepności betonu o składzie zawierającej berwilit są nieznacznie większe niż w mieszance z liaporem, co tłumaczy się większymi właściwościami tarcia dodatków berwilitowych. Po wprowadzeniu siły sprężającej obserwuje się natomiast większy wzrost sił przyczepności w mieszankach liaporowych, które posiadają większy wpływ na zależne od wydłużeń poprzecznych zachowanie się przyczepności.

- Wpływ otuliny betonowej

Badania bez zwolnienia naciągu wykazały możliwość przeniesienia większych sił przyczepności przy większych otulinach betonowych ( $c = 5,5 \cdot d_p$ ). Po wprowadzeniu siły sprężającej siły przyczepności osiągały większe wartości przy otulinie  $c = 5 \cdot d_p$  niż przy  $c = 5,5 \cdot d_p$ , co pokrywa się z badaniami na betonie normalnym.

Jak w betonie normalnym otulina betonowa równa  $c = 5,75 \cdot d_p$  okazała się niewystarczająca, by zapobiec tworzeniu się rys rozłupujących w elemencie o uźebrowanym drucie sprężającym niezależnie od receptury mieszanki betonowej i zmian naprężenia stali sprężającej.

### 3.4.4 Weryfikacja metod typu pull-out

#### 3.4.4.1 Logan

Logan [95] przeprowadzał badania potwierdzające wystarczającą jakość przyczepności betonu do stali sprężającej z uwagi na występowanie splotów sprężających o powierzchni charakteryzującej się obniżonymi właściwościami przyczepności. Zastosowanie splotów z sześciu różnych źródeł na terenie USA miało zapewnić reprezentatywność wyników. Średnia maksymalna wartość siły wyciągającej sploty pochodzące z czterech źródeł (na sześć badanych) zawierała się w przedziale od 164 kN do 185 kN. Średnia maksymalna wartość siły wyciągającej sploty pochodzące z dwóch pozostałych źródeł zawierała się w przedziale od 49,8 kN do 47,6 kN.

Otrzymane wyniki badań korespondowały z wynikami otrzymanymi przez S. Moustafa (1974) tylko dla splotów o dobrej przyczepności. Dla tych przypadków porównanie wyników z testów pull-out z zachowaniem się splotów na końcu poślizgu i badaniem belek na zginanie, wykazało długości transmisji i długości zakotwienia niższe niż obliczone wg ACI 318-95, w związku z czym Logan zaproponował obniżenie minimalnej wartości siły wyciągającej ze 170 kN (proponycja Mostafy) do 160 kN.

Zdaniem autorów badań, proste badania nienaciągniętych splotów okazało się bardziej skuteczne niż badanie naciągniętych splotów, ale nie uzyskano dobrej korelacji między metodą pull-out a długością transmisji. Badanie naciągniętych splotów metodą pull-out okazało się trudne do przygotowania i przeprowadzenia, a otrzymane wyniki nie były stabilne. We wnioskach końcowych stwierdzono, że prosta metoda pull-out badania nienaciągniętych splotów (metoda Logana) w dalszym ciągu nie jest niezawodnym wskaźnikiem (metodą badań) przyczepności.

Przed każdym badaniem pull-out Logan rejestrował takie czynniki jak kolor splotu, osad na splocie, rdzę i skok uzwojenia zewnętrznych drutów. Ponieważ nie uzyskał silnej korelacji między którymkolwiek z wymienionych czynników a nośnością na wyciąganie splotu, Logan doszedł do wniosku, że żaden z tych wymienionych czynników nie może być traktowany jako pewny wskaźnik przyczepności.

#### 3.4.4.2 Larson, Peterman i Esmaily (2007)

Larson, Peterman i Esmaily [93] przeprowadzili badania doświadczalne zmierzające do określenia przyczepności betonów samozagęszczalnych do splotów sprężających oraz w celu sprawdzenia, czy wzory ACI i AASHTO na długość transmisji są zachowane.

Do określenia przyczepności zastosowano metodę LBPT betonując sploty w "mieszance Logana" jak również w blokach z zastosowaniem betonów samozagęszczalnych, z których miały być wykonane belki strunobetonowe. Sploty badane w "mieszance Logana" spełniły stawiane wymagania, bowiem średnia siła wyciągająca wynosiła 176 kN (wartość minimalna 160 kN). Średnia siła wyciągająca splot z bloku na betonie samozagęszczalnym wynosiła 100 kN.

### **3.4.4.3 Ramires i Russell (2008)**

Ramires i Russell [132] badali przyczepność, długość transmisji i długość zakotwienia splotów sprężających o średnicy 12,7 i 15,2 mm w betonach wysokiej wytrzymałości. Głównym celem podjętego programu badawczego było zbadanie wpływu wytrzymałości betonu na przyczepność do splotów i rewizja (poprawa) wzorów AASHTO na długość transmisji i zakotwienia.

Przeprowadzono również zmodyfikowane badania NASP dla betonu w celu określenia w jakim stopniu wytrzymałość betonu wpływa na zachowanie się przyczepności betonu do splotu.

Po przeanalizowaniu otrzymanych wyników Ramirez i Russell stwierdzili, że wzrastająca wytrzymałość betonu polepsza zachowanie się przyczepności. Wartości sił wyciągających "pull-out" w zmodyfikowanej metodzie NASP dla betonu wzrastały wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu, a elementy wykonane z betonu wysokiej wytrzymałości wykazywały krótsze długości transmisji.

Jeśli chodzi o przyczepność to wyniki otrzymane z tych badań doświadczalnych wykazały, że badania wg metody NASP na zaprawie są dobrym wskaźnikiem zachowania się (oceny) przyczepności. Wyniki otrzymane z badań pull-out wg metody NASP z zastosowaniem zaprawy są dobrze skorelowane z długością transmisji i długością zakotwienia. W raporcie końcowym Ramirez i Russell zaproponowali nowe zależności pozwalające określić długość transmisji i długość zakotwienia, które uwzględniają wytrzymałość betonu. Ponadto badacze zalecili uznanie metody badawczej NASP jako metody normowej do określenia przyczepności splotu i uznanie jej jako metody kontroli jakości przyczepności splotów. Propozycje te nie zostały oficjalnie wprowadzone do normy AASHTO.

### **3.4.4.4 Pozolo i Andrawes (2011)**

Pozolo i Andrawes [129] prowadzili badania doświadczalne w celu określenia wpływu betonów samozagęszczalnych na przyczepność i długość transmisji w stosunku do splotów o średnicy 12,7 mm. Do oceny przyczepności betonu zastosowano metodę Logana (LBPT). Wykonano dwa bloki o wymiarach 610 mm x 610 mm x 1676 mm z betonu samozagęszczalnego i betonu normalnie zagęszczonego. W każdym z nich osadzono po 14 splotów. Badania polegające na wyciąganiu splotów przeprowadzono po 1, 3, 7 i 28 dniach rejestrując nieliniową zależność siła - poślizg oraz maksymalną siłę wyciągającą splot. Wyniki otrzymane dla obu mieszanek betonowych były porównywalne.

### **3.4.4.5 NASP i LBPT**

W wyniku prowadzonych równoległych badania metodą LBPT i NASP [108] w celu dokonania oceny większej użyteczności, należy stwierdzić, że wynikające z badań współczynniki zmienności niewiele się różnią między sobą, na poziomie 1 - 2 %. Oznacza to, że obie metody są porównywalne w kategorii zgodności wyników. Oceniając obie metody w kategoriach absolutnej przyczepności i odrzucenia lub akceptacji splotów w oparciu o postawione ograniczenia, można stwierdzić, że metoda NASP zaakceptowała sploty od trzech producentów natomiast metoda LBPT tylko od jednego producenta.

Żadna z analizowanych metod tzn. NASP i LBPT nie są w pełni wiarygodne określenia oceny przyczepności betonu do splotów sprężających. Przyjęte w nich ograniczenia, których spełnienie warunkuje zastosowanie splotu do produkcji elementów strunobetonowych winny być udoskonalone. Należy przeprowadzić dalsze badania przyczepności i długości transmisji, aby się upewnić, czy istnieje możliwość podniesienia minimalnych wartości sił wyciągających w metodzie NASP i obniżenia minimalnych wartości sił wyciągających w metodzie LBPT.

W metodzie NASP, jak wynika z badań, proporcje składników w zaprawie mają znaczący wpływ na wartość sił wyciągających splot. Mniejsza ilość piasku obniża skuteczność mechanicznego zazębienia

się, co powoduje spadek siły wyciągającej. Wynika stąd, że w procedurze wykonania próbek, poza wytrzymałością na ściskanie i przepływem zaprawy należy określić ilość piasku.

Należy rozważyć możliwość dokonywania oceny przydatności splotu na podstawie kształtu krzywej siła wyciągająca - poślizg splotu. Sploty, dla których w metodzie NASP krzywa poniżej poślizgu 2,54 mm ma przebieg płaski lub opada, zamiast wykazywać tendencję wzrostu, powinny być odrzucone pomimo spełnienia kryterium minimalnej wartości siły wyciągającej.

Długość transmisji maleje wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu na ściskanie. Ponadto długość transmisji rośnie w czasie. Z przeprowadzonych badań wynika, że największy przyrost długości transmisji rzędu 20 % odnotowano w okresie czterech dni od zwolnienia naciągu. W późniejszym okresie do 28 dni, przyrost długości transmisji wynosi średnio 5 - 10 %. Większe długości transmisji zanotowano od końca elementu, przy którym nastąpiło zwolnienie naciągu.

W związku z faktem, że wzrost wytrzymałości betonu na ściskanie powoduje spadek długości transmisji i wzrost siły wyciągającej w metodzie NASP, wytrzymałość betonu ma wpływ na przyczepność, a zatem równanie na długość transmisji powinno być zależne od wytrzymałości betonu na ściskanie.

Z uwagi na fakt, że wartości wślizgów splotów po zwolnieniu naciągu, wyznaczone za pomocą potencjometru liniowego nie są wiarygodne, a za pomocą taśmy mierniczej nieprecyzyjne, długości transmisji wyznaczone na podstawie pomiarów odkształceń betonu przy zastosowaniu czujnika nasadowego DEMEC wg 95% *Average Mean Strain Method* są stabilne i wiarygodne. Do pomiaru wartości wślizgów splotów należy opracować bardziej precyzyjną metodę np. z wykorzystaniem suwmiarki.

*Ramirez i Russell* [132] zaproponowali zależność na obliczanie długości transmisji, w której otrzymane wartości są mniej zachowawcze w stosunku do wzoru AASHTO, ale uwzględnia się w niej poza średnicą splotu, wytrzymałość betonu na ściskanie (3.17)

$$L_t = 120 \cdot \frac{d_b}{\sqrt{f'_{ci}}} \geq 40 \cdot d_b \quad (3.17)$$

gdzie :  $d_b$  - nominalna średnica splotu (cale)  
 $f'_{ci}$  - wytrzymałość betonu na ściskanie określana na walcach w chwili zwolnienia naciągu [ksi]

Przy wytrzymałości betonu 27,6 MPa ( $f'_{ci} = 4$  ksi), zależność przyjmuje postać wzoru normowego AASHTO

$$L_t = 60 \cdot d_p \quad (3.18)$$

Obliczona wg wzoru (3.17) długość transmisji nie zawsze jest zachowawcza w stosunku do długości transmisji wyznaczonej doświadczalnie na końcu elementu, przy którym nastąpiło zwolnienie naciągu (strona czynna).

## 4 DŁUGOŚĆ TRANSMISJI SIŁY NACIĄGOWEJ

Poniżej zestawiono istniejące regulacje normatywne krajowe i międzynarodowe odnośnie do transmisji siły naciągowej cięgien sprężających w elementach strunobetonowych. Oznaczenia występujące we wzorach zawartych w tym rozdziale zostały dopasowane do obecnie obowiązującej normy EC-2 [N10]. Oryginalny zapis jest podany w klamrach kwadratowych. Niektóre normy w tym również *Model Code 1990* [N4], która jest dokumentem źródłowym dla europejskich norm wydanych przez *Comité Euro-International du Béton* (CEB) i nie jest aktualna z chwilą opublikowania *Model Code 2010* [N9], zostały przytoczone w niniejszej pracy. Analizując tendencje rozwojowe w odniesieniu do pewnych zagadnień np. długość transmisji, zasadne jest przedstawienie ewolucji pewnych wzorów czy też zależności, które w kolejnych edycjach są nieznacznie korygowane ewentualnie pozostawione bez zmian.

### 4.1 Długość transmisji wg wybranych norm [149]

#### 4.1.1 CEB-FIP MODEL CODE 1990 [N4]

##### 4.1.1.1 Naprężenia przyczepności

Naprężenie przyczepności  $f_{bpd}$  jest w MC 90 zdefiniowane w postaci:

$$f_{bpd} = \eta_{p1} \cdot \eta_{p2} \cdot f_{ctd} \quad (4.1)$$

gdzie:

$\eta_{p1}$	=	1,4	dla uźebrowanych prętów, drutów
	=	1,2	dla 7-drutowych splotów
$\eta_{p2}$	=	1,0	- dla cięgien sprężających o nachyleniu 45° – 90° względem poziomu podczas betonowania
			- dla poziomych cięgien sprężających, które znajdują się w odległości $\leq 250$ mm od krawędzi dolnej lub $\geq 300$ mm od powierzchni górnej w elemencie
	=	0,7	dla wszystkich innych przypadków
$f_{ctd}$	=	$f_{ctk0,05}/1,50$	- obliczeniowa wytrzymałość betonu na rozciąganie osiowe

W celu wyznaczenia długości transmisji należy wstawić wytrzymałość betonu na rozciąganie w chwili wprowadzeniu siły sprężającej, a przy wyznaczeniu długości zakotwienia wytrzymałość na rozciąganie po 28 dniach.

W przypadku projektowania konstrukcji z betonu sprężonego ważna jest znajomość wytrzymałości betonu na ściskanie w chwili zwolnienia naciągu. Do określenia jej rozwoju w funkcji czasu podano zależność, która jest również aktualna w *Model Code 2010* [N9].

Na podstawie naprężeń przyczepności  $f_{bpd}$  ze wzoru (4.1) oblicza się podstawową długość zakotwienia  $l_{bp}$  (4.2)

$$l_{bp} = \frac{A_{sp}}{d_p \cdot \pi} \cdot \frac{f_{pd}}{f_{bpd}} \quad [l_{bpt} = \frac{A_{sp}}{\varphi \cdot \pi} \cdot \frac{f_{pd}}{f_{bpd}}] \quad (4.2)$$

gdzie:  $f_{pd}$  =  $f_{pk}/1,15$   
 $f_{pk}$  = wytrzymałość na rozciąganie stali sprężającej  
 $A_{sp}/\pi \cdot d_p$  =  $d_p/4$  dla drutów okrągłych  
 =  $7 \cdot d_p/36$  dla 7-drutowych splotów

#### 4.1.1.2 Długość transmisji

Długość transmisji została zdefiniowana równaniem:

$$l_{bpd} = \alpha_8 \cdot \alpha_9 \cdot \alpha_{10} \cdot l_{bp} \cdot \sigma_{pm0} / f_{pd} \quad [l_{bpt} = \alpha_8 \cdot \alpha_9 \cdot \alpha_{10} \cdot l_{bp} \cdot \sigma_{pt} / f_{pd}] \quad (4.3)$$

gdzie:  $\alpha_8$  = 1,0 przy stopniowym wprowadzeniu sprężenia  
 = 1,25 przy nagłym wprowadzeniu sprężenia  
 $\alpha_9$  = 1,0 przy obliczeniach nośności momentów i sił poprzecznych  
 = 0,5 przy obliczeniach naprężeń poprzecznych na czole strefy zakotwienia  
 $\alpha_{10}$  = 0,5 dla splotów  
 = 0,7 dla uźebrowanych drutów  
 $\sigma_{pm0}$  = naprężenia w stali sprężającej po stratach doraźnych, bezpośrednio przed wprowadzeniem siły sprężającej  
 $f_{pd}$  =  $f_{pk} / \gamma_p$  granica plastyczności stali sprężającej  $f_{pk}$  zredukowana o częściowy współczynnik bezpieczeństwa

#### 4.1.2 DIN 1045-1 [N6, N7]

Norma *DIN 1045-1* zawiera regulacje dotyczące wymiarowania i konstruowania betonu niezbrojonego, betonu normalnego i lekkiego, zbrojonego zbrojeniem zwykłym i sprężającym. Właściwości, wymagania, produkcja, próby wytrzymałościowe i certyfikacja betonu, zostały niezależnie potraktowane w *DIN 1045-2*. Wykonanie betonowych konstrukcji nośnych zostało uregulowane w *DIN 1045-3*. *DIN 1045-1*, wydanie z lipca 2001 oraz z sierpnia 2008, rozróżnia długość transmisji, dyspersji i zakotwienia w obliczeniach wprowadzenia siły sprężającej.

We wzorze na długość transmisji występuje wartość naprężenia w stali sprężającej  $\sigma_{pm0}$  po zwolnieniu naciągu. Naprężenie przyczepności  $f_{bp}$  jest podane w zależności od wytrzymałości betonu na ściskanie.

$$l_{bp} = \alpha_1 \frac{A_p}{\pi \cdot d_p} \cdot \frac{\sigma_{pm0}}{f_{bp} \cdot \eta_1} \quad (4.4)$$

gdzie:  $\alpha$  = 1,0 przy stopniowym wprowadzeniu sprężenia  
 = 1,25 przy nagłym wprowadzeniu sprężenia  
 $\eta_1$  = 1,0 dla betonu normalnego  
 =  $0,4 + 0,6 (\rho/2200)$  dla betonu lekkiego gdzie  $\rho$  w  $[\text{kg}/\text{m}^3]$

$A_p$	=	przekrój nominalny splotu lub drutu
$d_p$	=	średnica nominalna splotu lub drutu
$\sigma_{pm0}$	=	naprężenia w stali sprężającej po wprowadzeniu siły sprężającej (po stratach doraźnych)
$f_{bp}$	=	naprężenie przyczepności według tabeli w normie

Naprężenie przyczepności według tabeli normowej dotyczy splotów o  $A_p \leq 150 \text{ mm}^2$  i drutów o  $d_p \leq 8,0 \text{ mm}$ . Stosując uźebrowane pręty o średnicy  $d_p \leq 12,0 \text{ mm}$  należy wartości naprężenia przyczepności określić na podstawie danych doświadczalnych. Jako przybliżenie można stosować wartości z tabeli w normie DIN [N7].

Wartość obliczeniową długości transmisji wyznacza się według równania

$$l_{bpd} = \{0,8 \cdot l_{bp}; 1,2 \cdot l_{bp}\} \quad (4.5)$$

przy czym miarodajna jest wartość mniej korzystna.

#### 4.1.3 PN-EN 1992-1-1:2008 [N10]

Długość transmisji  $l_{pt}$  jest to długość, na której siła zostaje w pełni przekazana z cięgien na beton. Podstawową wartość długości transmisji określa wzór:

$$l_{pt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \phi \cdot \sigma_{pm0} / f_{bpt} \quad (4.6)$$

gdzie:	$\alpha_1$	=	1,0 przy stopniowym zwalnianiu naciągu 1,25 przy nagłym zwalnianiu naciągu
	$\alpha_2$	=	0,25 dla cięgien o kołowym przekroju poprzecznym 0,19 dla splotów trzydrutowych i siedmiodrutowych
	$\phi$	=	średnica nominalna cięgien
	$\sigma_{pm0}$	=	naprężenie w cięgnię natychmiast po zwolnieniu naciągu
	$f_{bpd}$	=	jest wytrzymałością ze względu na przyczepność określoną wzorem:

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \cdot \eta_1 \cdot f_{cta}(t) \quad (4.7)$$

gdzie:	$\eta_{p1}$	=	2,7 dla drutów nagniatanych 3,2 dla splotu siedmiodrutowego
	$\eta_1$	=	zależy od warunków przyczepności = 1,0 przy dobrych warunkach przyczepności = 0,7 w innych przypadkach
	$f_{cta}(t)$	=	wytrzymałość obliczeniowa betonu na rozciąganie osiowe w momencie zwolnienia naciągu

#### 4.1.4 ACI 318-02 [N3]

ACI 318-02 jest miarodajną amerykańską normą dotyczącą żelbetu i betonu sprężonego. Różni się ona w wielu szczegółach od norm europejskich. W celu obliczenia zakotwienia cięgien sprężających w elementach strunobetonowych podany jest w ACI 318-02 wzór na długość zakotwienia dotyczący zarówno drutów jak i splotów. Poniższe równanie jest uzupełnione współczynnikiem, który uwzględnia transformację jednostek w system metryczny:

$$l_{ba} = \frac{\sigma_{p0}}{21} \cdot d_p + \frac{1}{7} \cdot (f_{pd} - \sigma_{pm0}) \cdot d_p \quad (4.8)$$

oryginalny zapis:  $[l_d = (\frac{f_{se}}{3000}) \cdot d_b + (\frac{f_{ps} - f_{se}}{1000}) \cdot d_b]$  (4.9)

gdzie:	$l_{ba}$	=	długość zakotwienia
--------	----------	---	---------------------

$\sigma_{pm0}$	=	efektywne naprężenia w stali sprężającej po stratach doraźnych [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{pd}$	=	charakterystyczna wartość umownej 0,1% granicy plastyczności stali sprężającej podzielona przez współczynnik częściowy stali sprężającej
$d_p$	=	średnica nominalna stali sprężającej

Długość zakotwienia  $l_{ba}$  składa się z dwóch części, przy czym pierwszy człon wzoru opisuje długość transmisji  $l_{ba}$  cięgna sprężającego:

$$l_{bp} = \frac{\sigma_{pm0}}{21} \cdot d_p \quad (4.10)$$

Drugi człon definiuje dodatkową długość, na którym to odcinku naprężenie w stali sprężającej zwiększa się liniowo, aż do osiągnięcia granicy plastyczności:

$$l_{\Delta} = \frac{1}{7} \cdot (f_{pd} - \sigma_{pm0}) \cdot d_p \quad (4.11)$$

Jeżeli na długości transmisji wystąpią rysy, należy ją przedłużyć o 50  $d_p$  w przypadku splotów i o 100 $d_p$  w przypadku drutów.

#### 4.1.5 MC 2010 Model Code 2010 [N9]

##### 4.1.5.1 Uwagi wstępne

Wytrzymałość przyczepności cięgien sprężających zależy od przypadku obciążenia. Największa wartość odpowiada długości transmisji tj. długości potrzebnej do wprowadzenia siły naciągowej. Poza tą długością należy brać pod uwagę niższe wartości wytrzymałości przyczepności. Wynikiem tego jest potrzeba stosowania dwuliniowego wykresu długości zakotwienia, która jest konieczna do osiągnięcia obliczeniowego naprężenia w stali.

Należy uwzględnić dwa przypadki przyczepności ze względu na poprzeczną deformację cięgien. Dla „ciągien wciskanych” wzdłuż długości transmisji, gdzie cięgna stają się grubsze w chwili zwolnienia naciągu i cięgien „wrywanych”, na długości zakotwienia gdzie, przeciwnie, naprężenie w stali wzrasta podczas obciążania.

##### 4.1.5.2 Obliczeniowa wytrzymałość przyczepności

Obliczeniowa wartość wytrzymałości przyczepności dla cięgien sprężających wyraża się wzorem:

$$f_{bpd} = \eta_{p1} \eta_{p2} f_{cta} \quad (4.12)$$

gdzie:

$f_{cta} = f_{ctk}(t)/1,5$  jest minimalną obliczeniową wytrzymałością betonu na rozciąganie osiowe;  
dla długości transmisji w chwili przekazania siły sprężającej,  
dla długości zakotwienia wytrzymałością 28-dniową;

$\eta_{p1}$  współczynnik uwzględniający rodzaj cięgien sprężających:

$\eta_{p1} = 1,4$  dla nagniatanych drutów;

$\eta_{p1} = 1,2$  dla splotów 7-drutowych;

$\eta_{p2}$  współczynnik uwzględniający położenie cięgien:

$\eta_{p2} = 1,0$  dla wszystkich cięgien, które są odgięte pod kątem 45°-90° lub wszystkie cięgna poziome, które są położone co najwyżej 250 mm od dołu lub co najmniej 300 mm od góry przekroju betonowego podczas betonowania

$\eta_{p2} = 0,7$  dla wszystkich innych przypadków.



#### 4.1.5.3 Podstawowa długość zakotwienia

Podstawowa długość zakotwienia określa długość, która jest wymagana do osiągnięcia pełnej wytrzymałości w ciągnięciu. Podstawowa długość zakotwienia pojedynczego cięgna sprężającego wynosi:

$$l_{bp} = \frac{A_{sp} f_{pta}}{\phi \pi f_{bpd}} \quad (4.13)$$

gdzie:

$f_{pta} = \frac{f_{ptk}}{1,15}$ , a  $f_{ptk}$  jest charakterystyczną wytrzymałością na rozciąganie zbrojenia sprężającego.

Mnożnik  $\frac{A_{sp}}{\phi \pi}$  zależy od rodzaju cięgien:

$$\frac{A_{sp}}{\phi \pi} = \frac{\phi}{4} \text{ dla cięgien o przekroju okrągłym;}$$

$$\frac{A_{sp}}{\phi \pi} = \frac{7}{36} \phi \text{ dla splotów 7-drutowych.}$$

#### 4.1.5.4 Długość transmisji

Długość transmisji cięgien sprężających wynosi:

$$l_{bpt} = \alpha_{p1} \alpha_{p2} \alpha_{p3} l_{pb} \frac{\sigma_{pi}}{f_{pta}} \quad (4.14)$$

gdzie:  $\sigma_{pi}$  naprężenie w stali sprężającej zaraz po zwolnieniu naciągu,

$\alpha_{p1}$  współczynnik uwzględniający sposób zwolnienia naciągu:

$\alpha_{p1} = 1,0$  dla stopniowego zwalniania naciągu;

$\alpha_{p1} = 1,25$  dla nagłego zwolnienia naciągu;

$\alpha_{p2}$  współczynnik uwzględniający rozważane sytuacje obliczeniowe:

$\alpha_{p2} = 1,0$  dla obliczeń długości zakotwienia z uwzględnieniem momentu i siły poprzecznej

$\alpha_{p2} = 0,5$  przy sprawdzaniu naprężeń poprzecznych w strefie zakotwienia wywołanych sprężeniem;

$\alpha_{p3}$  współczynnik uwzględniający wpływ jakości przyczepności:

$\alpha_{p3} = 0,5$  dla splotów płaskich;

$\alpha_{p3} = 0,7$  dla splotów i nagniatanych drutów.

Użycie blisko rozmieszczonych strzemion lub zwojów wokół cięgien i poprzecznego sprężenia może powodować skrócenie długości transmisji. Fakt ten nie jest uwzględniony z powodu braku danych doświadczalnych.

Zwolnienie cięgna realizowane przez przecięcie betonu i stali powinno być kwalifikowane jako stopniowe zwalnianie.

Długość transmisji może być oszacowana z wartości wślizgu ( $\delta_e$ ) cięgna na licu elementu betonowego. Jednakże, kiedy element betonowy jest odcinany z dłuższego elementu w produkcji, poślizg nie może być oszacowany dokładnie. Zakładając liniowy rozkład naprężeń w stali wzdłuż długości transmisji wartość poślizgu może być wyrażona wzorem:

$$\delta_e = 0,5 \frac{\sigma_{pi}}{E_p} l_{bpt} \quad (4.15)$$

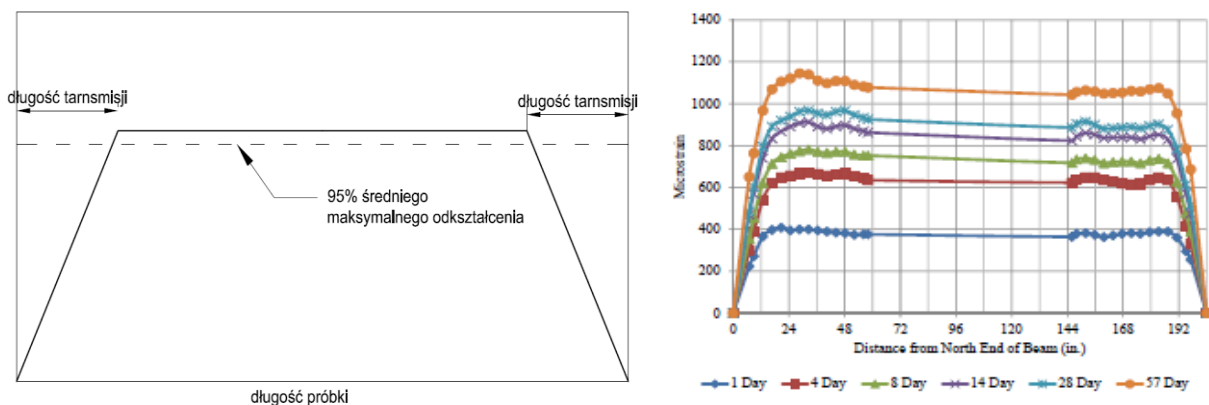
gdzie:  $\alpha_{p2} = 1,0$  w równaniu na  $l_{bpt}$  (4.14);  $E_p$  jest modułem sprężystości stali sprężającej.

## 4.2 Metodyka badań

Ze względu na złożoność zjawiska przyczepności opracowanie metody uwzględniającej jego całokształt jak również konieczność rozróżnienia wpływu poszczególnych czynników jest zadaniem niezwykle trudnym. Na przestrzeni lat naukowcy z różnych ośrodków próbowali stawić czoła wyzwaniu opracowania metody odwzorowującej rzeczywiste warunki współpracy betonu i zbrojenia sprężającego. Ich trud zaowocował kolejnymi procedurami nierzadko udoskonalanymi przez kontynuatorów.

### 4.2.1 Metoda pomiaru podłużnego odkształcenia betonu / Metoda maksymalnego 95%-owego średniego odkształcenia (95% AMS)

Doświadczalne określanie długości transmisji w elemencie strunobetonowym najczęściej odbywa się przez pomiar podłużnego odkształcenia zewnętrznej powierzchni betonu. Jeszcze przed przyłożeniem naprężeń (zwolnieniem naciągu) elektryczne lub mechaniczne mierniki naprężenia są mocowane wzdłuż cięgien sprężających lub pomiar następuje za pomocą czujnika nasadowego. Zarejestrowane w badaniach wartości odkształceń w różnych odległościach od końców belki są podstawą do wyznaczenia przebiegu funkcji. Długość transmisji wyznaczana jest z krzywej jako odległość początku nachylenia wykresu do punktu przecięcia z prostą poziomą określającą 95% (niektórzy naukowcy preferują wartość 100%) średniego odkształcenia na odcinku przebiegającym w przybliżeniu poziomo (rys. 4.1). Metoda została opracowana przez *B. Russella* i *N. H. Burnsa* podczas prowadzonych badań (1996) [145]. Pobieranie odczytów odkształceń odbywa się na bocznej powierzchni w przypadku belek, natomiast w płycie na powierzchni górnej. Metoda odczytów i obróbka danych ma kluczowe znaczenie.

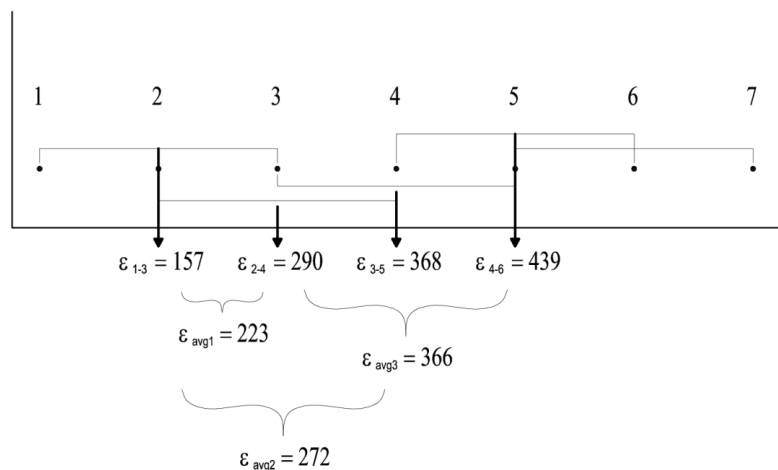


Rys. 4.1 Wyidealizowana zależność pomiędzy odkształceniem betonu i długością próbki (po lewej) i typowy wykres uzyskany doświadczalnie [108] (po prawej)

W celu zminimalizowania błędu odczytu na zewnętrznych powierzchniach betonu wykonanych tensometrami elektrooporowymi *Bruce Russell*, *Ned H. Burns* przyjęli zasadę prowadzenia odczytów przez dwie niezależne osoby oraz na dwóch stronach elementu, przy czym tolerowane były bez powtórzeń różnice odczytów do 0,000032 cala/cal. Uzyskane cztery wyniki były podstawą do utworzenia średniej arytmetycznej i kwalifikowane jako wartość "czysta". W analizie wyników zastosowano **metodę "wyczyszczenia" danych**. Pierwszy stopień przeprowadzono przy uśrednianiu odczytów z czterech wartości. Następnym krokiem ograniczenia nieprawidłowości wyników było wyznaczenie średniej z trzech badań na podstawie wzoru (4.16), a wyznaczone w ten sposób dane konsekwentnie stosowano przy przeprowadzonej analizie wyników.

$$(\text{odkształcenie})_x = \frac{(\text{odkształcenie})_{x-1} + (\text{odkształcenie})_x + (\text{odkształcenie})_{x+1}}{3} \quad (4.16)$$

Do odczytywania odkształceń przy pomocy czujnika nasadowego DEMEC najlepiej nadaje się przyrząd o bazie pomiarowej 200 mm z uwagi na niejednorodność materiału jakim jest beton. Pomiaru pobierane co 50 mm są jednak bardziej dokładne i raporcie [108] przedstawiono metodę polegającą na odczytach odkształceń czujnikiem nasadowym o większej bazie jednak odniesionym do krótszych odcinków 100 mm. W celu określenia długości transmisji, na bocznych powierzchniach wszystkich belek naklejono repery służące do rejestracji odkształceń za pomocą czujnika nasadowego typu DEMEC. Repery stabilizowano w osi splotów tj. 50,8 mm od spodu belki i 50,8 mm od górnej krawędzi belki. Pierwszy reper naklejono w odległości 25 mm od każdego końca i dalej co 100 mm na długości 1,52 m. Autorzy badań dysponowali czujnikiem nasadowym o bazie pomiarowej 200 mm. Pomiaru wykonano kolejno między reperami nieparzystymi 1 - 3, 3 - 5, 5 - 7, ... a następnie parzystymi 2 - 4, 4 - 6, 6 - 8, ... . W celu przedstawienia rozkładu odkształceń betonu na długości transmisji w postaci wygładzonej co 100 mm, obliczono średnie wartości odkształceń z trzech kolejnych pomiarów np. 1 - 3, 3 - 5 i 2 - 4 (rys. 4.2). Ostatnie punkty na długości transmisji z obu końców belek połączono linią prostą. Przykładowy rozkład określonych w ten sposób odkształceń betonu w osi dolnych splotów, w kolejnych dniach pomiarowych, przedstawiono na rys 4.2.



Rys. 4.2 Metoda pomiarów odkształceń na zewnętrznych powierzchniach elementu.

Podobną metodę pomiaru odkształceń na zewnętrznej powierzchni betonu za pomocą czujnika nasadowego typu DEMEC zastosował Oh [120] w kompleksowych badaniach długości transmisji. Na całej długości belki naklejono na wysokości splotu repery w odstępie co 50 mm służące do pomiaru odkształceń betonu, a zastosowany czujnik o bazie pomiarowej 150 mm przykładany był z przesunięciem co 50 mm. Ponadto pomiar pobierany był dwukrotnie w celu zminimalizowania błędów.

#### 4.2.2 Pomiar wślizgu końca cięgna

Równie często stosowana jest metoda pomiaru końcowego poślizgu cięgna w sprężanej próbce. Według teorii Guyona długość transmisji  $l_t$  jest liniowo proporcjonalna do wielkości końcowego poślizgu cięgna  $\delta$  przy zwolnieniu siły sprężającej na torze naciągowym i odwrotnie proporcjonalna do wstępnego odkształcenia cięgna  $\epsilon_{si}$  i określona wzorem:

$$l_t = \alpha \frac{\delta}{\epsilon_{si}} \quad (4.17)$$

Propozycje odnośnie współczynnika  $\alpha$  opierają się na badaniach eksperymentalnych i teoretycznych rozważaniach, a dyskusje wokół jego wartości toczą się między różnymi naukowcami. Najczęściej przyjmuje wartości z przedziału od 2 do 3.

Metodę pomiaru wślizgu końca splotu zastosował Logan (1997) [95]. W celu przebadania długości transmisji i długości zakotwienia wykonano sześć belek o długości 27,4 m (90 stóp) o poprzecznym przekroju 165 x 305 mm sprężonych jednym splotem zlokalizowanym w odległości 50,8 mm od dolnej krawędzi, które pocięte na pięć równych części dawały elementy badawcze o długości 5,49 m. W ten sposób stworzono możliwość przebadania w sumie 60 długości transmisji.

Podczas badań mierzono wślizgi końców splotów do betonu po zwolnieniu naciągu oraz po 7, 14 i 21 dniach, a następnie otrzymane wartości wykorzystano do obliczenia długości transmisji stosując wzór:

$$\Delta = \frac{PL}{AE} = fL/E \quad (4.18)$$

lub:

$$\Delta = \text{avg}f_{si}L_{tr}/E_{ps} \quad (4.19)$$

gdzie:

$\Delta$  - zmierzona wartość poślizgu (cal),

$\text{avg}f_{si}$  – średnie początkowe naprężenie w cięgnię, na długości transmisji, po zwolnieniu naciągu (ksi)

$L_{tr}$  - długość transmisji (cal)

$E_{ps}$  - moduł sprężystości cięgna, (ksi)

Przy założeniu prostoliniowej zmiany naprężeń w cięgnię od zera na końcu belki do pełnego poziomu naprężeń wstępnych na długości transmisji  $L_{tr}$ , poślizg cięgna może być wyrażony w warunkach redukcji naprężeń w cięgnię z powodu zwolnienia naprężeń wstępnych:

$$\Delta = 0,5f_{si}L_{tr}/E_{ps} \quad (4.20)$$

a długość transmisji w oparciu o poślizgu końca równa jest:

$$L_{tr} = \Delta E_{ps}/(0,5f_{si}) \quad (4.21)$$

Obliczone w ten sposób długości transmisji porównano z długościami transmisji obliczonymi wg normy ACI 318-95 [N3], a różnice wahały się w granicach od -56% do +83% w przypadku pomiarów bezpośrednio po zwolnieniu naciągu oraz w przedziale od -41% do +100% po 21 dniach. Odnotowano również prawie we wszystkich przypadkach wzrost długości transmisji po 21 dniach. Końce belek badano na zginanie przy różnych długościach zakotwienia i obserwowano, czy zniszczenie nastąpiło w wyniku zginania czy też przez utratę przyczepności. Na podstawie badania długości transmisji obliczonych z poślizgu splotów z obliczonymi i aktualnym momentem niszczącym stwierdzono, że opracowana przez Masta teoria poślizgu splotu pozwala dokładnie przewidzieć, która belka zniszczy się przez utratę przyczepności, a która przez utratę nośności na zginanie.

#### 4.2.3 Metoda pomiaru odkształcenia splotów na jego długości

Metoda pomiaru odkształcenia splotów polega na zainstalowaniu tensometrów elektrooporowych na pojedynczych drutach splotu i dokonaniu odczytów. Tę metodę w ramach kompleksowych badań długości transmisji zastosował Oh [120], przy czym naciąg splotów realizowano indywidualnie do osiągnięcia docelowego naprężenia  $0,75f_{pu}$ , a pomiar siły w splotcie realizowano za pomocą siłomierza umieszczonego pod zakotwieniem biernym.

#### 4.2.4 Zniszczenie belek siłą skupioną

Najczęściej wyznaczenie długości transmisji i dyspersji w cięgnach sprężających odbywa się przez pomiar podłużnego odkształcenia betonu na powierzchni badanego elementu oraz przez pomiar końcowego poślizgu cięgna w sprężanym próbcie. Te procedury nie uwzględniają jednak zniszczenia belek siłą skupioną w różnej odległości od podpór i testów pull-out, które to badania determinują również wyznaczenie obydwóch długości [103].

Badanie wytrzymałości na zginanie polega na przyłożeniu siły skupionej po zwolnieniu naciągu cięgna w trzy lub czteropunktowym schemacie obciążenia, gdzie zmienną jest odległość od końca belki do punktu występowania maksymalnego momentu. Badanie ma na celu wyznaczyć relacje między długością transmisji a długością zakotwienia zdefiniowaną w myśl amerykańskiej normy [N3]. Zaobserwowany znaczny poślizg cięgna świadczący o utracie przyczepności przemawia za długością zakotwienia mniejszą niż wymagana długość dyspersji w belce. W przeciwnym przypadku zniszczenie nastąpi pod wpływem siły zginającej bez uszkodzenia zakotwienia.

#### 4.2.5 Metoda mieszana

Często w badaniach wykorzystuje się kilka metod w celach porównawczych. Jest to również procedura pozwalająca zweryfikować zastosowane metody badawcze w aspekcie ich przydatności i wiarygodności.

##### 4.2.5.1 *Bruce Russell, Ned H. Burns (1996) [145]*

Punktem wyjścia wyznaczenia długości transmisji był pomiar zmian długości między punktami pomiarowymi, z którego wyznaczone zostały odkształcenia betonu odzwierciedlające zmiany naprężeń. Zastosowano mechaniczne czujniki typu DEMEC o dokładności 20 do 30 mikroadkształceń ( $\pm 20$  do  $\pm 30 \times 10^6$  cala/cal), a długość pomiarowa wynosiła 200 mm (7,87 cala). Opracowana procedura badawcza pozwoliła na zebranie następujących danych:

- odkształcenia na powierzchni betonu;
- poślizg splotu w zakotwieniu;
- odczyty z elektrycznych tensometrów elektrooporowych przyklejonych do drutów;
- wyniki wzrokowej oceny elementu.

Pomiary wykonano przed przekazaniem siły sprężającej na beton oraz po jej przekazaniu i obejmowały odczyty odkształcenia na zewnętrznych powierzchniach betonu wykonane tensometrami elektrooporowymi oraz pomiary poślizgu splotu na końcach belek. Wartości odkształceń betonu i stali oraz poślizgu końca splotu uzyskano przez utworzenie różnicy między początkowymi i końcowymi odczytami. Uzyskane wyniki za pomocą czujników nasadowych potwierdzają wiarygodność pomiarów, potwierdzoną przez różne ośrodki naukowe. Również pomiary prowadzone na obu stronach elementu eliminują skutki nie osiowego sprężenia, przez co uwierzytelniona zostaje przyjęta procedura badawcza.

##### 4.2.5.2 *Rose i Russell (1997) [141]*

Celem podjętego programu badawczego [141] była ocena skuteczności trzech metod badawczych, które mogą być stosowane do oceny przyczepności sprężających splotów. Dane otrzymane z badań wyciągania nienaprężonych splotów oraz naprężonych splotów bezpośrednio metodą pull-out, pomierzone poślizgi (wciągnięcia) końców splotów i długości transmisji na belkach, zostały wykorzystane do określenia względnego zachowania się przyczepności splotów o średnicy 12,7 mm pochodzących od różnych producentów i o różnych warunkach zewnętrznej powierzchni.

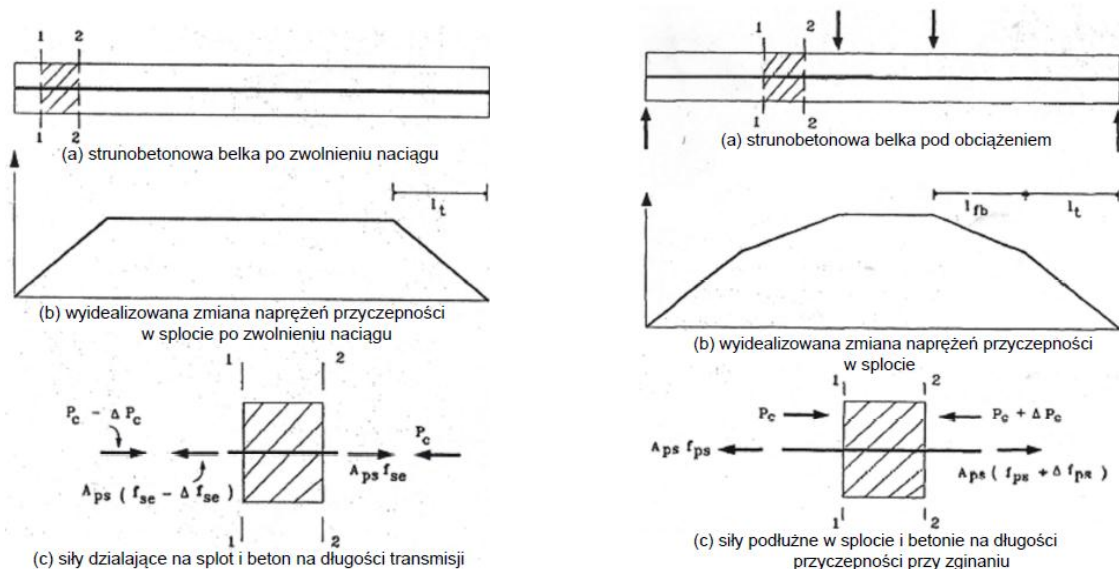
Badania splotów bez wstępnego naciągu przeprowadzono wg metody Logana. Sploty o długości czynnej 457 mm zabetonowano pionowo w betonowych blokach o wymiarach 610 x 914 x 1219 mm. Do badania splotów ze wstępnym naciągiem wykonano próbki długości 305 mm o przekroju poprzecznym 12,7 x 12,7 mm. Sądząco, że ten sposób badania próbek ze wstępnym naciągiem splotu bliżej odzwierciedli przyczepność w elementach sprężonych, ponieważ uwzględniony jest efekt Hoyera powstający przy zwolnieniu naciągu. Do badania wciągnięcia końców splotu i długości transmisji wykonano belki długości 5,18 m o przekroju poprzecznym 152 mm x 305 mm. Wszystkie belki były sprężone dwoma splotami. Odkształcenia betonu mierzono za pomocą czujnika nasadowego typu DEMEC. Do analizy długości transmisji zastosowano 95% *Average Mean Strain Method*.

Autorzy badań doszli do wniosku, że pomiar poślizgu (wciągnięcia) splotu daje najbardziej właściwą ocenę przyczepności. Większej wartości poślizgu splotu odpowiada większa długość transmisji, a opracowane równanie na długość transmisji w zależności od wartości poślizgu jest właściwe.

#### 4.2.6 Metoda pomiaru siły w splocie

##### 4.2.6.1 Metoda Abrishami H. H., Mitchell D.

H. H. Abrishami i D. Mitchell [2] zaproponowali metodę badawczą polegającą na określeniu naprężeń przyczepności w sposób bardziej bezpośredni, na podstawie pomierzonych sił w splocie, a nie na podstawie pomierzonych odkształceń w splocie lub betonie jak czyniono to dotychczas. Ta prosta procedura pozwala na określenie relacji naprężenie przyczepności–poślizg dla naciągniętego splotu zakotwionego w betonie, zarówno na długości transmisji jak i długości przyczepności przy zginaniu. Na rysunku 4.3 przedstawiono odpowiednio zmianę naprężeń przyczepności w naciągniętym splocie po zwolnieniu siły naciągu oraz tę samą belką poddaną obciążeniu zewnętrznemu.

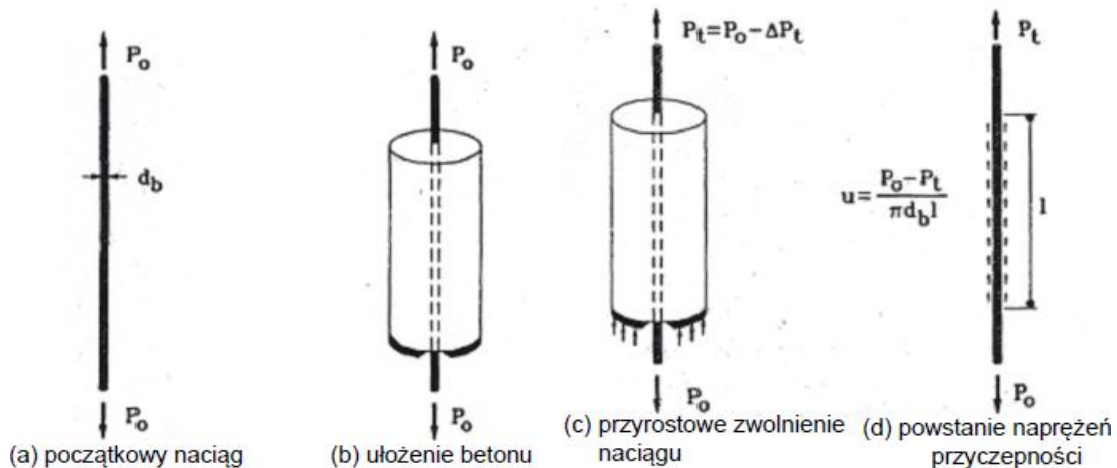


Rys. 4.3 Wyidealizowana zmiana naprężeń w splocie na długości strunobetonowej belki po zwolnieniu naciągu (po lewej) i po przyłożeniu obciążenia zewnętrznego (po prawej) [2].

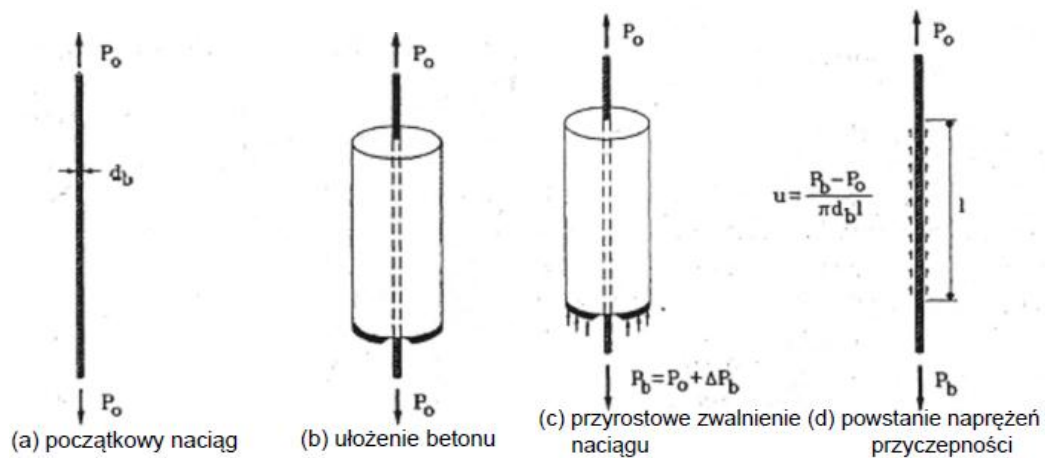
Przebieg naprężeń w splocie na długości belki wskazuje na dwa różne zjawiska przyczepności na długości transmisji i długości przyczepności na zginanie, w związku z czym te dwa obszary będą w badaniach rozpatrywane osobno. W obu przypadkach podano również na rys. 4.3 (c - po lewej) i (c -

po prawej) przekrojowe siły podłużne w splocie i betonie działające na długości transmisji oraz na długości przyczepności przy zginaniu.

Istota nowej metody zaproponowana w pracy [2] zawarta jest w pięciu krokach przedstawionych poniżej. Poszczególne etapy tej procedury są takie same dla obydwóch obszarów przyczepności za wyjątkiem kroku trzeciego, który różni się w zależności od tego, czy jest stosowany dla długości transmisji czy długości przyczepności przy zginaniu. Na rys. 4.4 i 4.5 zostały zobrazowane poszczególne etapy przeprowadzania badania odpowiednio dla strefy długości transmisji i strefy długości przy zginaniu wraz z podanymi siłami działającymi na próbkę.



Rys. 4.4 Techniki badania symulacji zachowania się przyczepności na długości transmisji [2].



Rys. 4.5 Technika badania symulacji zachowania się przyczepności na długości przyczepności przy zginaniu [2].

W wyniku zmniejszenia na górze próbki czy zwiększenia na dole próbki naciągu splotu występują (małe) naprężenia przyczepności równe:

**Obszar długości transmisji**

$$u = \frac{P_0 - P_t}{\pi d_b l}$$

**Obszar długości przyczepności przy zginaniu**

$$u = \frac{P_b - P_0}{\pi d_b l} \quad (4.22, 4.23)$$

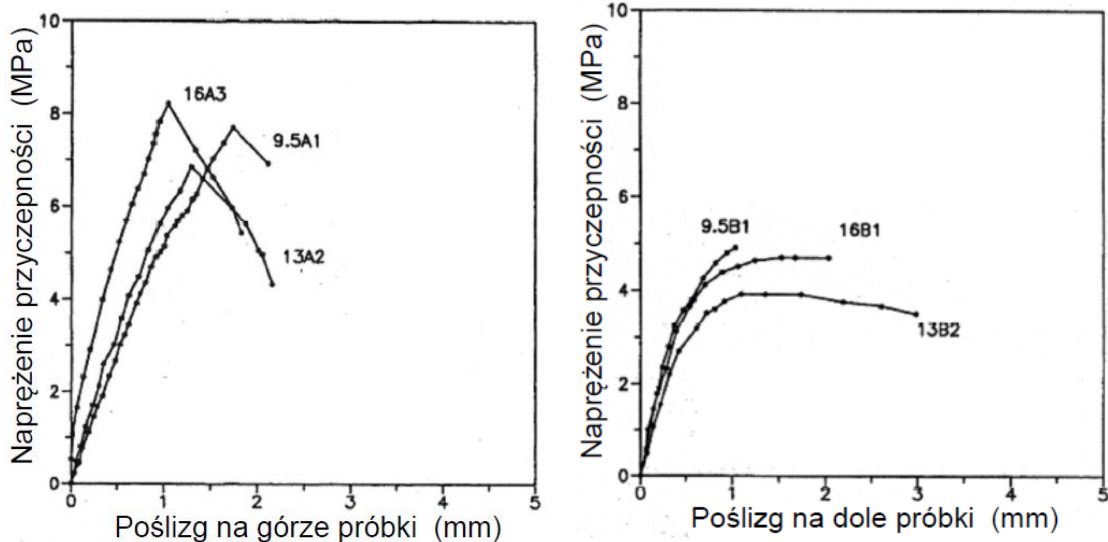
gdzie:  $P_0$  – siła w naciągniętym splocie,  
 $P_t$  – siła na górnym końcu splotu,  
 $P_b$  – siła na dolnym końcu splotu,

$l$  – długość zabetonowania (czynna) splotu w betonie.

Zastosowane w badaniu przyrostowe obciążenie jest powtarzane, aby uzyskać pełną zależność naprężenie przyczepności – poślizg. Przyjęcie metody wielostopniowego zwalniania naciągu w splocie podczas badań transmisji powoduje, że otrzymane przebiegi przyczepności są reprezentatywne dla stopniowego zwalniania naciągu. Naciąg w splocie jest regulowany przez zakotwienia śrubowe, a obciążenie na górze i dole jest rejestrowane przez siłomierze ciśnieniowe.

## Wyniki

Naprężenie przyczepności wyznaczono na podstawie różnicy sił w splotach na górze i dole próbki. We wszystkich badanych przypadkach próbek symulujących fragment długości transmisji jak również długości przyczepności przy zginaniu, zniszczenie nastąpiło przez utratę przyczepności (wyciągnięcie splotu w badaniu pull-out), a nie jak się spodziewano, przez rozłupanie betonu. Ponadto nie zaobserwowano powierzchniowych rys na żadnej z badanych próbek cylindrycznych. Dla obszaru długości transmisji maksymalne naprężenie przyczepności zmienia się w przedziale od 6,7 do 8,3 MPa przy wartości średniej 7,5 MPa, natomiast dla obszaru przyczepności przy zginaniu maksymalne wartości naprężenia przyczepności zawierają się w przedziale od 3,1 do 5,4 MPa ze średnią wartością wytrzymałości na przyczepność 3,9 MPa.



Rys. 4.6 Porównanie zależności naprężenie przyczepności – poślizg na długości transmisji dla splotów o średnicy 9,5; 13 i 16 mm [33] (po lewej), porównanie zależności naprężenie przyczepności – poślizg na długości przyczepności przy zginaniu dla splotów o średnicy 9,5; 13 i 16 mm (po prawej)[2].

Analiza badań w [2] zakończyła się zestawieniem wyników uzyskanych w dwóch rozważanych obszarach. Rys. 4.6 obrazuje zależności naprężenie przyczepności – poślizg dla dwóch próbek ze splotem o średnicy 13 mm, gdzie symulując badane obszary wykazano zdecydowanie większą wytrzymałość na przyczepność możliwą do osiągnięcia na długości transmisji ( $u'_t$ ) niż na długości przyczepności przy zginaniu ( $u'_{fb}$ ). Autorzy podają również średnie stosunki  $u'_t/u'_{fb}$ , które wynoszą 1,5; 2,0 i 2,3 odpowiednio dla splotów o średnicy 9,5; 13 i 16 mm i które wzrastają wraz ze wzrostem średnicy splotu.

Interpretacja równania

$$l_d = \left(\frac{f_{se}}{3}\right) \cdot d_b + (f_{ps} - f_{se}) \cdot d_b \quad (4.24)$$



pozwała zauważyć, że wytrzymałość na przyczepność jest 3 razy większa na długości transmisji niż na długości przyczepności przy zginaniu. Również inny jest charakter zniszczenia w obu obszarach. Próbka przy badaniu na długości przyczepności przy zginaniu wykazuje zależność bardziej ciągłą niemal przy stałym naprężeniu przyczepności (w przybliżeniu płaski odcinek na wykresie: rys. 4.6 po prawej), natomiast próbka badana na długości transmisji wykazuje bardziej kruche zniszczenie przyczepności (wyraźny kąt ostry na wykresie: rys. 4.6 po lewej).

### Wnioski

Autorzy przedstawiając swoją metodę badawczą i uzyskane wyniki sformułowali następujące wnioski dotyczące przyczepności betonu do naciągniętych splotów na długości transmisji i długości przyczepności przy zginaniu

- prostota badania dzięki pomiarom sił przyłożonych do splotów i odpowiadającym im poślizgom w przeciwieństwie do konwencjonalnych pomiarów odkształceń betonu w stosowanych dotychczas badaniach
- kontrola odkształceń za pomocą zakotwień gwintowanych (śrubowych) naciągniętego splotu umożliwiła wyznaczenie kompletnej zależności naprężenie przyczepności – poślizg z uwzględnieniem fazy pokrytycznej
- obserwowane są różnice w zachowaniu się obu końców w przypadku symulacji długości transmisji: stopniowy wzrost poślizgu występuje na zwolnionym końcu, a drugi koniec ulega przemieszczeniom dopiero po osiągnięciu maksymalnej (rzeczywistej) wartości naprężenia przyczepności.
- w symulacji długości przyczepności przy zginaniu obserwowalne jest zjawisko odwrotne a mianowicie stopniowy wzrost poślizgu występuje na obciążonym końcu, natomiast naprężenie przyczepności osiąga swoje maksimum pod warunkiem wystąpienia poślizgu na drugim końcu
- tendencja do wyrównania poślizgów na obu końcach próbki po wystąpieniu maksymalnej wartości naprężenia przyczepności jest zauważalna w symulacji długości transmisji i przyczepności przy zginaniu, co świadczy o wyciąganiu splotu
- naprężenie przyczepności  $u'_t$  osiągane w przypadku symulacji długości transmisji osiąga większe wartości niż naprężenie przyczepności  $u'_{fb}$  otrzymane na długości przyczepności przy zginaniu. Średnie stosunki tych naprężeń  $u'_t/u'_{fb}$  kształtują się w zależności od średnicy splotów 9,5 mm, 13 mm i 16 mm i wynoszą odpowiednio 1,5; 2,0 i 2,3, przy czym jest zauważalny wzrost wraz ze wzrostem średnicy splotu.
- zauważalne są różnice w przebiegu zależności naprężenie przyczepności – poślizg dla obu przypadków: kształt krzywej na symulowanej długości transmisji jest bardziej stromy niż odpowiadająca mu zależność na symulowanej długości przyczepności przy zginaniu.
- zniszczenie przyczepności na symulowanej długości transmisji jest kruche, podczas gdy próbka na symulowanej długości przyczepności przy zginaniu zachowuje się ciągliwie (wzrost poślizgu przy prawie stałym naprężeniu przyczepności)

#### 4.2.6.2 *Metoda ECADA/Marti-Vargas J.R., Arbelaez C.A., Fernandez-Prada M.A., Serna-Ros P., Miguel-Sosa P.F. 2006 [103]*

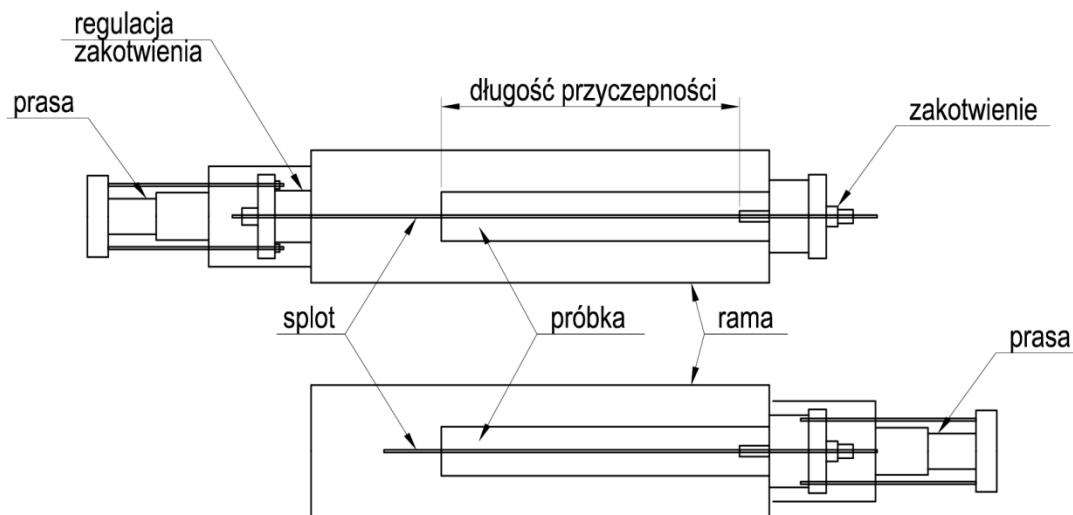
Opracowany program badawczy na Politechnice w Walencji w Hiszpanii miał na celu wyznaczenie długości transmisji i zakotwienia przez pomiar siły w ciągnięciu w serii próbek poddanych testom pull-out. W doświadczeniach wykorzystano elementy o różnej długości efektywnej przyczepności i te same procedury stosowane w produkcji elementów prefabrykowanych. Po przyłożeniu naprężeń wstępnych do próbki i wytworzeniu efektu Hoyera po jej zwolnieniu naciągu, nastąpiła symulacja przyłożenia obciążenia eksploatacyjnego.

Celem przeprowadzonych badań była weryfikacja użyteczności opracowanej metody badawczej oraz możliwości rozszerzenia jej do kontroli jakości przyczepności cięgna sprężającego do betonu jako pewnej standaryzacji. W badaniach zastosowano 12 mieszanek betonowych przy użyciu tylko

siedmiodrutowych splotów sprężających. Otrzymane wyniki wykazują poprawność i użyteczność procedury i wskazują na zachowawczy charakter wzorów ACI 318 [N3].

Ze względu na wyniki badań przeprowadzonych przez *Cousins i innych* [32], w których długość transmisji i zakotwienia dla niepowlekanych siedmiodrutowych splotów o średnicy 13 mm (0,5 cala) przekraczała znacznie wartości obliczone za pomocą wzorów ACI 318, *Federal Highway Administration (FHWA)* zobowiązywała projektantów do zwiększenia tych wartości o współczynnik 1,6 i wycofała z użycia cięgna o średnicy 15 mm (0,6 cala) w budowie mostów z zastosowaniem betonu sprężonego na trasie autostrad. Wymogi FHWA zaowocowały kolejnymi badaniami nad przyczepnością cięgien sprężających do betonu i opracowaniem nowych przepisów projektowych. Wyniki otrzymane w badaniach przedstawia przeglądowa praca *Buckner'a* [22], chociaż problem kontroli jakości przyczepności cięgna do otaczającego betonu jest nadal otwarty i nie doczekał się jeszcze standaryzacji procedury, mimo wielu badań eksperymentalnych.

W celu lepszego ujęcia badanych wartości długości transmisji i zakotwienia cięgien sprężających zostały zaproponowane modyfikacje (rys. 4.7) układu badawczego w stosunku do badania *Keuning'a* (metoda push-in rys. 3.22) [77]. Nowy projekt o nazwie ECADA przewiduje odpowiednią odległość między płytkami A i C ramy, dzięki czemu istnieje możliwość pomiaru długości transmisji i zakotwienia cięgna sprężającego jak również ujęta zostaje przyczepność.



Rys. 4.7 Schemat badań ECADA [103]

Zaletą przedstawionych badań ECADA jest odtwarzanie efektu Hoyera przed przeprowadzeniem badania pull-out. Uzyskuje się to przez poddanie próbki kolejno procesowi sprężenia (push-in) oraz zakotwienia (pull-out) odwzorowując charakter zachowania się elementu w warunkach eksploatacji. Stosowane oprzyrządowanie rejestrujące dane doświadczalne jest proste i nadaje się do wielokrotnych pomiarów. W badaniach zrezygnowano z wewnętrznych urządzeń pomiarowych, aby nie zakłócać samego mechanizmu przyczepności. Ze zgodności sztywności systemu AMA i próbki wynika wiarygodność pomiarów.

Po przeprowadzonych badaniach porównano wyniki doświadczalne z wartościami obliczonymi wg wzorów podanych w normach [N3]. Uzyskane wartości długości transmisji na drodze eksperymentalnej osiągały 50 % - 80% wartości normowych, a w przypadku długości zakotwienia leżały w obszarze 45 % - 65 % wartości obliczeniowych. Wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu na ściskanie zmniejsza się długość transmisji i dyspersji.

Użyty sprzęt jest prosty i nadający się do wielokrotnego użycia, a metoda badawcza jest, zdaniem autorów, wiarygodna i systematyczna. Procedura bazuje na metodach powszechnie stosowane

w produkcji elementów prefabrykowanych. Autorzy zaproponowali wzory pozwalające obliczyć długość transmisji i zakotwienia o dobrej korelacji z przeprowadzonymi badaniami, uznając je jako bazowe dla standaryzacji oceny jakości zakotwienia w elementach strunobetonowych.

$$l_t = 29,85 - 0,0016f'_{ci} \quad (4.25)$$

$$l_d = 35,08 - 0,0014f'_{ci} \quad (4.26)$$

gdzie:  $l_t$  = długość transmisji (cm)

$l_d$  = długość zakotwienia (cm)

$f'_{ci}$  = wytrzymałość betonu na ściskanie w chwili badania (psi).

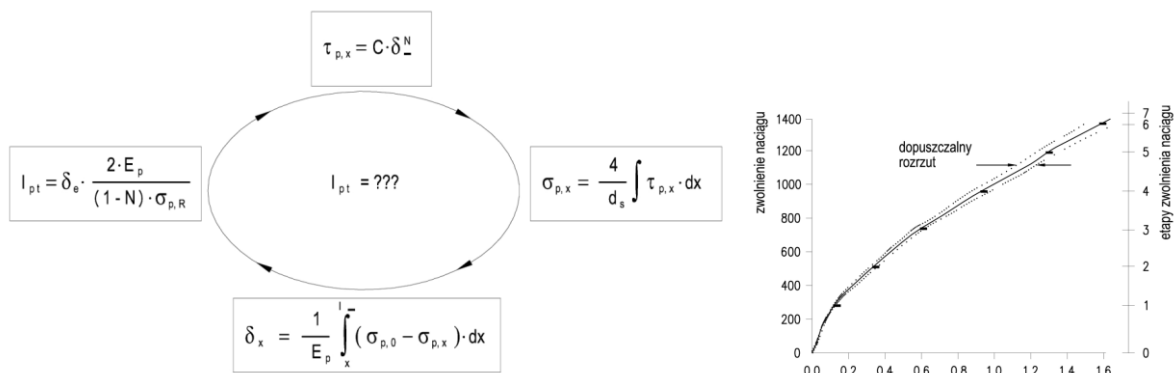
#### 4.2.7 Test SSR (Step by Step Release) (A. S. G. Bruggeling 2001) [19]

Po zakwalifikowaniu metody pull-out jako nieużytecznej przy zastosowaniu splotów sprężających (ze względu na szeroki wachlarz czynników wpływu) oraz krytykując metodę pomiaru odkształceń betonu na powierzchni elementu próbnego, *Bruggeling* [18, 19, 20] rozwinął metodę określania długości transmisji znanej jako SSR - test (*Step by Step Release*). Bazując na prawie przyczepności zaproponowanym przez *Rehman* i rozwiniętym przez *Noakowskiego* (4.27) tzw. charakterystyce przyczepności lub prawie  $\tau - \delta$  i na pomiarach poślizgu końca splotów przy zwalnianiu naciągu, przedstawił algorytm (rys. 4.8), gdzie brakującym ogniwem jest właśnie długość transmisji.

$$\tau(x) = C \cdot \delta(x)^N \quad (4.27)$$

gdzie :  $\tau$  - naprężenie przyczepności  
 $\delta$  - poślizg splotu względem betonu  
 C, N - parametry charakterystyki przyczepności

Przedstawiony na rys. 4.8 cykl obliczeniowy wyjaśnia, że tylko albo przebieg naprężeń przylegania i rozciągania albo przebieg przemieszczenia może zostać obliczony. Metodą wyznaczenia charakterystyk jest tzw. „odwrotne modelowanie” (*Inverse Modelling*).



Rys. 4.8 Cykl obliczeniowy wg *Bruggelina* (po lewej) i zależność między przeniesionym sprężeniem i poślizgiem czoła (po prawej) [19].

Całkowite zwolnienie pełnego sprężenia daje możliwość pomiaru tylko absolutnej wartości przemieszczenia czoła. Tym samym brakuje możliwości, określenia dwóch niewiadomych C i N. Stopniowe zwalnianie naciągu i dokonywanie pomiarów przemieszczenia czoła po każdym kroku, stwarza możliwości porównawcze w celu wyznaczenia tych wielkości. Prawo przyczepności jest wtedy dla tego specyficznego przypadku znane, zakładając że obliczone wartości zgadzają się ze zmierzonymi

wynikami. W praktyce oznacza to, że z wartości C i N uzyskanymi doświadczalnie, oblicza się zależność  $\Delta\sigma_p(x) - \delta(x)$  dla  $\sigma_p(x) = 0$  do  $\sigma_p(x = \ell_{pt}) = \sigma_{po}$ . Kiedy stwierdzone jest, że w ten sposób obliczone wielkości  $\delta(x)$  dla każdego kroku nie odbiegają więcej niż  $\pm 3\%$  od wartości zmierzonych, wyznaczone wartości C i N są poprawne. Propozycja autora obejmuje siedem kroków zwalniania naciągu podczas przeprowadzenia badania (0, 18, 33, 48, 63, 78, 93 i 100%), przy czym celem nie jest opracowanie standaryzowanej procedury, lecz o stworzenie pewnego banku danych.

Zaletą prawa przyczepności  $\tau(x) = C \cdot \delta(x)^N$  jest zakres ważności dla całego sprawdzonego przedziału naprężeń rozciągających  $0 \div \sigma_p(x)$ . Figura przebiegu naprężeń wzdłuż długości transmisji nie zawsze jest parabolą. Dla paraboli N przyjmie wartość równą  $N = 0,33$ , a dla liniowego zachowania się (czyste tarcie) należy spodziewać się  $N = 0$ . Dla nieprofilowanych splotów  $N = 0,114$  oznacza, że zachowanie się przyczepności zbliża się do przypadku „czystego tarcia”, a tylko sploty o profilowanych drutach i profilowane pojedyncze druty wykazują figurę zbliżoną do paraboli.

Za pomocą metody SSR jest również możliwe, określić prawo przyczepności w tych przypadkach, w których oczekiwane są krótkie długości transmisji, jak np. w BWW i ciągnach (rozciąganych) z tworzyw sztucznych.

#### 4.2.8 Metoda odspojenia (przerwania ciągłości przylegania betonu do splotów)

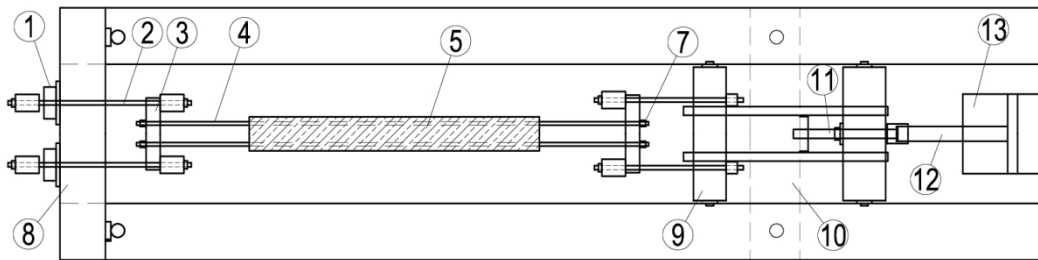
Metoda odspojenia polega na zastosowaniu częściowego przerwania ciągłości przyczepności betonu do splotu sprężającego przez nałożenie plastikowych tulejek eliminujących przyleganie. Zarejestrowany przebieg odkształcenia dla próbek ze splotami o pełnej przyczepności na całej długości charakteryzuje się trzema obszarami: wykresem o odcinku wznoszącym się, poziomym i opadającym, przy czym nachylone odcinki wykresu odpowiadają długości transmisji. W przeciwieństwie do nich w próbkach o przerwanej przyczepności, wykres odkształcenia obrazuje więcej odrębnych stref transmisji na każdym końcu z pośrednim płaskim odcinkiem między strefami transmisji splotów. Metodę zastosowali *B. Russell i N. H. Burns* [145] (pkt. 4.3.3.1) oraz *Barnes R.W., Grove J.W., Burns N.H* [11] (pkt. 4.3.3.2).

#### 4.2.9 A. Nitsch 2001 - Badania na belkach

W celu zbadania zależnego od naprężeń i zależnego od odkształceń składnika przyczepności (pkt. 3.2.2.2) Nitsch przeprowadził 18 badań wprowadzenia siły sprężającej na utworzonym stanowisku badawczym. Dwanaście elementów badawczych o przekroju prostokątnym i długości 1,60 m wystarczającej na wytworzenie się nienakładającego się z obu stron obszaru transmisji, zostało sprężonych dwoma lub czterema splotami  $7\phi 4$  mm. W celu eliminacji wpływu zarysowania, w próbkach nie zastosowano strzemion poprzecznych. Drugą grupę stanowiły belki o przekroju teowym i długości 3,60 m i sprężone również splotami  $7\phi 4$  mm, przy czym w trzech z nich na jednym z końców wbudowano strzemiona w celu zbadania wpływu zbrojenia poprzecznego na powstanie zarysowania. Badanie przeprowadzono w poziomej ramie przypominającej zastosowaną ramę do badania przyczepności na próbkach kostkowych. Zastosowano mieszanki betonowe takie same jak w badaniach przyczepności o różnej wytrzymałości na ściskanie z zawartością krzemionki jak również bez niej oraz porównawczo beton normalny.

Odkształcenia na obydwóch zewnętrznych powierzchniach bocznych betonowej próbki mierzono za pomocą czujników elektrooporowych w formie paska (DMS), a uzyskany wynik uśredniono, natomiast wślizg stali sprężającej mierzono przy użyciu przetwornika drogi. Zwolnienia naciągu zastępowało w pięciu w przybliżeniu równych krokach, po których pobierano pomiar odkształcenia i sporządzano

wykresy zależności odkształcenia zewnętrznej powierzchni betonu w funkcji odległości od czoła belki przy kolejnych stopniach zwolnienia naciągu.



Rys. 4.9 Stanowisko badań opracowane przez Nitscha [114]

Na podstawie zebranych doświadczalnie danych została obliczona długość transmisji wg wzoru:

$$l_{bp} = 1,35 \cdot l_{80\%}, \quad (4.28)$$

gdzie:  $l_{80\%}$ , jest długością dyspersji przy 80% wprowadzeniu siły naciągowej [N5].

Porównanie wyników wykazywało krótsze długości transmisji o prawie 50% w przypadku betonów o wyższej wytrzymałości na ściskanie i zawartości krzemionki. Uzyskane długości transmisji przybierały wartości z zakresu od 172 mm do 222 mm dla betonów o wytrzymałości na ściskanie w chwili zwolnienia naciągu powyżej 73,8 MPa określonej na kostkach o boku 150 mm, co stanowi redukcję długości transmisji o około 50% przy wzroście wytrzymałości na ściskanie około 1,61. Prowadząc badania nad długością transmisji bezpośrednio po zwolnieniu, po 13 dniach i w okresie 23 - 40 dni zauważył, że obliczone długości transmisji wg wyżej wymienionego wzoru wykazują pozorne wzrosty wynikające ze zmiany z parabolicznego przebiegu w liniowy, ale maksymalna wartość jest taka sama. Betony z zawartością krzemionki wykazują prawie dwukrotnie mniejszą długość transmisji (dotyczy to również przyrostów w czasie) niż w przypadku betonów bez zawartości krzemionki dzięki wysokiej wytrzymałości na ściskanie.

#### 4.2.10 Nienormowe metody badań długość transmisji /Badania zmierzające do określenia akceptowanej normowej metody badania długość transmisji [108]

Analiza metod i przeprowadzonych badań doświadczalnych zawarta w raporcie [108] miała na celu określenie powszechnie akceptowanej normowej procedury eksperymentalnego wyznaczania długości transmisji. W ramach badań własnych przy określaniu wpływu mieszanki betonowej na długość transmisji i długość zakotwienia wykonano 12 belek długości 5,12 m o prostokątnym przekroju poprzecznym 165 mm x 305 mm sprężonych dwoma (dołem) lub czterema (2 dołem i 2 górną) splotami o średnicy 12,7 mm. W pierwszym etapie mierzono długość transmisji po zwolnieniu naciągu i dalej przez dwa miesiące. Następnie belki były badane na zginanie w celu określenia długości zakotwienia i porównania ich z wartościami obliczonymi wg norm ACI i AASHTO.

Z każdej mieszanki betonowej wykonano trzy belki: dwie sprężone dwoma splotami i jedną sprężoną czterema splotami. Belki sprężone dwoma splotami wykonane były po cztery sztuki na jednym torze naciągowym długości 30,48 m. Belki sprężone czterema splotami wykonane były po 2 sztuki na jednym torze naciągowym. Naciąg zwalniano po 24 - 26 godzinach od chwili zabetonowania belek. Starano się uwolnić wszystkie sploty jednocześnie.

W celu wyznaczenia długości transmisji posłużono się 95% *Average Mean Strain Method*, którą zaproponowali *Russel i Burns* [145]. Z analizy przedstawionych wyników można wysunąć wniosek,

że wyraźną różnicę długości transmisji (rzędu do 27,81%) obserwuje się po upływie 7 dni od chwili zwolnienia naciągu bez względu na rodzaj mieszanki betonowej. Współczynniki zmienności przybierały wartości do 37,9%. Ponadto w analizowanym przypadku zanotowano mniejsze długości transmisji dla belek wykonanych na betonie samozagęszczalnym.

Długości transmisji postanowiono również określić na podstawie pomierzonych wartości wślizgu (wciągnięć) splotów do belek strunobetonowych, korzystając z zależności:

$$L_{tr} = 2 \cdot E_p \cdot \Delta / f_{si} \quad (4.29)$$

gdzie :  $\Delta$  - oznacza wartość poślizgu [mm]  
 $E_p$  - moduł sprężystości stali sprężającej  
 $f_{si}$  - naprężenie w splocie bezpośrednio przed zwolnieniem naciągu

Do pomiaru poślizgu zastosowano liniowy potencjometr stabilizowany na splocie i przylegający do czoła belki. Z uwagi na silne mechaniczne oddziaływanie splotu na potencjometr w chwili zwolnienia naciągu, otrzymane wyniki nie były stabilne, a zatem wartości poślizgu nie mogą być miarodajne do obliczenia długości transmisji. Uzyskane wartości zawierały się w przedziale od -3,96 mm do 3,175 mm.

W uzupełnieniu do tych pomiarów prowadzono pomiary ręczne za pomocą stalowej taśmy kontrolując zmianę odległości pasma naklejonej na splot opaski z izolacyjnej taśmy od czoła sprężanej belki. Pomiary dokonano z dokładnością 0,79 mm (1/32 cala). Załączone wyniki pomiarów taśmą i czujnikiem nasadowym DEMEC pozwalają obliczyć różnicę uzyskanych doświadczalnie wartości dochodzącą w skrajnych przypadkach do 208,5%.

### 4.3 Dotychczasowe badania doświadczalne długości transmisji

#### 4.3.1 Zestawienie w formie banku danych

W ostatnich kilkudziesięciu latach przeprowadzono wiele badań doświadczalnych związanych z rozwojem przyczepności, długości transmisji i zakotwienia. Szczególnie w latach dziewięćdziesiątych nastąpiła ich intensyfikacja w Stanach Zjednoczonych, co było związane z niewłaściwym oszacowaniem przyczepności betonu do cięgien sprężających. Poniżej podano zestawienie porządkując badania wg roku publikacji w formie banku danych. Tabela 4.1 zawiera oprócz rodzaju betonu i danych odnośnie wytrzymałości na ściskanie (walce) również rodzaj splotów i charakter ich powierzchni, sposób zwolnienia naciągu oraz dane opisujące rodzaj elementu badawczego i liczbę próbek.

Tabela 4.1 Zestawienie przeprowadzonych badań [27]

Rok	Odnosińnik	Liczba prób <sup>(1)</sup>	Rodzaj betonu <sup>(2)</sup>	Wytrzymałość na ściskanie $f_{c,0,t}$ w chwili sprężania	Badana nominalna średnica splotów $d_p$	Rodzaj powierzchni Splotów <sup>(3)</sup>	Rodzaj przyczepność <sup>(4)</sup>	Sposób zwalniania naciągu	Rodzaj eksperymentu
1965	Badania wg [166]	59 / 0	NSC, HSC	11 - 77 N/mm <sup>2</sup>	1/4"; 0,3"; 3/8"; 0,5"; 5/8"; 0,7"; 0,75"	-	FB	N	-
1965	Over et al. [122]	3 / 0	NSC	29 - 38 N/mm <sup>2</sup>	1/4"; 3/8"; 0,5"	G	FB	ST	BK
1980	Plähn [127]	23 / 17	NSC	29 - 58 N/mm <sup>2</sup>	0,5"	G	FB	ST	-
1988	Castrodale [28]	22 / 18	NSC, HSC	35 - 66 N/mm <sup>2</sup>	0,5"	R	FD	ST, N	BK
1990	Cousins et al. [32,33]	46 / 0	NSC	28 - 46 N/mm <sup>2</sup>	3/8"; 0,5"; 0,6"	-	FB	N	BK
1992	Lane [91]	22 / 10	NSC	30 N/mm <sup>2</sup>	3/8"; 0,5"; 0,6"	EP, G	FB	N	BK
1992	Russel et al. [96,143,144]	60 / 52	NSC	19 - 33 N/mm <sup>2</sup>	0,5"; 0,6"	G, O	FB, PD	N	BK
1992	Cousins et al. [31]	4 / 2	NSC	25 N/mm <sup>2</sup>	3/8"	EP, R	FB	N	BK
1992	Shahawy et al. [150]	10 / 6	NSC	35 - 39 N/mm <sup>2</sup>	0,5"; 0,6"	R	FB, PD	N	BK
1993	Mitchell et al. [106]	22 / 22	NSC, HSC	21 - 50 N/mm <sup>2</sup>	3/8"; 0,5"; 0,62"	G, R	FB	ST	BK
1993	Issa et al. [69]	5 / 5	NSC	33 - 40 N/mm <sup>2</sup>	0,5"	G	FB	N	BK
1994	Deatherage et al. [37,38]	40 / 40	NSC	26 - 38 N/mm <sup>2</sup>	0,5"; 9/16"; 0,6"	G, R	FB	N	BK
1994	Cousins et al. [34]	12 / 0	NSC, HSC	37 - 57 N/mm <sup>2</sup>	0,5"	-	FB	N	BK
1995	Gross et al. [55]	3 / 3	HSC	49 N/mm <sup>2</sup>	0,6"	R	FB	N	BK
1995	Den Uijl [42]	17 / 4	NSC, HSC	30 - 58 N/mm <sup>2</sup>	3/8"; 0,5"	G	FB	ST	BK
1997	Cordova et al. [30]	4 / 4	NSC	30 N/mm <sup>2</sup>	0,6"	G	FB	ST	BK
1997	Kilgore [78]	48 / 0	NSC, HSC	43 - 79 N/mm <sup>2</sup>	0,6"	G	PD	N	BK
1997	Rose et al. [133]	17 / 0	NSC	28 - 32 N/mm <sup>2</sup>	0,5"	R, G, S	FB	N	BK
1997	Logan [95]	60 / 0	NSC	29 N/mm <sup>2</sup>	0,5"	G, R	FB	N	BK
1998	Grove [56]	24 / 0	NSC, HSC	33 - 60 N/mm <sup>2</sup>	0,6"	G	PD	N	BK
1998	Lane [92]	30 / 0	NSC, HSC	32 - 54 N/mm <sup>2</sup>	0,5"; 0,6"	R	FB	N	BK
1999	Barnes et al. [10]	128 / 12	NSC, HSC	27 - 76 N/mm <sup>2</sup>	0,6"	G, R	FB, PD	N	BK
2000	Shing et al. [152]	6 / 6	HSC	45 N/mm <sup>2</sup>	0,6"	R	FB	N	BK
2000	Oh et al. [119]	72 / 72	NSC, HSC	33 - 47 N/mm <sup>2</sup>	0,5"; 0,6"	G	FB	N	BK

Rok	Odnosińnik	Liczba prób <sup>(1)</sup>	Rodzaj betonu <sup>(2)</sup>	Wytrzymałość na ściskanie $f_{c,wy}$ w chwili sprężenia	Badana nominalna średnica splotów $d_p$	Rodzaj powierzchni Splotów <sup>(3)</sup>	Rodzaj przyczepności <sup>(4)</sup>	Sposób zwalniania naciągu	Rodzaj eksperymentu
2001	Shahawy [151]	24 / 0	NSC	28 N/mm <sup>2</sup>	0,5"; 0,6"	-	FB	N	BK
2001	Steinberg et al. [153]	12 / 8	NSC	23 - 25 N/mm <sup>2</sup>	0,5"	G	FB	N	BK
2001	Nitsch [114]	9 / 7	NSC, HSC	32 - 65 N/mm <sup>2</sup>	0,5"	G	FB	ST	WSS, BK
2002	Nassar [111]	4 / 4	LC	33 N/mm <sup>2</sup>	0,5"	-	FB	N	BK
2004	Arbelaez et al. [6]	9 / 9	NSC, HSC	31 - 69 N/mm <sup>2</sup>	0,5"	G	FB	ST	EC
2005	Kose et al. [80]	20 / 4	NSC	26 - 32 N/mm <sup>2</sup>	0,6"	R	FB, PD	ST	BK
2005	Proske et al. [130]	10 / 6	SVB	44 - 75 N/mm <sup>2</sup>	0,5"	G	FB	ST	WSS
2005	Hegger et al. [59,61,63]	24 / 24	SVB	20 - 33 N/mm <sup>2</sup>	0,5"	G	FB	ST	WSS, BK
2005	Hegger et al. [62]	12 / 11	LC	24 - 46 N/mm <sup>2</sup>	0,5"	G	FB	ST	WSS, BK
2006	Marti-Vargas et al. [103, 104]	21 / 21	NSC, SVB	24 - 62 N/mm <sup>2</sup>	0,5"	G	FB	ST	EC
2007	Hegger et al. [60]	8 / 8	NSC	40 - 47 N/mm <sup>2</sup>	0,5"	G	FB	ST	BK
2007	Marti-Vargas et al. [105]	12 / 12	NSC	24 - 55 N/mm <sup>2</sup>	0,5"	G	FB	ST	EC

#### Legenda

- (1) ogólna liczba badań / liczba badań objęta statystyką  
(powód odrzucenia prób: sploty o niskiej przyczepności „low bond quality“, niepełna charakterystyka materiałowa, tworzenie się rys rozporowych, zanieczyszczenia/powłoki, izolacja etc.)
- (2) NSC = beton normalny, HSC = BWW, SSCC = beton samozagęszczalny, LC = beton lekki
- (3) G = gładka, R = rdza, EP = powłoka epoksydowa, O = zanieczyszczenie olejem, S = pokryty silanem
- (4) FB = fully bonded (pełna przyczepność), PD = partially debonded (częściowa izolacja), FD = fully debonded (pełna izolacja)
- (5) ST - stopniowe, N - nagłe
- (6) WSS = wprowadzenie siły sprężającej, BK = badanie na belkach, EC = badanie ECADA

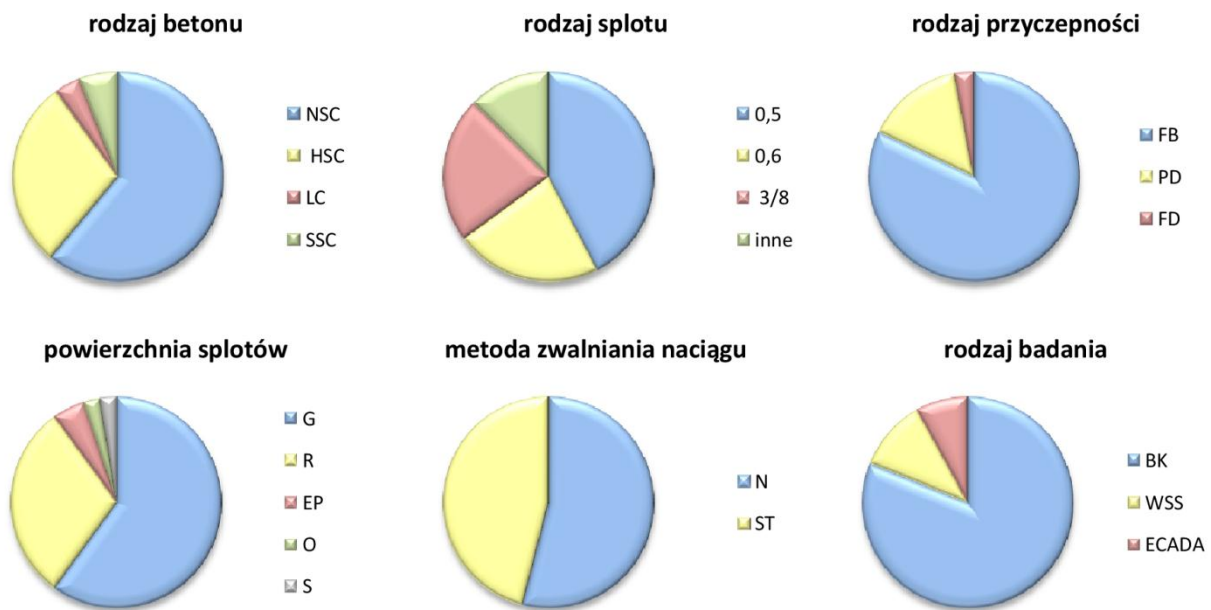
### 4.3.2 Analiza banku danych

Przedstawione badania zostały wykonane różnymi metodami, co utrudnia pełne porównanie. Tym niemniej analiza banku danych pozwala na wyciągnięcie pewnych wniosków oraz orientację co do częstotliwości badanych parametrów. Poniżej na rys. 4.10 przedstawiono na wykresach kołowych udział poszczególnych parametrów badania.

Większość badań długości transmisji koncentruje się na betonie normalnym (61%), ale zastosowanie BWW zyskuje wciąż na znaczeniu (29%). W załączonym zestawieniu nie jest jednak podany skład mieszanki betonowej, a w szczególności obecność zastosowanych dodatków, w związku z czym istnieje obawa, czy chodzi tu faktycznie o beton wysokiej wytrzymałości, czy tylko o beton normalny o podwyższonej wytrzymałości na ściskanie. Beton lekki i samozagęszczalny nie jest przedmiotem szerszego zainteresowania (10%). Prawie połowa badań (47%) dotyczy splotów 7φ4 mm



(0,5"), chociaż badania na splotach 7φ5 mm (0,6") są coraz częstsze (25%). W pozostałych rodzajach splotów wyróżnić można jedynie sploty 3/8 (12% badań), natomiast pozostałe sploty są stosowane w sporadycznych przypadkach. Pełną przyczepność wykazywało 82% splotów w przeprowadzonych badaniach, natomiast badania z częściowym odspojeniem zajmowały jedynie 15%. Przypadek całkowitego odspojenia obejmował tylko 3% badań. Najczęściej badania charakteryzowały się czystymi splotami (60%). Zardzewiałe sploty zastosowano w 30% badań, pokryte powłoką epoksydowa w 5%, a zanieczyszczone olejem czy krzemionką 2,5%. Częstość zwalniania naciągu w sposób nagły czy stopniowy była prawie wyrównana. Większość badań przeprowadzono na belkach, a metodę ECADA zastosowano w 8% przypadkach.



Rys. 4.10 Analiza banku danych

### 4.3.3 Wybrane zagadnienia z zakresu dotychczasowych badań

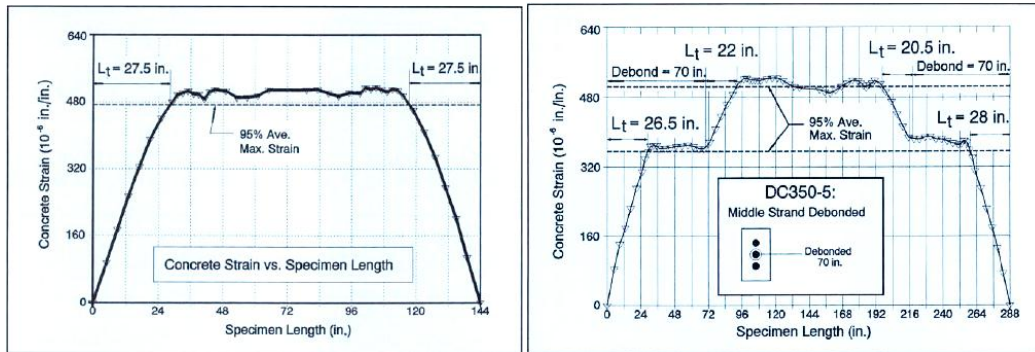
#### 4.3.3.1 Badania Bruce Russell, Ned H. Burns [143]

Badania prowadzono na obu końcach 44 belek, z czego 32 belki wykonano z koncentrycznie sprężanych belek, natomiast pozostałe 12 belek zostało zbudowane w skali, jako modele belek AASHTO zawierające cztery, pięć lub osiem splotów. Procedury badań odtwarzały rzeczywiste warunki panujące przy produkcji elementów strunobetonowych. Badania długości transmisji przewidywały pomiary wartości doświadczalnych przy zróżnicowanych parametrach, do których należały:

- liczba splotów (1, 3, 4, 5 i 8)
- wymiar średnicy splotu: 12,7 i 15,2 mm (0,5 i 0,6 cala))
- częściowy brak przyczepności splotu (o pełnej lub niepełnej przyczepności splotu)
- zbrojenie poprzeczne krępujące (z lub bez)
- rozmiar i kształt przekroju poprzecznego

Oprócz rejestracji odkształcenia betonu, pomiarom podlegały również poślizgi końców splotów na każdym elemencie. Wykonywano je również dla splotów o przerwanej przyczepności, które wykazywały się większymi wartościami poślizgu świadczącym o braku hamowania przez beton na długości wyłączenia. Rysunek 4.11 (po prawej) przedstawia przebieg odkształcenia elementu,

w którym środkowy z 3 splotów został pozbawiony przyczepności na długości 1,78m (70 cali), na którym widzimy cztery strefy transmisji. Skuteczna eliminacja przyczepności splotu za pomocą osłonięcia jest wyraźnie widoczna. Zauważalna jest również różnica nachylenia wykresu dla splotu o pełniej przyczepności (przebieg jest bardziej stromy) w porównaniu do splotu o przerwanej przyleganiu do betonu.



Rys. 4.11 Wykres odkształcenia i długość transmisji dla próbki z pełną przyczepnością (po lewej) i o niepełnej przyczepności (metoda 95% średniego maksymalnego odkształcenia) [148]

Podsumowując badania własne wpływu parametrów na długość transmisji, autorzy stwierdzają, że jedyną istotną zmienną była średnica splotu, przy czym przyjęty program badawczy nie obejmował wytrzymałości betonu na ściskanie jako badanego parametru. Mając na uwadze wyniki badań autorzy sugerują przyjęcie w obliczeniach długości transmisji wyrażenia:

$$L_t = \frac{f_{se}}{2} d_b \quad (4.30)$$

zamiast dotychczas obowiązującego:

$$L_t = \frac{f_{se}}{3} d_b \quad (4.31)$$

mimo że inni naukowcy (*Shahawy i inni*, *Buckner*) opowiadają się za poprawnością przyjętego w normach wyrażenia drugiego. Dobrane zachowawczo wyrażenie określające długość transmisji powinno być dobrane w sposób gwarantujący szeroki zakres zastosowania i stanowiące górną granicę dla większego odsetka wyników badań. Alternatywnie, długość transmisji może być wyznaczona jako równa 80-ciu średnicom splotu czyli  $80d_b$ , w przypadku splotów o niskiej relaksacji.

W uzasadnieniu swojej propozycji autorzy zwracają uwagę, że jest to wartość przekraczająca zmierzone długości transmisji dla większości próbek w przeprowadzonych badaniach, jak również nienaruszona przez powstanie i rozwój zarysowania strefa transmisji gwarantuje właściwe przekazywanie siły sprężającej. Tak przyjęta długość transmisji jest możliwa do zastosowania również dla splotów o innych średnicach i wyższej wytrzymałości.

Przeprowadzone badania w latach 80 i powtórzone w większym zakresie w latach 90-tych minionego wieku charakteryzowały się nagłą i gwałtowną utratą przyczepności w zakotwieniu, co w przypadku rzeczywistych konstrukcji w fazie eksploatacji mogło mieć katastrofalne skutki. Skonstruowane zachowawczo i obejmujące większą liczbę danych wyrażenie do wyznaczenia długości transmisji pozwala skuteczniej zapobiegać niepożądanym awariom.

#### 4.3.3.2 *Badania Barnes R.W., Grove J.W., Burns N.H. [11]*

Praca Roberta W. Barnes'a, Johna W. Grove'a i Neda H. Burns'a [11] zaliczana do najbardziej kompleksowych badań przedstawionych do tej pory, obejmowała wartości długości transmisji zmierzone dla 184 stref transmisji w 36 dźwigarach strunobetonowych AASHTO typu I z cięgnami średnicy 15,2 mm (0,6 cala) w rozstawie 50 mm (2 cali) wykonanych w zakładzie przemysłowym. Obecnie ta konfiguracja cięgien jest najbardziej skutecznym rodzajem sprężania rozciąganej strefy belek mostowych z HSC. Aktualne przepisy norm ACI [N3] i AASHTO [N1] dotyczące zakotwienia zbrojenia sprężającego bazują na badaniach przeprowadzonych 40 lat temu na cięgnach o mniejszych średnicach i z niższym poziomem naprężeń sprężających, nie uwzględniającej wpływu większej wytrzymałości betonu, która zyskuje na znaczeniu w nowoczesnej praktyce.

Dźwigary AASHTO typu I zostały parami zabetonowane, a zmiennymi badania były powierzchnia cięgna, wzór odspojenia cięgien sprężających od betonu (długość efektywnej przyczepności projektowana była za pomocą rurek osłonowych eliminujących przyleganie cięgna do betonu) i wytrzymałość materiału. Każda para belek charakteryzowała się tą samą kombinacją zmiennych, dla których wyznaczono długości transmisji na czterech końcach. Tylko jedna trzecia dźwigarów miała jedną strefę transmisji na każdym końcu, natomiast pozostałe charakteryzowały się trzema lub czterema strefami transmisji na końcach wynikającymi z przejściowego odspojenia splotów od otaczającego betonu, o czym świadczą "schodkowe" wykresy.

Zastosowano w badaniach trzy typy mieszanki, z których dwie wykonano na żwirze rzeczonym przy spodziewanej wytrzymałości na ściskanie odpowiednio 34 i 48 MPa, przy stosunku w/c = 0,33 i 0,28 oraz jedną na kruszywie węglanowym łamanym i docelowej wytrzymałości 103 MPa przy w/c = 0,25. Z każdej serii mieszanki wykonano 1/3 próbek, a spadek stożka opadowego dla każdego typu wynosił około 200 mm (8 cali).

Zwolnienie siły naciągowej nastąpiło w czasie krótszym niż 24 godziny. Zastosowano sploty sprężające 7-drutowe o łącznej średnicy 15,2 mm (0,6 cala) stali ASTM A 416, klasy 270, cechującej się niską relaksacją i modułem sprężystości  $E_p$  cięgna około 195 MPa (28.000 ksi) wg badań laboratoryjnych. Sploty rozmieszczone były na siatce o boku równym 50 mm (2 cale) przy naprężeniu początkowym  $0,75f_{pu} = 1395$  MPa (202,5ksi).

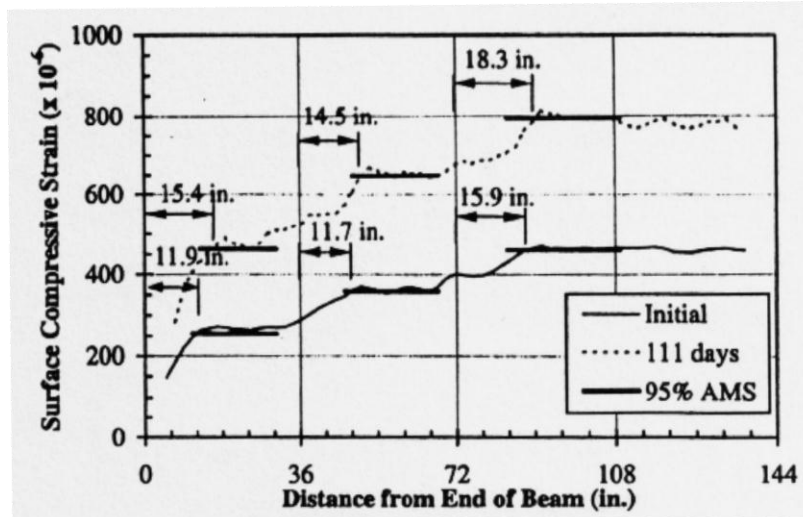
W doświadczeniach stosowano sploty o dwóch rodzajach powierzchni: czystej i skorodowanej w równych ilościach. Czyste cięgna zostały zdefiniowane jako cięgna w momencie dostawy o gładkiej powierzchni i wolne od rdzy poza sporadycznymi lekkimi plamkami wynikającymi z warunków atmosferycznych podczas sprężania i wykonywania zbrojenia belki, w czasie nie przekraczającym trzech dni przed wylaniem. Zardzewiałe cięgna narażone na warunki atmosferyczne panujące w hali prefabrykacji przez kilka miesięcy, charakteryzowały się znaczną powłoką rdzy, która jednak nie naruszała w stopniu istotnym przekroju cięgna.

Naciąg zwolniono dwoma metodami przez przecięcie palnikiem gazowym: metoda "równoczesnego zwolnienia" i metoda symulacji stopniowego zwalniania naciągu. Długości transmisji zostały określone metodą 95% maksymalnego średniego odkształcenia (AMS) opracowanego przez *Russell'a i Burns'a* (1993) [143].

Na rys. 4.12 przedstawiono typowy przebieg odkształcenia początkowego i długotrwałego belki o trzech strefach transmisji. Uzyskane wartości płaskich odcinków z wykresów poddano korekcie w oparciu o teorię sprężystości ze względu na ekscentryczność naprężeń wstępnych i wielkość próbek, gdzie ciężar własny każdego dźwigara znacząco wpłynął na profil odkształceń ściskających.

Stosowanie metody 95% AMS do pomiarów początkowych jak i rozłożonych w czasie dla cięgien z pełną i częściową przyczepnością wymaga stosowania korygującej procedury analitycznej. Praca

Barnes'a, Burns'a i Kreger'a (2000) [10] obejmuje konstrukcję i analizę modeli elementów skończonych w celu oceny rozbieżności pomiędzy profilem odkształceń zmierzonych wzdłuż linii punktów pomiarowych i aktualnym profilem naprężeń w ciągnie sprężającym. Opisane różnice mogą mieć duże znaczenie w przypadkach większych odległości pomiędzy ciągnami i punktami pomiarowymi, które miały miejsce w niektórych odspojonych ciągnach w przeprowadzonych badaniach. Badania Bucknera (1994) na małych koncentrycznie sprężonych graniastosłupach i Base'a (1958) na próbkach pełnowymiarowych potwierdzają zaobserwowane rozbieżności.



Rys. 4.12 Wykres zależności powierzchniowego odkształcenia początkowego i długotrwałego w zależności od końca belki [11]

Uzyskane długości transmisji są mniejsze niż  $60d_b$ , które są proponowane przez AASHTO LRFD [N2], a jedynie trzy z 184 długości transmisji przekraczają wartość  $50d_b$ , która jest zalecana w przepisach amerykańskiej normy ACI 318-02 [N3] dotyczących projektowania belek ze względu na ścinanie. W opisanych badaniach określono wartości długości transmisji znacznie mniejsze niż uzyskane przez inne zespoły badawcze jak np. Cousins, Johnston i Zia (1990) [32]; Russell i Burns (1993) [144], Cousins, Stallings i Simmons (1994) [34] oraz Lane (1998) [92], co najprawdopodobniej jest związane z zastosowaniem w doświadczeniach ciągnie sprężających pochodzących od innych producentów.

Po wyznaczeniu odkształceń betonu przy ściskaniu na jego powierzchni na 36 dźwigarach AASHTO typu I wykonanych w zakładzie prefabrykacji i wyznaczeniu długości transmisji (początkowa i długoterminowa) przy zmiennych parametrach takich jak: wpływ klasy betonu, stanu powierzchni ciągnia, metody zwolnienia naciągu i czasu autorzy przedstawili swoje wnioski:

- ze względu na proporcjonalną zależność długości transmisji od wyrażenia  $(f_{pt}/\sqrt{f'_{ci}})d_b$  przyjęto górną granicę dla długookresowych długości transmisji mierzonych w tym badaniu jako  $l_t = 0,22 \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot (f_{pt}/\sqrt{f'_{ci}})d_b$ , co odpowiada  $l_t = 0,57 \cdot \text{ksi}^{-1} \cdot (f_{pt}/\sqrt{f'_{ci}})d_b$ , i co wykazuje zgodność z propozycją Mitchella i innych (1993) [106];
- wpływ czasu najczęściej do 28 dni na zwiększenie długości transmisji autorzy ocenili w przedziale do około 10 % - 20 %, a sporadycznie do 50%;
- wpływ powierzchni ciągnia sprężającego:
  - średnia długość transmisji splotów pokrytych nalotem korozyjnym osiągała mniejsze długości transmisji niż średnia czystych ciągnie szczególnie w betonach o normalnej wytrzymałości,
  - rozrzut wyników określających długość transmisji uzyskanych w badaniach dla skorodowanych splotów był jednak znacznie większy niż dla czystych splotów,

- w niektórych przypadkach zardzewiałe sploty wykazywały większe długości transmisji niż czyste sploty w odpowiadających belkach, kwestia korozji nie może być uwzględniana w celu redukcji długości transmisji
- wpływ sposobu zwolnienia:
  - w próbach wykonanych z betonu o wytrzymałości na ściskanie większej niż 48 MPa (7000 psi) w chwili zwolnienia naciągu nie zaobserwowano wpływu sposobu zwolnienia naciągu na długość transmisji, pod warunkiem, że sploty sprężające nie były pokryte nalotem korozyjnym;
  - w przypadku skorodowanych splotów zastosowanie nagłego zwolnienia naciągu powodowało wzrost długości transmisji o 30 % do 50% w stosunku do stopniowego zwalniania;

W nielicznych próbkach, zwłaszcza zardzewiałych, zaobserwowano w badaniach niewielkie długookresowe długości transmisji. Zaistniała zatem potrzeba zdefiniowania dolnej granicy długości transmisji przez wprowadzenie wyrażenia  $l_t = 0,13 \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot (f_{pt}/\sqrt{f'_{ci}})d_b$ , co odpowiada  $l_t = 0,17 \cdot \text{ksi}^{-1} \cdot (f_{pt}/\sqrt{f'_{ci}})d_b$ , co jednak wymaga sprawdzenia naprężeń dopuszczalnych w splotach.

#### 4.3.3.3 *Abendroth, Stuart i Yuan w pracy (1997) [1]*

Oryginalność badań zespołu złożonego z *Abendroth, Stuart i Yuan* polega na zastosowaniu w badaniach płyty, a nie powszechnie występującej belki. W pracy [1] przedstawili program i realizację badań doświadczalnych, których celem było określenie możliwości wykorzystania splotów sprężających pokrytych żywicą epoksydową z posypką piaskową (splot powlekany C) i czystych splotów oraz siatek zgrzewanych z prętów użebrowanych do produkcji cienkich strunobetonowych płyt pomostowych. Do wykonania 75 elementów próbnych o szerokości 0,102; 0,152; 0,305 i 0,914 mm, przydługości od 2,08 do 3,58 m, zastosowano siedmiodrutowy splot o średnicy 9,53mm ( $A_p = 54,8\text{mm}^2$ ) ze stali niskiej relaksacji o wytrzymałości charakterystycznej 1860 MPa. Sploty usytuowane były w połowie grubości płyty, natomiast siatka zbrojeniowa umieszczona była nad splotami. Pręty poprzeczne leżały bezpośrednio na splotach, a pręty podłużne umieszczone były na prętach poprzecznych i w połowie odległości między splotami.

Do wykonania betonu o stosunku  $w/c = 0,39$  zastosowano cement portlandzki, piasek i kruszywo łamane węglanowe o uziarnieniu do 13 mm. Wytrzymałość betonu na ściskanie w chwili zwalniania naciągu wynosiła 30 MPa. Sploty sprężające umieszczone były w połowie grubości elementów badawczych, a ich naciąg zwolniono przez przecięcie za pomocą szlifierki. Wnioski wynikające z przeprowadzonych badań i analiz:

- Aby zapobiec rozłupywaniu betonu (rysy podłużne wzdłuż splotów) podczas zwalniania naciągu, minimalna grubość płyty zbrojonej siatką zgrzewaną i sprężonej powlekanymi splotami winna wynosić 76 mm.
- W przypadku stosowania niepowlekanych splotów i siatki zbrojeniowej z prętów niepowlekanych, minimalna grubość strunobetonowej płyty powinna wynosić 64 mm. Przy tej grubości płyt, w przypadku niektórych mostów odnotowano rysy podłużne rozłupujące beton poniżej splotów.
- Analizując pomierzone długości transmisji zamieszczone w [1] można stwierdzić, że nie odnotowano istotnych zmian w okresie 18 godzin od chwili zwolnienia naciągu, zarówno dla splotów niepowlekanych jak i powlekanych.
- Grubość bocznej otuliny betonowej skrajnego splotu w płycie ma wpływ na długość transmisji splotów niepowlekanych. W przypadku splotów powlekanych wpływ ten nie był jednoznaczny.
- Rozstaw splotów o średnicy 152 mm w elementach próbnych o szerokości 914 mm, nie miał wpływu na długość transmisji zarówno splotów powlekanych jak i nie powlekanych.

- Pomierzone długości transmisji splotów powlekanych były około 50% mniejsze od długości transmisji splotów niepewlekanych.

#### Uwaga

Autorzy badań nie wzięli pod uwagę długości badanego elementu. Do badania długości transmisji w przypadku elementów ze splotami niepewlekanyimi należało zastosować próbki znacznie dłuższe, aby można było w sposób jednoznaczny określić wartość stałych odkształceń betonu na odcinku poza długością transmisji. W niektórych badanych elementach długość transmisji wynosiła 963 mm (autorzy badań nie podali długości elementu).

#### **4.3.3.4 *Girgis i Tuan (2005)[52]***

*Girgis i Tuan* 2005 [52] w badaniach doświadczalnych zastosowali trzy mieszanki betonowe. Mieszanki 1 i 2 były betonami samozagęszczalnymi, natomiast mieszanka 3 była betonem normalnie zagęszczalnym. Z każdej mieszanki wykonano jeden strunobetonowy dźwigar mostowy sprężony splotami 7φ5 mm o średnicy 15,2 mm. Produkcja dźwigarów poprzedzona została badaniami kwalifikacyjnymi splotów metodą LBPT przy zastosowaniu mieszanki Logana.

Podczas badań doświadczalnych dźwigarów mierzono odkształcenia betonu na zewnętrznej powierzchni w osiach splotu za pomocą czujnika nasadowego DEMEC po 1, 3, 7, 14 i 28 dniach od wykonania elementów. Długości transmisji wyznaczono stosując metodę 95 % średniej wartości odkształcenia (95% *Average Mean Strain Method*).

Na elementach wykonanych z betonu samozagęszczalnego (mieszanki 1 i 2) uzyskano większe początkowe długości transmisji niż na elemencie wykonanym z betonu normalnie zagęszczalnego. Długość transmisji dla mieszanki 1 była większa o 80 %, natomiast długość transmisji dla mieszanki 2 była większa ponad 100 % od długości transmisji dla betonu samozagęszczalnego. Badania przeprowadzone metodą LBPT nie przewidywały większych długości transmisji w dźwigarach wykonanych z betonów samozagęszczalnych. Przyjęto, że większe wartości sił wyciągających będą odpowiadały krótszym długościom transmisji.

#### **4.3.3.5 *Larson, Peterman i Esmaily (2007)[93]***

Prowadząc badania nad przyczepnością betonów samozagęszczalnych do splotów sprężających oraz weryfikując wzory ACI [N3] i AASHTO [N1] na długość transmisji, *Larson, Peterman i Esmaily* [93] badali długość transmisji w sześciu belkach o przekroju poprzecznym 203 mm x 305 mm, sprężonych jednym splotem umieszczonym w odległości 50,8 mm od dolnej krawędzi (SSB) i sześć belek o przekroju poprzecznym 203 mm x 610 mm sprężonych jednym splotem umieszczonym w odległości 559 mm od dolnej krawędzi (TSB). Wysokość tych belek malała do 305 mm w strefie maksymalnego momentu zginającego, tak aby wyniki uzyskane dla belek SSB i TSB mogły być porównywalne. Ponadto wykonano jeszcze cztery belki dwuteowe (TB) ze splotami na wysokości 483 mm. Wszystkie belki wykonane zostały z tego samego betonu samozagęszczalnego i sprężone splotami o średnicy 12,7 mm.

Długość transmisji obliczono wg teorii poślizgu *Masta*, wykorzystując w tym celu pomierzone poślizgi splotów w chwili zwolnienia naciągu i po 21 dniach. Średnie wartości długości transmisji określone po 21 dniach wynosiły 533 mm dla belek SSB, 762 mm dla belek TSB i 737 mm dla belek TB. Dodatkowo w przypadku belek SSB i TB ze splotami w pobliżu dolnej krawędzi zarejestrowano wzrost długości transmisji o 10 - 20 %, podczas gdy w przypadku belek TSB ze splotami w pobliżu górnej krawędzi wzrost długości transmisji wyniósł 40 - 45 %.

Wszystkie belki zbadano przy obciążeniu czteropunktowym (stały moment w połowie rozpiętości), po czym zostały zniszczone przy zginaniu w wyniku zerwania splotu.

W wyniku dokonanych analiz stwierdzono, że wzory ACI i AASHTO są również zachowawcze przy obliczaniu długości transmisji i długości zakotwienia dla dolnych splotów w belkach wykonanych z betonu samozagęszczalnego. W przypadku splotów górnych wzór normowy nie ma zastosowania z powodu znacznie większych długości transmisji rzędu 50 - 60 %. Metoda *Logana* (LBPT) [95] nie powinna być stosowana w przypadku betonów samozagęszczalnych.

#### **4.3.3.6 Badania Borisa Kommer 2008 [79]**

Badania długości transmisji prowadził *B. Kommer* [79] przyjmując taki sam schemat badawczy jak *A. Nitsch* i pięć mieszanek lekkich betonów wysokiej wytrzymałości o wytrzymałości na ściskanie określonej na walcach w chwili zwolnienia naciągu w przedziale 27,7 MPa i 50,3 MPa. Uzyskane doświadczalnie długości transmisji wynosiły odpowiednio 277 mm i 506 mm.

W przypadku betonów samozagęszczalnych wytrzymałość betonu na ściskanie na próbkach cylindrycznych zawierała się między 26,0 a 34,2 MPa, natomiast długość transmisji osiągnęła wartości między 379 mm a 833 mm.

#### **4.3.3.7 Ramirez i Russell (2008)[132]**

*Ramirez i Russell* [132] badali przyczepność, długość transmisji i długość zakotwienia splotów sprężających o średnicy 12,7 i 15,2 mm w betonach wysokiej wytrzymałości. Głównym celem podjętego programu badawczego było zbadanie wpływu wytrzymałości betonu na przyczepność do splotów i rewizja wzorów AASHTO na długość transmisji i zakotwienia.

Badania doświadczalne przeprowadzono na 8 belkach o przekroju dwuteowym i 43 belkach o przekroju prostokątnym. Elementy wykonano o jednodniowej wytrzymałości na ściskanie od 27,5 do 68,9 MPa, a do ich sprężenia zastosowano sploty pochodzące od czterech producentów. Podczas badań mierzono długości transmisji za pomocą czujnika nasadowego typu DEMEC, wartości poślizgu splotów i określano długości zakotwienia na podstawie badań belek na zginanie przy czteropunktowym obciążeniu przy zmiennych czynnych długościach splotu. Przeprowadzono również zmodyfikowane badania NASP dla betonu w celu określenia, w jakim stopniu wytrzymałość betonu wpływa na zachowanie się przyczepności betonu do splotu.

Po przeanalizowaniu otrzymanych wyników *Ramirez i Russell* stwierdzili, że wzrastająca wytrzymałość betonu polepsza zachowanie się przyczepności. Wartości sił wyciągających "pull-out" w zmodyfikowanej metodzie NASP dla betonu wzrastały wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu na ściskanie, a elementy wykonane z betonu wysokiej wytrzymałości wykazywały krótsze długości transmisji.

#### **4.3.3.8 Pozolo i Andrawes (2011)[129]**

Po badaniach określających wpływ betonów samozagęszczalnych na przyczepność przeprowadzonych na dwóch blokach przy zastosowaniu mieszanki Logana, w drugim etapie badań wykonano dwa dźwigary dwuteowe (I1 i I2) oraz dwa dźwigary o przekroju skrzynkowym (N1 i N2). Zmiany długości transmisji mierzono za pomocą czujnika nasadowego DEMEC naklejając w tym celu repery na zewnętrznej powierzchni belek na poziomie cięgien sprężających. Pomiaru dokonano po 1, 3, 7 i 28 dniach, a do wyznaczenia długości transmisji zastosowano metodę 95% średniej wartości odkształcenia (95% *Average Mean Strain Method*). Pomierzone długości transmisji były mniejsze od wartości obliczonych wg zależności normowych ACI i AASHTO.

W świetle prowadzonych badań stwierdzono, że sploty spełniają warunki przyczepności w dźwigarach wykonanych z betonu samozagęszczalnego.

#### 4.3.3.9 *Oh, Lee i Yoo (2014)[120]*

*Oh i inni* [119, 120] przeprowadzili badania doświadczalne, których celem było określenie rzeczywistej przyczepności i długości transmisji w stali sprężającej strunobetonowych elementów. W badaniach uwzględniono średnicę splotu, wytrzymałość betonu na ściskanie, grubość betonowej otuliny i rozstaw splotów sprężających. Łącznie wykonano 36 elementów długości 3,0 m i stałej wysokości 0,2 m. Szerokość elementów sprężonych pojedynczym splotem o średnicy 12,7 i 15,2 mm wyniosła odpowiednio 112,7 i 115,2 mm. W przypadku belek sprężonych dwoma splotami szerokość elementów wyniosła 150,8 i 160,8 mm. W badaniach uwzględniono dwie wytrzymałości betonu na ściskanie w chwili zwalniania naciągu: 35 MPa (beton zwykły, N) i 45 MPa (beton wysokiej wytrzymałości, H). Ponadto przyjęto trzy grubości betonowej otuliny 30, 40 i 50 mm mierzone od spodu belki oraz trzy osiowe rozstawy splotów  $3 \cdot d_b$ ,  $4 \cdot d_b$  i  $5 \cdot d_b$  ( $d_b$  – średnica).

Do pomiaru odkształceń w splocie zainstalowano tensometry elektrooporowe na pojedynczych drutach splotów 7-dmio drutowych. Naciąg splotów realizowano indywidualnie do osiągnięcia docelowego naprężenia  $0,75f_{pu}$ . Pomiar siły w splocie realizowano za pomocą siłomierza umieszczonego pod zakotwieniem biernym. Elementy badawcze rozformowano dwa dni po zabetonowaniu. Następnie na całej długości belki naklejono na wysokości splotu repery w odstępach co 50 mm służące do pomiaru odkształceń betonu za pomocą czujnika nasadowego typu DEMEC. Zwolnienie naciągu zrealizowano 72 godziny od zabetonowania, za pomocą diamentowej tarczy (zwolnienie gwałtowne). Pomiar odkształceń betonu wykonano dwukrotnie za pomocą czujnika o bazie pomiarowej 150 mm. Czujnik był przykładany z przesunięciem co 50 mm. Przed zwolnieniem naciągu zakładano na obu końcach splotu czujniki przemieszczeń do pomiaru wartości wślizgu splotu. W oparciu o sporządzone rozkłady odkształceń betonu na długości belek, wyznaczono długości transmisji metodą 95% AMS (95% średniego maksymalnego odkształcenia) w chwili zwolnienia naciągu oraz po 7, 28 i 90 dniach. Ponadto długości transmisji obliczono w oparciu o pomierzone wartości wślizgu splotów wg wzoru (tab. 4.2).

Wnioski wynikające z przeprowadzonych badań są następujące:

- Długości transmisji obliczone wg wzoru normowego ACI 318-95 [N3] przeszacowują rzeczywiste pomierzone długości transmisji. Rozbieżności wyników są znaczące w przypadku betonów wysokiej wytrzymałości i przy znacznej grubości otuliny. Oba te parametry nie są ujęte w normie.
- Długość transmisji w elementach strunobetonowych maleje wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu na ściskanie, a także maleje wraz ze wzrostem grubości otuliny betonowej.
- Długość transmisji rośnie wraz ze wzrostem średnicy splotu sprężającego. Nie jest to zależność idealnie liniowa, aczkolwiek w normie ACI 318 przyjmuje się zależność liniową.
- Nagłe zwolnienie naciągu przez przecięcie splotu powoduje znaczny wzrost poślizgu i tym samym większą długość transmisji niż na końcu biernym. Średni wzrost długości transmisji na zwolnionym (czynnym) końcu jest o 15% większy w stosunku do długości transmisji na końcu biernym.
- Wartość wślizgu pomierzonego na końcu splotu może być w sposób racjonalny wykorzystana do obliczenia długości transmisji. Teoretycznie wyznaczona długość transmisji w oparciu o pomierzony wślizg wykazuje całkowitą zgodność z pomierzonymi wartościami.
- Większy rozstaw splotów powoduje skrócenie długości transmisji.
- Długość transmisji nieznacznie wzrasta w czasie, w wyniku efektów pełzania. Wartość wzrostu wynosi około 5% po 90 dniach od chwili zwolnienia naciągu.



## Komentarz

Rzeczywista wytrzymałość betonu na ściskanie określona w chwili zwolnienia naciągu (3 dni) wynosiła 34,7 MPa i 45,4 MPa, natomiast po 28 dniach dojrzewania betonu odpowiednio 48,7 MPa i 58,9 MPa. W świetle aktualnej normy [N10] oba te rodzaje betonów należy zakwalifikować do betonów zwykłych. Autorzy badań nie podają składu mieszanek betonowych, natomiast z informacji załączonych w pracy [120] wynika, że współczynnik sprężystości betonu obu mieszanek po 28 dniach dojrzewania wynosił 27 223 i 31 031 MPa.

Podłużne naprężenia ściskające w strefie bardzo dobrej przyczepności strunobetonowych elementów wyniosło 7,84 MPa dla splotów o średnicy 12,7 mm i 11,0 MPa dla splotów o średnicy 15,2 mm. Oh i inni (2014) [120] po przeanalizowaniu wyników otrzymanych z badań doświadczalnych stwierdzili, że naprężenie przyczepności wzrasta dynamicznie wraz ze wzrostem poślizgu przy niższych jego wartościach. Następnie wzrost przyczepności jest mniejszy przy jednoczesnym wzroście poślizgu. Dla celów wykonywanej analizy długości transmisji za pomocą metody elementów skończonych (MES), Oh i inni [2014] zaproponowali ujęcie zachowania relacji naprężenie przyczepności – poślizg w postaci zależności

$$f_b(x) = \alpha \cdot \sqrt{f'_{ci}} \cdot \left(\frac{S(x)}{d_b}\right)^\beta \quad (4.32)$$

gdzie:  $S(x)$  – poślizg

$d_b$  – średnica splotu

$f'_{ci}$  – wytrzymałość na ściskanie w chwili zwolnienia naciągu

Współczynniki  $\alpha$  i  $\beta$  zostały ustalone na podstawie badań doświadczalnych. Dla splotów o średnicy 12,7 mm zaproponowano  $\alpha=1,96$  i  $\beta=0,30$ , natomiast dla splotów o średnicy 15,2 mm  $\alpha=1,42$  i  $\beta=0,25$ .

Zależność ta została użyta do scharakteryzowania właściwości relacji naprężenie przyczepności-poślizg w elemencie interfejsowym między splotem i betonem w analizie MES.

W rezultacie dokonanej analizy wyników otrzymanych z badań doświadczalnych i analiz obliczeniowych zaproponowano realistyczne równanie do obliczania długości transmisji

$$l_t = 8 \cdot \sqrt{f_{pe}} \cdot \left(\frac{1}{f'_{ci}}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot d_b^{1,28} \cdot \left(\frac{1}{C-20,0} + 0,25\right) \quad (4.33)$$

gdzie:  $d_b$  – średnica splotu [mm]

$f'_{ci}$  – wytrzymałość betonu na ściskanie [MPa]

$f_{pe}$  – efektywne naprężenie w splocie [MPa]

$C$  – grubość betonowej otuliny mierzona od osi splotu [mm],  $C > 20\text{mm}$

Dla celów projektowych zaproponowano nieco zachowawczą formułę w postaci

$$l_{t,design} = 1,04 \cdot l_t \quad (4.34)$$

Do obliczenia długości transmisji, w przypadku braku informacji na temat średnicy splotu, grubości betonowej otuliny, wytrzymałości betonu na ściskanie oraz poziomu naprężenia w stali sprężającej można zastosować równanie

$$l_t = 183 \cdot \Delta + 340 \quad (4.35)$$

gdzie:  $\Delta$  – poślizg splotu [mm] na końcu strunobetonowego elementu oraz  $\Delta > 0,005\text{mm}$

W wyniku dokonanych analiz obliczeniowych za pomocą metody elementów skończonych, przy wariantowym przyjęciu poziomu naprężenia w stali sprężającej i wytrzymałości betonu na ściskanie w chwili zwalniania naciągu oraz grubości otuliny betonowej sformułowano następujące wnioski końcowe.

- Długość transmisji rośnie wraz ze wzrostem średnicy splotu. Średni wskaźnik wzrostu wynosi około 30% przy przejściu ze splotu o średnicy 12,7 mm na splot o średnicy 15,2 mm.
- Długość transmisji zwiększa się wraz ze wzrostem wartości sprężenia, a wskaźnik wzrostu długości transmisji jest w przybliżeniu proporcjonalny do pierwiastka drugiego stopnia z efektywnego naprężenia w splotcie.
- Długość transmisji maleje wraz ze wzrostem grubości betonowej otuliny na wszystkich poziomach sprężenia.
- Długość transmisji maleje wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu na ściskanie dla wszystkich poziomów sprężenia i średnic splotu. Oznacza to, że beton wysokiej wytrzymałości na ściskanie jest znacznie bardziej efektywny w przenoszeniu sprężenia niż beton zwykły. Efekt ten winien być uwzględniony w praktyce projektowej.

#### 4.4 Zaproponowane wzory na długość transmisji i przyczepności

Przeprowadzone badania zaowocowały dużą liczbą proponowanych wzorów zestawionych poniżej.

Tabela 4.2 Zestawienie zaproponowanych wzorów na długość transmisji i zakotwienia

Źródło	Długość transmisji $l_{ba}$ [mm]	Długość zakotwienia $l_{ba}$ [mm]
DIN 1045-1 [N6, N7]	$l_{bp} = \alpha_1 \cdot \frac{A_p}{\pi \cdot d_p} \cdot \frac{\sigma_{pm0}}{f_{bp} \cdot \eta_1}$ $l_{bpd} = \begin{cases} 0,8 \cdot l_{bp} \\ 1,2 \cdot l_{bp} \end{cases}$	$l_{ba} = l_{bpd} + \frac{A_p}{\pi \cdot d_p} \cdot \frac{\sigma_{pd} - \sigma_{pmt}}{f_{bp} \cdot \eta_1 \cdot \eta_p}$
	$\alpha_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{stopniowe zwalnianie} \\ 1,25 & \text{nagłe zwalnianie} \end{cases}$ $\eta_1 = 1,0 (\text{współ. dla betonu lekkiego})$	$\eta_p = \begin{cases} 0,5 & \text{splot} \\ 0,7 & \text{żebrowana stal sprężająca} \end{cases}$
Eurocode 2 [N8]	$l_{bp} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot d_p \cdot \frac{\sigma_{pm0}}{f_{bp}(t)}$ $f_{bp}(t) = \eta_{p1} \cdot \eta_1 \cdot f_{cta}(t)$ $l_{bpd} = \begin{cases} 0,8 \cdot l_{bp} \\ 1,2 \cdot l_{bp} \end{cases}$	$l_{ba} = l_{bpd} + \alpha_2 \cdot d_p \cdot \frac{\sigma_{pd} - \sigma_{pmt}}{f_{bp}}$ $f_{bp} = \eta_{p2} \cdot \eta_1 \cdot f_{cta}$
	$\alpha_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{stopniowe zwalnianie} \\ 1,25 & \text{nagłe zwalnianie} \end{cases}$ $\alpha_2 = \begin{cases} 0,19 & \text{splot} \\ 0,25 & \text{okrągła stal sprężająca} \end{cases}$ $\eta_{p1} = \begin{cases} 3,2 & \text{splot} \\ 2,7 & \text{druty profilowane} \end{cases}$	$\eta_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{dobre warunki} \\ 0,7 & \text{złe warunki} \end{cases}$ $\eta_{p2} = \begin{cases} 1,2 & \text{splot} \\ 1,4 & \text{druty profilowane} \end{cases}$
ACI 318-05 / AASHTO Standard [N3] [N1]	$l_{bp} = \frac{1}{21} \cdot d_p \cdot \sigma_{pmt}$ $l_{bp} = 50 \cdot d_p \text{ (wzór uproszczony)}$	$l_{ba} = l_{pb} + \frac{1}{7} \cdot d_p \cdot (\sigma_{pd} - \sigma_{pmt})$

AASHTO LRFD	[N2]	$l_{bp} = \frac{1}{21} \cdot d_p \cdot \sigma_{pmt}$ $l_{bp} = 60 \cdot d_p$ (wzór uproszczony)	$l_{ba} = l_{pb} + \frac{1}{7} \cdot d_p \cdot (\sigma_{pd} - \sigma_{pmt})$
Hanson i Kaar	[57]	$L_t = f_{pe} d_b / 20,7$	-----
Oleśniewicz	[121]	$L_t = \psi d_b \sqrt{\frac{f_{pe}}{f'_{ci}}}$	-----
Martin et al.	[102]	$l_{bp} = 80 \cdot d_p$	Ograniczenie $\sigma_{pd}$ w zależności od $l_{ba}$ . Dla $l_{ba} \leq 80 \cdot d_p$ dotyczy: $\sigma_{pd} \leq \frac{6,985 \cdot l_{ba}}{80 \cdot d_p} \cdot \left( \frac{135}{\left(\frac{d_p}{25,4}\right)^{\frac{1}{6}}} + 31 \right)$ Dla $l_{ba} > 80 \cdot d_p$ dotyczy: $\sigma_{pd} \leq \frac{135 \cdot 6,985 \cdot l_{ba}}{\left(\frac{d_p}{25,4}\right)^{\frac{1}{6}}} + \frac{0,39 \cdot 6,985 \cdot l_e}{d_p}$
Zia et. al.	[166]	Dla $f_{cmj} < 55,2 \frac{N}{mm^2}$ : $l_{bp} = \alpha_1 \cdot \frac{\sigma_{pm0}}{f_{cmj}} \cdot d_p - A_1$ $\alpha_1 = \begin{cases} 1,3 & \text{stopniowe zwalnianie} \\ 1,5 & \text{nagłe zwalnianie} \end{cases}$ $A_1 = \begin{cases} 58 & \text{stopniowe zwalnianie} \\ 117 & \text{nagłe zwalnianie} \end{cases}$	Dla $f_{cmj} < 55,2 \frac{N}{mm^2}$ : $l_{ba} = l_{pb} + \frac{1}{5,6} \cdot d_p \cdot (\sigma_{pd} - \sigma_{pmt})$
Zia i Moustafa	[166]	$L_t = \frac{1,5 f_{pi} d_b}{f'_{ci}} - 117$	$l_d = \left( 1,5 \frac{f_{si} D}{f'_{ci}} - 117 \right) + \frac{1,25}{6,9} (f_{su} - f_{se}) D$
Nijhawam	[113]	$L_t = \frac{0,69 f_{pi} d_b}{f'_{ci}} + 262$	-----
Cousins, et al.	[32]	$l_{bp} = \frac{0,0415 \cdot U'_t \cdot \sqrt{f_{cmj}}}{B} + \frac{12 \cdot \sigma_{pmt} \cdot A_p}{\pi \cdot d_p \cdot U'_t \cdot \sqrt{f_{cmj}}}$ $U'_t = 6,7$ (niepowlekanie sploty) $P = 300$	$l_{ba} = l_{pb} + \frac{12 \cdot (\sigma_{pd} - \sigma_{pmt}) \cdot A_p}{\pi \cdot d_p \cdot U'_t \cdot \sqrt{f_{ck}}}$ $U'_t = 1,32$ (niepowlekanie sploty)
Cousins i inni	[32]	$L_t = \frac{f_{pe} d_b}{2,22 \sqrt{f'_{ci}}} + 3,41 \sqrt{f'_{ci}}$	-----
Bruggeling i Huyghe	[21]	$L_t = 7 f_{pi} d_w / 12(0,13) f'_{ci}$	-----
Shahawy et al.	[150]	$l_{bp} = \frac{1}{21} \cdot d_p \cdot \sigma_{pm0}$	-----
Balazs	[9]	$L_t = 2,93 d_b \sqrt[5]{\frac{f_{pi}^3}{f'_{ci}{}^2}}$	-----
Russel et al.	[143] [144]	$l_{bp} = \frac{1}{13,8} \cdot d_p \cdot \sigma_{pmt}$ Uproszczony:	$M_{cr} > l_{pb} \cdot V_{ed}$ Na końcu izolowane sploty:

		$l_{bp} = 80 \cdot d_p$	$l_{abisoliert} + l_{bp} \leq \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{M_{cr}}{M_{ed}}}\right) \cdot l_{ges}$
Mitchell et al.	[106]	$l_{bp} = \frac{1}{21} \cdot d_p \cdot \sigma_{pm0} \cdot \sqrt{\frac{20,7}{f_{cmj}}}$	$l_{ba} = l_{pb} + \frac{1}{7} \cdot d_p \cdot (\sigma_{pd} - \sigma_{pmt}) \cdot \sqrt{\frac{30}{f_{ck}}}$
Deatherage et al.	[37]	$l_{bp} = \frac{1}{21} \cdot d_p \cdot \sigma_{pm0}$	$l_{ba} = l_{pb} + \frac{1}{4,6} \cdot d_p \cdot (\sigma_{pd} - \sigma_{pmt})$
Buckner	[22]	$l_{bp} = \frac{1250}{E_c} \cdot d_p \cdot \sigma_{pm0}$ <i>Uproszczoney:</i> $l_{bp} = \frac{\eta_1}{21} \cdot d_p \cdot \sigma_{pm0}$ $\eta_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{dobre warunki przyczepności} \\ 1,3 & \text{złe warunki} \end{cases}$	$l_{ba} = l_{pb} + \frac{\lambda \cdot d_p \cdot (\sigma_{pd} - \sigma_{pmt})}{6,9}$ $1 < \lambda = 0,6 + 40 \cdot \varepsilon_{pd} < 2$
Lane	[92]	$l_{bp} = \frac{4 \cdot d_p \cdot \sigma_{p0}}{f_{ck,28d}} - 127$	$l_{ba} = l_{pb} + \frac{6,4 \cdot d_p \cdot (\sigma_{pd} - \sigma_{pmt})}{f_{ck,28d}} - 381$
Barnes et al.	[10]	$l_{bp} = \frac{1}{2,1 \cdot \sqrt{f_{cmj}}} \cdot d_p \cdot \sigma_{pm0}$	$l_{ba} = l_{pb} + 0,18 \cdot d_p \cdot (\sigma_{pd} - \sigma_{pmt})$
Tadros et al.	[156]	$l_{bp} = \frac{d_p \cdot \sigma_{pmt}}{16,6} - 127$	-----
Petermann et al.	[125]	<i>dla betonu lekkiego:</i> <i>Bez podłużnego zarysowania:</i> $l_{pb} = 50 \cdot d_p$ (wzór uproszczony) <i>z podłużnym zarysowaniem:</i> $l_{bp} = 70 \cdot d_p$ (wzór uproszczony)	<i>dla betonu lekkiego:</i> $l_{ba} = l_{pb} + \frac{1}{7} \cdot d_p \cdot (\sigma_{pd} - \sigma_{pmt}) + S$ $S = \max \left\{ \frac{d_L}{0,5} \cdot h \right.$
Mahmoud et al.	[97]	$l_{bp} = \frac{d_p \cdot \sigma_{pm0}}{\alpha_t \cdot f_{cmj}^{\frac{2}{3}}} - 127$ $\alpha_t = 2,4$ (sploty stalowe)	-----
Shahawy	[151]	$l_{pb} = \frac{1}{21} \cdot d_p \cdot \sigma_{pm0}$	$l_{ba} = l_{pb} + \frac{d_p \cdot (\sigma_{pd} - \sigma_{pmt})}{8,25} + 1,47 \cdot h$
Kose et al.	[81]	$l_{bp} = 29 \cdot \left(1 - \frac{d_p}{25,4}\right)^2 \cdot \frac{\sigma_{pm0}}{\sqrt{f_{ck,28d}}}$	$l_{ba} = l_{pb} + \left(203 + 122 \cdot \frac{(\sigma_{pd} - \sigma_{p0}) \cdot \left(1 - \frac{d_p}{25,4}\right)^2}{\sqrt{f_{ck,28d}}}\right)$
Nitsch	[114]	$l_{bp} = \alpha_1 \cdot \frac{A_p \cdot \sigma_{pm0}}{1,6 \cdot \pi \cdot \sqrt{A_p} \cdot f_{bp}}$ $f_{bp} = n_{p1} \cdot \frac{f_{cmj,cube}}{10}$ $\eta_{p1} = \begin{cases} 1,2 & \text{splot} \\ 1,6 & \text{profil} \end{cases}$ $l_{bpd} = \begin{cases} 0,8 \cdot l_{bp} \\ 1,2 \cdot l_{bp} \end{cases}$	$l_{pa} = l_{pbd} \cdot \frac{A_p}{1,6 \cdot \pi \cdot \sqrt{A_p}} \cdot \frac{\sigma_{pd} - \sigma_{pmt}}{f_{bp} \cdot \eta_1 \cdot \eta_p}$ $\eta_p = 0,5$ $\alpha_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{stopniowe zwalnianie} \\ 1,25 & \text{nagłe zwalnianie} \end{cases}$

Martí-Vargas et al.	[103]	$l_{bp} = 758 - 5,9 \cdot f_{cmj}$	$l_{ba} = 891 - 5,2 \cdot f_{ck}$
Martí-Vargas et al.	[104, 105]	$l_{bp} = \lambda \cdot \frac{A_p \cdot \sigma_{pm0}}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot d_p \cdot 0,4 \cdot f_{cmj}^{\frac{2}{3}}}$	-----
Oh et al.	[120]	$l_t = 8 \cdot \sqrt{f_{pe}} \cdot \left(\frac{1}{f_{ci}}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot d_b^{1,28} \cdot \left(\frac{1}{c - 20,0} + 0,25\right)$	-----

Ze względu na przyjęty i przeprowadzony program badań przez poszczególnych naukowców jak również otrzymane wyniki oraz wyciągnięte wnioski, liczba parametrów występujących we wzorach jak również podany charakter zależności są bardzo różnorodne. Poniżej zestawiono tabelarycznie zmienne zastosowane w formułach obliczeniowych.

Tabela 4.3 Zmienne występujące we wzorach na obliczanie długości transmisji

Badania	A	$f_{pe}$	$f_{ci}$	$1/f_{ci}$	E	$d_b$	c	zwalnianie naciągu	rodzaj splotu
Oh	-	+	-	+	-	+	+	-	-
Martin	-	-	-	-	-	+	-	-	-
Zia	-	+	+	-	-	+	-	+	-
Shahawy	-	+	-	-	-	+	-	-	-
Deatherage	-	+	-	-	-	+	-	-	-
Mitchell	-	+	-	+	-	+	-	-	-
Russell	-	+	-	-	-	+	-	-	-
Buckner	-	+	-	-	+	+	-	-	-
Lane	-	+	-	+	-	+	-	-	-
Barnes	-	+	-	+	-	+	-	-	-
Tadros	-	+	-	-	-	+	-	-	-
Mahmoud	-	+	-	+	-	+	-	-	+
Kose	-	+	-	+	-	+	-	-	-
Marti-Vargas	-	-	+	-	-	-	-	-	-
Marti-Vargas	+	+	$1/f_{ci}$	+	-	$1/d_p$	-	-	-
Cousins	-	+	-	+	-	+	-	-	-
Petrmann	-	-	-	-	-	+	-	-	-
Nitsch	+	+	+	-	-	-	-	+	+

## 5 MATERIAŁY

Badania zastosowanych materiałów obejmowały określenie cech mechanicznych betonu oraz splotów stali sprężającej.

### 5.1 Beton

#### 5.1.1 Beton do produkcji prefabrykowanych elementów ściany zbiornika w Zakładzie Prefabrykacji Precon Polska sp z o.o.

Do produkcji płyt z betonu C40/50 stosowana jest mieszanka betonowa na kruszywie bazaltowym o uziarnieniu 2-8 i 8-16, cemencie CEM I 52,5R z udziałem dodatków napowietrzających i plastyfikujących, o stosunku w/c = 0,45 (tab.5.1).

Tabela 5.1 Skład mieszanki betonowej C40/50

Rodzaj materiałów na 1 m <sup>3</sup>	Ciężar [kg]
Piasek	746
Bazalt 2 - 8	516
Bazalt 8 - 16	650
Cement CEM I 52,5R	370
Woda	166,5
VC EPL 21	2,22
LPS V	0,3

Wymagana minimalna wytrzymałość betonu na ściskanie w chwili rozformowania elementu wynosiła 35 MPa, dlatego też do produkcji płyt zastosowano cement CEM I 52,5R. W trakcie betonowania elementów pobrano próbki, które posłużyły do określenia wytrzymałości betonu na ściskanie i na rozciąganie oraz modułu sprężystości betonu.

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych w Laboratorium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej uzyskano właściwości mechaniczne betonu po 2, 7 i 28 dniach dojrzewania betonu zestawione w tabeli 5.2. Podaną w tablicy 5.2 wartość  $f_{c,cyl} = 35,6$  MPa obliczono z relacji do  $f_{c,cube}$  przyjmując współczynnik przeliczeniowy 1,15 (jak dla betonu po 7 dniach dojrzewania). Wytrzymałość na osiowe rozciąganie obliczono z relacji w stosunku do  $f_{c,cyl}$  przyjmując średni współczynnik przeliczeniowy 0,0475 (jak dla betonu po 7 i 28 dniach dojrzewania). Współczynnik sprężystości po 20 godzinach i 1 dniu dojrzewania betonu oszacowano na poziomie 26 000 i 30 000 MPa w oparciu o wyniki uzyskane na innych betonach o podobnym składzie. Określone w ten sposób w/w wartości należy traktować jako przybliżone, ale ich ustalenie było konieczne do przeprowadzenia analizy obliczeniowej stanu odkształcenia i naprężenia w prefabrykowanym elemencie w chwili zwolnienia

naciągu (20 h). Należy podkreślić, że w zakładzie prefabrykacji nie można było tych cech określić doświadczalnie.

Ciężar objętościowy betonu obliczony na podstawie dokonanych geometrycznych obmiarów próbek w chwili badania wytrzymałości (po uprzednim zważeniu próbek) wynosił 2483 kg/m<sup>3</sup> przy współczynniku zmienności 0,50 %.

Tabela 5.2 Właściwości mechaniczne betonu

Właściwości mechaniczne betonu	20 godzin	2 dni	7 dni	28 dni
średnia wytrzymałość betonu na ściskanie (próbka 150 x 150 x 150 mm) $f_{c,cube}$ [MPa]	41,0	46,44	61,33	75,41
średnia wytrzymałość betonu na ściskanie (próbka $\phi$ 150 x 300 mm) $f_{c,cyl}$ [MPa]	35,6	40,94	53,29	67,91
średni moduł sprężystości betonu na ściskanie $E_c$ [MPa]	26 000 - - 30 000-	34 300	40 200	42 180
średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie osiowe $f_{ct}$ [MPa]	1,56	1,79	2,40	2,90
średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie przez rozłupanie $f_{ct,sp}$ [MPa]	-	-	3,96	4,75

### 5.1.2 Beton wysokiej wytrzymałości do produkcji tarczy w Laboratorium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych (L-1) Politechniki Krakowskiej

Beton o wysokiej wytrzymałości (*High-Strength Concrete* – HSC) często utożsamiany z betonem wysokowartościowym (*High-Performance Concrete* – HPC) nie oznacza jednak tego samego. Sama nazwa wskazuje na cechę wyróżniająca, chociaż szeroko przyjmuje się, że każdy beton wysokowartościowy jest betonem o wysokiej wytrzymałości, ale nie odwrotnie. Tym nie mniej oba pojęcia stosowane są łącznie lub zamiennie. Oba typy betonów należą do nowoczesnych betonów cementowych, do których zalicza się również betony bardzo wysokowartościowe BBWW (*Very High-Performance Concrete* - VHPC) oraz betony ultra-wysokowartościowe BUWW (*Ultra High-Performance Concrete* – UHPC).

Beton wysokiej wytrzymałości charakteryzuje się najczęściej nie tylko podwyższoną wytrzymałością, ale również innymi właściwościami na wysokim poziomie, do których należy między innymi trwałość na oddziaływanie czynników środowiskowych, niska przepuszczalność cieczy, odporność na ścieralność. Próba definicji i określenie ścisłych granic napotyka jednak na trudności, co wyraża się w różnych kryteriach w poszczególnych normach. W Polsce pod pojęciem beton BWW rozumie się betony cementowe na kruszywach naturalnych z odpowiednimi dodatkami i domieszkami, charakteryzujące się dobrą urabialnością świeżej mieszanki betonowej, wytrzymałością na ściskanie po 28 dniach dojrzewania nie mniejszą niż 60 MPa oraz dużą trwałością [50, 51, 83]. Odpowiedni dobór rodzaju i proporcji składników, jak również mikrowypełniaczy i superplastyfikatorów rzutujących na uszczelnienie mikrostruktury, pozwala na uzyskanie określonych właściwości świeżej mieszanki i stwardniałego betonu. BWW oznacza się niską wartością wskaźnika wodno-cementowego w granicach  $w/c=0,21\div 0,38$  i dodatkowo jest charakteryzowany przez wskaźnik wodno-spoiwowy ( $w/s$ ). Mechaniczne właściwości BWW wynikają z ich składu i struktury.

Zniszczenie w betonie przebiega zawsze przez najłabszy element i o ile betonie normalnym jest to warstwa przejściowa między ziarnami kruszywa a matrycą, zgodnie z relacją  $f_{kruszywa} > f_{zaprawy} > f_{betonu}$ , to w BWW są to właśnie ziarna kruszywa, przez które najczęściej przechodzi rysa, co jest charakterystycznym wyznacznikiem w odniesieniu do dwuskładnikowego materiału kompozytowego,

za który uchodzi beton wysokiej wytrzymałości [70]. Efekt ten jest uzyskiwany dzięki ulepszeniu strefy kontaktowej przez zastosowanie kruszywa łamanego, zastosowanie superplastifikatorów zmniejszających wskaźnik wodno-cementowy, zastosowanie cementów wyższej klasy i dodatków wywołujących reakcje pucolanowe (np. pył krzemionkowy).

### 5.1.2.1 *Kruszywo*

Kruszywo jako podstawowy składnik mieszanki powinno charakteryzować się odpowiednią jakością. Zniszczenie materiału przebiega przez najłabszy element struktury i w związku z tym wysoka wytrzymałość betonu nie może być osłabiona przez kruszywo o dużo niższej wytrzymałości. Zalecenia odnośnie zastosowania kruszywa w BWW wskazują na skały charakteryzujące się wysoką wytrzymałością na ściskanie i niską odkształcalnością, a te wymagania spełnia przede wszystkim materiał magmowy.

Betony wysokowartościowe charakteryzuje zagęszczona matryca i jej wiązanie z powierzchnią kruszywa grubego [70], którego maksymalne rozwinięcie powierzchni właściwej poprawia mechaniczną przyczepność ziaren do zaczynu cementowego [126]. Stosowanie naturalnego żwiru o gładkiej powierzchni sprzyja urabialności mieszanki i wodożądności, może okazać się jednak niezadawalające w aspekcie przyczepności. Kruszywo łamane okazuje się bardziej efektywne, zwłaszcza w perspektywie właściwości stwardniałego betonu, a odpowiednio dobrana technologia kruszenia pozwala zminimalizować zawartość ziaren wydłużonych i płaskich niekorzystnie wpływających na parametry dojrzałego betonu.

Odpowiedni dobór wielkości ziaren kruszywa decyduje o wartościach pożądanych cech mechanicznych betonu, przy czym im mniejszy maksymalny wymiar ziaren kruszywa i im drobniejszy stos okruschowy tym uzyskiwana wytrzymałość betonu będzie przybierać większe wartości. Zalecane ograniczenia wielkości ziaren w przypadku planowanej wytrzymałości betonu na ściskanie równej 75, 100 i 150 MPa zawierają się w przedziałach odpowiednio 20 - 28, 10 - 20 i 10 - 14 mm.

Odwrotnie niż w przypadku kruszywa, wzrost uziarnienia piasku zwiększa proporcjonalnie wytrzymałość betonu, a zalecane wartości wskaźnika uziarnienia powinny zawierać się w przedziale 2,7 - 3,0 [3] lub 2,8 - 3,2 [112].

Do wykonania badanych betonów zastosowano kruszywo składające się z:

- piasku rzecznego 0/2 mm o gęstości  $\rho_p=2,65 \text{ kg/dm}^3$ ,
- grysów bazaltowych o gęstości  $\rho_{\text{bazalt}}=2,9 \text{ kg/dm}^3$ :
  - frakcji 2/8 mm,
  - frakcji 8/16 mm.

### 5.1.2.2 *Cement*

W betonach wysokowartościowych, ze względu na stosowany niski współczynnik w/c oraz przy zapewnieniu odpowiedniej odległości między ziarnami grubego kruszywa, zawartość cementu jest większa w porównaniu do betonów normalnych. Najczęściej stosowany jest cement portlandzki dobrej jakości klasy 42,5 lub 52,5 w ilości  $450 \div 550 \text{ kg/m}^3$ . Przy stosowaniu superplastifikatorów zaleca się dobór cementu z większą zawartością fazy krzemianowej przy mniejszej ilości fazy wapniowej.

Do wykonania mieszanek betonu BWW zastosowano cement portlandzki klasy wytrzymałościowej CEM-I 42,5 o wysokiej wytrzymałości wczesnej (R) produkowany w Cementowni "Rudniki".



### 5.1.2.3 Mikrowypełniacz mineralny

Zastosowanie dodatków i domieszek do betonów wpływa znacząco na ich budowę wewnętrzną i istotnie różnicuje beton zwykły od wysokowartościowego. Najczęściej stosowany jest pył krzemionkowy, chociaż zastosowanie znajdują również popioły lotne, mączka wapienna, granulowany żużel wielkopiecowy, popiół wulkaniczny, pył szklany i mączka cementowa.

Pył krzemionkowy, jako produkt uboczny procesu hutniczego przy produkcji krzemu metalicznego, składa się z rozdrobnionych cząstek amorficznej i aktywnej krzemionki o rozkładzie uziarnienia między 0,03 a 0,3  $\mu\text{m}$  i powierzchni właściwej około 20  $\text{m}^2/\text{g}$  [163, 112]. Obecność pyłu krzemionkowego zmienia charakterystyki zarówno świeżej mieszanki betonowej jak i dojrzałego betonu zwiększając zapotrzebowanie na wodę podczas jego wytwarzania, poprawiając spoiwość wpływającą na odsączenie (co jednak może powodować spękanie od skurczu), zwiększa stopień hydratacji cementu i związane z tym ciepło twardnienia. Pył krzemionkowy uszczelniając strukturę matrycy betonowej powoduje znaczny wzrost wytrzymałości nie tylko początkowej ale i końcowej betonu, a absorbując wodę zapobiega jej kumulacji w otoczeniu kruszywa i zbrojenia powodując zwiększenie przyczepności. Zmiany struktury wewnętrznej obserwowane jako eliminacja porów kapilarnych na korzyść porów zamkniętych wpływa na małą przepuszczalność gazów i cieczy, zwiększoną odporność na korozję chemiczną i mrozoodporność.

W zastosowanej mieszance betonowej jako dodatek mineralny wprowadzono granulowany pył krzemionkowy (drobno zmielony piasek krzemionkowy  $\text{SiO}_2$ ) SikaFume® HR-TU o następującej charakterystyce:

- zawartość amorficznej krzemionki – min. 92% masy,
- gęstość – 2,2  $\text{kg}/\text{dm}^3$ ,
- gęstość nasypowa – 0,65  $\text{kg}/\text{dm}^3$ ,
- powierzchnia właściwa po zdysperowaniu w mieszance betonowej – 20,6 ÷ 24,2  $\text{m}^2/\text{kg}$ ,
- udział ziaren < 0,063 mm – min. 99% masy.

### 5.1.2.4 Domieszki chemiczne -superplastyfikator

Podstawą technologii wykonywania betonów wysokiej wytrzymałości jest stosowanie superplastyfikatorów w interakcji z pyłami krzemionkowymi [76]. Domieszki modyfikujące lepkość (plastyfikatory i superplastyfikatory) umożliwiają przy niskim wskaźniku wodno-cementowym uzyskanie względnie ciekłej konsystencji mieszanki betonowej. Skutkuje to szczelniejszym ułożeniem mieszanki, co jest istotne zwłaszcza przy stosowaniu łamanego kruszywa, redukcją zużycia cementu i wody zarobowej przy zachowaniu założonej konsystencji mieszanki betonowej, co wpływa na poprawę właściwości mechanicznych dojrzałego betonu jak zwiększenie wytrzymałości [70], wodoszczelności i mrozoodporności. Uplynnacze jako substancje chemiczne są powierzchniowo czynne redukujące napięcie wody i tarcie między cementem a kruszywem [112] i o działaniu hydrofilowym, co w konsekwencji prowadzi do poprawy urabialności świeżej mieszanki, o ile zachowana jest kompatybilność superplastyfikatora względem stosowanego cementu.

Efektom działania domieszki opartego na zjawiskach fizyczno-chemicznych adsorpcji powierzchniowej i przestrzennej separacji cząstek działających na ziarna cementu i frakcji mialkich jest uzyskanie jednorodnej mieszanki o lepszej plastyczności. W produkowanym betonie zastosowano stężony superplastyfikator polimerowy Sika®ViscoCrete®5-600 przeznaczony do specjalistycznych betonów konstrukcyjnych w tym wysokowartościowych o charakterystyce:

- gęstość – 1,075 kg/dm<sup>3</sup>,
- odczyn pH – 4,4,
- umowna zawartość suchej substancji – 36,5%,
- zawartość chlorków ≤ 0,1%,
- zawartość alkaliów ≤ 0,5%.

### 5.1.2.5 Woda

Do mieszanek betonowych użyto wody pochodzącej z miejskiej sieci wodociągowej. Stosunek wody do cementu wynosił w/c = 0,33.

### 5.1.2.6 Mieszanka betonowa

We wszystkich testach pull-out jak również w badaniu tarczy w laboratorium L-18 stosowano tę samą mieszankę betonową w ramach szerszego projektu Zakładu Konstrukcji Sprężonych Politechniki Krakowskiej.

Tabela 5.3 Receptura mieszanki betonowej 1 m<sup>3</sup> oraz zastosowanych zarobów

składniki	1,0 m <sup>3</sup>	0,085 m <sup>3</sup>	0,08 m <sup>3</sup>	0,07 m <sup>3</sup>	0,06 m <sup>3</sup>
	kg				
bazalt 8/16 mm	580	49,3	46,4	40,6	34,8
bazalt 2/8 mm	650	55,25	52	45,5	39
piasek 0/2 mm	665	56,525	53,2	46,55	39,9
cement	476	40,46	38,08	33,32	28,56
pył krzemionkowy	24	2,04	1,92	1,68	1,44
woda	156	13,26	12,48	10,92	9,36
superplastyfikator	5,2	0,442	0,416	0,364	0,312

### 5.1.3 Wyniki badań właściwości mechanicznych betonu

Próbki pobrane podczas produkcji elementów z BWW zostały poddane badaniom po 24 godzinach, 3, 7, 28 i 90 dniach. Przeprowadzono badania wytrzymałościowe na ściskanie na kostkach 150 x 150 x 150 mm i na walcach  $\Phi$  150 x 300 mm. Program obejmował również badania na rozciąganie przy rozłupywaniu na kostkach 150 x 150 x 150 mm oraz osiowe rozciąganie na walcach  $\Phi$  150 x 300 mm. Uzyskane wyniki przedstawiono w tab. 5.4 oraz na rys. 5.1 i 5.2. Jednocześnie w celach porównawczych na rys. 5.1 i 5.2 naniesiono wyniki badań uzyskane na betonie normalnym, z którego wykonano prefabrykowane elementy ściany zbiornika produkowane w Zakładzie Prefabrykacji Jastrowie firmy Precon Polska sp. z o. o.

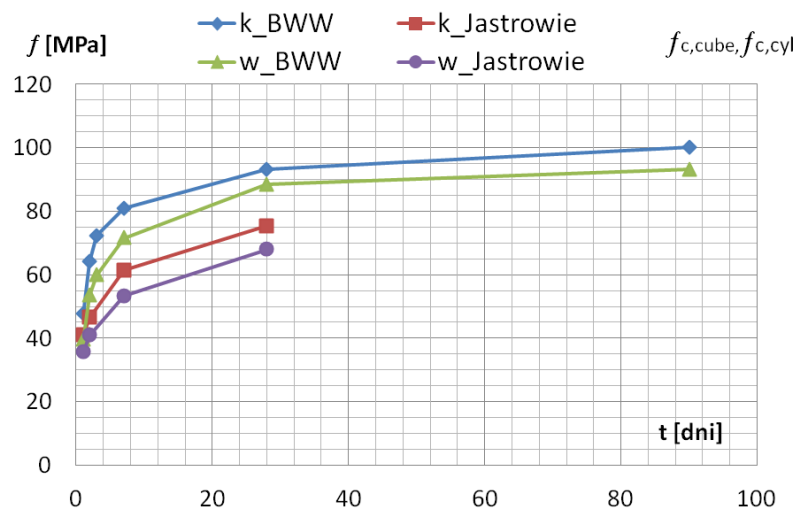
Podczas badania przyczepności BWW do splotów 7 $\phi$ 5 mm pod naciągiem, zwalnianie naciągu realizowano po 20 godzinach dojrzewania betonu, co umożliwiło rozformowanie próbek po przecięciu splotów i przygotowanie do badań po 24 godzinach, jak to miało miejsce w przypadku próbek ze splotami bez naciągu. Uznano zatem za istotne określenie wytrzymałości betonu na ściskanie oraz modułu sprężystości betonu po 22 godzinach tj. w chwili zwalniania naciągu. Otrzymane wyniki są zawarte w tabeli 5.4.

Tabela 5.4 Charakterystyki wytrzymałościowe zastosowanego BWW

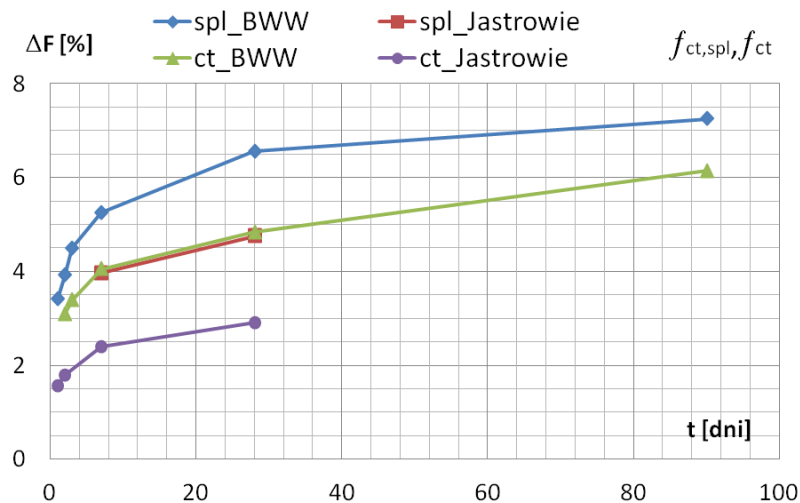
Wiek betonu [dni]	Parametry rozkładu		$f_{c,cube}$	$f_{ct,spl}$	$f_{c,cyl}$	$f_{ct}$	$E_{cm}$
	wielkość	jednostka					
22 h	$\bar{x}$	[MPa]	-	-	35,09	-	29 740
	n	[szt.]	-	-	3	-	3
	s	[MPa]	-	-	0,92	-	501
	v	[%]	-	-	2,63	-	1,68
1	$\bar{x}$	[MPa]	47,54	3,42	39,50	-	35 300
	n	[szt.]	11	8	9	-	9
	s	[MPa]	3,6	0,49	1,29	-	966
	v	[%]	7,57	14,42	3,26	-	2,74
2	$\bar{x}$	[MPa]	64,08	3,92	53,47	3,1	39 360
	n	[szt.]	11	10	7	5	7
	s	[MPa]	2,72	0,4	1,50	0,3	834
	v	[%]	4,25	10,29	2,80	9,83	2,12
3	$\bar{x}$	[MPa]	72,29	4,5	59,83	3,39	42 290
	n	[szt.]	10	9	6	5	6
	s	[MPa]	2,54	0,76	2,45	0,17	717
	v	[%]	3,51	16,87	4,10	5,09	1,70
7	$\bar{x}$	[MPa]	80,82	5,25	71,53	4,05	46 000
	n	[szt.]	10	9	9	6	9
	s	[MPa]	4,41	0,82	2,25	0,26	999
	v	[%]	5,46	15,6	3,15	6,54	2,17
28	$\bar{x}$	[MPa]	93,13	6,56	88,39	4,83	49 660
	n	[szt.]	11	11	11	8	11
	s	[MPa]	4,57	0,48	2,40	0,62	1201
	v	[%]	4,9	7,3	2,71	12,86	2,42
90	$\bar{x}$	[MPa]	100,19	7,25	93,19	6,14	53 100
	n	[szt.]	7	7	6	5	6
	s	[MPa]	4,57	0,39	3,28	0,24	1319
	v	[%]	4,57	5,44	3,52	3,98	2,48

$\bar{x}$  - wartość średnia  
n - liczba próbek

s - odchylenie standardowe  
v - współczynnik zmienności



Rys. 5.1 Wykresy rozkładu wytrzymałości betonu na ściskanie określonego na walcach i kostkach w zależności od wieku betonu dla BWW i betonu zastosowanego w płycie C8



Rys. 5.2 Wykresy rozkładu wytrzymałości betonu na osiowe rozciąganie i przez rozłupywanie w zależności od wieku betonu dla BWW i betonu zastosowanego w płycie C8

## 5.2 Stal sprężająca

W testach pull-out przewidziano uwzględnienie wpływu rodzaju splotów na zachowanie się przyczepności. Do badań przyjęto sploty siedmiodrutowe z centralnie usytuowanym rdzeniem o nieco większym przekroju poprzecznym i sześciu drutach oplotu ze stali o wysokiej wytrzymałości. Charakterystyki zastosowanych trzech rodzajów splotów 7φ4 mm, 7φ5 mm z drutów okrągłych i profilowanych zestawiono w tabeli 5.5. Ze względu na zjawisko przyczepności szczególnie ważnym jest przyjęty do obliczeń obwód splotu wpływający bezpośrednio na wyznaczoną wartość naprężeń jak również przekrój betonu podlegający ścinaniu a wypełniający przestrzenie między drutami oplotu. Poniżej zostaną omówione cechy geometryczne przekroju.

Tabela 5.5 Cechy mechaniczne i geometryczne splotów

cechy mechaniczne i geometryczne			sploty		
			7φ4 mm	7φ5 mm	
cecha	symbol	jednostka		okrągłe	zamknięte
wytrzymałość charakterystyczna na rozciąganie	$f_{pk}$	[MPa]	1860	1860	1820
moduł sprężystości	$E_p$	[GPa]	190	195	190
pole powierzchni	$A_p$	[mm <sup>2</sup> ]	100	150	165
średnica	$d_p$	[mm]	12,9	15,7	15,2
powierzchnia ścinanego betonu	$A_c$	[mm <sup>2</sup> ]	25,4	37	10,3
obwód zastępczy	$u_\phi$	[mm]	40,5	49,3	47,8
obwód rzeczywisty	$u_p$	[mm]	53,4	65,34	52,9

### 5.2.1 Sploty 7φ4 mm do produkcji prefabrykowanego elementu ściany zbiornika w systemie C8

#### 5.2.1.1 Charakterystyki

Do badania przyczepności BWW jak i długości transmisji siły sprężającej w strunobetonowych elementach ściennych dla zbiorników realizowanych w systemie C8 zastosowano sploty typu 7φ4 mm produkowane przez firmę TYC SA PSC, Santander Hiszpania. Poniżej przytoczono dane wyjściowe

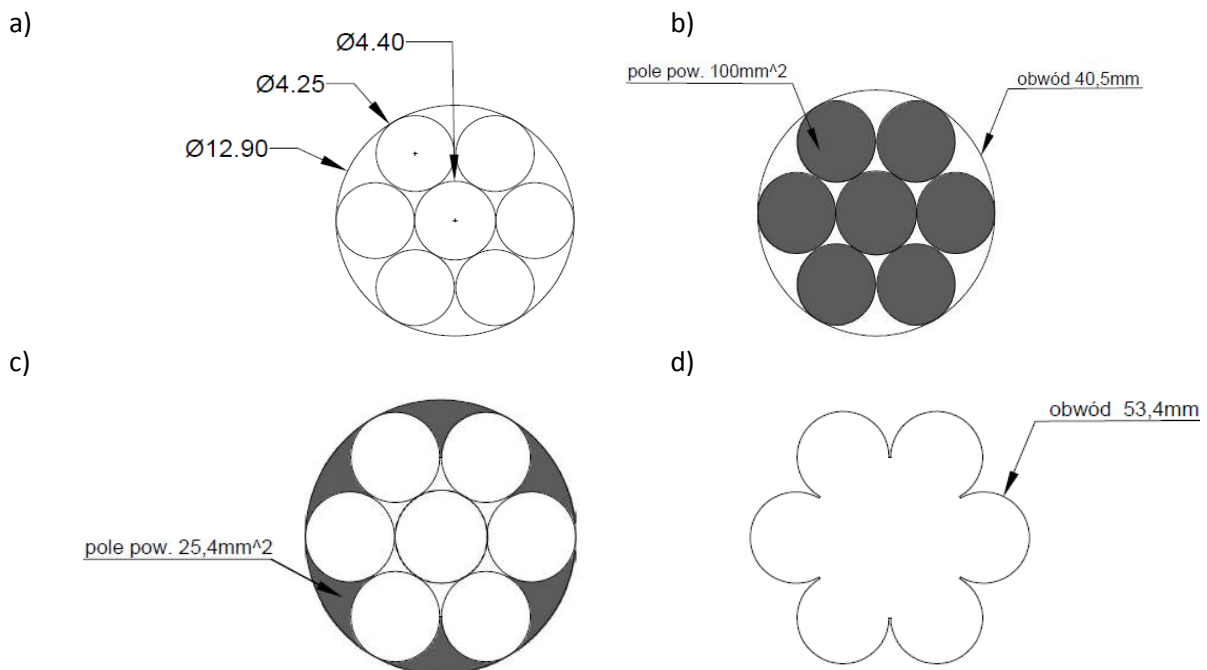
na podstawie atestu (16.04.2012) dostarczonego przez producenta (tab. 5.6) oraz dane otrzymane z badań uzupełniających przeprowadzonych w laboratorium Instytutu L-1.

Tabela 5.6 Właściwości splotu Y186057-12,9

Krań	Przekrój poprzeczny	Masa	Siła zrywająca	Siła przy odkształceniu 0,1%	Siła przy odkształceniu 0,2%	Moduł sprężystości	%	Długość próbki	Ciężar netto
	$A_p$		P	$P_{0,1}$	$P_{0,2}$	$E_p$		l	
	[mm <sup>2</sup> ]	g/m	[kN]	[kN]	[kN]	[kN/mm <sup>2</sup> ]		[m]	[kG]
minimum	98,00	765,40	186,0			185,00	3,50		
maximum	102,00	796,60	213,0	160,00		205,00			

Splot 7 $\phi$ 4 mm zbudowany jest z rdzenia o średnicy  $\phi_r = 4,40$  mm, wokół którego opleciono sześć drutów o średnicy  $\phi_o = 4,2$  mm. Obwód okręgu opisanego na prętach splotu wynosi 40,5 mm, pole powierzchni 100 mm<sup>2</sup>, a pole powierzchni ścinanego betonu w przypadku wykręcania się splotu z kołowego kanału betonowego wynosi 25,4 mm<sup>2</sup>. Druty centralny i obwodowe wykazują kołowy przekrój.

Na rysunku 5.3 zobrazowano rzeczywisty przekrój przez splot 7 $\phi$ 4 mm. Przedstawiono poszczególne charakterystyki splotu 7 $\phi$ 4mm, do których zaliczyć można średnice pojedynczych drutów rdzenia, oplotu i całego splotu, sumaryczną powierzchnię wszystkich drutów i koła opisanego na splotcie, pole powierzchni ścinania i rzeczywisty obwód kontaktowy między betonem a splotem.



Rys. 5.3 Charakterystyki splotu 7 $\phi$ 4mm : a), b) - przekrój splotu, średnice pojedynczych drutów i całego splotu c) - powierzchnia ścinanego betonu, d) - obwód splotu

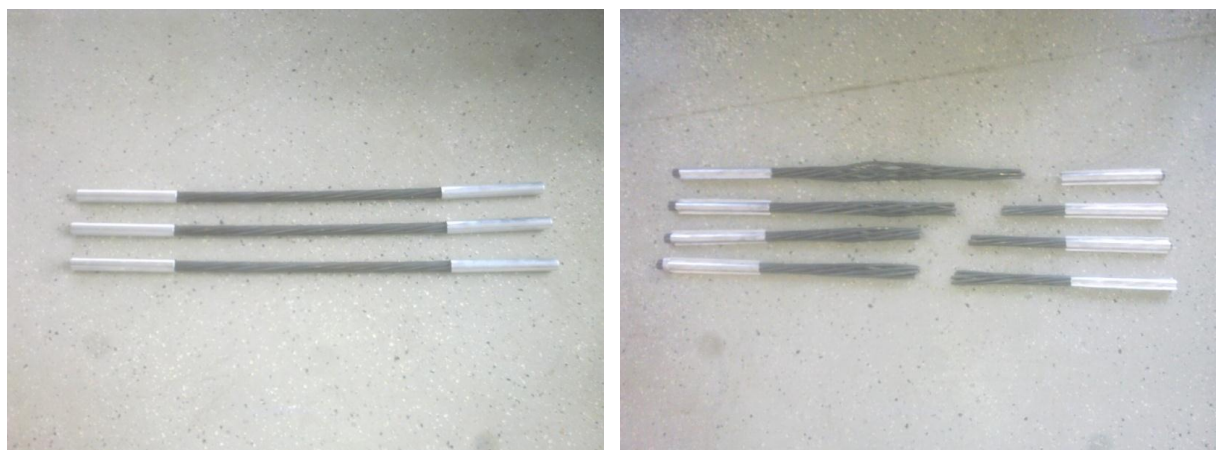
### 5.2.1.2 Wyniki badań właściwości mechanicznych stalowych splotów

Sploty 7 $\phi$ 4 mm zostały poddane wg normy [N13] statycznej próbie rozciągania przy zastosowaniu metody B. Badania zostały przeprowadzone w maszynie Zwick-Roell Z1200 przy stałej kontroli siły rozciągającej i odpowiadającym mu pomiarze przemieszczenia i odkształcenia rejestrowanym ekstensometrem inkrementalnym o bazie 180 mm i zsynchronizowanym z oprogramowaniem urządzenia. Przy wstępnej sile o wartości 5 kN odbywał się przyrost obciążenia z prędkością 20 MPa/s do osiągnięcia granicy plastyczności, po czym następowało sterowanie odkształceniem o wartości 20 mm/min.

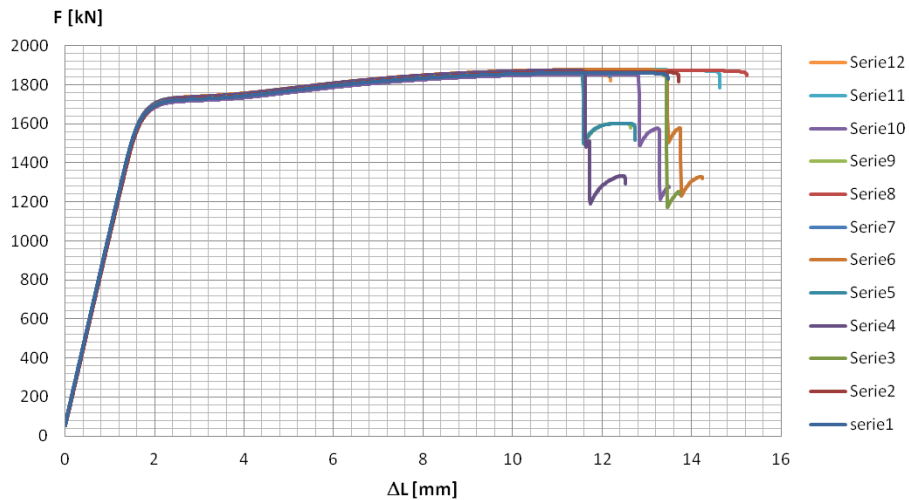
Badanie przeprowadzono na 12 splotach 7 $\phi$ 4 mm o długości około 0,70 m. Przed badaniem na oba końce splotu zostały nałożone aluminiowe rurki (rys. 5.5) o długości około 80 mm, które po włożeniu do szczęk maszyny wytrzymałościowej zostały zaciśnięte (rys. 5.4). Wyniki otrzymane z badań zostały zestawione na rys. 5.6 oraz w tabeli 5.6.



Rys. 5.4 Badanie splotów w maszynie Zwick-Roell Z1200



Rys. 5.5 Sploty przed włożeniem do maszyny wytrzymałościowej i po badaniach



Rys. 5.6 Wykres zależności siły wyciągającej od wydłużenia dla splotów 7φ4 mm (wyniki statycznej próby rozciągania)

Tabela 5.7 Charakterystyki splotów 7φ4 mm (wyniki statycznej próby rozciągania)

Parametry rozkładu		$m_E$	$F_{p0.1}$	$R_m$	$F_m$	$A_{gt}$	$A_g$	$S_0$
		[GPa]	[kN]	[MPa]	[kN]	[%]	[%]	[mm <sup>2</sup> ]
średnia	$\bar{x}$	197,24	166,37	1867,56	186,63	5,72	4,78	99,93
odchylenie standardowe	$s$	0,83	0,67	8,04	0,80	0,15	0,15	0,00
współczynnik zmienności	$v$	0,42	0,40	0,43	0,43	2,68	3,18	0,00

gdzie:

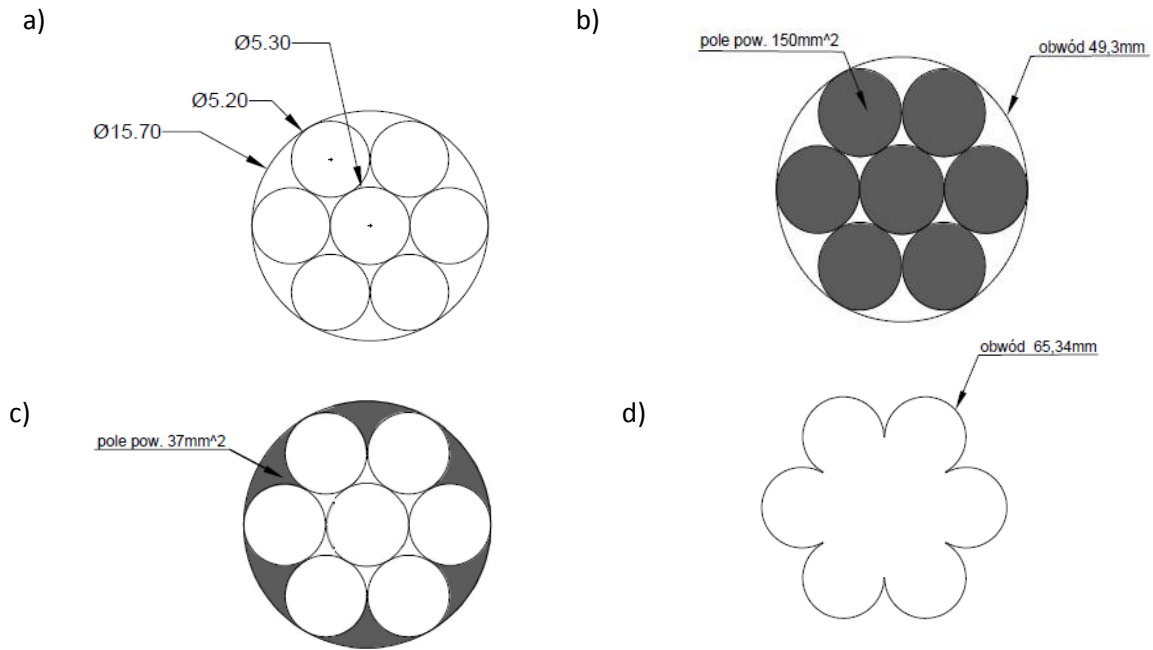
- $m_E$  - nachylenie krzywej naprężenie - wydłużenie ekstensometryczne procentowe (wartość modułu sprężystości - dwustronny ekstensometr uśredniający, badanie osiowe),
- $F_{p0.1}$  - wartość siły odpowiadająca umownej granicy plastyczności
- $R_m$  - wytrzymałość na rozciąganie
- $F_m$  - największa siła,
- $A_{gt}$  - wydłużenie ekstensometryczne całkowite % przy największej sile  $F_m$
- $A_g$  - wydłużenie ekstensometryczne plastyczne % przy największej sile  $F_m$

## 5.2.2 Sploty 7 φ 5 mm okrągłe

### 5.2.2.1 Charakterystyki

Na rysunku 5.7 został zobrazowany rzeczywisty przekrój przez splot 7φ5 mm. Przedstawiono poszczególne charakterystyki 7φ5 mm, do których zaliczyć można średnice pojedynczych drutów rdzenia, oplotu i całego splotu, sumaryczną powierzchnię wszystkich drutów i koła opisanego na splotcie, pole powierzchni ścinania i rzeczywisty obwód kontaktowy między betonem a splotem.

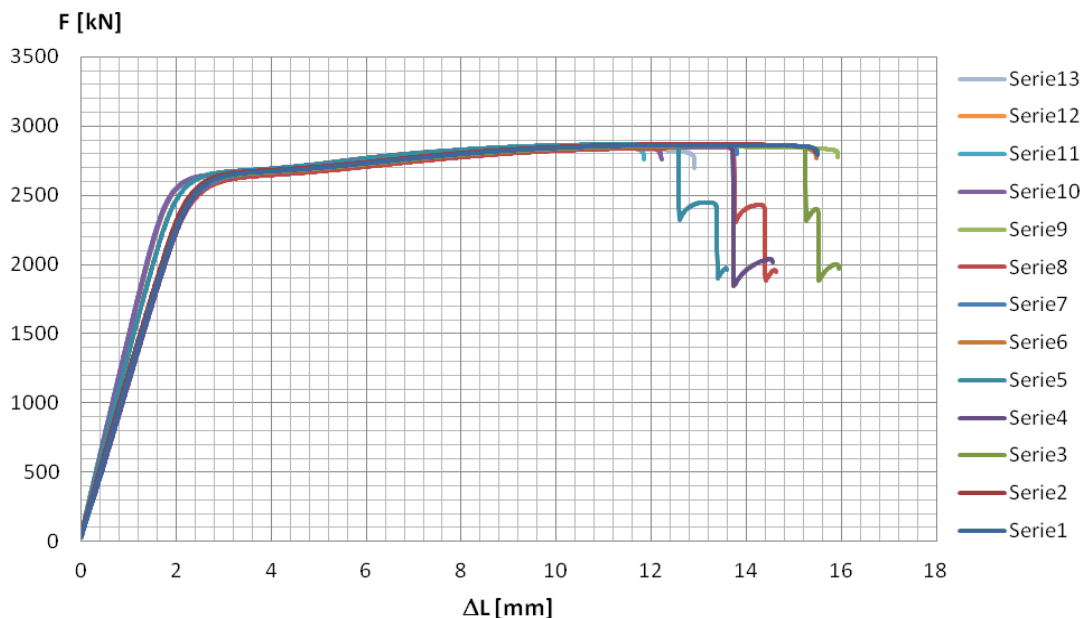




Rys. 5.7 Charakterystyki splotu 7φ5 mm okrągłego: a), b) - przekrój splotu, średnice pojedynczych drutów i całego splotu c) - powierzchnia ścinanego betonu, d) - obwód splotu

### 5.2.2.2 Wyniki badań właściwości mechanicznych stalowych splotów

Badania doświadczalne przeprowadzono na 13 próbkach długości 0,70 m wg [N13]. Przed badaniem na oba końce splotu 7φ5 mm nałożono aluminiowe rurki długości około 80 mm o ściance grubości 1 mm. Wyniki otrzymane z badań doświadczalnych przedstawiono na rys. 5.8 oraz zestawiono w tabeli 5.6.



Rys. 5.8 Wykres zależności siły wyciągającej od wydłużenia dla splotów 7φ5 mm (wyniki statycznej próby rozciągania)



Tabela 5.8 Charakterystyki splotów 7 $\phi$  5 mm okrągłe (wyniki statycznej próby rozciągania)

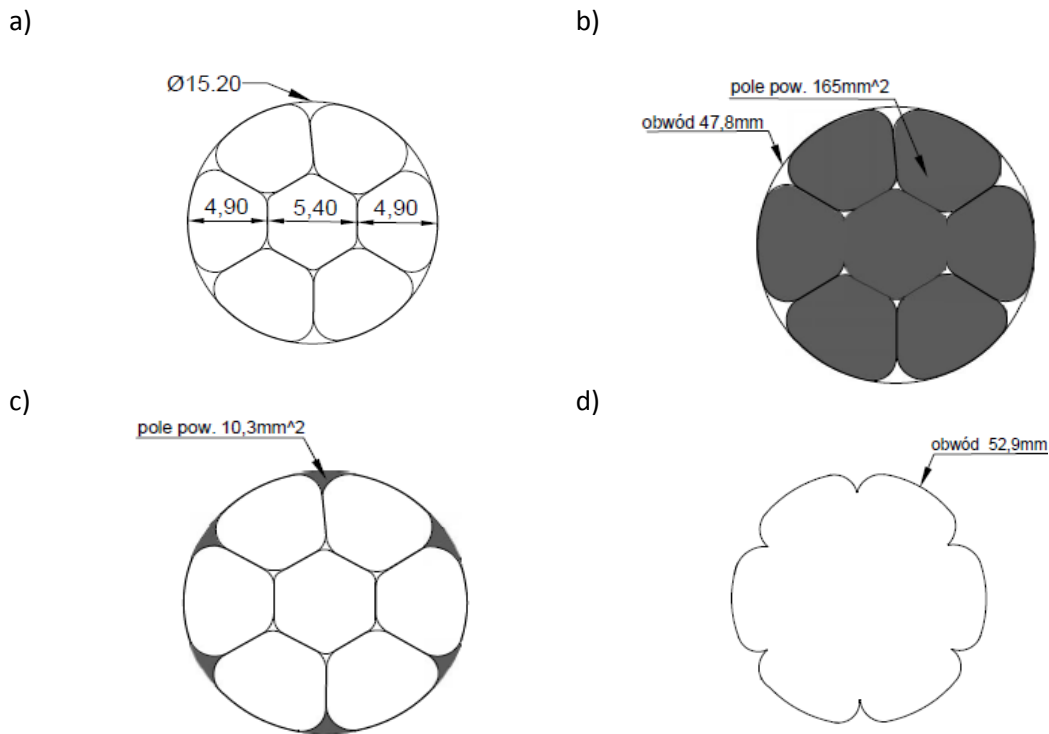
Parametry rozkładu		$m_E$	$F_{p0.1}$	$R_m$	$F_m$	$A_{gt}$	$A_g$	$S_o$
		[GPa]	[kN]	[MPa]	[kN]	[%]	[%]	[mm <sup>2</sup> ]
średnia	$\bar{x}$	190,14	251,86	1904,27	285,65	5,28	4,28	150,01
odchylenie standardowe	$s$	1,387	1,451	6,402	0,960	0,073	0,076	0,000
współczynnik zmienności	$v$	0,730	0,576	0,336	0,336	1,391	1,771	0,000

gdzie: oznaczenia jak w przypadku tabeli 5.6

### 5.2.3 Sploty 7 $\phi$ 5 mm zamknięte

#### 5.2.3.1 Charakterystyki

Na rysunku 5.9 przedstawiono poszczególne charakterystyki splotu 7 $\phi$ 5mm zamkniętego (producent *Bridon - Dyform*), do których zaliczyć można średnice pojedynczych drutów rdzenia i oplotu oraz całego splotu, sumaryczną powierzchnię wszystkich drutów i koła opisanego na splocie, pole powierzchni ścinania i rzeczywisty obwód kontaktowy między betonem a splotem.



Rys. 5.9 Charakterystyki splotu 7 $\phi$ 5mm zamkniętego: a), b) - przekrój splotu, średnice pojedynczych drutów i całego splotu c) - powierzchnia ścinanego betonu, d) - obwód splotu

## 6 ANALIZA NUMERYCZNA MES ROZKŁADU ODKSZTAŁCEŃ W STRUNO- BETONOWYCH TARCZACH

### 6.1 Uwagi wstępne

Analiza numeryczna prowadzona była dwutorowo: w aspekcie określenia wpływu rozstawu cięgien sprężających i długości transmisji na stan odkształcenia w strunobetonowej tarczy oraz pod kątem przygotowań do własnych badań doświadczalnych zapewniających wyłonienie reprezentatywnego elementu badawczego. Szersze tło problematyki badawczej zostało zakreślone we wprowadzeniu. Poniżej (pkt. 6.2) przedstawiono istniejące systemy rozwiązań konstrukcyjnych zbiorników na ciecz, co bliżej sprecyzuje podjęty temat.

Wyjściowym elementem analizy numerycznej była rzeczywista płyta systemu C8, którą w toku badań komputerowych modyfikowano zmieniając parametry. Do analizy włączono również przypadki czysto teoretyczne w celu lepszego uchwycenia problemu. Symulacja komputerowa miała zastąpić kosztowne badania laboratoryjne i niemożliwe do przeprowadzenia w szerszym zakresie.

Analiza numeryczna została przeprowadzona wykorzystując program *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2012*. W ramach przygotowań przebadano numerycznie więcej modeli, a zmiennymi parametrami były wymiary elementu, liczba i rozstaw splotów, długość transmisji oraz wartość siły sprężającej.

Elementy rzeczywiste po fazie wykonania zostają przewiezione na miejsce ich eksploatacji, po czym następuje montaż po obwodzie koła i sprężenie cięgnami bez przyczepności. Przyłożone obciążenie eksploatacyjne prostopadle do powierzchni środkowej nadaje zmontowanym elementom charakter pracy "płyty". W elemencie badawczym zostaje wprowadzone jedynie sprężenie w płaszczyźnie środkowej, po czym następuje zebranie wyników pomiarów i ich analiza już bez obciążania elementu siłą prostopadłą do płaszczyzny środkowej i dlatego określenie "tarcza" jest bardziej właściwe.

W przeprowadzonej analizie numerycznej uwzględniono niżej wymienione czynniki wpływające na stan odkształcenia strunobetonowej tarczy:

- geometria tarczy (w szczególności szerokość i grubość),
- rodzaj betonu i jego właściwości mechaniczne
  - wytrzymałość betonu ściskanie
  - wytrzymałość betonu na osiowe rozciąganie
  - moduł sprężystości betonu E
- liczba i rozstaw splotów w zależności od szerokości tarczy,
- wartość siły sprężającej,
- długość transmisji.

W analizie nie uwzględniono czynników reologicznych ani ułożenia zbrojenia podłużnego i poprzecznego, co również ma wpływ na stan odkształcenia strunobetonowej tarczy.

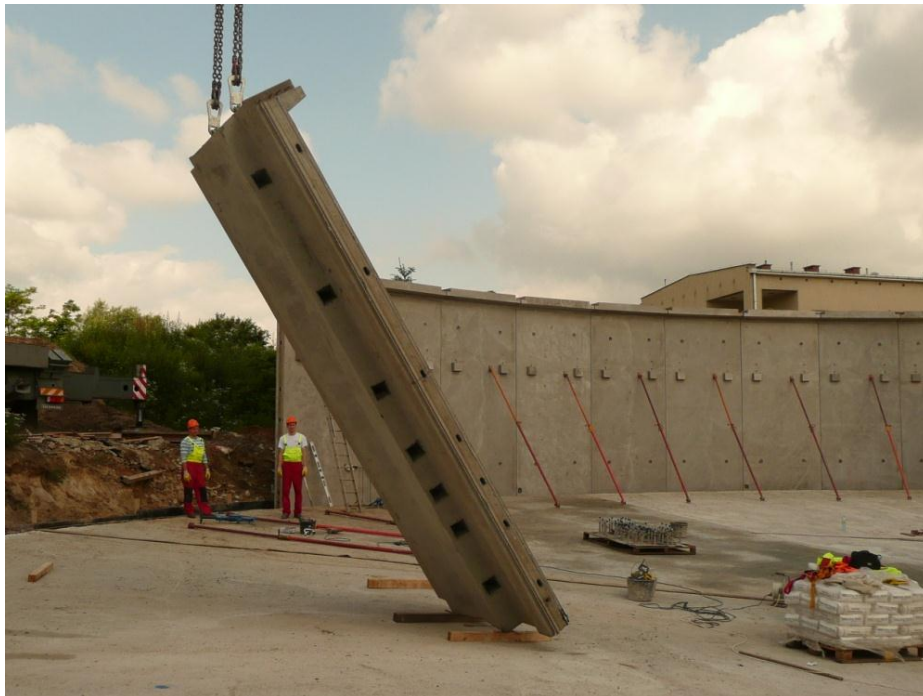
## 6.2 Istniejące systemy rozwiązań ścian z prefabrykowanymi elementami

Po przeanalizowaniu istniejących rozwiązań konstrukcyjnych przedstawionych w pracach [146, 147, 148] można wyróżnić następujące rozwiązania systemowe zbiorników o ścianie z elementów prefabrykowanych sprężonej cięgnami bez przyczepności:

- zbiorniki o ścianie z elementów żelbetowych o stałym przekroju kołowym z pionowymi połączeniami wypełnionymi zaczynem cementowym, sprężonej wewnętrznymi cięgnami bez przyczepności,
- zbiorniki o ścianie z elementów żelbetowych uźbrowanych płaskich z pionowymi połączeniami wypełnionymi betonem drobnoziarnistym, sprężonej zewnętrznymi cięgnami bez przyczepności,
- zbiorniki o ścianie z elementów żelbetowych płaskich z klejonymi pionowymi stykami, sprężonej zewnętrznymi cięgnami bez przyczepności,
- zbiorniki o ścianie z elementów strunobetonowych płaskich z pionowymi połączeniami wypełnionymi zaczynem cementowym, sprężonej wewnętrznymi cięgnami bez przyczepności (C14),
- zbiorniki o ścianie z elementów strunobetonowych płaskich z pionowymi suchymi stykami wypełnionymi profilem neoprenowym EPDM, sprężonej wewnętrznymi cięgnami bez przyczepności (C8).

W Europie stosowane są powszechnie dwa systemowe rozwiązania zbiorników o ścianie ze strunobetonowych elementów prefabrykowanych: C14 i C8. Oba systemy zostały opracowane w Szwecji przez firmę *Abetong*. W obu rozwiązaniach stosuje się sploty  $7\phi 4$  mm i beton klasy C40/50.

Zbiornik w systemie C14 po raz pierwszy został zrealizowany w 2001 roku. System ten przeznaczony jest do realizacji zbiorników o dużej pojemności (max 25 000 m<sup>3</sup>). Ogólny widok zbiornika w trakcie realizacji jak również widok po zmontowaniu płyt przed sprężeniem obwodowym przedstawiono na rys. 6.1 i 6.2.



Rys. 6.1 Widok zbiornika w systemie C14 w trakcie realizacji. Na pierwszym planie widoczny pilaster, w tyle standardowe płyty montowane po obwodzie koła.



Rys. 6.2 Widok zbiornika w systemie C14 przed sprężeniem



Rys. 6.3 Widok zbiornika w systemie C8 w trakcie realizacji





Rys. 6.4 Widok prefabrykowanych płyt strunobetonowych w systemie C8 z rozmieszczeniem splotów

Prefabrykowane elementy realizowane w systemie C8 przeznaczone są do wznoszenia ścian zbiorników o mniejszej pojemności i o niższych ścianach. Ogólny widok zbiornika w trakcie realizacji jak również widok prefabrykowanych płyt strunobetonowych przedstawiono na rys. 6.3 i 6.4. Najczęściej stosowane długości elementów kształtują się w zakresie 4 - 6 m. W przypadku wykonywania tych płyt z betonu normalnego - klasa C40/50 długości transmisji siły sprężającej obliczeniowo kształtują się na poziomie 1,0 - 1,5 m w zależności od sposobu zwalniania naciągu. W przypadku górnej krawędzi ściany, długość transmisji ma mniejsze znaczenie z uwagi na stosunkowo małe naprężenia w kierunku południkowym występujące w stadium eksploatacyjnym. Na dolnej krawędzi natomiast, mamy przypadek przesuwnego połączenia ściany z dnem podczas realizacji sprężenia w kierunku obwodowym. W stadium eksploatacyjnym realizuje się przegubowe połączenie ściany z dnem, a w skrajnym przypadku może wystąpić utwierdzenie. W konsekwencji zmiany schematów statycznych występują naprężenia rozciągające w kierunku południkowym przekraczające wytrzymałość betonu na rozciąganie. Wartości naprężeń rozciągających w stadium eksploatacyjnym zwiększają się w wyniku obciążenia ściany zbiornika naprężeniami termicznymi w komorach fermentacyjnych. Maksymalne wartości tych naprężeń zlokalizowane są na wysokości 1,0 - 1,50 m, a zatem na długości transmisji. Wykonanie tych elementów z betonu wysokiej wytrzymałości powinno znacznie zredukować długość transmisji siły naciągowej, a jednocześnie stwarza możliwość wprowadzenia splotów większej mocy 7 $\phi$ 5 mm. Pozwala to na uzyskanie większych naprężeń ściskających w kierunku południkowym, redukując naprężenia rozciągające w stadium eksploatacyjnym.

Podstawowym elementem konstrukcyjnym zbiorników na cieple z ścianie z elementów prefabrykowanych sprężonej cięgnami bez przyczepności jest płyta żelbetowa lub strunobetonowa wykonywana w zakładach prefabrykacji na torze naciągowym. W każdej ścianie zbiornika poza podstawowym elementem musi być usytuowany co najmniej jeden element nietypowy spełniający rolę pilastra (przy większych obwodach dwa) o rozwiązaniu konstrukcyjnym umożliwiającym

wyprowadzenie na zewnątrz powłoki, obwodowych cięgien sprężających w celu zrealizowania naciągu i zakotwienia siły sprężającej. Z uwagi na funkcję elementu przekrój poprzeczny jest bardziej rozbudowany i stanowi rozwiązanie indywidualne. W praktyce oznacza to wprowadzenie większej liczby splotów, gęściej rozmieszczonych i nie jest tematem tej pracy.

Oprócz typowego elementu zachodzi konieczność produkcji płyt wyposażonych w otwory technologiczne służące do przeprowadzenia rurociągów (otwory małych średnic rzędu 200 - 300 mm). Ponadto wykonywane są otwory montażowe o średnicy do 800 mm umożliwiające wejście pracownikom obsługi. W tych przypadkach regularny rozstaw splotów zostaje zaburzony i zachodzi konieczność stosowania alternatywnego rozwiązania polegającego na zróżnicowaniu rozstawu splotów sprężających. Parametrami stałymi pozostaje wartość siły sprężającej, rodzaj cięgna i rodzaj zastosowanego betonu. Ze względu na uwarunkowania wynikające z koncepcji systemu, do których zalicza się geometrię płyty (konieczność przyjęcia określonej szerokości i długości elementu) jak również beton określony klasą min C40/50, zmiennymi parametrami jest liczba i rozstaw splotów.

Cięgna w projektowanej tarczy powinny być tak rozmieszczone, aby uzyskać możliwie równomierny rozkład naprężeń ściskających w przekroju poprzecznym na jej długości przy jednoczesnym ograniczeniu wartości naprężeń rozciągających w przekroju prostopadłym do cięgien sprężających. Poza zbrojeniem sprężającym w tarczy występuje zbrojenie zwykłe w obu kierunkach, niemniej jednak z uwagi na zastosowanie elementów do konstrukcji ściany zbiornika na ciecze, zachodzi konieczność zapewnienia szczelności elementu. Możliwość zarysowania występuje na dolnej i górnej krawędzi tarczy w strefie przekazywania siły sprężającej (długość transmisji).

### **6.3 Wpływ rozstawu cięgien sprężających na stan odkształcenia strunobetonowej tarczy**

#### **6.3.1 Uwagi ogólne**

Stosowane w rzeczywistości płyty w systemie C8 i C14 charakteryzują się szerokością 2,1 m i 2,40 m, długością powyżej 4,0 m przy zmiennej grubości w przedziale 155 do 185 mm. Przyjęta geometria tarcz w obliczeniach numerycznych uwzględniała te dane wyjściowe i w kolejnych wariantach przyjęto zmodyfikowane modele obliczeniowe zarówno teoretyczne jak i pod kątem planowanych badań.

Strunobetonowe płyty stosowane w systemie C8 i C14 są standardowo produkowane jako sprężane splotami  $7\phi 4$  mm w dwóch warstwach na grubości płyty w różnych rozstawach z siłą naciągu równą  $P_1 = 135$  kN, co numerycznie można zastąpić jedną siłą o podwójnej wartości. W perspektywie planowanych badań, analiza uwzględniała również przypadki naciągu splotami  $7\phi 5$  mm o sile naciągu 200 kN.

W produkcji elementów strunobetonowych zwolnienie naciągu po 24 godzinach dojrzewania betonu realizowane jest pod warunkiem osiągnięcia przez beton wytrzymałości na ściskanie  $f_{cm} = 35$  MPa. Stąd też w obliczeniach numerycznych przyjęto tę wartość i odpowiadający mu moduł sprężystości  $E = 30\ 000$  MPa.

#### **6.3.2 Modele przyjęte w analizie**

Systematyczne badania prowadzono zmieniając w modelu wyjściowym najpierw grubość elementu, a następnie liczbę cięgien i ich rozstaw jak również szerokość tarczy i siłę naciągową. Równomierny rozkład naprężeń podłużnych w obszarze środkowym pozwalał na zmniejszenie długości tarczy do 4,0 m. Ze względu na planowane badania i posiadany przez laboratorium system naciągowy dla splotów  $7\phi 5$  mm, większość analiz przeprowadzono pod tym kątem.

Obszerny przeanalizowany materiał został przedstawiony w ograniczonym wymiarze. Ogółem przebadano 167 przypadków, z których część jest zamieszczona w Załącznikach A, B i C. Podane w pkt. 6.3 wyniki otrzymano z systematycznych badań numerycznych na tarczach o grubości 0,1 m i zmiennych szerokościach od 2,0 do 1,2 m obciążonych splotami typu 7 $\phi$ 5 mm o sile naciągowej 200 kN przy przyjęciu długości transmisji  $l_{bp} = 0,5$  m. W obliczeniach siła sprężająca została określona jako przyłożona do betonowej tarczy i rozłożona wzdłuż długości transmisji ze stałą wartością równą  $p_1 = 400$  kN/m.

Szczególnym przypadkiem jest płyta z otworem technologicznym o średnicy 800 mm. Można tu wyróżnić dwa rozwiązania:

- usytuowanie splotów poza zasięgiem otworu,
- przeprowadzenie splotu przez oś otworu i jego przecięcie po zwolnieniu naciągu.

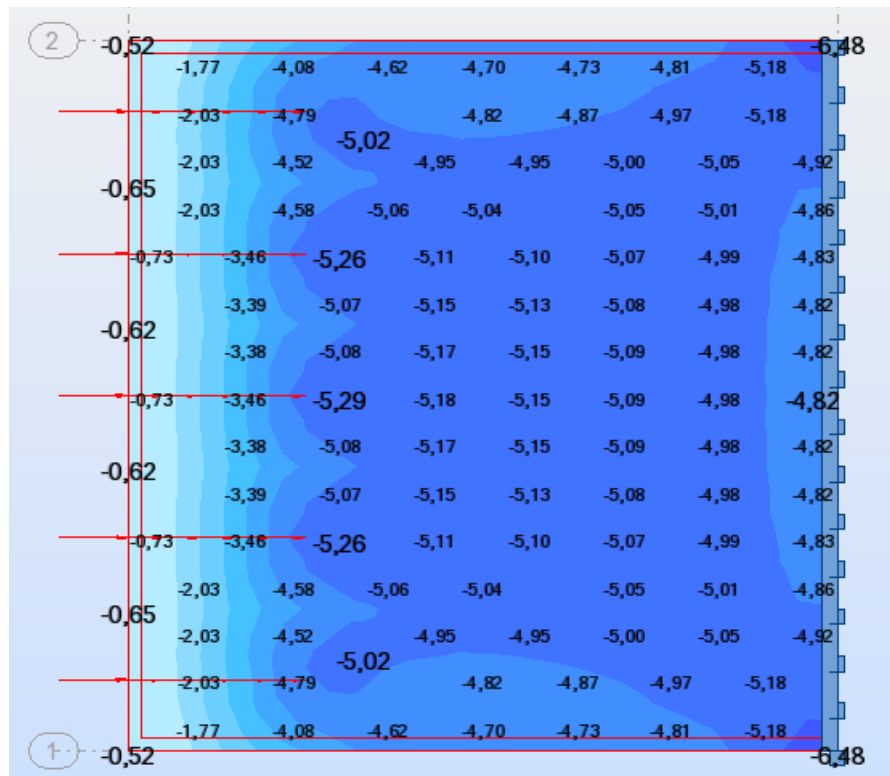
Oba przypadki zostały uwzględnione w analizie numerycznej

### 6.3.3 Wyniki analizy numerycznej dla tarczy pełnej

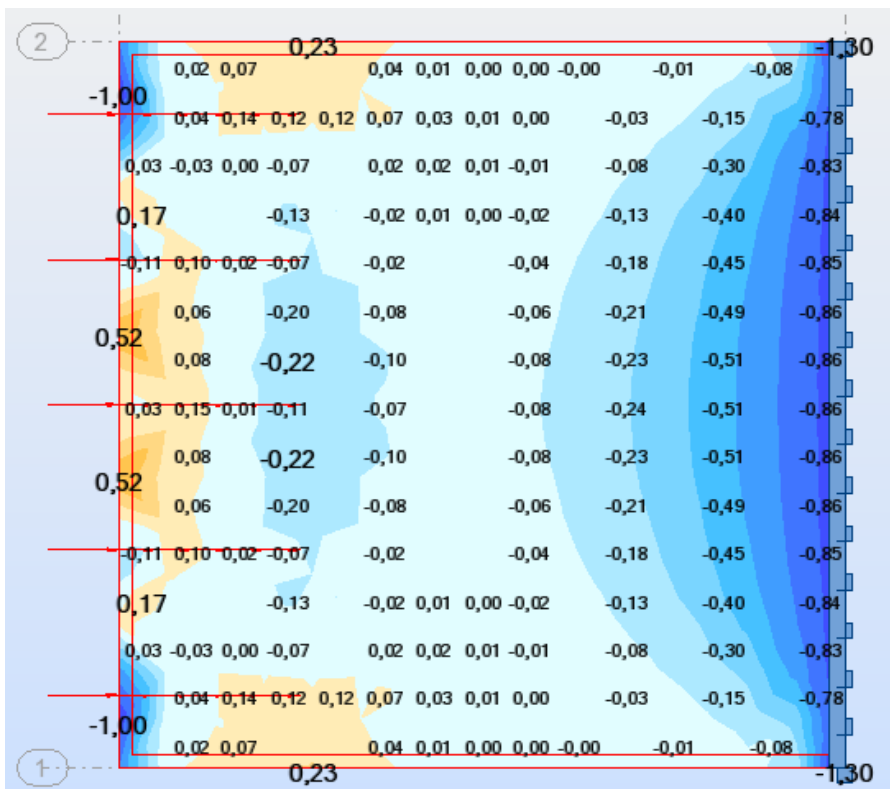
Na rysunkach 6.5 i 6.6 zobrazowano tarczę o szerokości 2,0 m i długości 4,0 m przy grubości 0,1 m obciążonej pięcioma splotami sprężającymi w równych odległościach  $a = 0,4$  m o sile naciągu  $P_1 = 200$  kN. Mapa naprężeń (rys. 6.5) w kierunku podłużnym wykazuje maksymalną wartość równą  $\sigma = 5,26$  MPa na końcu długości transmisji i względnie równomierny rozkład na szerokości tarczy o wartości około 5 MPa. W kierunku poprzecznym tarczy (rys. 6.6) odnotowuje się również tylko niewielkie różnice naprężeń ściskających 0,1 - 0,5 MPa, a naprężenia rozciągające występujące lokalnie na czole tarczy nie przekraczają wartości  $\sigma = 0,52$  MPa.

Na rysunkach 6.7 i 6.8 przedstawiono wariantowo tarczę z rysunku poprzedniego pozbawioną środkowego splotu sprężającego. Rozkład naprężeń w kierunku podłużnym (rys. 6.7) nie jest już tak równomierny jak w poprzednim przypadku. Wartość maksymalna w "piku" jest mniejsza i wynosi  $\sigma = 4,74$  MPa, a poza "pikiem" na szerokości tarczy wynosi około 4 MPa. Między splotami wykształca się obszar "niecki" naprężeń wchodzący w głąb tarczy na odległość około 1,5 m od czoła tarczy. Na mapie naprężeń poprzecznych (rys. 6.8) zauważalny jest większy obszar naprężeń rozciągających z wartością maksymalną  $\sigma = 2,35$  MPa.

Przypadki przedstawione w załączniku A dotyczą tarcz o zmieniającej się w kolejnych krokach szerokości od 2,0 m do 1,2 m co 0,2 m oraz zmiennym rozstawie dwóch splotów sprężających  $a = 1,6 \div 0,6$  m również co 0,2 m. W tabeli 6.1 zestawiono dla poszczególnych szerokości tarcz maksymalne naprężenia w kierunku podłużnym i maksymalne naprężenia w kierunku poprzecznym w czole tarczy w zależności od rozstawu splotów sprężających. Uzyskane w obliczeniach wartości zobrazowano na rys. 6.9 i 6.10 w formie wykresu. Na rysunku 6.10 naniesiono wytrzymałość betonu na rozciąganie  $f_{ct} = 3,1$  MPa uzyskaną w badaniach doświadczalnych BWW (rozdział 5) w celu oceny możliwości wystąpienia zarysowania w przypadku przekroczenia naprężenia rysującego.

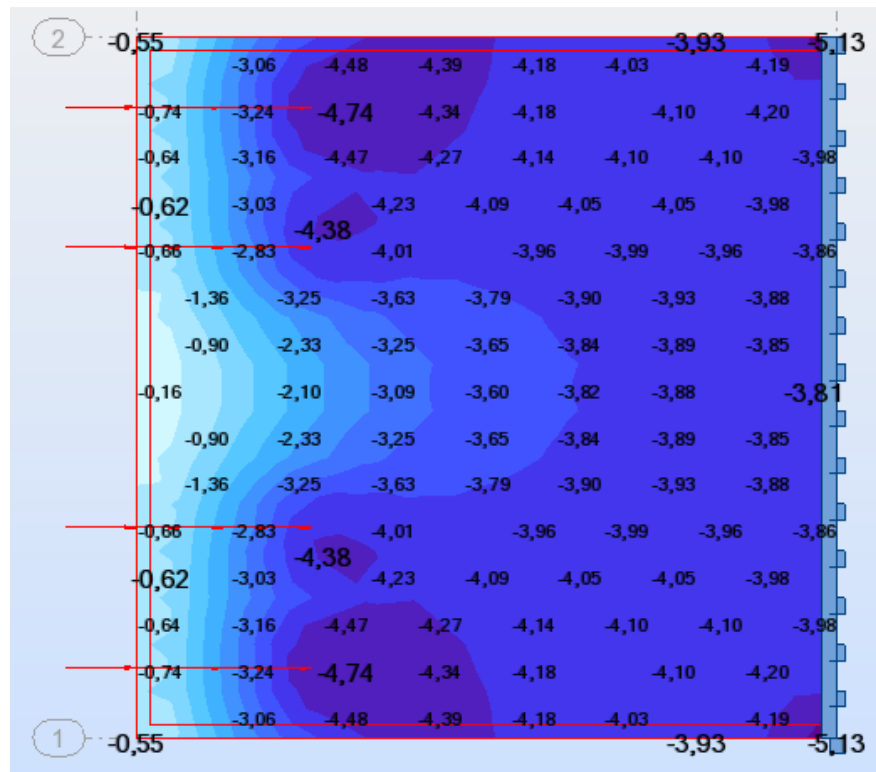


Rys. 6.5 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z pięcioma splotami

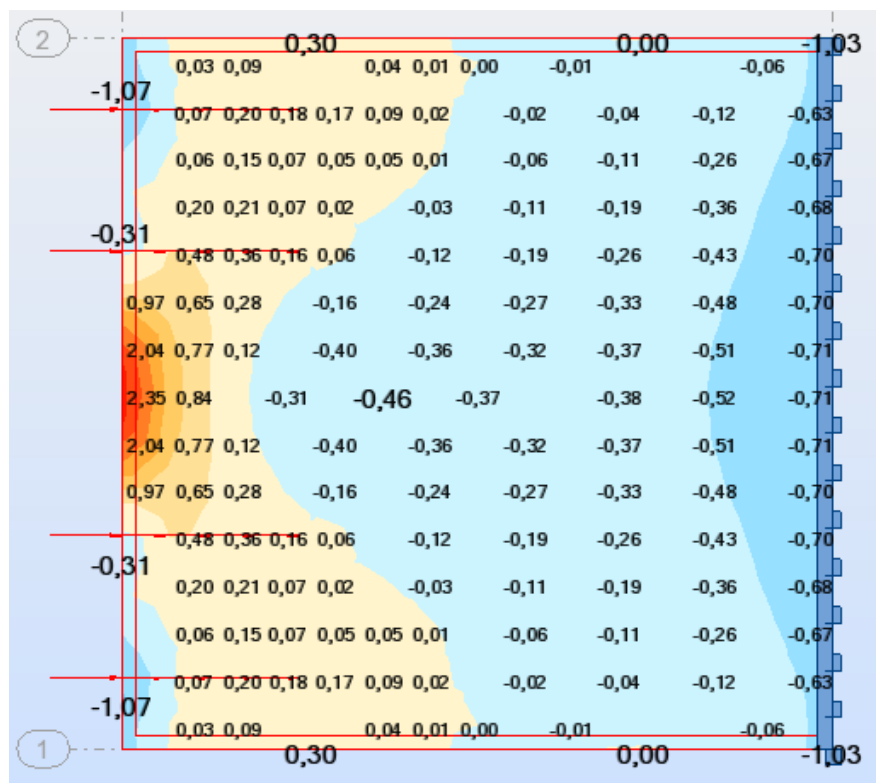


Rys. 6.6 Mapa naprężeń w kierunku poprzecznym tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z pięcioma splotami





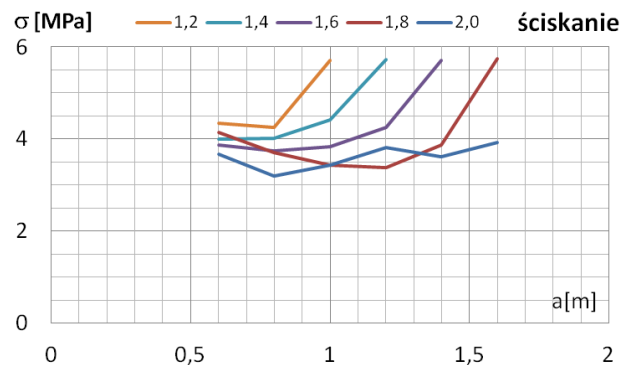
Rys. 6.7 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z czterema splotami



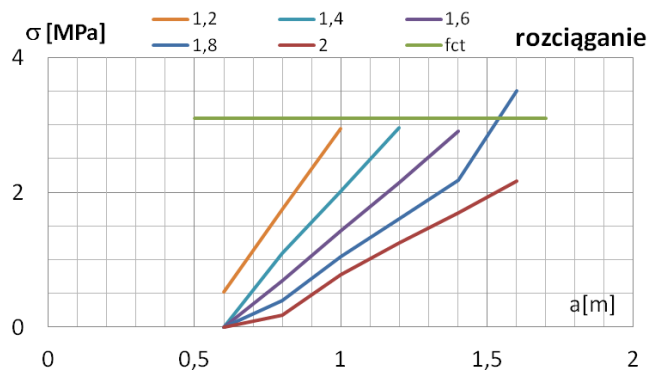
Rys. 6.8 Mapa naprężeń w kierunku poprzecznym tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z czterema splotami

Tabela 6.1 Wartości naprężeń ściskających w "piku" i rozciągających na czole tarczy w funkcji rozstawu dwóch splotów 7φ5 mm dla poszczególnych szerokości tarczy

szerokość płyty [m]	rozstaw ciąglen [m]	naprężenia	
		ściskanie w "piku" [MPa]	rozciąganie w czole [MPa]
2,0	1,6	3,93	2,17
	1,4	3,61	1,69
	1,2	3,82	1,25
	1	3,43	0,78
	0,8	3,19	0,18
	0,6	3,66	ściskanie
1,8	1,6	5,75	3,5
	1,4	3,87	2,18
	1,2	3,37	1,61
	1	3,43	1,04
	0,8	3,71	0,4
	0,6	4,15	ściskanie
1,6	1,4	5,71	2,91
	1,2	4,26	2,14
	1	3,84	1,43
	0,8	3,75	0,69
	0,6	3,87	ściskanie
1,4	1,2	5,73	2,96
	1	4,42	2,01
	0,8	4,02	1,1
	0,6	3,99	ściskanie
1,2	1	5,7	2,95
	0,8	4,26	1,74
	0,6	4,34	0,52



Rys. 6.9 Rozkłady naprężeń ściskających w "piku" w zależności od rozstawu dwóch splotów 7φ5 mm dla poszczególnych szerokości elementów



Rys. 6.10 Rozkłady naprężeń rozciągających na czole tarczy w zależności od rozstawu dwóch splotów 7φ5 mm dla poszczególnych szerokości elementów

W Załączniku B zawarte są wyniki badań numerycznych o większej liczbie splotów dla tarczy o wymiarach przewidzianych w badaniach eksperymentalnych. W kierunku podłużnym przy równomiernym rozstawie splotów, nawet bardzo zagęszczonych do 0,1 m, obserwuje się relatywnie równomierny rozkład naprężeń ściskających na szerokości tarczy. "Niecka" naprężeń pojawia się dopiero przy dwóch splotach sprężających osiągając coraz większe rozmiary w miarę wzrostu rozstawu splotów. W kierunku poprzecznym przy rozstawie splotów od 0,1 do 0,2 m również występują naprężenia ściskające, natomiast przy rozstawie 0,3 do 0,8 m obserwuje się wzrost naprężeń rozciągających do wartości 4,52 MPa. Wobec zaobserwowanego zjawiska do produkcji płyty na torze badawczym podtrzymano rozstaw splotów  $a = 0,67$  m przyjęty w badaniach przyczepności bez modyfikacji stanowiska badawczego. Pewne modyfikacje rozkładu naprężeń w kierunku poprzecznym zaobserwowano w przypadku cięgien usytuowanych blisko zewnętrznej krawędzi.

### **6.3.4 Wyniki analizy numerycznej dla tarczy z otworem**

#### **6.3.4.1 Otwór poza trasą splotu**

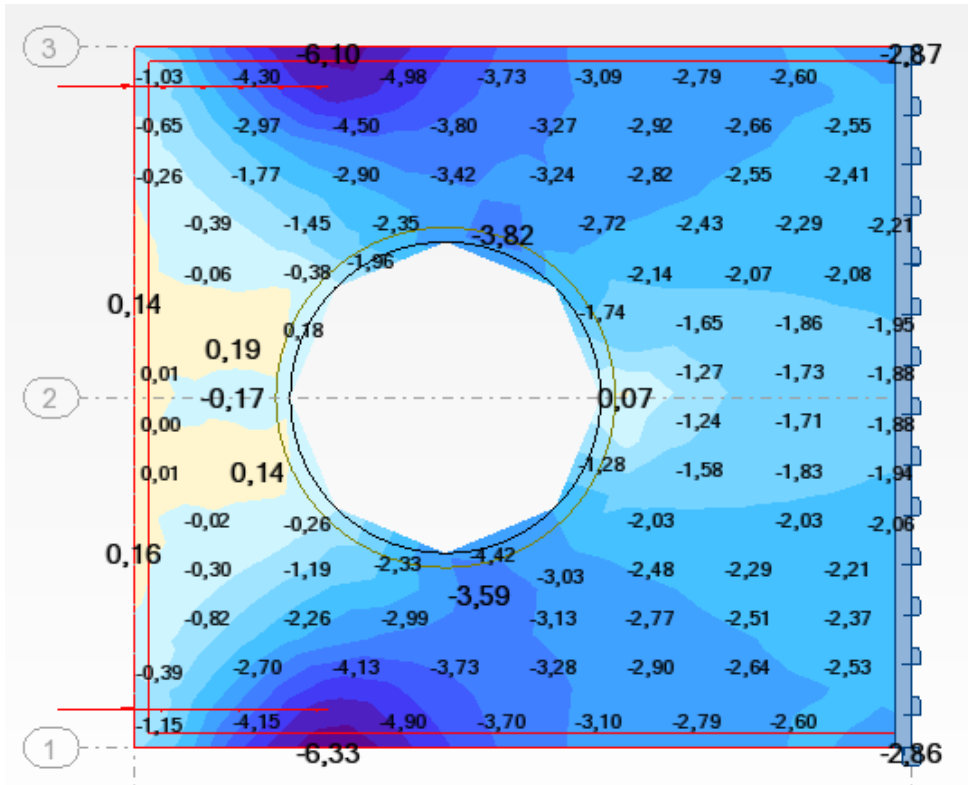
Dla przypadków tarcz analizowanych w pkt. 6.3.3 przeprowadzono badania numeryczne przy zachowaniu identycznych założeń obliczeniowych wprowadzając otwór technologiczny o średnicy 800 mm i w odległości środka od czoła tarczy równej 800 mm usytuowanym symetrycznie względem osi podłużnej elementu.

Ze wszystkich przypadków zamieszczonych w Załączniku A najbardziej niekorzystny rozkład naprężeń poprzecznych zauważalny jest dla tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,6 m (rys. A.7). Naprężenia rozciągające na czole tarczy osiągają wartość  $\sigma = 3,50$  MPa. Na rys. 6.11 i 6.12 zostały zobrazowane mapy naprężeń odpowiednio w kierunku podłużnym i poprzecznym dla tej samej tarczy uzupełnionej otworem. W kierunku podłużnym daje się zauważyć wzrost naprężeń ściskających w "piku" z  $\sigma = 5,75$  MPa w przypadku tarczy bez otworu na  $\sigma = 6,33$  MPa w przypadku tarczy z otworem, co spowodowane jest redukcją przekroju betonowego o przekrój otworu. Wpływ otworu nie tylko nie pogarsza stanu poprzecznych naprężeń w tarczy, ale je nawet redukuje do wartości 2,98 (niewielka niesymetryczność wyników spowodowana jest podziałem na elementy skończone dokonane automatycznie przez program ROBOT).

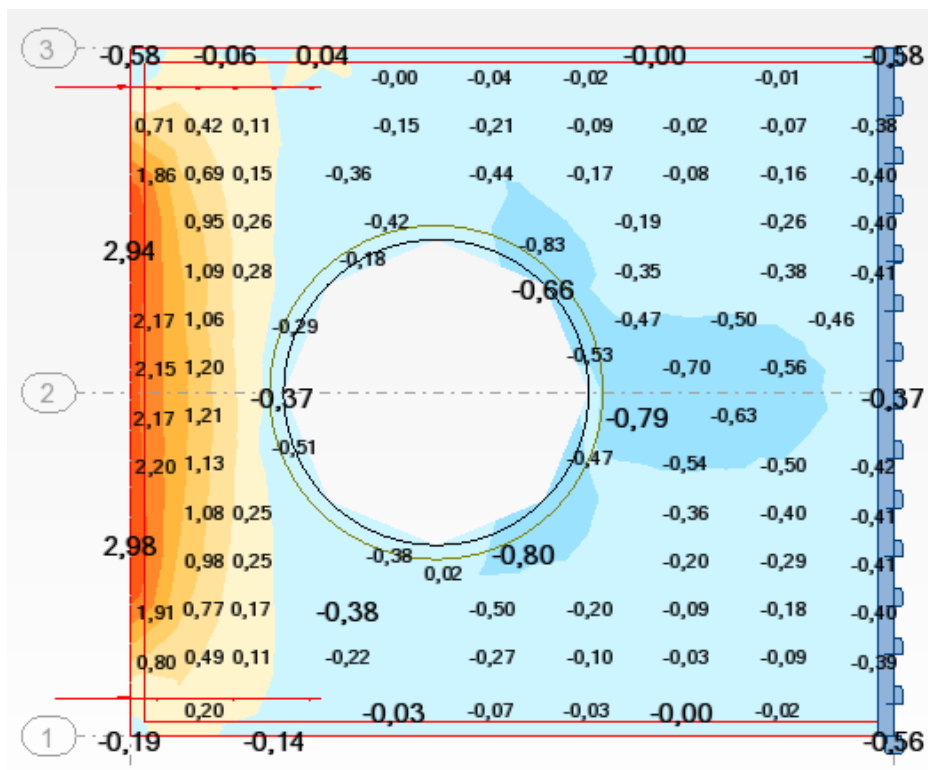
W innych przypadkach (Załącznik B) porównując tarczę z otworem do analogicznej tarczy bez otworu obserwuje się w kierunku podłużnym większe naprężenie w "piku" rozciągające się aż do brzegów otworu niż w przypadku tarczy bez otworu. W kierunku poprzecznym otwór wpływa redukująco na rozciągające naprężenia w czole tarczy. Pojawiają się natomiast naprężenia rozciągające na brzegach otworu, przy czym za tarczą w kierunku środka naprężenia na krawędzi otworu są większe niż w przeciwnym obszarze.

#### **6.3.4.2 Otwór przez splot**

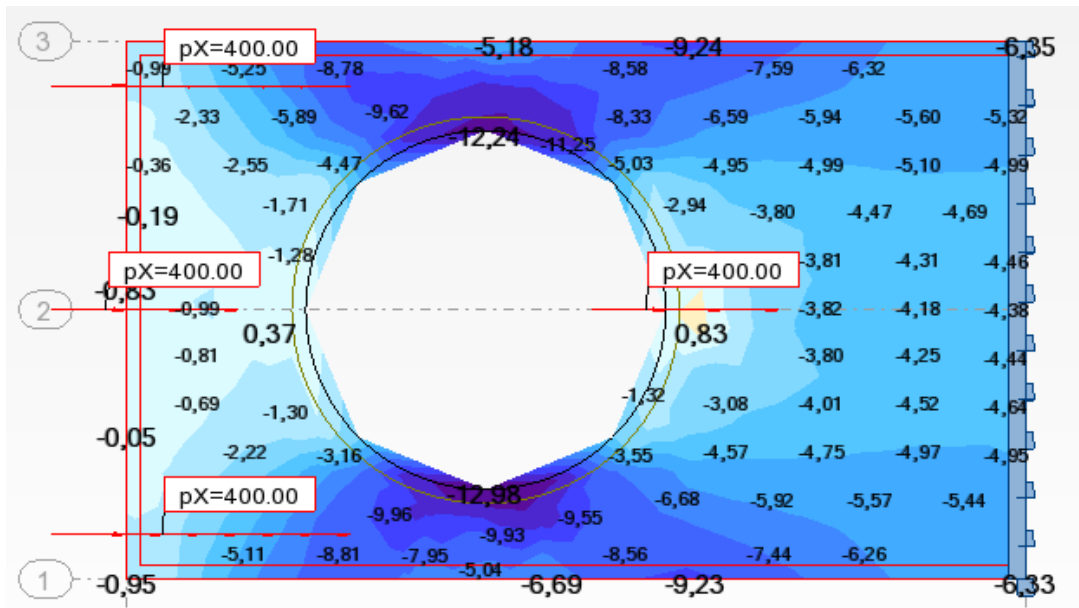
Usytuowanie otworu o znacznej średnicy w elemencie tarczowym i przy tak dużym rozsunięciu splotów sprężających spowodowało znaczące obniżenie naprężeń ściskających w kierunku podłużnym tarczy (rys. 6.11). Powoduje to obniżenie zdolności eksploatacyjnej w ścianie zbiornika. W celu podniesienia poziomu naprężeń ściskających w kierunku podłużnym zachodzi konieczność zagęszczenia rozstawu splotów, a tym samym przeprowadzenia splotu przez oś otworu. Oznacza to w praktyce wykonanie elementu z otworem i przecięcie splotu wewnątrz otworu po wcześniejszym zwolnieniu naciągu we wszystkich cięgnach. Tym samym sprężenie jest przeniesione na beton po obu stronach utworzonego otworu.



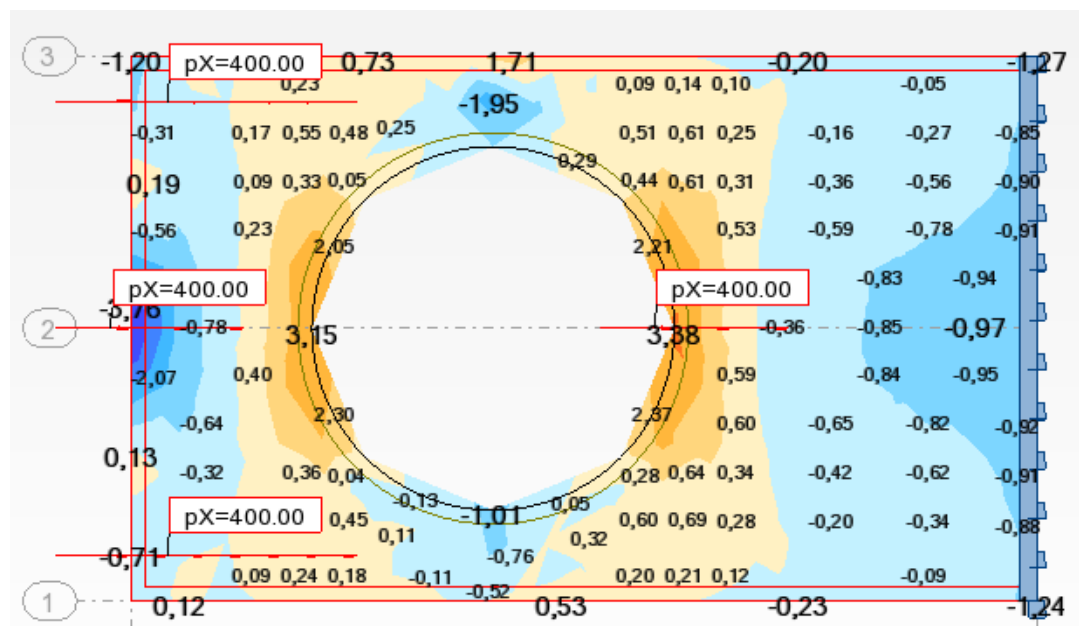
Rys. 6.11 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,6 m z otworem



Rys. 6.12 Mapa naprężeń w kierunku poprzecznym tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,6 m z otworem



Rys. 6.13 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym tarczy o wymiarach 1,2 x 0,1 x 4,0 m z trzema splotami w rozstawie 0,5 m.



Rys. 6.14 Mapa naprężeń w kierunku poprzecznym tarczy o wymiarach 1,2 x 0,1 x 4,0 m z trzema splotami w rozstawie 0,5 m.

Ze względu na brak danych przyjęto założenie, że transfer siły odbywa się w równych częściach po obu stronach wyciętego otworu. Do obliczeń przyjęto dwa odcinki o długości  $l_{bp}/2 = 0,25$  m równomiernie rozłożonego obciążenia  $p = 400$  kN/m (rys. 6.13 i 6.14).

Na rysunkach 6.13 i 6.14 przedstawione są mapy naprężeń odpowiednio w kierunku podłużnym i poprzecznym tarczy o wymiarach 1,2 x 0,1 x 4,0 m z trzema osiami splotów w rozstawie 0,5 m. W kierunku podłużnym otrzymano naprężenia ściskające w paśmie otworu na szerokości elementu w przedziale 3,8 - 4,4 MPa. Na wysokości otworu obserwuje się znaczący wzrost naprężeń dochodzący do wartości 9,92 MPa.

W kierunku poprzecznym rozkład naprężeń również przyjmuje inną postać. W przypadku tarczy bez otworu największe wartości naprężeń rozciągających występują w czole elementu i wynoszą  $\sigma = 2,95$  MPa. Otwór powoduje redukcję naprężeń rozciągających na czole tarczy do  $\sigma = 1,27$  MPa. Pojawiają się natomiast naprężenia rozciągające za otworem o maksymalnej wartości  $\sigma = 1,75$  MPa. Wprowadzenie trzeciego cięgna podlegającego wycięciu w świetle otworu zwiększa naprężenia rozciągające za otworem do wartości  $\sigma = 3,38$  MPa, natomiast naprężenia przed otworem wynoszą  $\sigma = 3,15$  MPa, podczas gdy na czole tarczy występuje już tylko ściskanie.

### 6.3.5 Wnioski

Na podstawie dokonanej analizy numerycznej, podczas której przebadano więcej modeli o zmieniającej się geometrii tarczy, liczbie i rozstawie splotów oraz wartości siły sprężającej można wysnuć następujące wnioski:

- przy względnie równomiernym rozstawie (0,15 - 0,30 m) splotów sprężających o takiej samej sile naciągu powstają w tarczy równomiernie rozłożone naprężenia w kierunku podłużnym, a w kierunku poprzecznym występują naprężenia rozciągające osiągają niewielkie wartości.
- wraz ze zwiększającym się rozstawem splotów rozkład naprężeń ściskających w kierunku podłużnym staje się coraz bardziej nierównomierny i to tym bardziej, im większe są relatywne rozstawy między splotami; między splotami pojawia się "niecka" naprężeń penetrująca w głąb tarczy;
- wraz ze zwiększającym się rozstawem splotów pojawiają się w kierunku poprzecznym naprężenia rozciągające na czole tarczy, tym większe im większy jest rozstaw splotów i im cieńsza jest płyta, które mogą przekroczyć wytrzymałość betonu na rozciąganie i prowadzić do pojawienia się i rozwoju zarysowania;
- otwór technologiczny (niezależnie od usytuowania między splotami czy przez splot) skutkuje w kierunku podłużnym wzrostem naprężeń ściskających w obszarze "piku", który może się dalej rozprzestrzeniać aż do krawędzi otworu (redukcja przekroju poprzecznego);
- otwór technologiczny wpływa redukująco na naprężenia rozciągające w kierunku poprzecznym, pojawiają się natomiast naprężenia rozciągające na krawędziach otworu,
- splot przebiegający przez oś otworu poprawia zdolność eksploatacyjną tarczy przez wzrost naprężeń ściskających w paśmie otworu i powoduje dalszą redukcję naprężeń rozciągających w czole tarczy i dalszy wzrost naprężeń rozciągających na krawędziach otworu.
- wzrost naprężeń rozciągających na obrzeżach otworu wskazuje na konieczność zastosowania odpowiedniego zbrojenia poprzecznego, co nie eliminuje problemu wodoszczelności elementu.
- zastosowanie BWW do produkcji tarczy strunobetonowych umożliwia nie tylko wyeliminowanie zarysowania tarcz na etapie produkcji ale również przyczynia się do skrócenia długości transmisji.

## 6.4 Wpływ długości transmisji na stan odkształcenia strunobetonowej tarczy

### 6.4.1 Modele badawcze

Wpływ długości transmisji na stan naprężenia i odkształcenia strunobetonowej tarczy został przeanalizowany na wielu modelach tarczowych. W Załączniku C przedstawiono mapy naprężeń w kierunku podłużnym i poprzecznym tarczy. Ponadto sporządzono rozkłady odkształceń betonu w kierunku podłużnym płyty wzdłuż splotu oraz rozkłady odkształceń poprzecznych wzdłuż czterech nitek, z których pierwsza usytuowana jest w czole tarczy, a następne są do niej równoległe i wytyczone

przez linie siatki w odstępach co 100 mm do 150 mm. Z załączonych przykładów rozkładów odkształceń poprzecznych widać wyraźnie zasięg oddziaływania naprężeń rozciągających.

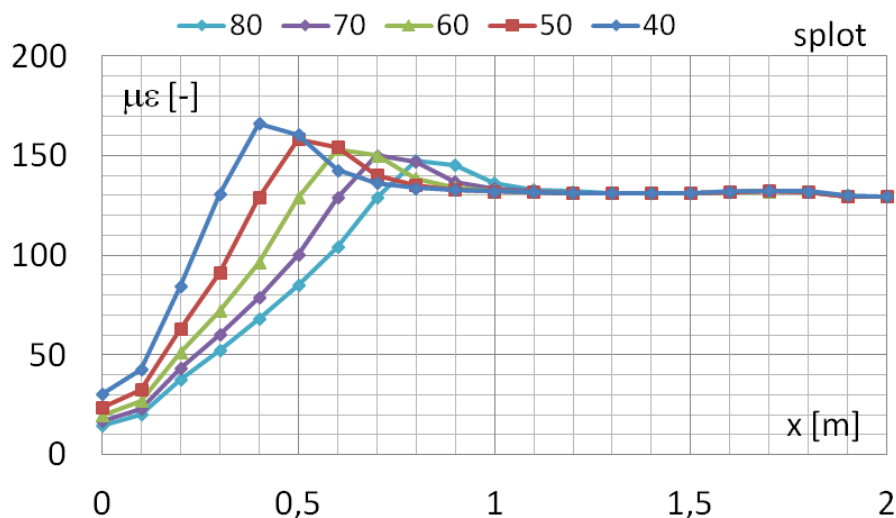
Modelem wyjściowym była również płyta rzeczywista systemu C8, którą modyfikowano w toku przeprowadzanych obliczeń numerycznych zmieniając geometrię tarczy, liczbę i rozstaw splotów sprężających oraz wartość obciążenia. Wybrana faza systematycznej analizy wpływu długości transmisji na stan naprężenia i odkształcenia dotyczyła planowanej w badaniach tarczy o szerokości  $b = 1,0$  m i długości  $l = 4,0$  m przy grubości  $h = 0,1$  m. Określony rozstaw splotów przyjęto zgodnie z możliwościami przeprowadzenia badań i równy  $a = 0,67$  m, a siła naciągowa wynosiła  $P = 200$  kN. Przy tak zdefiniowanych danych wyjściowych, przeprowadzono analizę numeryczną dla pięciu długości transmisji  $l_{bp} = 0,4; 0,5; 0,6; 0,7$  i  $0,8$  m. Przy zastosowaniu w badaniach betonu wysokiej wytrzymałości nie spodziewano się uzyskać większych wartości długości transmisji.

#### 6.4.2 Wyniki badań numerycznych i analiza

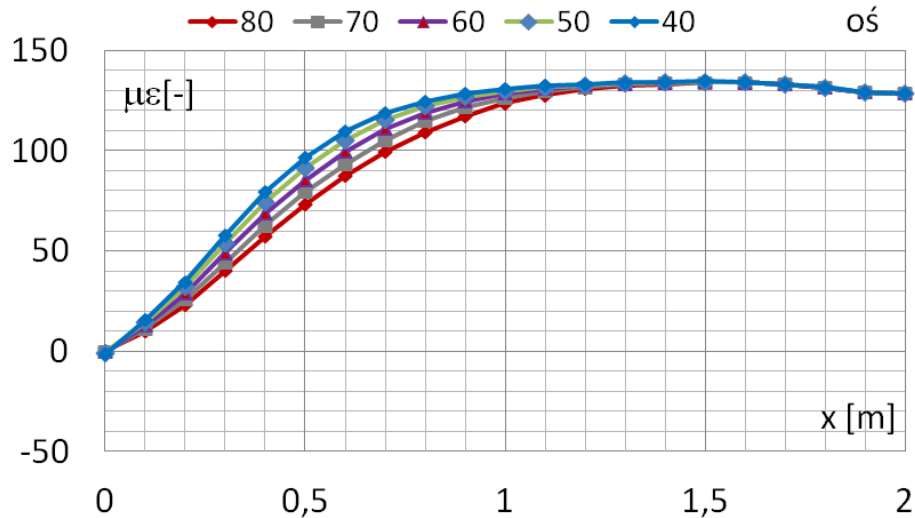
Na rysunku 6.15 przedstawiono uzyskane mapy naprężeń w kierunku podłużnym i poprzecznym dla różnych długości transmisji, przez które został przeprowadzony przekrój oraz odczytane naprężenia w poszczególnych węzłach. Obliczone z naprężeń odkształcenia zobrazowano na rys. 6.15 i 6.16.

Na rysunku 6.15 przedstawiono rozkłady odkształceń betonu ( $\mu\epsilon$ ) w kierunku podłużnym w funkcji odległości od czoła tarczy dla poszczególnych długości transmisji w osi splotu. Zauważalny jest "pik" na końcu poszczególnych długości transmisji, a największa wartość osiągana jest w przypadku najkrótszej długości transmisji i równa około  $170 \mu\epsilon$ . Maksymalne wartości odkształceń betonu stopniowo maleją w miarę wzrostu długości transmisji, by przybrać wartość  $150 \mu\epsilon$  (najniższa maksymalna) dla największej długości transmisji zastosowanej w badaniach numerycznych.

Na rysunku 6.16 przedstawiono rozkłady odkształceń betonu ( $\mu\epsilon$ ) w kierunku podłużnym w funkcji odległości od czoła tarczy dla poszczególnych długości transmisji w osi tarczy (między splotami). W odróżnieniu do przebiegu odkształceń w osi splotu, w osi tarczy odnotowujemy łagodniejszy wzrost bez "piku" do wartości maksymalnej utrzymującej się aż do środka tarczy. Zasada jednak pozostaje ta sama: im mniejsza długość transmisji tym większa wartość odkształceń jest osiągana na krótszym odcinku. W odległości 1,2 m wartości odkształceń betonu osiągają równe wartości na całej szerokości tarczy.



Rys. 6.15 Rozkłady odkształceń betonu ( $\mu\epsilon$ ) w kierunku podłużnym w funkcji odległości od czoła tarczy dla poszczególnych długości transmisji siły naciągowej, w osi splotu



Rys. 6.16 Rozkłady odkształceń betonu ( $\mu\epsilon$ ) w kierunku podłużnym w funkcji odległości od czoła tarczy dla poszczególnych długości transmisji siły naciągowej, w "niecce" (brak splotu)

### 6.4.3 Wnioski

Na podstawie dokonanej analizy numerycznej wpływu długości transmisji siły sprężającej na stan odkształcenia strunobetonowej tarczy można wysnuć następujące wnioski:

- przy zmniejszającej się długości transmisji, siła obciążająca tarczę przypadająca na jednostkę długości wzrasta, co ma niekorzystny wpływ na stan naprężenia i odkształcenia tarczy;
- przy mniejszej długości transmisji naprężenia w kierunku podłużnym w "piku" na końcu wprowadzenia siły sprężającej osiągają większe wartości;
- przy mniejszej długości transmisji naprężenia w kierunku poprzecznym na czole tarczy osiągają większe wartości.

## 6.5 Analiza numeryczna stanu odkształceń betonu w płycie C8

Analiza numeryczna stanu odkształceń w płycie C8 została zobrazowana w rozdziale 9, w którym przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych w zakładzie prefabrykacji i w Instytucie Materiałów i Konstrukcji Budowlanych (IMiKB) Politechniki Krakowskiej. Otrzymane wyniki porównano z wynikami uzyskanymi z obliczeń MES. Fragment otrzymanych wyników opublikowano w pracy [149].

## 6.6 Analiza numeryczna stanu odkształceń betonu w tarczy wykonanej w laboratorium IMiKB

Ze względu na niemożliwość przeprowadzenia badań eksperymentalnych na dużej liczbie tarcz, wybór odpowiedniej poprzedzony był obliczeniami numerycznymi za pomocą metody elementów skończonych. W ramach przygotowań przebadano numerycznie więcej modeli, a parametrami zmiennymi były wymiary elementu, liczba i rozstaw splotów, długość transmisji oraz siła sprężająca.

### 6.6.1 Określenie wymiarów tarczy

Uwzględniając aktualne możliwości techniczne wykonania tarczy i przeprowadzenia badań w laboratorium Instytutu materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej, przyjęto



we wstępnej analizie następujące wymiary tarczy w rzucie: 1,6 x 4,8 m i 2,0 x 4,8 m. Wartości te odpowiadają rzeczywistym wymiarom płyt stosowanych w systemie C8.

Sprężenie przewidziano za pomocą splotów 7 $\phi$ 5 mm, przy określonym rozstawie 0,67 m lub 1,32 m. Rozstaw ten podyktowany był nawierconymi otworami w stalowych trawersach, które znalazły już zastosowanie jako belki oporowe podczas badań przyczepności betonowych próbek na torze naciągowym. Analizowany rozstaw splotów odpowiadał rzeczywistemu rozstawowi cięgien sprężających w produkowanych elementach strunobetonowych.

Przy równoczesnym sprężeniu elementu dwoma cięgnami (siła naciągowa  $P = 210$  kN) umieszczonymi w połowie grubości tarczy, uzyskano w analizie MES wartości odkształceń w kierunku podłużnym możliwe do zarejestrowania na zewnętrznych powierzchniach tarczy za pomocą czujnika nasadowego DEMEC. Ze względu jednak na ich niewielkie wartości, rozważono możliwość przyjęcia węższego elementu o wymiarach 1,2 x 4,8 m lub nawet 1,0 x 4,8 m. Otrzymane wyniki przebiegu naprężeń wzdłuż osi tarczy wskazywały na dużą stabilizację naprężeń w odległości przekraczającej 1,0 m mierzonym od końców płyty, co doprowadziło w dalszych obliczeniach do przyjęcia zredukowanej długości tarczy do 4,0 m. Ostatecznie przyjęto płytę o stałym przekroju prostokątnym, a obliczenia przeprowadzono dla połowy długości płyty 2,0 m (symetria przekroju).

W związku z wysokim modułem sprężystości użytego w badaniach betonu, przyjęto wstępnie grubość tarczy  $d = 80, 100, 120$  mm. Po dokonanych analizach i uwzględniając wnioski oraz zalecenia wykonawcze wynikające z badań doświadczalnych przeprowadzonych na pomostowych płytach [1], przyjęto do obliczeń grubość płyty równą 100 mm. Ponadto zakładając usytuowanie splotów w połowie grubości elementu, otrzymano preferowaną grubość betonowej otuliny  $c = 40$  mm. Przyjęcie większej grubości tarczy nie było wskazane z uwagi na zastosowanie do jej wykonania betonu wysokiej wytrzymałości na kruszywie bazaltowym o dużym module sprężystości, co przekłada się na relatywnie niższe wartości odkształceń betonu, które są rejestrowane za pomocą czujnika nasadowego typu DEMEC.

## 6.6.2 Określenie rozkładu siły sprężającej

W obliczeniach przyjęto wartość siły w splocie 7 $\phi$ 5 mm w chwili zwalniania naciągu  $P_{m0} = 210$  kN i stały rozkład naprężeń przyczepności na długości transmisji siły sprężającej. Ustalona w toku obliczeń numerycznych długość elementu próbnego równa  $l = 4,0$  m oraz usytuowanie stalowych belek oporowych w osiowym rozstawie 7,0 m, pozwalały wyznaczyć straty siły sprężającej równe 9,47 kN. W obliczeniach przyjęto wartość siły w splocie 7 $\phi$ 5 mm po stratach doraźnych  $P_{m0} = 200$  kN i stały rozkład naprężeń przyczepności na długości transmisji siły sprężającej.

Uwzględniając wysokie dane materiałowe (rozdz. 5) wyliczono we wstępnej analizie numerycznej dwie jej wartości graniczne  $l_{bp} = 0,55$  m oraz  $l_{bp} = 0,32$  m w zależności od przyjętych parametrów we wzorach normowych [N10], zakładając małe prawdopodobieństwo ich przekroczenia w warunkach przeprowadzenia badań doświadczalnych. Przyjęta długość transmisji została wyznaczona na podstawie wzoru wg [N10], do którego podstawiono wartości materiałowe jak dla betonu klasy 80/95, założono dobre warunki przyczepności, stopniowe zwolnienie naciągu ( $\alpha_1 = 1,0$ ) oraz konieczność sprawdzenia poprzecznych naprężeń rozciągających w strefie zakotwienia ( $\alpha_2 = 0,5$ ). Właściwe obliczenie wstępnych wartości długości transmisji rzutuje na wyniki otrzymane w analizie MES.

Przykładowe obliczenia tarcz z rozkładem odkształceń w kierunku podłużnym i poprzecznym zamieszczono w Załączniku D. W kierunku podłużnym wzdłuż linii splotów zaznaczonych na rysunku jako odcinek przyłożenia równomiernie rozłożonej siły podłużnej zaznacza się powolny wzrost naprężeń od 0 do maksymalnej wartości, po czym następuje obszar o względnie wyrównanych naprężeniach.

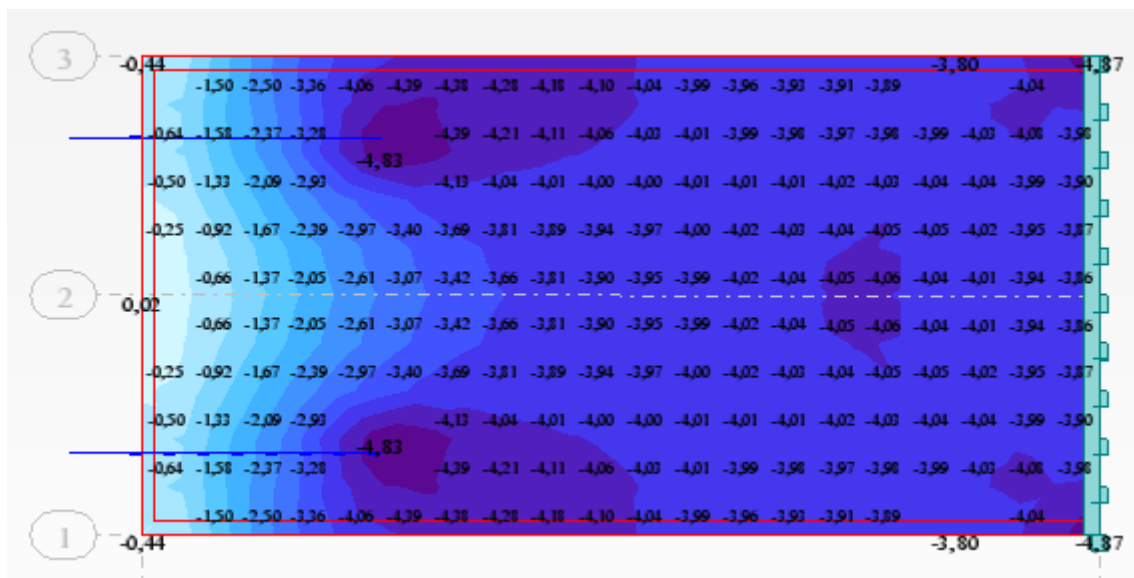
W zależności od geometrii tarczy w niektórych przypadkach dochodzi do utworzenia się "niecki" naprężeń. między splotami, a strefa równomiernych naprężeń jest osiągana w większej odległości od czoła tarczy. W kierunku poprzecznym również w zależności od geometrii zaznacza się mniejszy lub większy obszar występowania naprężeń rozciągających na czole elementu między splotami, a w miarę oddalania się od czoła tarczy występuje coraz większa stabilizacja naprężeń.

### 6.6.3 Naprężenia i odkształcenia w badanej tarczy

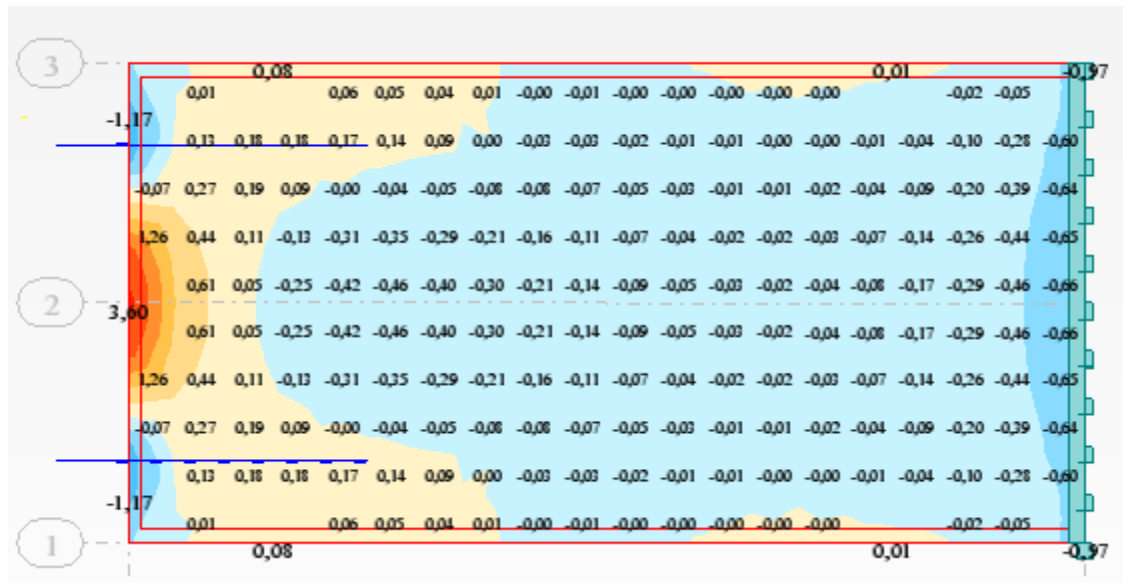
Otrzymane mapy naprężeń dla płyty o wymiarach 1,0 x 0,1 x 4,0 m obciążonej dwoma splotami w rozstawie 0,67 m, w kierunku podłużnym i poprzecznym przedstawiono odpowiednio na rys. 6.17 i 6.18.

Obliczenia przeprowadzono przyjmując długość transmisji 0,5 m. Wzdłuż linii splotów zaznaczonych na rysunku jako odcinek przyłożenia równomiernie rozłożonej siły podłużnej zaznacza się powolny wzrost naprężeń od 0 do maksymalnej wartości równej  $\sigma = 4,83$  MPa, po czym następuje obszar o względnie wyrównanych naprężeniach przyjmujących wartość około 4 MPa. Między splotami sprężającymi utworzyła się "niecka" naprężeń charakterystyczna dla nierównomiernego rozkładu naprężeń na szerokości tarczy, a strefa równomiernych naprężeń jest osiągana w większej odległości od czoła tarczy (rys. 6.17). W kierunku poprzecznym zaznacza się obszar występowania naprężeń rozciągających na czole elementu między splotami przy maksymalnej wartości  $\sigma = 3,60$  MPa, a w miarę oddalania się od czoła tarczy występuje coraz większa stabilizacja naprężeń.

W celu obliczenia odkształceń tarczy wzdłuż splotów sprężających i w osi elementu zostały założone odpowiednie przekroje i z wartości naprężeń obliczono wartości odkształceń stosując moduł E otrzymany eksperymentalnie i równy  $E_1 = 35\ 900$  MPa (po 1 dniu) oraz  $E_{28} = 48\ 740$  MPa (po 28 dniach). Ze względu na rozciąganie występujące w pobliżu czoła tarczy między splotami również tutaj wyznaczono wartości odkształceń. Wartości te zostaną porównane z doświadczalnymi.



Rys. 6.17 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym tarczy o wymiarach 1,0 x 0,10 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,67 m



Rys. 6.18 Mapa naprężeń w kierunku poprzecznym tarczy o wymiarach 1,0 x 0,10 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,67 m

#### 6.6.4 Wybór tarczy do badań eksperymentalnych

Na podstawie wyników otrzymanych z analiz numerycznych poprzedzających badania eksperymentalne, przyjęto do badań doświadczalnych tarczę o wymiarach 1,0 x 4,0 m i o grubości 0,10 m oraz rozstawie cięgien sprężających  $a = 0,67$  m. Przyjęta grubość tarczy  $d = 100$  mm przy średnicy splotu  $d_s = 15,7$  mm wykazuje się dobrym otuleniem betonu o wartości  $c = 4,2$  cm, spełniającym wymagania normy pkt. 4.4.1 normy [N10] ( $c = 1,5\phi = 23,55$  mm). Przyjęta długość tarczy  $l = 4,0$  m jest wystarczająca i nie zachodzą na siebie strefy naprężeń ściskających rozwijających się wzdłuż cięgna sprężającego element.

## 7 BADANIA PRZYZCZEPNOŚCI

Przyczepność stali do betonu jest zjawiskiem bardzo złożonym, jak to zostało już wcześniej opisane, i związane jest to z uwarunkowaniami fizykalnymi, na które mają wpływ liczne parametry. Odzwierciedla się to w różnych metodach badawczych przyjętych przez poszczególnych naukowców w celu zbadania przyczepności betonu do stalowych prętów i splotów sprężających. Kwestia uporządkowania już istniejących i zastosowanych procedur doświadczalnych jest problemem nagłym, a stworzenie jednolitego układu badań i jego standaryzacji obejmującej całokształt czynników wpływu może okazać się zadaniem niewykonalnym, co jednak nie przesądza o podejmowaniu prób w różnych ośrodkach [108].

Decydując się zatem na przyjęcie określonego modelu eksperymentalnego należy zachować świadomość jego granic również interpretacyjnych. I tak do najczęściej stosowanej metody badawczej należą testy pull-out, polegające na wyciąganiu stalowego pręta z betonowego bloku. Rekomendowanie tej procedury przez RILEM [N11] jako jednej z dwóch przeważa o jej popularności.

Badania własne przyczepności betonu do splotów sprężających obejmują badania na elementach próbnych ze splotami bez wstępnego naciągu, gdzie splot pełni rolę zbrojenia pasywnego oraz z uwzględnieniem wstępnego naciągu na specjalnie skonstruowanym torze w Laboratorium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej czyli przewidują taki charakter pracy, do jakiego sploty są przeznaczone. Mimo że same testy pull-out w obu przypadkach przebiegają tak samo, to jednak sposób przygotowania elementów próbnych jest zasadniczo różny i dlatego oba typy badań zostaną osobno omówione.

Zakłady prefabrykacji produkujące strunobetonowe elementy nie są wyposażone w maszyny wytrzymałościowe i systemy pomiarowe umożliwiające każdorazowo przed podjęciem produkcji danego elementu ocenić przydatność danego typu splotu do produkcji. Wobec istniejącego ryzyka nie osiągnięcia zamierzonego celu, konieczne jest opracowanie metody weryfikacji przydatności splotu dostarczonego przez konkretnego producenta. Takie metody, jak to zostało przedstawione w rozdziale 3 niniejszej pracy, są rozwijane np. w USA. Najogólniej rzecz biorąc celem rozwijanych badań jest opracowanie procedury badawczej polegającej na dokonaniu oceny pełnej przydatności splotów do produkcji strunobetonowych elementów na podstawie badań przyczepności betonu do splotów bez wstępnego naciągu. Jak wynika z omówionych badań (rozdział 3), wykonanie takich elementów próbnych jest możliwe w każdym zakładzie prefabrykacji, natomiast niezbędne jest określenie procedury badawczej w metodzie pull-out, z której otrzymane wyniki byłby miarodajne dla przypadku betonowych elementów próbnych ze splotem pod wstępnym naciągiem.

W przyjętym programie badawczym przewidziano przeprowadzenie badań przyczepności na splotach bez wstępnego naciągu i ze wstępnym naciągiem dla różnych długości czynnych.

## 7.1 Badania przyczepności BWB do splotów bez wstępnego naciągu

Badania przyczepności zostały przeprowadzone w dwóch etapach: wstępnym i zasadniczym. Faza wstępna inicjująca badania o takim charakterze miała na celu uzyskanie wstępnej orientacji o zachowaniu się przyczepności betonu do splotów sprężających oraz określenie szczegółowych badań zasadniczych w terminie późniejszym.

### 7.1.1 Badania wstępne

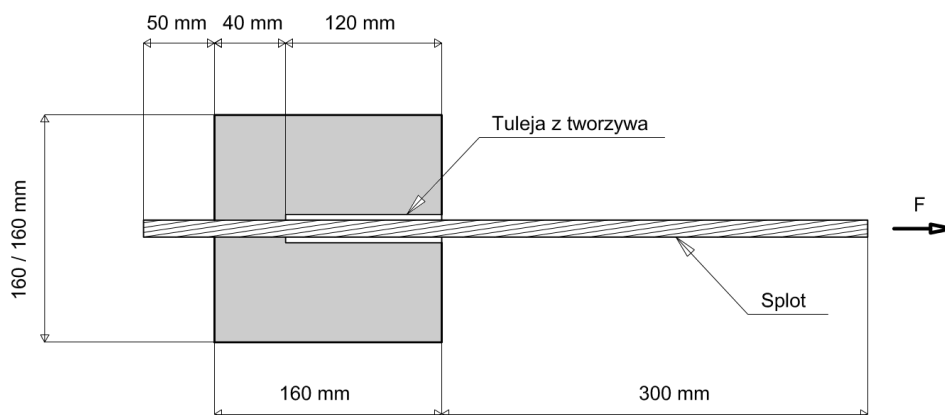
Zmiennymi parametrami w fazie wstępnej były rodzaj splotów oraz długość czynna przyczepności.

#### 7.1.1.1 Sploty

W celu zbadania wpływu rodzaju splotów na naprężenia przyczepności przyjęto do badań wstępnych trzy rodzaje splotów:  $7\phi 4$  mm,  $7\phi 5$  mm z drutów okrągłych i  $7\phi 5$  mm z drutów profilowanych, które określane będą jako  $7\phi 5$  mm okrągłe i  $7\phi 5$  mm zamknięte. Badania miały na celu potwierdzenie zbliżonego zachowania się splotów lub wykazania ewentualnych różnic podczas prowadzenia testów pull-out. Ponadto wybór podyktowany był powszechnym stosowaniem tych rodzajów splotów oraz jednolitym traktowaniem ich przez obowiązujące przepisy normowe przy określaniu długości transmisji.

#### 7.1.1.2 Przyjęcie czynnej długości przyczepności

Przegląd stosowanych próbek użytych w tego rodzaju badaniach wskazuje na różne tendencje z przewagą elementów o krótkim odcinku przyczepności sięgającym pięciu średnic pręta zbrojeniowego (rys. 3.20, 3.31). Ze względu jednak na zainteresowania długością transmisji, która stanowi punkt ciężkości niniejszej pracy, od początku istniały tendencje do zwiększania czynnej długości przyczepności w przeprowadzanych testach pull-out aż do jej osiągnięcia przynajmniej w ograniczonym zakresie. Praca Nitscha [114], który przyjął w badaniach eksperymentalnych dwie czynne długości przyczepności 50 mm oraz 75 mm i po analizie wyników nie otrzymał liniowej zależności naprężeń przyczepności na jej długości, co należałoby oczekiwać po przyjęciu koncepcji równomiernego rozkładu, stała się inspiracją do podjęcia badań zależności siły wyciągającej i wynikających z niej naprężeń od przyjętej długości czynnej.



Rys. 7.1 Przekrój przez próbkę z zaznaczeniem długości efektywnej

W oparciu o wnioski wynikające z badań przeprowadzonych w innych ośrodkach naukowych (pkt. 3), podczas których przyjmowano czynne długości przyczepności dostosowując je do metodyki

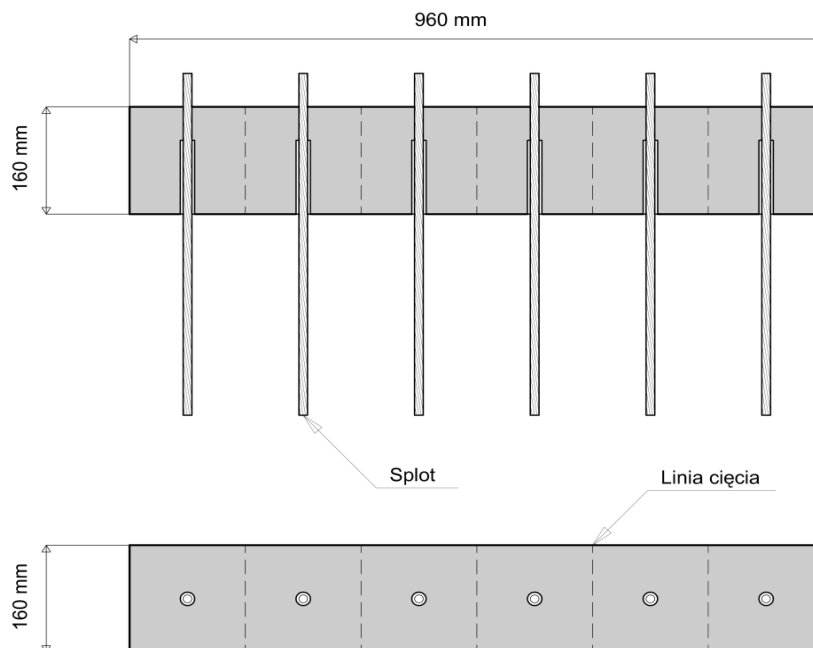
przeprowadzonych badań doświadczalnych, w badaniach wstępnych przyjęto trzy efektywne długości przyczepności 40 mm, 80 mm oraz 120 mm, a po uzyskaniu zadowalających wyników wykonano jedną próbę o czynnej długości 240 mm. Projektowane długości czynne zapewniono za pomocą tulejki osłonowej przerywającej przyleganie splotu do betonu jak na rys. 7.1. W celu zapewnienia projektowanej czynnej długości przyczepności, przed nałożeniem ochronnej tulejki z PCV na splot nawijano sznurek konopny mający za zadanie wypełnienie przestrzeni między splotem a rurką, po czym oba końce wypełniano masą silikonową zabezpieczającą wnikanie mleczka cementowego do jej wnętrza (rys. 7.2).



Rys. 7.2 Przygotowane próbki z nawiniętym sznurkiem konopnym

### 7.1.1.3 Elementy badawcze

Najczęściej stosowaną i zalecaną przez RILEM [N11] do badań pull-out jest forma kostkowa o boku równym dziesięciokrotnej średnicy pręta jak na rys. 3.17, co w przypadku przyjętych do badania splotów  $7\phi 4$  mm,  $7\phi 5$  mm okrągłych i zamkniętych o średnicach odpowiednio 12,9 mm, 15,7 mm i 15,9 mm równałoby się kostce o boku 129 mm, 157 mm i 159 mm.



Rys. 7.3 Schemat próbek w fazie wstępnej



Ujednolicając zalecane wartości wymiarów próbek przyjęto kostkę o boku 160 mm i do ich produkcji wykorzystano dostępne w Zakładzie Konstrukcji Sprężonych formy podłużne o przekroju kwadratowym 160 mm x 160 mm i długości 960 mm równej sześciokrotności przyjętej kostki. Przygotowane odcinki splotów ułożono prostopadłe do długości elementu (rys. 7.3, 7.4) otrzymując sześć połączonych próbek, które po rozformowaniu przecięto wzdłuż linii zaznaczonych na rysunku i poddano badaniu.



Rys. 7.4 Próbki przygotowane do betonowania w fazie I



Rys. 7.5 Próbki z umocowaniem motylkowym

Na dwóch przeciwległych ściankach formy wykonanej z drewnianej sklejki zostały nawiercone otwory o różnej wielkości, przez które przeciągnięto uprzednio przygotowane sploty. Jeden z otworów dostosowany był do średnicy splotu, a drugi, większy mieścił w swoim wnętrzu splot razem z nałożoną plastikową rurką regulującą czynną długość przyczepności. Na zewnętrzne odcinki splotów, po ich włożeniu do formy, nałożono krótkie tulejki stalowe z przewierconymi otworami, przez które przechodziły śrubki motylkowe stabilizujące położenie splotów w czasie betonowania i zagęszczania betonu (rys. 7.5). Położenie splotu do kierunku betonowania było prostopadłe czyli poziome, a ze względu na grubość elementu równą 160 mm kwalifikowało warunki przyczepności jako dobre wg normy [N10].

### 7.1.2 Wyniki badań wstępnych przyczepności BWW dla splotów 7φ5 mm zamkniętych

Metoda wykonania próbek, przygotowania ich do badań oraz przeprowadzenie testów pull-out przebiegało tak samo w fazie wstępnej jak i zasadniczej, a czynności te zostaną opisane w pkt. 8.1.3.

W badaniach doświadczalnych przyjęto zasadę utrzymywania obciążenia próbki w maszynie wytrzymałościowej do uzyskania 10 mm poślizgu splotu. Wcześniejsze zakończenie badań mogło mieć miejsce w przypadku:

- rozłupania próbki,
- spadku siły obciążającej o 20% w stosunku do maksymalnej wartości zarejestrowanej podczas obciążenia,
- wystąpienia zagrożenia uszkodzenia ekstensometru rejestrującego przemieszczenia splotu, co może nastąpić w przypadku zerwania splotu. Ekstensometr jest bardzo czuły i rejestruje przemieszczenia w sposób ciągły. W przypadku skokowych przemieszczeń splotu lub pręta, odnotowuje się silne uderzenia splotu w ekstensometr, odczyty rejestrowane są z coraz większą amplitudą, co jest sygnałem do podjęcia decyzji o wstrzymaniu dalszych badań.

Z uwagi na zdecydowanie odmienny charakter zależności siła - poślizg zarejestrowanych w przypadku splotów zamkniętych w porównaniu do splotów okrągłych, podjęto decyzję z zakończeniu badań przyczepności BWW do splotów zamkniętych na etapie badań wstępnych. Badania zasadnicze ograniczono wyłącznie do splotów okrągłych, a wyniki dotyczące splotów okrągłych otrzymane w badaniach wstępnych zostały ujęte przy kompleksowym opracowaniu rezultatów badań zasadniczych w pkt. 8 pracy.

Na rys. 7.6, 7.7 i 7.8 przedstawiono kolejno wyniki badań dla splotów 7φ5 mm zamkniętych o długości czynnej odpowiednio 40 mm, 80 mm i 120 mm w postaci zależności siła wrywająca - poślizg splotu. Ze względu na przebadanie w danym wieku betonu tylko po jednej próbce o długości czynnej 240 mm, otrzymane przebiegi przedstawiono na rysunku zbiorczym (rys. 7.8).

W przypadku długości czynnych 40, 80 i 120 mm, w poszczególnych etapach pomiarowych prowadzonych po 1, 3, 7 i 28 dniach dojrzewania betonu, przebadano 2, 3, lub 4 próbki. W przypadku długości czynnej 240 mm, traktowanej rozpoznawczo, przebadano tylko po 1 próbce.

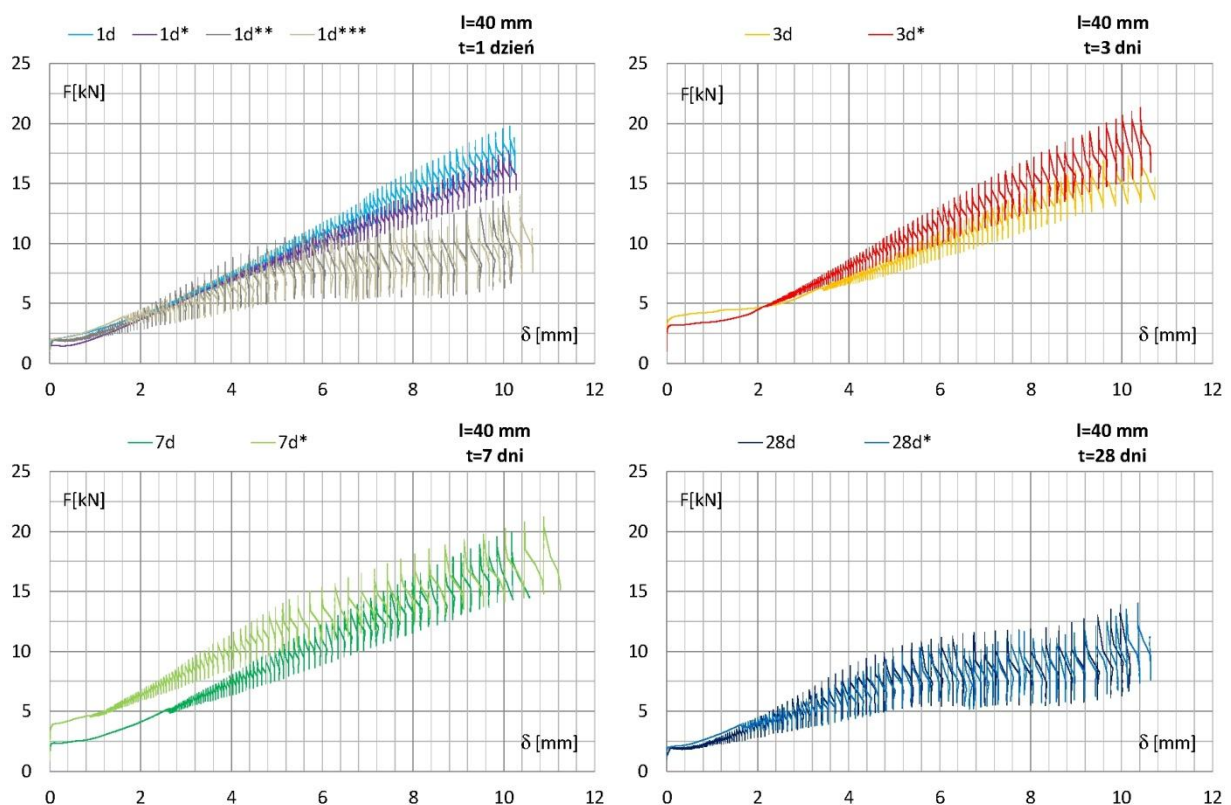
Zarejestrowane wykresy sił wyciągających w funkcji przemieszczenia dla poszczególnych długości czynnych niezależnie od wieku betonu w chwili przeprowadzenia badań, zostały naniesione na jeden diagram i zestawione na rys. 7.8.

Zależność siła wyciągająca - poślizg wykazuje charakterystyczny zygzakowaty przebieg po niewielkim pionowym odcinku przedstawiającym przyczepność pierwotną. Po zerwaniu przyczepności przylegania w niektórych próbkach występuje dłuższy odcinek prosty o pewnym nachyleniu do poziomu bez skokowego przebiegu. W końcowym etapie pomiarowym zarejestrowano

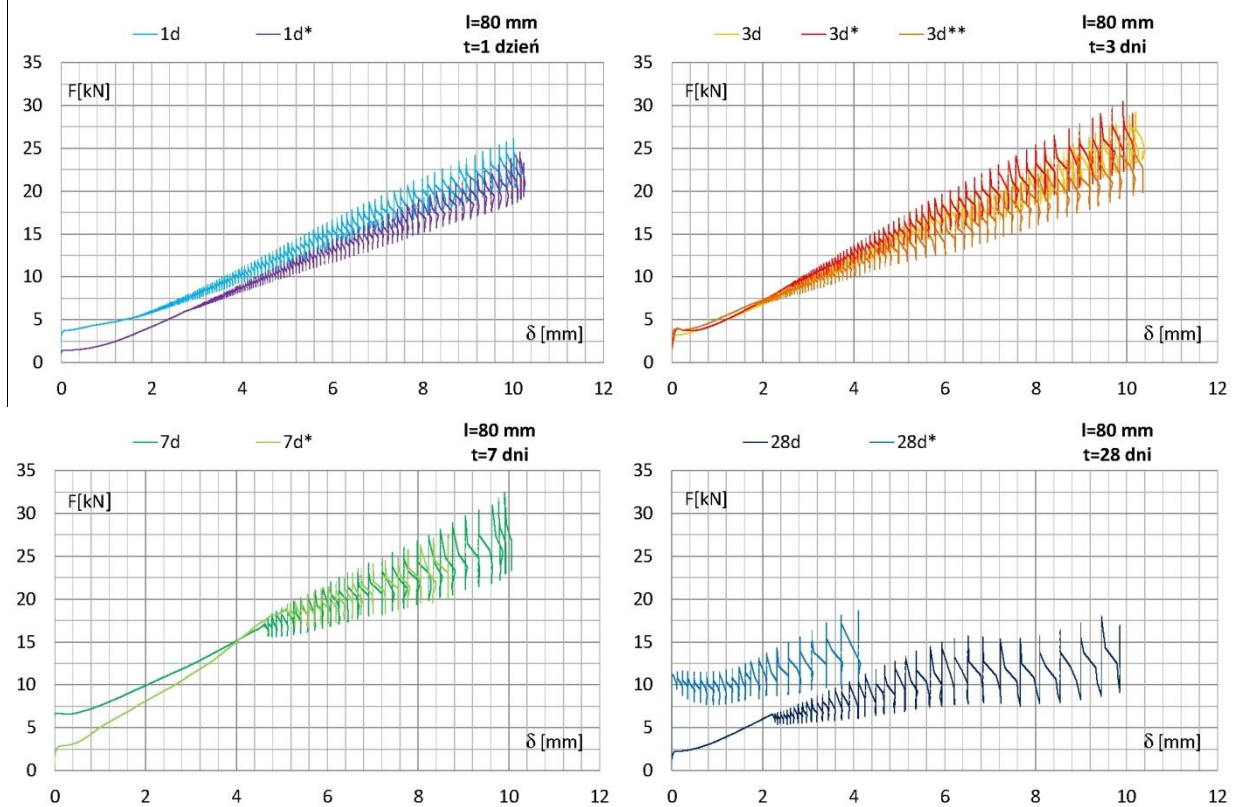


skokowy przebieg krzywej do chwili zatrzymania obciążenia. We wszystkich przypadkach odnotowano wraz ze zwiększającym się poślizgiem większą amplitudę a mniejszą częstotliwość wartości odczytu.

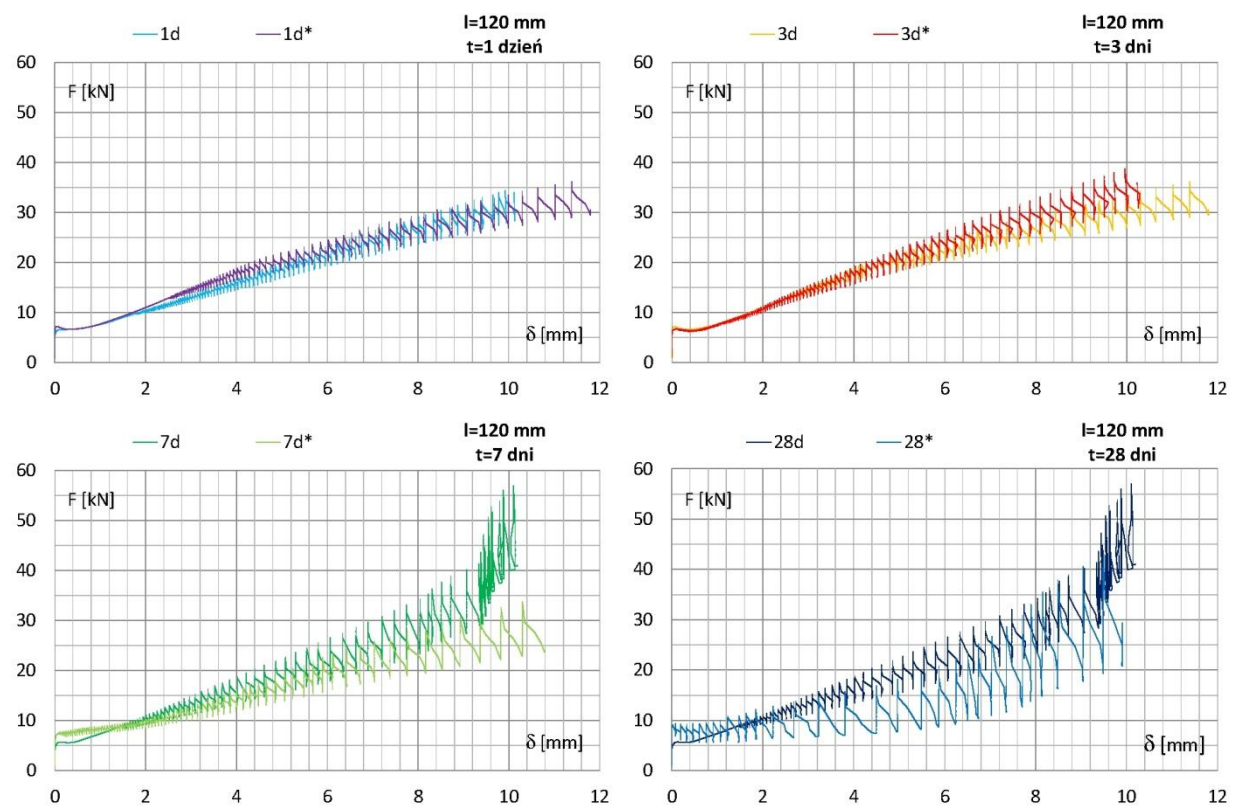
Prawie we wszystkich przypadkach obserwuje się niewielki wzrost siły wyciągającej w funkcji czasu. Dla długości czynnej 40 mm w pierwszym tygodniu siła osiąga wartość około 20 kN, a po 28 dniach dla innej próbki tylko około 14 kN. Podobną tendencję uzyskuje się dla podwójnej długości czynnej przyczepności 80 mm. Maksymalna siła wyciągająca przyjmuje wartość po 1 dniu 26 kN, po 3 i 7 dniu zaobserwować można niewielki wzrost do 32 kN, a po 28 dniach nawet ten poziom nie zostaje osiągnięty. Jedna z próbek ulega przedwczesnemu zniszczeniu przy poślizgu 4 mm i sile 18 kN, a druga osiąga ten poziom przy poślizgu 10 mm. Jak można zauważyć, dwukrotne zwiększenie długości czynnej nie powoduje podwojenia siły wyciągającej. Również w przypadku długości czynnej 120 mm istnieje podobny trend, chociaż tutaj po wartościach 35 kN w 1 dniu i prawie 40 kN po 3 dniach, jedna z próbek wykazuje wartość siły wyciągającej około 58 kN po 7 i 28 dniu, podczas gdy druga próbka przybiera wartości w granicach 35 - 40 kN. Próbki o długości czynnej 240 mm po 1 i 7 dniu wykazują prawie tę samą wartość siły wyciągającej równą około 58 kN na końcu badania, podczas gdy pozostałe dwie próbki ulegają przedwczesnemu zniszczeniu po 3 dniach odpowiednio przy sile 40 kN i poślizgu około 7,5 mm, a próbka 28-dniowa już przy sile około 20 kN i względnym przemieszczeniu około 2 mm. W przypadku tej próbki utrata przyczepności pierwotnej nastąpiła przy relatywnie wysokiej sile wyciągającej 18 kN (wartość największa z wszystkich badanych próbek). Badania zostały automatycznie przerwane z uwagi na osiągnięcie granicznej wartości amplitudy rejestracji.



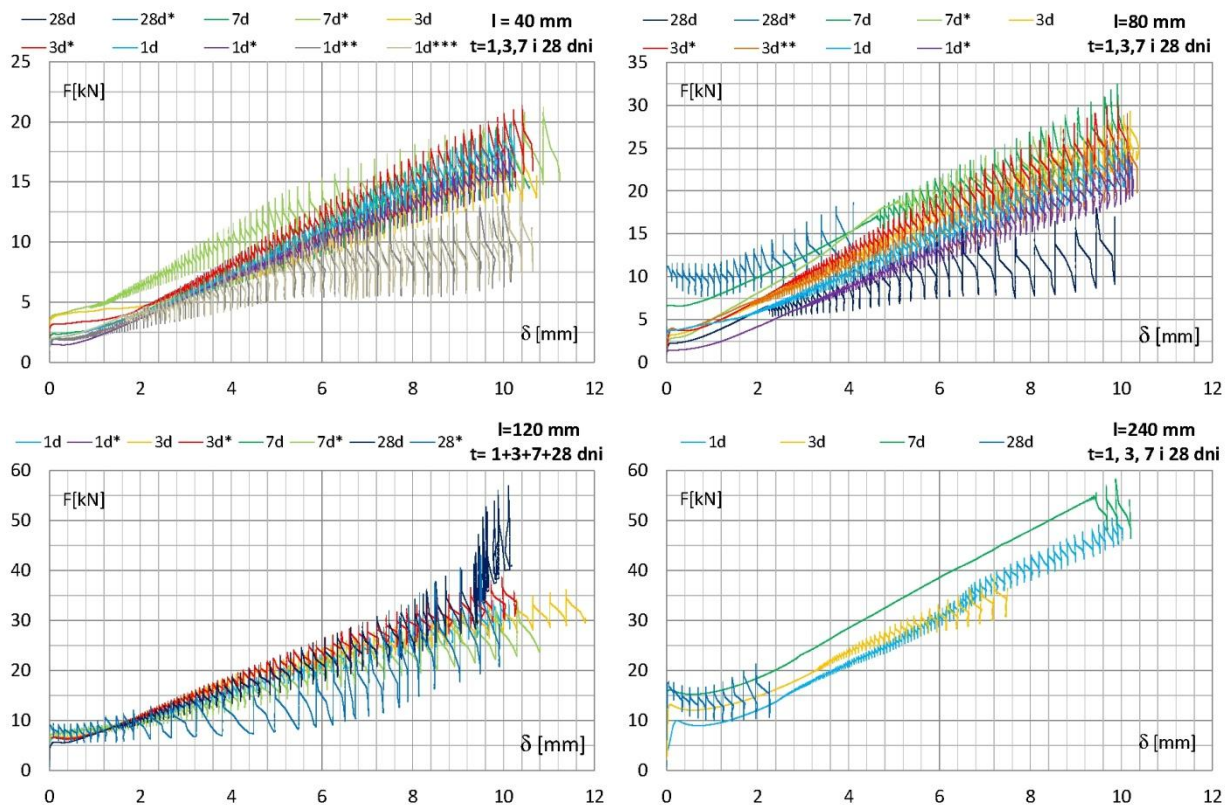
Rys. 7.6 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów  $7\phi 5$  mm zamkniętych o długości czynnej 40 mm dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni



Rys. 7.7 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów  $7\phi 5$  mm zamkniętych o długości czynnej 80 mm dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni



Rys. 7.8 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów  $7\phi 5$  mm zamkniętych o długości czynnej 120 mm dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni



Rys. 7.9 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów  $7\phi 5$  mm zamkniętych o długości czynnej 40, 80, 120 i 240 mm dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni

Podsumowując wyniki otrzymane z badań wstępnych na splotach  $7\phi 5$  mm zamkniętych można stwierdzić:

- W chwili pokonania naprężenia przyczepności następuje nagły spadek wartości siły wyciągającej bez względu na długość czynną badanej próbki, a następnie stopniowy jej wzrost do osiągnięcia założonej wartości poślizgu splotu. Maksymalną wartość siły wyciągającej otrzymuje się w przypadku zakończenia badań to jest po osiągnięciu poślizgu 10 mm albo w momencie odłączenia ekstensometru.
- Naprężenie przyczepności pierwotnej BWW do splotów  $7\phi 5$  mm zamkniętych, kształtuje się w przedziale od 0,4 do 2,0 MPa w zakresie badanych czynnych długości przyczepności 40 do 240 mm. Wyższe wartości, w przedziale 1 - 2 MPa, uzyskano dla długości czynnej 40 mm. Naprężenie przyczepności obliczono dzieląc wartości sił wyciągających splot przez nominalny obwód splotu ( $\pi\phi$ ) oraz czynną długość przyczepności
- Maksymalne wartości naprężenia przyczepności uzyskuje się dla maksymalnych sił wyciągających odpowiadających końcowej wartości poślizgu splotu bez względu na czynną długość splotu. W analizowanych przypadkach uzyskane naprężenia przyczepności zawierają się w przedziale od 4,8 do 10 MPa. Należy zauważyć, że w niektórych przypadkach maksymalne naprężenia przyczepności po 28 dniach dojrzewania betonu były niższe niż po 7 dniach, a nawet po 1 dniu.

### 7.1.3 Badania zasadnicze

#### 7.1.3.1 Sploty

Ze względu na odmienny charakter zachowania się przyczepności BWW do splotów zamkniętych, badania zasadnicze zostały zawężone do dwóch rodzajów splotów: 7φ4 mm i 7φ5 mm o drutach okrągłych.

#### 7.1.3.2 Przyjęcie czynnej długości przyczepności

Otrzymane w badaniach wstępnych zależności siła wyciągania - poślizg dla poszczególnych efektywnych długości przyczepności nie wskazywały na prostą liniową zależność tych dwóch wielkości. Zainteresowania długością transmisji sugerowały przyjęcie kolejnych długości czynnych i ustalenie związków między nimi. Rozszerzone badania w fazie zasadniczej obejmowały powtórne przebadanie długości czynnych 80 mm i 120 mm w celu ustalenia powtarzalności wyników. Oprócz tego przyjęto długość 240 mm i 330 mm (13 cali). Po zadowalających wynikach potwierdzono podjęcie prób z długością równą 460 mm (18 cali). Dwie ostatnie długości pozwalają na porównanie wyników z wynikami badań prowadzonymi w amerykańskich ośrodkach naukowych. Na rys. 7.10 przedstawiono przygotowane sploty do badań z osadzonymi tulejkami, do wykonania próbek ze splotami bez wstępnego naciągu.



Rys. 7.10 Przygotowane sploty do badań zasadniczych

#### 7.1.3.3 Elementy badawcze

W badaniach zasadniczych użyto form wykonanych ze sklejki drewnopochodnej o jednolitym wewnętrznym przekroju poprzecznym 160 x 160 mm, a długość była regulowana efektywną długością przyczepności skorygowaną o długość plastikowej tulejki wartości 40 mm. Obecność tulejki była nieodzowna ze względu na przyjętą metodykę badań (eliminacja koncentracji naprężeń w miejscu obciążenia próbki). Podobnie jak w elementach z badań wstępnych na przeciwległych ściankach czołowych zostały nawiercone otwory o różnej średnicy odpowiednio na sam splot i splot otoczony osłonką z PCV. Również tutaj zachodziła konieczność zabezpieczenia stabilizacji położenia splotu



przed możliwością jego przemieszczenia podczas betonowania, za pomocą stalowych rurek i śrub motylkowych (rys. 7.11).



Rys. 7.11 Przygotowane próbki do badań zasadniczych

## 7.1.4 Przeprowadzenie badań

### 7.1.4.1 Wykonanie próbek

Proces betonowania przebiegał w Laboratorium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej. Ze względu na zamknięty charakter pomieszczenia prace badawcze realizowano w stałej temperaturze otoczenia wynoszącej około 20°C i próbki nie były narażone na działanie zewnętrznych czynników atmosferycznych.

Wykonane ze sklejki szalunkowej formy przed betonowaniem zostały powleczone od strony wewnętrznej środkiem antyadhezyjnym zapobiegającym przyklejaniu się betonu do ścianek i ułatwiającym późniejsze rozformowanie. Przygotowane w ten sposób formy układano na folii zabezpieczającej posadzkę w Laboratorium.



Rys. 7.12 Widok mieszalnika (po lewej) i mieszanka betonowa w trakcie wytwarzania (po prawej).

Użyty w badaniach mieszalnik (rys. 7.12) charakteryzował się poziomo ułożonym bębniem, a podawanie składników betonu następowało od góry. Po dokładnym ich wymieszaniu (rys. 7.12) mieszanka betonowa została przewieziona wózkami w miejsce jej układania, co realizowano ręcznie za pomocą szufelek (rys. 7.13). Starannie ułożona w formach mieszanka betonowa została następnie zagęszczona buławą wibracyjną. Zagęszczanie mieszanki betonowej realizowano przez wprowadzenie buławy prostopadle do mieszanki dwu, trzy lub czterokrotnie po jednej i drugiej stronie splotu, w zależności od długości wykonywanej próbki utrzymując buławę w pobliżu podłużnego boku formy. Taki sposób zagęszczania eliminował gromadzenie się wzdłuż splotów drobnych frakcji mieszanki

betonowej. Czas zagęszczania wibratorem wgłębnym określał brak pojawiania się na powierzchni większych pęcherzyków powietrza, co dawało możliwość uzyskania betonu bez nadmiernej segregacji jego składników (3 - 4 sekundy w każdym położeniu buławy). Uzyskane górne powierzchnie o wyglądzie relatywnie gładkim i szklistym zostały wyrównane packami murarskimi.



Rys. 7.13 Mieszanka betonowa bezpośrednio przed betonowaniem (po lewej) i układanie betonu w próbkach (po prawej)

Oprócz zasadniczych elementów do badania przyczepności, w toku betonowania zostały wykonane próbki normowe kostkowe i walcowe do kontrolnych i uzupełniających badań wytrzymałości betonu na ściskanie, rozciąganie osiowe, rozciąganie przy rozłupywaniu oraz wyznaczenia modułu sprężystości  $E$ . Zastosowane formy stalowe również zostały powleczone od wewnątrz substancją antyadhezyjną ułatwiającą rozformowanie, a zagęszczanie odbywało się na stole wibracyjnym w Laboratorium Instytutu. Górne powierzchnie również zostały wygładzone, a wszystkie próbki-świadki ułożono obok próbek zasadniczych stwarzając takie same warunki dojrzewania betonu.

W ramach pielęgnacji betonu wszystkie formy zawierające mieszankę betonową zostały starannie okryte folią i grubym sukniem aż do następnego dnia. Po 20 godzinach rozpoczęto prace związane ze zdejmowaniem form (rys. 7.14) i następowała segregacja elementów na grupę przeznaczoną do badania po 24 godzinach oraz na grupę zawierającą próbki do badań w późniejszych terminach 3, 7 lub 28 dni, którą ponownie owinięto folią. Próbki normowe przechowywano w warunkach określonych przez normę [N14] w specjalnych pojemnikach przy stałej temperaturze  $20^{\circ}\text{C}$  i stałej wilgotności wynoszącej 95%.

W jednym dniu betonowania wykonywano, z uwagi na ograniczoną liczbę form jak również pojemność betoniarki, po 8 próbek o długości 160 mm (długość czynna 80 lub 120 mm), 8 próbek o długości 280 mm ( $l_{ef} = 240$  mm) lub 500 mm ( $l_{ef} = 460$  mm) oraz 8 próbek o długości 370 mm ( $l_{ef} = 330$  mm). Do produkcji mieszanki betonowej stosowano suche składniki kruszywa drobnego i grubego. Zachowanie stałych warunków betonowania nie mogło mieć zatem wpływu na wyniki badań doświadczalnych, które prowadzono w ściśle określonych okresach dojrzewania betonu.



Rys. 7.14 Próbkę po betonowaniu w fazie zasadniczej

#### 7.1.4.2 Przygotowanie badań

Po wyjęciu próbek z form mierzono temperaturę betonu, a na powierzchni elementów nadano oznaczenia z uwzględnieniem rodzaju splotu, czynnej długości przyczepności, przewidzianym dniem badania oraz numerem kolejnym. W przypadku próbek realizowanych we wstępnej fazie badawczej wykonywanych w jednym elemencie długości 960 mm, zachodziła konieczność pocięcia ich na elementy kostkowe. Przecięcie nastąpiło według zaznaczonych linii a uzyskane w ten sposób elementy kostkowe zostały starannie przygotowane do badań. Wystające końce splotów zostały dokładnie oczyszczone z ewentualnych zabrudzeń stwardniałej mieszanki betowej, a zwłaszcza górna część, na której miał być osadzony ekstensometr. Na górnych powierzchniach czołowych naklejano dwa aluminiowe kątowniki po obu stronach splotu w rozstawie 40 - 50 mm stanowiące punkt odniesienia urządzenia pomiarowego, w którym zostały przeprowadzone testy pull-out (rys. 7.15).



Rys. 7.15 Próbkę przygotowane do badań



### 7.1.4.3 Stanowisko badawcze

Testy pull-out zostały przeprowadzone w Laboratorium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej w maszynie Zwick-Roell Z1200 o centralnie usytuowanych szczękach do badań wytrzymałościowych, w których osadzona została specjalnie do tego celu zaprojektowana stalowa klatka (rys. 7.16). Osiowe wprowadzenie siły z maszyny na klatkę realizowano za pomocą przegubu kulistego. Klatka zbudowana jest ze sztywnej płyty górnej i dolnej połączonych między sobą czterema wieszakami w narożach o sześciokątnym przekroju, których zadaniem jest przeniesienie obciążeń występujących podczas badania z płyty górnej na dolną.



Rys. 7.16 Widok próbki o czynnej długości przyczepności 460 mm na stanowisku badawczym

Zalecenia RILEM [N11] przewidują wprowadzenie siły rozciągającej do dłuższego końca splotu, a wykonanie pomiaru na jego krótszym, co zostało zrealizowane przez odpowiednie umieszczenie próbki w urządzeniu badawczym. Dolny koniec splotu został przeprowadzony przez otwór znajdujący się w dolnej płytce gwarantującej dobre oparcie dla całej próbki, a dodatkowo podłożona płytka pilśniowa na całej powierzchni styku między betonem a płytą poprawiała dopasowanie i eliminowała lokalne naprężenia wynikające z nierówności powierzchniowych betonu, które mogłyby mieć niepożądany wpływ na wynik badania.

### 7.1.4.4 Przebieg badania

Po dokładnym osadzeniu elementu badawczego zaciskano szczęki kotwiące (ciśnienie 400 bar) mocujące dolny odcinek splotu w projektowanym położeniu, co było równoznaczne z przyłożeniem obciążenia, gdy mechanizm sterujący powodował ruch klatki do góry z umieszczoną w niej próbką. Unieruchomienie splotu w stałej pozycji przy przesuwanym się elemencie badawczym wywoływało siły równoległe do powierzchni styku materiałów, co połączone było z ich względnym przemieszczaniem się (poślizgiem).

Do górnego odcinka splotu jak również do aluminiowych kątowników trwale połączonych (naklejonych) z próbką zostało przyłożone urządzenie pomiarowe, które stanowiły dwa niezależne zestawy ekstensometrów inkrementalnych o rozdzielczości odczytu  $0,12 \mu\text{m}$ . Każdy z czujników mierzył różnicę przemieszczeń, a końcowy wynik stanowił uśrednioną różnicę pojedynczych układów pomiarowych. Oprogramowanie urządzenia pozwalało na ciągłą rejestrację siły w zależności



od osiągniętego poślizgu. W badaniu przestrzegano zaleceń *Weißego* i *Holschemachera* [162] dla betonów wysokiej wytrzymałości, a dotyczących sterowania obciążenia przez regulację przemieszczenia w czasie o wartości 0,1 mm/s. Wstępne obciążenie splotu wynosiło 1 kN, po czym uruchamiany był pomiar przemieszczeń, a rejestrację siły prowadzono do chwili uzyskania poślizgu o wartości 10 mm.

Maksymalne siły zrywające splot 7φ4 mm i 7φ5 mm kształtowały się odpowiednio na poziomie 186,63 kN i 285,65 kN. W przypadku próbek o większej długości czynnej przy okresie dojrzewania betonu 7 i 28 dni uzyskiwano znaczne wartości sił wyciągających zbliżające się do wartości sił zrywających splot. Przed wprowadzeniem tych próbek do stanowiska badawczego mierzono długość splotu (od strony tensometru) w stosunku do czołowej powierzchni próbki. Aby nie dopuścić do zniszczenia bardzo kosztownego systemu pomiarowego, przy osiągnięciu odpowiedniej wartości poślizgu odłączano ekstensometr i badania były kontynuowane w celu zarejestrowania maksymalnej siły wrywającej splot. Po zakończeniu badań mierzono przymiarem liniowym długość wciągnięcia splotu w stosunku do czołowej powierzchni próbki.

#### **7.1.4.5 Ocena charakterystyki zniszczenia**

Rejestrowanie siły wyciągającej w zależności od poślizgu było prowadzone do chwili osiągnięcia względnego przemieszczenia między stalą a betonem o wartości 10 mm. Wszystkim próbkom udało się uzyskać ten zasięg bez widocznych oznak zniszczenia betonu, co wiązało się z przyjętymi wymiarami elementów badawczych i stosunkiem otuliny betonowej do średnicy splotu wynoszącym od 4,5 do 5,6. Tak przyjęta geometria przekroju zabezpieczała próbki przed zniszczeniem przez rozłupanie betonu.

Dla prawie wszystkich próbek udało się uzyskać w badaniach przebieg rejestracji siły wyciągającej w zależności do poślizgu w zakresie do 10 mm. Jedynie w niektórych przypadkach nastąpiło gwałtowne zerwanie pojedynczego drutu w szczękach i badanie zostało ukończone przedwcześnie. Żadna z badanych próbek nie uległa rozłupaniu. W niektórych przypadkach nastąpiło zerwanie pojedynczego drutu w splotie w obszarze szczęk zaciskowych.

Zarówno dla próbek ze splotem 7φ4 mm jak i 7φ5 mm rozłupano elementy próbne po zakończeniu badań, co umożliwiło dokonanie obserwacji powierzchni kontaktowej betonu ze splotem jak również powierzchni przylegania splotu do betonu (rys. 7.17). W oparciu o dokonane obserwacje można stwierdzić:

- sposób nawinięcia sznurka i wprowadzenie silikonu spełniły swoje zadanie polegające na uniemożliwieniu przenikania zaczynu cementowego do tulei (spełniony wymóg metodyki badań),
- w przypadku obu rodzajów splotów stwierdzono obecność betonu w bruzdach między drutami zewnętrznej warstwy splotu,
- dla splotów 7φ5 mm odwzorowana w betonie zewnętrzna struktura splotu potwierdziła obecność grubszych bruzd betonowych w stosunku do analogicznych bruzd dla splotów 7φ4 mm, co potwierdza zdolność betonu do przeniesienia większych sił wyciągających w przypadku splotów 7φ5 mm,
- w obszarze powierzchni kontaktowej beton - splot tylko w nielicznych przypadkach stwierdzono obecność niewielkich pustek powietrznych



Rys. 7.17 Widok obu części betonowej próbki po rozłupaniu

## 7.1.5 Wyniki badań

### 7.1.5.1 Uwagi ogólne

W fazie wstępnej przebadano  $n_{bw} = 95$  próbek przy trzech rodzajach splotów  $7\phi 4$  mm,  $7\phi 5$  mm z prętami okrągłymi i  $7\phi 5$  mm z prętami profilowanymi (sploty zamknięte) bez wstępnego naciągu. Badane próbki charakteryzowały się czterema wartościami długości czynnej 40, 80, 120 i 240 mm. W tabeli 7.1 podano ilościowe zestawienie próbek wykonanych z różnymi splotami i przebadanych po określonym czasie dojrzewania betonu. Ze względu na planowane badania próbek o czynnej długości przyczepności 330 mm i 460 mm zrezygnowano z kontynuowania badań próbek o czynnej długości 40 mm w fazie zasadniczej.

W ramach badań zasadniczych zrealizowano  $n_{bz} = 226$  próbek ze splotami bez wstępnego naciągu ( $7\phi 4$  mm i  $7\phi 5$  mm z prętami okrągłymi). W tabeli 7.2 zestawiono wszystkie próbki ze splotami  $7\phi 4$  mm i  $7\phi 5$  mm o drutach okrągłych przebadane w ramach badań wstępnych i zasadniczych bez naciągu ( $n_{bz} = 226$ ,  $n_{bw,7\phi 4} = 29$  (tab.7.1);  $n_{bw,7\phi 5} = 35$  (tab.7.1)) o łącznej liczbie  $n = 290$ . W programie badań przewidziano wykonanie takiej liczby próbek aby w każdym etapie badawczym uzyskać 5 - 6 miarodajnych wyników. Badania doświadczalne musiały być tak zaprogramowane, aby w każdym przewidzianym do badań okresie dojrzewania betonu można było skorzystać z maszyny wytrzymałościowej będącej najbardziej obciążonym urządzeniem badawczym. Badania nie mogły być prowadzone ani w sobotę ani w niedzielę z uwagi na zajęcia dydaktyczne na studiach niestacjonarnych. Ze względu na awarię zasilania elektrycznego, próbki przeznaczone do badań po okresie 3 dni lub 7 dni musiały być przeniesione na okres późniejszy. W wyniku tych trudności w przypadku próbek z długością czynną 460 mm badania ograniczono do czterech elementów w każdym okresie badawczym. Z podobnych powodów próbki ze splotami  $7\phi 5$  mm ograniczono do czterech elementów w okresie po 7 dniach. Należy nadmienić, że bezpośrednio po zakończeniu badań zasadniczych na próbkach ze splotami bez wstępnego naciągu należało przystąpić do wykonania próbek na torze naciągowym w celu określenia naprężenia przyczepności, a dalej długości transmisji.

Tabela 7.1 Zestawienie liczby przebadanych próbek w badaniach wstępnych

wiek betonu [dni]	liczba przebadanych próbek												n [szt]
	rodzaj splotu												
	7 φ 4 mm (okrągłe)				7 φ 5 mm (okrągłe)				7 φ 5 mm (zamknięte)				
	długość czynna $l_{ef}$ [mm]												
	40	80	120	240	40	80	120	240	40	80	120	240	
1d	2	2	2	1	5	2	2	2	4	2	2	1	27
3d	2	3	2	1	5	2	3	0	2	3	2	1	26
7d	2	1	2	2	3	2	3	0	2	2	2	1	22
28d	2	3	2	0	2	2	2	0	2	2	2	1	20
n [szt]	8	9	8	4	15	8	10	2	10	9	8	4	95
Σn [szt]	29				35				31				

Tabela 7.2 Zestawienie liczby przebadanych próbek łącznie w badaniach wstępnych i zasadniczych ze splotem bez naciągu

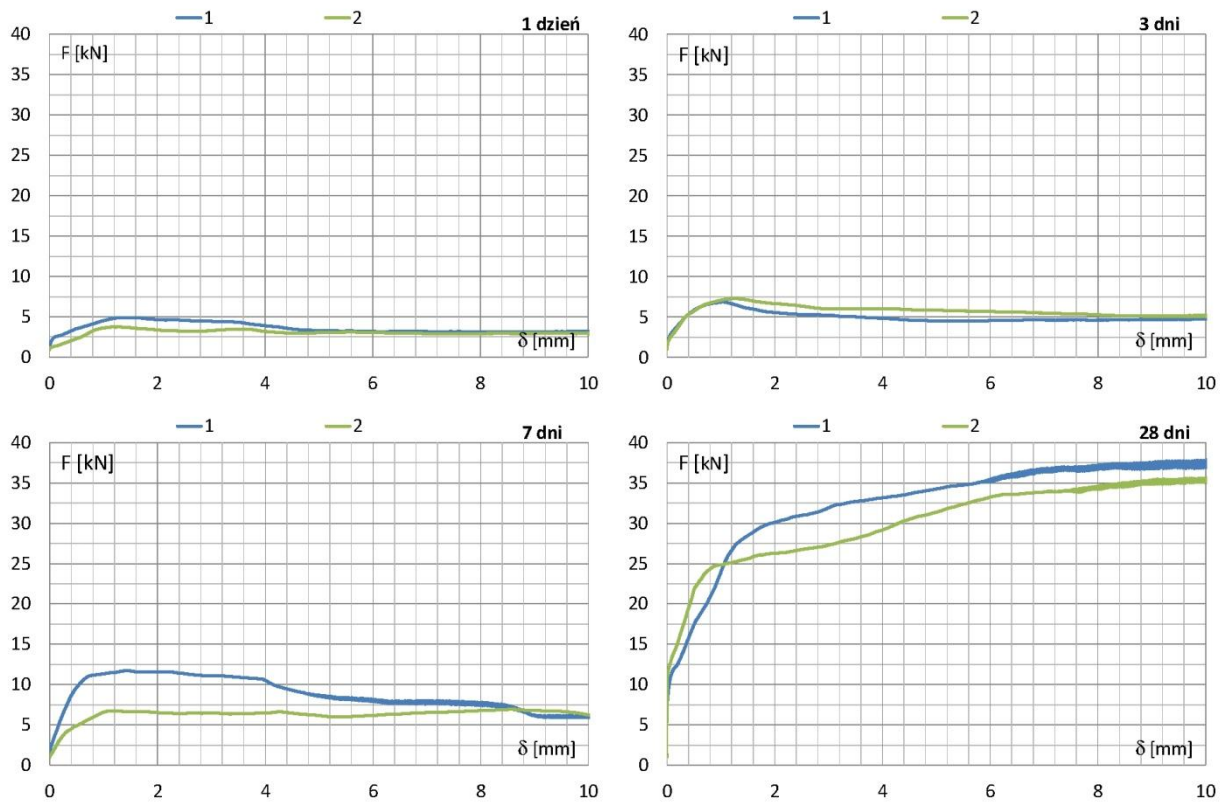
długość czynna $l_{ef}$ [mm]	sploty 7φ 4 mm				sploty 7φ 5 mm				n [szt]
	wiek betonu w chwili badania [dni]								
	1	3	7	28	1	3	7	28	
40	2	2	2	2	5	5	3	2	23
80	8	9	7	9	8	8	7	8	64
120	8	8	7	8	8	9	8	10	66
240	5	5	6	5	6	6	4	8	45
330	8	8	8	8	8	8	4	8	60
460	4	4	4	4	4	4	4	4	32
n [szt]	35	36	34	36	39	40	30	40	
Σ n [szt]	141				149				290
Σ n [szt]	290								

W następnych punktach rozdziału przedstawiono wyniki badań. Zamieszczone wykresy nie mają ujednocionej skali (zwłaszcza sił, mniej naprężeń przyczepności) w obrębie jednego rysunku zawierającego wyniki dla określonej efektywnej długości z uwagi na znaczne różnice występujące między pierwszym a ostatnim, a wykonywane próby ujednoczenia "wypłaszczą" wykresy i czynią je nieczytelnymi. Zestawiając rozkłady parami (lewa - prawa strona) starano się przynajmniej w tym małym zakresie o taką samą skalę.

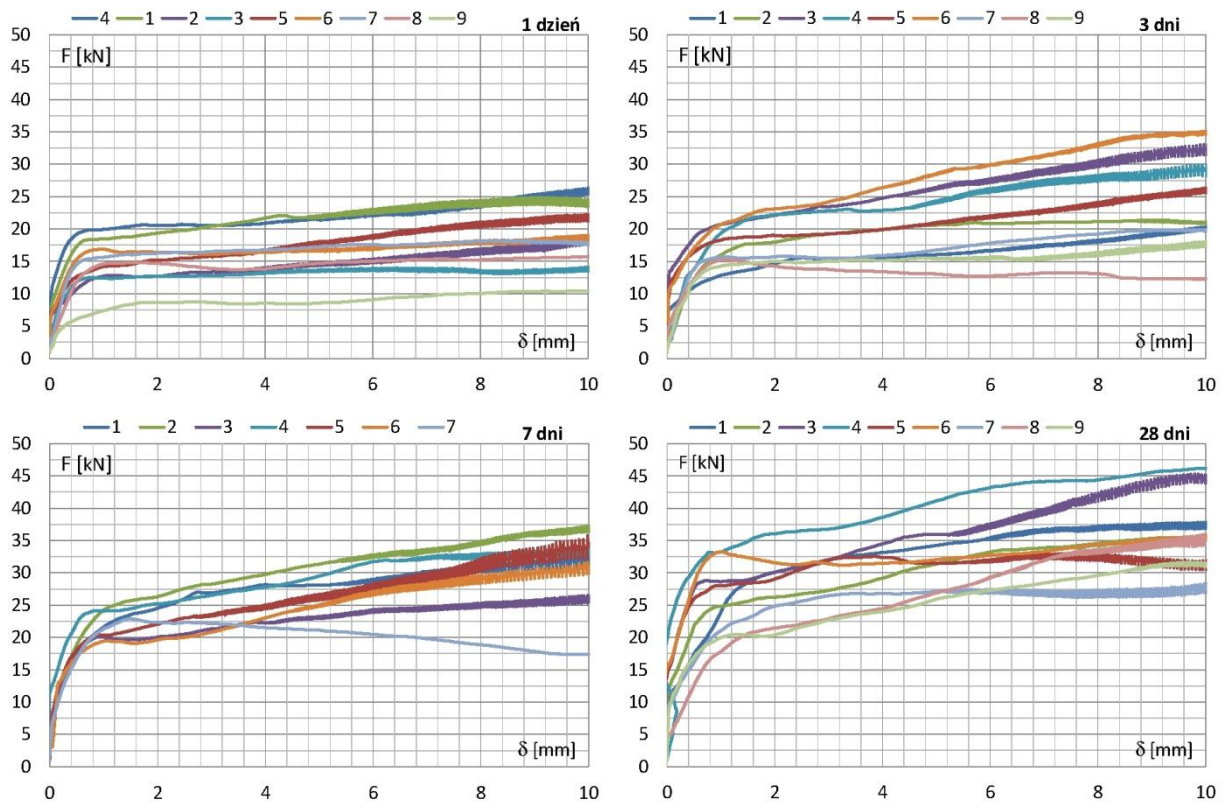
### 7.1.5.2 Wyniki badań próbek ze splotami 7φ4 mm

Przebieg badania pull-out przeprowadzono w identyczny sposób jak w przypadku próbek zawierających sploty 7φ5 mm zamknięte, który został omówiony wcześniej. Również w tym przypadku obowiązywała zasada prowadzenia badań do osiągnięcia poślizgu 10 mm, po czym przerywano wyciąganie splotu z bloczku betonowego. Poniżej przedstawiono wykresy zależności siła wyciągająca - poślizg dla kolejnych dni pomiarowych, pogrupowane w zależności od długości efektywnej splotu.

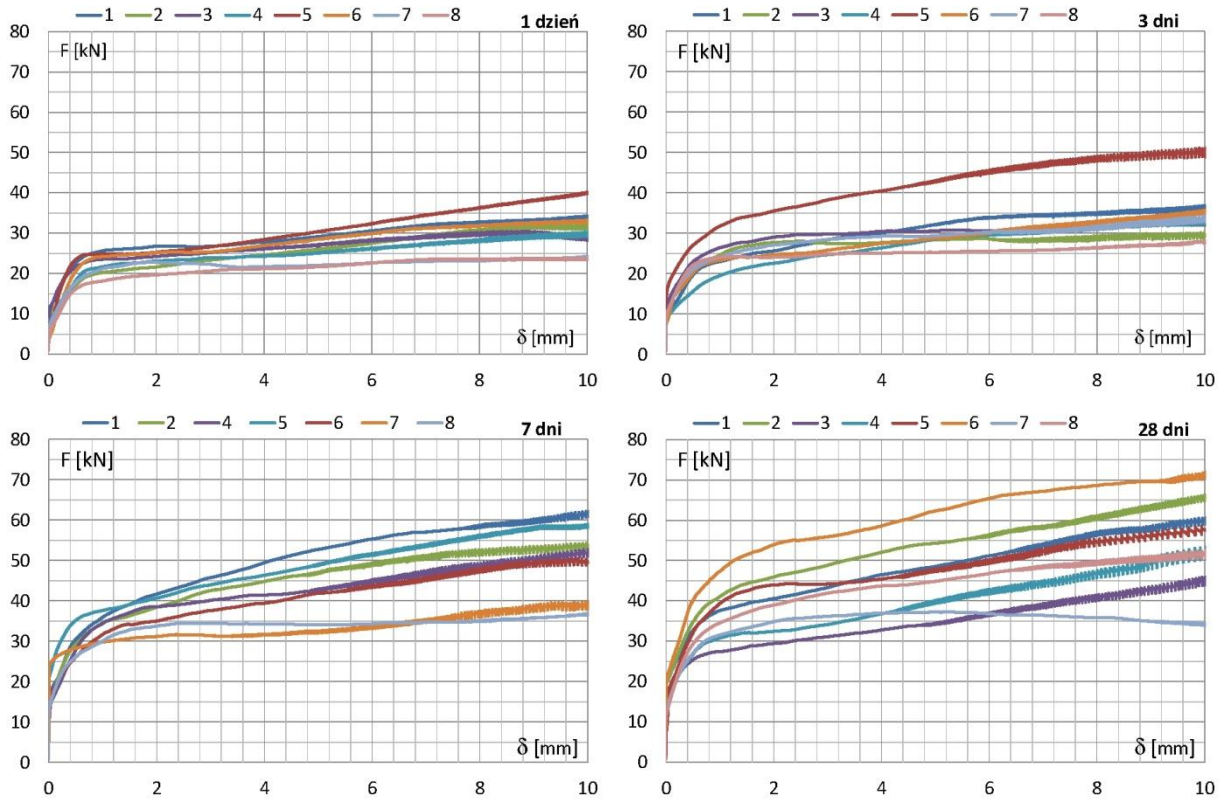
Prawie dla wszystkich długości przyczepności i we wszystkich dniach pomiarowych obserwuje się stały wzrost ("średniej") krzywej określającej zależność siła wyciągająca - poślizg w poszczególnych przypadkach. Po pionowym przebiegu obrazującym brak różnicy przemieszczenia betonu względem stalowego splotu, następuje "odrywanie" się wykresu od osi wartości siły wyciągającej, po czym krzywa stopniowo wyokrągla się, by po przekroczeniu poślizgu około 1 mm przejść w odcinek względnie prosty. Jedynie nieliczne wykresy wykazują tendencje spadkowe po osiągnięciu wartości maksymalnej lub siła wyciągania stabilizuje się w przybliżeniu na tym samym poziomie przy wzrastającym przemieszczeniu.



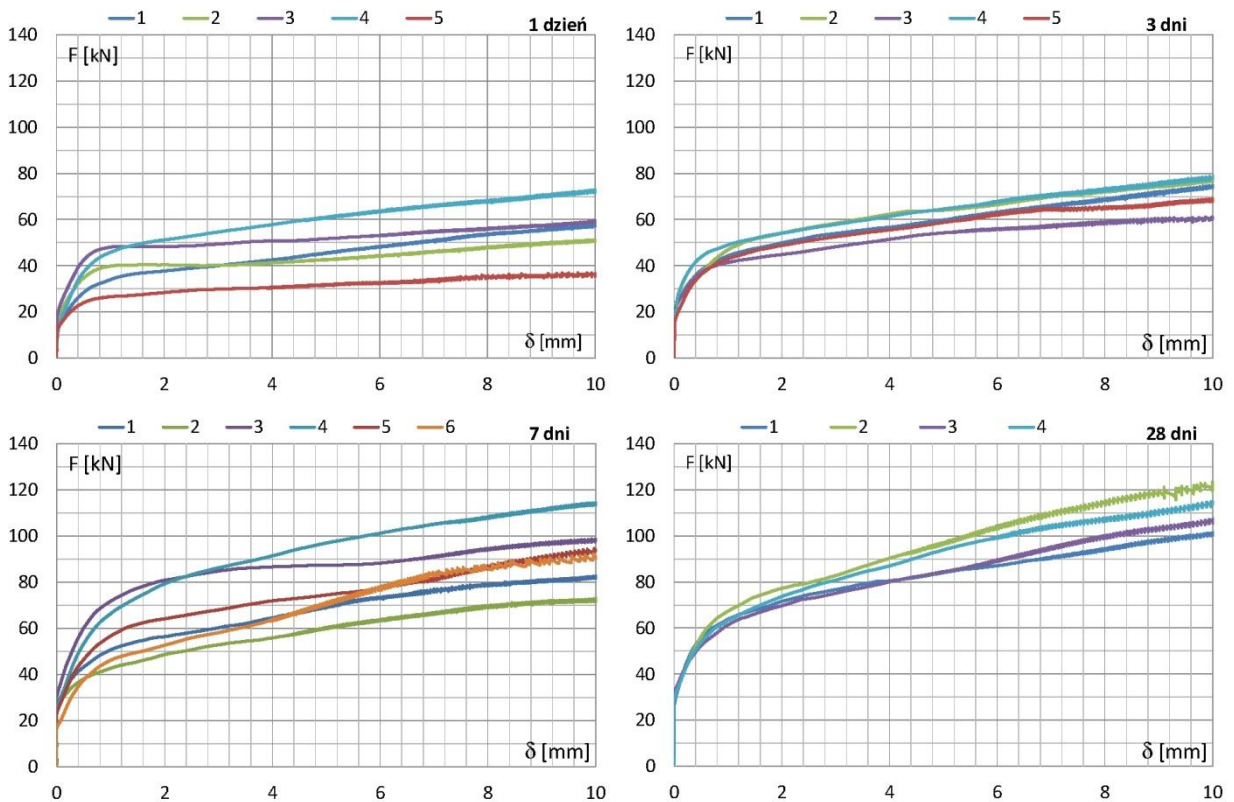
Rys. 7.18 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów  $7\phi 4$  mm okrągłych, o długości czynnej 40 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni



Rys. 7.19 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów  $7\phi 4$  mm okrągłych, o długości czynnej 80 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni

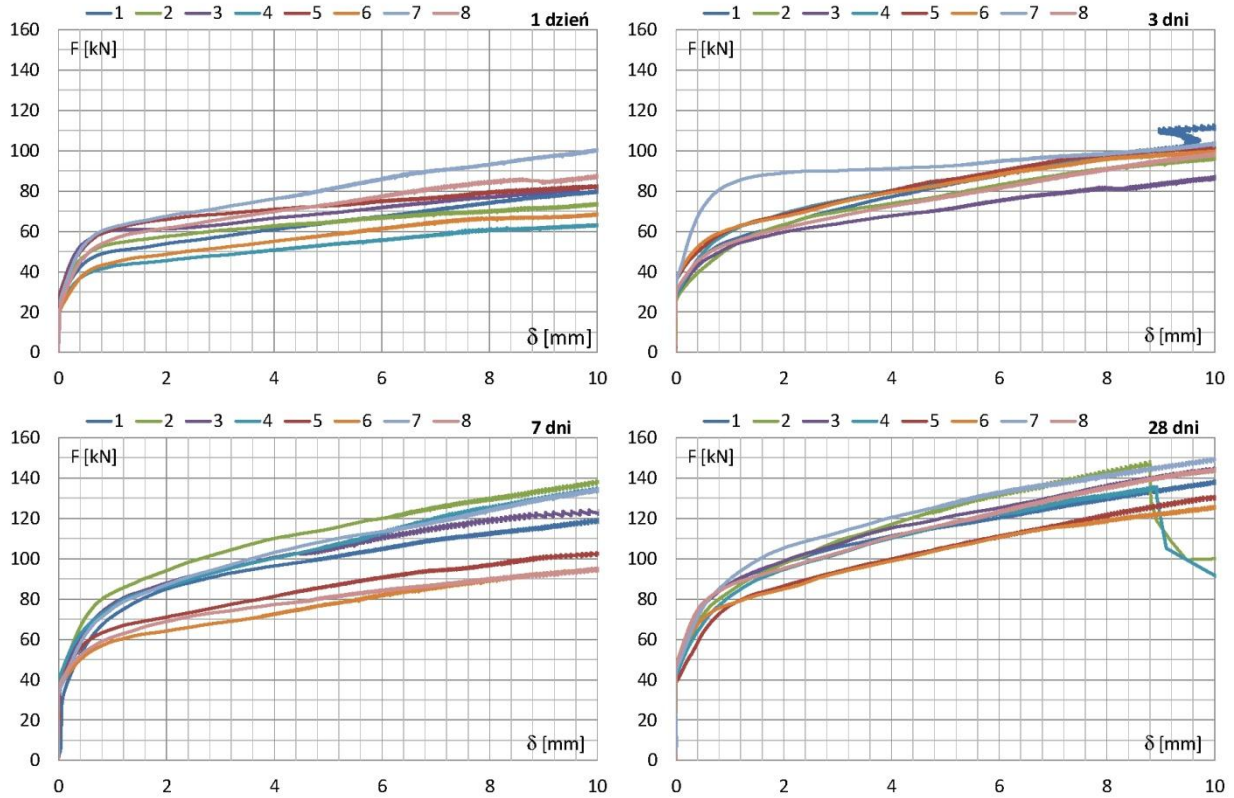


Rys. 7.20 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7 $\phi$ 4 mm okrągłych, o długości czynnej 120 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni

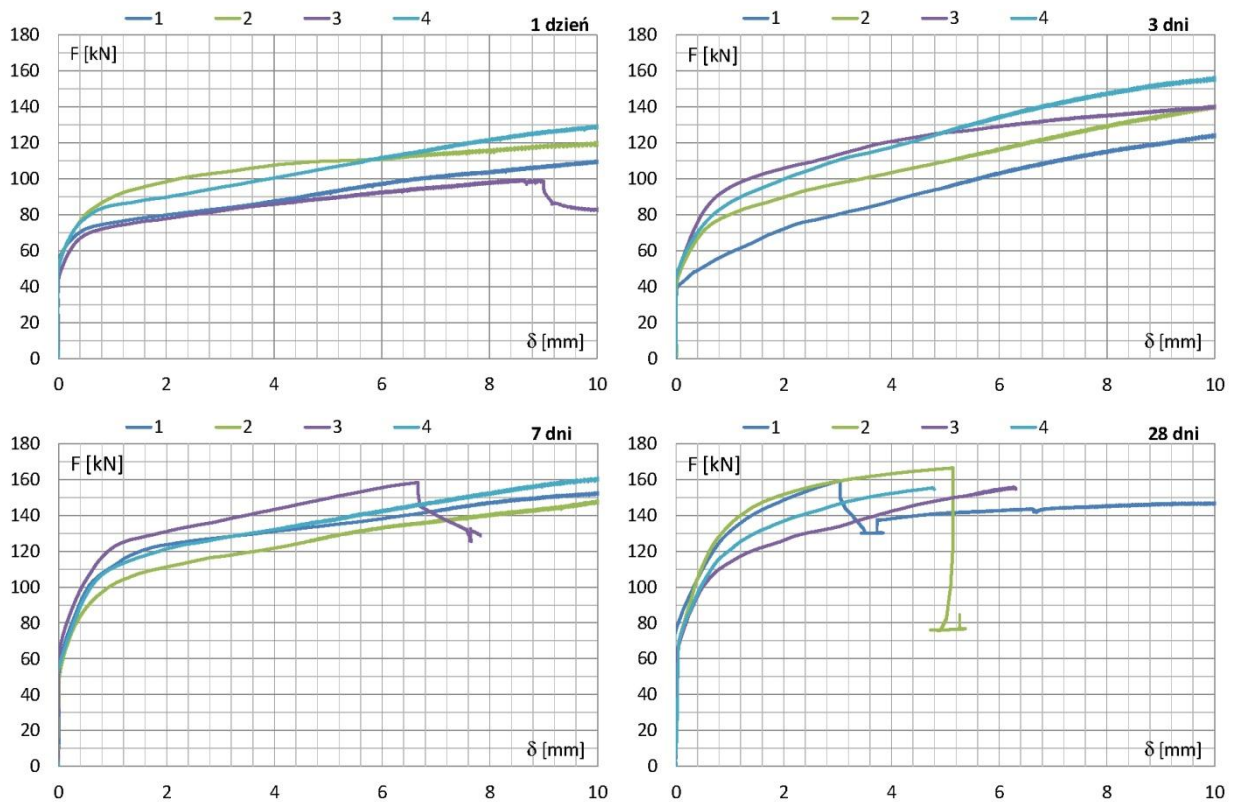


Rys. 7.21 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7 $\phi$ 4 mm okrągłych, o długości czynnej 240 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni





Rys. 7.22 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów  $7\phi 4$  mm okrągłych, o długości czynnej 330 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni



Rys. 7.23 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów  $7\phi 4$  mm okrągłych, o długości czynnej 460 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni

W niektórych przypadkach zauważalny jest "drobnoskokowy" lub pogrubiony wykres, który przy bliższej analizie okazuje się przedstawiać charakterystyczny dla splotów zamkniętych zygzakowaty przebieg, lecz o relatywnie mniejszej różnicy wartości górnej i dolnej siły wyciągającej oraz większej częstotliwości, co na wykresie odwzorowuje się efektem pogrubienia. Wartości średnie jednak z górnej i dolnej wartości wykazują tendencje wzrostowe.

Prawie wszystkie próbki osiągnęły planowany w badaniach poziom poślizgu 10 mm. Jedynie w przypadkach, w których wartość siły wyciągającej splot zbliżała się do wartości siły zrywającej splot (187,5 kN) następowało uszkodzenie splotu na poziomie począwszy od około 150 kN. W jednym przypadku doszło do przedwczesnego zniszczenia splotu przy sile około 100 kN, a w jednym zaznaczył się osobliwy przebieg zależności siła wyciągająca - poślizg.

W przypadku próbek o długości czynnej 460 mm badanych po 28 dniach dojrzewania betonu podczas badań pierwszej próbki przy sile wrywającej 159,26 kN, co stanowi 86% siły zrywającej splot, uległ zerwaniu jeden drut w szczękach powodując spadek siły wyciągającej. Ze względu na kontynuowanie badania, zredukowana siła wyciągająca została przeniesiona przez sześć drutów. Analogiczne zjawisko zerwania jednego z drutów oplotu zaistniało w przypadku drugiej próbki z tą samą długością czynną, co spowodowało zakończenie badań. Oznacza to, że doszło do uszkodzenia nie próbki betonowej ale splotu. Przy dwóch kolejnych próbkach wyłączono ekstensometry przy osiągnięciu siły około 155 kN i kontynuowano badania. Zanotowane wartości siły wrywającej wynosiły odpowiednio 166,0 kN i 167,0 kN, co stanowi przyrost sił o 6,5% i 7,5% (tab. 7.3).

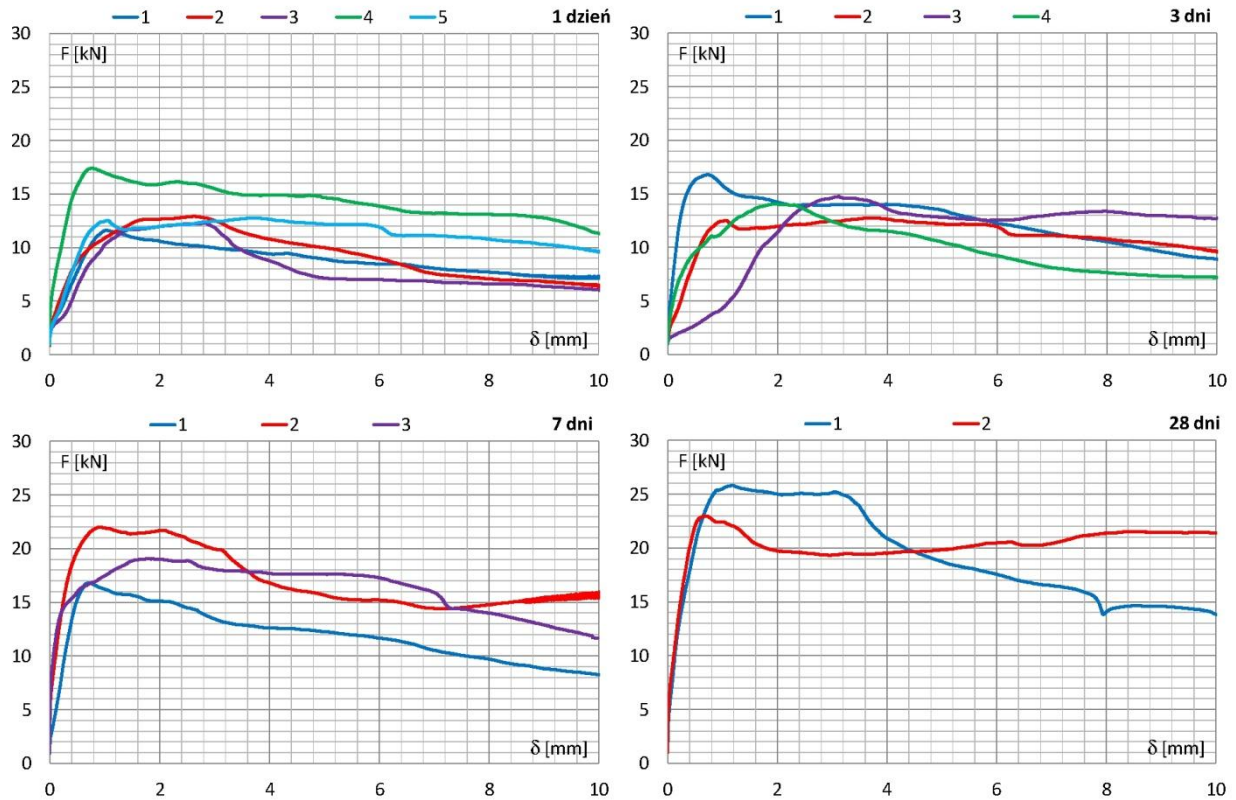
Tabela 7.3 Siły wrywające splot 7φ4 mm po odłączeniu ekstensometru

PRÓBKA	długość			siła wrywająca				
	L <sub>przed</sub>	L <sub>po</sub>	ΔL	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>1</sub> /F <sub>2</sub>	Δ(F <sub>2</sub> -F <sub>1</sub> )	
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	%	[kN]	%
8_7φ4_28d_1	98	85	13	45,31	46,0	98,5	0,7	1,5
8_7φ4_28d_2	97	83	14	46,19	47,0	98,3	0,8	1,8
8_7φ4_28d_3	98	84	14	32,99	33,0	100,0	0,0	0,0
8_7φ4_28d_4	99	85	14	35,95	39,0	92,2	3,1	8,5
12_7φ4_28d_1	98	84	14	58,62	68,0	86,2	9,4	16,0
12_7φ4_28d_2	99	85	14	71,89	74,0	97,1	2,1	2,9
33_7φ4_28d_1	101	86	15	131,01	142,0	92,3	11,0	8,4
33_7φ4_28d_2	101	85	16	126,43	138,0	91,6	11,6	9,2
33_7φ4_28d_3	100	90	10	149,98	153,0	98,0	3,0	2,0
33_7φ4_28d_4	99	88	11	144,63	153,0	94,5	8,4	5,8
46_7φ4_28d_1	98	88	10	159,29	-	-	-	-
46_7φ4_28d_2	101	90	11	166,46	-	-	-	-
46_7φ4_28d_3	99	83	16	155,80	166,0	93,9	10,2	6,5
46_7φ4_28d_4	100	78	22	155,34	167,0	93,0	11,7	7,5

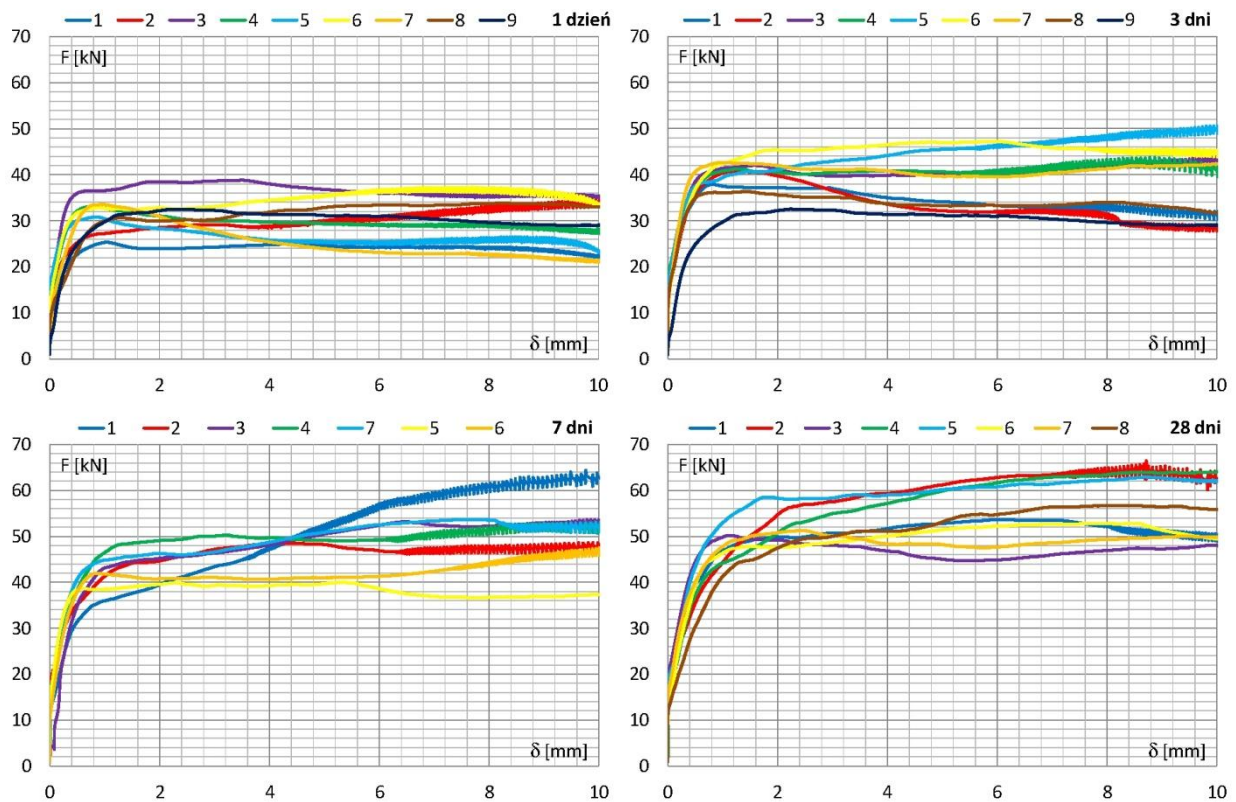
W tabeli 7.3 zestawiono pomierzone długości splotów 7φ4 mm, wystające z próbki od strony ekstensometru, przed rozpoczęciem badań (L<sub>przed</sub>) i po zakończeniu badań (L<sub>po</sub>) oraz obliczone długości poślizgu (ΔL) w chwili zakończenia badań. Podano również wartości sił wyciągających w chwili odłączenia ekstensometru (F<sub>1</sub>) i wartości sił maksymalnych (F<sub>2</sub>). Dane te dotyczą próbek badanych po 28 dniach dojrzewania betonu.

### 7.1.5.3 Wyniki badań próbek ze splotami 7φ5 mm okrągłymi

Poniżej przedstawiono zależności siła wyciągająca - poślizg dla poszczególnych dni pomiarowych pogrupowanych w zależności od długości efektywnej splotu.

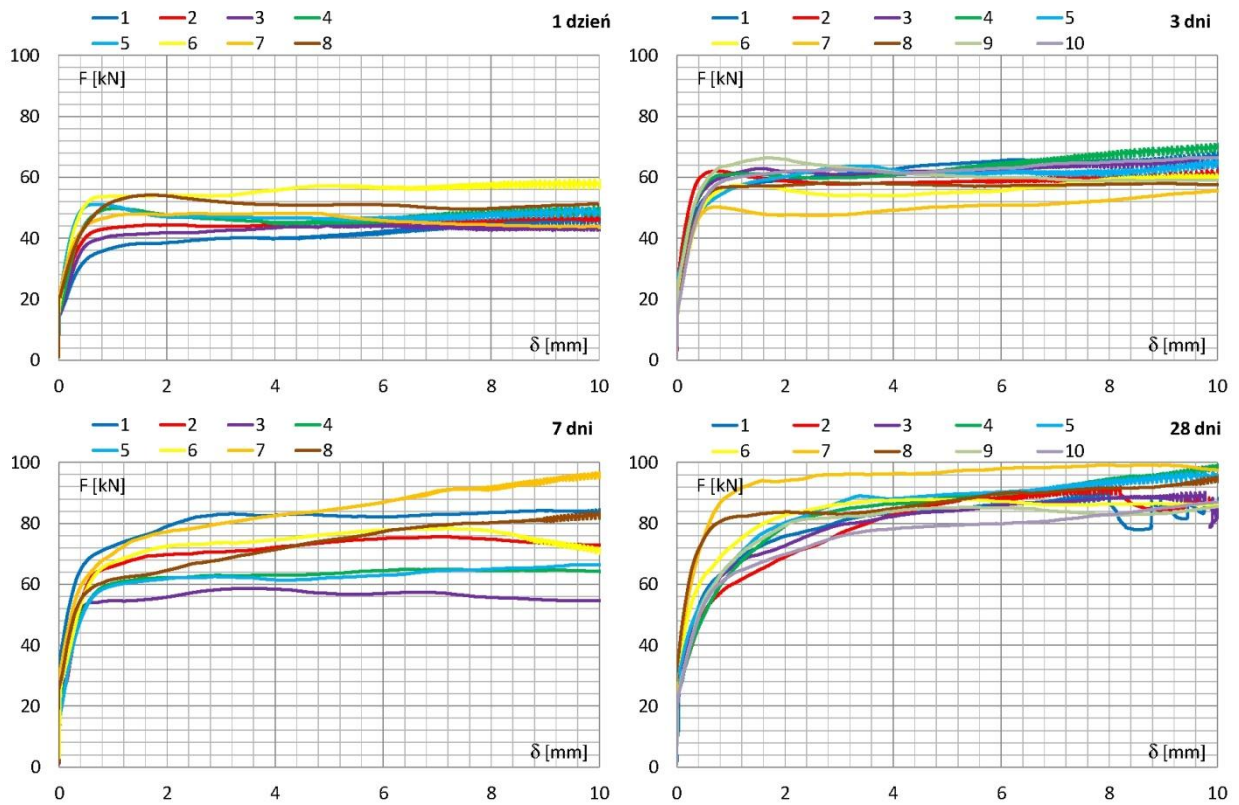


Rys. 7.24 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów  $7\phi 5$  mm okrągłych, o długości czynnej 40 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni

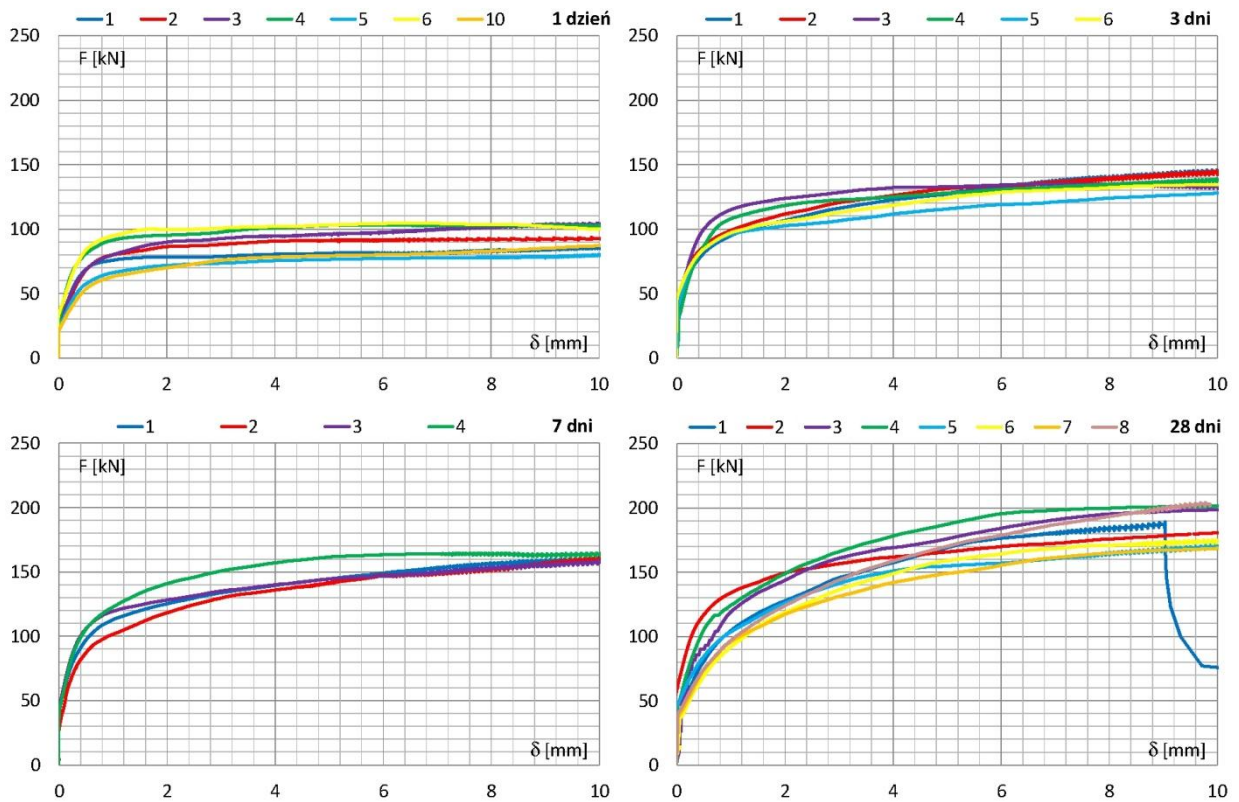


Rys. 7.25 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów  $7\phi 5$  mm okrągłych o długości czynnej 80 mm dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni

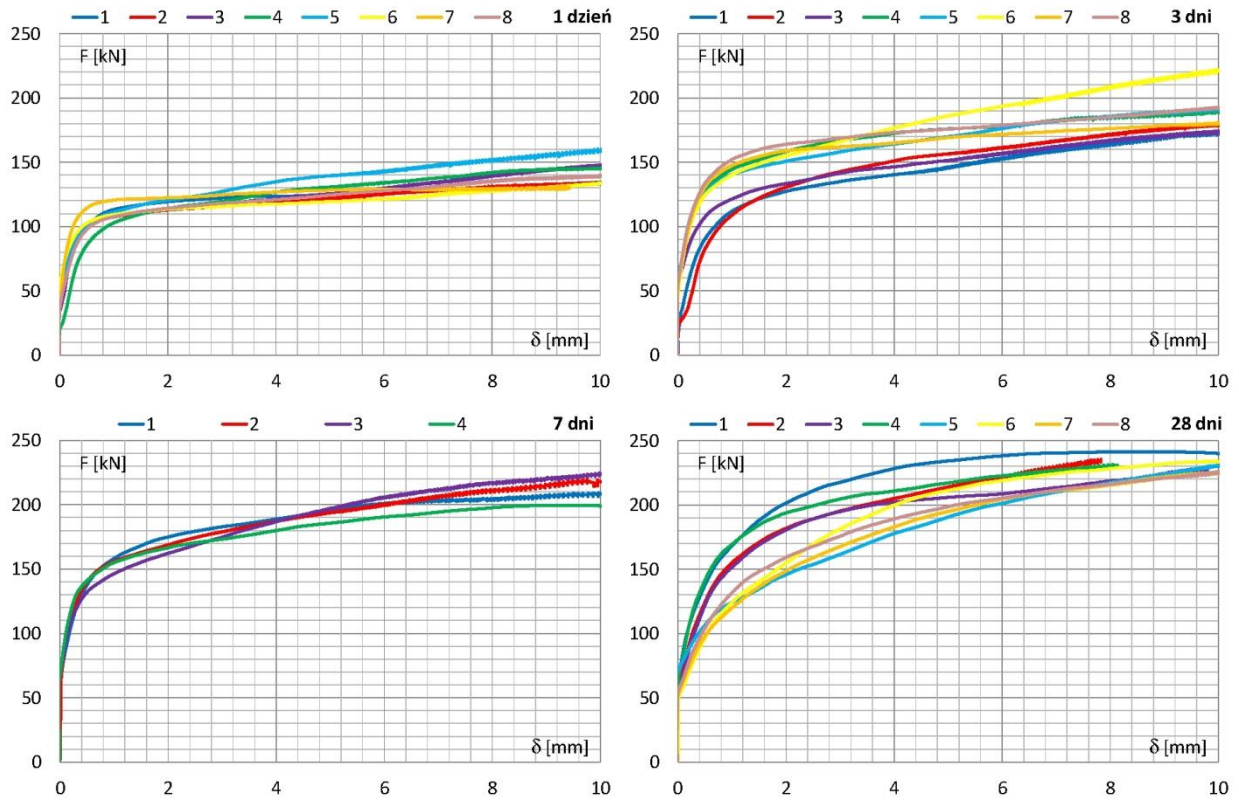




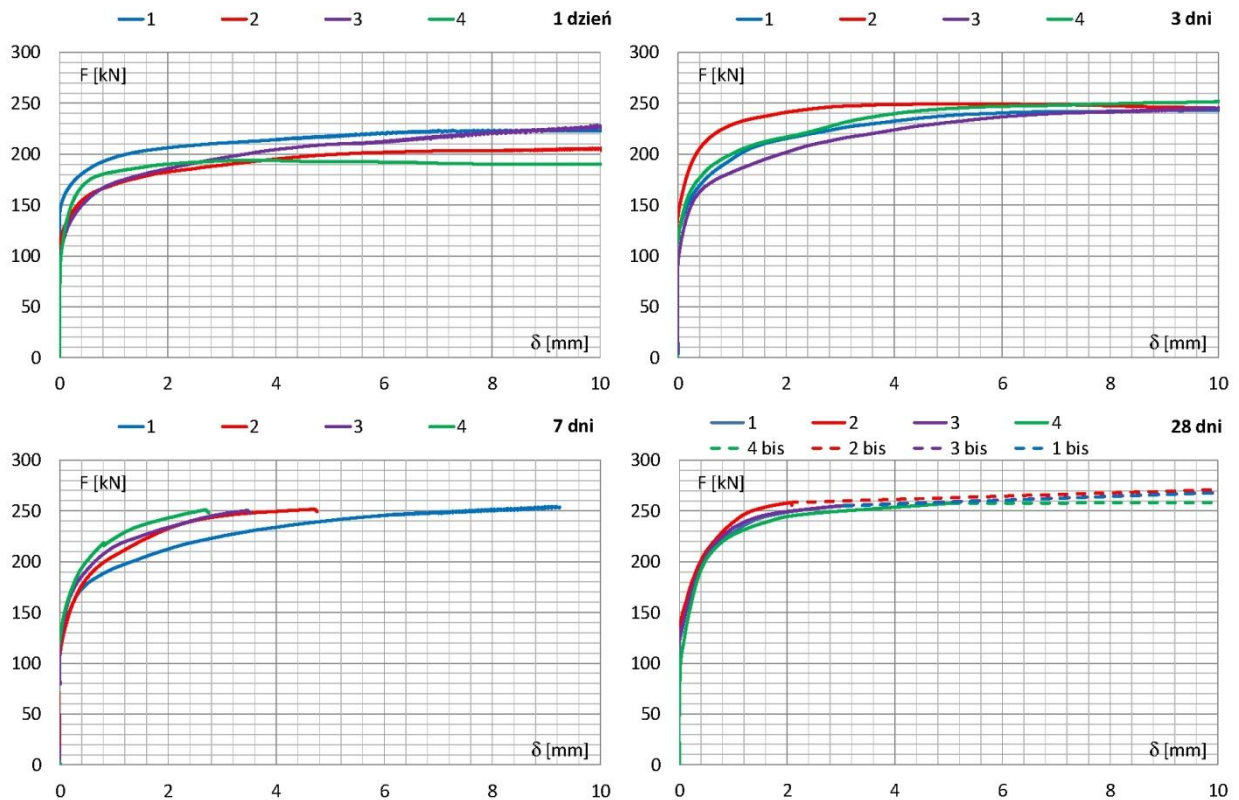
Rys. 7.26 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów  $7\phi 5$  mm okrągłych o długości czynnej 120 mm dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni



Rys. 7.27 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów  $7\phi 5$  mm okrągłych o długości czynnej 240 mm dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni



Rys. 7.28 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów  $7\phi 5$  mm okrągłych o długości czynnej 330 mm dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni



Rys. 7.29 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów  $7\phi 5$  mm okrągłych o długości czynnej 460 mm dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni

W przypadku efektywnej długości przyczepności 40 mm zauważalne są tendencje spadkowe po osiągnięciu maksymalnej wartości siły wyciągającej przy poślizgu w przybliżeniu 1 mm. Te maksymalne wartości w kolejnych dniach pomiarowych wykazują jednak tendencje wzrostowe.

Począwszy od długości efektywnej 80 mm nie obserwuje się dalej tendencji spadkowych, ale stabilizujące lub wzrostowe. Analogiczną sytuację można odnieść do długości czynnej 120 mm, w przypadku której wyczuwalny wzrost siły wyciągającej wraz ze wzrostem poślizgu obserwuje się dla próbek badanych w 7 i 28 dniu dojrzewania betonu. Podobną sytuację można odnieść do próbek o długości czynnej 240 mm. W przypadku badanych próbek o długości czynnej 330 mm znaczny wzrost pochylenia krzywej zależności siła - poślizg obserwuje się w pierwszym dniu dojrzewania betonu. Dla tej długości czynnej w przypadku 2 próbek badanych po 28 dojrzewania betonu badania zostały wstrzymane przy poślizgu około 8 mm z uwagi na znaczną tendencję wzrostu siły wyciągającej.

Na rys. 7.29 przedstawiono rozkłady zależności siły wyciągającej od poślizgu dla próbek o długości czynnej 460 mm. W każdym okresie badawczym, próby wyciągania splotu przeprowadzono dla 4 elementów. W próbkach badanych po 1 i 3 dniach dojrzewania betonu zależność obciążenie - poślizg zostało zarejestrowane w pełnym cyklu pomiarowym, mimo iż wartość siły wyciągającej w przypadku elementów badanych po 3 dniach osiągnęła wartość 250 kN. Obserwując wykresy można zauważyć, że między wartością poślizgu 6 i 10 mm nie ma wzrostu wartości siły wyciągającej. W przypadku próbek badanych po 7 i 28 dniach dojrzewania betonu szybki przyrost siły wyciągającej zanotowano w okresie od chwili obciążenia do poślizgu 2 - 4 mm (7 dni) oraz 2 - 3 mm (28 dni).

Badania w tych przypadkach zostały przerwane w obawie przed uszkodzeniem ekstensometru albo w wyniku zerwania drutu w oplocie zewnętrznym splotu w szczękach zakotwienia. W pierwszym przypadku po odłączeniu ekstensometru kontynuowano obciążenie do chwili uzyskania maksymalnej wartości siły wyciągającej, po której odnotowano gwałtowny spadek siły. W drugim przypadku zakończono badania. W tabeli 7.4 zestawiono zarejestrowane wartości sił w badanych próbkach w chwili odłączenia ekstensometru oraz wartości maksymalnych sił powodujących wyrwanie splotu. Zestawione w tabeli oznaczenia są objaśnione przy tab. 7.3

Tabela 7.4 Siły wrywające splot 7φ5 mm po odłączeniu ekstensometru (28 dni)

PRÓBKA	długość			siła wrywająca				
	L <sub>przed</sub>	L <sub>po</sub>	ΔL	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>1</sub> /F <sub>2</sub>	Δ(F <sub>2</sub> - F <sub>1</sub> )	
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	%	[kN]	%
8_7φ5_28d_2	94	87	7	62,92	63,0	99,9	0,1	0,1
8_7φ5_28d_3	95	83	12	52,82	53,0	99,7	0,2	0,3
8_7φ5_28d_1a	100	77	23	50,20	51,0	98,4	0,8	1,6
8_7φ5_28d_2a	98	86	12	64,09	65,0	98,6	0,9	1,4
12_7φ5_28d_1	97	76	21	97,02	97,0	100,0	0,0	0,0
12_7φ5_28d_2	100	80	20	87,87	88,0	99,9	0,1	0,1
12_7φ5_28d_3	103	88	15	99,16	99,2	100,0	0,0	0,0
12_7φ5_28d_4	99	78	21	95,46	105,0	90,9	9,5	10,0
24_7φ5_28d_1	100	84	16	171,56	173,0	99,2	1,4	0,8
24_7φ5_28d_2	100	83	17	175,26	176,0	99,6	0,7	0,4
24_7φ5_28d_3	100	86	14	168,82	169,0	99,9	0,2	0,1
24_7φ5_28d_4	99	85	14	204,16	204,2	100,0	0,0	0,0
33_7φ5_28d_1	99	84	15	231,42	232,0	99,8	0,6	0,3
33_7φ5_28d_2	100	82	18	234,30	235,0	99,7	0,7	0,3
33_7φ5_28d_3	101	84	17	226,07	227,0	99,6	0,9	0,4
33_7φ5_28d_4	101	83	18	226,10	226,1	100,0	0,0	0,0
46_7φ5_28d_1	97	75	22	254,93	268,0	95,1	13,1	5,1
46_7φ5_28d_2	99	97	2	258,15	271,0	95,3	12,9	5,0
46_7φ5_28d_3	97	94	3	255,50	268,0	95,3	12,5	4,9
46_7φ5_28d_4	101	92	9	257,66	258,0	99,9	0,3	0,1

Średnia wartość siły wyciągającej, przy której przerwano proces badawczy na próbkach o długości czynnej 460 mm po 28 dniach dojrzewania betonu wynosi 256,56 kN, co stanowi 0,9 wartości siły zrywającej splot 7φ5 mm (285,65 kN - tab. 5.8). Średnia wartość rzeczywista sił wrywających splot wynosi 266,25 kN, co stanowi 0,93 siły zrywającej.

## 7.2 Badania przyczepności BWW do splotów ze wstępnym naciągiem

Wpływ sprężenia na przyczepność betonu do cięgien sprężających znany jest od dawna i opisywany w literaturze jako efekt Hoyera. Naprężenia przyczepności mają istotny wpływ na wartość długości transmisji, co w efekcie związane jest z nośnością elementu w strefach przekazywania siły sprężającej. Wyznaczenie przyczepności betonu do splotów poddanych wstępnemu naciągowi jest bardziej istotne niż określenie jej na nienaciągniętych splotach, chociaż kwestia porównania obu wartości pozwala lepiej określić powstałe różnice.

Ze względu na charakter pracy splotów, które przeznaczone są do stosowania ich w celu sprężenia betonu, istotny jest wpływ tego sprężenia na określenie przyczepności cięgien sprężających do betonu. Po zakończeniu badań prowadzonych na próbkach ze splotami bez wstępnego naciągu i określających przyczepność betonu do splotów w tych warunkach, podjęte zostały badania na próbkach ze wstępnym naciągiem splotu. W Laboratorium Instytutu został zaprojektowany i utworzony tor naciągowy, na którym wykonano próbki przeznaczone do testów pull-out.

### 7.2.1 Sploty

Do badań ze wstępnym naciągiem przeznaczone zostały jedynie sploty 7φ5 mm o drutach okrągłych zarówno w badaniach wstępnych jak i zasadniczych. Z uwagi na możliwości przeprowadzania badań w Instytucie Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej (istnieje kompleksowy system do naciągu splotów 7φ5 mm) jak również ocenę współpracy BWW z aktualnie najsilniejszymi splotami, badania doświadczalne ograniczone zostały tylko do splotów 7φ5 mm okrągłych. Ponadto w badaniach długości transmisji przewidziano zastosowanie zacisków plastycznych i zakotwień śrubowych od strony biernej na torze naciągowym, których wykonanie jest tylko możliwe (specjalna prasa hydrauliczna zaciskowa) na splotach 7φ5 mm.

### 7.2.2 Przyjęcie czynnej długości przyczepności

We wstępnych badaniach przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm pod naciągiem, traktowanych jako rozpoznawcze w celu dokonania oceny skuteczności przeprowadzenia badań na torze naciągowym zastosowano tylko dwa rodzaje próbek o długości czynnej 80 mm i 120 mm. Oznaczało to wykonanie próbek badawczych o zewnętrznych wymiarach 0,16 x 0,16 x 0,16 m rozmieszczonych na długości dwóch splotów naciągniętych na stanowisku badawczym. Porównanie otrzymanych wyników stwarzało możliwości ocenienia wpływu efektywnej długości przyczepności na naprężenia przyczepności betonu do splotów poddanych naciągowi, jak również odniesienie ich do wartości uzyskanych w badaniach bez wstępnego naciągu. W wyniku uzyskania pozytywnych rezultatów postanowiono przeprowadzić kompleksowe badania na próbkach o długościach czynnych 120, 240, 330 i 460 mm jakie zastosowano w badaniach zasadniczych w odniesieniu do splotów 7φ4 mm i 7φ5 mm bez naciągu.

### 7.2.3 Element badawczy

Do wykonania wszystkich próbek zastosowano formy indywidualne ze sklejki przedstawione na rys. 7.30. Również tutaj długość czynna była regulowana jak w badaniach bez naciągu.

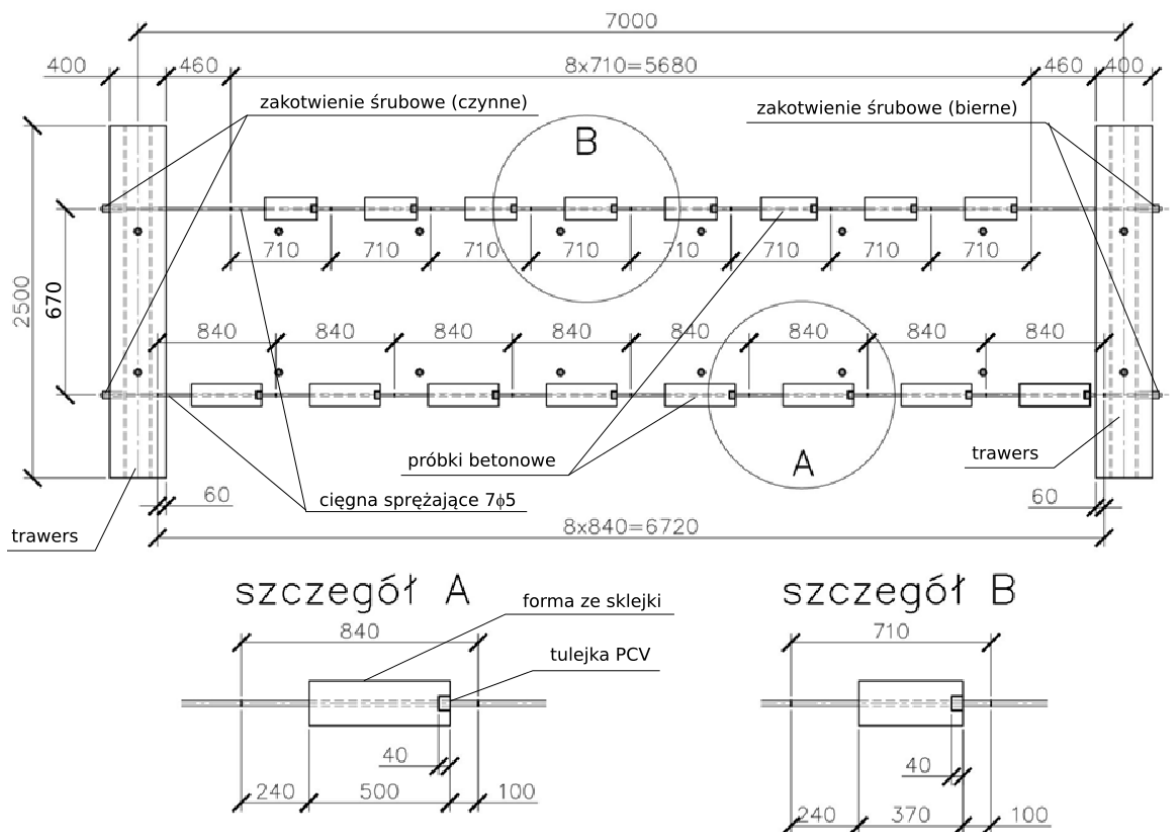




Rys. 7.30 Formy wykorzystane podczas wytwarzania próbek z widocznym splotem zaopatrzonym w tulejkę plastikową

#### 7.2.4 Wykonanie próbek i przeprowadzenie badań

W Zakładzie Konstrukcji Sprężonych L-14 zaprojektowano specjalne stanowisko odwzorujące tor naciągowy o możliwości zastosowania dwóch równoległych splotów, które przechodziły przez rząd próbek usytuowanych w odpowiedniej odległości zapewniającej po przecięciu możliwość wykonania testów pull-out. Dostępne w laboratorium stalowe trawersy zostały umieszczone w odległości 7,0 m i przytwierdzone za pomocą śrub montażowych na stendzie badawczym grubości 1 m. Nawiercone otwory w środkach trawersów w odległości 0,67 m określały rozstaw splotów sprężających w badaniach laboratoryjnych. Ze względu na ograniczoną liczbę form będących do dyspozycji i elementów, które mogły się zmieścić między trawersami na splocie, wykonano pod naciągiem pięć betonowań o różnej kombinacji elementów badawczych. Na rys. 7.31 przedstawiono projekt toru naciągowego z przykładowym zestawem próbek.



Rys. 7.31 Projekt stanowiska badawczego ze szczegółami A i B

Przed przeciągnięciem splotów na torze naciągowym zostały na biernym końcu splotu wykonane zaciski plastyczne, a po przeciągnięciu splotów na drugim końcu założono zakotwienie szczękowe. Naciąg zrealizowano jednostronnie agregatem ciśnieniowym typu Paul, a przyłożona siła kontrolowana była w sposób ciągły na monitorze komputera podpiętego do siłomierza usytuowanego na końcu czynnym.

Sploty były umieszczone na takiej wysokości aby między warstwą poślizgową (2 warstwy folii na betonie) a dolną powierzchnią formy występował luz 1 - 2 mm zapewniający swobodę przemieszczeń próbek w chwili zwalniania naciągu. W celu eliminacji obrotu form między warstwą poślizgową a spodem formy umieszczano podkładki dystansowe na obu końcach próbki.

Po zrealizowaniu naciągu sprawdzono odległości między elementami badawczymi oraz skontrolowano efektywną długość przyczepności (lokalizacja tulejki), po czym przestrzeń między tulejką a splotem wewnątrz formy wypełniono konopnym sznurkiem, a wejście do tulejki dodatkowo wypełniono masą silikonową w celu zabezpieczenia przed wniknięciem mleczka cementowego, co mogłoby mieć wpływ na wyniki badań. Otwory formy również zabezpieczono masą silikonową przed wypłynięciem mleczka. Wszystkie tulejki w formach były usytuowane przy krawędzi od strony pras naciągowych. Zwolnienie naciągu po 20 godzinach dojrzewania betonu realizowano od strony zakotwień biernych, dzięki którym (obecność zacisków plastycznych w zakotwieniach śrubowych) możliwe było stopniowe zwalnianie naciągu. Wślizg splotu następował bezpośrednio do betonu.



Rys. 7.32 Przygotowane formy do betonowania w fazie I

Przygotowanie mieszanki betonowej o składzie jak w poprzednich badaniach na próbkach ze splotami bez naciągu wstępnego odbywało się w zamkniętym pomieszczeniu laboratorium L-18 w mieszalniku o poziomym bębnie przy podawaniu składników od góry. Po dokładnym ich wymieszaniu beton został przewieziony do halę i starannie ułożony w formach. Zagęszczony wibratorem wgłębnym beton, pokryty foliami i sukniem w celu zapewnienia odpowiednich warunków dojrzewania, pozostał do następnego dnia (rys. 7.34). Zagęszczanie mieszanki betonowej realizowano w identyczny sposób jak w przypadku próbek wykonywanych ze splotami bez naciągu.



Rys. 7.33 Przygotowane formy do betonowania w fazie II



Rys. 7.34 Tor naciągowy po betonowaniu (na pierwszym planie i w głębi widać próbki przygotowane do badań)

Następnego dnia po 20 godzinach od chwili ukończenia betonowania nastąpiło zwolnienie naciągu, przecięcie splotów w oznakowanych miejscach, rozformowanie i przygotowanie próbek do testów pull-out, po uprzednich pomiarach temperatury oraz dokładnym oznakowaniu uwzględniającym czynną długość przyczepności i położenie próbki w czasie betonowania. Odległość elementu od czynnego końca mogła mieć wpływ na kształtowanie się przyczepności betonu do splotów sprężających, co również należało przeanalizować przy interpretacji wyników badań. Próbki przeznaczone do badań w późniejszym czasie składowano wewnątrz hali zapewniając niezmiennie warunki dojrzewania betonu okrytego folią.





Rys. 7.35 Próbki po betonowaniu następnego dnia, przed zwolnieniem naciągu



Rys. 7.36 Przecinanie splotów

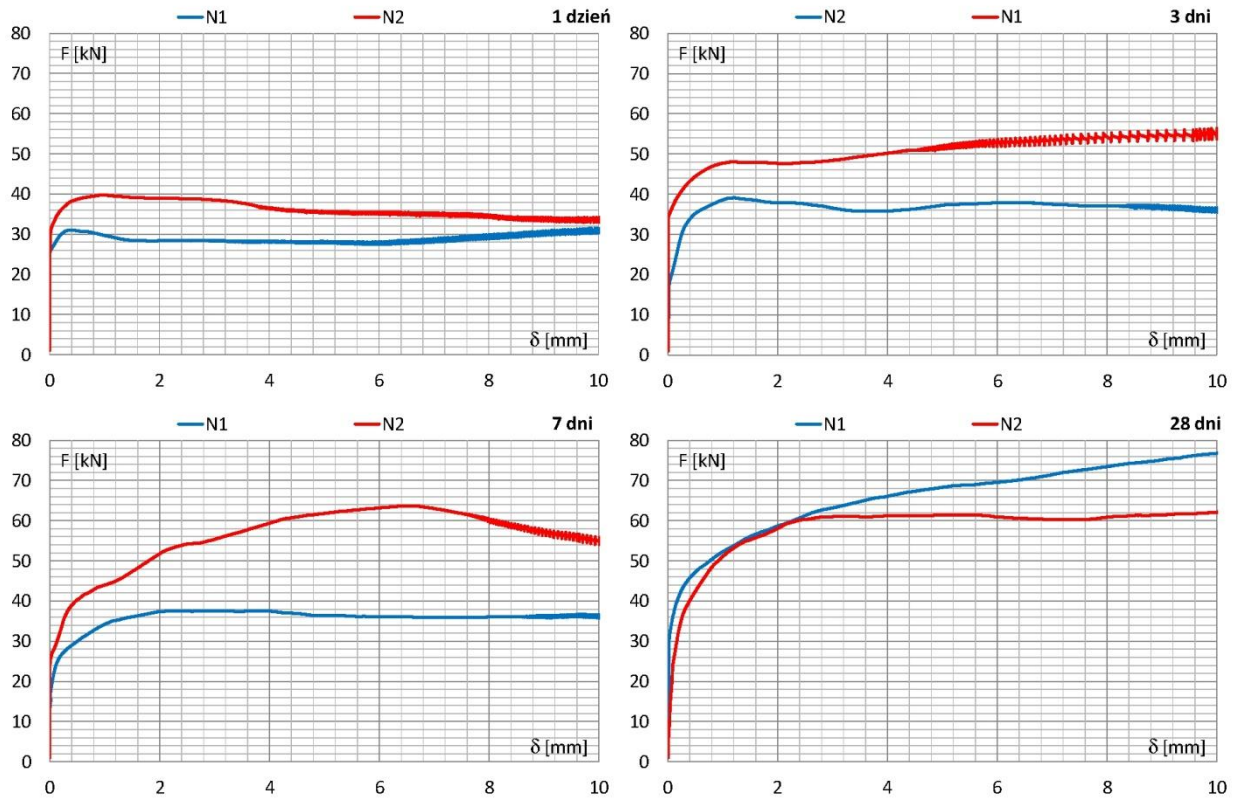
Przygotowanie elementów do badań i testy pull-out przeprowadzono w identyczny sposób jak w przypadku elementów ze splotami bez wstępnego naciągu.

### 7.2.5 Wyniki badań

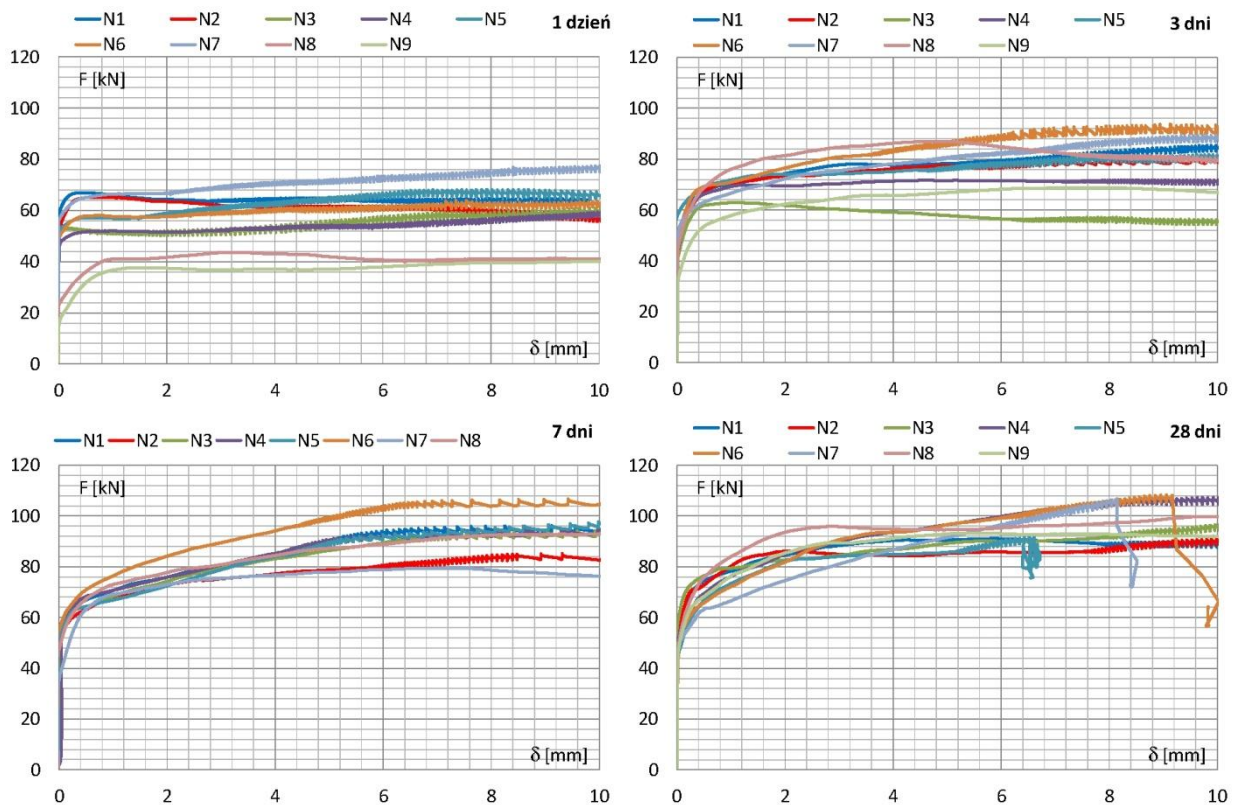
W tabeli 7.5 podano liczbę próbek przebadanych w fazie wstępnej oraz zasadniczej. Ogółem przebadano 104 próbki.

Przebieg badania pull-out przeprowadzono w identyczny sposób jak w przypadku próbek zawierających sploty  $7\phi 5$  mm zamknięte, który został omówiony wcześniej. Również w tym przypadku obowiązywała zasada prowadzenia badań do osiągnięcia poślizgu 10 mm, po czym przerywano wyciąganie splotu z bloczku betonowego. Poniżej przedstawiono wykresy zależności siła wyciągająca - poślizg dla kolejnych dni pomiarowych pogrupowanych w zależności od długości efektywnej splotu. Wszystkie otrzymane wyniki opracowano analogicznie jak w przypadku splotów bez wstępnego naciągu.

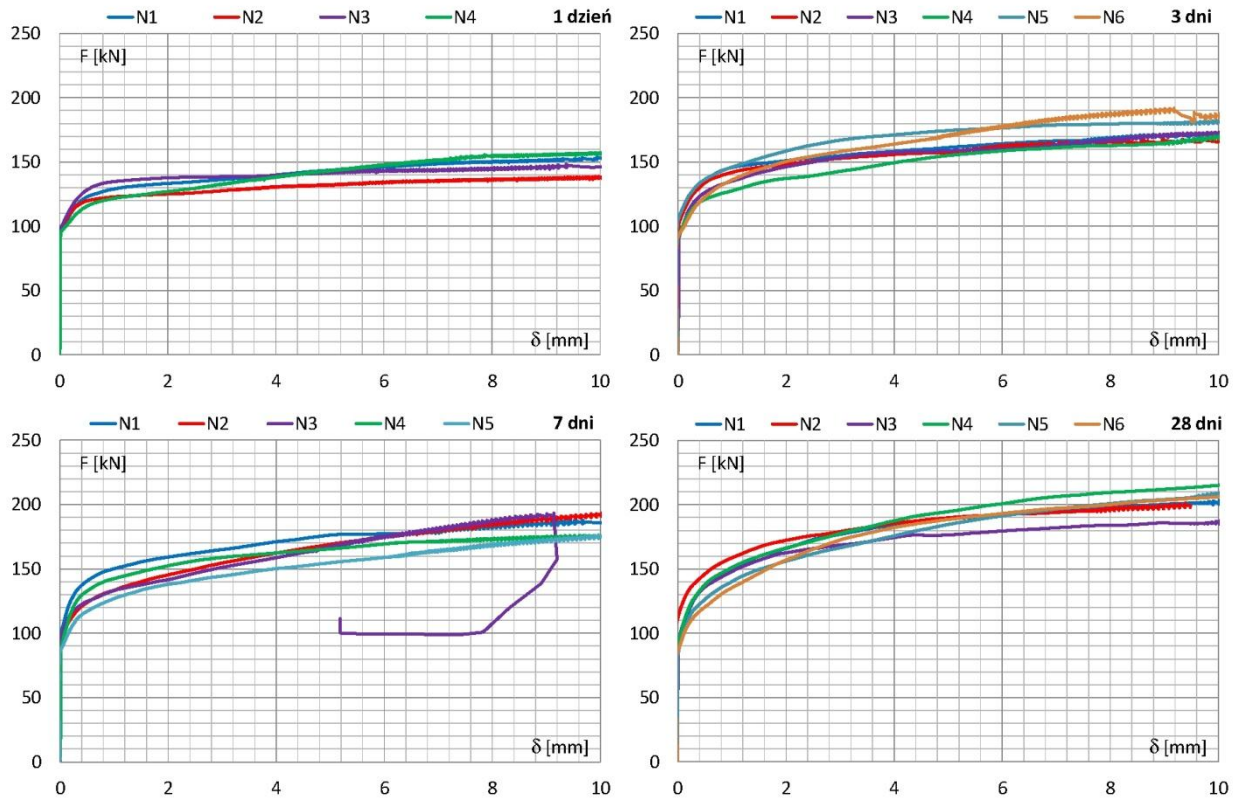




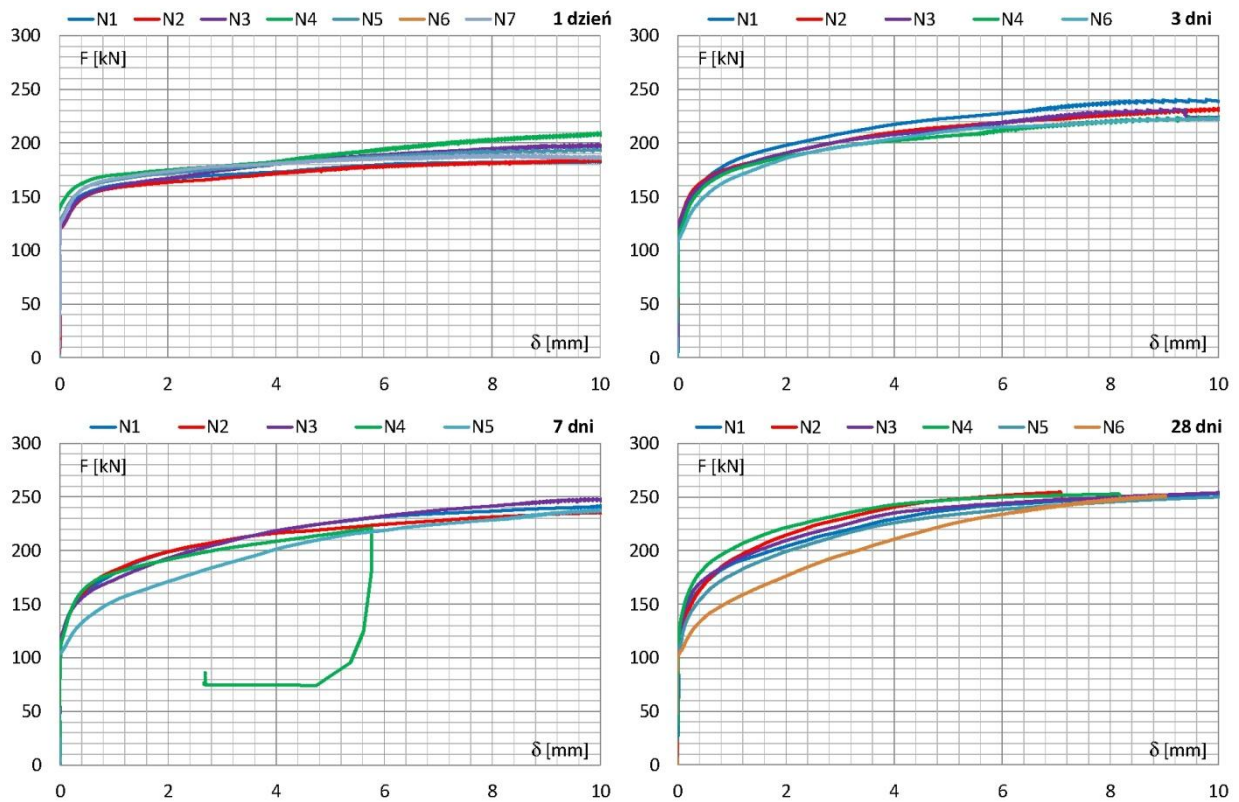
Rys. 7.36 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7 $\phi$ 5 mm okrągłych, o długości czynnej 80 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni pod naciągiem



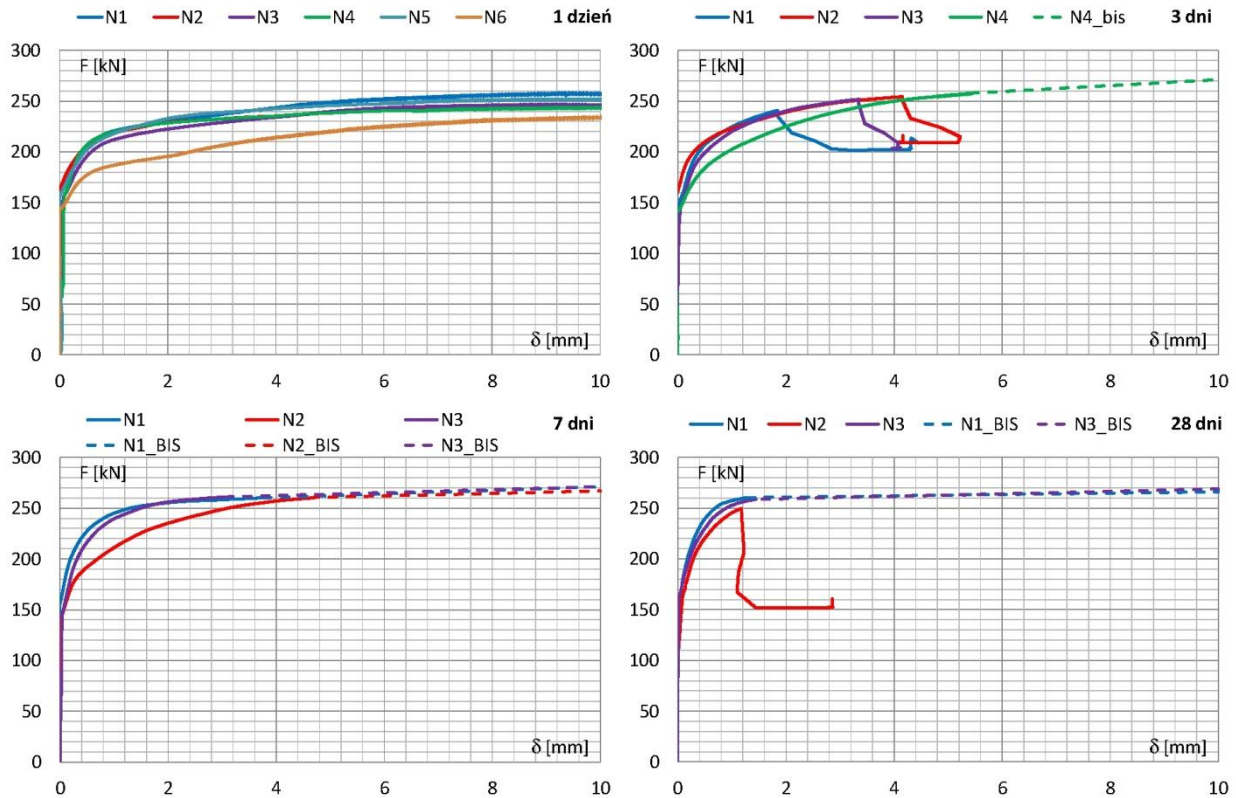
Rys. 7.37 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7 $\phi$ 5 mm okrągłych, o długości czynnej 120 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni pod naciągiem



Rys. 7.38 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów  $7\phi 5$  mm okrągłych, o długości czynnej 240 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni pod nacięciem



Rys. 7.39 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów  $7\phi 5$  mm okrągłych, o długości czynnej 330 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni pod nacięciem



Rys. 7.40 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7φ5 mm okrągłych, o długości czynnej 460 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni pod naciągiem

Tabela 7.5 Liczba przebadanych próbek pod naciągiem

L <sub>ef</sub> [mm]	wiek betonu								suma
	24		3d		7d		28d		
	faza I	faza II	faza I	faza II	faza I	faza II	faza I	faza II	
80	2	-	2	-	2	-	2	-	8
120	2	7	2	7	2	6	2	7	35
240	-	4	-	6	-	5	-	6	21
330	-	7	-	6	-	5	-	6	24
460	-	6	-	4	-	3	-	3	16
faza I/faza II	4	24	4	23	4	19	4	22	104
suma	28		27		23		26		104

W przypadku próbek o długości czynnej 240 mm i wyższych obserwuje się szybki wzrost siły wyciągającej przy bardzo małych poślizgach splotu. Wykresy dla tych trzech długości są bardzo zwarte. Po stosunkowo szybkim wzroście siły wyciągającej obserwuje się wolniejszy jej przyrost w miarę wzrostu poślizgu. W przypadku próbek o czynnej długości 330 mm badanych po 7 i 28 dniach wartość siły wyciągającej osiągała 250 kN, co powodowało konieczność wyłączenie ekstensometru.

W przypadku próbek o długości czynnej splotu 460 mm pełny cykl pomiarowy udało się zrealizować tylko po pierwszym dniu dojrzewania betonu, kiedy wartość maksymalnej siły wyciągającej wynosiła 258,1 kN. Po 3 dniach dojrzewania betonu siła wyciągająca osiągnęła wartość 250 kN już przy poślizgu splotu około 3 mm. W przypadku pozostałych trzech badanych próbek nastąpiło zerwanie drutu w oplocie zewnętrznym, natomiast badanie próbki 4 wstrzymano odłączając ekstensomert przy sile 257,75 kN. W próbkach badanych po 7 dniach dojrzewania betonu wartość siły wyciągającej na poziomie 250 kN osiągnięto już w 2 przypadkach przy poślizgu 1,5 mm, a w trzeciej próbce w przy poślizgu 4 mm.

Po odłączeniu ekstensometrów badania kontynuowano. Trzy elementy przebadano również po 28 dniach dojrzewania betonu. Przy obciążeniu próbki nastąpił gwałtowny wzrost siły wyciągającej. W przypadku próbek 1 i 3 po osiągnięciu wartości 260 kN przy poślizgu około 1 mm odłączono ekstensometry. Rzeczywiste wartości siły wyciągającej podano w tabeli 7.5. Badanie drugiej próbki przerwano z uwagi na zerwanie drutu z oplotu zewnętrznego przy sile około 250 kN.

Średnia wartość siły wrywającej, przy której przerwano proces badawczy na próbkach o długości czynnej 460 mm po 28 dniach dojrzewania betonu wynosi 256,22 kN, co stanowi 0,9 wartości siły zrywającej splot 7φ5 mm (285,63 kN - tab.5.8). Średnia wartość rzeczywista sił wrywających splot 7φ5 mm wynosi 267,5 kN, co stanowi 0,94 siły zrywającej.

Tabela 7.6 Siły wrywające splot 7φ5 mm pod naciągiem po odłączeniu ekstensometru (28 dni)

PRÓBKA 28d	długość			siła wrywająca				
	L <sub>przed</sub>	L <sub>po</sub>	ΔL	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>1</sub> /F <sub>2</sub>	Δ(F <sub>2</sub> -F <sub>1</sub> )	
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	%	[kN]	%
N_12_7φ5_3d_3	118	106	12	91,10	91,1	100,0	0,0	0,0
N_12_7φ5_3d_4	120	110	10	91,06	91,1	100,0	0,0	0,0
N_12_7φ5_3d_5	131	110	21	96,79	96,8	100,0	0,0	0,0
N_12_7φ5_3d_3	117	105	12	107,26	107,0	100,2	-0,3	-0,2
N_12_7φ5_3d_4	109	98	11	92,02	-	-	-	-
N_12_7φ5_3d_5	106	95	11	108,22	-	-	-	-
N_12_7φ5_3d_6	102	94	8	106,69	-	-	-	-
N_24_7φ5_7d_1	179	165	14	203,51	203,5	100,0	0,0	0,0
N_24_7φ5_7d_2	118	103	15	200,68	-	-	-	-
N_24_7φ5_7d_3	180	167	13	187,48	187,5	100,0	0,0	0,0
N_24_7φ5_7d_4	182	162	20	215,48	228,0	94,5	12,5	5,8
N_24_7φ5_7d_3	137	121	16	211,06	211,0	100,0	-0,1	0,0
N_24_7φ5_7d_4	159	141	18	206,50	206,0	100,2	-0,5	-0,2
N_33_7φ5_7d_1	116	95	21	253,09	262,0	96,6	8,9	3,5
N_33_7φ5_7d_2	138	129	9	254,59	265,0	96,1	10,4	4,1
N_33_7φ5_7d_3	100	80	20	254,16	258,0	98,5	3,8	1,5
N_33_7φ5_7d_4	140	116	24	252,92	260,0	97,3	7,1	2,8
N_33_7φ5_7d_1	92	72	20	250,05	258,0	96,9	7,9	3,2
N_33_7φ5_7d_4	148	131	17	251,49	-	-	-	-
N_46_7φ5_7d_2	113	105	8	260,25	266,0	97,8	5,8	2,2
N_46_7φ5_7d_3	151	148	3	249,63	-	-	-	-
N_46_7φ5_7d_3	167	158	9	258,80	269,0	96,2	10,2	3,9

## 8 Analiza wyników badań przyczepności

### 8.1 Uwagi wstępne

Ze względu na zależność długości transmisji sił sprężających od przyczepności betonu do stali sprężającej, dokładna analiza przyczepności musi poprzedzać rozważania nad transferem sprężenia. Uzyskane w badaniach wyniki poddano wieloaspektowej analizie, po wcześniejszym przyjęciu założeń dotyczących modelu badań i wyznaczania naprężeń przyczepności.

### 8.2 Założenia

#### 8.2.1 Założenia wynikające ze stosowanej metodyki badań

Testy pull-out są najbardziej rozpowszechnioną metodą badania przyczepności betonu do stalowych prętów zbrojeniowych i zalecaną przez RILEM [N11], tym nie mniej zjawisko przyczepności w modelu eksperymentalnym przebiega inaczej niż w rzeczywistym elemencie. Dotyczy to zwłaszcza charakteru pracy otaczającego splot betonu, który w modelu badawczym poddany jest ścisnaniu, co odbiega od rzeczywistych warunków. Nieprawidłowe odwzorowanie strefy rozciąganej występującej w elemencie rzeczywistym przekłada się na konsekwencje uzyskiwane w ramach wyników badań. Powstanie i rozwój rys ma inny przebieg w ściskanym betonie wpływającym krępująco na zarysowanie, co powoduje naruszenie schematu poszczególnych mechanizmów zachowania się przyczepności. W obrębie przyjętych ograniczeń i zaburzeń mechanizmów przyczepności, porównanie wyników dla poszczególnych przypadków jest jednak możliwe.

#### 8.2.2 Wyznaczenie naprężeń przyczepności

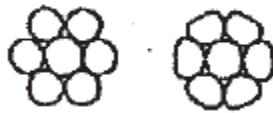
W sposób jednoznaczny można wyznaczyć naprężenia przyczepności tylko dla prętów (drutów) gładkich. Umowne naprężenia przyczepności można wyznaczyć również pośrednio wykorzystując wartość siły wyciągającej i dzieląc ją przez odpowiednią powierzchnię przyczepności, której ustalenie nie jest sprawą łatwą. Przyjęcie modelu badawczego RILEM [N11] pozwala założyć, że zmiany odkształceń w stali wzdłuż osi splotu są liniowe, a wartość naprężeń przyczepności jest stała i można ją wyznaczyć z zależności:

$$\tau = \frac{F}{\pi \phi l}, \quad (8.1)$$

gdzie:  $F$  – siła działająca na splot,  
 $\phi$  – średnica splotu,  
 $l$  – długość odcinka przyczepności.



W przypadku splotu (ciągna sprężającego) złożonego z kilku pojedynczych drutów (rys. 8.1) zachodzi pytanie, co przyjąć jako średnicę splotu. Przyjęcie średnicy okręgu opisanego na splocie zaniżałoby obwód czynny splotu zwłaszcza w splotach otwartych z drutami okrągłymi, a z kolei uwzględnienie w całości krzywizny koła między punktami styczności zewnętrznych drutów nasuwa wątpliwości, czy takie założenie jest uprawnione.



Rys. 8.1 Przekrój splotu otwartego i zamkniętego

W aktualnych normach [N10] brakuje odpowiednich regulacji. Problem ten znalazł rozwiązanie w pracy [158]. W wyniku przeprowadzonych badań doświadczalnych określono efektywnie czynny obwód przyczepności przy dowolnej liczbie drutów w splocie. Jako wynik przeprowadzonych badań został zaproponowany uproszczony wzór na czynny obwód przyczepności:

$$u_p = 1,6 \cdot \pi \cdot \sqrt{A_p} \quad (8.2)$$

gdzie:  $u_p$  = czynny obwód przyczepności  
 $A_p$  = pole powierzchni splotu

Tabela 8.1 Cechy geometryczne splotów

cechy geometryczne			sploty					
cecha	symbol	jednostka	7 $\phi$ 4 mm		7 $\phi$ 5 mm			
					okrągłe		zamknięte	
pole powierzchni	$A_p$	[mm <sup>2</sup> ]	100		150		165	
średnica	$d_p$	[mm]	12,9		15,7		15,2	
powierzchnia ścinanego betonu	$A_c$	[mm <sup>2</sup> ]						
			obwód	stosunek	obwód	stosunek	obwód	stosunek
obwód zastępczy ( $u = \pi d$ )	$u_\phi$	[mm]	40,5	1,00	49,3	1,00	47,8	1,00
obwód czynny wg DIN	$u_{DIN}$	[mm]	50,3	1,24	61,6	1,25	64,6	1,35
obwód rzeczywisty	$u_p$	[mm]	53,4	1,32	65,34	1,33	52,9	1,11
			odwrotność obwodu	stosunek	odwrotność obwodu	stosunek	odwrotność obwodu	stosunek
naprężenia przyczepności	$\tau_\phi$	[MPa]	1/40,5	1,00	1/49,3	1,00	1/47,8	1,00
naprężenia przyczepności	$\tau_{DIN}$	[MPa]	1/50,27	0,81	1/61,56	0,80	1/64,56	0,74
naprężenia przyczepności	$\tau_p$	[MPa]	1/53,4	0,76	1/65,34	0,75	1/52,9	0,90

Analityczne wyznaczenie długości obwodu figury geometrycznej złożonej z sześciu łuków potwierdza zachowawczy charakter wzoru (8.2) w stosunku do splotu otwartego, jednak w przypadku splotu zamkniętego czynny obwód zostaje zawyżony. Tabela 8.1 zawiera cechy geometryczne poszczególnych splotów ze szczególnym uwzględnieniem możliwych do przyjęcia obwodów i relacji między nimi jak również relacji między naprężeniami przyczepności wyznaczonymi na podstawie tych obwodów przyjmując jako wyjściowy obwód zastępczy  $\tau_\phi$  zdefiniowany jako opisany na splocie. Ze względu na liniowość, naprężenia przyczepności wyznaczone dla obwodu rzeczywistego zmniejszają się w stosunku do naprężeń przy obwodach zastępczych dla splotów 7 $\phi$ 4 mm, 7 $\phi$ 5 mm okrągłych i 7 $\phi$ 5 mm zamkniętych odpowiednio o współczynnik 0,76; 0,75 i 0,9.

### 8.2.3 Przyjęte w analizie progi poślizgu

Z wyznaczonych na podstawie testów pull-out zależności siła wyciągająca - poślizg zostały obliczone naprężenia przyczepności. W celu opisanego zachowania się przyczepności w zależności od poślizgu przyjęto siedem poziomów porównawczych (odniesienia). Ze względu na definicje utraty przyczepności pierwotnej przyjęto jej trzy wartości 0,01 mm [134], 0,0254 mm [31] oraz 0,1 mm [45, 46]. Ze względu na prowadzone badania do wartości poślizgu 10 mm, dla której niejednokrotnie osiągnęte są wartości maksymalne sił wyciągających, uznano tę wartość również za charakterystyczną. Za pośrednie wartości uznano 0,254 mm; 1,0 mm oraz 2,54 mm (1 cal). Odczytane z wykresów wartości sił wyciągających i odpowiadające im wartości naprężeń przyczepności zestawiono w tabelach i naniesiono na wykresy.

### 8.3 Wyznaczenie naprężeń przyczepności

Na podstawie otrzymanych z badań wykresów zależności siła wyciągająca - poślizg dla konkretnego przypadku pojedynczej próbki w kolejnych dniach pomiarowych, odczytano wartość siły w przyjętych do analizy siedmiu poziomach poślizgu betonu względem splotu i obliczono naprężenia przyczepności stosując obwód zastępczy (tab. 8.1). Analiza uzyskanych naprężeń przyczepności betonu do splotów przebiegała dwutorowo: z uwagi na wiek betonu i efektywną długość przyczepności.

Sporządzone na tej podstawie wykresy sił dla splotów 7φ4 mm, 7φ5 mm okrągłych bez naciągu i 7φ5 mm okrągłych z naciągiem, zestawiono w Załączniku E uwzględniając wpływ obydwóch czynników. Z uzyskanych wartości średnich sił wyciągających obliczono naprężenia przyczepności betonu do splotów oraz sporządzono wykresy zależności naprężeń w funkcji wieku betonu i efektywnej (czynnej) długości przyczepności. W następnych trzech punktach pracy zestawiono naprężenia przyczepności odpowiednio dla splotów 7φ4 mm, 7φ5 mm okrągłych bez naciągu i 7φ5 mm okrągłych z uwzględnieniem naciągu.

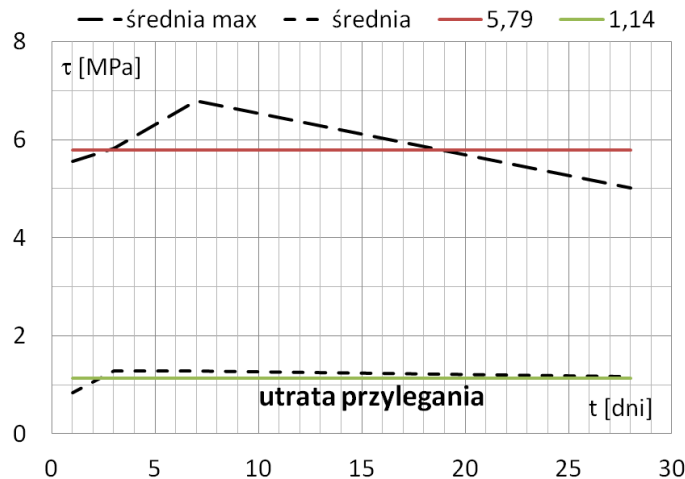
Wykresy nie mają ujednoczonej skali (zwłaszcza sił, mniej naprężeń przyczepności) w obrębie jednego rysunku z uwagi na znaczne różnice występujące między pierwszym a ostatnim, a wykonywane próby ujednoczenia "wypłaszczały" wykresy i czyniły je nieczytelnymi. Zestawiając rozkłady parami (lewa - prawa strona) starano się przynajmniej w tym małym zakresie o taką samą skalę.

#### 8.3.1 Naprężenia przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm zamkniętych

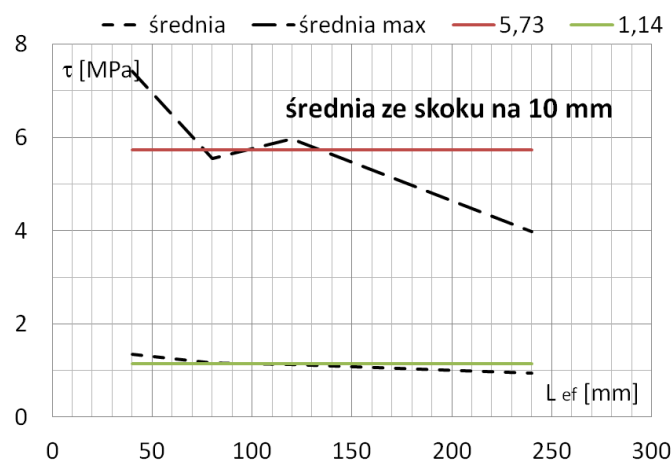
W punkcie 7.1.2 niniejszej pracy przedstawiono wyniki otrzymane z badań doświadczalnych przeprowadzonych na splotach 7φ5 mm zamkniętych dla efektywnych długości przyczepności 40, 80, 120 i 240 mm. Przyjmując wartości sił wyciągających przy poślizgu 0,1 i 10 mm oraz zastępczą średnicę splotu, obliczono naprężenie przyczepności BWW do splotu w kolejnych okresach badawczych dla realizowanych efektywnych długości przyczepności. Naprężenia przyczepności dla poślizgu 0,1 mm nazwano, z uwagi na charakter wykresu, naprężeniami przylegania, natomiast dla poślizgu 10 mm - naprężeniami przyczepności wyznaczonymi ze średniej wartości obu sił (górną i dolną wartość skoku ekstensometru).

Na rysunku 8.2 przedstawiono rozkłady średnich wartości naprężenia przylegania oraz naprężenia przyczepności, wyznaczone dla wszystkich badanych próbek, w zależności od wieku betonu. Obliczona średnia wartość naprężenia przylegania w okresie 1 - 28 dni wynosi 1,14 MPa przy współczynniku zmienności 16,25%. Naprężenie przyczepności zależy od przyjętej do obliczeń wartości poślizgu splotu. W analizowanym przypadku (10 mm) otrzymano średnią wartość naprężeń przyczepności równą 5,79 MPa przy współczynniku zmienności 11,11%.

Na rysunku 8.3 przedstawiono rozkłady średnich wartości naprężenia przylegania oraz naprężenia przyczepności wyznaczone dla wszystkich badanych próbek, w zależności od efektywnej długości przyczepności. Obliczona średnia wartość naprężenia przylegania wynosi również 1,14 MPa, ale przy współczynniku zmienności 12,51%. Średnia wartość naprężenia przyczepności wynosi 5,73 MPa przy współczynniku zmienności 21,38%.



Rys. 8.2 Rozkłady średnich wartości naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm zamkniętych bez naciągu w funkcji czasu



Rys. 8.3 Rozkłady średnich wartości naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm zamkniętych bez naciągu w funkcji efektywnej długości przyczepności

### 8.3.2 Naprężenia przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm bez naciągu

Tabela 8.2 zawiera wartości średnich naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm dla poszczególnych efektywnych długości przyczepności w kolejnych dniach pomiarowych z podaniem współczynnika zmienności.

#### 8.3.2.1 Naprężenia przyczepności w funkcji wieku betonu

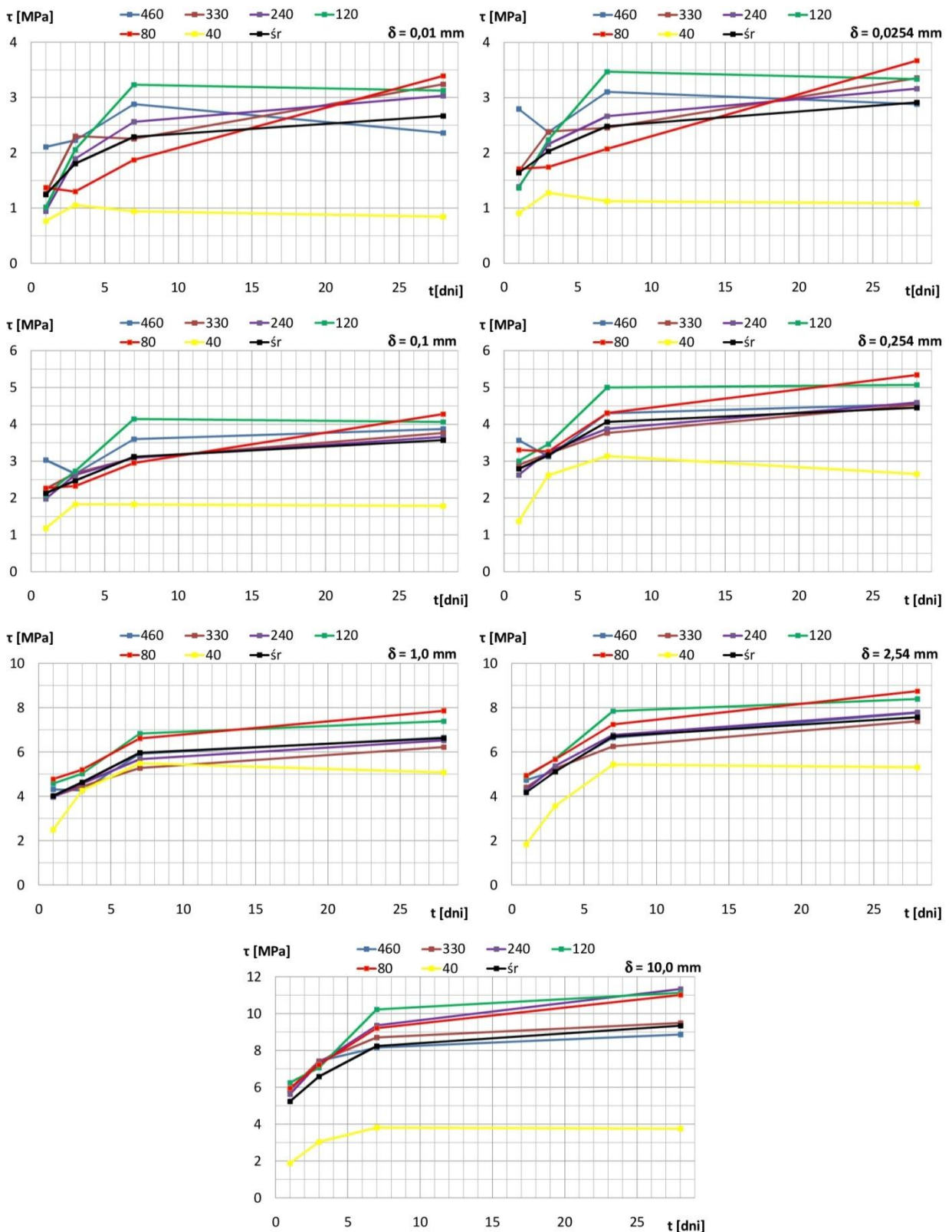
W Załączniku E przedstawiono przebieg wartości sił wyciągających na poszczególnych poziomach poślizgu dla wszystkich czynnych długości przyczepności w funkcji wieku betonu (rys. E.1). Na każdym wykresie wyznaczono średnią, które zebrano na rys. E.2 i zamieszczono również na rys. 8.4. Wartości z 1, 3 i 7 dnia pomiarowego charakteryzują się relatywnie szybszym wzrostem na poszczególnych poziomach, przy średnim wzroście z około 30 kN po 1 dniu na około 40 kN po 7 dni, po czym następuje



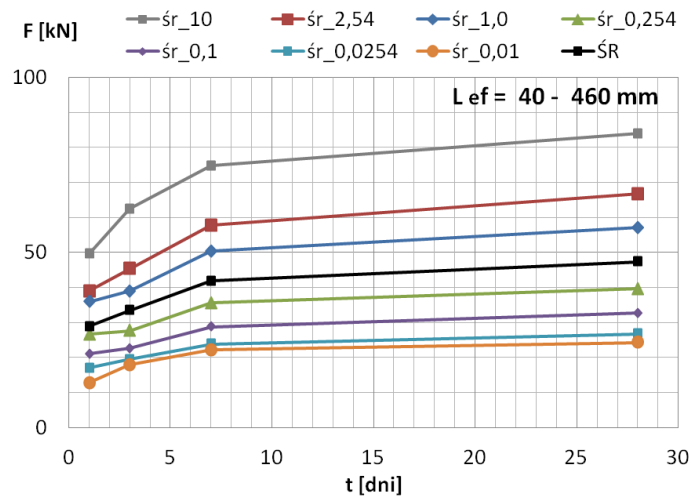
względnie powolniejszy przyrost do średniej wartości nie przekraczającej 50 kN i maksymalnej równej około 85 kN dla efektywnej długości przyczepności 460 mm.

Tabela 8.2 Średnie naprężenia przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm w funkcji wieku betonu i poślizgu splotu

efektywna długość przyczepności $l_{ef}$ [mm]	wartości poślizgu $\delta$ [mm]	ŚREDNIE WARTOŚCI NAPRĘŻEŃ PRZYZCZEPNOŚCI [MPa]							
		1d		3d		7d		28d	
		$\tau$	$v$ [%]	$\tau$	$v$ [%]	$\tau$	$v$ [%]	$\tau$	$v$ [%]
40	0,01	0,77	12,94	1,06	5,97	0,94	24,34	0,85	5,63
	0,0254	0,91	21,57	1,28	4,33	1,12	26,84	1,09	7,08
	0,1	1,18	29,52	1,83	5,83	1,82	26,73	1,79	7,80
	0,254	1,38	25,06	2,62	1,33	3,14	27,21	2,65	9,44
	1	2,49	11,04	4,27	1,79	5,49	26,50	5,08	1,38
	2,54	1,84	6,29	3,57	8,68	5,43	27,47	5,32	0,18
	10	1,88	2,83	3,04	4,40	3,81	0,00	3,76	6,67
80	0,01	1,37	47,20	1,30	63,60	1,87	42,01	3,39	47,39
	0,0254	1,71	44,49	1,74	55,31	2,07	36,97	3,67	40,17
	0,1	2,28	37,16	2,32	50,09	2,95	19,75	4,28	35,06
	0,254	3,31	24,96	3,27	26,78	4,30	12,28	5,34	32,38
	1	4,78	16,00	5,20	15,85	6,61	8,20	7,85	20,51
	2,54	4,93	16,74	5,67	19,09	7,25	11,51	8,75	16,03
	10	5,96	19,91	7,24	29,35	9,22	20,08	11,02	15,98
120	0,01	1,02	47,58	2,06	22,95	3,23	29,52	3,12	26,65
	0,0254	1,37	35,29	2,24	22,41	3,47	24,33	3,34	23,27
	0,1	2,09	16,84	2,74	18,43	4,15	17,34	4,07	13,67
	0,254	3,01	15,45	3,46	16,09	5,00	12,81	5,08	12,02
	1	4,58	8,90	5,03	13,24	6,84	8,27	7,39	16,62
	2,54	4,88	6,41	5,69	13,99	7,85	10,72	8,39	18,27
	10	6,25	12,86	7,07	18,43	10,23	17,33	11,14	20,26
240	0,01	0,94	35,16	1,89	33,35	2,56	10,67	3,03	6,11
	0,0254	1,39	24,92	2,16	11,96	2,66	10,29	3,16	4,57
	0,1	1,98	17,63	2,63	10,11	3,09	11,09	3,66	2,17
	0,254	2,62	17,50	3,26	8,30	3,88	12,95	4,59	1,28
	1	3,97	20,17	4,58	6,02	5,68	18,80	6,52	3,39
	2,54	4,29	19,49	5,37	7,06	6,77	19,71	7,79	3,56
	10	5,63	21,44	7,33	8,82	9,37	15,61	11,34	7,68
330	0,01	1,26	44,18	2,30	13,27	2,25	36,89	3,24	6,23
	0,0254	1,67	20,27	2,39	12,59	2,46	33,27	3,35	6,37
	0,1	2,25	11,62	2,67	12,40	3,09	9,09	3,77	6,81
	0,254	2,90	12,42	3,21	15,01	3,77	8,71	4,53	7,61
	1	3,99	13,16	4,44	15,96	5,28	11,21	6,23	5,52
	2,54	4,41	11,62	5,26	11,16	6,26	13,13	7,39	6,39
	10	5,90	8,93	7,42	6,84	8,71	14,36	9,50	15,45
460	0,01	2,11	45,10	2,23	12,26	2,88	9,87	2,36	57,27
	0,0254	2,79	6,67	2,38	7,43	3,10	8,30	2,88	33,66
	0,1	3,03	5,96	2,66	9,67	3,60	7,31	3,87	12,15
	0,254	3,57	4,81	3,13	13,09	4,30	6,04	4,55	8,43
	1	4,31	8,35	4,27	16,75	5,93	6,57	6,66	6,65
	2,54	4,74	9,77	5,14	13,11	6,65	5,60	7,77	7,09
	10	5,85	15,67	7,43	8,03	8,16	3,37	8,87	8,09



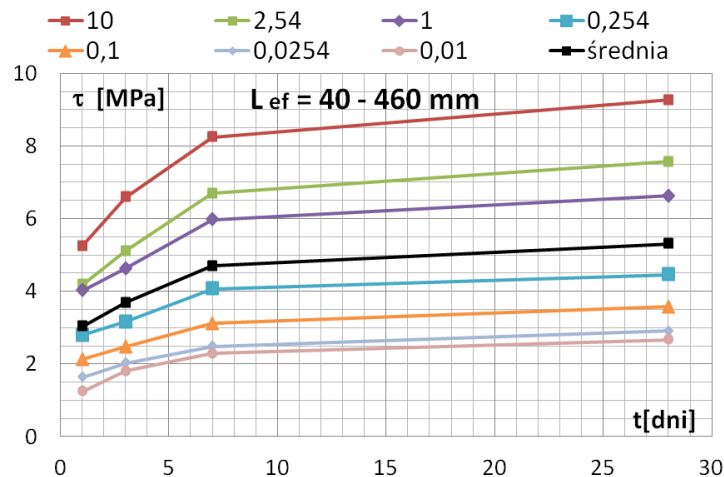
Rys. 8.5 Wykresy zależności naprężeń przyczepności BWW do splotu 7 $\phi$ 4 mm w funkcji wieku betonu dla poszczególnych poziomów poślizgu przy różnych czynnych długościach przyczepności



Rys. 8.4 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot  $7\phi 4$  mm od wieku betonu dla poszczególnych poziomów, przy różnych czynnych długościach przyczepności

Na rysunku 8.5 przedstawiono rozkłady średnich naprężeń obliczonych dla poszczególnych efektywnych długości przyczepności w funkcji wieku betonu na przyjętych poziomach poślizgu. Szczególny przyrost można zauważyć w pierwszych trzech dniach pomiarowych. Między 7 a 28 dniem następuje względna stabilizacja, za wyjątkiem próbek z czynną długością równą 80 mm, natomiast próbki o efektywnej długości 40 mm wykazują się najmniejszym naprężeniem przyczepności na wszystkich poziomach poślizgu i we wszystkich dniach pomiarowych.

Na każdym z wykresów na rys. 8.5 wyznaczono przebieg wartości średnich (czarna linia), które zebrano na rys. 8.6. Przebieg średnich z poszczególnych poziomów poślizgu charakteryzuje się początkowo relatywnie szybszym wzrostem do 7 dnia pomiarowego, po czym odnotowuje się łagodniejszy wzrost wartości, przy średnim naprężeniu przyczepności około 5 MPa.



Rys. 8.6 Wykresy zależności średnich naprężeń przyczepności BWW do splotów  $7\phi 4$  mm w funkcji wieku betonu dla poszczególnych poziomów poślizgu przy różnych czynnych długościach przyczepności

W tabeli 8.3 zestawiono średnie względne przyrosty naprężeń przyczepności BWW do splotu  $7\phi 4$  mm, dla różnych poziomów odniesienia (charakterystycznych).

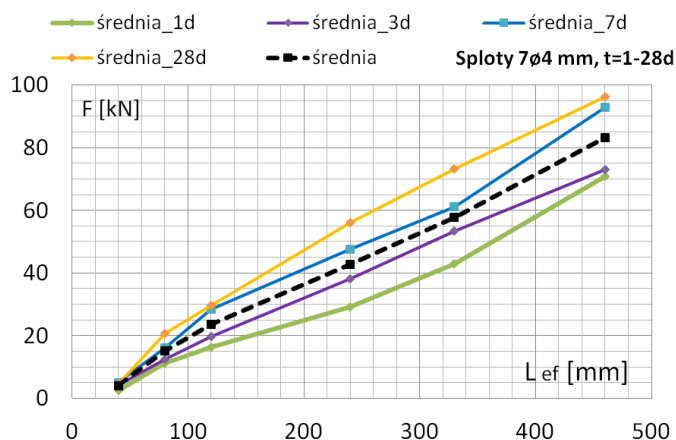
Tabela 8.3 Naprężenia przyczepności uzyskane dla splotów 7φ4 mm bez naciągu i ich względne przyrosty w funkcji wieku betonu

poślizg $\delta$ [mm]	naprężenia przyczepności $\tau$ [MPa]				przyrosty w stosunku do 28 dnia dla poszczególnych poziomów poślizgu				przyrosty w stosunku do 28 dnia dla poziomu poślizgu $\delta = 10$ mm			
	dni pomiarowe				dni pomiarowe				dni pomiarowe			
	1	3	7	28	1	3	7	28	1	3	7	28
0,01	1,24	1,81	2,29	2,67	0,47	0,68	0,86	1	0,13	0,19	0,24	0,29
0,0254	1,64	2,03	2,48	2,92	0,56	0,70	0,85	1	0,18	0,22	0,27	0,31
0,1	2,13	2,48	3,12	3,57	0,60	0,69	0,87	1	0,23	0,26	0,33	0,38
0,254	2,80	3,16	4,07	4,46	0,63	0,71	0,91	1	0,30	0,34	0,43	0,48
1	4,02	4,63	5,97	6,62	0,61	0,70	0,90	1	0,43	0,50	0,64	0,71
2,54	4,18	5,12	6,70	7,57	0,55	0,68	0,89	1	0,45	0,55	0,72	0,81
10	5,25	6,59	8,25	9,35	0,56	0,70	0,88	1	0,56	0,70	0,88	1
ŚREDNIA	3,04	3,69	4,70	5,31	0,58	0,70	0,88	1,00	-	-	-	-
s	1,25	1,59	2,05	2,29	0,03	0,01	0,02	0,00	-	-	-	-
v [%]	41,31	43,26	43,55	43,17	4,73	1,49	2,22	0,00	-	-	-	-

### 8.3.2.2 Naprężenia przyczepności w funkcji efektywnej długości przyczepności

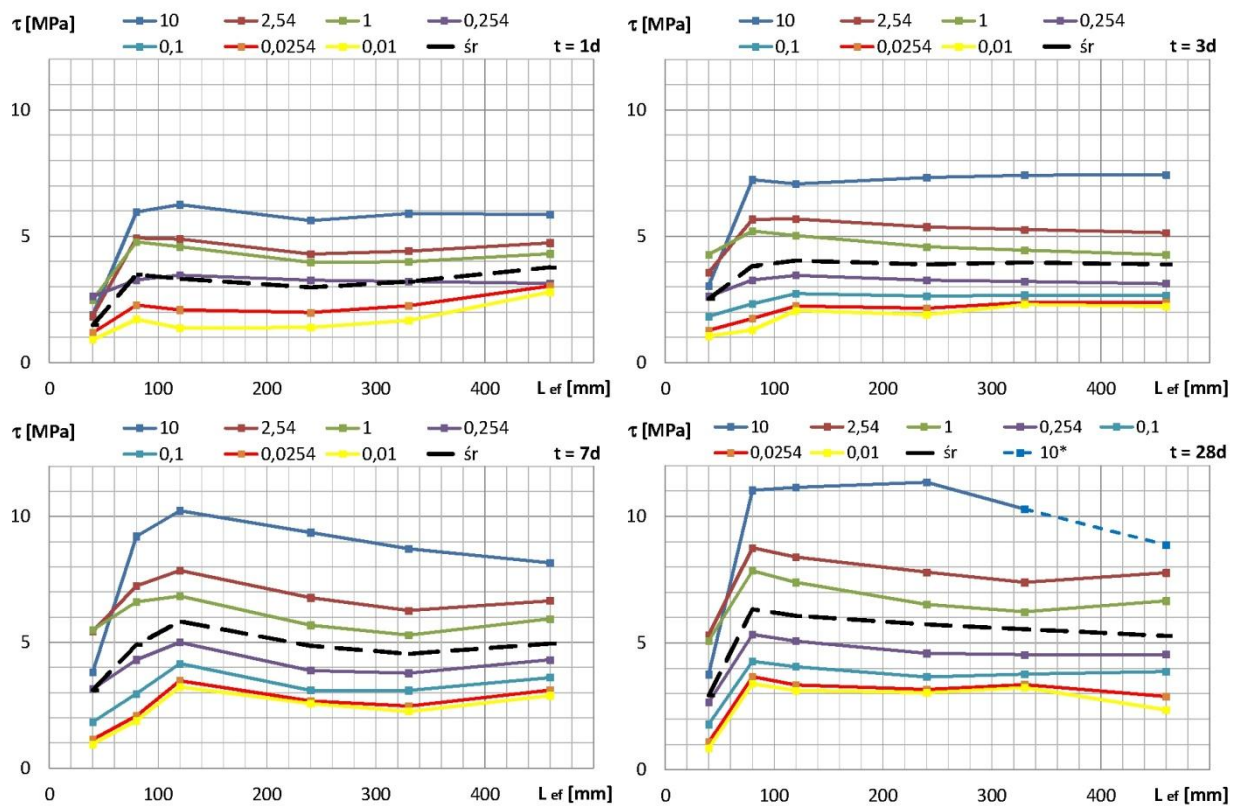
W Załączniku E przedstawiono wykresy sił wyciągania w poszczególnych dniach pomiarowych dla wybranych poziomów poślizgu w funkcji efektywnej długości przyczepności (rys. E.3). Wszystkie wykresy zależności siły wyciągającej od długości czynnej wykazują się stałą tendencją wzrostową, za wyjątkiem diagramu charakteryzującego 28 dzień (rys. E.3). Dotyczy to efektywnej długości przyczepności 460 mm i poziomu poślizgu 10 mm. Żadna z badanych próbek nie osiągnęła tego względnego przemieszczenia z uwagi na zerwanie drutu lub odłączenie ekstensometru. Dotyczy to również czynnej długości przyczepności 330 mm, dla której poziom poślizgu 10 mm osiągnęła tylko jedna i to najślabza próbka. Końcowe odcinki wykresów dla poszczególnych próbek naniesiono linia przerywaną przyjmując wartości maksymalnej siły wyciągającej pomierzonej po odłączeniu ekstensometru.

Na każdym wykresie sporządzono rozkład średnich sił wyciągania zebranych ze wszystkich poziomów poślizgu w funkcji efektywnej długości przyczepności dla poszczególnych dni pomiarowych dla splotów 7φ4 mm. Zbiorcze porównanie wykresów średnich sił wyciągających splot 7φ4 mm w zależności od efektywnej długości przyczepności i wieku betonu podano na rys. 8.7 (rys. E.4). Przebiegi tych średnich charakteryzują się stałym wzrostem wartości, a maksymalna siła osiąga wartość około 95 kN, przy średniej maksymalnej niewiele poniżej 85 kN.

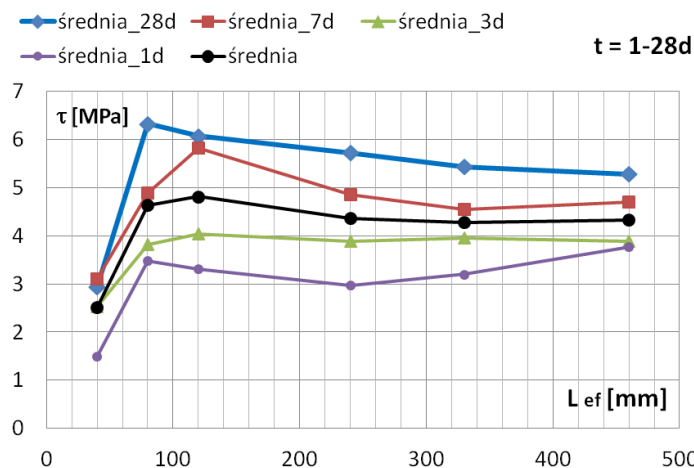


Rys. 8.7 Wykresy zależności średnich sił wyciągających sploty 7φ4 mm od czynnej długości przyczepności i wieku betonu

Na podstawie sił wyciągania (rys. E.3) zostały wyznaczone naprężenia przyczepności w zależności od efektywnej długości przyczepności dla charakterystycznych wartości poślizgu po 1, 3, 7 i 28 dniach dojrzewania betonu (rys. 8.8).



Rys. 8.8 Wykresy zależności naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm od efektywnej długości przyczepności dla poszczególnych dni pomiarowych



Rys. 8.9 Wykresy zależności średnich naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm od efektywnej długości przyczepności dla poszczególnych dni pomiarowych

Na wszystkich wykresach po początkowym wzroście naprężeń przyczepności przy efektywnej długości przyczepności 80 - 120 mm widoczna jest pewna stabilizacja w postaci równoległych odcinków, chociaż w niektórych przypadkach zaznacza się w tym obszarze niewyraźne maksimum, po czym następuje spadek lub spadek w postaci "siodełka" ze wzmocnieniem dla czynnych długości przyczepności 330 mm i 460 mm. Zbiornicze porównanie wykresów średnich naprężeń przyczepności

BWW do splotów 7 $\phi$ 4 mm w zależności od efektywnej długości przyczepności i wieku betonu podano na rys. 8.9. Średnie wartości naprężeń przyczepności leżą nieznacznie poniżej 5 MPa.

### 8.3.2.3 Wnioski

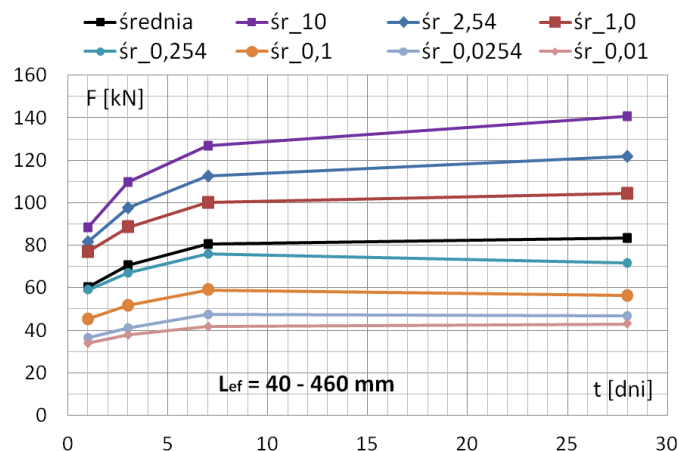
- Naprężenie przyczepności BWW do splotów 7 $\phi$ 4 mm bez naciągu rośnie wraz z wiekiem betonu. Największy przyrost średniego naprężenia przyczepności rzędu 55 % odnotowuje się w okresie od 1 do 7 dnia. Pomiędzy 7 a 28 dniem wzrost średniego naprężenia przyczepności wynosi 13%.
- Wartość naprężenia przyczepności rośnie wraz ze wzrostem poślizgu odniesienia, w każdym okresie pomiarowym (dla każdego wieku betonu).
- Naprężenie przyczepności wyznaczone dla efektywnej długości przyczepności 40 mm zdecydowanie różni się od średnich wartości.
- Średnie naprężenie przyczepności BWW do splotu 7 $\phi$ 4 mm bez naciągu można uznać za stabilne bez względu na efektywną długość przyczepności w przedziale od 80 mm do 460 mm. Wartości średnie  $\tau$  i odpowiadające im współczynniki zmienności  $v$  (%) dla rozważanego wieku betonu po 1, 3, 7 i 28 dni wynoszą odpowiednio 3,35 MPa (8,0%), 3,92 MPa (1,9%), 5,01 MPa (8,54%) i 5,77 MPa (6,77%). Średnie naprężenie przyczepności dla okresu 1 - 28 dni wynosi 4,51 MPa przy  $v = 4.22\%$ .

### 8.3.3 Naprężenia przyczepności BWW do splotów 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu

W tabeli 8.4 zestawiono wartości średnich naprężeń przyczepności BWW do splotów 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu dla poszczególnych efektywnych długości przyczepności w kolejnych dniach pomiarowych z podaniem współczynnika zmienności.

#### 8.3.3.1 Naprężenia przyczepności w funkcji wieku betonu

W Załączniku E przedstawiono przebieg wartości sił wyciągających na poszczególnych poziomach poślizgu dla wszystkich czynnych długości przyczepności w funkcji wieku betonu (rys. E.5). Na każdym wykresie wyznaczono średnią, które zebrano na rys. E.6 i zamieszczono również na rys. 8.10. Wartości z 1 i 3 dnia charakteryzują się relatywnie szybszym wzrostem na poszczególnych poziomach, przy średnim wzroście z około 60 kN po 1 dniu na około 70 kN po 3 dni i około 80 po 7 dniu, po czym następuje względna stabilizacja średnich wyników do wartości nie przekraczającej 85 kN i maksymalnej równej około 140 kN dla efektywnej długości przyczepności 460 mm.

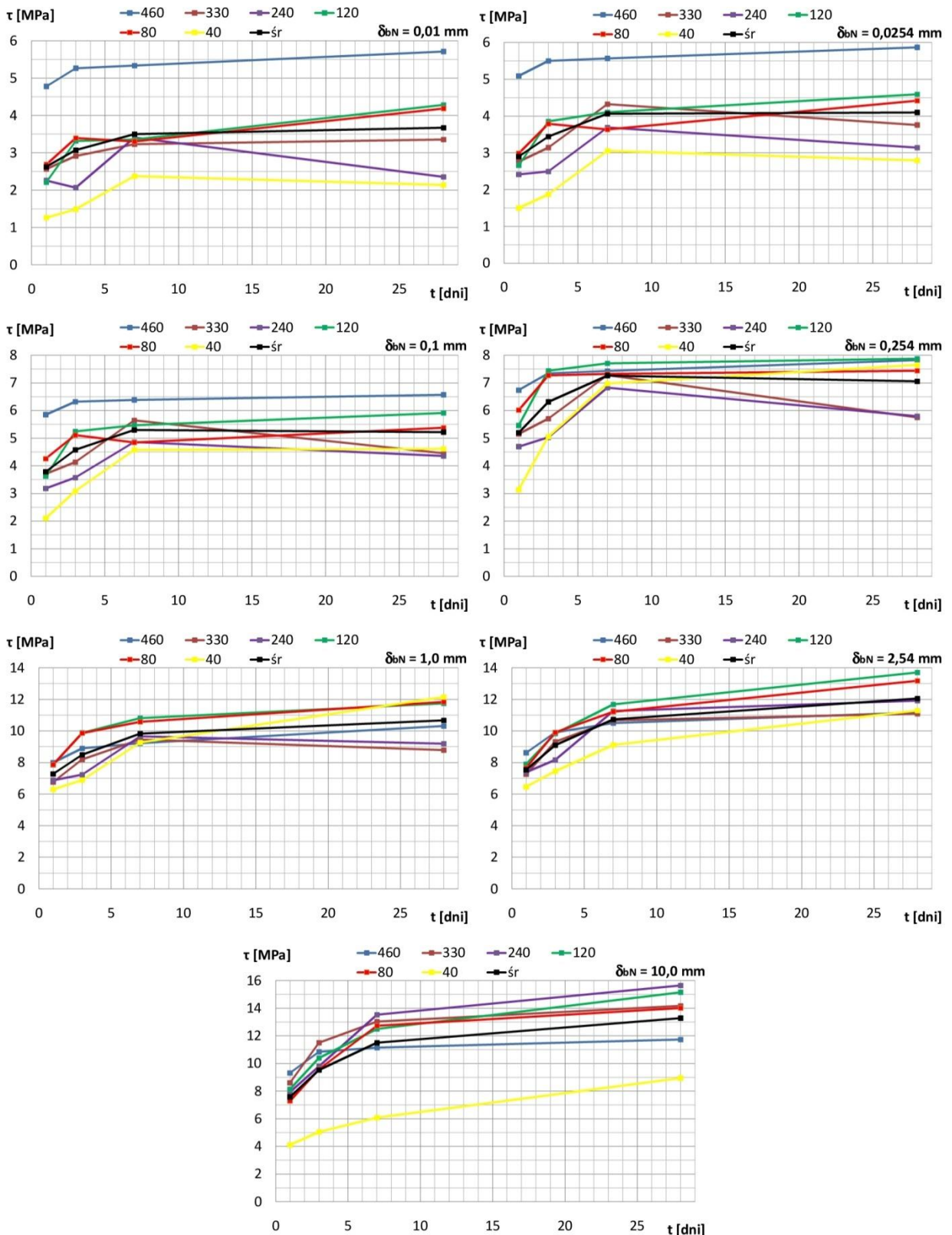


Rys. 8.10 Wykresy zależności średnich sił wyciągających 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów, przy różnych czynnych długościach przyczepności

Tabela 8.4 Średnie naprężenia przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm bez naciągu w funkcji wieku betonu i poślizgu splotów.

efektywna długość przyczep- ności	wartości poślizgu	ŚREDNIE WARTOŚCI NAPRĘŻEŃ PRZYZEPNOŚCI [MPa]							
		1d		3d		7d		28d	
$l_{ef}$ [mm]	$\delta$ [mm]	$\tau$	$\nu$ [%]	$\tau$	$\nu$ [%]	$\tau$	$\nu$ [%]	$\tau$	$\nu$ [%]
40	0,01	1,27	30,07	1,49	47,02	2,38	36,35	2,14	16,84
	0,0254	1,50	32,41	1,87	41,24	3,06	42,40	2,79	12,83
	0,1	2,11	39,12	3,08	42,27	4,58	41,15	4,61	6,36
	0,254	3,14	42,25	5,05	45,70	6,97	28,42	7,65	4,89
	1	6,30	19,29	6,90	38,77	9,27	13,37	12,15	6,46
	2,54	6,45	15,06	7,46	10,97	9,12	14,45	11,29	12,39
80	0,01	2,49	39,98	3,40	31,28	3,30	31,60	4,18	17,64
	0,0254	2,79	35,51	3,79	26,31	3,64	32,50	4,42	16,10
	0,1	4,04	23,65	5,11	20,99	4,84	23,52	5,37	13,04
	0,254	5,87	19,70	7,27	13,39	7,32	11,62	7,44	12,05
	1	7,84	10,40	9,87	9,85	10,58	7,98	11,84	7,26
	2,54	7,72	12,26	9,91	9,32	11,21	7,52	13,17	6,94
120	0,01	2,21	18,48	3,32	22,83	3,36	43,96	4,30	28,61
	0,0254	2,66	17,87	3,86	17,17	4,10	26,63	4,60	25,82
	0,1	3,62	20,27	5,24	12,18	5,46	19,86	5,92	18,89
	0,254	5,45	19,83	7,44	9,59	7,71	13,59	7,89	18,22
	1	7,86	11,49	9,87	6,75	10,81	8,74	11,77	12,66
	2,54	7,90	10,17	9,84	8,00	11,68	11,49	13,73	7,82
240	0,01	2,25	15,64	2,06	55,17	3,41	15,14	2,36	67,99
	0,0254	2,41	15,71	2,50	39,47	3,69	13,81	3,14	44,71
	0,1	3,18	15,37	3,57	12,58	4,86	10,95	4,36	21,50
	0,254	4,69	14,30	5,03	6,93	6,82	8,17	5,79	21,25
	1	6,87	11,73	7,24	8,62	9,65	7,10	9,19	13,05
	2,54	7,40	10,88	8,16	7,76	11,27	5,89	11,91	8,47
330	0,01	2,56	24,23	2,91	32,65	3,23	34,04	3,36	23,73
	0,0254	2,76	23,74	3,14	31,16	4,32	5,68	3,75	11,58
	0,1	3,70	21,51	4,13	28,53	5,64	4,64	4,45	13,24
	0,254	5,15	12,56	5,70	23,62	7,27	3,88	5,75	14,48
	1	6,76	4,40	8,20	11,78	9,46	2,95	8,79	13,35
	2,54	7,26	3,06	9,32	8,51	10,67	2,33	11,09	10,52
460	0,01	4,78	20,84	5,26	13,46	5,34	4,72	5,71	3,80
	0,0254	5,09	17,22	5,50	12,50	5,56	4,53	5,86	3,93
	0,1	5,84	12,45	6,32	10,21	6,38	5,02	6,56	2,98
	0,254	6,74	8,49	7,34	9,20	7,43	4,54	7,82	1,82
	1	8,00	5,33	8,89	8,46	9,22	5,21	10,31	1,47
	2,54	8,61	4,13	9,91	5,64	10,50	4,59	11,17	0,49
	10	9,32	6,92	10,85	1,32	11,15	0,00	11,74	1,85





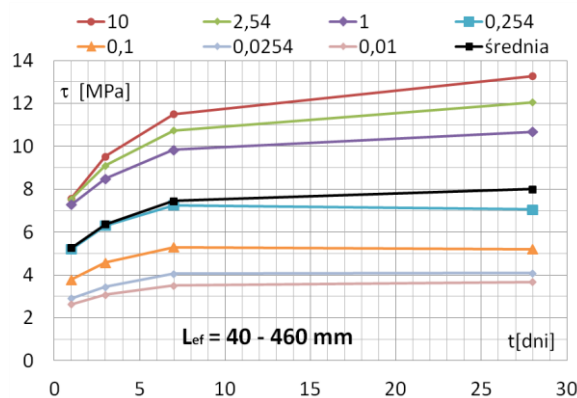
Rys. 8.11 Wykres zależności naprężeń przyczepności BWW do splotów 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu w funkcji wieku betonu dla poszczególnych poziomów poślizgu przy różnych efektywnych długościach przyczepności



Na rys. 8.11 przedstawiono rozkłady zależności średnich naprężeń przyczepności BWW do splotu 7φ5 mm bez naciągu dla badanych długości czynnych przy charakterystycznych wartościach poślizgu splotu. Wnioski wynikające z dokonanej analizy:

- naprężenia przyczepności określone przy długości czynnej 460 mm dla poślizgu 0,01; 0,0254 i 0,1 mm są znacznie (do 2 MPa) większe od naprężeń przyczepności określonych np. dla długości czynnych 80 i 120 mm,
- najbardziej zwartą wiązkę krzywych zależności naprężenie przyczepności w funkcji wieku betonu ( $f_c$ ) otrzymano dla poślizgu splotu 2,54 mm. Rozwój średniego naprężenia przyczepności jest zbliżony z rozkładem naprężenia przyczepności dla długości czynnej 460 mm,
- naprężenie przyczepności określone dla długości czynnej 40 mm charakteryzuje się najniższymi wartościami zarówno dla małych poślizgów 0,01 i 0,0254 jak dla maksymalnego poślizgu 10,0 mm.

Dla wszystkich wykresów na rys. 8.11 obliczono średnie z naprężeń przyczepności wyznaczonych dla poszczególnych efektywnych długości i przedstawiono je na rys. 8.12. Widać wyraźny wzrost naprężenia przyczepności wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu na ściskanie do 7 dnia, dla wszystkich rozważanych wartości poślizgu splotu. Powyżej 7 dnia obserwuje się dalszy wzrost naprężenia przyczepności, ale tylko dla wartości poślizgu 1,0; 2,54 i 10 mm. Dla pozostałych wartości poślizgu odnotowuje się nieznaczny spadek naprężenia przyczepności.



Rys. 8.12 Wykresy zależności średnich naprężeń przyczepności BWW do splotów 7 φ5 mm bez naciągu w funkcji wieku betonu dla poszczególnych poziomów poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności

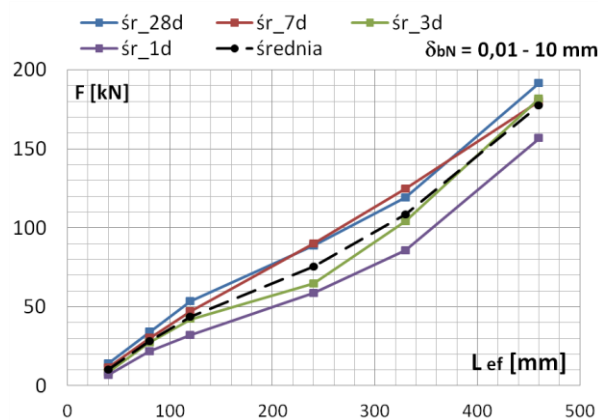
W tabeli 8.5 zestawiono względne przyrosty naprężeń przyczepności BWW dla splotu 7φ5 mm bez naciągu, dla różnych poziomów odniesienia (charakterystycznych).

Tabela 8.5 Naprężenia przyczepności uzyskane dla splotów 7φ5 mm bez naciągu i ich względne przyrosty w funkcji wieku betonu

poślizg $\delta$ [mm]	naprężenia przyczepności $\tau$ [MPa]				przyrosty naprężeń w stosunku do 28 dnia dla poszczególnych poziomów poślizgu [-]				przyrosty naprężeń w stosunku do 28 dnia dla poziomu poślizgu $\delta = 10$ mm [-]			
	dni pomiarowe				dni pomiarowe				dni pomiarowe			
	1	3	7	28	1	3	7	28	1	3	7	28
0,01	2,59	3,07	3,50	3,67	0,71	0,84	0,95	1	0,20	0,23	0,26	0,28
0,0254	2,87	3,44	4,06	4,09	0,70	0,84	0,99	1	0,22	0,26	0,31	0,31
0,1	3,75	4,58	5,29	5,21	0,72	0,88	1,02	1	0,28	0,34	0,40	0,39
0,254	5,17	6,31	7,26	7,06	0,73	0,89	1,03	1	0,39	0,47	0,55	0,53
1	7,27	8,49	9,83	10,68	0,68	0,80	0,92	1	0,55	0,64	0,74	0,80
2,54	7,56	9,10	10,74	12,06	0,63	0,75	0,89	1	0,57	0,69	0,81	0,91
10	7,57	9,53	11,50	13,28	0,57	0,72	0,87	1	0,57	0,72	0,87	1
ŚREDNIA	5,25	6,36	7,46	8,01	0,68	0,82	0,95	1,00	-	-	-	-
s	1,89	2,31	2,78	3,47	0,06	0,06	0,06	0,00	-	-	-	-
v [%]	36,02	36,32	37,32	43,33	8,39	7,78	6,58	0,00	-	-	-	-

### 8.3.3.2 Naprężenia przyczepności w funkcji efektywnej długości przyczepności

W Załączniku E (rys. E.7) przedstawiono wykresy sił wyciągania w funkcji efektywnej długości przyczepności dla poszczególnych dni pomiarowych. Przebiegi sił na poszczególnych poziomach poślizgu wykazują tendencje wzrostowe. W 7 i 28 dniu dla poślizgu 10 mm przebieg zaczyna się "wypląszczać" przy efektywnej długości przyczepności z uwagi na powolne zbliżanie się do wyczerpania nośności stalowego splotu. Na każdym wykresie sporządzono rozkład średnich sił wyciągania zebranych ze wszystkich poziomów poślizgu w funkcji efektywnej długości przyczepności dla poszczególnych dni pomiarowych dla splotów 7φ5 mm bez naciągu. Zbiorcze zestawienie wykresów średnich sił wyciągających splot 7φ5 mm bez naciągu, w zależności od efektywnej długości przyczepności i wieku betonu zestawiono na rys. 8.13 (rys. E.8). Przebiegi tych średnich charakteryzują się stałym wzrostem wartości, a maksymalna siła osiąga wartość około 190 kN, przy średniej maksymalnej niewiele poniżej 180 kN.

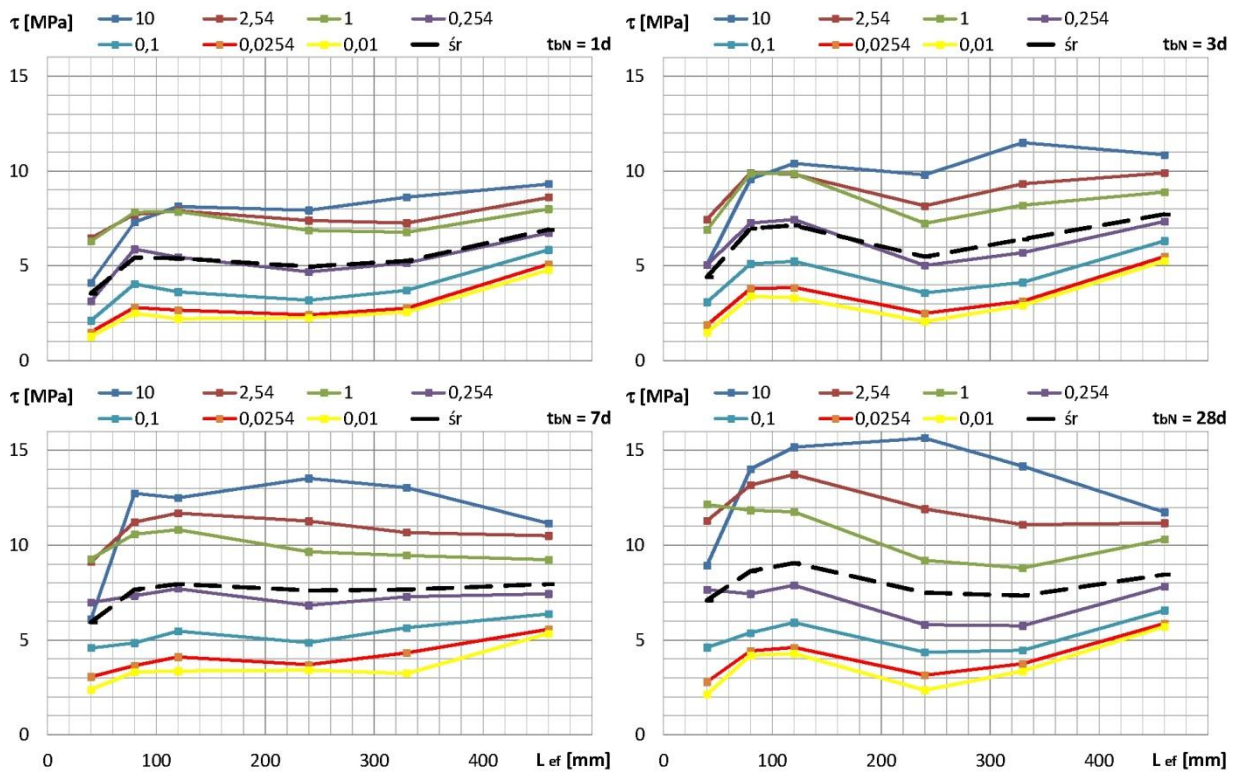


Rys. 8.13 Wykresy zależności średnich sił wyciągających sploty 7φ5 mm bez naciągu od czynnej długości przyczepności i wieku betonu

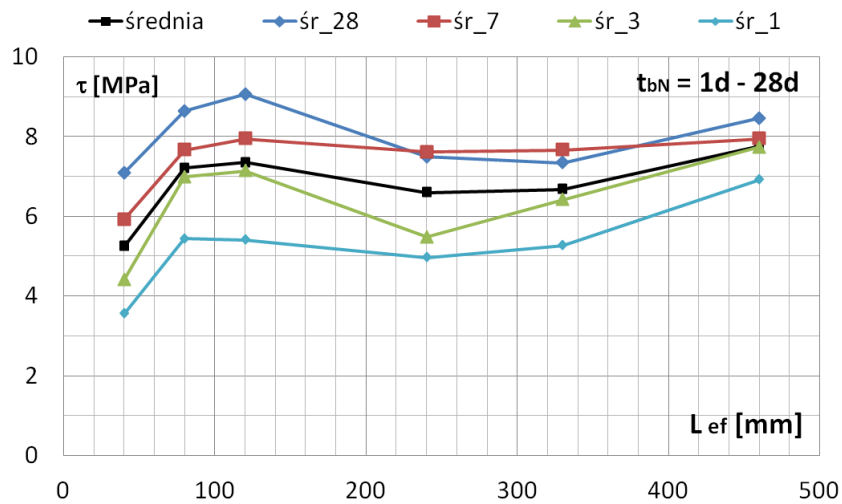
Na podstawie sił wyciągania (rys. E.7) zostały wyznaczone naprężenia przyczepności w poszczególnych dniach pomiarowych dla splotów 7φ5 mm bez naciągu i przedstawione na rys. 8.14 w funkcji efektywnej długości przyczepności.

Dla wartości poślizgu 10 mm i 2,54 mm widać wyraźny spadek wartości naprężeń przyczepności w elementach próbnym po 7 i 28 dniach dojrzewania betonu, przy czynnej długości przyczepności wynoszącej 460 mm i 330 mm. W przypadku pozostałych poziomów poślizgu utrzymuje się również tendencja spadkowa jednak ze wzmocnieniem. Na każdym z wykresów wyznaczono średnie wartości naprężeń przyczepności z badanych poślizgów. Zbiorcze porównanie wykresów średnich naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm bez naciągu w zależności od efektywnej długości przyczepności dla poszczególnych dni pomiarowych podano na rys. 8.15.

Naprężenia przyczepności rosną wraz z wiekiem betonu. Zestawione rozkłady średnich, po wzroście wartości naprężeń przyczepności przy efektywnej długości wynoszącej 80 i 120 mm charakteryzują się nieznacznym spadkiem, po czym następuje wzmocnienie przy długości przyczepności 460 mm. Średnie wartości naprężeń przyczepności leżą poniżej 8 MPa.



Rys. 8.14 Wykresy zależności naprężeń przyczepności BWW do splotów 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu od efektywnej długości przyczepności dla poszczególnych dni pomiarowych



Rys. 8.15 Wykresy zależności średnich naprężeń przyczepności BWW do splotów 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu od efektywnej długości przyczepności i wieku betonu

### 8.3.3.3 Wnioski

- Naprężenie przyczepności BWW do splotów 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu rośnie wraz z wiekiem betonu. Największy przyrost średniego naprężenia przyczepności rzędu 42 % odnotowuje się w okresie od 1 do 7 dnia. Pomiędzy 7 a 28 dniem wzrost średniego naprężenia przyczepności wynosi 7,4%.
- Wartość naprężenia przyczepności rośnie wraz ze wzrostem poślizgu odniesienia, w każdym okresie pomiarowym (dla każdego wieku betonu).
- Naprężenie przyczepności wyznaczone dla efektywnej długości przyczepności 40 mm jest znacznie mniejsze od wartości średniej, natomiast dla długości przyczepności 460 mm po 1 i 3 dniach wykazuje tendencję wzrostową.
- Średnie naprężenie przyczepności BWW do splotu 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu można uznać za stabilne bez względu na efektywną długość przyczepności w przedziale od 80 mm do 460 mm. Wartości średnie  $\tau$  i odpowiadające im współczynniki zmienności  $v$  (%) dla rozważanego wieku betonu po 1, 3, 7 i 28 dniach wynoszą odpowiednio 5,60 MPa (12,13%); 6,75 MPa (11,25%); 7,76 MPa (1,91%) i 8,19 MPa (8,16%). Średnie naprężenie przyczepności dla okresu 1 - 28 dni wynosi 7,07 MPa przy  $v = 6,97\%$ .

### 8.3.4 Naprężenia przyczepności BWW do splotów 7 $\phi$ 5 mm okrągłych z naciągiem

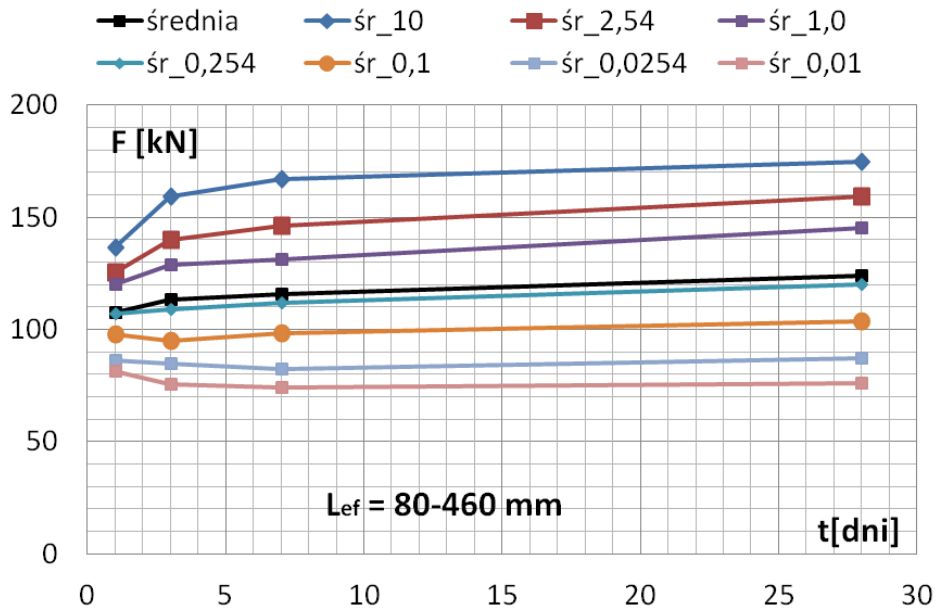
W tabeli 8.6 zestawiono wartości średnich naprężeń przyczepności BWW do splotów 7 $\phi$ 5 mm okrągłych z naciągiem dla poszczególnych efektywnych długości przyczepności w kolejnych dniach pomiarowych z podaniem współczynnika zmienności.

Tabela 8.6 Naprężenia przyczepności betonu BWW do splotów 7φ5 mm z naciągiem w funkcji wieku betonu i poślizgu

efektywna długość przyczep- ności	wartości poślizgu	ŚREDNIE WARTOŚCI NAPRĘŻEŃ PRZYZCZEPNOŚCI [MPa]							
		1d		3d		7d		28d	
$l_{ef}$ [mm]	$\delta$ [mm]	$\tau$	$v$ [%]	$\tau$	$v$ [%]	$\tau$	$v$ [%]	$\tau$	$v$ [%]
80	0,01	6,87	5,31	4,79	83,12	5,36	20,03	0,67	7,10
	0,0254	7,26	8,58	6,69	32,49	5,71	17,28	5,01	54,71
	0,1	7,81	9,63	7,50	26,57	6,66	10,04	7,82	19,11
	0,254	8,52	9,31	9,02	15,02	7,96	13,04	9,98	9,04
	1	8,80	14,44	10,94	10,56	9,91	12,48	13,11	1,13
	2,54	8,52	15,50	10,83	12,24	11,63	18,29	15,45	0,93
	10	8,19	4,07	11,45	20,51	11,50	20,37	17,61	10,55
120	0,01	7,35	31,35	6,36	37,76	8,50	12,53	7,72	16,92
	0,0254	7,71	30,20	7,78	13,97	8,70	11,85	8,48	8,79
	0,1	8,13	28,55	8,88	11,12	9,41	9,71	9,67	8,04
	0,254	8,70	25,74	10,14	8,45	10,40	5,50	10,97	7,83
	1	9,27	18,53	11,58	7,39	12,09	5,92	12,90	6,30
	2,54	9,32	17,67	12,30	9,27	13,24	5,23	14,59	5,11
	10	9,84	18,78	13,05	13,39	15,45	9,43	16,12	6,30
240	0,01	7,61	16,73	7,05	31,86	6,48	46,43	7,78	11,08
	0,0254	8,35	4,40	8,37	6,10	8,17	4,88	8,13	9,66
	0,1	8,87	3,54	9,01	5,85	9,01	3,91	9,08	8,13
	0,254	9,69	4,20	10,07	5,18	10,21	4,67	10,33	6,56
	1	10,82	4,30	11,73	4,72	11,36	7,70	12,45	5,15
	2,54	11,22	3,49	12,85	4,68	12,72	4,91	14,31	2,90
	10	12,39	5,08	14,71	3,87	15,59	3,46	17,14	4,39
330	0,01	7,70	5,73	6,19	38,67	6,78	8,77	6,60	4,16
	0,0254	7,87	4,95	6,32	38,31	7,21	2,43	6,99	5,95
	0,1	8,26	5,13	7,48	15,34	7,99	1,34	8,01	8,72
	0,254	9,05	3,68	8,95	4,76	9,16	0,72	9,22	9,06
	1	10,11	3,04	10,82	2,71	10,93	1,79	11,28	8,21
	2,54	10,68	3,31	11,71	7,05	12,41	1,51	13,08	6,23
	10	11,94	5,36	13,98	2,75	14,81	1,98	15,70	2,09
460	0,01	5,03	52,76	5,83	20,28	5,13	46,91	5,37	9,94
	0,0254	5,43	40,70	6,48	8,92	5,67	32,63	6,30	12,16
	0,1	7,20	5,44	7,13	7,35	7,47	5,64	7,76	4,30
	0,254	7,98	5,04	8,08	5,91	8,56	5,32	9,04	3,64
	1	9,37	5,59	9,60	4,11	10,26	5,92	11,10	1,98
	2,54	9,97	5,77	10,66	2,28	11,17	2,69	11,38	3,10
	10	10,85	2,93	11,95	0,00	11,89	0,70	11,38	3,10

#### 8.3.4.1 Naprężenia przyczepności w funkcji wieku betonu

W Załączniku E przedstawiono przebieg wartości sił wyciągających na poszczególnych poziomach poślizgu dla wszystkich czynnych długości przyczepności w funkcji wieku betonu (rys. E.9). Na każdym wykresie wyznaczono średnią, które zebrano na rys. E.10 i zamieszczono również na rys. 8.16. Wartości z 1 i 3 dnia charakteryzują się relatywnie szybszym wzrostem na poszczególnych poziomach (oprócz małych przemieszczeń), przy średnim wzroście z około 110 kN po 1 dniu na około 115 kN po 3 dniu i około 120 po 7 dniu, po czym następuje względna stabilizacja średnich wyników do wartości nie przekraczającej 125 kN i maksymalnej równej około 175 kN dla efektywnej długości przyczepności 460 mm.

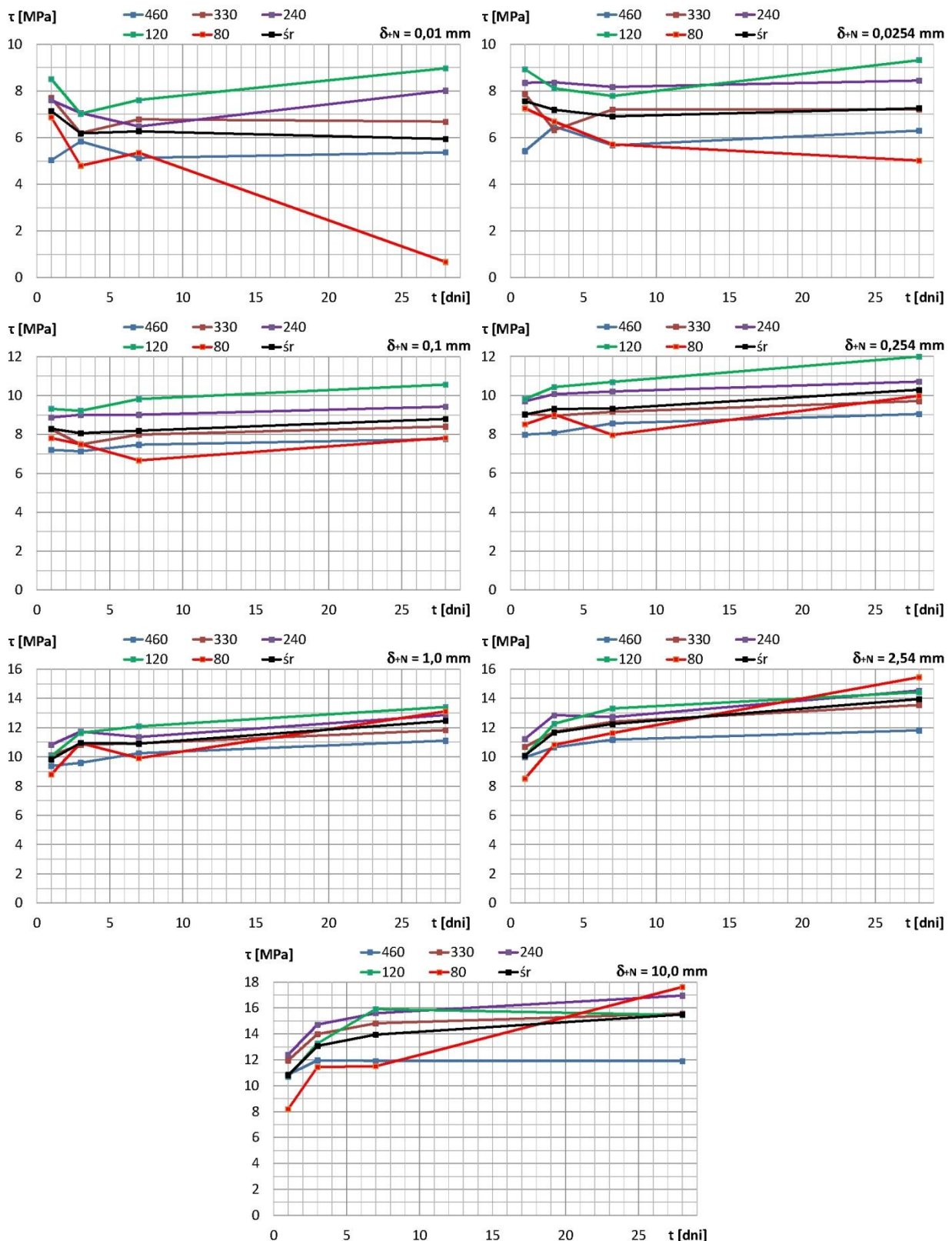


Rys. 8.16 Wykresy zależności średnich sił wyciągających sploty 7 $\phi$ 5 mm z naciągiem od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności

Na rys. 8.17 przedstawiono rozkłady zależności wartości naprężeń przyczepności BWW do splotu 7 $\phi$ 5 mm z naciągiem dla badanych długości czynnych przy charakterystycznych wartości poślizgu splotu. Wnioski wynikające z dokonanej analizy:

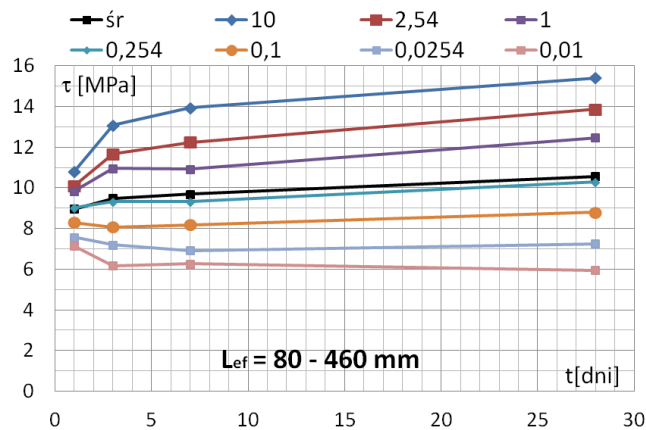
- największy rozrzut średnich wartości naprężeń przyczepności zarejestrowano dla poślizgu 0,01 mm i 10 mm
- najbardziej zwarte wiązki krzywych zależności naprężenia przyczepności w funkcji wieku betonu ( $f_c$ ) otrzymano dla poślizgów: 0,1; 0,254; 1,0 i 2,54 mm.
- Daje się zauważyć liniowy wzrost naprężenia przyczepności w zależności od wzrostu wytrzymałości betonu na ściskanie

Na rys. 8.18 przedstawiono rozkłady średnich wartości naprężeń przyczepności w zależności od wieku betonu dla różnych wartości poślizgu splotu. W tabeli 8.7 zestawiono względne przyrosty naprężeń przyczepności BWW do splotu 7 $\phi$ 5 mm z naciągiem, dla różnych poślizgów odniesienia (charakterystycznych).



Rys. 8.17 Wykresy zależności naprężeń przyczepności BWW do splotów 7 $\phi$ 5 mm z naciągiem od wieku betonu dla poszczególnych poziomów poślizgu przy różnych czynnych efektywnych długościach przyczepności





Rys. 8.18 Wykresy zależności średnich naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm z naciągiem w funkcji wieku betonu dla poszczególnych poziomów poślizgów przy różnych efektywnych długościach przyczepności

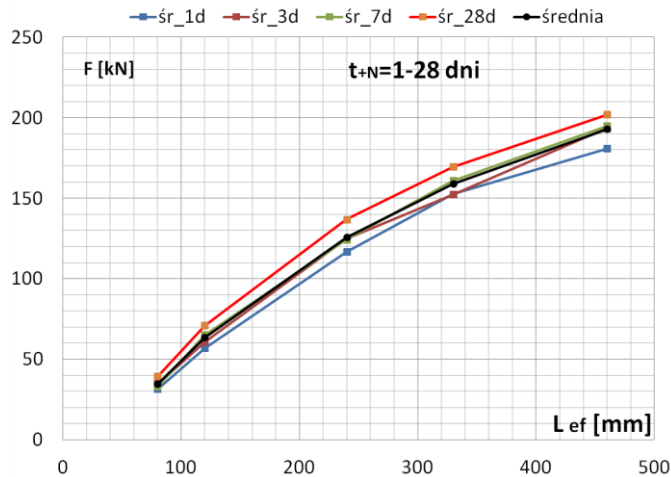
Tabela 8.7 Naprężenia przyczepności uzyskane dla splotów 7φ5 mm z naciągiem i ich względne przyrosty w funkcji wieku betonu

poślizg $\delta$ [mm]	naprężenia przyczepności $\tau$ [MPa]				przyrosty naprężeń w stosunku do 28 dnia dla poszczególnych poziomów poślizgu [-]				przyrosty naprężeń w stosunku do 28 dnia dla poziomu poślizgu $\delta = 10$ mm [-]			
	dni pomiarowe				dni pomiarowe				dni pomiarowe			
	1	3	7	28	1	3	7	28	1	3	7	28
0,01	7,14	6,18	6,27	5,94	1,20	1,04	1,06	1	0,46	0,40	0,40	0,38
0,0254	7,56	7,19	6,91	7,26	1,04	0,99	0,95	1	0,49	0,46	0,45	0,47
0,1	8,29	8,07	8,19	8,79	0,94	0,92	0,93	1	0,54	0,52	0,53	0,57
0,254	9,01	9,31	9,32	10,28	0,88	0,91	0,91	1	0,58	0,60	0,60	0,66
1	9,83	10,95	10,91	12,46	0,79	0,88	0,88	1	0,63	0,71	0,70	0,80
2,54	10,09	11,66	12,25	13,95	0,72	0,84	0,88	1	0,65	0,75	0,79	0,90
10	10,82	13,07	13,95	15,50	0,70	0,84	0,90	1	0,70	0,84	0,90	1
ŚREDNIA	8,96	9,49	9,68	10,60	0,90	0,92	0,93	1,00	-	-	-	-
s	1,26	2,33	2,62	3,27	0,17	0,07	0,06	0,00	-	-	-	-
v [%]	14,09	24,54	27,03	30,87	18,78	7,63	6,22	0,00	-	-	-	-

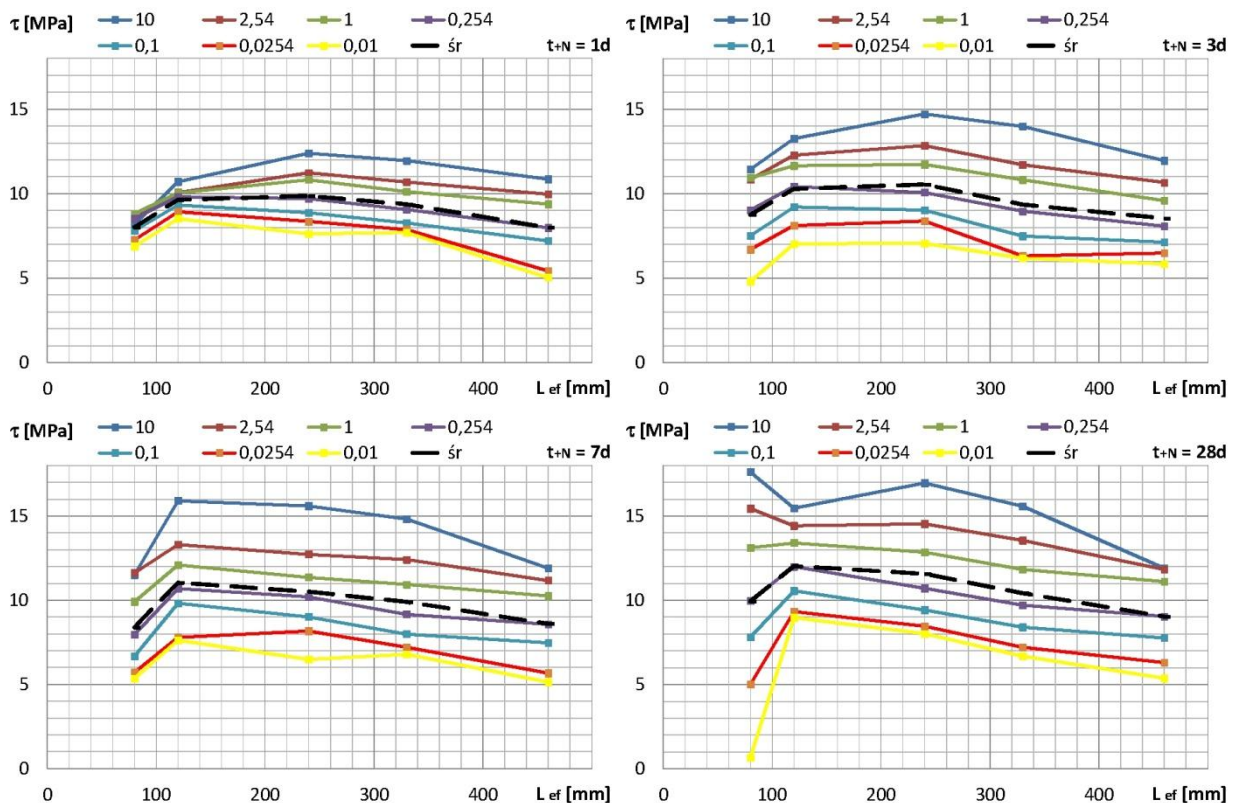
### 8.3.4.2 Naprężenia przyczepności w funkcji efektywnej długości przyczepności

W Załączniku E (rys. E.11) przedstawiono wykresy sił wyciągających w funkcji efektywnej długości przyczepności dla poszczególnych dni pomiarowych. Przebiegi sił na poszczególnych poziomach poślizgu wykazują tendencje wzrostowe. W 7 i 28 dniu dla poślizgu 10 mm przebieg zaczyna się "wypłaszczać" przy efektywnej długości przyczepności 460 mm z uwagi na powolne (zbliżanie się) do wyczerpania się nośności stalowego splotu. Na każdym wykresie sporządzono rozkład średnich sił wyciągających splot zebranych ze wszystkich poziomów poślizgu i zestawiono na rys. E.12 i 8.19. Przebiegi tych średnich charakteryzują się stałym wzrostem wartości, a maksymalna siła osiąga wartość ponad 200 kN, przy średniej około 190 kN. Rozkłady średnich sił wyciągających mają charakter rosnący i wznoszą się po linii wypukłej podczas gdy w przypadku próbek ze splotem 7φ5 mm bez naciągu krzywe rozkładu sił wyciągających mają kształt wklęsły.





Rys. 8.19 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot 7φ5 mm z naciągiem od efektywnej długości przyczepności i wieku betonu

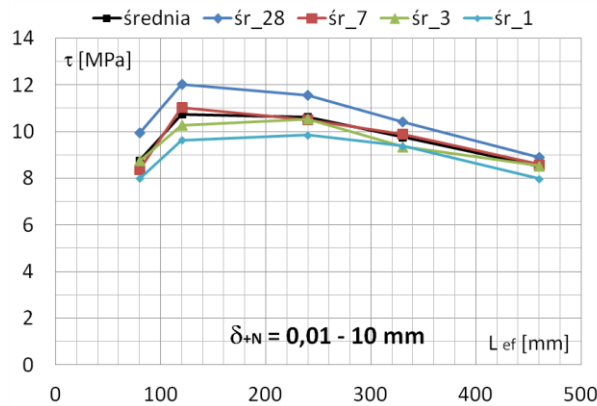


Rys. 8.20 Zależność naprężenia przyczepności w funkcji długości efektywnej przyczepności w poszczególnych dniach (1, 3, 7 i 28) dla splotów 7φ5 mm z naciągiem

Na rys. 8.20 przedstawiono rozkłady naprężeń przyczepności w funkcji czynnej długości przyczepności na poszczególnych poziomach rozważanych poślizgów splotu 7φ5 mm pod naciągiem, określone po 1, 3, 7 i 28 dniach dojrzewania betonu. Tendencje wzrostowe utrzymują się do 80 mm a w niektórych przypadkach do 240 mm efektywnej długości przyczepności, po czym następuje spadek wartości.

Dla wszystkich wykresów z rys. 8.20 wyznaczono średnie wartości naprężeń przyczepności z badanych poślizgów. Zbiorcze porównanie wykresów średnich naprężeń przyczepności BWW

do splotów 7φ5 mm z naciągiem w zależności od efektywnej długości przyczepności dla poszczególnych dni pomiarowych podano na rys. 8.21. Naprężenia przyczepności zmieniają się wraz z wiekiem betonu. Tendencje wzrostowe wstępują do czynnej długości 120 mm a osiągnięta maksymalna wartość wynosi około 12 MPa, po czym następuje spadek do wartości około 9 MPa dla długości czynnej 460 mm.



Rys. 8.21 Średnie naprężenia przyczepności w funkcji długości efektywnej przyczepności w poszczególnych dniach (1, 3, 7 i 28) i średnia ze wszystkich dni dla splotów 7φ5 mm z naciągiem

### 8.3.4.3 Wnioski

- Naprężenie przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm z naciągiem rośnie wraz z wiekiem betonu. Przyrost średniego naprężenia przyczepności rzędu 8,0% odnotowuje się w okresie od 1 do 7 dnia. Pomiędzy 7 a 28 dniem wzrost średniego naprężenia przyczepności wynosi 9,5%.
- Wartość naprężenia przyczepności rośnie wraz ze wzrostem poślizgu odniesienia, w każdym okresie pomiarowym (dla każdego wieku betonu).
- Średnie naprężenie przyczepności BWW do splotu 7φ5 mm z naciągiem można uznać za stabilne dla efektywnej długości przyczepności w przedziale od 120 mm do 240 mm i wieku betonu do 28 dni dojrzewania. Dla efektywnych długości przyczepności 80, 330 i 460 mm obserwuje się spadek wartości średniego naprężenia przyczepności
- Wartości średnie  $\tau$  i odpowiadające im współczynniki zmienności  $v$  (%) dla rozważanego wieku betonu po 1, 3, 7 i 28 dniach wynoszą odpowiednio 8,96 MPa (9,07%); 9,49 MPa (8,45%); 9,69 MPa (10,73%) i 10,57 MPa (10,60%). Średnie naprężenie przyczepności w okresie 1 - 28 dni wynosi 9,69 MPa przy współczynniku zmienności  $v = 9,49\%$ .

## 8.4 Czynniki wpływające na przyczepność BWW do splotów w świetle badań własnych

### 8.4.1 Wpływ wieku betonu

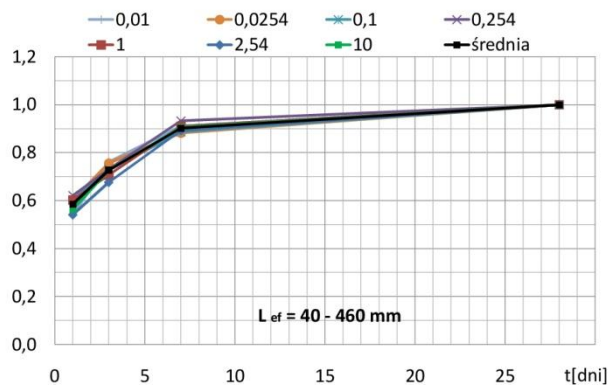
Względne przyrosty naprężenia przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm, 7φ5 mm bez naciągu i 7φ5 mm z naciągiem w stosunku do wartości naprężenia przyczepności po 28 dniach dojrzewania betonu, określonego dla poszczególnych poziomów poślizgu ze wszystkich efektywnych długości przyczepności zestawiono odpowiednio w tabelach 8.3, 8.5 i 8.7. Rozkłady względnych przyrostów naprężeń przyczepności przedstawiono natomiast na rys. 8.22, 8.23 i 8.24. W celu dokonania analizy porównawczej otrzymanych wyników ze względnym przyrostem właściwości mechanicznych betonu

wysokiej wytrzymałości sporządzono rys. 8.25, 8.26 i 8.27, na których naniesiono średnie wartości względnych przyrostów naprężeń przyczepności.

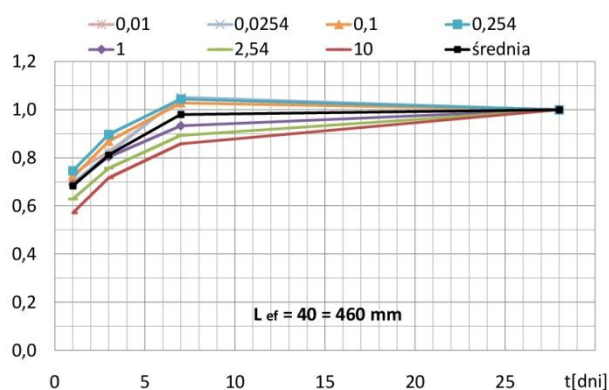
Analizując rozwój względnych przyrostów właściwości mechanicznych betonu można stwierdzić, że najszybszy wzrost wykazuje moduł sprężystości betonu, a następnie wytrzymałość betonu na ściskanie wyznaczona na kostkach 150 x 150 x 150 mm. Nieco wolniejsze przyrosty odnotowuje się w przypadku wytrzymałości betonu na rozciąganie osiowe, a przyrosty wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu i wytrzymałości na ściskanie określonej na walcach  $\varnothing$  150 x 300 mm są sobie równe i najmniejsze.

W przypadku splotów 7 $\phi$ 4 mm bez naciągu względny przyrost naprężenia przyczepności jest niższy w okresie pierwszych 3 i 7 dni odpowiednio do względnego przyrostu wytrzymałości betonu na ściskanie określonej na kostkach oraz od modułu sprężystości betonu.

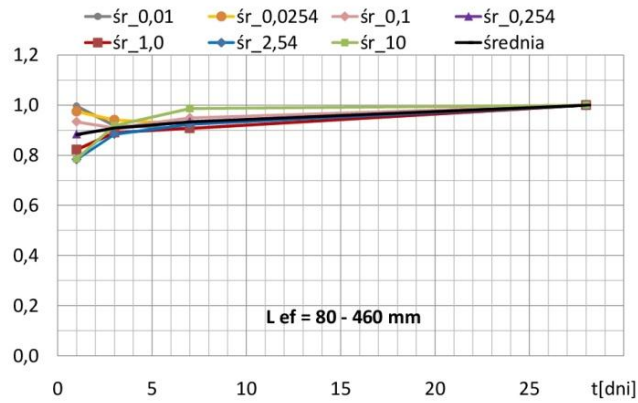
Dla splotów 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu względny przyrost naprężenia przyczepności jest niższy tylko w okresie pierwszych trzech dni od względnego przyrostu modułu sprężystości betonu. Z kolei w przypadku splotów 7 $\phi$ 5 mm z naciągiem względny przyrost naprężenia przyczepności dominuje od pierwszego dnia, a w trzecim dniu dojrzewania betonu jest nieznacznie niższy od względnego przyrostu modułu sprężystości betonu. Na rysunku 8.28 przedstawiono rozkłady względnych przyrostów naprężenia przyczepności BWW do splotów 7 $\phi$ 4 mm, 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu i 7 $\phi$ 5 mm z naciągiem określone na poziomach poślizgu od 0,01 do 10 mm i efektywnych długości przyczepności od 40 do 460 mm dla splotów bez naciągu oraz od 80 do 460 mm dla splotów z naciągiem w zależności od wieku betonu.



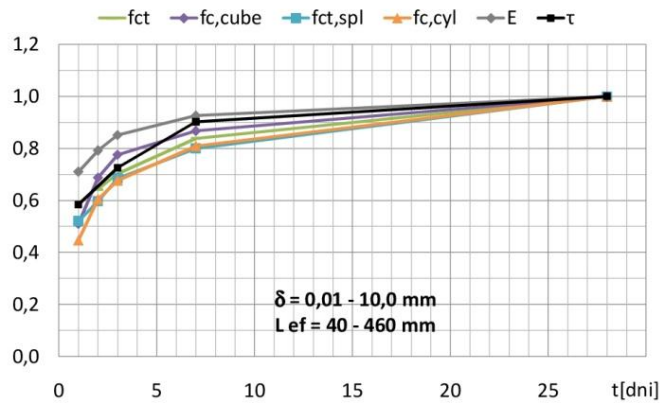
Rys. 8.22 Rozkłady średnich względnych przyrostów naprężeń przyczepności BWW do splotów 7 $\phi$ 4 mm na poszczególnych poziomach poślizgu w zależności od wieku betonu



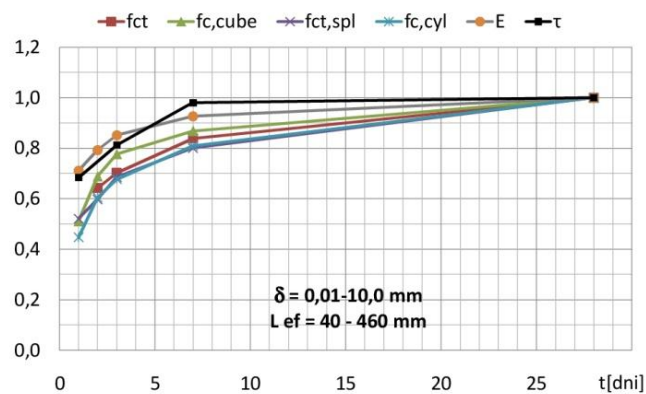
Rys. 8.23 Rozkłady średnich względnych przyrostów naprężeń przyczepności BWW do splotów 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu na poszczególnych poziomach poślizgu w zależności od wieku betonu



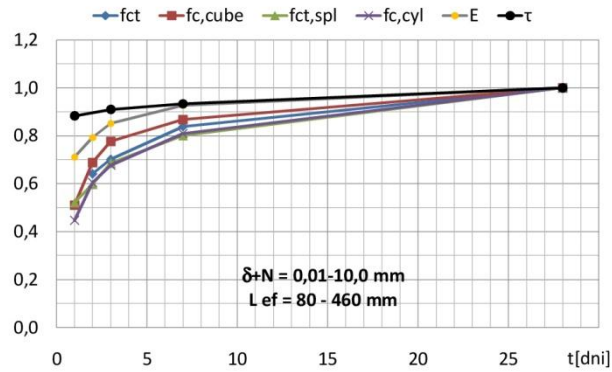
Rys. 8.24 Rozkłady średnich względnych przyrostów naprężeń przyczepności BWW do splotów  $7\phi 5$  mm z naciągiem na poszczególnych poziomach położeniu w zależności od wieku betonu



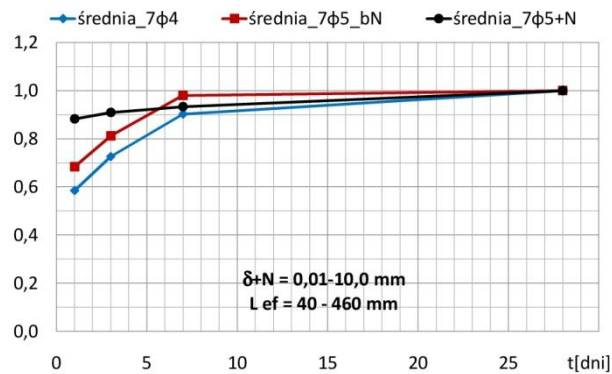
Rys. 8.25 Rozkłady względnych przyrostów naprężeń przyczepności BWW do splotów  $7\phi 4$  mm na tle względnych przyrostów właściwości mechanicznych betonu w funkcji wieku betonu



Rys. 8.26 Rozkłady względnych przyrostów naprężeń przyczepności BWW do splotów  $7\phi 5$  mm bez naciągu na tle względnych przyrostów właściwości mechanicznych betonu w funkcji wieku betonu



Rys. 8.27 Rozkłady względnych przyrostów naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm z naciągiem na tle względnych przyrostów właściwości mechanicznych betonu w funkcji wieku betonu



Rys. 8.28 Rozkłady względnych średnich przyrostów naprężenia przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm, 7φ5 mm bez naciągu oraz 7φ5 mm z naciągiem w zależności od wieku betonu

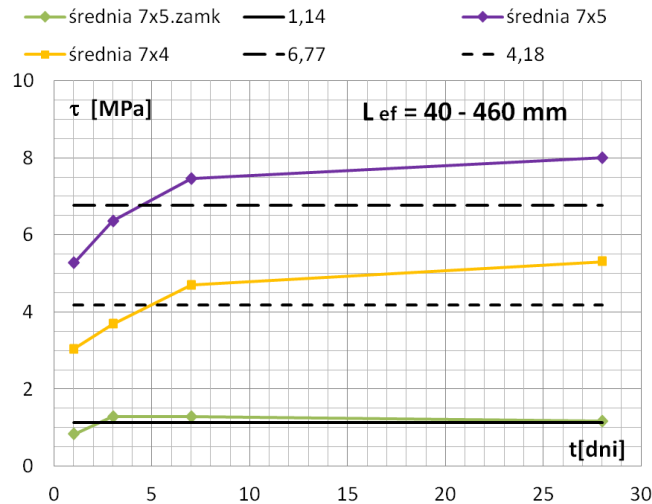
Nitsch [114] w swoich badaniach wykazał również znacznie szybszy względny przyrost naprężenia przyczepności BWW, ale tylko do splotów 7φ4 mm i porównywalny ze względnym przyrostem wytrzymałości betonu na rozciąganie. *Betram i Hegger* [12, 13] potwierdzają tezę o łączeniu tych dwóch cech wytrzymałościowych ze względu na podobne zachowanie się, jednak z uwagi na znaczne rozrzuty wytrzymałości betonu na rozciąganie oznaczające niestabilną bazę odniesienia, skłaniają się do przyjęcia jako punktu odniesienia wytrzymałości betonu na ściskanie.

Wnioski wynikające z badań własnych przemawiają za uznaniem wytrzymałości betonu na ściskanie i modułu sprężystości betonu jako punkty odniesienia do analizy naprężenia przyczepności BWW do splotów sprężających.

#### 8.4.2 Wpływ rodzaju splotu

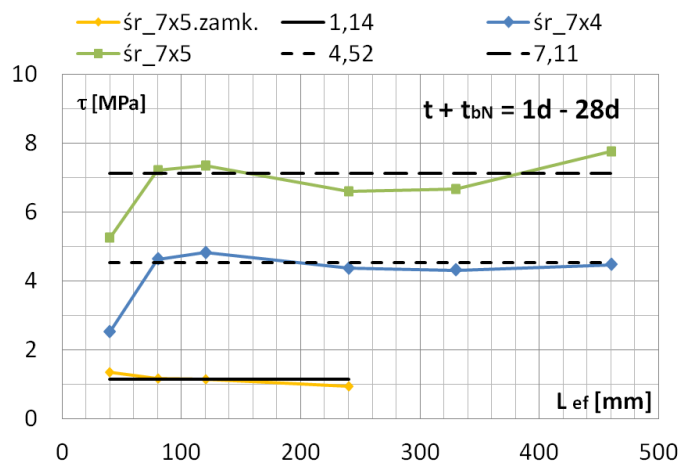
W normie [N7, N9, N10] przy obliczaniu długości transmisji i naprężenia przyczepności betonu do splotów wprowadza się uogólnienie w postaci splotów siedmiodrutowych. Przeprowadzone badania doświadczalne wykazały znaczącą różnicę wartości naprężeń przyczepności dla splotów 7φ4 mm i 7φ5 mm bez naciągu. Na rys. 8.29 przedstawiono rozkłady średnich naprężeń przyczepności BWW do obu analizowanych splotów bez naciągu, wyznaczonych na poziomie określonych poślizgów i przyjętych efektywnych długości przyczepności do 460 mm, w zależności od wieku betonu. Średnie naprężenia przyczepności uzyskane po jednym dniu dojrzewania betonu w przypadku splotów 7φ5 mm

są większe o 72,70% od analogicznych wartości dla splotu 7φ4 mm i ta tendencja utrzymuje się do 28 dnia i wynosi po 3, 7 i 28 dniach odpowiednio 72,36%, 58,72% i 50,85%. Średnio naprężenie przyczepności w okresie 1 - 28 dni dla splotów 7φ5 mm jest większe od naprężenia przyczepności dla splotów 7φ4 mm o 63,66%. Średnie wartości naprężenia przyczepności wyznaczone dla badanych efektywnych długości przyczepności w czasie od 1 dnia do 28 dnia dla splotów 7φ4 mm i 7φ5 mm bez naciągu wynoszą odpowiednio 4,18 MPa przy współczynniku zmienności  $v = 21,01\%$  oraz 6,77 MPa przy współczynniku zmienności  $v = 15,5\%$ .



Rys. 8.29 Rozkłady średnich wartości naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm i 7φ5 mm okrągłych bez naciągu w funkcji czasu dla poszczególnych poślizgów

Na rys. 8.30 przedstawiono rozkłady średnich wartości naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm i 7φ5 mm określonych w okresie dojrzewania betonu od 1 do 28 dnia dla ustalonych wartości poślizgu splotów w zależności od efektywnej długości przyczepności. Z przebiegu obu krzywych można wnioskować, że do wyznaczenia naprężenia przyczepności nie można przyjmować czynnej długości przyczepności poniżej 80 mm. Średnie wartości naprężenia przyczepności wyznaczone dla efektywnych długości przyczepności w przedziale od 80 do 460 mm dla splotów 7φ4 mm i 7φ5 mm bez naciągu wynoszą odpowiednio 4,52 MPa przy współczynniku zmienności  $v = 4,07\%$  oraz 7,11 MPa przy współczynniku zmienności  $v = 6,11\%$ .



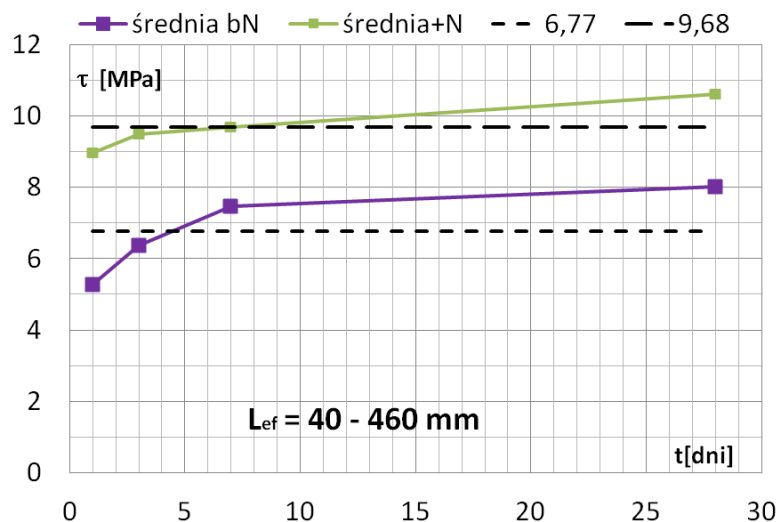
Rys. 8.30 Rozkłady średnich wartości naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm i 7φ5 mm okrągłych bez naciągu w funkcji efektywnej długości przyczepności



Obliczone w punkcie 8.3.1 rozkłady średnich wartości naprężenia przylegania BWW do splotów 7φ5 mm zamkniętych, w zależności od wieku betonu i efektywnej długości przyczepności (40 - 240 mm) naniesiono odpowiednio na rys. 8.29 i 8.30.

### 8.4.3 Wpływ sprężenia

W punkcie 8.3 niniejszej pracy przedstawiono rozkłady naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm bez naciągu i z naciągiem dla określonych wartości poślizgów i rozważanych efektywnych długości przyczepności. Na rysunku 8.31 zobrazowano rozkłady średnich wartości naprężenia przyczepności BWW do rozważanych splotów w zależności od wieku betonu.

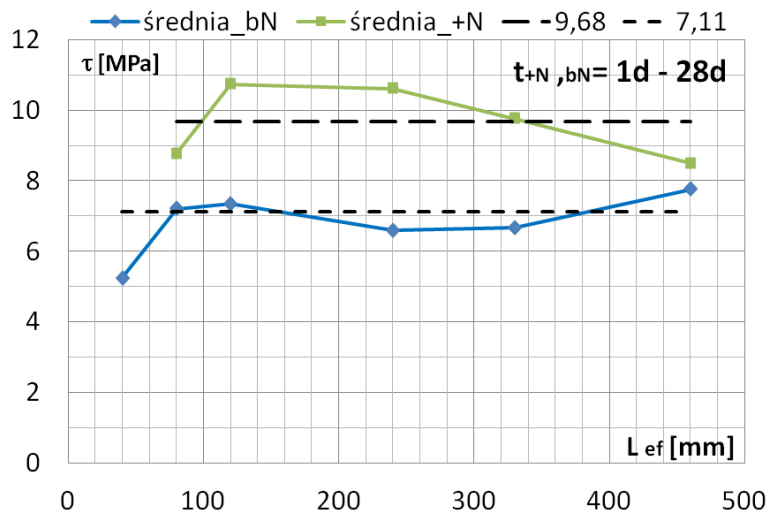


Rys. 8.31 Rozkłady średnich wartości naprężenia przyczepności BWW do splotów 7 φ5 mm bez naciągu i z naciągiem w funkcji wieku betonu

Można wnioskować, że w przypadku splotów 7φ5 mm z naciągiem naprężenie przyczepności rośnie liniowo wraz z wiekiem betonu. Średnie naprężenia przyczepności uzyskane po jednym dniu dojrzewania betonu w przypadku splotów 7φ5 mm z naciągiem są większe o 70,67% od analogicznych wartości dla splotu 7φ5 mm bez naciągu. Tendencja wzrostowa utrzymuje się do 28 dnia i wynosi po 3, 7 i 28 dniach odpowiednio 49,21%, 29,76% i 32,33%. Średnio naprężenie przyczepności w okresie 1 - 28 dni dla splotów 7φ5 mm z naciągiem jest większe od naprężenia przyczepności dla splotów 7φ5 mm bez naciągu o 45,49%. Średnie wartości naprężenia przyczepności wyznaczone dla badanych efektywnych długości przyczepności w czasie od 1 dnia do 28 dnia dla splotów 7φ5 mm bez naciągu i 7φ5 mm z naciągiem wynoszą odpowiednio 6,77 MPa przy współczynniku zmienności  $v = 15,5\%$  oraz 9,68 MPa przy współczynniku zmienności  $v = 7,03\%$ .

Rozkłady średnich wartości naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm bez naciągu i z naciągiem w zależności od efektywnej długości przyczepności przedstawiono na rys. 8.32. Średnie wartości naprężeń przyczepności dla splotów 7φ5 mm bez wprowadzenia sprężenia wykazują tendencję wzrostową aż do efektywnej długości przyczepności 80 i 120 mm z wartością w przybliżeniu odpowiadającą  $\tau = 7,25$  MPa, po czym następuje pewien spadek w formie "siodelka" do wartości poniżej 6,6 MPa, by dla czynnej długości przyczepności  $l = 460$  mm przybrać wartość maksymalną równą około 8 MPa. Wartości naprężeń przyczepności dla splotów z naciągiem osiągają swoje maksimum przy efektywnej długości czynnej  $l = 120$  mm, po czym wykazują tendencje spadkowe, by dla długości przyczepności  $l = 460$  mm przybrać niewiele większą wartość około 8,5 MPa, jak w przypadku splotów 7φ5 mm bez naciągu.

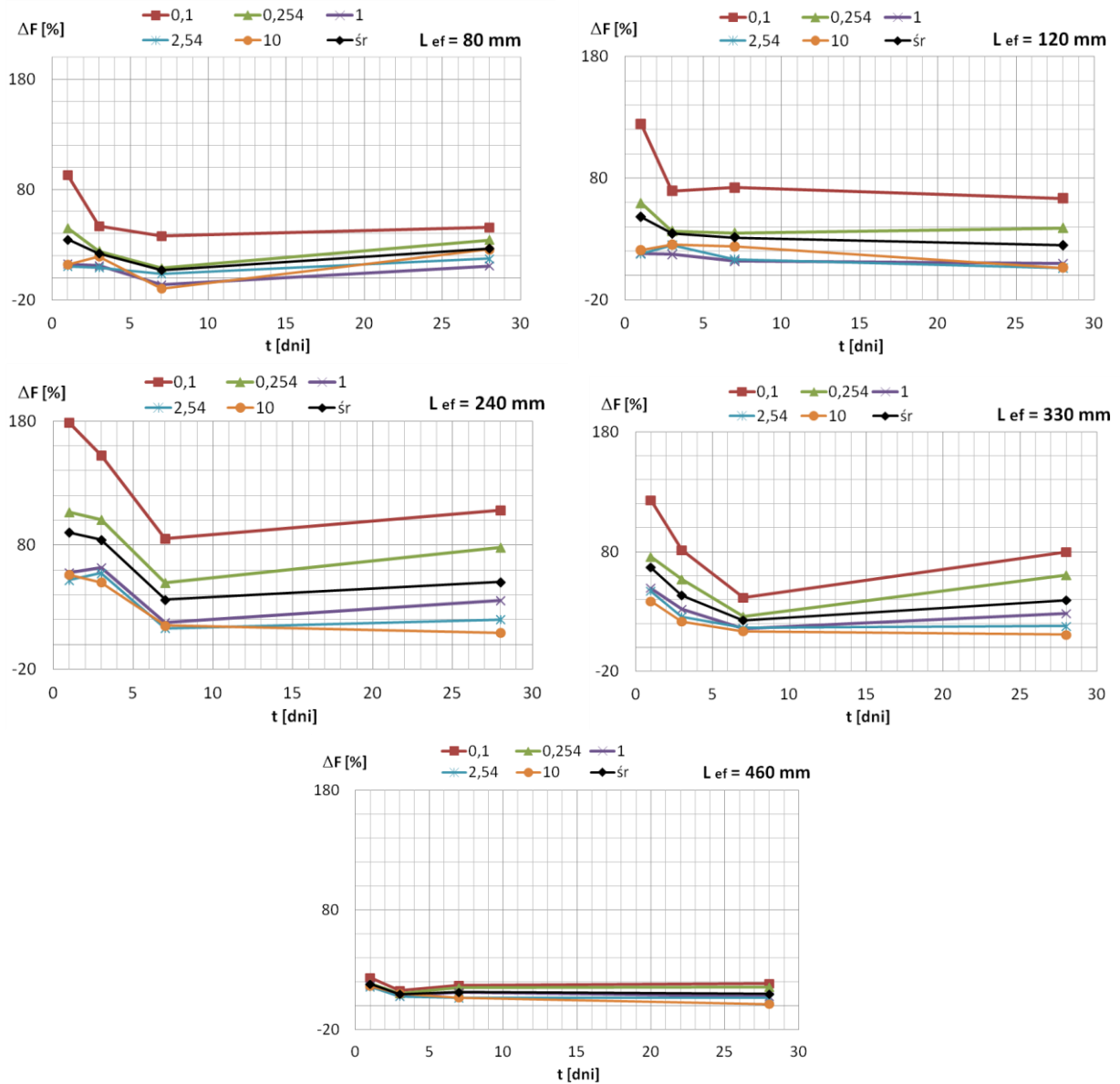
Średnie wartości naprężenia przyczepności wyznaczone dla efektywnych długości przyczepności w przedziale od 40 do 460 mm dla splotów 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu i w przedziale od 80 do 460 mm dla splotów 7 $\phi$ 5 mm z naciągiem wynoszą odpowiednio 7,11 MPa przy współczynniku zmienności  $v = 6,11\%$  oraz 9,68 MPa przy współczynniku zmienności  $v = 9,49\%$ .



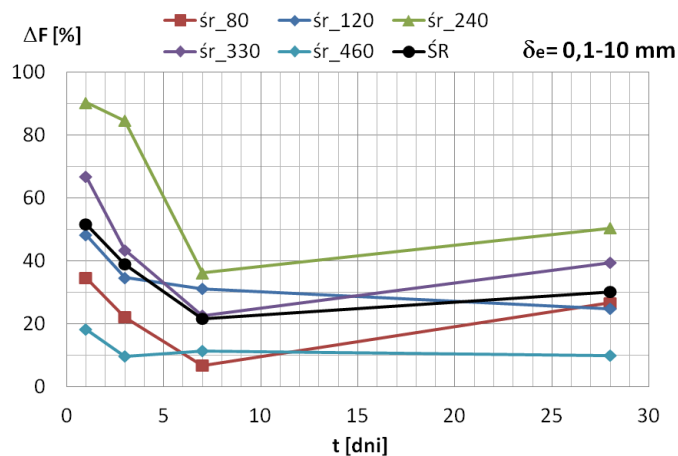
Rys. 8.32 Rozkłady średnich wartości naprężeń przyczepności BWW do splotów 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu i z naciągiem w funkcji efektywnej długości przyczepności.

Na rys. 8.33 przedstawiono rozkłady obliczonych przyrostów średnich wartości sił wyciągających sploty 7 $\phi$ 5 mm z naciągiem i bez naciągu w zależności od wieku betonu dla analizowanych efektywnych długości przyczepności 80, 120, 240, 330 i 460 mm. Na wykresach pominięto przyrosty sił wyznaczonych dla poślizgu 0,01 i 0,0254 mm z uwagi na niestabilność wyników. Największe przyrosty sił wyciągających splot odnotowano po jednym dniu dojrzewania betonu przy poślizgu 0,1 mm dla każdej czynnej długości przyczepności, a najmniejsze dla 10 mm za wyjątkiem splotu o efektywnej długości przyczepności 120 mm. Wyraźną stabilizację przyrostu siły wyciągającej można odnotować dla betonu po 7 dniach dojrzewania. Dla czynnej długości przyczepności wynoszącej 460 mm średni przyrost siły wyciągającej splot po 3, 7 i 28 dniach dojrzewania betonu przy poślizgu 2,54 mm wynosi 5,3%, natomiast przy poślizgu 1,0 mm wynosi 8,9 %. Na każdym wykresie wyznaczono średnią, które zebrano na rys. 8.34. Analiza średnich wykazuje największe przyrosty sił wyciągających dla efektywnej długości czynnej równej 240 mm, które wynoszą po 1 dniu dojrzewania betonu około 90%, natomiast po 28 dniach około 50%. Najmniejsze przyrosty osiągają sploty o efektywnej długości przyczepności równej 460 mm i wynoszą odpowiednio 20% i 10%.

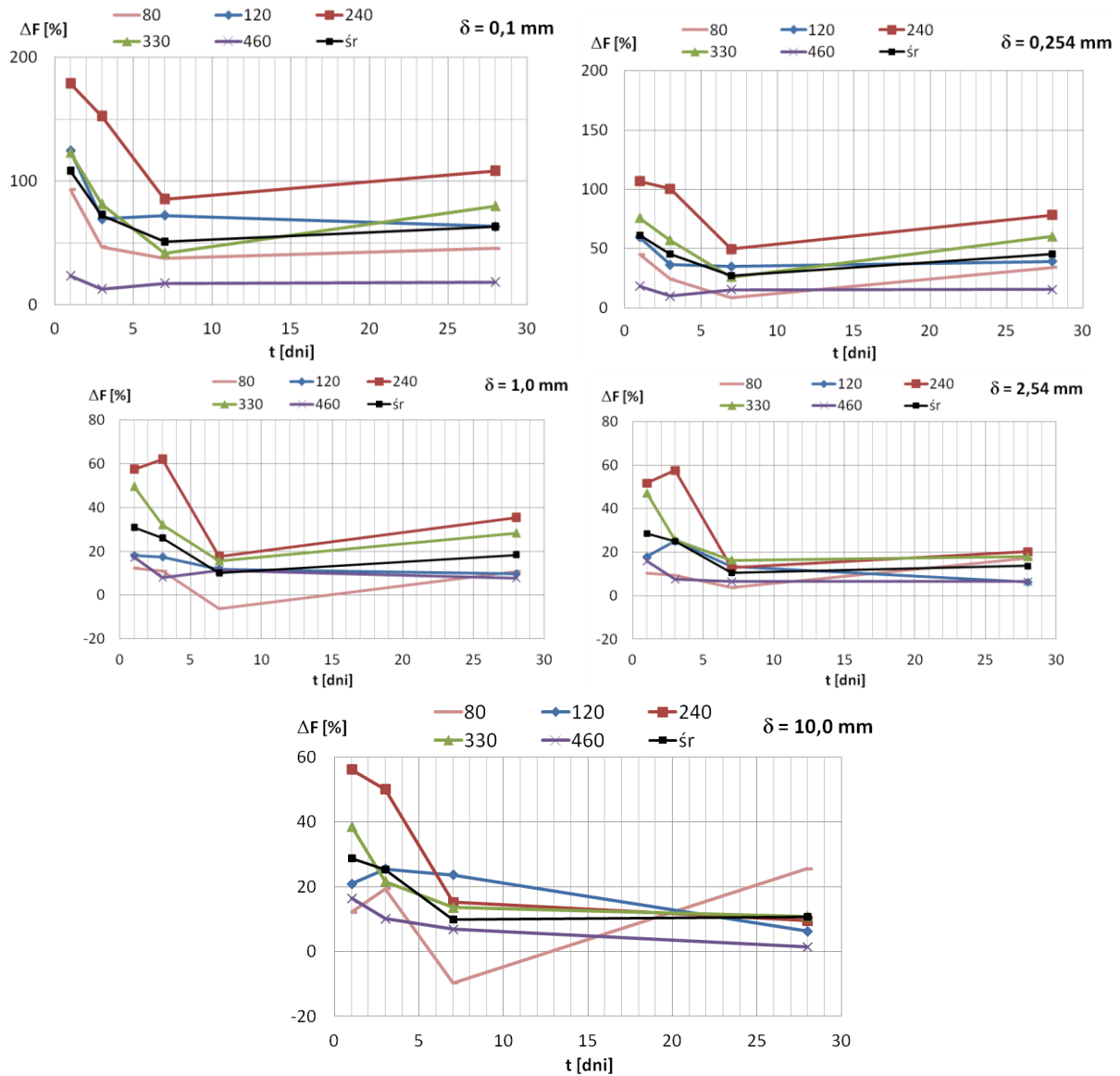




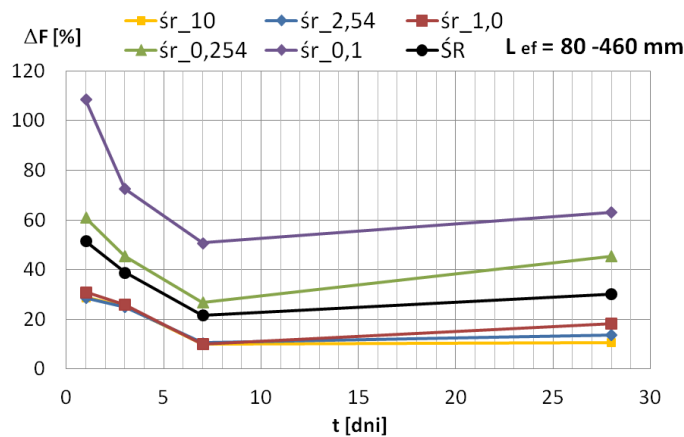
Rys. 8.33 Rozkłady przyrostów średnich wartości sił wyciągających sploty 7 $\phi$ 5 mm z naciągiem i bez naciągu w zależności od wieku betonu



Rys. 8.34 Rozkłady średnich przyrostów sił wyciągających sploty 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu i z naciągiem w funkcji czasu wyrażony w procentach z poszczególnych efektywnych długościach przyczepności dla różnych poziomów poślizgu



Rys. 8.35 Wykres zależności różnic sił wyciągających między splotami  $7\phi 5 \text{ mm}$  bez naciągu i z naciągiem w funkcji czasu wyrażony w procentach dla poszczególnych poziomów poślizgu w poszczególnych efektywnych długościach przyczepności



Rys. 8.36 Zestawienie średnich zależności różnic sił wyciągających między splotami  $7\phi 5 \text{ mm}$  bez naciągu i z naciągiem w funkcji czasu wyrażony w procentach z poszczególnych poziomów poślizgu w różnych efektywnych długościach przyczepności.

Na rys. 8.35 przedstawiono rozkłady obliczonych przyrostów sił dla długości poślizgu 0,1; 0,254; 1; 2,54 i 10 mm. Wykresy przyrostów sił dla poślizgu 0,01 i 0,0254 mm pominięto z uwagi na niestabilność wyników. Największe przyrosty sił wyciągających splot odnotowano po jednym dniu dojrzewania betonu dla czynnej długości przyczepności równej 240 mm na wszystkich poziomach poślizgu. Najniższe przyrosty odnotowuje się dla czynnej długości przyczepności 460 mm. Najbardziej zwartą wiązkę przebiegów można zauważyć przy poślizgu 2,54 mm między 7 a 28 dniem dojrzewania betonu.

Na poszczególnych wykresach na rys. 8.35 utworzono średnie, które zebrano na rys. 8.36. Prawie równoległy przebieg krzywych dla poszczególnych poziomów poślizgu daje obraz powtarzalności wyników ze zmniejszającym się z wiekiem betonu i wielkością poślizgu wpływem wprowadzenia sprężenia na wartości sił wyciągających i naprężeń przyczepności BWW do splotów. Rozkład wartości na poziomie poślizgów 1,0 mm; 2,54 i 10 mm jest prawie identyczny.

#### 8.4.4 Wpływ efektywnej długości przyczepności

Przeprowadzone badania doświadczalne wykazały, że wpływ efektywnej długości na przyczepność BWW do splotów sprężających zależy od rodzaju stalowego splotu. Rozwiązanie konstrukcyjne zamkniętego splotu  $7\phi 5$  mm powoduje, że przy poślizgu 0,1 mm widoczne jest załamanie się wykresu zależności siła wyciągająca - poślizg, co można interpretować jako pokonanie siły przylegania. Przy wzroście siły wyciągającej przemieszczanie się splotu nie następuje w sposób płynny z uwagi na kształt zewnętrznych drutów. Betonowa, spiralnie ułożona bruzda o niewielkiej grubości, utworzona wzdłuż splotów jest ścinania, czemu towarzyszy zauważalny na wykresie uskok. Wartość tego uskoku, wyrażająca się na wykresie zróżnicowaną wartością siły wyciągającej, zależy przede wszystkim od wartości poślizgu splotu bez względu na wiek betonu, jak również od efektywnej długości przyczepności, stąd też trudno w analizowanym przypadku mówić o naprężeniu przyczepności BWW do splotu. Można natomiast w sposób jednoznaczny określić wartość naprężenia przylegania. Obliczone w punkcie 8.3.1 rozkłady średnich wartości naprężenia przylegania BWW do zamkniętych splotów  $7\phi 5$  mm, w zależności od wieku betonu i efektywnej długości przyczepności (40 - 240 mm) naniesiono na rys. 8.29 i 8.30.

W przypadku splotów z drutów okrągłych nie można w sposób jednoznaczny określić naprężenia przylegania. Analizując wykresy przedstawione na rys. 8.8 i 8.14 można sformułować wniosek, że naprężenia przyczepności BWW do splotów okrągłych  $7\phi 4$  mm i  $7\phi 5$  mm zależą od wieku betonu i wartości poślizgu splotu w próbie wyciągania. Mając na uwadze fakt, że niektóre ośrodki badawcze nie dysponują maszynami wytrzymałościowymi umożliwiającymi precyzyjne określenie zależności siła wyciągająca - poślizg, proponuje się stosować pojęcie średniego naprężenia przyczepności BWW do splotów.

Z wykresów przedstawionych na rys. 8.9 i 8.15 widać wyraźnie, że średnie naprężenie przyczepności w niewielkim stopniu zależy od efektywnej długości przyczepności. Istotne różnice występują wraz z wiekiem betonu.

Średnie naprężenie przyczepności BWW do splotów  $7\phi 4$  mm i  $7\phi 5$  mm bez naciągu, w okresie do 28 dni dojrzewania betonu i przy efektywnej długości przyczepności 80 - 460 mm wynosi odpowiednio 4,51 MPa ( $\nu = 4,22\%$ ) 7,07 MPa ( $\nu = 6,97\%$ ). W przypadku splotów  $7\phi 5$  mm pod naciągiem analogicznie obliczone średnie naprężenie przyczepności wynosi 9,69 MPa ( $\nu = 9,49\%$ ).

Tabela 8.8 Stosunek średnich naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm z naciągiem do 7φ5 mm bez naciągu w zależności od wieku betonu dla poszczególnych poziomów poślizgu

δ [mm]	$\tau_{+N}/\tau_{BN}$ [-]			
	1d	3d	7d	28d
0,1	2,09	1,73	1,51	1,63
0,254	1,61	1,46	1,27	1,45
1	1,31	1,26	1,10	1,18
2,54	1,29	1,25	1,11	1,13
10	1,29	1,25	1,10	1,10
śr [-]	1,52	1,39	1,22	1,30
s [-]	0,31	0,19	0,16	0,21
v [%]	20,45	13,34	13,12	16,05

Tabela 8.9 Stosunek średnich naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm z naciągiem do 7φ5 mm bez naciągu w zależności od wieku betonu dla poszczególnych efektywnych długości przyczepności

l <sub>ef</sub>	τ [MPa]			
	1d	3d	7d	28d
80	1,35	1,22	1,07	1,27
120	1,48	1,35	1,31	1,25
240	1,90	1,84	1,36	1,50
330	1,67	1,43	1,23	1,39
460	1,18	1,10	1,11	1,08
śr [MPa]	1,52	1,39	1,22	1,30
s [-]	0,25	0,25	0,11	0,14
v [%]	16,52	18,35	9,23	11,00

W tabeli 8.8 zestawiono stosunki średnich wartości naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm z naciągiem do splotów 7φ5 mm bez naciągu, w zależności od wieku betonu dla poszczególnych poziomów poślizgu. Z kolei w tabeli 8.9 podano stosunki średnich wartości naprężeń przyczepności 7φ5 mm z naciągiem do splotów 7φ5 mm bez naciągu z zależności od wieku betonu dla poszczególnych efektywnych długości przyczepności. Na podstawie analizy zestawionych wyników można sformułować następujące wnioski:

- Wpływ naciągu splotów na średnie naprężenie przyczepności maleje wraz z wiekiem betonu.
- Średnie naprężenie przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm z naciągiem po 1 dniu dojrzewania betonu są większe o 50% w stosunku do analogicznie obliczonych naprężeń dla splotów 7φ5 mm bez naciągu w zależności od efektywnej długości przyczepności.
- Najmniejszy wpływ naciągu splotu na naprężenia przyczepności BWW widoczny jest dla efektywnej długości przyczepności wynoszącej 460 mm. W okresie od 3 do 28 dnia dojrzewania betonu wzrost naprężenia przyczepności z tytułu sprężenia elementu wynosi 10%. Po jednym dniu dojrzewania betonu wzrost ten wynosi 18%.
- Najbardziej regularne zmiany stosunku obu naprężeń przyczepności odnotowano dla poślizgów 1,0; 2,54 i 10 mm. Z uwagi na możliwość występowania trudności z określeniem siły wyciągającej przy poślizgu 10 mm proponuje się za miarodajną uznać wartość 2,54 mm.

## 9 BADANIA DOŚWIADCZALNE DŁUGOŚCI TRANSMISJI

Badania doświadczalne przeprowadzono w Zakładzie Prefabrykacji firmy Precon Polska sp. z o. o. podczas produkcji prefabrykowanych elementów ściany zbiornika cylindrycznego o rozwiązaniu systemowym C-8 oraz w Laboratorium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej podczas produkcji elementu tarczowego według projektu indywidualnego dla celów badawczych.

### 9.1 Badania elementów systemu C-8 ściany zbiornika

#### 9.1.1 Produkcja płyt

Prefabrykowane elementy ściany zbiornika produkowane były w Zakładzie Prefabrykacji na torze naciągowym o długości 20,16 m (rys. 9.1). W analizowanym przypadku w jednym cyklu produkcyjnym betonowane były 3 prefabrykowane elementy o długości 4,65 m. Do wykonania płyt stosowano 8 splotów typu 7  $\phi$  4 mm o nominalnej średnicy 13 mm i powierzchni przekroju poprzecznego 100 mm<sup>2</sup> produkowanych przez firmę TYSCA PSC, Santander - Hiszpania. Średnia wytrzymałość na zerwanie splotu według atestu wynosiła 1874,8 MPa, umowna granica plastyczności na poziomie odkształcenia 0,1% wynosiła 1712,2 MPa, a moduł sprężystości 193 683 MPa.

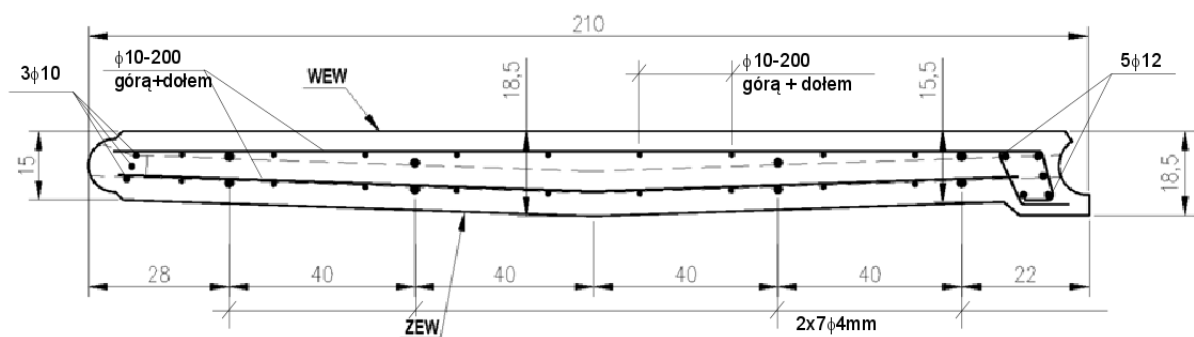
Prefabrykowany element zbrojony był dwoma siatkami wykonanymi z prętów  $\phi$  8 mm co 0,20 m w kierunku podłużnym oraz z prętów  $\phi$  10 mm co 0,20 m w kierunku poprzecznym ze stali A III N. Rozmieszczenia siatek zbrojeniowych i splotów w przekroju poprzecznym płyty przedstawiono na rys. 9.2.

Badania przeprowadzono na pierwszej płycie od strony agregatu naciągowego (strona czynna w chwili sprężania elementu). Po ułożeniu zbrojenia zwykłego i splotów sprężających zrealizowano naciąg o sile docelowej 130 kN we wszystkich splotach. W dalszej kolejności ułożono mieszankę betonową, zagęszczono i po osadzeniu wszystkich niezbędnych elementów montażowych płyty, zatarto powierzchnię górną (wewnętrzna powierzchnia ściany zbiornika). Wszystkie płyty na torze naciągowym zostały przykryte zestawem trzech mat osłaniających elementy przed odprowadzeniem ciepła i zapewniającymi stałe warunki dojrzewania.

Podstawą do podjęcia decyzji o zwolnieniu naciągu była określona doświadczalnie po 20 godzinach dojrzewania wytrzymałość betonu na ściskanie wynosząca 41 MPa.



Rys. 9.1 Ogólny widok toru naciągowego przed ułożeniem betonu (agregaty naciągowe u góry rysunku)

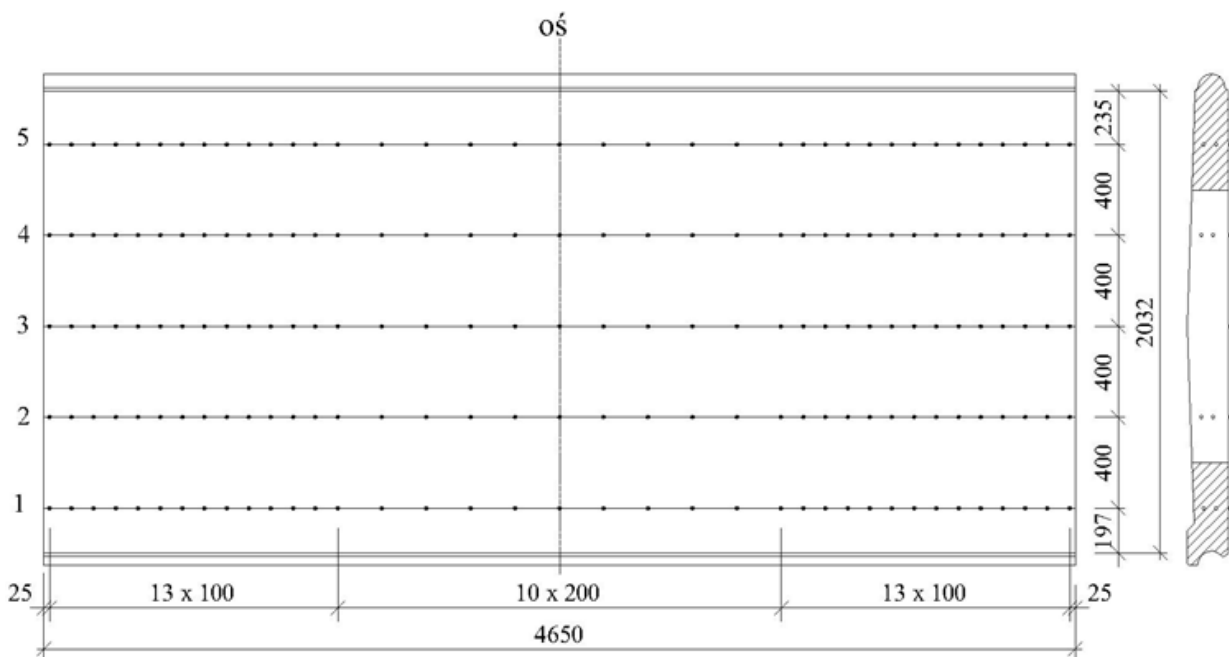


Rys. 9.2 Przekrój poprzeczny prefabrykowanego elementu

### 9.1.2 Badania odkształceń betonu po zwolnieniu naciągu

Przed zwolnieniem naciągu naklejono punkty pomiarowe wzdłuż pięciu linii (rys. 9.3). Linie 1, 2, 4 i 5 pokrywały się z trasą splotów sprężających, natomiast linia 3 poprowadzona była wzdłuż podłużnej osi płyty. Temperatura górnej powierzchni płyty wynosiła 35°C. Na wewnętrznej powierzchni elementu prefabrykowanego reper pierwszy i ostatni naklejono w odległości 25 mm od końców płyty. Następnie idąc w kierunku poprzecznej osi płyty naklejono punkty pomiarowe w odległości co 100 mm, a dalej co 200 mm. Wzajemnie usytuowanie punktów pomiarowych i przekrój poprzeczny płyty przedstawiono na rys. 9.3. Punkty pomiarowe naklejono na płaskiej powierzchni elementu (wewnętrzna strona ściany zbiornika). Na przewidywanych odcinkach długości transmisji (początek i koniec płyty), punkty pomiarowe rozmieszczono co 100 mm.

Pomiary odkształceń betonu wykonano za pomocą czujników nasadowych typu DEMEC o bazie pomiarowej 100 i 200 mm, dla których stała  $k$  wynosi odpowiednio  $1,575 \cdot 10^{-5}$  oraz  $0,789 \cdot 10^{-5}$ . Różnice odczytów dokonanych przed i po zwolnieniu naciągu pomnożone przez stałą czujnika dają rzeczywiste odkształcenia betonu w danym okresie dojrzewania. W pracy [149] podano wyniki otrzymane dla splotów usytuowanych wzdłuż linii 1 i 5 oraz odpowiadające im wykresy, na podstawie których określono długość transmisji po stronie czynnej i biernej. Przez stronę czynną należy rozumieć miejsce usytuowania pras naciągowych. Zwalnianie naciągu realizowano od strony biernej. Sposób zwalniania naciągu przedstawiono na rys. 9.4. Po zwolnieniu naciągu sploty były przecinane kolejno między płytami za pomocą piły tarczowej począwszy od bloku oporowego, przy którym zwolniono naciąg. Jako ostatnie przecięto sploty między lewą krawędzią badanej płyty a prasami naciągowymi, a zatem od lewej strony płyty (rys. 9.3) należało się spodziewać mniejszych długości transmisji siły sprężającej.



Rys. 9.3 Ogólny widok prefabrykowanej płyty i rozmieszczenie punktów pomiarowych





Rys. 9.4 Widok zakotwienia biernego przed zwolnieniem siły naciągowej



Rys. 9.5 Ogólny widok prefabrykowanej płyty i rozmieszczenie punktów pomiarowych



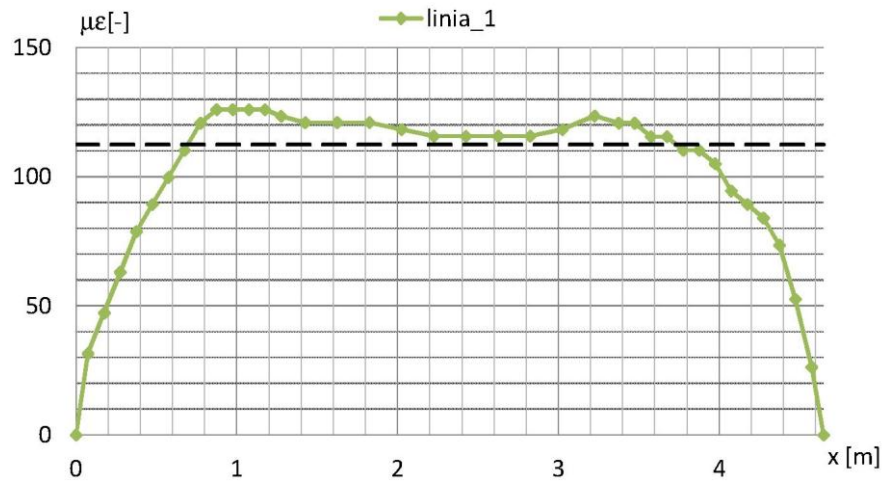
Ogólny widok płyty po przecięciu splotów, a przed rozformowaniem przedstawiono na rys. 9.5. Na górnej powierzchni płyty widoczne są repery naklejone wzdłuż linii pomiarowych. Wygładzone rozkłady odkształceń betonu określone wzdłuż linii pomiarowych przedstawiono kolejno na rys. 9.6, 9.7, 9.8, 9.9 i 9.10. Wygładzenie wykonano zgodnie z zaproponowaną [120, 145] i powszechnie akceptowaną procedurą (4.16). Obliczone na podstawie pomiarów wartości odkształceń betonu naniesiono w środku baz pomiarowych.

Do obliczenia wartości średniego odkształcenia betonu w tzw. strefie równomiernych odkształceń betonu (poza długością transmisji), wzdłuż poszczególnych linii pomiarowych, wzięto pod uwagę wartości odkształceń obliczone z pomiarów na długości płyty między 0,5 a 4,1 m. Otrzymane wartości zestawiono w tab. 9.1. Do wyznaczenia długości transmisji zastosowano procedurę 95% wartości średniego odkształcenia (95% AMS) polegającą na wyznaczeniu punktów przecięcia wygładzonego wykresu odkształceń betonu z prostą równoległą do osi odciętych o wartości odpowiadającej 95% średniego odkształcenia betonu w każdym rozpatrywanym przypadku (rys. 9.6 do 9.10). Wyznaczone długości transmisji zestawiono w tab. 9.1. Dla celów studialnych w tab. 9.1 podano również "hipotetyczną" długość transmisji (brak cięgien sprężających) wzdłuż linii 3.

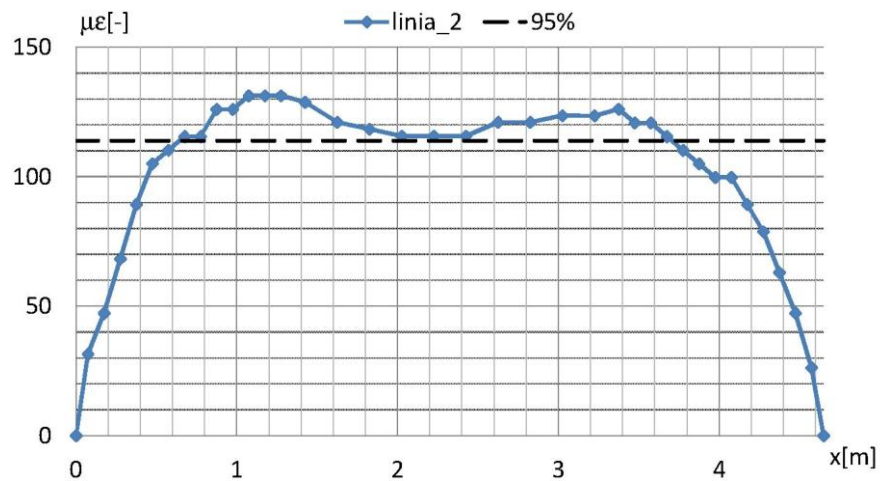
Tabela 9.1 Długości transmisji dla poszczególnych linii pomiarowych

Linie pomiarowe	Średnie wartości odkształceń betonu [με]	Długość transmisji $L_t$ [mm]	
		strona pras naciągowych	strona zwalniania naciągu
5	120,84	700	950
4	117,81	700	950
3	116,25	750	950
2	119,02	550	900
1	116,60	700	800
Wartości średnie	1, 2, 4, 5	720	950
	1, 2, 3, 4, 5	700	950

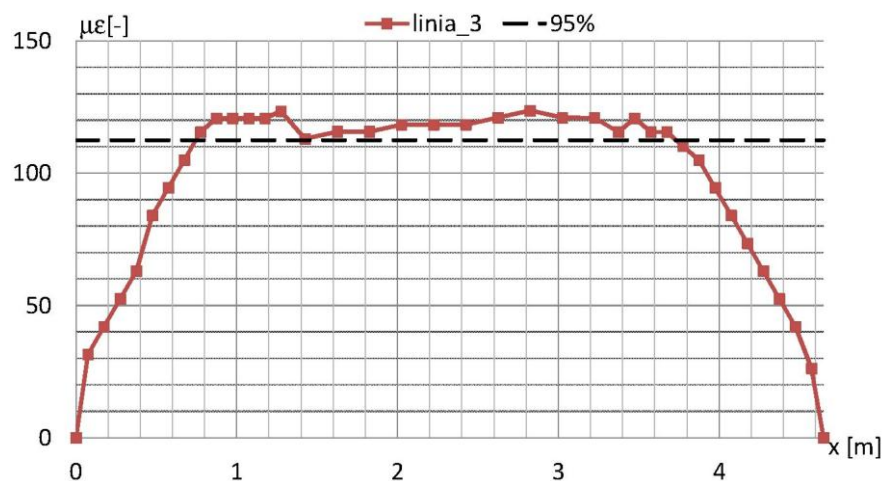
Na rys. 9.11 podano rozkład średnich odkształceń betonu otrzymanych w linii splotów (1, 2, 4 i 5) w porównaniu z odkształceniem betonu określonym wzdłuż podłużnej osi płyty (linia 3). Na obu końcach płyty w odległości między 0,1 m a 0,8 m (długość transmisji) widoczne są mniejsze odkształcenia betonu w osi płyty w odniesieniu do średnich wartości odkształceń betonu wzdłuż splotów sprężających. Różnica ta nie przekracza 26,15 %. Dla celów porównawczych na rys. 9.12 zestawiono rozkłady odkształceń betonu otrzymane z badań doświadczalnych wzdłuż pięciu linii pomiarowych. Rozkład średnich wartości odkształceń betonu obliczonych z pięciu linii pomiarowych przedstawiono na rys. 9.13. Obliczona różnica mikrodeformacji między maksymalną wartością w "piku" a wartością w "siodełku" między "pikami" wynosi 8,7 co stanowi 6,9 % w odniesieniu do wartości maksymalnej (w przypadku czterech linii jest to wartość 10,3 równa 10,3 %). Długości transmisji obliczone dla uśrednionych rozkładów odkształceń z czterech (1, 2, 4 i 5) i pięciu linii pomiarowych podano również w tab. 9.1. Na rysunku 9.14 przedstawiono rozkłady współczynników zmienności do wartości średnich odkształceń betonu z czterech i pięciu linii pomiarowych. Największe wartości współczynników zmienności na obu rysunkach widoczne są na długościach transmisji z obu końców płyty. Włączenie linii 3 do wartości średniej powoduje zwiększenie współczynnika zmienności zwłaszcza w obszarach na długości transmisji.



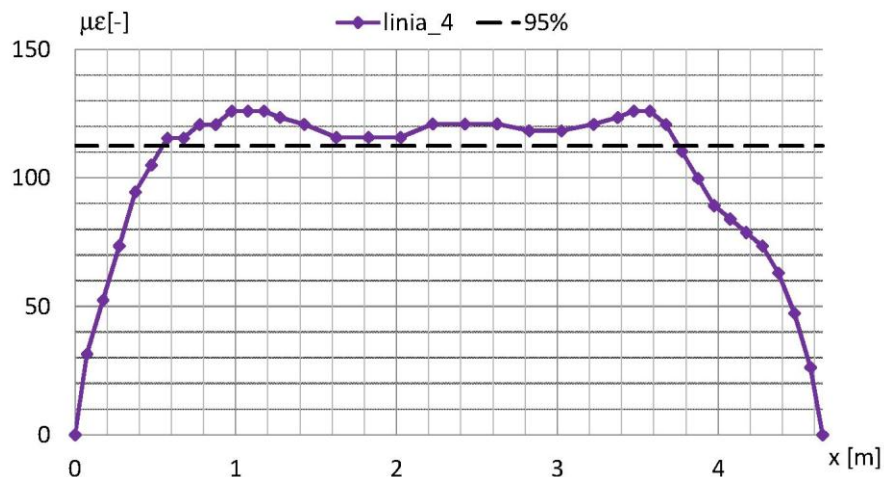
Rys. 9.6 Wygładzone rozkłady odkształceń (μϵ) betonu określone wzdłuż linii pomiarowej 1.



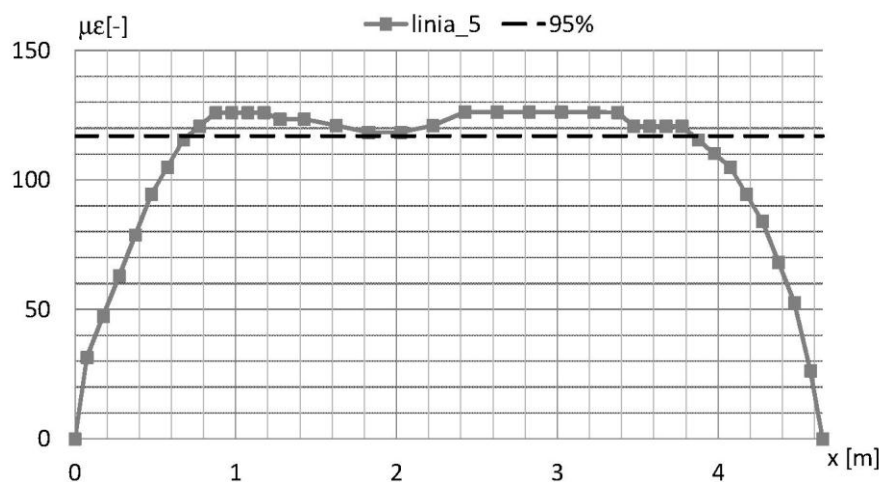
Rys. 9.7 Wygładzone rozkłady odkształceń (μϵ) betonu określone wzdłuż linii pomiarowej 2.



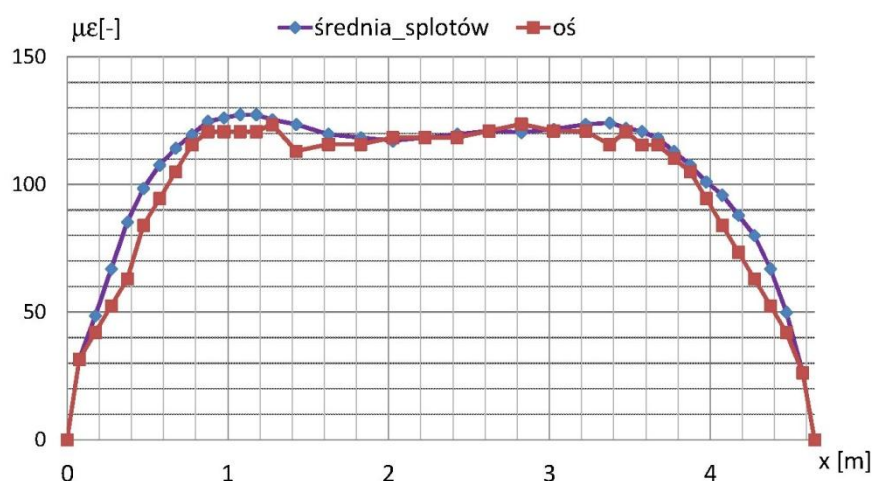
Rys. 9.8 Wygładzone rozkłady odkształceń (μϵ) betonu określone wzdłuż linii pomiarowej 3.



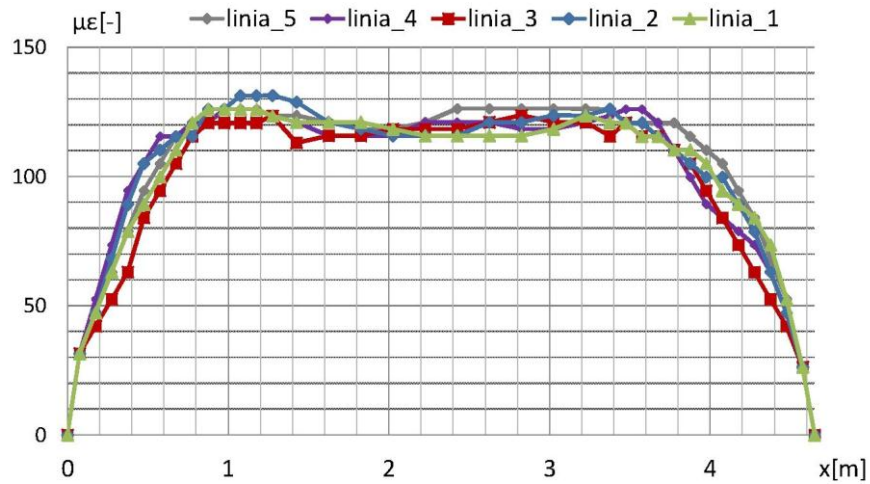
Rys. 9.9 Wyglądzone rozkłady odkształceń (μϵ) betonu określone wzdłuż linii pomiarowej 4.



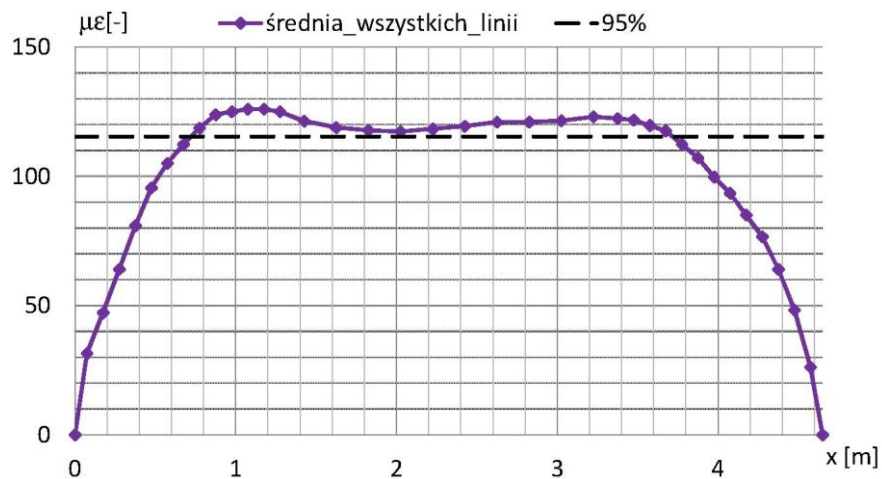
Rys. 9.10 Wyglądzone rozkłady odkształceń (μϵ) betonu określone wzdłuż linii pomiarowej 5.



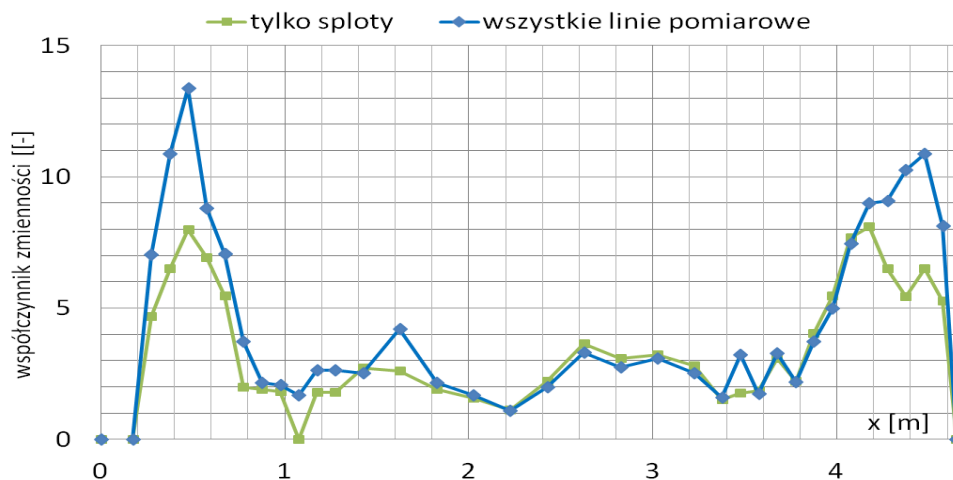
Rys. 9.11 Rozkład średnich odkształceń (μϵ) betonu otrzymanych w linii splotów (linia 1, 2, 4 i 5) w porównaniu z odkształceniami (μϵ) betonu określonymi wzdłuż podłużnej osi płyty (linia 3)



Rys. 9.12 Zestawienie rozkładów odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu otrzymane z badań doświadczalnych pięciu linii pomiarowych



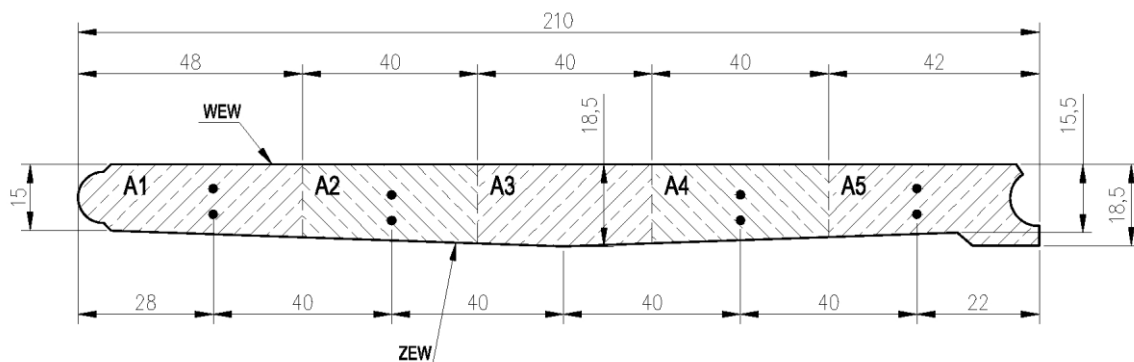
Rys. 9.13 Rozkład średnich wartości odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu z pięciu linii pomiarowych



Rys. 9.14 Rozkłady współczynnika zmienności do wartości średnich odkształceń betonu z czterech i pięciu linii pomiarowych.

### 9.1.3 Analiza otrzymanych wyników

Na rysunku 9.2 będącym przekrojem poprzecznym płyty naniesiono miejsce usytuowania splotów oraz siatek zbrojeniowych. Cały przekrój podzielono na pięć części (rys. 9.15), a następnie dla każdej z nich obliczono powierzchnię przekroju poprzecznego. W tabeli 9.2 zestawiono powierzchnie przekroju od  $A_1$  do  $A_5$ , a następnie przyjmując szerokość płyty 2,1 m obliczono zastępczą grubość płyty, która wynosi 169 mm. W dalszej kolejności przyjmując właściwości mechaniczne betonu, stali sprężającej oraz wartość siły naciągowej 130 kN, obliczono siłę po stratach doraźnych w chwili zwalniania naciągu wynoszącą 123,33 kN. Przyjmując te wartości sił oraz rzeczywiste powierzchnie przekroju płyty  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  i  $A_5$  wyznaczono średnie naprężenia w betonie  $\sigma_{cp}$ , jakie mogą wystąpić w połowie rozpiętości płyty wzdłuż cięgien sprężających. Średnie naprężenie w przekroju poprzecznym płyty obliczone przy przyjęciu 8 splotów działających na całkowity przekrój płyty wynosi 2,78 MPa. W tabeli 9.2 podano również obliczone wartości odkształceń betonu odpowiadające wyznaczonym naprężeniom przy przyjętym module sprężystości  $E = 26\ 000$  MPa.



Rys. 9.15 Podział przekroju płyty na pięć części

Tabela 9.2 Zestawienie wartości naprężeń i odkształceń w betonie przypadających na poszczególne powierzchnie

pole powierzchni [cm <sup>2</sup> ]	naprężenie w betonie [MPa]	odkształcenie betonu [ $\mu\epsilon$ ]
$A_1 = 686,34$	$\sigma_{cp} = 3,59$	$\epsilon_c = 138,1$
$A_2 = 684,84$	$\sigma_{cp} = 3,60$	$\epsilon_c = 138,5$
$A_3 = 726,44$		
$A_4 = 686,64$	$\sigma_{cp} = 3,59$	$\epsilon_c = 138,1$
$A_5 = 762,84$	$\sigma_{cp} = 3,23$	$\epsilon_c = 124,2$

$$\Sigma = 3547,1$$

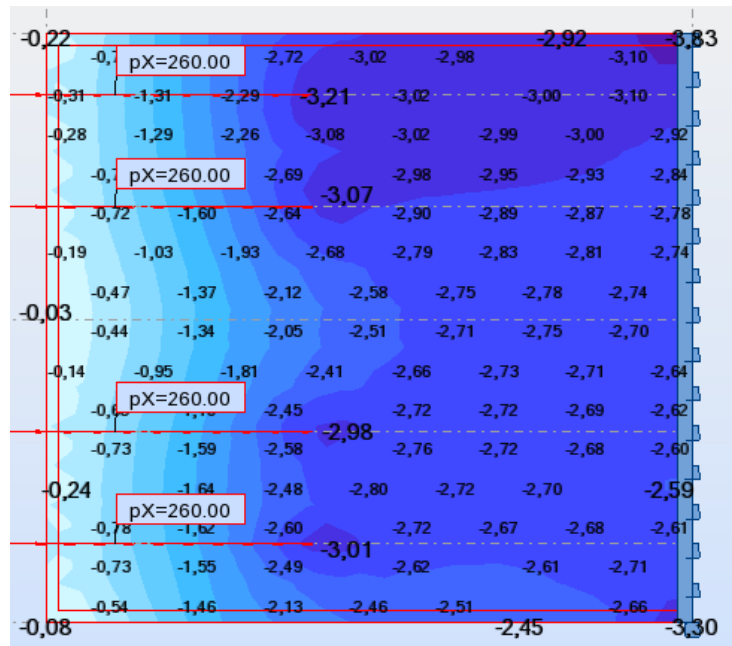
$$d = 3547,1/210 = 16,9 \text{ cm}$$

Analizę rozkładu naprężeń w płycie pod wpływem obciążenia od sprężenia przeprowadzono metodą elementów skończonych w programie ROBOT przyjmując następujące dane wyjściowe:

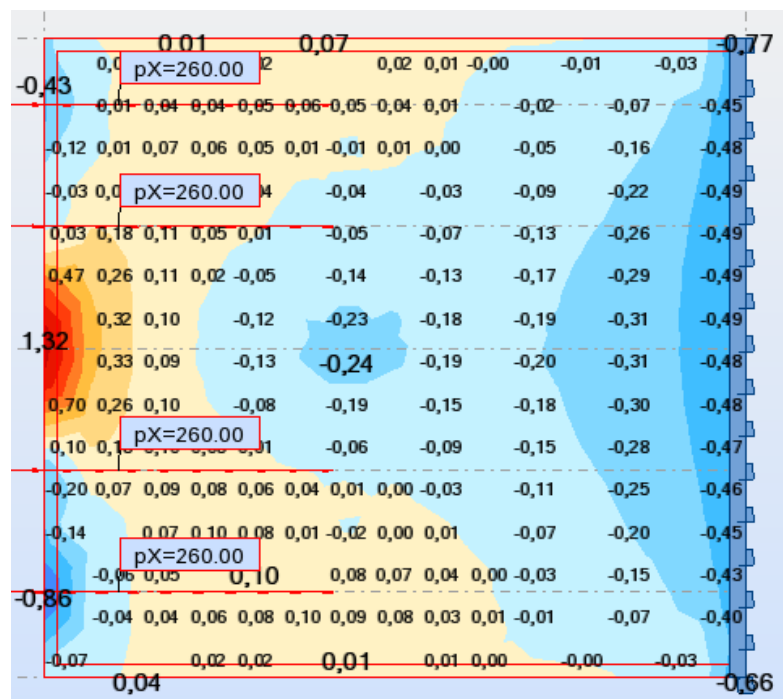
- wartość siły sprężającej w cięgnię 7 $\phi$ 4 mm po stratach doraźnych w chwili zwalniania naciągu  $P_{m0} = 123,33$  kN.
- wytrzymałość betonu na ściskanie w chwili zwalniania naciągu  $f_c = 35,6$  MPa







Rys. 9.18 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym płyty dla długości transmisji 950 mm (strona zwalniania naciągu)



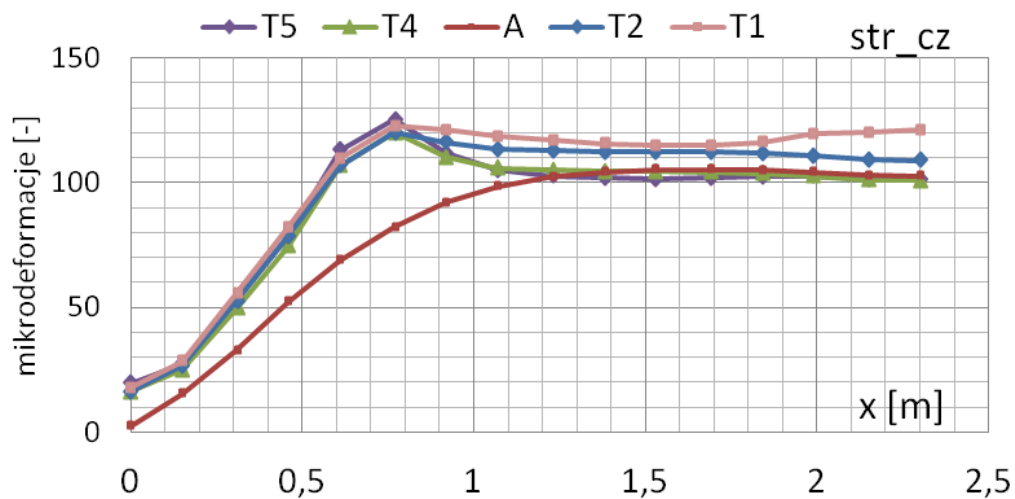
Rys. 9.19 Mapa naprężeń w kierunku poprzecznym płyty dla długości transmisji 950 mm (strona zwalniania naciągu)

Otrzymane mapy naprężeń w kierunku podłużnym i poprzecznym płyty dla długości transmisji 700 mm przedstawiono odpowiednio na rys. 9.16. i 9.17. Analogiczne mapy naprężeń w płycie dla długości transmisji 950 mm przedstawiono odpowiednio na rys. 9.18 i 9.19. Analizując rozkłady naprężeń w kierunku podłużnym płyty można zauważyć znaczące wartości naprężeń (piki) na końcach długości transmisji wzdłuż 1, 2, 4 i 5 linii pomiarowej. Większe wartości naprężeń ściskających występują przy mniejszych wartościach długości transmisji siły naciągowej. Poza długościami transmisji naprężenia

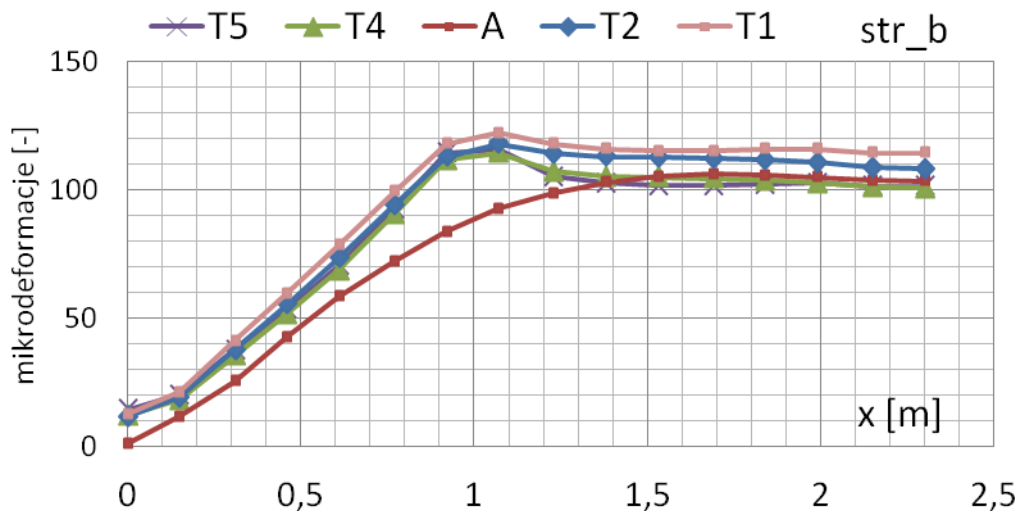


ściskające stabilizują się na całej szerokości płyty, a ich średnia wartość zbliżona jest do wartości 2,78 MPa obliczonej z podzielenia całkowitej siły sprężającej po stratach doraźnych ( $8P_{m0}$ ) przez sprowadzony przekrój poprzeczny płyty ( $169 \times 2100 \text{ mm}^2$ ).

Zdecydowanie niższe wartości naprężeń ściskających występują wzdłuż podłużnej osi płyty (linia pomiarowa 3) w obszarze długości transmisji. W celu wykazania różnic obliczono rozkłady odkształceń ściskających w betonie wzdłuż pięciu linii pomiarowych dla długości transmisji 700 mm i 950 mm, a otrzymane wyniki przedstawiono odpowiednio na rys. 9.20 i 9.21. Widoczna jest zdecydowanie większa różnica odkształceń podłużnych w betonie na długości transmisji wzdłuż linii splotów a osią elementu (brak cięgna sprężającego) dochodząca do 35% przy długości transmisji 700 mm. Analizując wyniki z badań doświadczalnych (rys. 9.11) różnica nie przekracza 15%. Stwierdzone rozbieżności wyników należy tłumaczyć obecnością zbrojenia zwykłego (dwie siatki zbrojeniowe w płycie), którego obecność nie została uwzględniona w metodzie elementów skończonych.



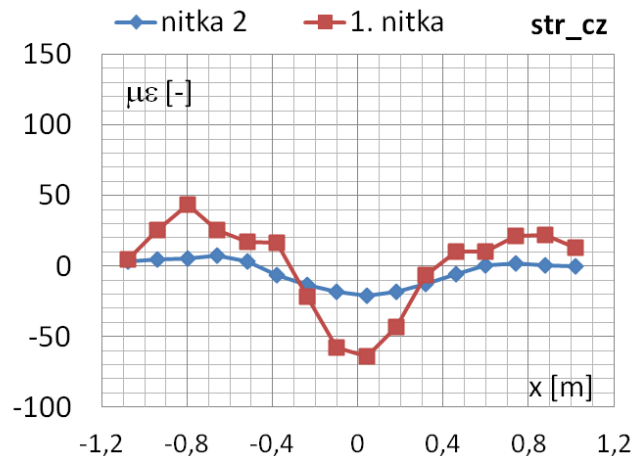
Rys. 9.20 Rozkłady odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) w betonie wzdłuż pięciu linii pomiarowych dla długości transmisji 700 mm (MES)



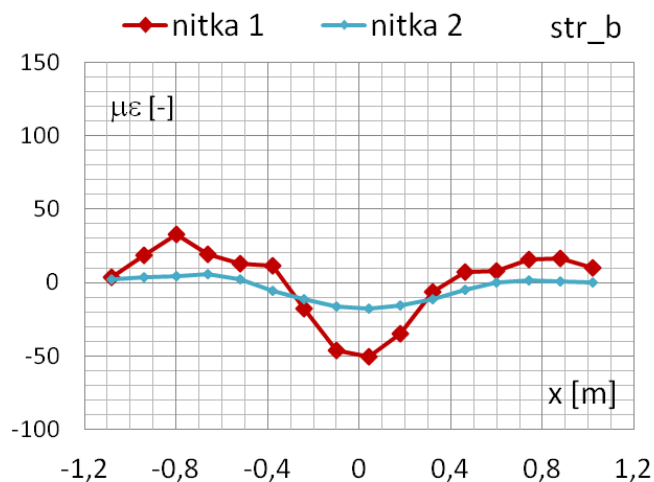
Rys. 9.21 Rozkłady odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) w betonie wzdłuż pięciu linii pomiarowych dla długości transmisji 950 mm (MES)

Analizując rozkłady naprężeń w kierunku poprzecznym płyty można zauważyć naprężenia rozciągające na początku i końcu płyty wzdłuż osi podłużnej na długości 200 mm. Wartości tych naprężeń (1,66 MPa) są większe przy mniejszych długościach transmisji (700 mm) i nie przekraczają wytrzymałości betonu na osiowe rozciąganie w chwili zwolnienia naciągu.

Na rysunkach 9.22 i 9.23 przedstawiono obliczone (MES) rozkłady odkształceń betonu w kierunku poprzecznym płyty na jej krawędzi (linia 1) oraz w odległości 150 mm (linia 2) odpowiednio dla długości transmisji 700 i 950 mm (znak minus oznacza rozciąganie). Większe wartości naprężeń rozciągających występują w przypadku mniejszych długości transmisji. Należy zauważyć, że mimo znacznych naprężeń rozciągających występujących w betonie w chwili zwalniania naciągu, nie zarejestrowano żadnych rys w podłużnej osi płyty, co wynika z odpowiedniej wytrzymałości betonu na rozciąganie i obecności dwóch siatek zbrojonych w prefabrykowanym elemencie.



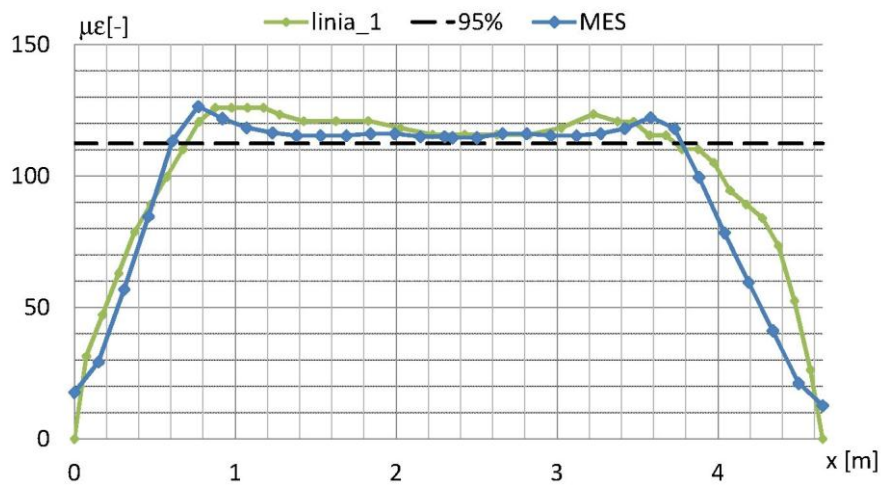
Rys. 9.22 Rozkłady odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) poprzecznych dla długości transmisji 700 mm (strona pras naciągowych) (MES)



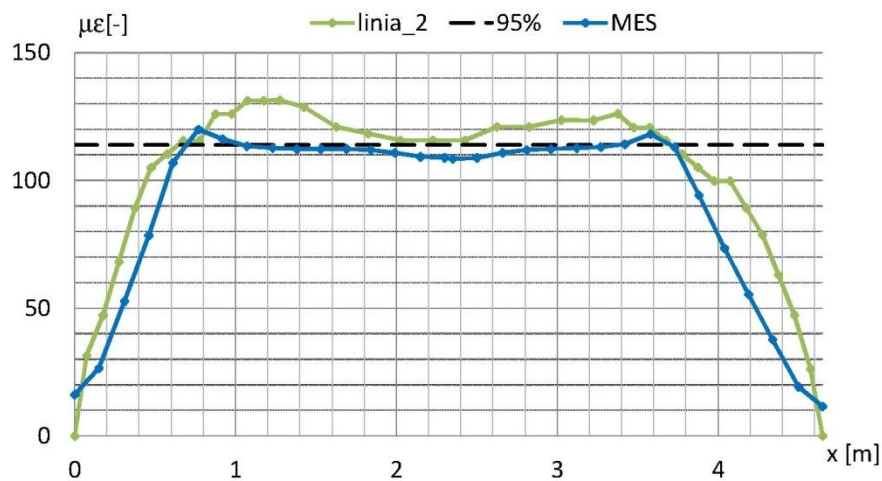
Rys. 9.23 Rozkłady odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) poprzecznych dla długości transmisji 950 mm (strona zwolnienia naciągu) (MES)

Obecnością zbrojenia zwykłego można wytłumaczyć również stwierdzony doświadczalnie prawie równomierny rozwój odkształceń betonu w kierunku podłużnym płyty wzdłuż pięciu linii pomiarowych (rys. 9.12). Doświadczalnie wykazane różnice odkształceń betonu między "pikami" i poza długościami transmisji (dla wykresów wygładzonych) są mniejsze niż to wynika z obliczeń metodą elementów skończonych (tab. 9.3). Na rysunkach 9.24 - 9.28 nałożono rozkłady mikrodeformacji w betonie obliczone wg MES z wyznaczonymi doświadczalnie dla poszczególnych linii pomiarowych. Dla każdego

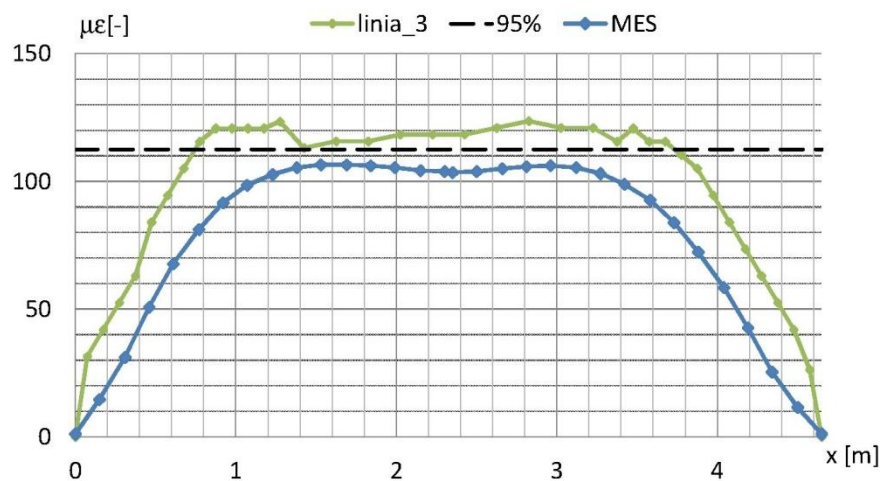
przypadku naniesiono wartość średnią równą 95% AMS. Wzdłuż splotów sprężających punkty przecięcia przebiegów mikrodeformacji doświadczalnych i obliczonych z linią reprezentującą 95% AMS są zbliżone do wyznaczonej wartości średniej długości transmisji, w przypadku linii 3 widać wyraźne różnice.



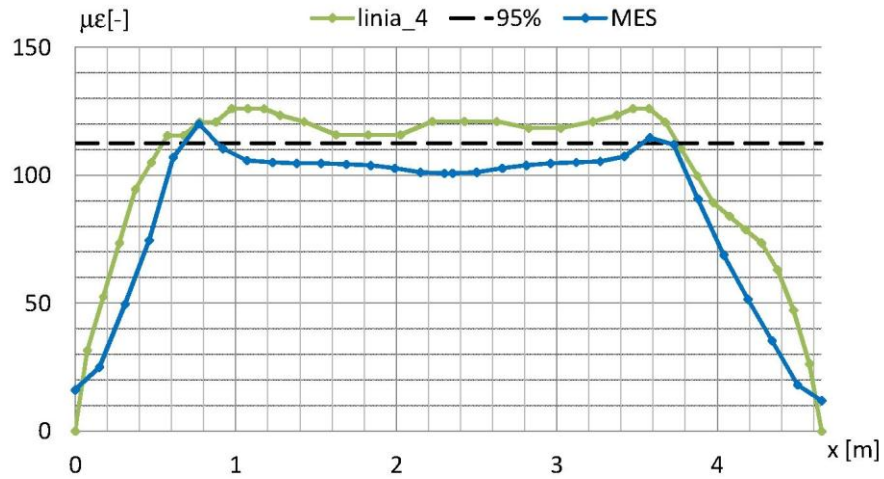
Rys. 9.24 Porównanie rzeczywistych odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) z numerycznymi (linia 1)



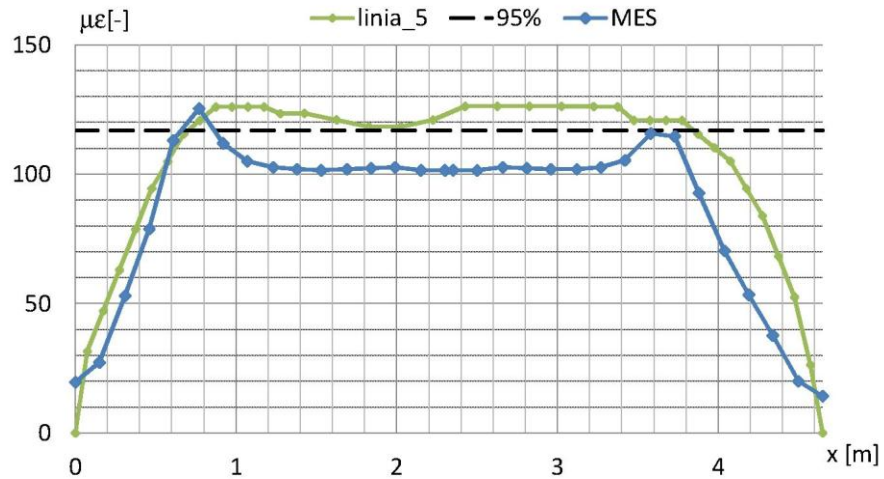
Rys. 9.25 Porównanie rzeczywistych odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) z numerycznymi (linia 2)



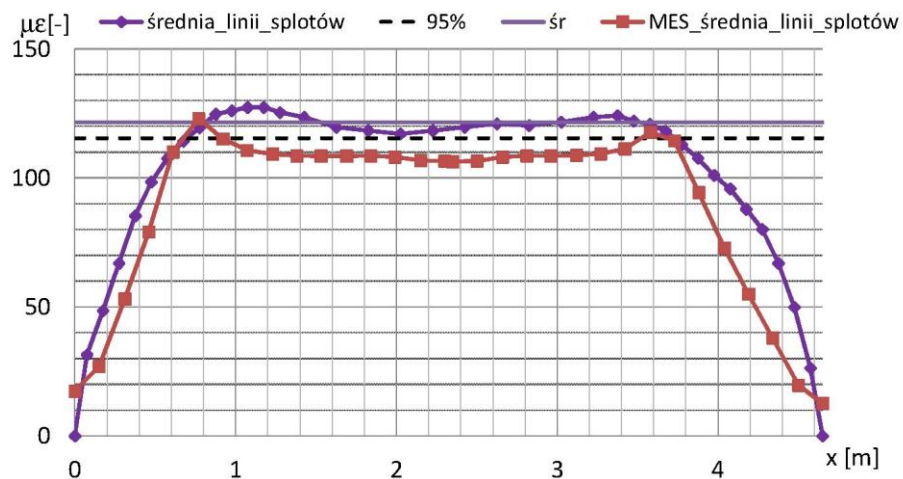
Rys. 9.26 Porównanie rzeczywistych odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) z numerycznymi (linia 3)



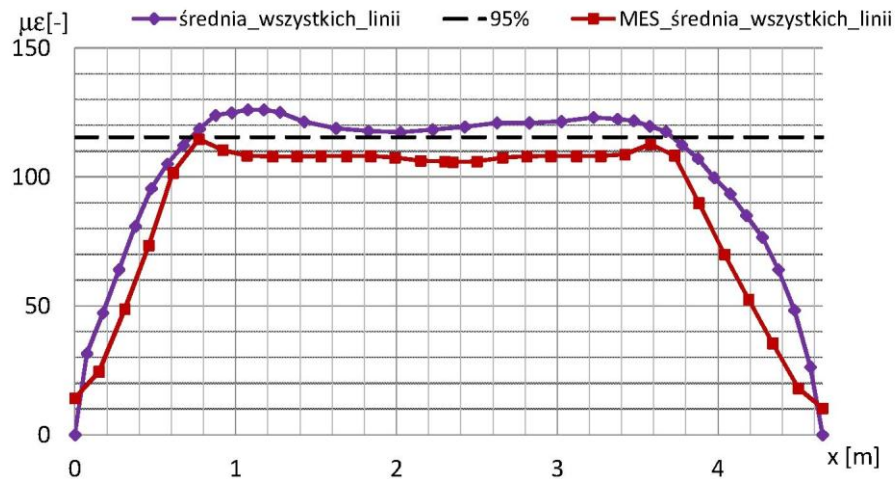
Rys. 9.27 Porównanie rzeczywistych odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) z numerycznymi (linia 4)



Rys. 9.28 Porównanie rzeczywistych odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) z numerycznymi (linia 5)



Rys. 9.29 Porównanie średnich wartości odkształceń doświadczalnych i obliczeniowych (MES) z czterech linii splotów



Rys. 9.30 Porównanie średnich wartości odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) doświadczalnych i obliczeniowych (MES) z pięciu linii pomiarowych

Na rysunku 9.29 przedstawiono średnie wartości z czterech linii splotów sprężających otrzymane z badań doświadczalnych i z obliczeń MES. Analogicznie sporządzony wykres dla pięciu linii pomiarowych przedstawiono na rys. 9.30. Średnie wartości odkształceń betonu pomierzonych na górnej powierzchni tarczy i obliczonych (MES) zestawiono w tabeli 9.3.

Tabela 9.3 Średnie odkształcenia betonu na górnej powierzchni tarczy

miejsce	wartości doświadczalne			wartości obliczeniowe (MES)			$\Delta$ (doświadczalne-obliczeniowe)			$\Delta$ %		
	linia 3	linie wszystkich splotów	wszystkie linie	linia 3	linie wszystkich splotów	wszystkie linie	linia 3	linie wszystkich splotów	wszystkie linie	linia 3	linie wszystkich splotów	wszystkie linie
"pik"	123,6	127,3	126,0	106,5	123,0	114,6	17,1	4,3	11,4	13,8	3,4	9,0
"siodełko"	113,0	117,0	117,3	102,7	106,3	105,8	10,3	10,7	11,5	9,1	9,1	9,8
$\Delta$ ("pik"- "siodełko")	10,6	10,3	8,7	3,8	16,6	8,8	6,7	-6,4	-0,1	-	-	-

## Wnioski

Podsumowując wyniki otrzymane z badań doświadczalnych prowadzonych w zakładzie prefabrykacji w odniesieniu do analizy obliczeniowej można stwierdzić, że obecność zbrojenia zwykłego w płycie w postaci siatek zbrojeniowych nie tylko przejmuje naprężenia rozciągające w kierunku poprzecznym, ale również zapewnia równomierne rozłożenie naprężeń w betonie w obu kierunkach elementu tarczowego.

W analizie przyjęto moduł sprężystości i wytrzymałość betonu na ściskanie w chwili zwalniania naciągu wyznaczone pośrednio korzystając z wartości określonych doświadczalnie po 2, 3, 7 i 28 dniach dojrzewania betonu. Należy przypuszczać, że lepszą zgodność wyników można byłoby oczekiwać w przypadku wartości określonych doświadczalnie, co nie było możliwe z uwagi na warunki badań doświadczalnych.

## 9.2 Badanie strunobetonowej tarczy z betonu wysokiej wytrzymałości

Produkcja elementów strunobetonowych odbywa się w zakładach prefabrykacji na specjalnie przygotowanych do tych celów torach naciągowych jak to zostało opisane w rozdziale 7.1 tej pracy. Celem badania laboratoryjnego długości transmisji było możliwe jak najdokładniejsze odtworzenie warunków, w których odbywa się produkcja. W laboratorium Instytutu L-1 zostało zaprojektowane

specjalne stanowisko odwzorowujące tor naciągowy, uwzględniające możliwość wykonania naciągu jednocześnie dwóch splotów. Dostępne w laboratorium stalowe trawersy o dwóch średnicach zostały umieszczone w odległości 7,0 m i przytwierdzone za pomocą śrub fundamentowych do stendu badawczego grubości 1,0 m w hali Instytutu L-1. Nawiercone otwory w średnicach trawersów w odległości 0,67 m narzucały rozstaw splotów sprężających w badaniach laboratoryjnych, który po analizie okazał się stosowny do przyjęcia.

### 9.2.1 Przyjęcie elementu badawczego

Element badawczy został przyjęty na podstawie analizy numerycznej, podczas której dokonano przeglądu uzyskanych wyników (rozdział 6). Zmiennymi były grubość tarczy, rozstaw splotów oraz zmieniająca się z czasem długość transmisji obliczona wg obecnie obowiązującej normy [N10].

Uwzględniając wnioski wynikające z dokonanej w punkcie 6 analizy otrzymanych wyników, jak również możliwości wykonania prefabrykowanego elementu i przeprowadzenia badań w laboratorium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej, postanowiono wykonać element o wymiarach 4,0 x 1,0 x 0,1 m sprężony dwoma splotami 7φ5 mm ułożonymi symetrycznie wzdłuż tarczy w osiowym rozstawie 0,67 m. Szerokość tarczy 1,0 m przy rozstawie splotów 0,67 m wykazuje formowanie się "niecki" naprężeń między splotami w okolicach brzegowych (analiza numeryczna), która powinna również zostać uchwycona podczas badań doświadczalnych. Grubość elementu 100 mm gwarantuje odpowiednią otulinę betonową wynoszącą dla splotów 7φ5 mm około 42 mm oraz pozwala na uchwycenie odkształceń na powierzchni betonu pod wpływem wprowadzenia siły naciągowej. Przyjęta długość tarczy  $l = 4,0$  m pozwala na swobodne ukształtowanie się długości transmisji z obu stron i zapobiega ich nakładaniu się.

### 9.2.2 Stanowisko badawcze i program badań

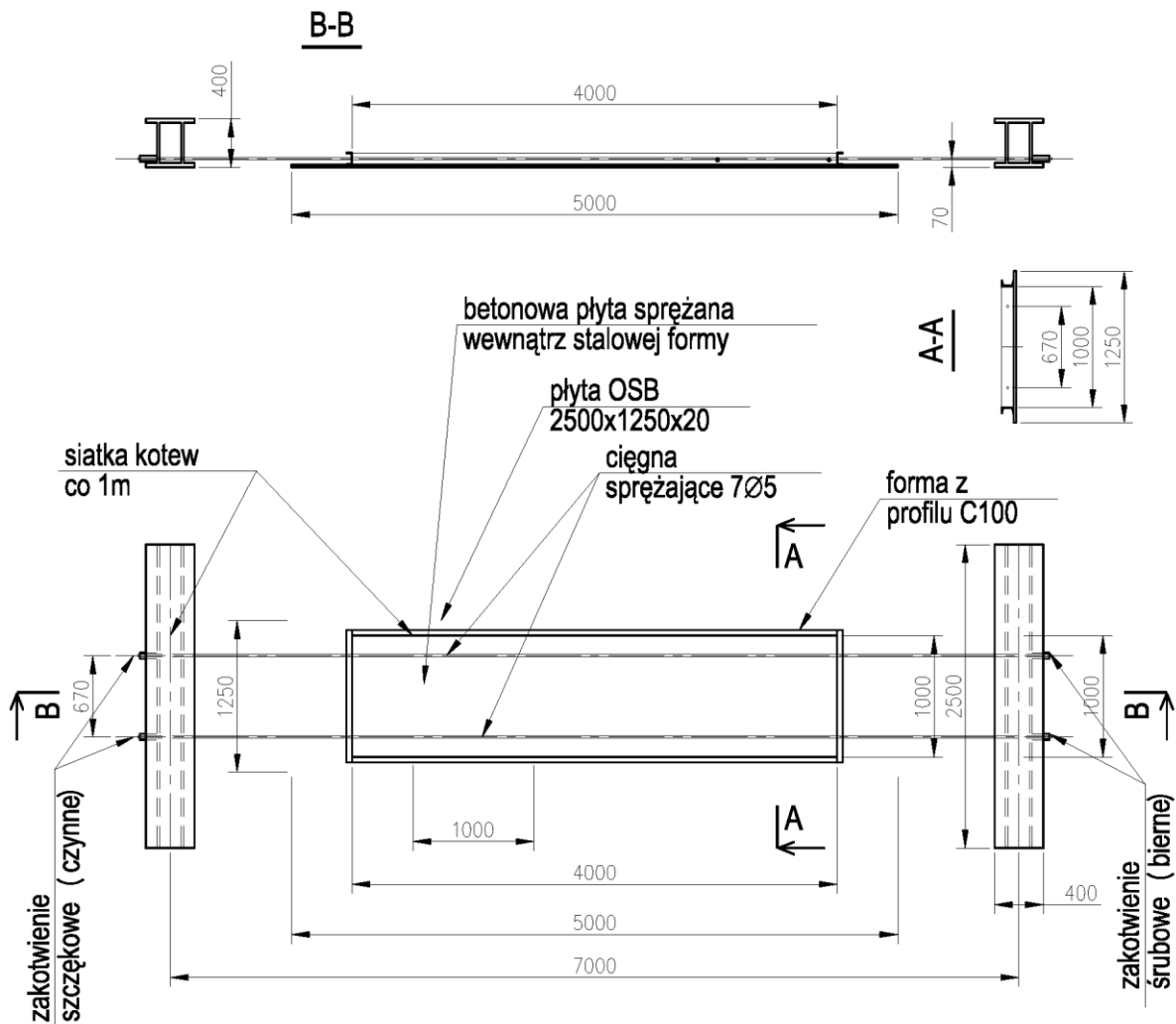
Stanowisko badawcze zostało przyjęte analogicznie jak w badaniach przyczepności betonu do splotów sprężających pod naciągiem. Stały rozstaw progów kotwiących stabilizujących siłę naciągową wynosił 7,0 m, a między nimi zlokalizowano formę stalową do wykonania tarczy strunobetonowej o wymiarach wynikających z przeprowadzonych analiz studialnych (pkt. 6). Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 9.31.

Wykonanie tarczy i program badań doświadczalnych:

- jednoczesny naciąg dwóch splotów 7φ5 mm z taką siłą, aby w każdym z nich uzyskać siłę po stratach doraźnych (w chwili zwolnienia naciągu) 200 kN,
- betonowanie elementu, pielęgnacja za pomocą trzech warstw izolacyjnych (dwie folie oraz sukno),
- pomiary siły sprężającej za pomocą dwóch siłomierzy HBM usytuowanych pod zakotwieniem od strony czynnej; od strony biernej wykonanie zacisków plastycznych i założenie zakotwień śrubowych,
- zwolnienie naciągu po 20 godzinach, a więc w czasie porównywalnym do badań przyczepności betonu do splotów ze wstępnym naciągiem. Realizowanie stopniowego zwolnienia, przy zastosowaniu kolumny oporowej od strony zakotwień śrubowych,
- rozmieszczenie reperów wzdłuż splotów i podłużnej osi tarczy oraz w kierunku poprzecznym na obu końcach tarczy,
- pomiar odkształceń betonu w kierunku podłużnym i poprzecznym prefabrykowanego elementu za pomocą czujników nasadowych typu DEMEC o bazie pomiarowej 100 mm i 200 mm po 2, 3, 7, 14, 21, 28 i 56 dniach dojrzewania betonu,



- pomiar temperatury na zewnętrznej powierzchni elementu,
- pomiar wślizgu splotów do prefabrykowanego elementu w chwili zwolnienia naciągu.



Rys. 9.31 Schemat stanowiska badawczego

### 9.2.3 Wykonanie tarczy

Formy zostały wykonane ze stalowych ceowników C100 o wysokości  $h = 100$  mm (rys. 9.32) połączonych w narożach śrubami z dospawanymi kątownikami (rys. 9.33). W celu zapewnienia centrycznego na wysokości formy położenia splotu w tarczy, pod profile stalowe zostały podłożone płyty OSB (rys. 9.32). Ceowniki zaopatrzone były w nawiercone otwory na dolnej półce umożliwiające przytwierdzenie ich wkrętami do płyty z OSB zapewniającej odpowiednie położenie. Między formą a podkładem z płyt z OSB umieszczono dwie warstwy folii (rys. 9.33) w celu zminimalizowania oporów tarcia występujących w wyniku skrócenia elementu podczas procesu dojrzewania betonu. Na poprzecznych bokach formy wykonanych z kształtownika stalowego nawiercone zostały otwory, przez które przechodziły sploty sprężające. Przestrzeń wewnętrzną między folią a formą stalową wypełniono masą silikonową hamującą wypływanie mleczka betonowego na zewnątrz.





Rys. 9.32 Widok stalowych form usytuowanych na płytach OSB



Rys. 9.33 Szczegół połączenia naroża (po lewej) i widok stalowej formy z przeciągniętymi splotami (po prawej)

#### 9.2.4 Naciąg splotów i betonowanie elementu

Po przycięciu z bębna splotów sprężających zostały wykonane zaciski plastyczne na końcu przeznaczonym na bierne zakotwienie, których nośność została doświadczalnie zweryfikowana. Przygotowane sploty przeciągnięte zostały najpierw przez pierwszą stalową belkę poprzeczną, potem przez ceowniki formy a następnie przez drugi trawers.



Rys. 9.34 Poszczególne etapy realizacji sprężenia

Zgodnie z przyjętym programem badań doświadczalnych jednoczesny naciąg dwóch splotów został zrealizowany przy pomocy agregatu pompowego i pras naciągowych typu Paul połączonych węzami wysokociśnieniowymi (rys. 9.34). Na belce oporowej pod zakotwieniem czynnym zainstalowano siłomierze typu HBM do pomiaru siły naciągowej od chwili zrealizowania naciągu do jego zwolnienia, co miało miejsce po 20 godzinach dojrzewania betonu. Rejestrowana siła została odczytywana bezpośrednio na monitorze komputera w sposób ciągły podczas całej procedury. Zarejestrowane maksymalne siły w splotach wynosiły 213,91 kN i 211,14 kN (rys. 9.34).

### 9.2.5 Przygotowanie i przeprowadzenie badań

Po zakończeniu prac związanych z naciągiem przystąpiono do betonowania (rys. 9.35). Upřednio wysuszone składniki betonu zostały wymieszane w mieszalniku o poziomym bębnie o pojemności 250 litrów przy podawaniu ich od góry. Wykonane trzy zaroby mieszanki betonowej o składzie jak w rozdziale 5, zostały przewiezione na halę Instytutu, po czym beton został starannie warstwami ułożony w formie z ceowników i zagęszczony wibratorem wgłębnym. Ogólny widok tarczy w trakcie jej betonowania i po zabetonowaniu przedstawiono na rys. 9.36. Betonowanie ukończono dnia 24.11.2014 o godzinie około 16:30. Po wyrównaniu górnej powierzchni betonu element badawczy w ramach pielęgnacji betonu został pokryty foliami i matą aż do następnego dnia, kiedy po odczytaniu siły z siłomierza nastąpiło przygotowanie go do badań.



Rys. 9.35 Przygotowana forma z ceowników z naciągniętymi splotami sprężającymi



Rys. 9.36 Płyta po zabetonowaniu i podczas pielęgnacji

Po 20 godzinach dojrzewania betonu przed zwolnieniem naciągu odnotowano wartości siły naciągowej, które wynosiły odpowiednio 201 kN i 197 kN. Pomierzono temperaturę betonu (rys. 9.39) na zewnętrznej powierzchni elementu, naklejono repery i wykonano odczyty wyjściowe ("zerowe") w poszczególnych bazach pomiarowych. Repery ułożono w trzech liniach podłużnych czyli wzdłuż dwóch splotów i w podłużnej osi tarczy co 0,20 m, przy czym na długości do 1,0 m od jej końców zostały zagęszczone do 0,1 m. W celu uchwycenia poprzecznego rozciągania betonu między splotami przy czołach tarczy, którego istnienie wykazano obliczeniami MES, naklejono repery wzdłuż pięciu linii poprzecznych co 0,10 m i we wzajemnym rozstawie 0,05 m (rys. 9.37).

Po zwolnieniu naciągu (22 h) powtórnie wykonano odczyty we wszystkich bazach pomiarowych, a następnie przykryto tarczę tymi samymi warstwami izolacyjnymi w celu zapewnienia identycznych warunków dojrzewania betonu, jak to miało miejsce w przypadku badania przyczepności betonu do splotów sprężających. Aby nie dopuścić do zanieczyszczenia (zaprószenia) reperów, co mogło mieć miejsce z uwagi na inne prace badawcze prowadzone w laboratorium, badany element utrzymywany był cały czas pod przykryciem.





Rys. 9.37 Rozmieszenie punktów pomiarowych



Rys. 9.38 Zwolnienie naciągu siły sprężającej

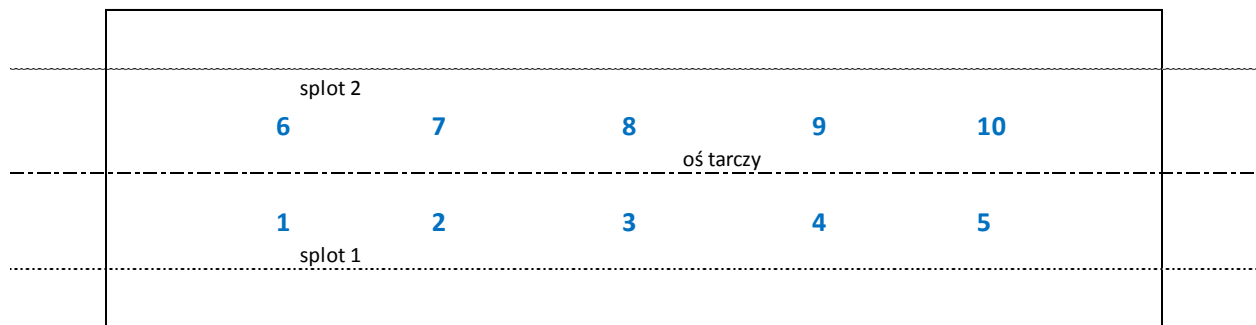
Z uwagi na powstałe w trakcie badań trudności organizacyjne nie udało się pomierzyć wartości wślizgu splotów. Zbadano natomiast wytrzymałość betonu na ściskanie i współczynniki sprężystości betonu w chwili zwolnienia naciągu.

### 9.2.6 Wyniki otrzymane z badań doświadczalnych

W celu określenia wpływu temperatury na odkształcenia tarczy powstałe na skutek zmian termicznych, prowadzono rejestrację temperatury na powierzchni betonu w każdym cyklu pomiarowym odkształceń betonu. Mierzono ją w 10 punktach pomiarowych (rys. 9.39). Przed przystąpieniem do wytyczenia linii pomiarowych i naklejenia reperów zmierzono lokalnie temperaturę betonu, która wynosiła  $T = 35^{\circ}\text{C}$ . Następne pomiary wskazywały na stały ubytek ciepła przyjmując wartości do  $33,7^{\circ}\text{C}$  (tab. 9.4). O 16:30 nastąpiło zwolnienie naciągu i zanotowane wartości przyjęto jako temperaturę podstawową, od której rozpoczęło się schładzanie tarczy wpływające na odkształcenia elementu od zmian temperatury. Tarcza pozostawała cały czas pod przykryciem, a jedynie podczas badań zdejmowano folie i maty unikając niepożądanych oddziaływań. Monitorowanie temperatury przerwano w dniu 01.12.2014, kiedy nastąpiło wyrównanie ciepłoty elementu badawczego z temperaturą panującą na hali laboratorium ( $19^{\circ}\text{C}$ ).

Tabela 9.4 Wartości temperatury w tarczy

TEMPERATURA TARCZY							
punkty pomiarowe	25.11.2014				26.11.2014	27.11.2014	01.12.2014
	10:20	12:20	14:20	16:00			
1	32,3	31,5	27,3	27,6	22,3	21,8	19,1
2	33,2	32,7	28,6	27,6	22,4	21,9	19,1
3	33,7	33,0	28,8	27,9	22,5	21,8	19,1
4	34,5	33,6	29,2	27,7	22,2	21,6	19,1
5	33,1	32,6	25,4	27,7	21,8	21,4	19,0
6	32,3	30,6	26,7	27,1	22,0	21,1	19,0
7	32,5	31,3	29,3	27,2	22,1	21,3	19,1
8	32,7	31,3	29,0	27,3	22,4	21,2	19,1
9	33,6	30,1	29,2	27,0	22,2	21,2	19,1
10	29,0	27,7	26,8	27,0	22,0	21,2	19,1
T średnia	32,7	31,4	28,0	27,4	22,2	21,5	19,1
T hali	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0

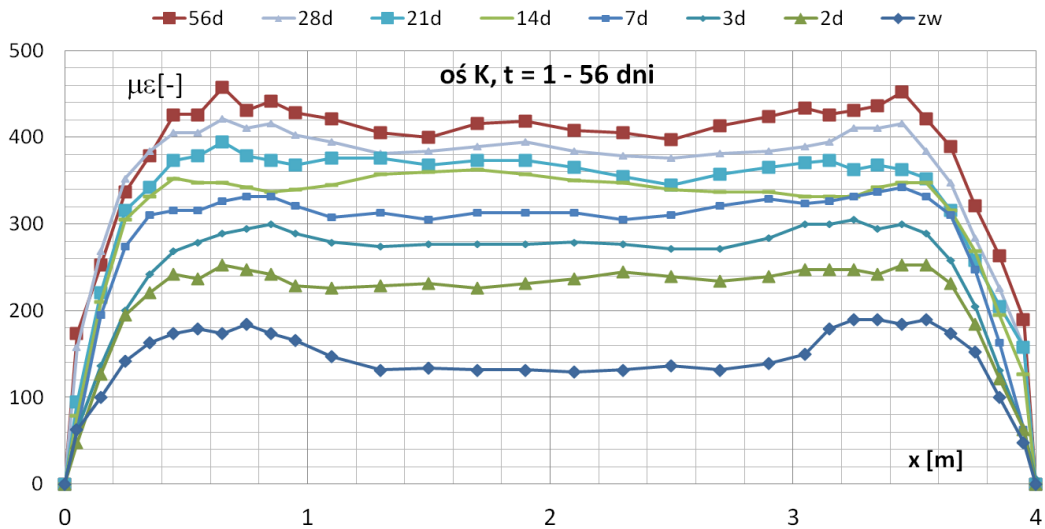


Rys. 9.39 Tarcza z zaznaczoną podłużną osią i osiami splotów oraz punktami pomiarowymi temperatury

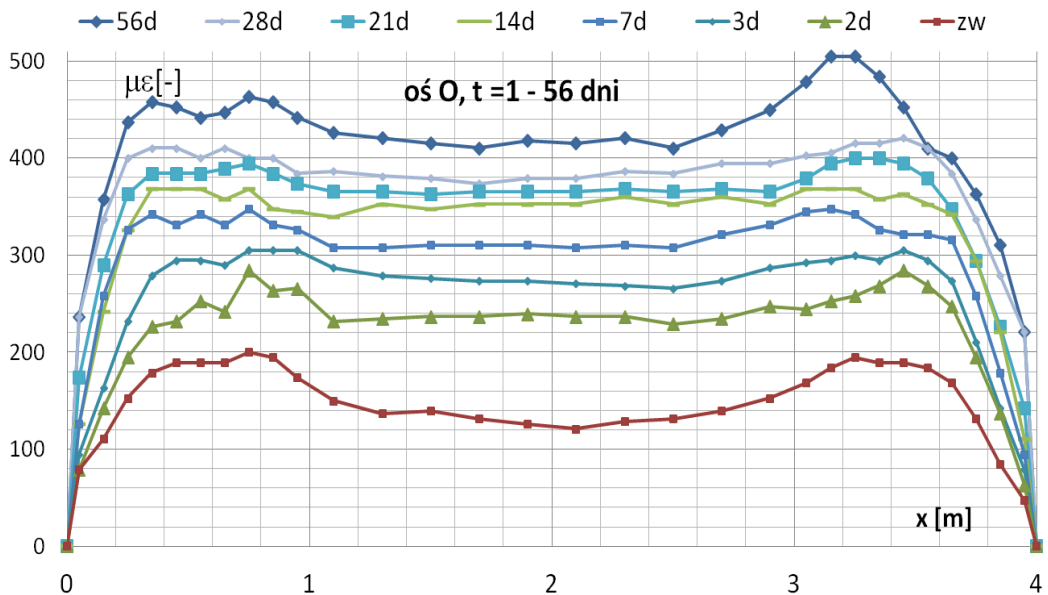
Na podstawie dokonanych pomiarów odkształceń betonu za pomocą czujnika nasadowego typu DEMEC obliczono różnice odczytów z kolejnych etapów pomiarowych w stosunku do odczytów "zerowych" i mnożąc je przez stałe czujników  $k = 1,578 \cdot 10^{-5}$  (baza 100 mm) i  $k = 0,789 \cdot 10^{-5}$  (baza 200 mm) obliczono wartości odkształceń betonu w poszczególnych bazach pomiarowych. W celu minimalizacji błędów pomiarowych odczyty zostały każdorazowo zebrane dwukrotnie, a otrzymane wartości zostały uśrednione powszechnie akceptowanymi metodami jak w przypadku płyty omówionej w rozdziale 9.1.

### 9.2.6.1 Odkształcenia podłużne

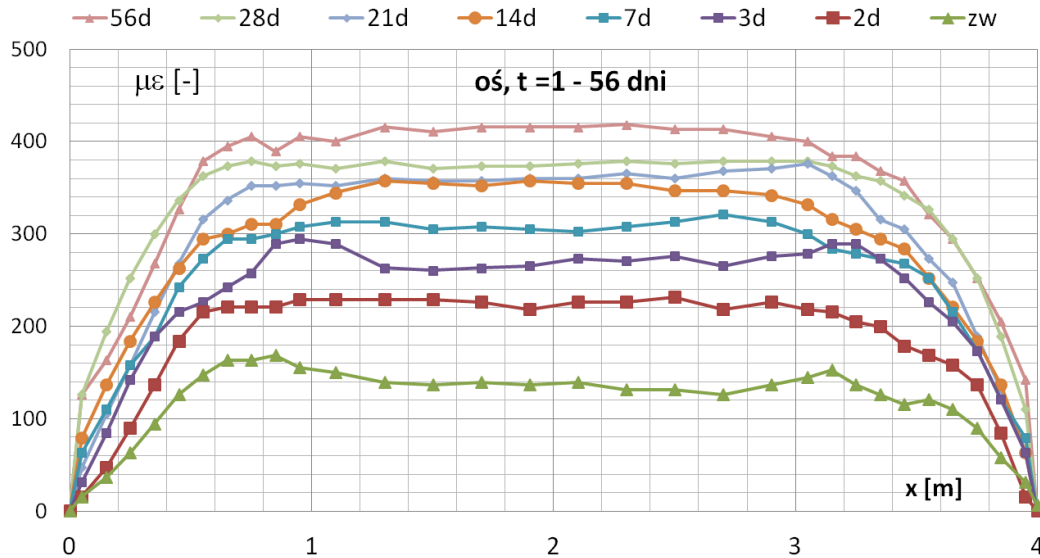
Wykresy zależności podłużnych mikrodeformacji betonu w osi tarczy jak również w osiach splotów w funkcji odległości od czoła tarczy, przyjętego jako początek wykresu, w kolejnych dniach dojrzewania betonu zostały przedstawione na rys. 9.40 - 9.42.



Rys. 9.40 Wykres zależności podłużnego odkształcenia betonu na zewnętrznej powierzchni elementu w funkcji odległości od czoła tarczy w osi 1 dla kolejnych dni pomiarowych



Rys. 9.41 Wykres zależności podłużnego odkształcenia betonu na zewnętrznej powierzchni elementu w funkcji odległości od czoła tarczy w osi 2 dla kolejnych dni pomiarowych



Rys. 9.42 Wykres zależności podłużnego odkształcenia betonu na zewnętrznej powierzchni elementu w funkcji odległości od czoła tarczy w osi dla kolejnych dni pomiarowych

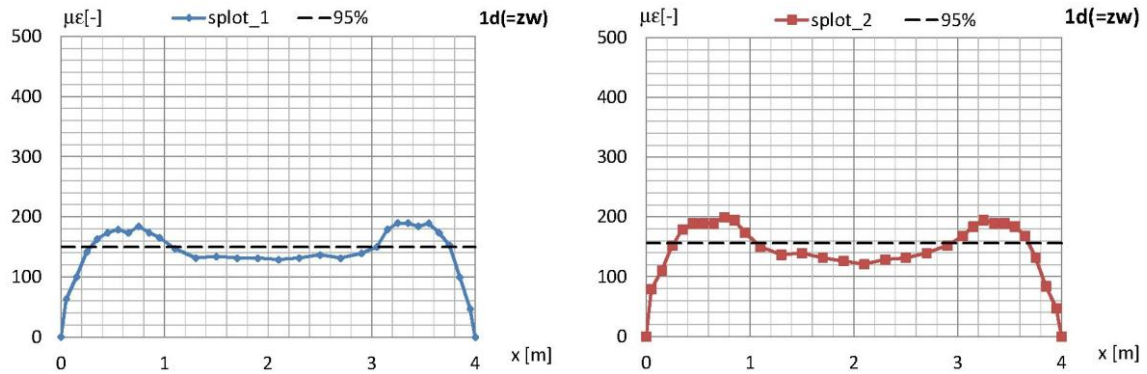
Celem wyznaczenia długości transmisji z wykresu podłużnych odkształceń betonu w funkcji odległości od czoła płyty, w pierwszym kroku obliczono wartość średnią z plateau, znajdującego się na długości 2,0 m w środku rozpiętości tarczy z pominięciem wartości uzyskanych w "pikach". Następnie włączono do obliczeń wszystkie punkty pomiarowe w "piku" o wartości przekraczającej średnią z plateau i jeszcze raz wyznaczono średnią, która stała się podstawą do wyznaczenia długości transmisji dla splotu w osi 1 i 2 metodą 95% AMS omówioną w rozdziale 9.1.

Tabela 9.5 Wyznaczenie średnich wartości odkształceń ( $\mu\epsilon$ )

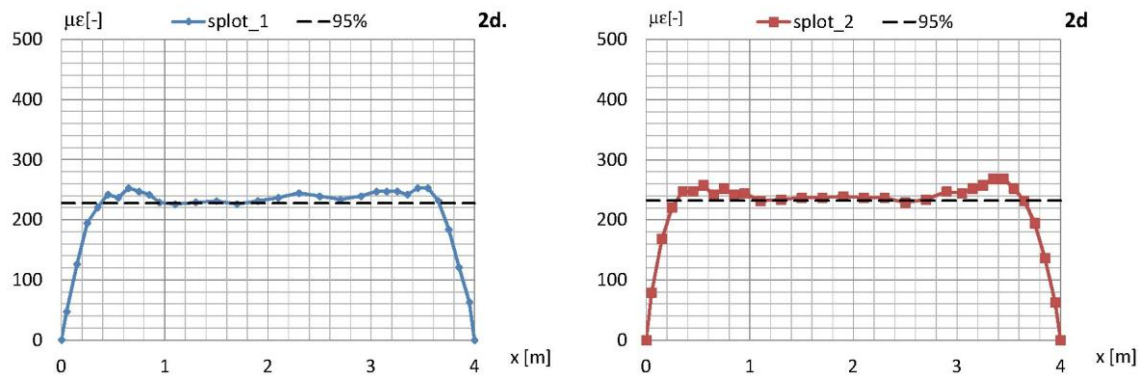
zakres	oś		dni pomiarowe								
			zw	2d	3d	7d	14d	21d	28d	56d	
plateau	splot 1	średnia	134,39	233,81	276,15	312,97	349,26	365,57	384,77	410,54	
		s	5,19	5,82	3,72	6,86	9,47	9,84	5,89	8,52	
		v	3,86	2,49	1,35	2,19	2,71	2,69	1,53	2,07	
	splot 2	średnia	135,71	236,17	275,36	312,44	352,16	365,83	383,72	421,59	
		s	9,50	4,68	6,66	7,33	5,70	1,42	6,60	8,44	
		v	7,00	1,98	2,42	2,34	1,62	0,39	1,72	2,01	
	średnia (1+2)		135,05	234,99	275,76	312,71	350,71	365,70	384,24	416,07	
	oś tarczy	średnia	136,76	225,92	270,36	310,08	351,37	361,36	375,56	412,12	
		s	6,00	4,15	8,30	5,19	5,42	5,15	3,07	5,40	
		v	4,39	1,84	3,07	1,67	1,54	1,43	0,82	1,31	
średnia (1+2+oś)		135,62	231,97	273,96	311,83	350,93	364,26	381,35	414,75		
95%	splot 1	średnia	157,90	233,81	276,15	312,97	349,26	365,57	384,77	410,54	
		95%	150,01	222,12	262,34	297,32	331,80	347,29	365,53	390,02	
		s	22,48	8,99	14,65	10,31	10,79	15,31	16,28	15,37	
		v	14,24	3,76	5,14	3,22	3,13	4,14	4,12	3,63	
	splot 2	średnia	164,11	244,48	286,67	324,75	357,45	377,51	396,18	439,67	
		95%	155,91	232,25	272,34	308,51	339,58	358,64	376,37	417,68	
		s	26,17	10,76	12,64	13,81	9,07	13,65	13,83	19,71	
		v	15,94	4,40	4,41	4,25	2,54	3,62	3,49	4,48	
	średnia (1+2)		średnia	161,01	239,14	281,41	318,86	353,36	371,54	390,48	425,11
			95%	152,96	152,96	152,96	152,96	152,96	152,96	152,96	152,96
	oś tarczy	średnia	144,36	223,55	276,15	307,10	351,37	362,72	375,60	411,48	
		s	16,92	25,12	27,92	32,34	40,61	42,17	28,68	5,54	
		v	11,72	11,24	10,11	10,53	11,56	11,63	7,64	1,35	
	średnia (1+2+oś)		średnia	155,46	235,82	282,61	317,32	351,24	369,94	389,06	424,90
			95%	147,68	224,03	268,48	301,45	333,67	351,44	369,61	403,65



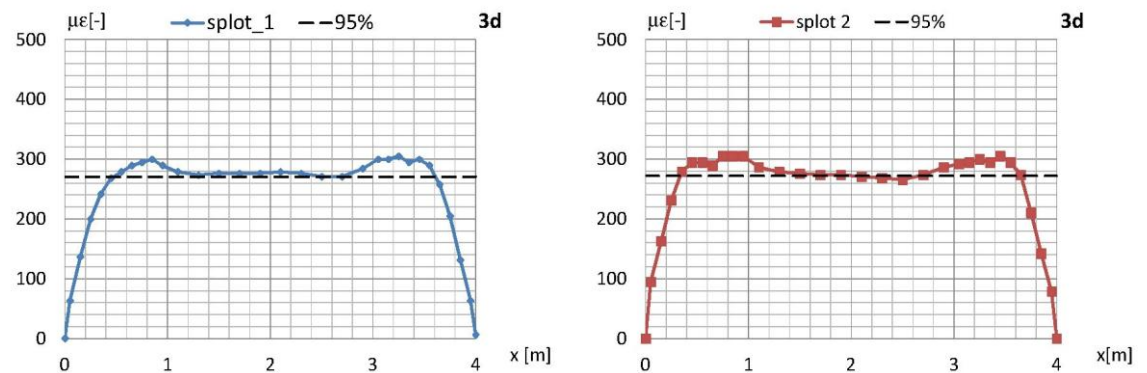
W tabeli 9.5 zestawiono średnie odkształcenia z plateau oraz średnie wartości odkształceń z odcinka zawierającego plateau i "piki" z uwzględnieniem odchylenia standardowego i współczynnika zmienności. Poniżej zestawione są przebiegi mikrodeformacji wzdłuż splotu 1 (po lewej) i wzdłuż splotu 2 (po prawej) w poszczególnych dniach pomiarowych z naniesioną prostą wyliczoną zgodnie z metodą 95% AMS.



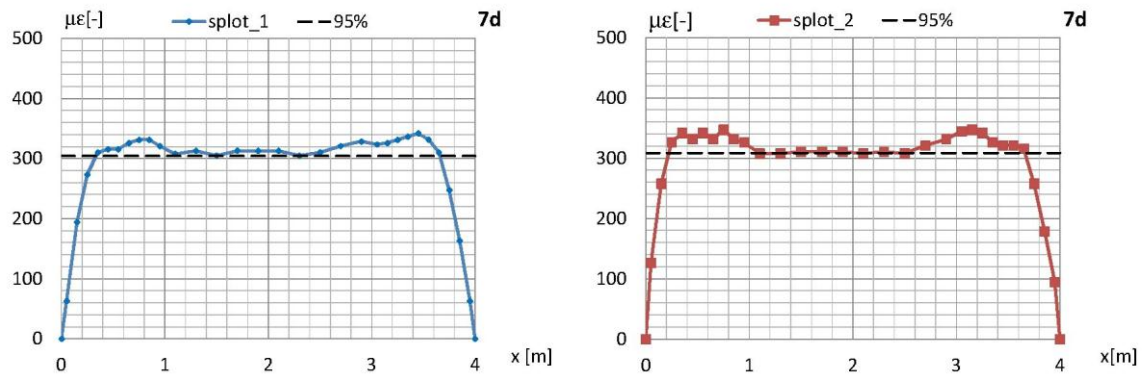
Rys. 9.43 Zależność odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotu 1 i 2 w funkcji odległości od czoła tarczy bezpośrednio po zwolnieniu naciągu (1d)



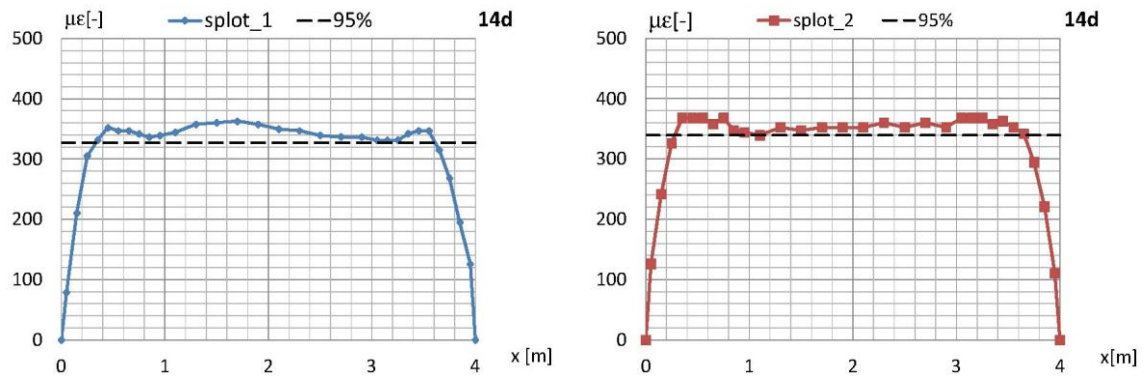
Rys. 9.44 Zależność odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotu 1 i 2 w funkcji odległości od czoła tarczy w chwili 2d



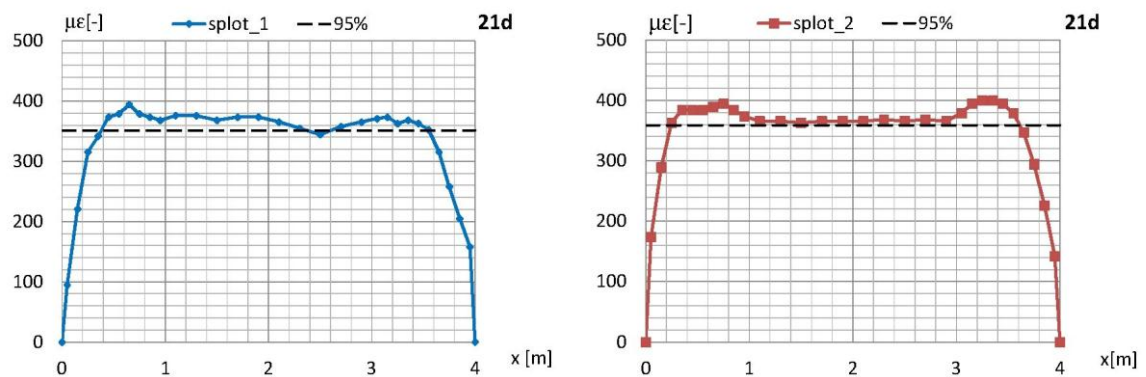
Rys. 9.45 Zależność odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotu 1 i 2 w funkcji odległości od czoła tarczy w chwili 3d



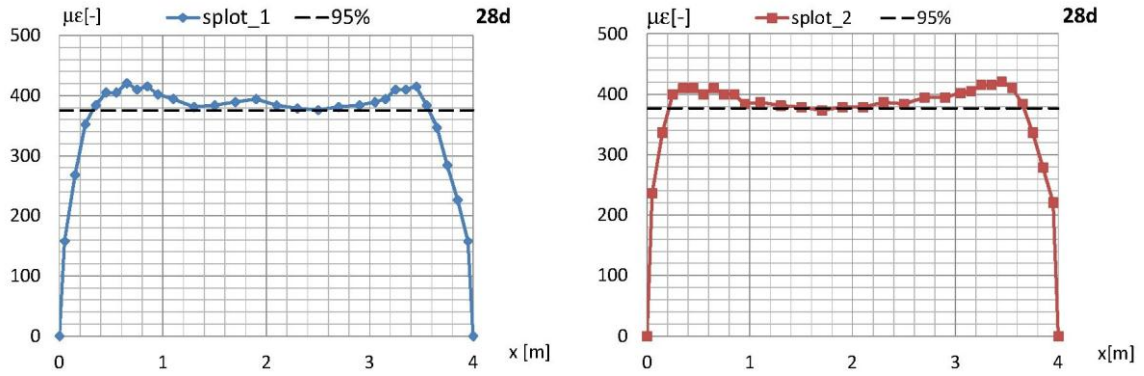
Rys. 9.46 Zależność odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotu 1 i 2 w funkcji odległości od czoła tarczy w chwili 7d



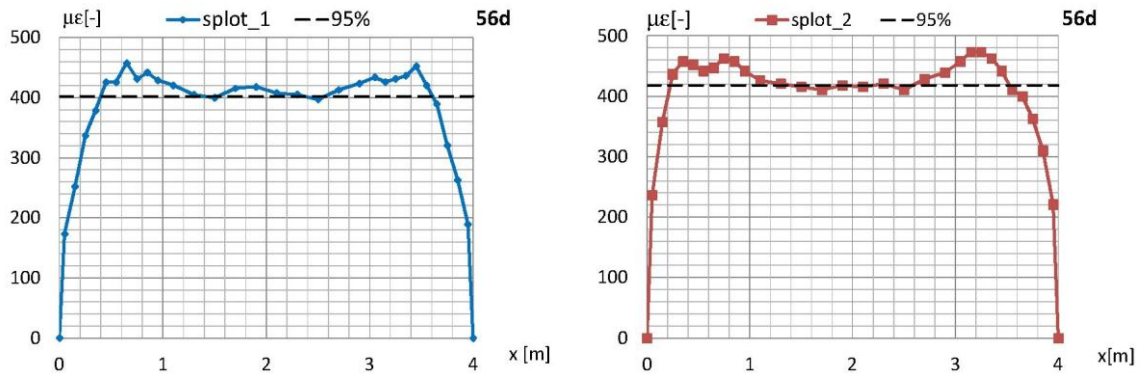
Rys. 9.47 Zależność odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotu 1 i 2 w funkcji odległości od czoła tarczy w chwili 14d



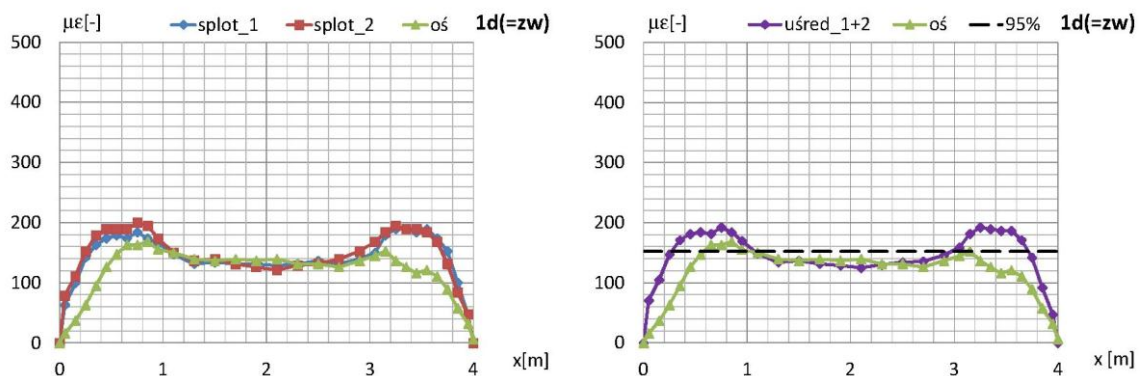
Rys. 9.48 Zależność odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotu 1 i 2 w funkcji odległości od czoła tarczy w chwili 21d



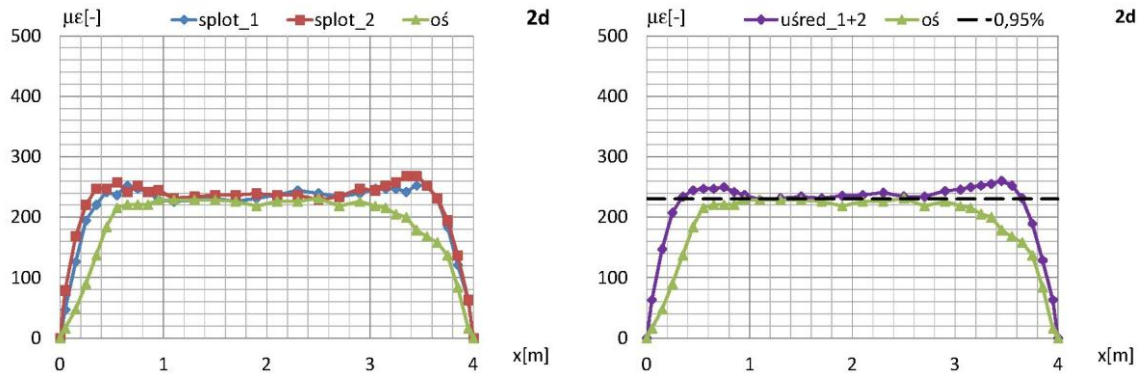
Rys. 9.49 Zależność odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotu 1 i 2 w funkcji odległości od czoła tarczy w chwili 28d



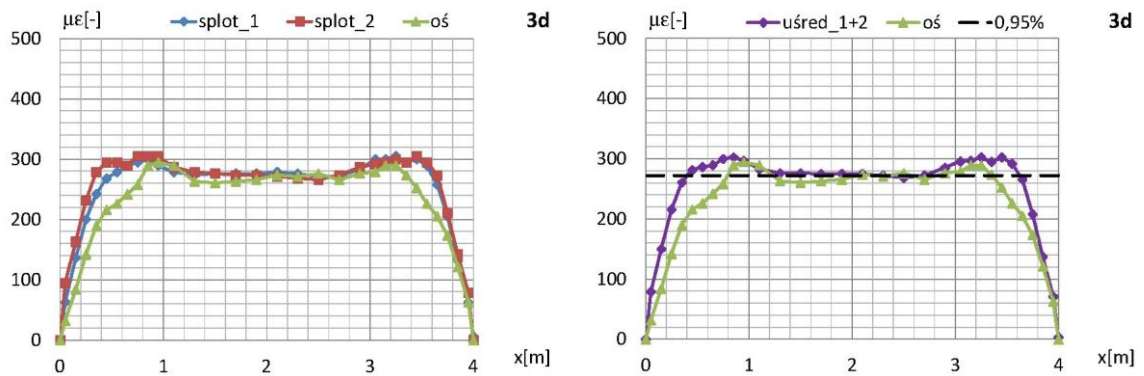
Rys. 9.50 Zależność odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotu 1 i 2 w funkcji odległości od czoła tarczy w chwili 56d



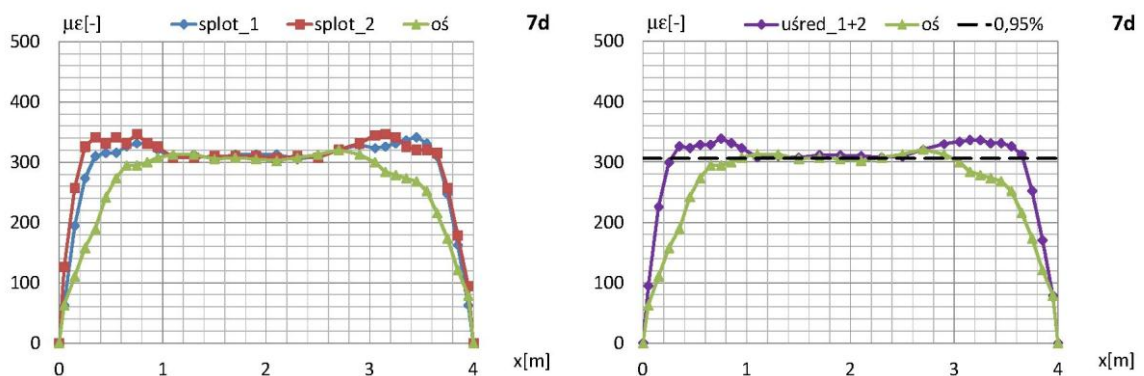
Rys. 9.51 Odkształcenie ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotów 1 i 2 oraz w osi tarczy (po lewej) oraz uśredniona wartość z obu splotów i w osi tarczy wraz z 95% prostą (po prawej) bezpośrednio po zwolnieniu naciągu (1d)



Rys. 9.52 Odkształcenie ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotów 1 i 2 oraz w osi tarczy (po lewej) oraz uśredniona wartość z obu splotów i w osi tarczy wraz z 95% prostą (po prawej) po 2 dniach

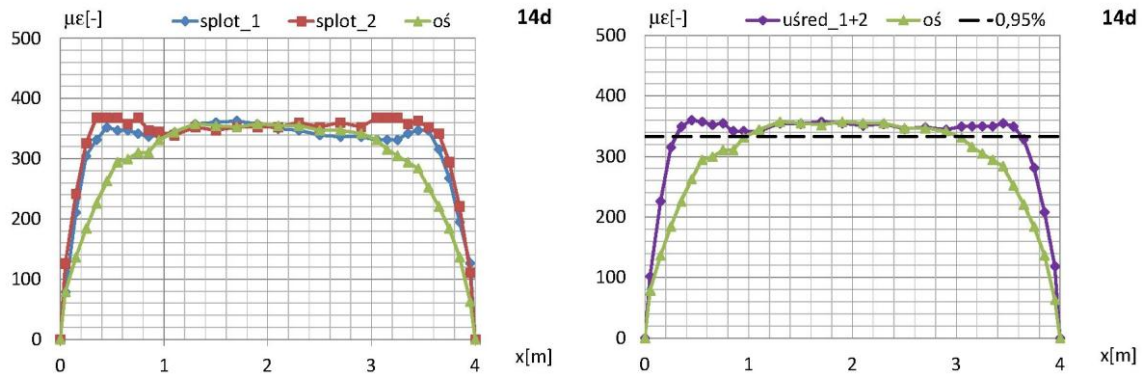


Rys. 9.53 Odkształcenie ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotów 1 i 2 oraz w osi tarczy (po lewej) oraz uśredniona wartość z obu splotów i w osi tarczy wraz z 95% prostą (po prawej) po 3 dniach

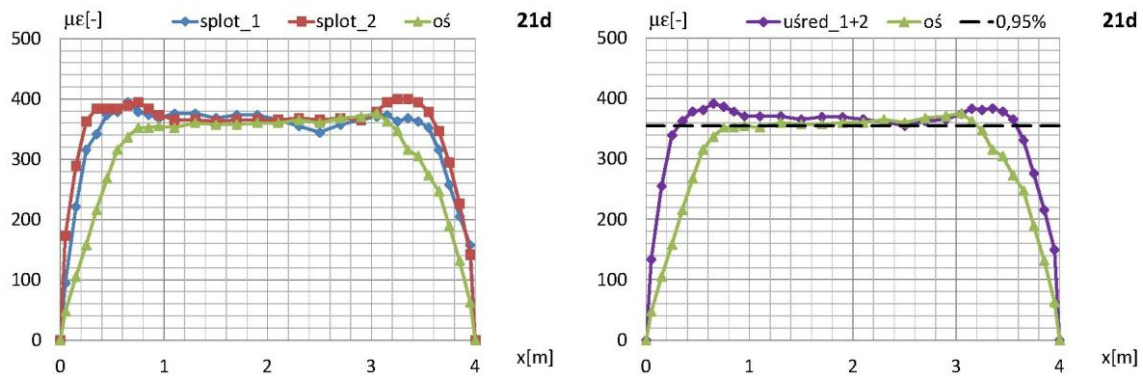


Rys. 9.54 Odkształcenie ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotów 1 i 2 oraz w osi tarczy (po lewej) oraz uśredniona wartość z obu splotów i w osi tarczy wraz z 95% prostą (po prawej) po 7 dniach

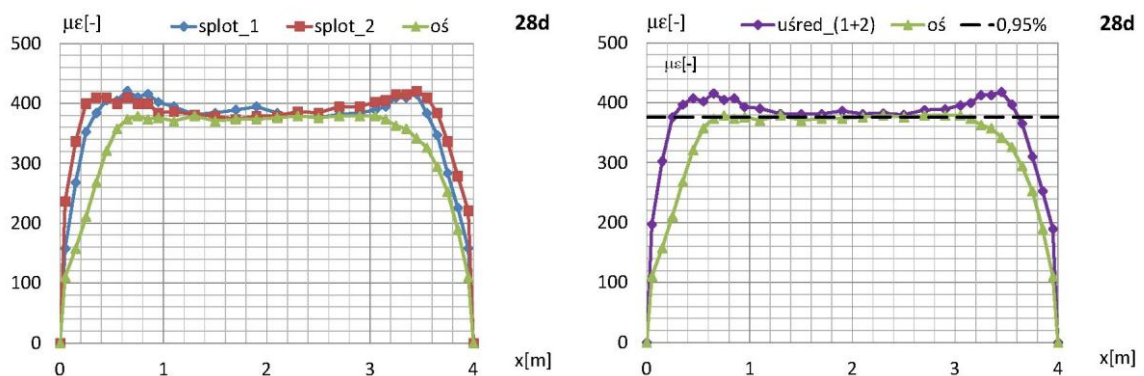




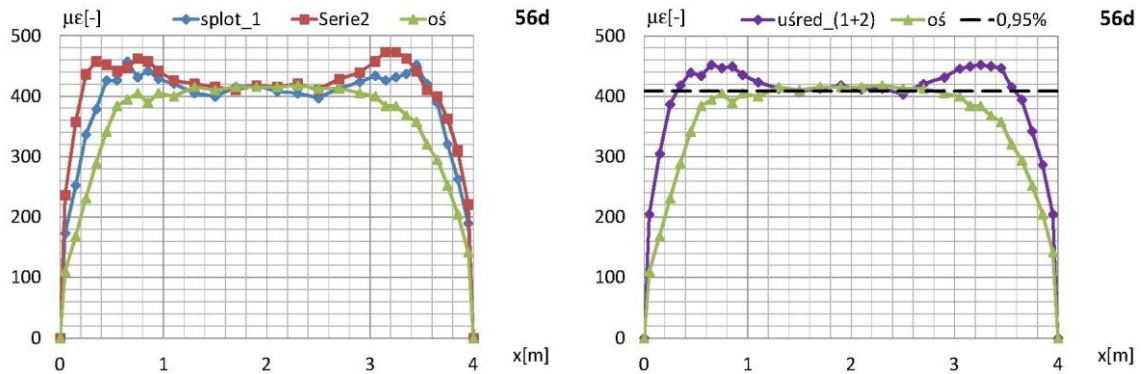
Rys. 9.55 Odkształcenie ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotów 1 i 2 oraz w osi tarczy (po lewej) oraz uśredniona wartość z obu splotów i w osi tarczy wraz z 95% prostą (po prawej) po 14 dniach



Rys. 9.56 Odkształcenie ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotów 1 i 2 oraz w osi tarczy (po lewej) oraz uśredniona wartość z obu splotów i w osi tarczy wraz z 95% prostą (po prawej) po 21 dniach



Rys. 9.57 Odkształcenie ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotów 1 i 2 oraz w osi tarczy (po lewej) oraz uśredniona wartość z obu splotów i w osi tarczy wraz z 95% prostą (po prawej) po 28 dniach



Rys. 9.58 Odkształcenie ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotów 1 i 2 oraz w osi tarczy (po lewej) oraz uśredniona wartość z obu splotów i w osi tarczy wraz z 95% prostą (po prawej) po 56 dniach

Przedstawione na wykresach przebiegi mikrodeformacji wzdłuż splotów (rys. 9.43 - 9.50) charakteryzują się stromym przebiegiem na obu końcach, co wskazuje na względnie krótką długość transmisji, po czym występuje obszar większych deformacji niż to ma miejsce w odcinku środkowym na długości płyty. Te charakterystyczne "piki" zostały również zauważone w obliczeniach MES. Odczytane długości transmisji w poszczególnych dniach pomiarów zestawiono w tabeli 9.5 Przebieg deformacji w osi tarczy (brak splotu sprężającego) w odniesieniu do uśrednionego rozkładu mikrodeformacji w osiach splotu przedstawiono na rys. 9.51 - 9.58. Porównując przebieg w osi tarczy w stosunku do linii splotów zauważa się łagodniejszy wzrost (wykres powoli "nadaża" za pozostałymi dwoma), by w przedziale względnie stałych odkształceń przybrać w przybliżeniu te same wartości.

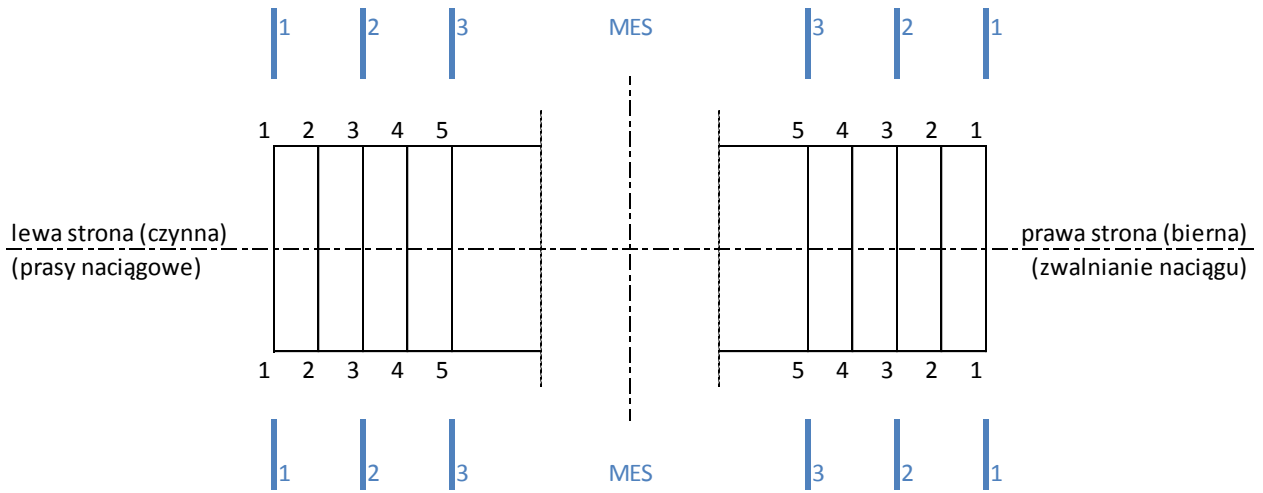
W tabeli 9.6 podano wyznaczone z badań długości transmisji oddzielnie wzdłuż splotów 1 i 2, następnie uśredniono otrzymane wartości. Ponadto wyznaczono długości transmisji dla uśrednionego wykresu (1 + 2).

Tabela 9.6 Wyznaczone doświadczalnie długości transmisji  $L_t$  [mm]

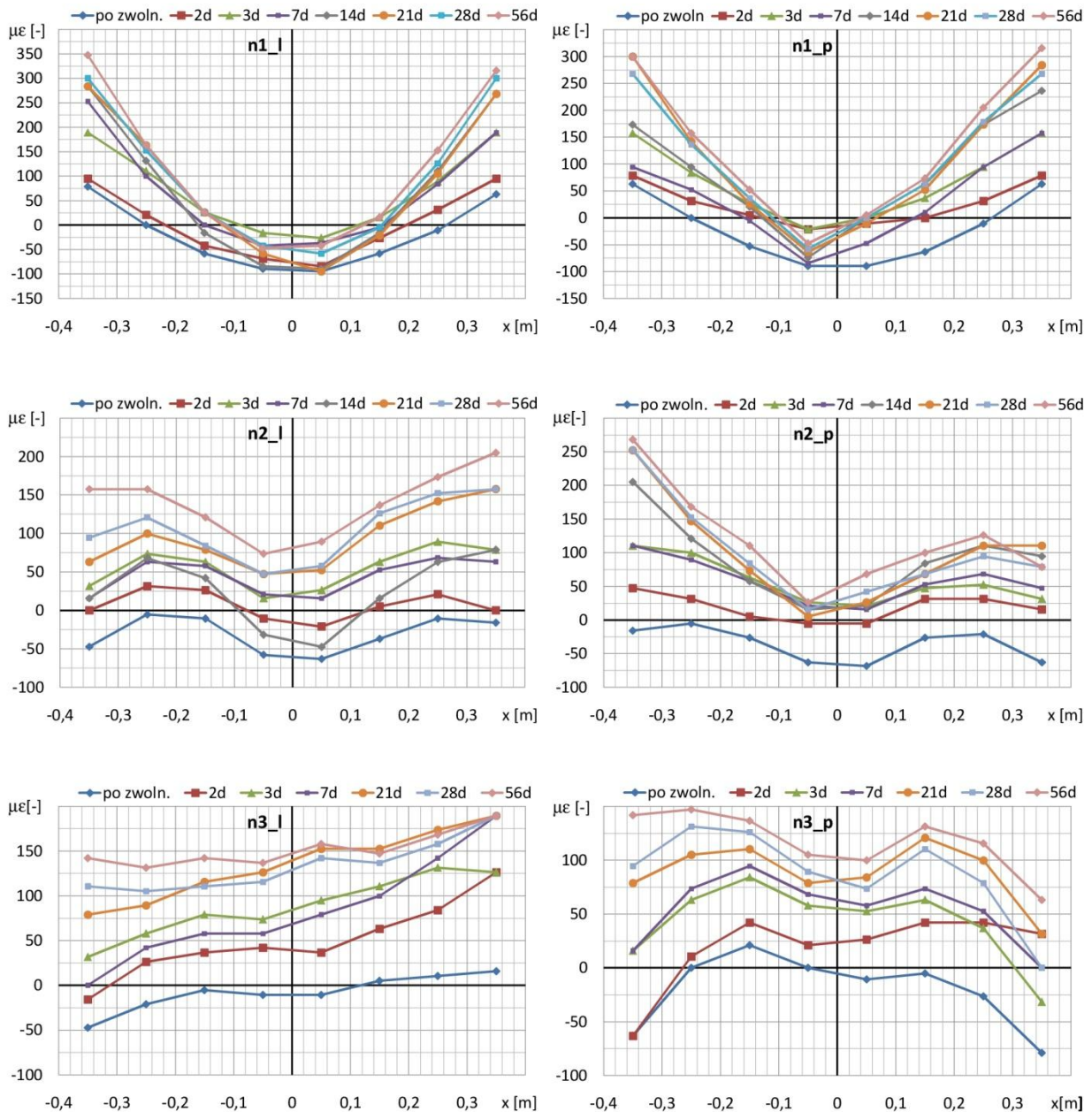
strona	osie	dni pomiarowe							
		zw	2d	3d	7d	14d	21d	28d	56d
czynna (naciąg)	1	300	400	500	350	350	400	350	400
	2	250	300	350	220	270	270	220	220
	średnia	275	350	425	285	310	335	285	310
	1+2	270	350	400	270	300	330	250	300
bierna (zwolnienie naciągu)	1	250	350	400	350	400	450	420	400
	2	350	350	350	330	350	400	320	470
	średnia	300	350	375	340	375	425	370	435
	1+2	290	300	370	350	350	420	400	420

### 9.2.6.2 Odkształcenia poprzeczne

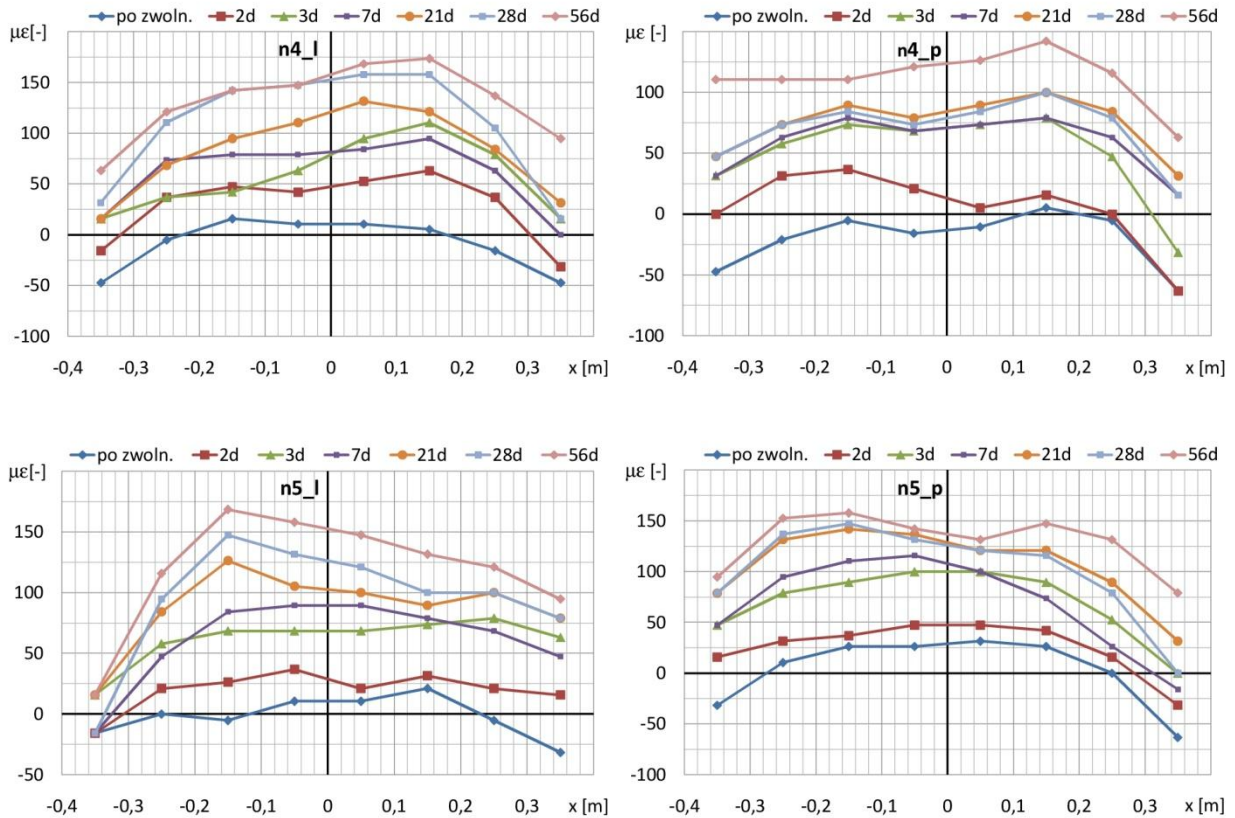
Odkształcenia w kierunku poprzecznym pomierzono wzdłuż pięciu linii pomiarowych po każdej stronie tarczy definiując kolejno poszczególne "nitki" począwszy od zewnętrznej strony tarczy w kierunku do wewnątrz (rys 9. 59). Otrzymane rozkłady odkształceń dla lewej (strona naciągu) i prawej (strona zwolnienia siły naciągowej) strony tarczy dla poszczególnych linii pomiarowych (n1, n2, n3, n4 i n5) w kolejnych dniach pomiarowych przedstawiono na rys. 9.60 (znak minus oznacza rozciąganie betonu).



Rys. 9.59 Usytuowanie poprzecznych linii pomiarowych (na niebiesko zaznaczono linie MES)

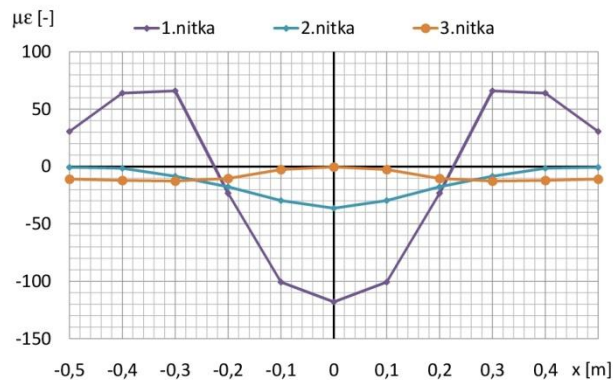




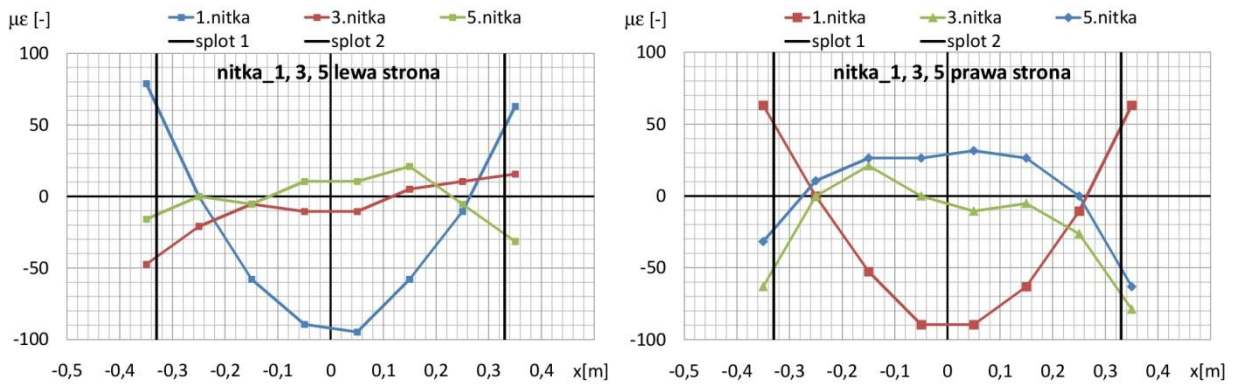


Rys. 9.60 Wykresy rozkładu poprzecznych odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) tarczy w kolejnych dniach pomiarowych

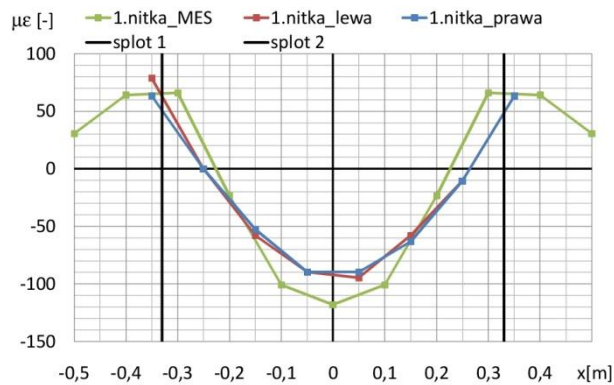
Przeprowadzona analiza MES (rozdział 6) odpowiada sytuacji po zwolnieniu naciągu. Ze względu na przyjęte w analizie numerycznej siatkowanie badanego elementu linia pomiarowa o numerze 1 odpowiada linii 1 w modelu rzeczywistym, natomiast linie 2 i 3 modelu numerycznego leżą odpowiednio na linii 3 i 5 rzeczywistego elementu. Na rysunku 9.61 przedstawiono odkształcenia poprzeczne uzyskane w analizie MES dla trzech linii pomiarowych (rys. 9.59), natomiast na rys. 9.62 zobrazowano odkształcenia im odpowiadające wyznaczone na drodze eksperymentalnej (nitki 1, 3 i 5) po lewej i prawej stronie tarczy (rys. 9.59). Następne rysunki 9.63, 9.64 i 9.65 zawierają nałożone przebiegi odkształceń wyznaczone numerycznie i z badań doświadczalnych dla kolejnych linii pomiarowych 1, 2 (3 nitka) i 3 (5 nitka). Widoczna jest zbieżność wyników zwłaszcza dla linii 1.



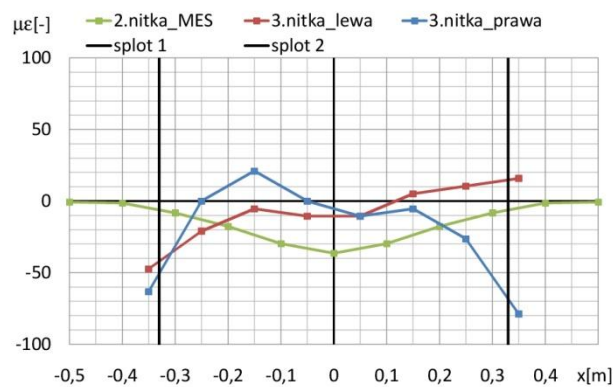
Rys. 9.61 Rozkład odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) poprzecznych analizy MES w liniach 1, 2 i 3 elementu numerycznego



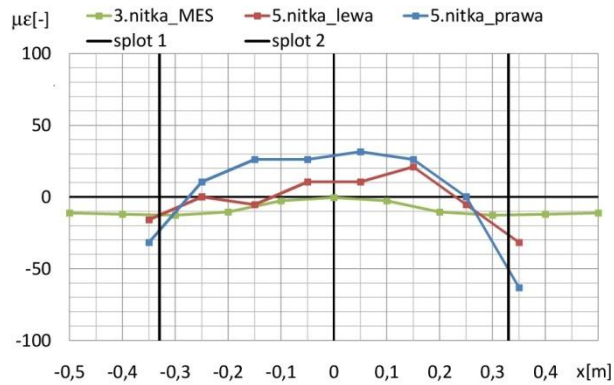
Rys. 9.62 Rozkład doświadczalnych odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) poprzecznych po obydwóch stronach tarczy w liniach 1, 3 i 5 w chwili zwolnienia naciągu



Rys. 9.63 Rozkład odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) poprzecznych doświadczalnych i numerycznych dla linii pomiarowej 1



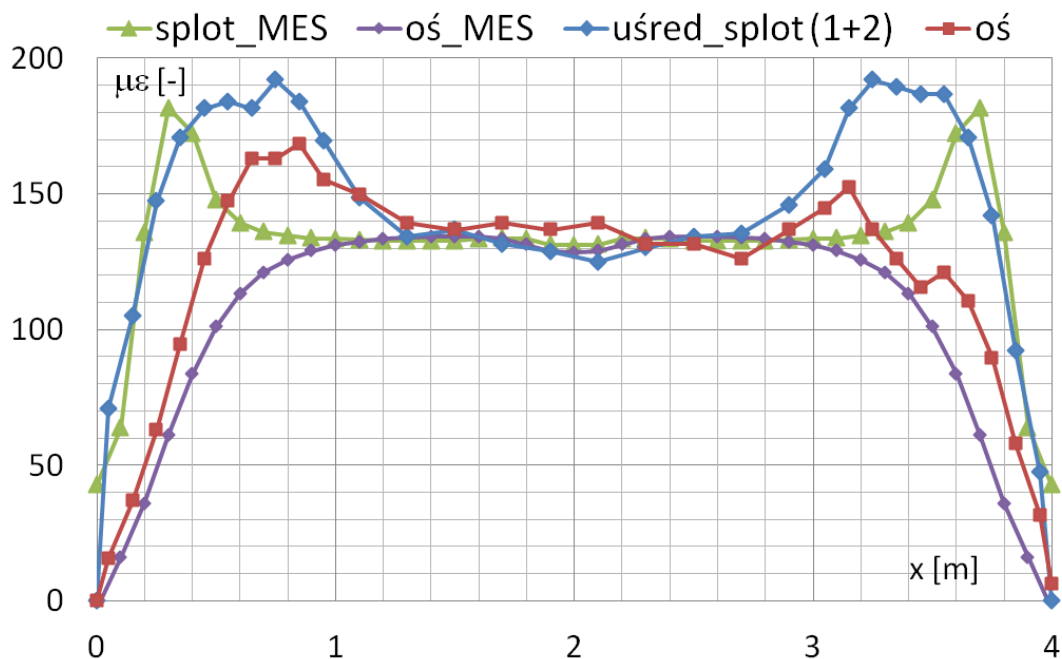
Rys. 9.64 Rozkład odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) poprzecznych doświadczalnych i numerycznych dla linii pomiarowej 3 (odpowiada 2 nitce w MES)



Rys. 9.65 Rozkład odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) poprzecznych doświadczalnych i numerycznych dla linii pomiarowej 5 (odpowiada 2 nitce w MES)

### 9.2.7 Analiza otrzymanych wyników z badań doświadczalnych

Analiza wyników otrzymanych z badań doświadczalnych w odniesieniu do wartości odkształceń betonu obliczonych metodą elementów skończonych, została dokonana w chwili, w której nastąpiło zwolnienie naciągu w splotach i przekazanie siły na element betonowej tarczy. Na rysunku 9.66 przedstawiono rozkłady średnich wartości odkształceń betonu pomierzonych wzdłuż splotów 1 i 2 oraz odkształceń betonu pomierzonych wzdłuż podłużnej osi tarczy. Wyznaczona graficznie dla tego stanu obciążenia długość transmisji, podana w tab. 9.6, wynosi 270 i 290 mm odpowiednio od strony naciągu i od strony zwolnienia naciągu. Obliczenia uzupełniające w metodzie elementów skończonych przeprowadzono przyjmując z zaokrąglenia długość transmisji 300 mm oraz określony doświadczalnie w tej chwili moduł sprężystości betonu  $E = 30\,000$  MPa. Otrzymane rozkłady odkształceń betonu wzdłuż linii splotów oraz wzdłuż podłużnej osi tarczy przedstawiono również na rys. 9.66.



Rys. 9.66 Pomierzone i obliczone (MES) odkształcenia betonu w chwili zwolnienia naciągu

Otrzymane bardzo podobne rozkłady odkształceń betonu w analizowanych przekrojach pomiarowych potwierdzają prawidłowość w przyjętej metodyce badawczej. Występujące pewne różnice w wartościach odkształceń można wytłumaczyć niejednorodnością materiału, jakim jest beton, metodyką pomiaru jak również wpływem warunków środowiskowych. Pomiar odkształceń betonu za pomocą czujnika nasadowego Demec trwały 1 godzinę. Do analiz obliczeniowych przyjęto moduł sprężystości betonu określony na podstawie badań przeprowadzonych na próbkach podczas badania przyczepności.

Na rysunkach 9.40 ÷ 9.42 przedstawiono zmiany rozkładu odkształceń betonu zachodzące w okresie do 56 dni od chwili zwolnienia naciągu. Śledząc przebiegi na kolejnych rysunkach 9.51 do 9.58 dochodzi się do wniosku, że zarejestrowane "piki" odkształceń betonu w zasięgu poślizgu dominują nad wartościami odkształceń odnotowanymi w połowie rozpiętości tarczy.

W celu dokonania oceny zmian odkształceń betonu w czasie, przeprowadzono obliczenia:

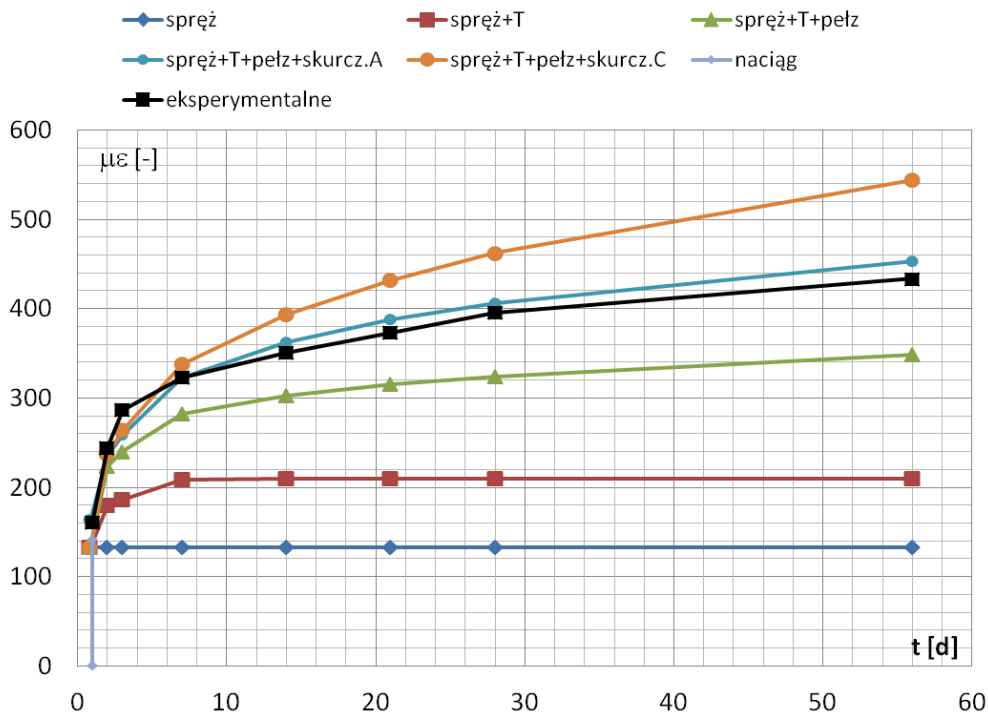
- odkształceń sprężystych (całkowita siła sprężająca tarczę  $P = P_1 + P_2 = 197 + 201 = 398$  kN);
- odkształceń wynikających z wychładzania betonu. Przyjęto średni współczynnik rozszerzalności termicznej dla bazaltu  $\alpha_t = 9,15 \cdot 10^{-6} \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ , (w pracy [17] zawiera się w przedziale  $7,9 - 10,4 \cdot 10^{-6} \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ );
- odkształceń pęcznienia betonu ( $RH = 50\%$ );
- odkształceń spowodowanych skurczem autogenicznym i skurczem od wysychania.

Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 9.7. W kolejnych wierszach wysumowano wpływ poszczególnych oddziaływań. W przedostatnim wierszu podano całkowite odkształcenia łącznie ze skurczem od wysychania. Określone w ten sposób odkształcenia przekraczają wartości pomierzonych odkształceń betonu. Z uwagi na fakt, że element badawczy przykryty był foliami i matami, do ostatecznych rozważań można pominąć odkształcenia betonu spowodowane wysychaniem. W ostatnim wierszu podano wartości pomierzonych odkształceń betonu. Na rysunku 9.67 zestawiono wyznaczone ze wzorów normowych mikrodeformacje ze średnimi odkształceniami otrzymanymi z badań doświadczalnych.

Tabela 9.7 Obliczone i pomierzone wartości odkształceń betonu w kierunku podłużnym tarczy

wiek betonu		20 godzin*	2 dni	3 dni	7 dni	14 dni	21 dni	28 dni	56 dni	
sprężyste	$\sigma_c$ [kN] = 398/0,1*1	3,98	3,98	3,98	3,98	3,98	3,98	3,98	3,98	
	$\epsilon_c (x 10^{-5}) = \sigma_c/E$	13,27	13,27	13,27	13,27	13,27	13,27	13,27	13,27	
	mikrodeformacje $\mu\epsilon$	<b>132,67</b>	<b>132,67</b>	<b>132,67</b>	<b>132,67</b>	<b>132,67</b>	<b>132,67</b>	<b>132,67</b>	<b>132,67</b>	
wpływ temperatury	[ $^\circ\text{C}$ ]	27,4	22,2	21,5	19,1	19,0	19,0	19,0	19,0	
	$\Delta T = 27,4 - T_i$ [C]	0,0	5,2	5,9	8,3	8,4	8,4	8,4	8,4	
	mikrodeformacje $\mu\epsilon$	0,0	47,6	54,0	75,9	76,9	76,9	76,9	76,9	
suma	$\epsilon_{cc} + \epsilon_c + \epsilon_T (x 10^{-5})$	<b>132,67</b>	<b>180,25</b>	<b>186,65</b>	<b>208,61</b>	<b>209,53</b>	<b>209,53</b>	<b>209,53</b>	<b>209,53</b>	
pęcznienie	$\varphi_c$	0,0	0,328	0,403	0,559	0,702	0,795	0,865	1,051	
	mikrodeformacje $\mu\epsilon$	0,0	43,5	53,5	74,2	93,1	105,5	114,8	139,4	
suma	$\epsilon_{cc} + \epsilon_c (x 10^{-5})$	<b>132,67</b>	<b>223,76</b>	<b>240,12</b>	<b>282,77</b>	<b>302,66</b>	<b>315,00</b>	<b>324,28</b>	<b>348,96</b>	
skurcz	autoge- niczny	$\epsilon_{ca}$ [ $\mu\epsilon$ ]	31,00	42,00	50,00	71,00	91,00	104,00	113,00	
		$\Delta (= \epsilon_T - \epsilon_1)$	0,00	11,00	19,00	40,00	60,00	73,00	82,00	
		mikrodeformacje $\mu\epsilon$	0,00	11,00	19,00	40,00	60,00	73,00	82,00	
		suma	<b>163,67</b>	<b>234,76</b>	<b>259,12</b>	<b>322,77</b>	<b>362,66</b>	<b>388,00</b>	<b>406,28</b>	<b>452,96</b>
		wysychanie $\epsilon_{cd}$ [ $\mu\epsilon$ ]	0,0	2,7	5,3	15,0	31,0	44,0	56,0	
	$\epsilon_{cc} + \epsilon_c + \epsilon_T + \epsilon_{ca}$ [ $\mu\epsilon$ ]	0,03	13,70	24,30	55,00	91,00	117,00	138,00	195,00	
SUMA	$\epsilon_{cc} + \epsilon_c + \epsilon_T + \epsilon_{ca}$ [ $\mu\epsilon$ ]	<b>132,69</b>	<b>237,46</b>	<b>264,42</b>	<b>337,77</b>	<b>393,66</b>	<b>432,00</b>	<b>462,28</b>	<b>543,96</b>	
odkształcenia z badań		<b>160,85</b>	<b>244,35</b>	<b>286,31</b>	<b>322,65</b>	<b>350,93</b>	<b>373,34</b>	<b>395,93</b>	<b>433,47</b>	

\* wiek betonu w chwili zwalniania naciągu



Rys. 9.67 Zestawienie doświadczalnych i obliczeniowych rozkładów odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu w funkcji czasu

Poniżej zestawiono obliczone długości transmisji dla obydwóch badanych przypadków wg wzorów zaproponowanych przez poszczególnych naukowców oraz podano w nawiasach stosunek wyznaczonej w badaniach długości transmisji do obliczeniowej, gdzie pierwsza wartość dotyczy końca czynnego (strona pras naciągowych), a druga biernego (strona zwalniana naciągu). Obliczenia długości transmisji dla przypadku "Jastrowie" i "Kraków" wykonano dla następujących danych:

	Jastrowie	Kraków
obciążenie początkowe $P_i, P_0$ [kN]	130,0	212,0
obciążenie po stratach doraźnych $P_e, P_{m0}$ [kN]	123,33	199,0
obciążenie po stratach $P_t, P_{mt}$ [kN]	110,0	180,0
naprężenie początkowe $f_{pi}, \sigma_{p0}$ [MPa]	1300	1420
naprężenie efektywne $f_{pe}, \sigma_{pm0}$ [MPa]	1233,3	1340
naprężenie po stratach $\sigma_{pmt}$ [MPa]	1100	1200
pole przekroju splotu $A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	100	150
wytrzymałość betonu na ściskanie		
w chwili zwolnienia naciągu $f'_{ci} f_{cmj} \sigma_{pm0}$ [MPa]	35,6	35,09
28 dni $f_{ck,28d}$ [MPa]	63,71	84,45
moduł sprężystości betonu $E$ [MPa]	26 000	30 000
średnica splotu $d_p$ [mm]	12,9	15,7
otulina betonowa [mm]	40	40
wyznaczona doświadczalnie długość transmisji:		
strona pras naciągowych [mm]:	700	270
strona zwalniania naciągu [mm]:	950	290

Tabela 9.8 Obliczone długości transmisji dla przypadku "Jastrowie" i "Kraków" wg poszczególnych wzorów zestawionych w tab. 4.2 (uporządkowanych wg roku powstania)

Źródło	Długość transmisji $l_{pb}$ [mm]	Jastrowie (zakład prefabrykacji)*	Kraków (hala PK)*
Model Code 1990	$l_{bpd} = \alpha_8 \cdot \alpha_9 \cdot \alpha_{10} \cdot l_{bp} \cdot \sigma_{pm0} / f_{pd}$	1219(0,57/0,78)	1249(0,22/0,23)
DIN 1045-1	$l_{bpb} = \alpha_1 \cdot \frac{A_p}{\pi \cdot d_p} \cdot \frac{\sigma_{pm0}}{f_{bp} \cdot \eta_1}$	823(0,85/1,15)	1102(0,24/0,26)
Eurocode 2	$l_{bpb} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot d_p \cdot \frac{\sigma_{pm0}}{f_{bp}(t)}$	907(0,77/1,05)	918(0,29/0,32)
ACI 318-05/ AASHTO Standard	$l_{bpb} = \frac{1}{21} \cdot d_p \cdot \sigma_{pmt}$	676(1,04/1,40)	737(0,37/0,40)
ACI 318-05/ AASHTO Standard	$l_{bpb} = 50 \cdot d_p$	645(1,08/1,47)	785(0,34/0,37)
AASHTO LRFD	$l_{bpb} = 60 \cdot d_p$	774(0,9/1,23)	942(0,29/0,31)
PN	$l_{pt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \phi \cdot \sigma_{pm0} / f_{bpt}$	891(0,79/1,07)	859(0,31/0,34)
Model Code 2010	$l_{bpt} = \alpha_{p1} \alpha_{p2} \alpha_{p3} l_{pb} \frac{\sigma_{pi}}{f_{ptd}}$	1218(0,57/0,77)	1238(0,22/0,23)
Hanson i Kaar	$l_{bpb} = 60 \cdot d_p$ (wzór uproszczony)	758 (0,92/1,25)	1002 (0,27/0,29)
Oleśniewicz	$L_t = \psi d_b \sqrt{\frac{f_{pe}}{f'_{ci}}}$	759 (0,92/1,25)	986 (0,27/0,29)
Martin et al.	$l_{bpb} = 80 \cdot d_p$	1032 (0,68/0,92)	1256 (0,21/0,23)
Zia et. al.	$l_{bpb} = \alpha_1 \cdot \frac{\sigma_{pm0}}{f_{cmj}} \cdot d_p - A_1$	523 (1,34/1,82)	748 (0,36/0,39)
Zia i Moustafa	$L_t = \frac{1,5 f_{pi} d_b}{f'_{ci}} - 117$	590 (1,19/1,61)	868 (0,31/0,33)
Nijhawam	$L_t = \frac{0,69 f_{pi} d_b}{f'_{ci}} + 262$	587 (1,19/1,62)	715 (0,38/0,41)
Cousins, et al.	$l_{bp} = \frac{0,0415 \cdot U'_t \cdot \sqrt{f_{cmj}}}{B} + \frac{12 \cdot \sigma_{pmt} \cdot A_p}{\pi \cdot d_p \cdot U'_t \cdot \sqrt{f_{cmj}}}$	1221 (0,57/0,78)	1646 (0,24/0,26)
Cousins i inni	$L_t = \frac{f_{pe} d_b}{2,22 \sqrt{f'_{ci}}} + 3,41 \sqrt{f'_{ci}}$	1221 (0,57/0,78)	1646 (0,16/0,18)
Bruggeling i Huyghe	$L_t = 7 f_{pi} d_w / 12(0,13) f'_{ci}$	698 (1,00/1,36)	972 (0,28/0,30)
Shahawy et al.	$l_{bpb} = \frac{1}{21} \cdot d_p \cdot \sigma_{pm0}$	758 (0,92/1,25)	1002 (0,27/0,29)
Balazs	$L_t = 2,93 d_b \sqrt[5]{\frac{f_{pi}^3}{f'_{ci}{}^2}}$	669 (1,05/1,42)	875 (0,31/0,33)
Russel et al.	$l_{bpb} = \frac{1}{13,8} \cdot d_p \cdot \sigma_{pmt}$	1153 (0,61/0,92)	1524 (0,18/0,19)
Russel et al.	$l_{bpb} = 80 \cdot d_p$	1032 (0,68/0,92)	1256 (0,21/0,23)

Mitchell et al.	$l_{bp} = \frac{1}{21} \cdot d_p \cdot \sigma_{pm0} \cdot \sqrt{\frac{20,7}{f_{cmj}}}$	578 (1,21/1,64)	782 (0,35/0,37)
Deatherage et al.	$l_{bp} = \frac{1}{21} \cdot d_p \cdot \sigma_{pm0}$	758 (0,92/1,25)	1002 (0,27/0,29)
Buckner	$l_{bp} = \frac{1250}{E_c} \cdot d_p \cdot \sigma_{pm0}$	765(0,91/1,24)	877(0,31/0,33)
Buckner	$l_{bp} = \frac{\eta_1}{21} \cdot d_p \cdot \sigma_{pm0}$	758 (0,92/1,25)	1002 (0,27/0,29)
Lane	$l_{bp} = \frac{4 \cdot d_p \cdot \sigma_{p0}}{f_{ck,28d}} - 127$	872 (0,80/1,09)	929 (0,29/0,31)
Barnes et al.	$l_{bp} = \frac{1}{2,1 \cdot \sqrt{f_{cmj}}} \cdot d_p \cdot \sigma_{pm0}$	1270 (0,55/0,75)	1719 (0,16/0,17)
Tadros et al.	$l_{bp} = \frac{d_p \cdot \sigma_{pmt}}{16,6} - 127$	831 (0,84/1,14)	1008 (0,27/0,29)
Petermann et al.	$l_{pb} = 50 \cdot d_p$	645 (1,09/1,23)	785 (0,34/0,37)
Petermann et al.	$l_{bp} = 70 \cdot d_p$	903 (0,78/1,05)	1099 (0,25/0,26)
Mahmoud et al.	$l_{bp} = \frac{d_p \cdot \sigma_{pm0}}{\alpha_t \cdot f_{cmj}^{\frac{2}{3}}} - 127$	486 (1,44/1,96)	709 (0,38/0,41)
Shahawy	$l_{pb} = \frac{1}{21} \cdot d_p \cdot \sigma_{pm0}$	758 (0,92/1,25)	1002 (0,27/0,29)
Kose et al.	$l_{bp} = 29 \cdot \left(1 - \frac{d_p}{25,4}\right)^2 \cdot \frac{\sigma_{pm0}}{\sqrt{f_{ck,28d}}}$	1085 (0,65/0,88)	617 (0,44/0,47)
Nitsch	$l_{bp} = \alpha_1 \cdot \frac{A_p \cdot \sigma_{pm0}}{1,6 \cdot \pi \cdot \sqrt{A_p} \cdot f_{bp}}$	575(1,22/1,62)	802(0,35/0,36)
Martí-Vargas et al.	$l_{bp} = 758 - 5,9 \cdot f_{cmj}$	548 (1,28/1,73)	558 (0,48/0,52)
Martí-Vargas et al.	$l_{bp} = \lambda \cdot \frac{A_p \cdot \sigma_{pm0}}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot d_p \cdot 0,4 \cdot f_{cmj}^{\frac{2}{3}}}$	528 (1,33/1,80)	729 (0,37/0,40)
Oh et al.	$l_t = 8 \cdot \sqrt{f_{pc}} \cdot \left(\frac{1}{f_{ct}}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot d_b^{1,28} \cdot \left(\frac{1}{c - 20,0} + 0,25\right)$	677 (1,03/1,33)	922 (0,29/0,31)

\* ( $L_{exp,cz}/L_{obl}$ )/( $L_{exp,b}/L_{obl}$ ) w nawiasach pierwsza wartość odpowiada stosunkowi wartości otrzymanej w badaniach doświadczalnych po stronie pras naciągowych do obliczonej  $L_{exp,cz}/L_{obl}$ , druga jest stosunkiem wartości otrzymanej po stronie zwolnienia naciągu do obliczeniowej

Stosunek wyznaczonych doświadczalnie wartości długości transmisji siły naciągowej w porównaniu do obliczonych wartości zawiera się w zakresie 0,55 - 1,96 dla przypadku "Jastrowie" oraz 0,16 - 0,52 dla przypadku "Kraków".



## 10 PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W przeprowadzonych badaniach doświadczalnych zastosowano beton wysokiej wytrzymałości C80/95 wykonany na kruszywie bazaltowym o uziarnieniu  $2\div 16$  mm z dodatkiem krzemionki (pyłu krzemionkowego) Sika Fume w ilości 5% w stosunku do wagi cementu. Podkreślenie tego faktu ma istotne znaczenie z uwagi na często spotykane dyskusje na temat przyczepności BWW do stalowych splotów jak również na temat długości transmisji siły naciągowej w elementach wykonanych z BWW na bliżej nieokreślonym kruszywie. Wysoka wytrzymałość betonu może być uzyskiwana w wyniku zastosowania odpowiednich plastyfikatorów oraz dodatków znacząco redukujących wodę bez udziału krzemionki. Wnioski wyprowadzone na podstawie wyników uzyskanych dla takich mieszanek betonowych nie mogą być bezpośrednio przenoszone do praktyki projektowej i wykonawczej, a tym bardziej do procesu normalizacji. Często badania doświadczalne prowadzone są na mieszankach betonowych wykonanych na kruszywie żwirowym, a otrzymany beton charakteryzuje się niskim modułem sprężystości mimo osiągnięcia 1-dniowej wytrzymałości na ściskanie rzędu 35 MPa pozwalającej na zwolnienie siły naciągowej.

Opracowane formuły przez różnych autorów badań na długość transmisji siły sprężającej nie mogą mieć zatem uniwersalnego przesłania z uwagi na bardzo zróżnicowaną bazę danych.

W wielu publikacjach i raportach z przeprowadzonych badań doświadczalnych, przy analizie przyczepności betonu do splotu podnosi się problem czystości splotu, stopnia zabrudzenia wynikającego z technologii produkcji lub niewłaściwych warunków składowania, stopień korozji oraz zastosowanie powłok ochronnych. Bardzo mało uwagi poświęca się samej konstrukcji splotu, średnicy drutów i ukształtowaniu zewnętrznej warstwy mającej bezpośredni kontakt z betonem.

W prezentowanej pracy wszystkie elementy badawcze i próbné wykonane zostały w identycznych warunkach na mieszance betonowej o ustalonym składzie przy dozowaniu suchych składników. Spełnione zostały dobre warunki betonowania, a układanie mieszanki betonowej następowało w kierunku prostopadłym do położenia splotu. Sploty zastosowane w badaniach były czyste, bez śladów nalotów korozji.

Badania przyczepności betonu do stalowych splotów w zakładach prefabrykacji prowadzone są na ogół na elementach próbných wykonanych ze splotem bez naciągu. Stosowane długości czynne dochodzą do 460 mm. W ośrodkach naukowych badania tego typu prowadzone są na próbkach ze splotem pod naciągiem, przyjmują różne efektywne długości przyczepności w zależności od zaprojektowanego stanowiska badawczego.

Wynikające wnioski z tych badań nie są spójne, stąd też w pracy zastosowano następujące długości czynne: 40, 80, 120, 240, 330 i 460 mm przy zachowaniu stałej wartości otuliny betonowej. Żadna z badanych próbek nie uległa zniszczeniu w wyniku rozłupania betonowej próbki.

## 10.1 Rodzaj splotu i efektywna długość przyczepności

Z uwagi na sposób realizacji elementów próbnych można uznać, że spełnione zostały dobre warunki wykonania prefabrykowanych elementów. Wyniki otrzymane z przeprowadzonych badań doświadczalnych potwierdzają postawioną w pracy tezę, że mechanizm przyczepności betonu wysokiej wytrzymałości do splotów sprężających zależy od rodzaju splotu i czynnej długości przyczepności, przy spełnieniu dobrych warunków wykonania strunobetonowych prefabrykatów.

### 10.1.1 Rodzaj splotu

- W przypadku splotów zamkniętych typu 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu, średnie wartości naprężenia przylegania zdefiniowane na poziomie poślizgu 0,1 mm nie zależą do długości przyczepności w przedziale 40 - 240 mm i wynosi 1,14 MPa. Naprężenie przyczepności określone dla poślizgu 10 mm wynosi 5,79 MPa przy  $v = 11,1\%$ , w zakresie długości przyczepności 40 - 240 mm.
- Średnie wartości naprężenia przyczepności wyznaczone dla efektywnych długości przyczepności w przedziale od 80 do 460 mm dla splotów 7 $\phi$ 4 mm i 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu wynoszą odpowiednio 4,52 MPa przy współczynniku zmienności  $v = 4,07\%$  oraz 7,11 MPa przy współczynniku zmienności  $v = 6,11\%$ .
- Średnie wartości naprężenia przyczepności uzyskane po jednym dniu dojrzewania betonu w przypadku splotów 7 $\phi$ 5 mm są większe o 72,70% od analogicznych wartości dla splotu 7 $\phi$ 4 mm i ta tendencja utrzymuje się do 28 dnia i wynosi po 3, 7 i 28 dniach odpowiednio 72,36%, 58,72% i 50,85%. Średnio naprężenie przyczepności w okresie 1 - 28 dni dla splotów 7 $\phi$ 5 mm jest większe od naprężenia przyczepności dla splotów 7 $\phi$ 4 mm o 63,66%.

### 10.1.2 Efektywna długość przyczepności

- Naprężenie przyczepności wyznaczone dla efektywnej długości przyczepności 40 mm zdecydowanie różni się od średnich wartości dla splotów 7 $\phi$ 4 mm i 7 $\phi$ 5 mm okrągłych bez naciągu. Charakteryzuje się najniższymi wartościami zarówno dla małych poślizgów 0,01 i 0,0254 mm jak dla maksymalnego poślizgu 10,0 mm.
- Średnie naprężenie przyczepności BWW można uznać za stabilne
  - w przypadku splotu 7 $\phi$ 4 mm bez naciągu bez względu na efektywną długość przyczepności w przedziale od 80 mm do 460 mm. Wartości średnie  $\tau$  i odpowiadające im współczynniki zmienności  $v$  (%) dla rozważanego wieku betonu po 1, 3, 7 i 28 dni wynoszą odpowiednio 3,35 MPa (8,0%), 3,92 MPa (1,9%), 5,01 MPa (8,54%) i 5,77 MPa (6,77%). Średnie naprężenie przyczepności dla okresu 1 - 28 dni wynosi 4,51 MPa przy  $v = 4,22\%$ .
  - w przypadku splotu 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu bez względu na efektywną długość przyczepności w przedziale od 80 mm do 460 mm. Wartości średnie  $\tau$  i odpowiadające im współczynniki zmienności  $v$  (%) dla rozważanego wieku betonu po 1, 3, 7 i 28 dniach wynoszą odpowiednio 5,60 MPa (12,13%); 6,75 MPa (11,25%); 7,76 MPa (1,91%) i 8,19 (8,16%). Średnie naprężenie przyczepności dla okresu 1 - 28 dni wynosi 7,07 MPa przy  $v = 6,97\%$ .
  - Średnie naprężenie przyczepności BWW do splotu 7 $\phi$ 5 mm z naciągiem można uznać za stabilne dla efektywnej długości przyczepności w przedziale od 120 mm do 240 mm i wieku betonu do 28 dni dojrzewania. Dla efektywnych długości przyczepności 80, 330 i 460 mm obserwuje się spadek wartości średniego naprężenia przyczepności. Wartości średnie  $\tau$

i odpowiadające im współczynniki zmienności  $v$  (%) dla rozważanego wieku betonu po 1, 3, 7 i 28 dniach wynoszą odpowiednio 8,96 MPa (9,07%); 9,49 MPa (8,45%); 9,69 MPa (10,73%) i 10,57 MPa (10,60%). Średnie naprężenie przyczepności dla okresu 1 - 28 dni wynosi 9,69 MPa przy  $v$  9,49%.

## 10.2 Wiek betonu i stopień sprężenia

### 10.2.1 Wiek betonu

- Naprężenia przyczepności BWW do stalowych splotów siedmiodrutowych rosną wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu na ściskanie. Zależność ta potwierdzona została zarówno do splotów zamkniętych jak i otwartych. Ponadto w przypadku splotów otwartych, wpływ wieku betonu na wzrost naprężenia przyczepności odnotowano również w odniesieniu do elementów próbnych formowanych na naciągniętych splotach  $7\phi 5$  mm.
- Największe przyrosty średniego naprężenia przyczepności odnotowuje się w okresie od 1 do 7 dnia i wynoszą one dla splotów  $7\phi 4$  mm bez naciągu,  $7\phi 5$  mm bez naciągu i  $7\phi 5$  mm z naciągiem odpowiednio 55%, 42% i 8,0%.
- Przyrosty między 7 a 28 dniem dojrzewania betonu wynoszą dla splotów  $7\phi 4$  mm bez naciągu,  $7\phi 5$  mm bez naciągu i  $7\phi 5$  mm z naciągiem odpowiednio 13%, 7,4% i 9,5%.
- Wartość naprężenia przyczepności rośnie wraz ze wzrostem poślizgu odniesienia, w każdym okresie pomiarowym (dla każdego wieku betonu) w przypadku splotów  $7\phi 4$  mm bez naciągu,  $7\phi 5$  mm bez naciągu i  $7\phi 5$  mm z naciągiem.
- W przypadku splotów zamkniętych typu  $7\phi 5$  mm naprężenie przylegania zdefiniowane na poziomie poślizgu 0,1 mm jest stałe w okresie od 1 dnia do 28 dnia dojrzewania betonu i wynosi 1,14 MPa.
- Względny przyrost naprężenia przyczepności BWW do stalowych splotów okrągłych typu  $7\phi 4$  mm i  $7\phi 5$  mm jest większy niż względny przyrost wytrzymałości betonu na rozciąganie. Fakt ten przemawia za uznaniem wytrzymałości betonu na ściskanie i współczynnika sprężystości betonu, jako punktu odniesienia do analizy naprężenia przyczepności BWW do stalowych splotów sprężających.

### 10.2.2 Stopień sprężenia

- Średnie naprężenia przyczepności uzyskane po jednym dniu dojrzewania betonu w przypadku splotów  $7\phi 5$  mm z naciągiem są większe o 70,67% od analogicznych wartości dla splotu  $7\phi 5$  mm bez naciągu. Tendencja wzrostowa utrzymuje się do 28 dnia i wynosi po 3, 7 i 28 dniach odpowiednio 49,21%, 29,76% i 32,33%. Średnio naprężenie przyczepności w okresie 1 - 28 dni dla splotów  $7\phi 5$  mm z naciągiem jest większe od naprężenia przyczepności dla splotów  $7\phi 5$  mm bez naciągu o 45,49%.
- Ograniczając naprężenia przyczepności do poślizgów 0,1; 0,254; 1,0; 2,54 i 10 mm średnie naprężenie przyczepności BWW do splotów  $7\phi 5$  mm z naciągiem po 1 dniu dojrzewania betonu są większe o 52% w stosunku do analogicznie obliczanych naprężeń dla splotów  $7\phi 5$  mm bez naciągu dla efektywnych długości przyczepności w przedziale 80 - 460 mm.
- Najbardziej regularne zmiany stosunku obu naprężeń przyczepności zarejestrowano dla poślizgu 1,0; 2,54 i 10 mm. Proponuje się w badaniach doświadczalnych uznać za najbardziej miarodajne wartości poślizgu 2,54 mm.
- Najmniejszy wpływ naciągu splotu na naprężenia przyczepności BWW widoczny jest dla efektywnej długości przyczepności 460 mm. Wzrost naprężenia przyczepności z tytułu sprężenia (naciągnięcia) splotu wynosi 18% po 1 dniu oraz 10% po 3, 7 i 28 dniach dojrzewania betonu.

### 10.3 Zastosowanie BWW do produkcji płyt strunobetonowych

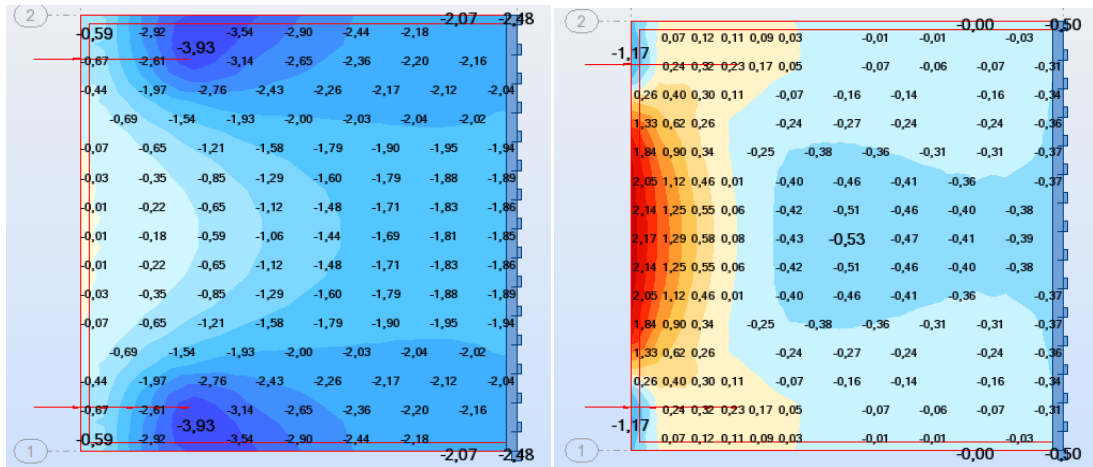
Przeprowadzona analiza numeryczna MES (o zmieniającej się geometrii tarczy, liczbie i rozstawie splotów, długości transmisji oraz wartości siły sprężającej) rozkładu odkształceń w strunobetonowych tarczach oraz wykonane badania doświadczalne w Zakładzie Prefabrykacji podczas produkcji strunobetonowych płyt z betonu zwykłego jak również w Instytucie L-1 na strunobetonowej tarczy z BWW pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- równomierny rozstaw splotów sprężających w tarczy strunobetonowej w odstępie/interwale równym około 0,15 do 0,30 m skutkuje równomiernie rozłożonymi naprężeniami w kierunku podłużnym, a w kierunku poprzecznym występujące naprężenia rozciągające osiągają niewielkie wartości
- konsekwencją wzrostu rozstawu splotów (powyżej 0,4 m) jest nierównomierność rozkładu naprężeń ściskających w kierunku podłużnym z tworzeniem się "niecki" naprężeń penetrującej w głąb tarczy
- wzrost rozstawu splotów powoduje pojawienie się na czole tarczy naprężeń rozciągających, które po przekroczeniu wytrzymałości betonu na rozciąganie, prowadzą do pojawienia się i rozwoju zarysowania;
- otwory technologiczne (niezależnie od usytuowania między splotami czy przez splot) prowadzą do wzrostu w kierunku podłużnym naprężeń ściskających w obszarze "piku" rozprzestrzeniającym się aż do krawędzi otworu (redukcja przekroju poprzecznego);
- otwór technologiczny skutkuje odprężeniem i redukuje naprężenia rozciągające w kierunku poprzecznym w czole tarczy. Pojawiają się natomiast naprężenia rozciągające na krawędziach otworu (konieczność zastosowania odpowiedniego zbrojenia poprzecznego), co nie eliminuje problemu wodoszczelności elementu;
- splot przebiegający przez oś otworu poprawia zdolność eksploatacyjną tarczy przez wzrost naprężeń ściskających w paśmie otworu i powoduje dalszą redukcję naprężeń rozciągających w czole tarczy i dalszy wzrost naprężeń rozciągających na krawędziach otworu;
- mniejsza wartość długości transmisji powoduje koncentrację naprężenia, co wyraża się w kierunku podłużnym większymi wartościami naprężeń w "piku" (na końcu wprowadzenia siły sprężającej);
- redukcja długości transmisji skutkuje wzrostem na czole tarczy naprężeń rozciągających w kierunku poprzecznym;
- przy zmniejszającej się długości transmisji, siła obciążająca tarczę przypadająca na jednostkę długości wzrasta, co ma niekorzystny wpływ na stan naprężenia i odkształcenia tarczy;
- zastosowanie BWW do produkcji tarczy strunobetonowych umożliwia nie tylko wyeliminowanie zarysowania tarcz na etapie produkcji ale również przyczynia się do skrócenia długości transmisji;
- otrzymane w wyniku przeprowadzonych badań doświadczalnych rozkłady odkształceń betonu na górnej powierzchni tarczy różnią się zdecydowanie od publikowanych wyników otrzymanych z badań doświadczalnych dla belek (pomiaru odkształceń zarejestrowano na bocznych powierzchniach belek);
- podane w tabeli 9.5 długości transmisji zostały określone dla przyjętego sposobu wyznaczenia wartości średniego odkształcenia. Obecność "pików" odkształceń i przyjęcie stosowanego odcinka długości tarczy do wyznaczenia wartości średniego odkształcenia betonu, ma istotny wpływ na określenie rzeczywistej długości transmisji.
- Przeprowadzone badania doświadczalne potwierdziły występowanie naprężeń rozciągających w czole tarczy między splotami w chwili wolnienia naciągu. Zgodność otrzymanych rozkładów

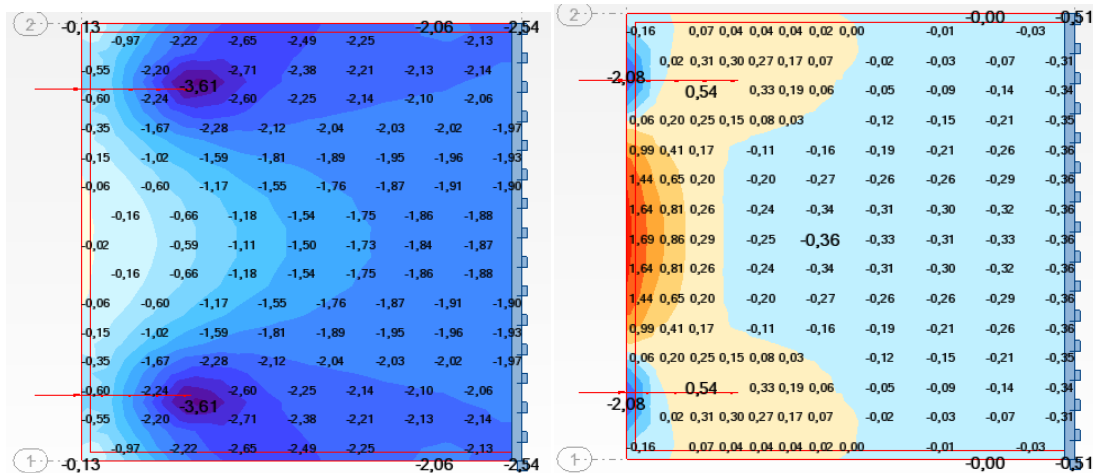
odkształceń betonu pomierzonych z obliczonymi potwierdza prawidłowe przyjęcie założeń obliczeniowych w MES.

- W zaistniałej sytuacji należy przeprowadzić uzupełniające badania doświadczalne na podobnych elementach z jednoczesnym pomiarem wartości wślizgu splotów w chwili zwolnienia naciągu i stałą kontrolą jego zmiany w czasie. Ponadto w badaniach uzupełniających należy w prefabrykowanych elementach zastosować zbrojenie zwykłe w postaci siatek zbrojeniowych w celu wyjaśnienia ewentualnego ich wpływu na rozkład odkształceń betonu w strefie zarejestrowanych "pików" na długości transmisji siły naciągowej.

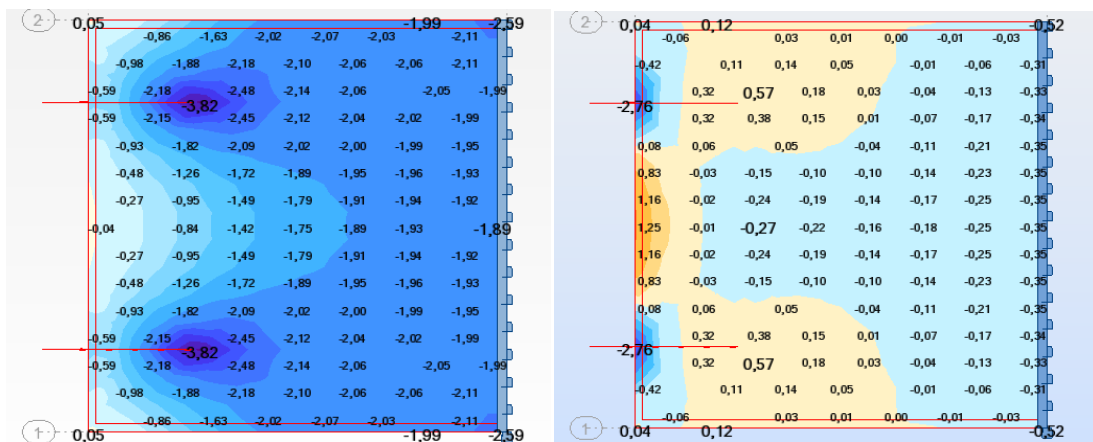
## ZAŁĄCZNIK A



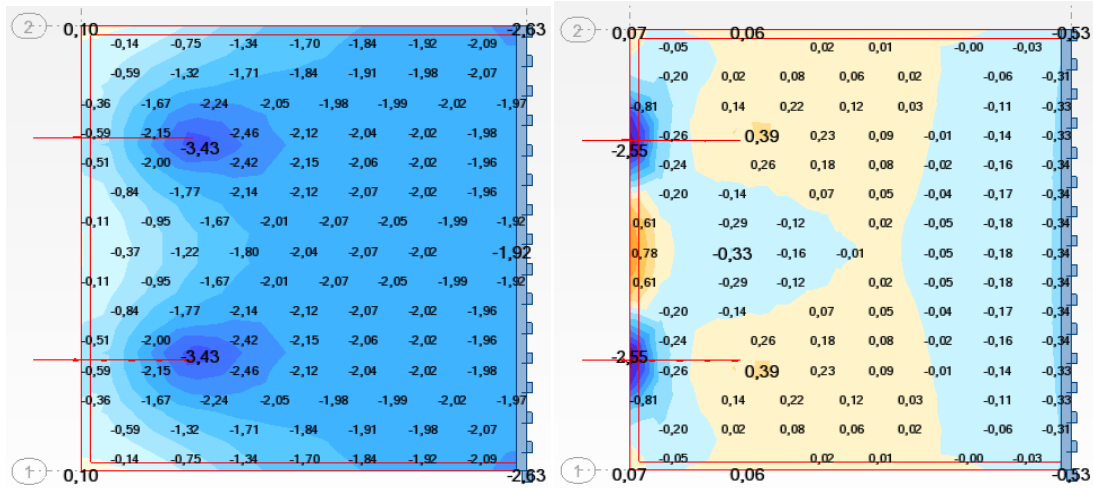
Rys. A.1 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,6 m



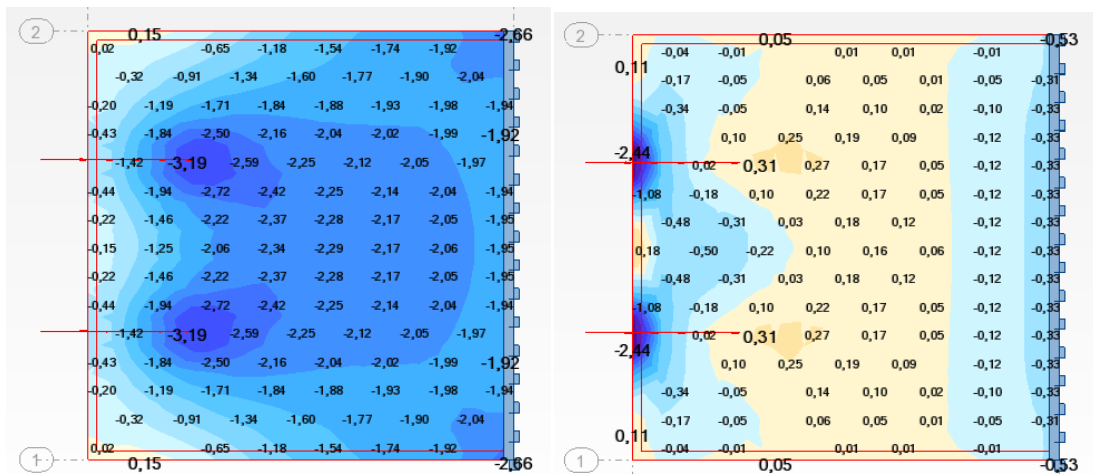
Rys. A.2 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,4 m



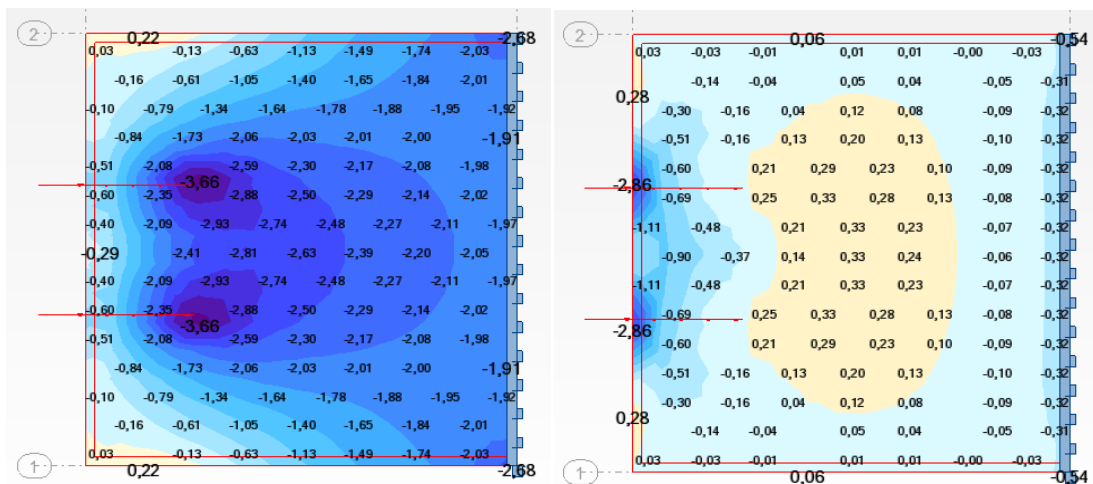
Rys. A.3 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,2 m



Rys. A.4 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,0 m

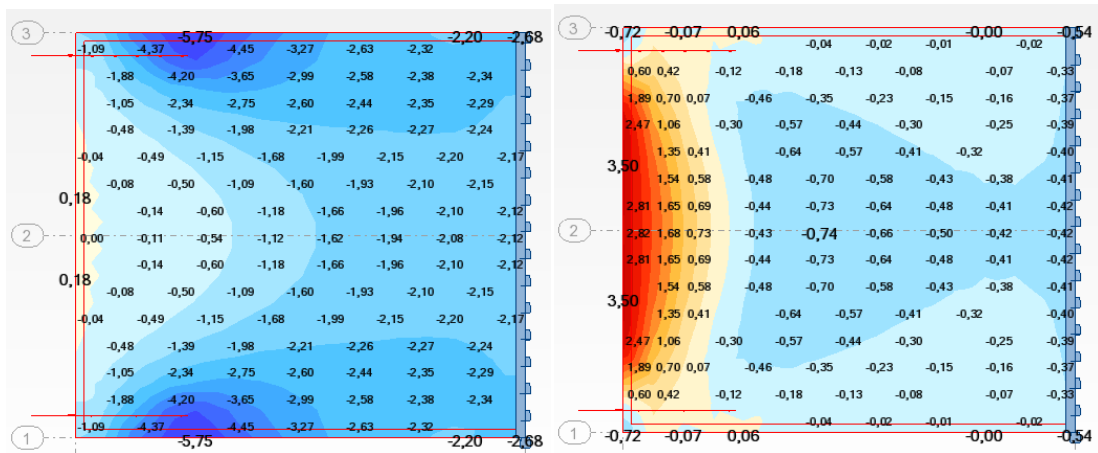


Rys. A.5 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,8 m

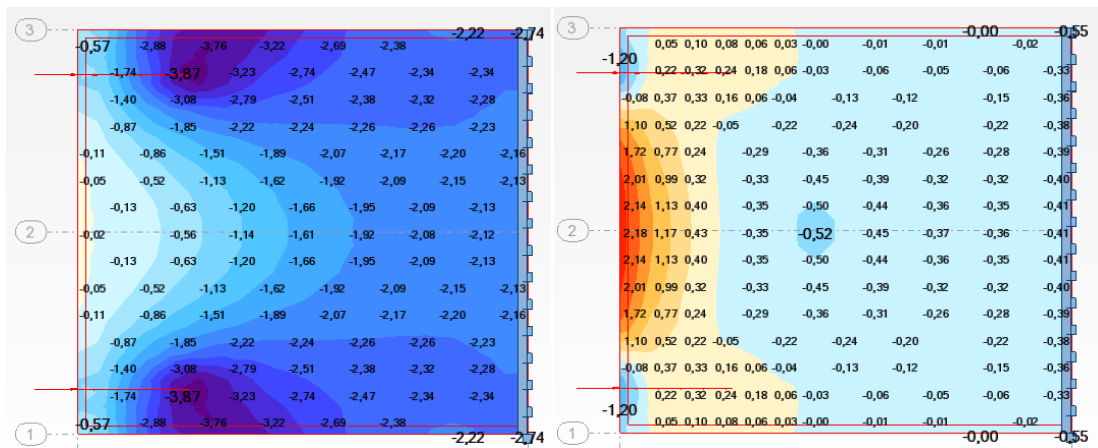


Rys. A.6 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,6 m

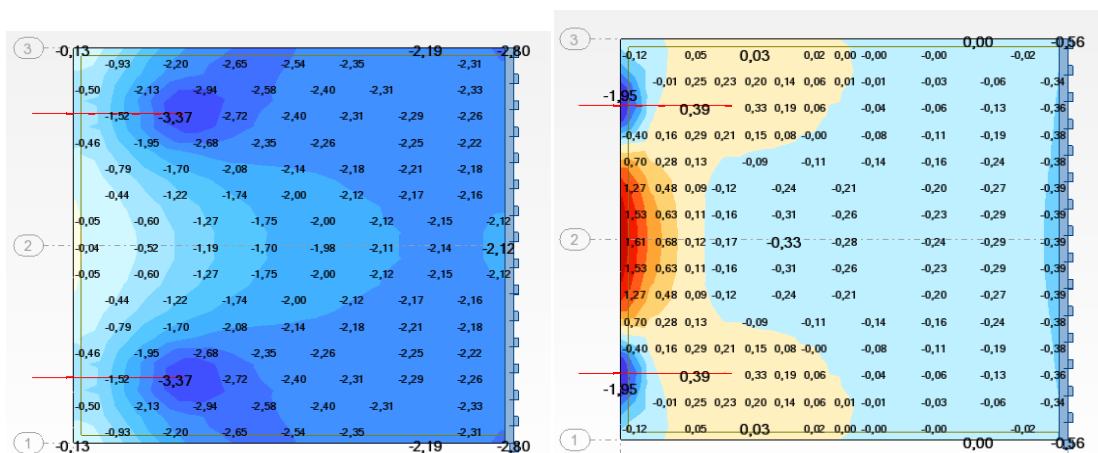




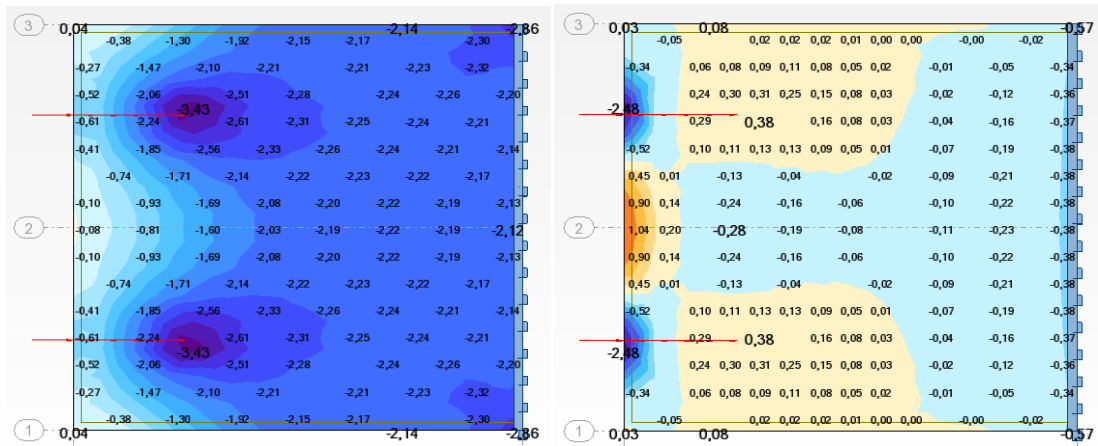
Rys. A.7 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,6 m



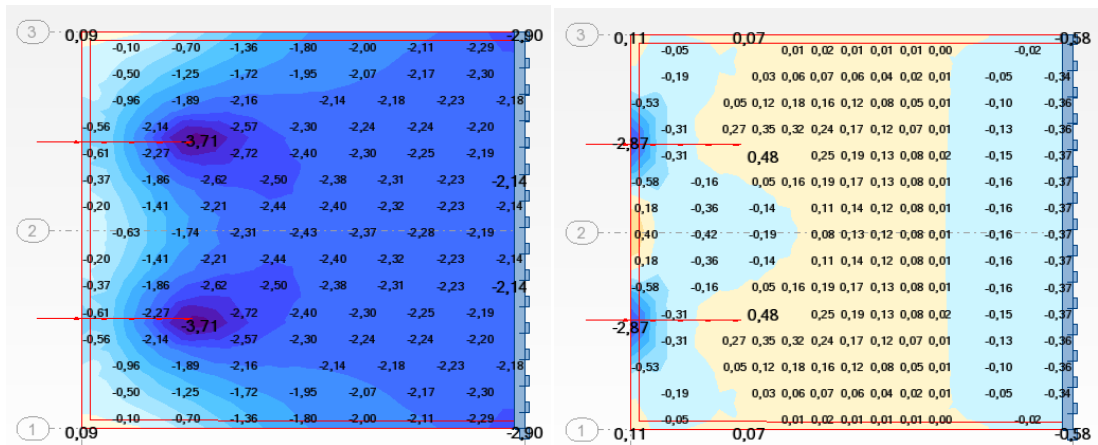
Rys. A.8 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,4 m



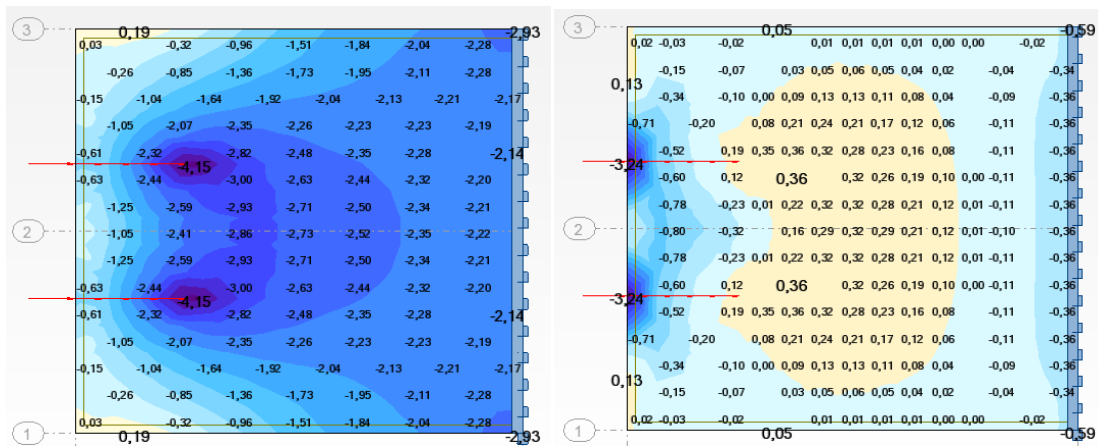
Rys. A.9 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,2 m



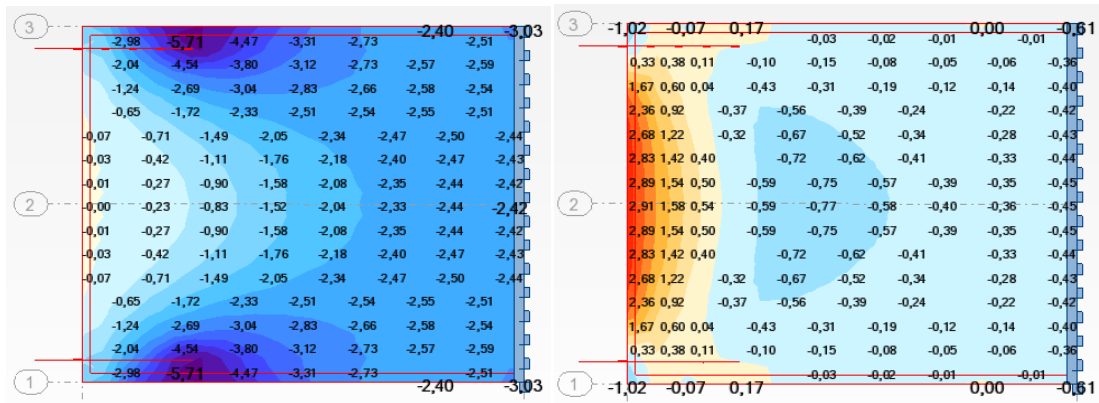
Rys. A.10 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,0 m



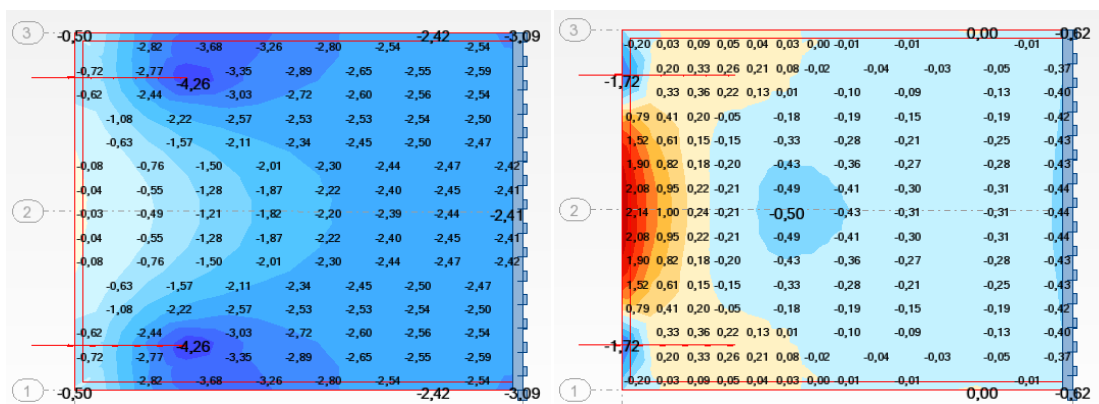
Rys. A.11 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,8 m



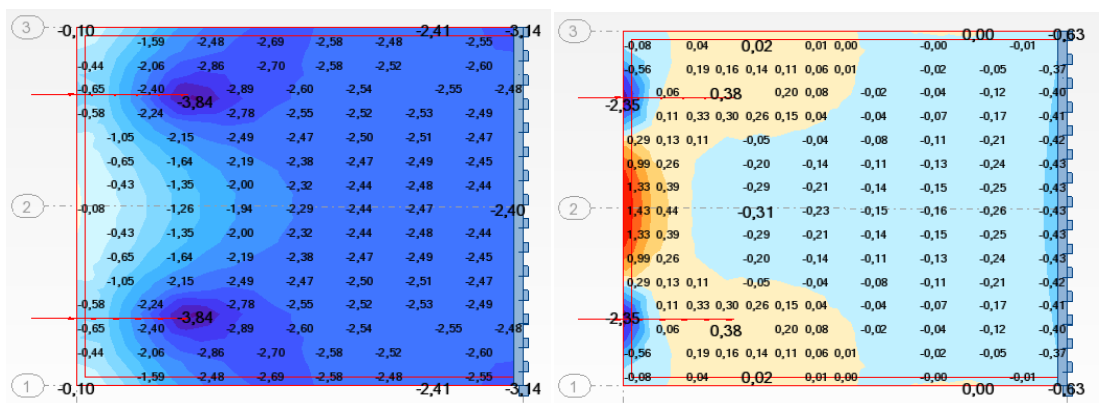
Rys. A.12 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,6 m



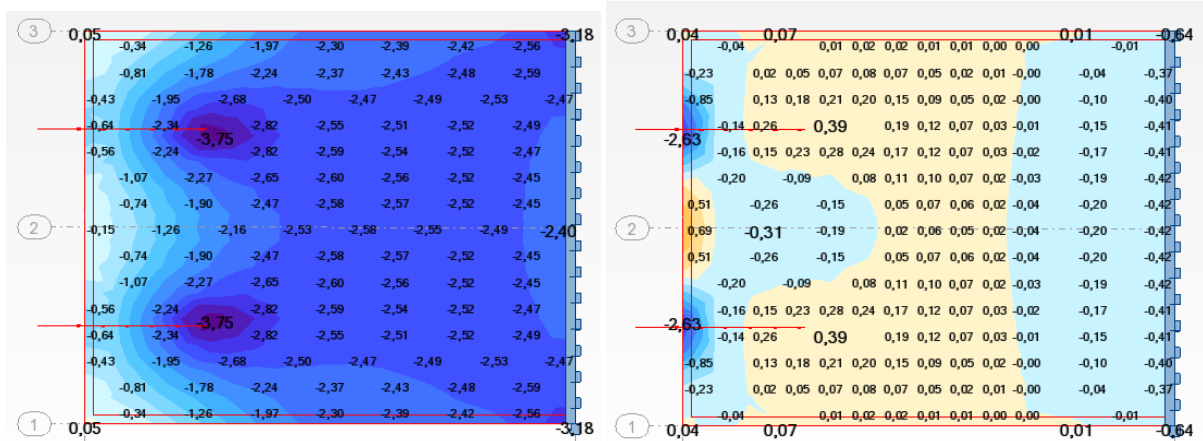
Rys. A.13 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,6 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,4 m



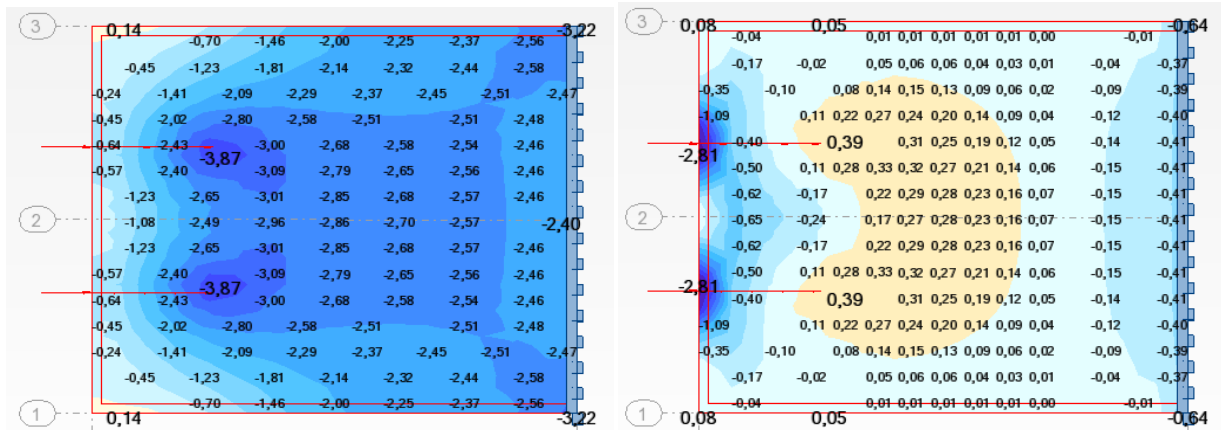
Rys. A.14 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,6 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,2 m



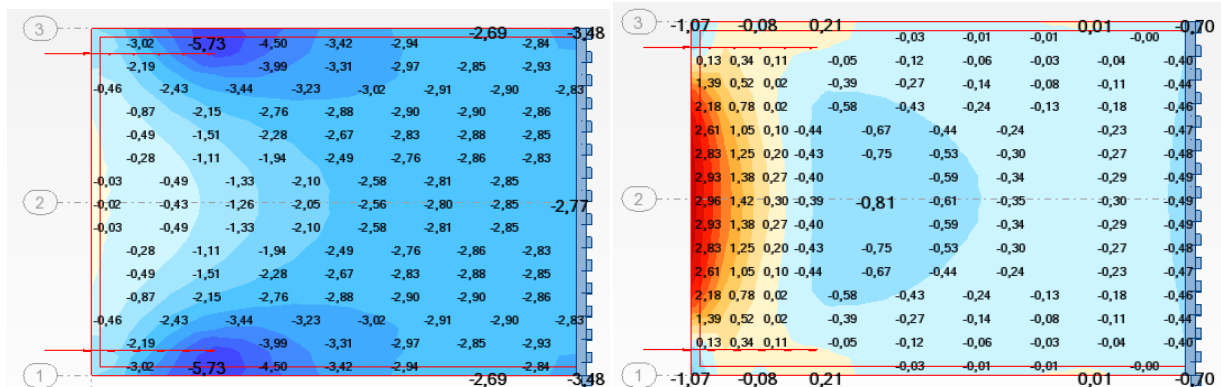
Rys. A.15 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,6 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,0 m



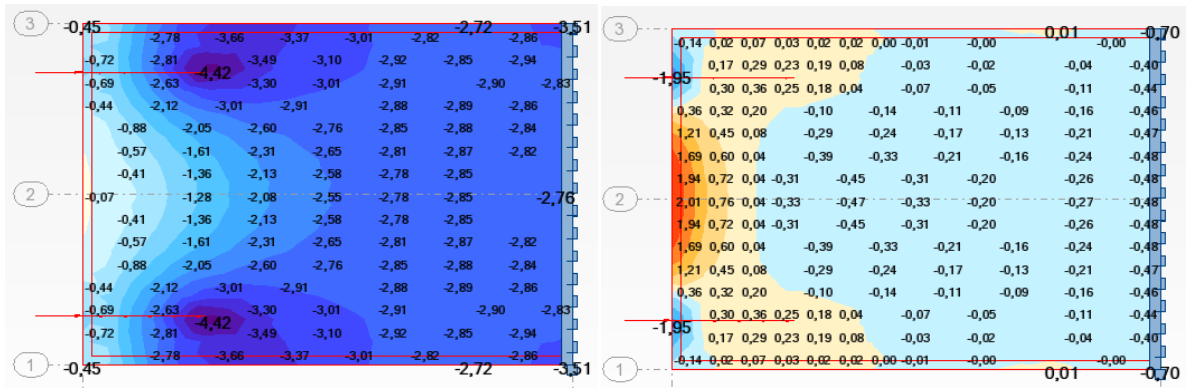
Rys. A.16 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,6 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,8 m



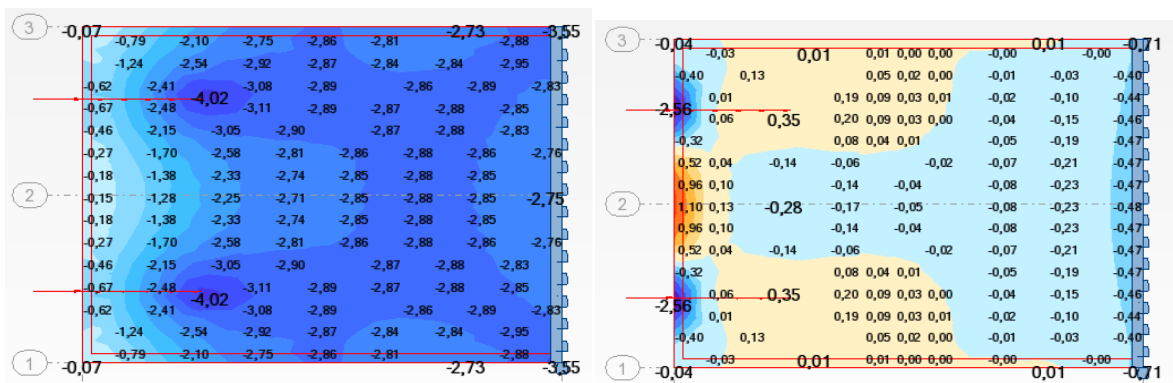
Rys. A.17 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,6 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,6 m



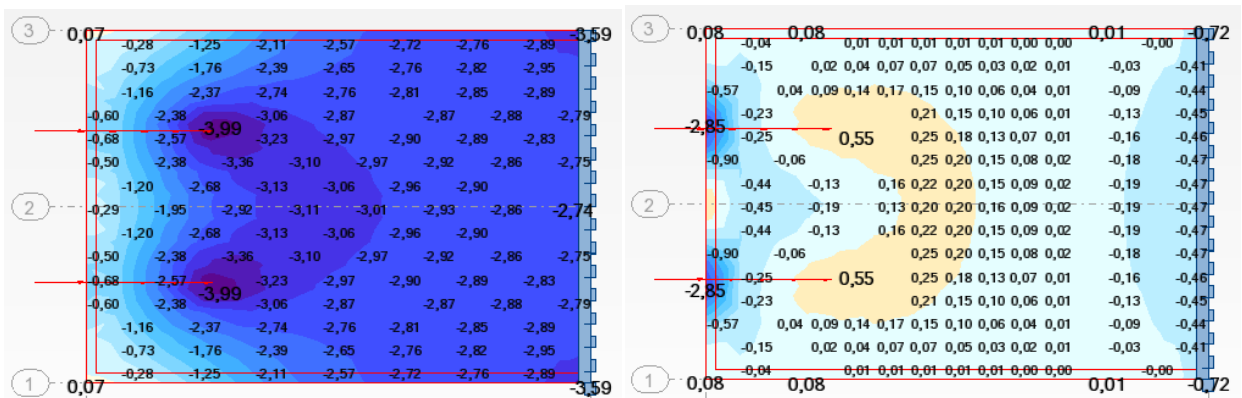
Rys. A.18 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,4 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,2 m



Rys. A.19 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,4 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,0 m



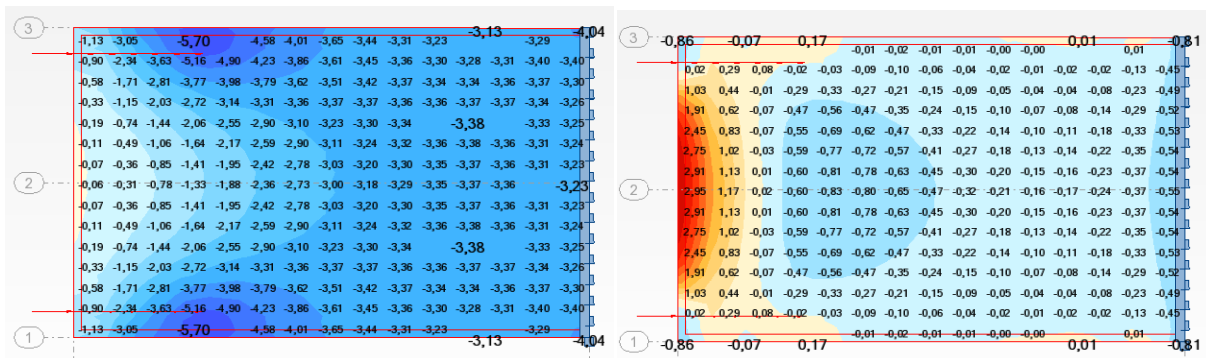
Rys. A.20 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,4 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,8 m



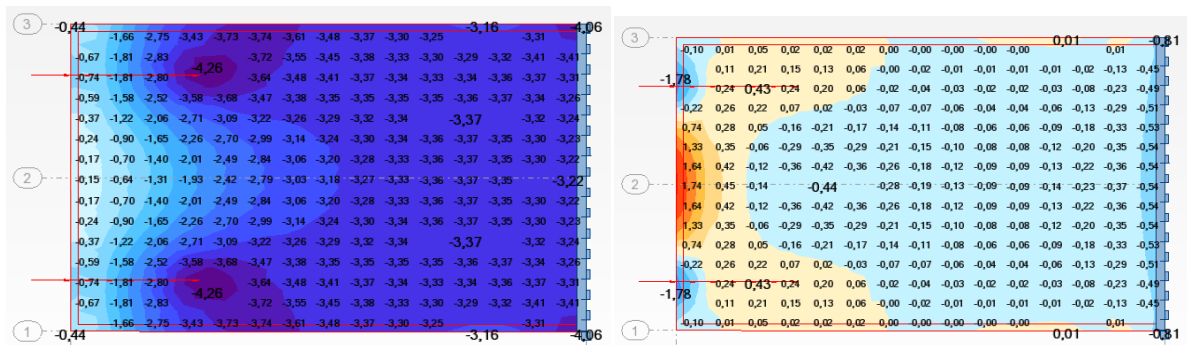
Rys. A.21 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,4 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,6 m



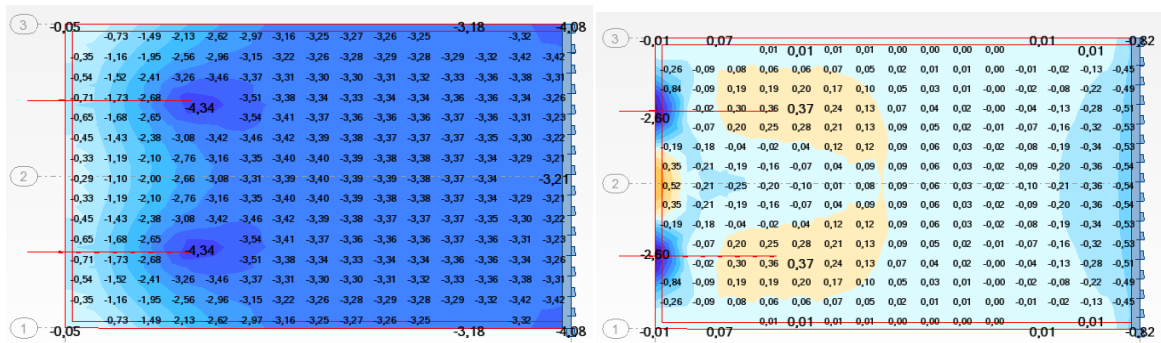
WPLYW DŁUGOŚCI TRANSMISJI SIŁY NACIĄGOWEJ I ROZSTAWU CIĘGIEN SPRĘŻAJĄCYCH NA STAN ODKSZTAŁCENIA  
W STRUNOBETONOWEJ TARCZY Z BETONU WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI



Rys. A.22 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,2 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,0 m

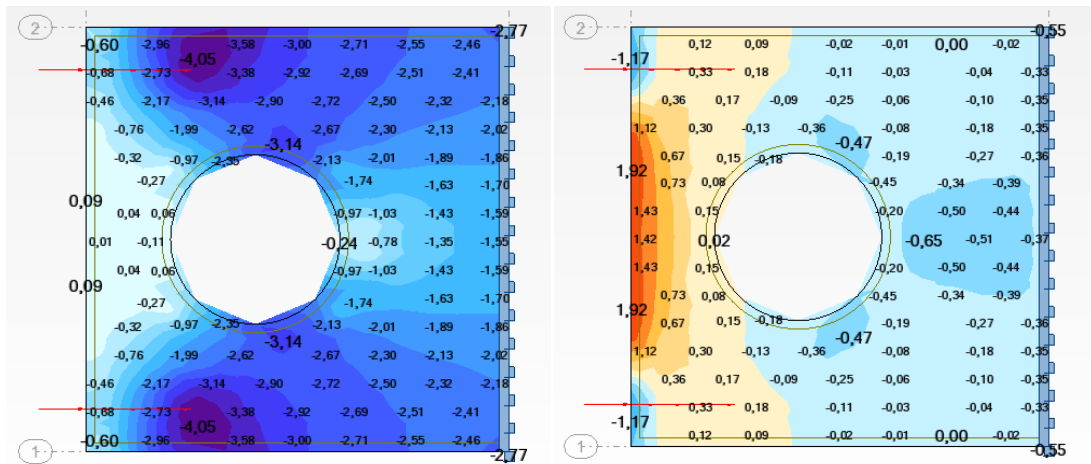


Rys. A.23 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,2 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,8 m

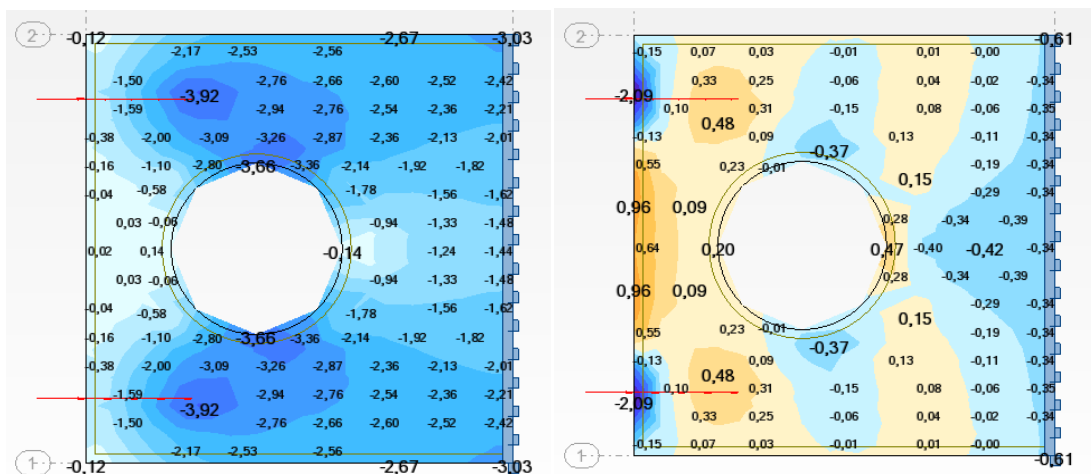


Rys. A.24 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,2 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,6 m

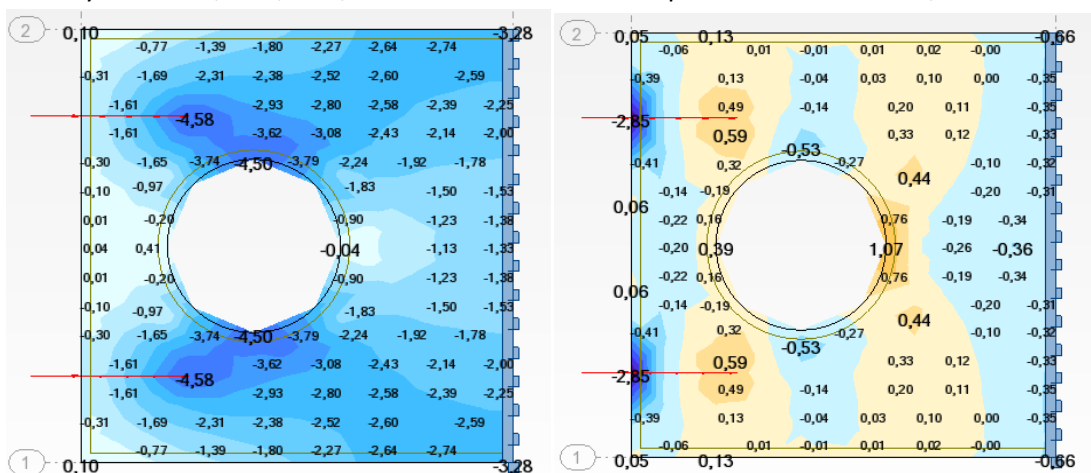
## ZAŁĄCZNIK B



Rys. B.1 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,6 m

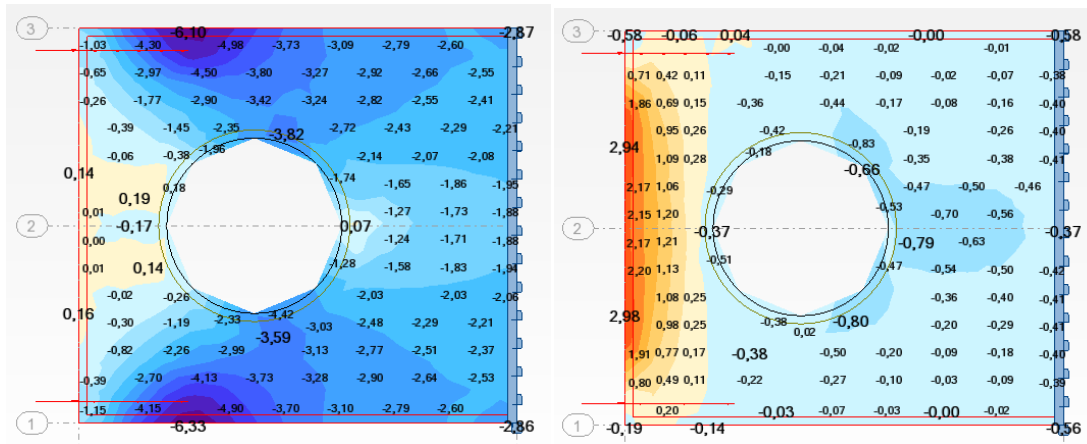


Rys. B.2 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,4 m

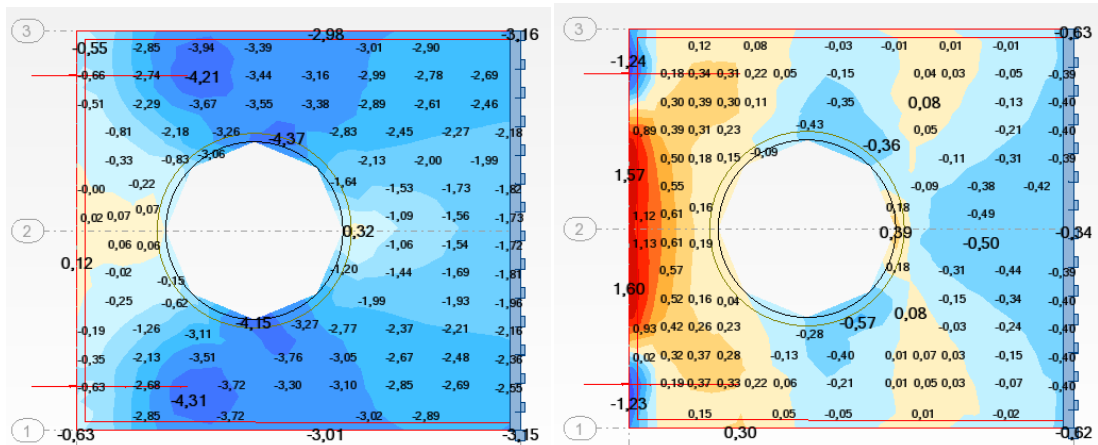


Rys. B.3 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,2 m

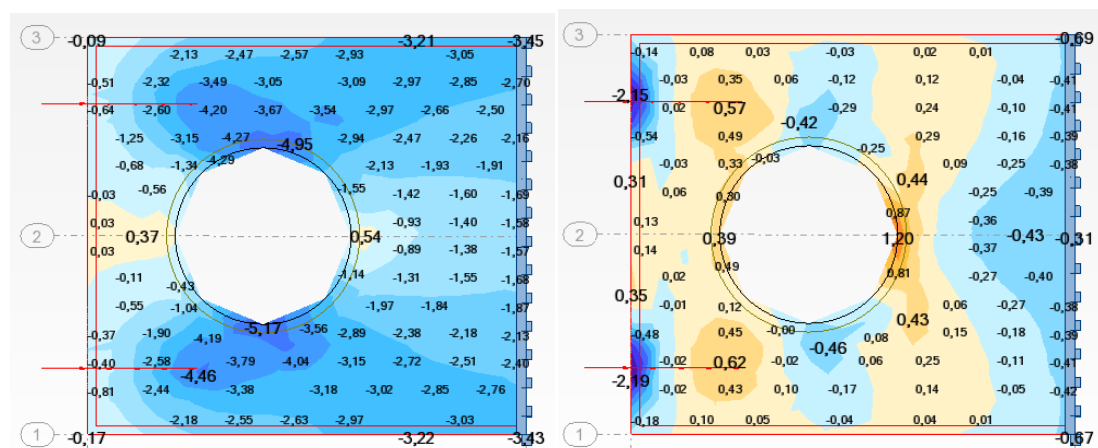




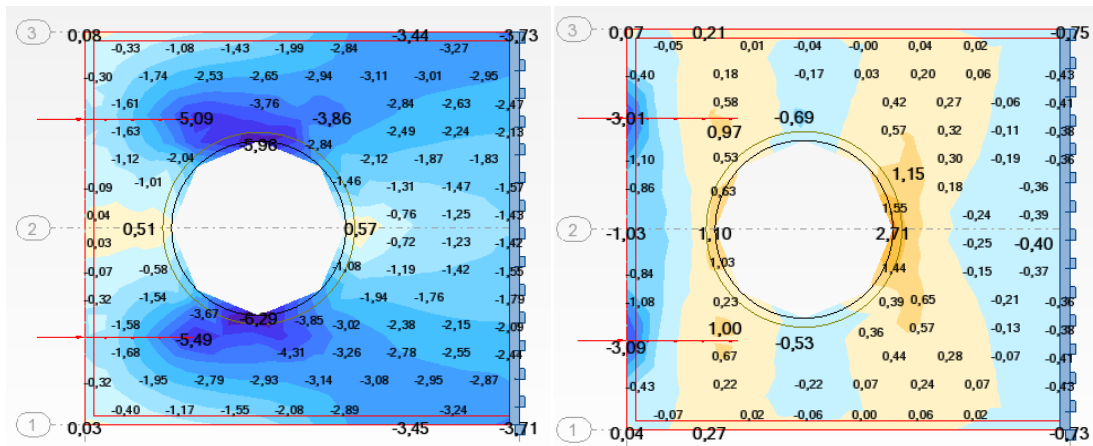
Rys. B.4 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,6 m



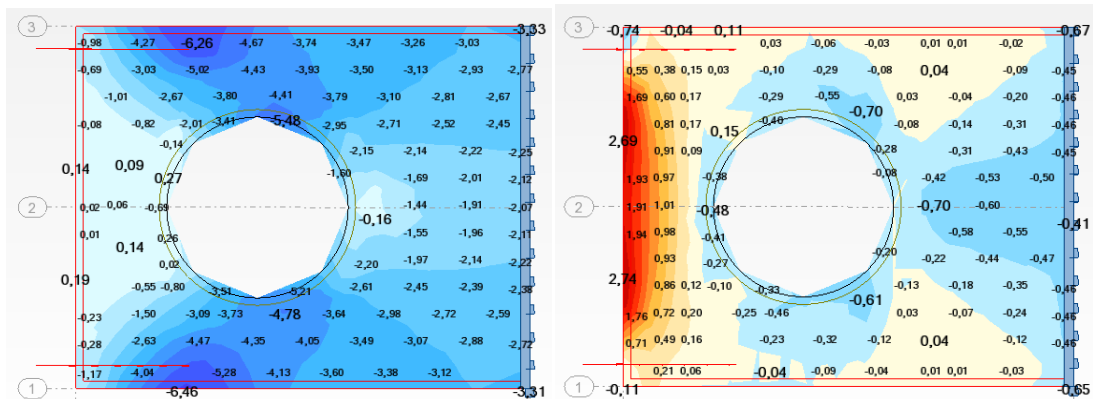
Rys. B.5 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,4 m



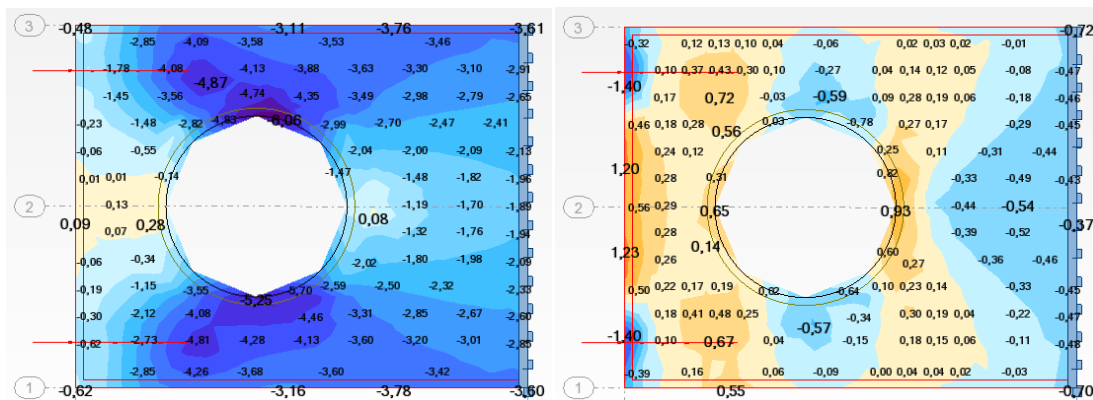
Rys. B.6 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,2 m



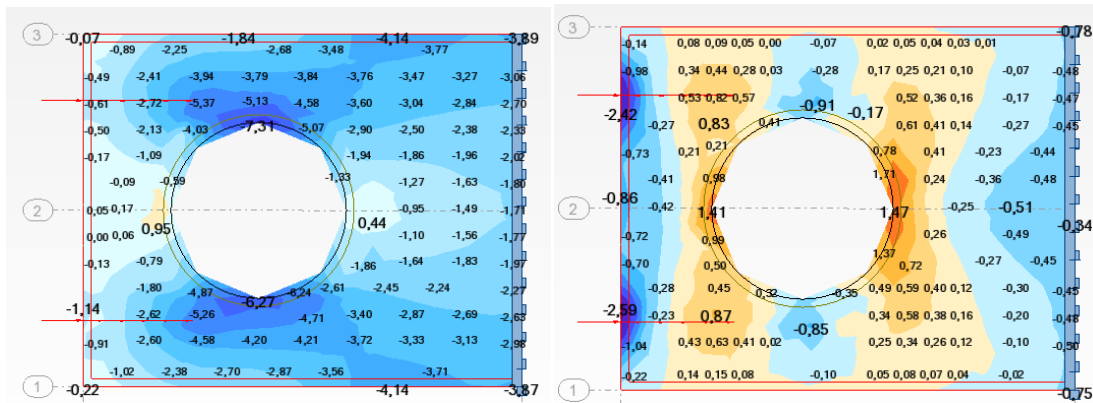
Rys. B.7 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,0 m



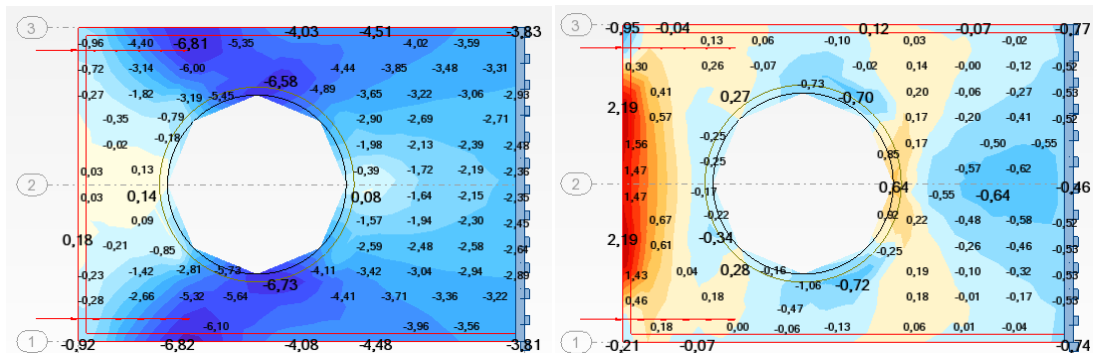
Rys. B.8 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,6 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,4 m



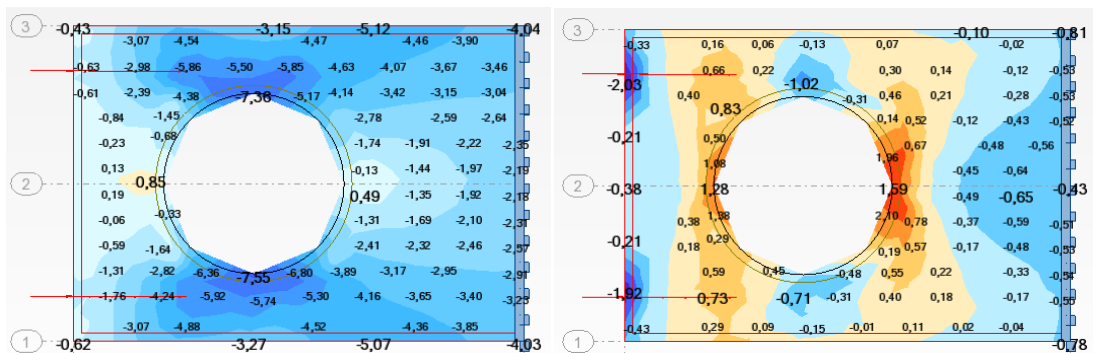
Rys. B.9 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,6 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,2 m



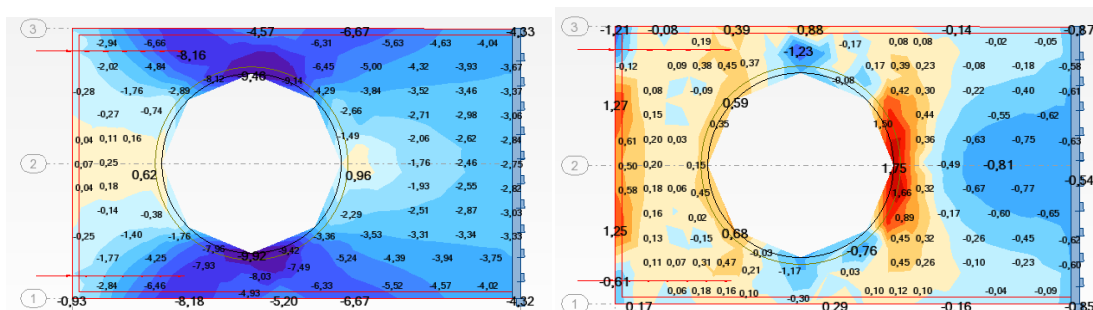
Rys. B.10 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,6 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,0 m



Rys. B.11 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,4 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,2 m



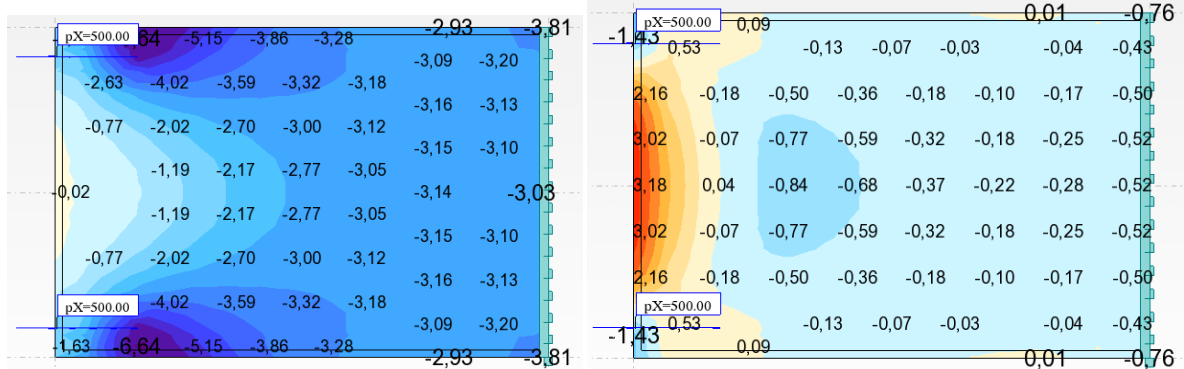
Rys. B.12 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,4 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,0 m



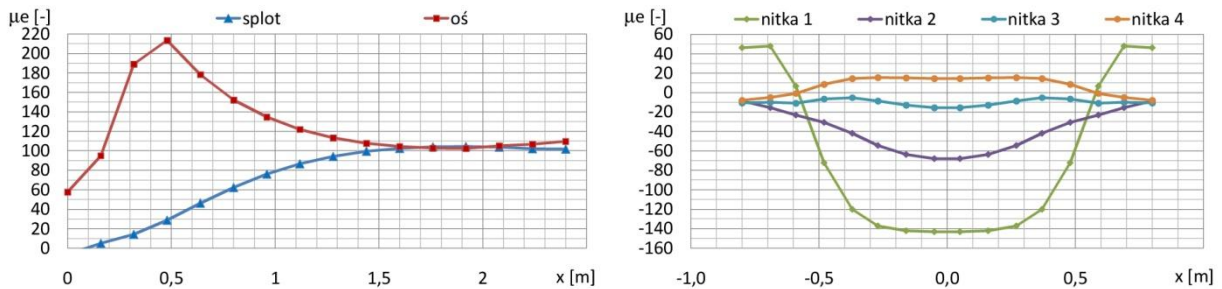
Rys. B.13 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,2 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,0 m

### ZAŁĄCZNIK C

1.  $b \times h \times L = 1,6 \times 0,08 \times 4,80$  m    rozstaw splotów  $a = 1,32$  m    liczba splotów  $n = 2$      $E = 30\,000$  MPa

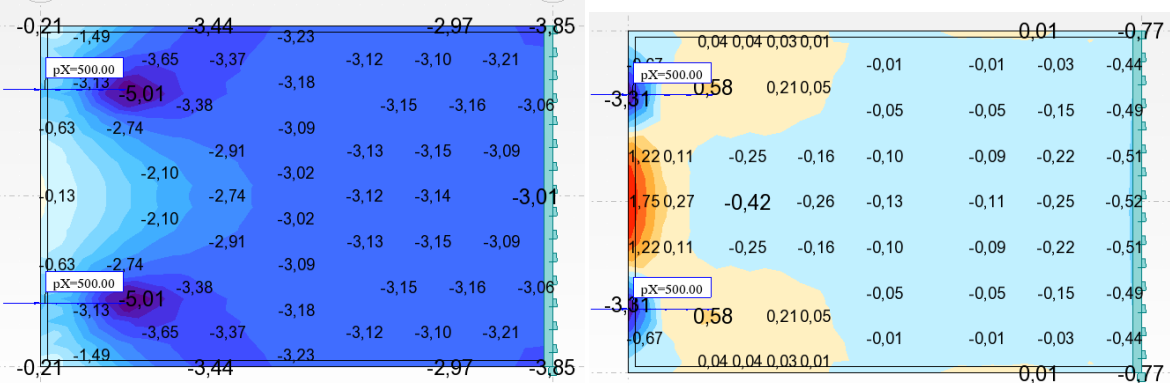


Rys. C.1 Mapa naprężeń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) dla  $b = 1,60$  m przy dwóch splotach w rozstawie  $a = 1,32$  m

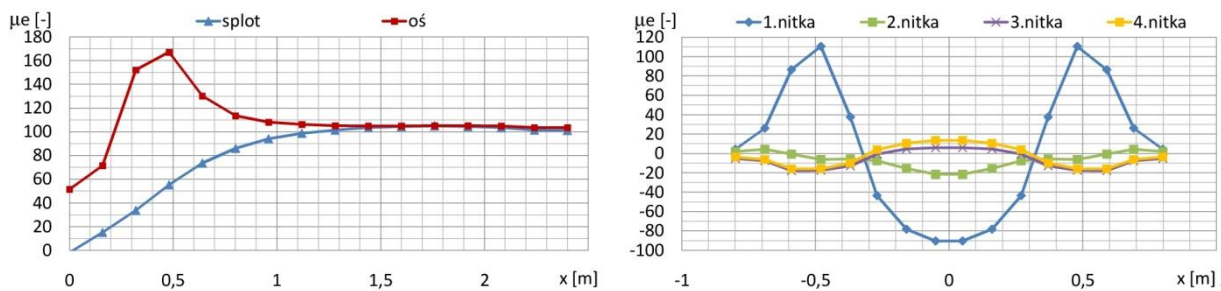


Rys. C.2 Przebieg odkształceń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) w funkcji odległości od czoła tarczy dla  $b = 1,60$  m przy dwóch splotach w rozstawie  $a = 1,32$  m

2.  $b \times h \times L = 1,6 \times 0,08 \times 4,80$  m    rozstaw splotów  $a = 1,0$  m    liczba splotów  $n = 2$      $E = 30\,000$  MPa



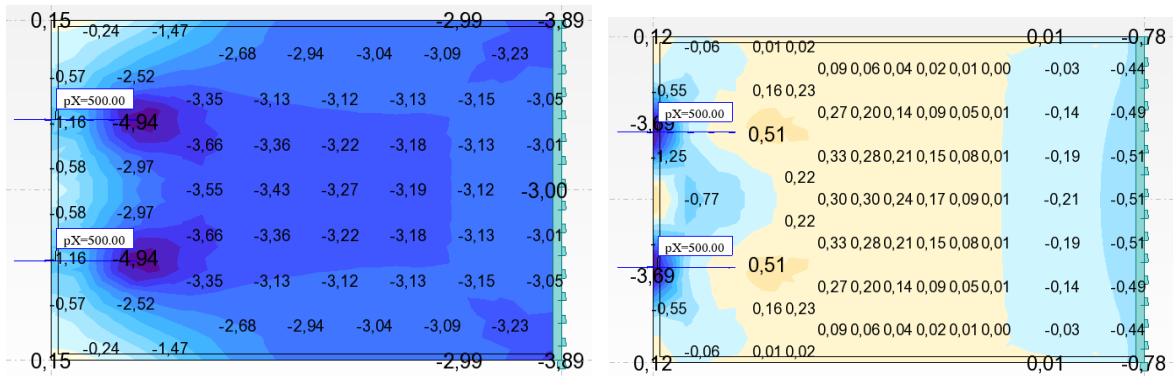
Rys. C.3 Mapa naprężeń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) dla  $b = 1,60$  m przy dwóch splotach w rozstawie  $a = 1,0$  m



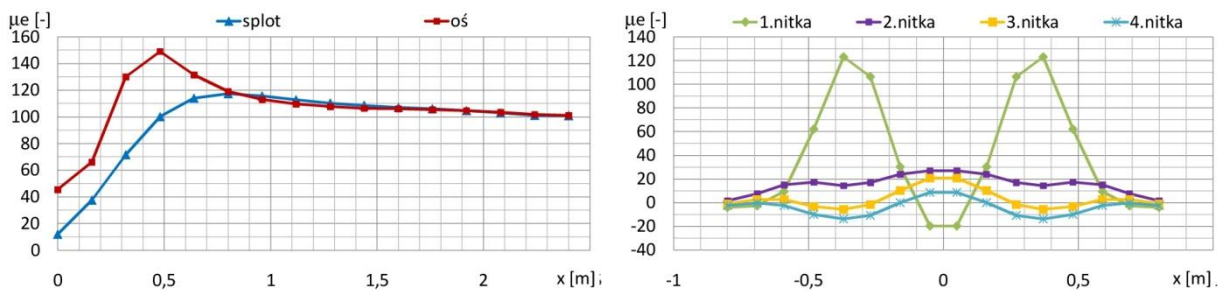
Rys. C.4 Przebieg odkształceń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) w funkcji odległości od czoła tarczy dla  $b = 1,60$  m przy dwóch splotach w rozstawie  $a = 1,0$  m



**3.  $b \times h \times L = 1,6 \times 0,08 \times 4,80$  m    rozstaw splotów  $a = 0,66$  m    liczba splotów  $n = 2$      $E = 30\,000$  MPa**

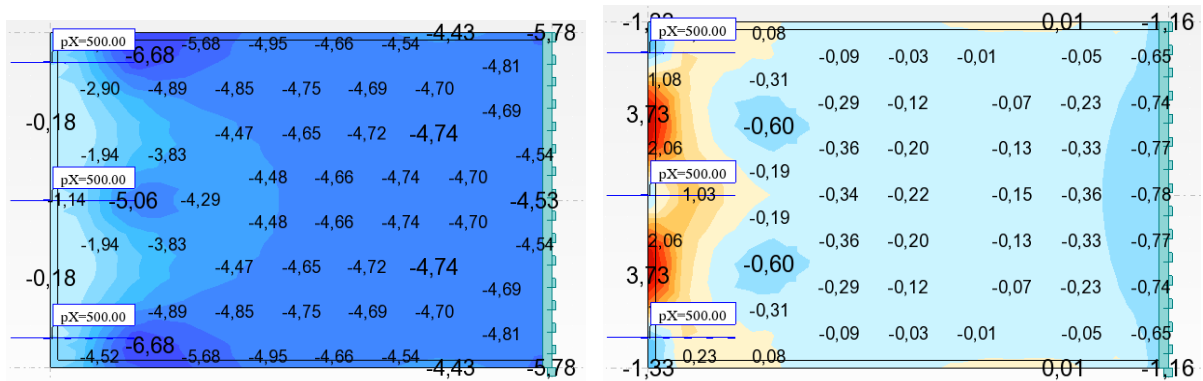


Rys. C.5 Mapa naprężeń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) dla  $b = 1,60$  m przy dwóch splotach w rozstawie  $a = 0,66$  m

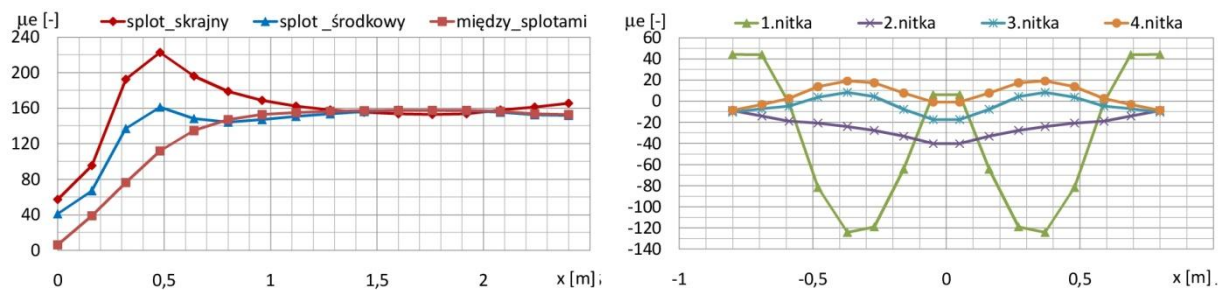


Rys. C.6 Przebieg odkształceń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) w funkcji odległości od czoła tarczy dla  $b = 1,60$  m przy dwóch splotach w rozstawie  $a = 0,66$  m

**4.  $b \times h \times L = 1,6 \times 0,08 \times 4,80$  m    rozstaw splotów  $a = 0,66$  m    liczba splotów  $n = 3$      $E = 30\,000$  MPa**

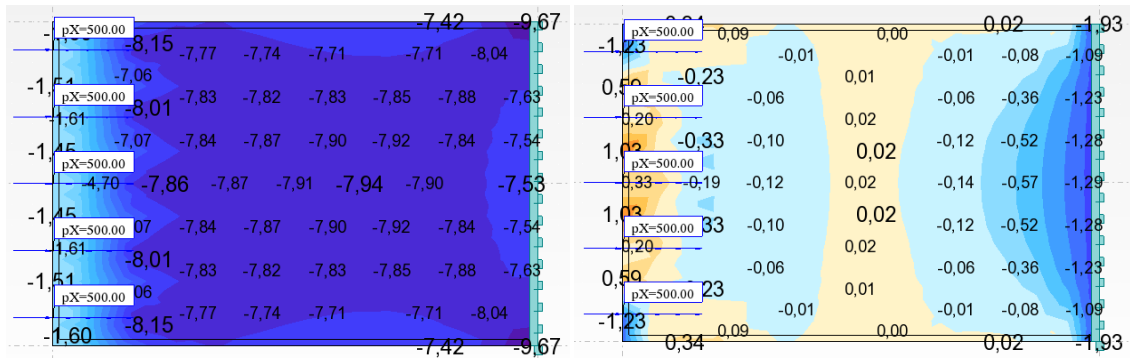


Rys. C.7 Mapa naprężeń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) dla  $b = 1,60$  m przy trzech splotach w rozstawie  $a = 0,66$  m

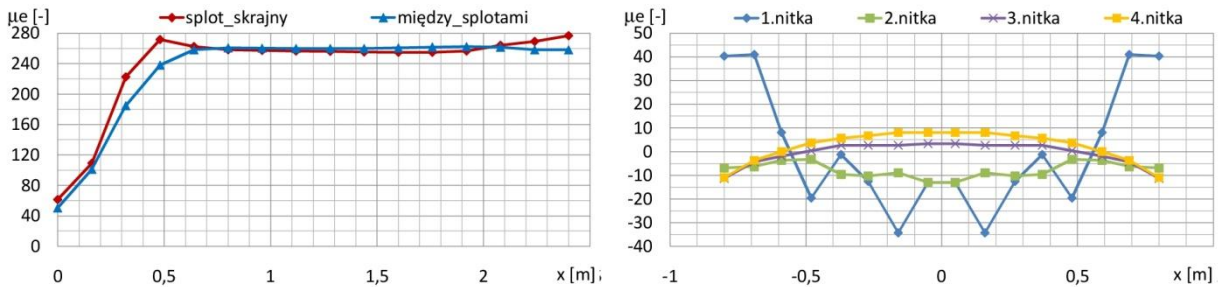


Rys. C.8 Przebieg odkształceń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) w funkcji odległości od czoła tarczy dla  $b = 1,60$  m przy trzech splotach w rozstawie  $a = 0,66$  m

5.  $b \times h \times L = 1,6 \times 0,08 \times 4,80$  m    rozstaw splotów  $a = 0,33$  m    liczba splotów  $n = 5$      $E = 30\,000$  MPa

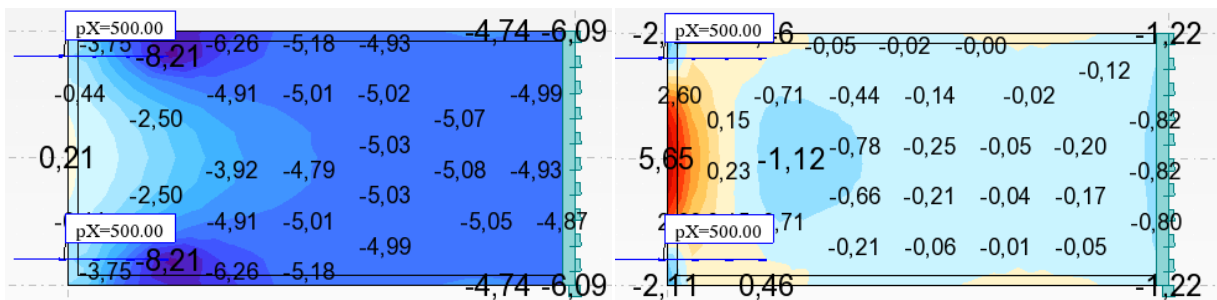


Rys. C.9 Mapa naprężeń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) dla  $b = 1,60$  m przy pięciu splotach w rozstawie  $a = 0,33$  m

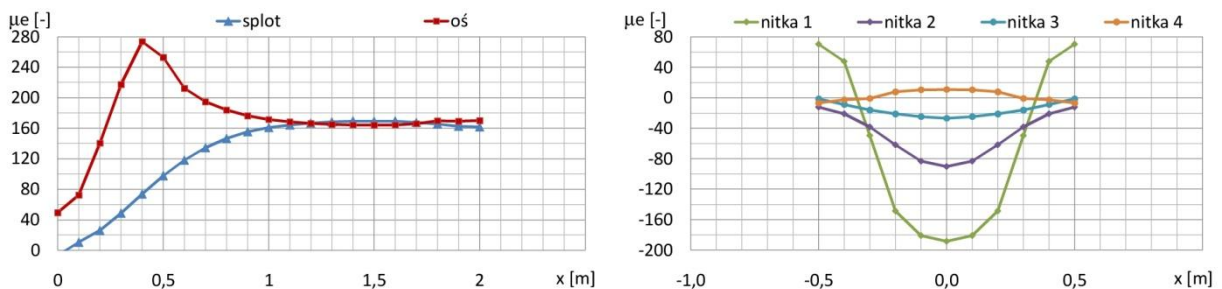


Rys. 6.10 Przebieg odkształceń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) w funkcji odległości od czoła tarczy dla  $b = 1,60$  m przy pięciu splotach w rozstawie  $a = 0,33$  m

6.  $b \times h \times L = 1,0 \times 0,08 \times 4,0$  m    rozstaw splotów  $a = 0,8$  m    liczba splotów  $n = 2$      $E = 30\,000$  MPa

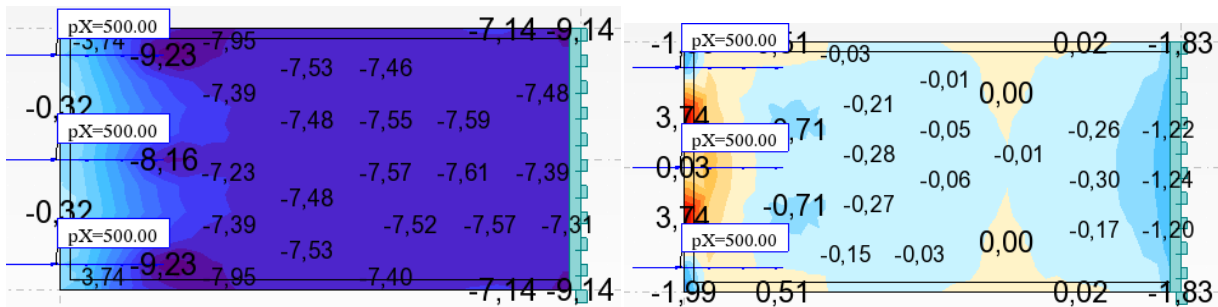


Rys. C.11 Mapa naprężeń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) dla  $b = 1,0$  m przy dwóch splotach w rozstawie  $a = 0,8$  m

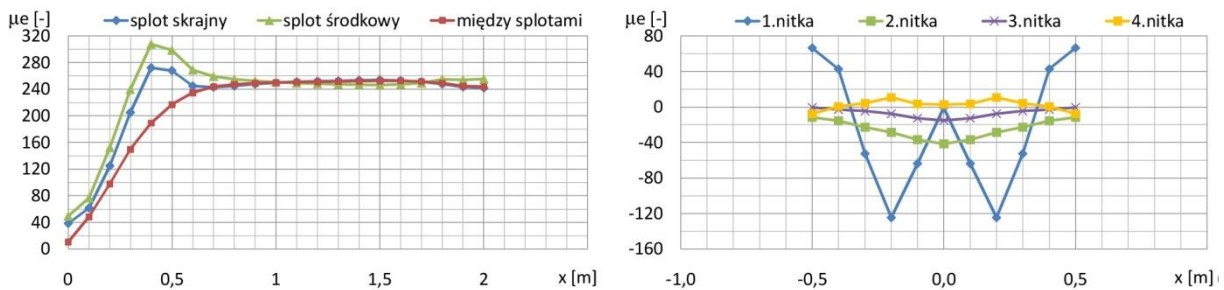


Rys. C.12 Przebieg odkształceń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) w funkcji odległości od czoła tarczy dla  $b = 1,0$  m przy dwóch splotach w rozstawie  $a = 0,8$  m

7.  $b \times h \times L = 1,0 \times 0,08 \times 4,0$  m    rozstaw splotów  $a = 0,4$  m    liczba splotów  $n = 3$      $E = 30\,000$  MPa

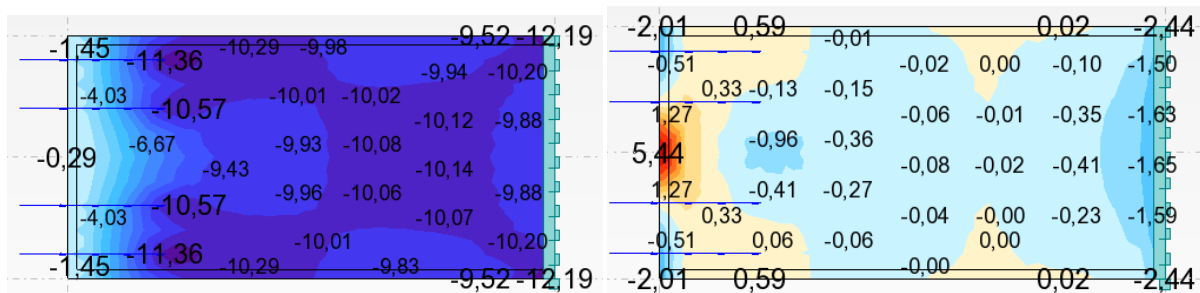


Rys. C.13 Mapa naprężeń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) dla  $b = 1,0$  m przy trzech splotach w rozstawie  $a = 0,4$  m

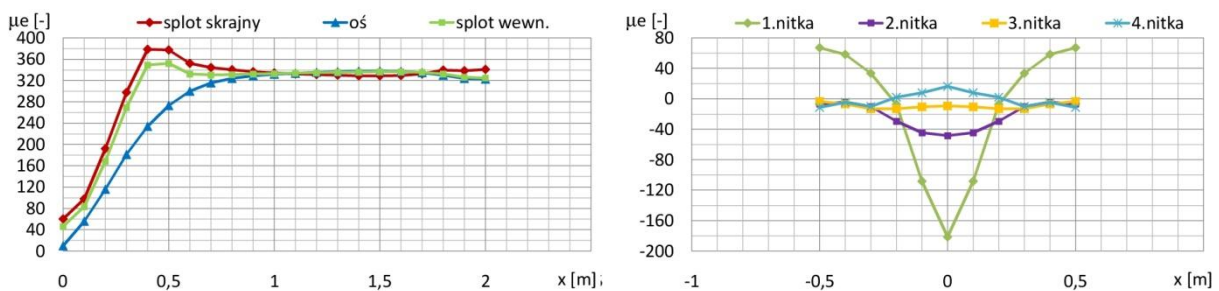


Rys. C.14 Przebieg odkształceń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) w funkcji odległości od czoła tarczy dla  $b = 1,0$  m przy trzech splotach w rozstawie  $a = 0,4$  m

8.  $b \times h \times L = 1,0 \times 0,08 \times 4,0$  m    rozstaw splotów  $a = 0,3$  (0,2) m    liczba splotów  $n = 4$      $E = 30\,000$  MPa



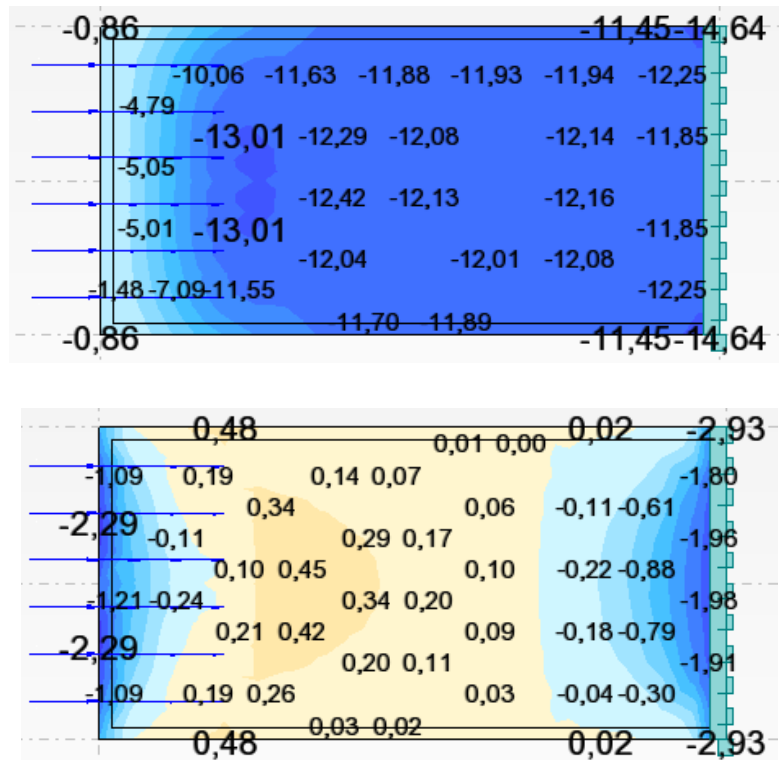
Rys. C.15 Mapa naprężeń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) dla  $b = 1,0$  m przy czterech splotach w rozstawie  $a = 0,30$  i  $0,20$  m



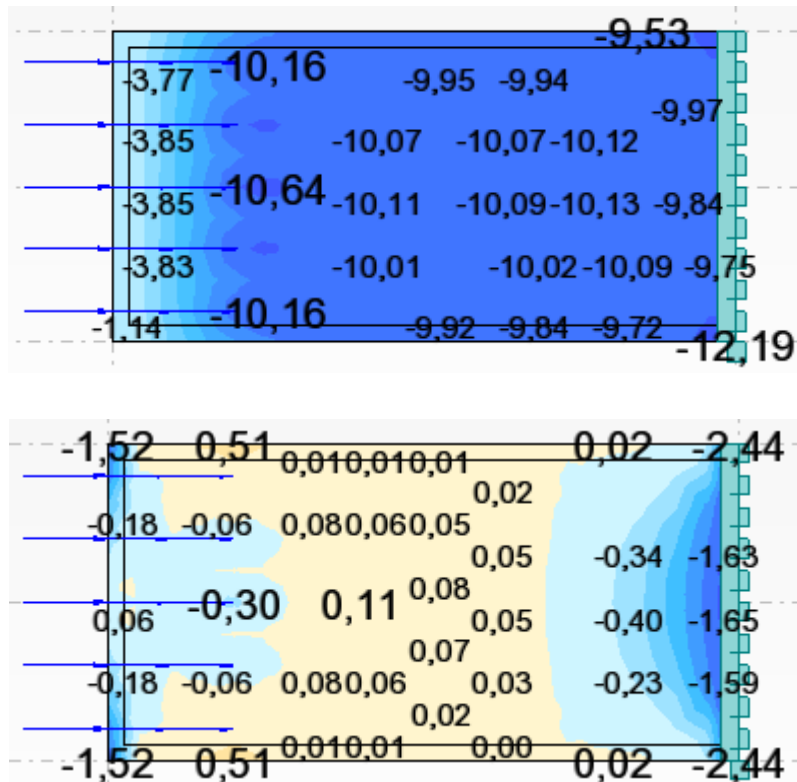
Rys. C.16 Przebieg odkształceń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) w funkcji odległości od czoła tarczy dla  $b = 1,0$  m przy czterech splotach w rozstawie  $a = 0,30$  i  $0,20$  m



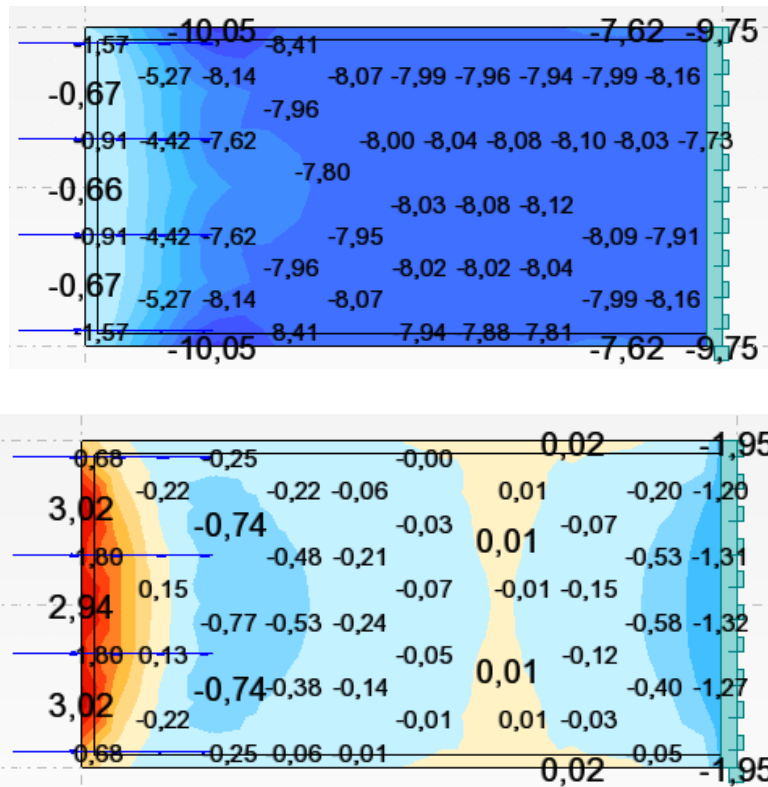




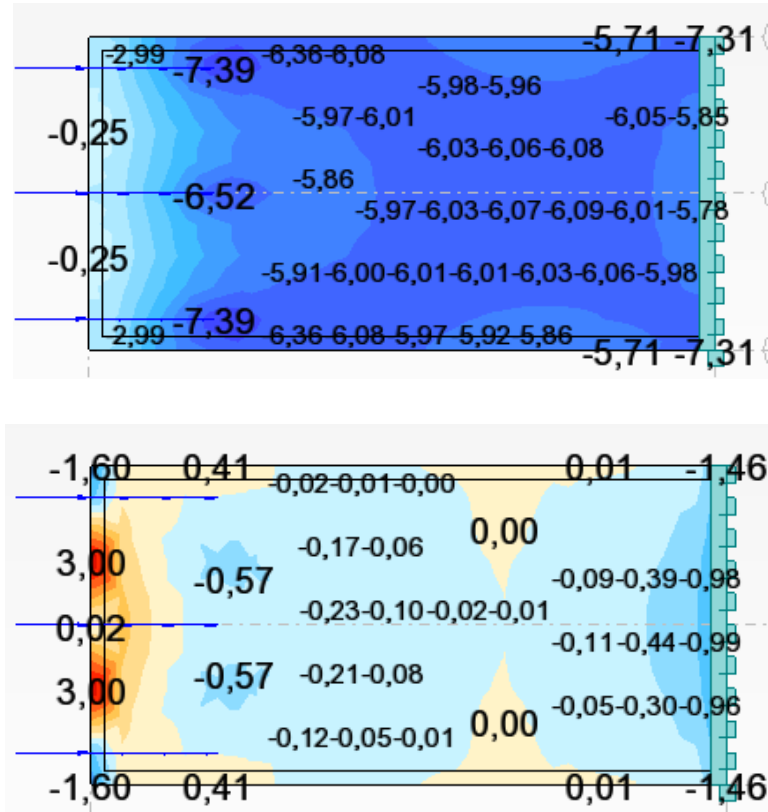
Rys. D.3 Rozkład naprężeń podłużnych (na górze) i poprzecznych (na dole) tarczy o wymiarach 1,0 x 0,1 x 4,0 m (do środka symetrii) przy rozstawie splotów 0,15 m (n = 6), sile sprężającej P = 200 kN i długości transmisji 0,4 m



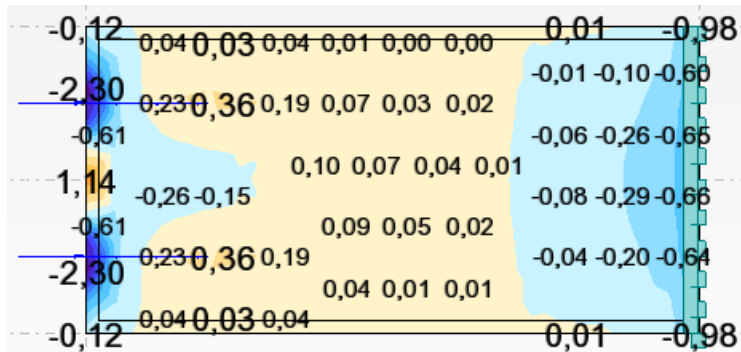
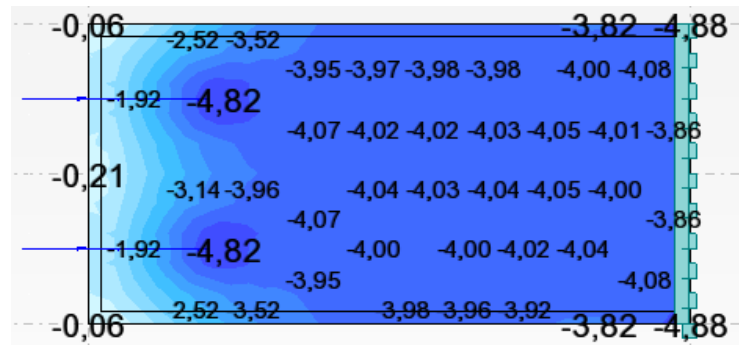
Rys. D.4 Rozkład naprężeń podłużnych (na górze) i poprzecznych (na dole) tarczy o wymiarach 1,0 x 0,1 x 4,0 m (do środka symetrii) przy rozstawie splotów 0,2 m (n = 5), sile sprężającej P = 200 kN i długości transmisji 0,4 m



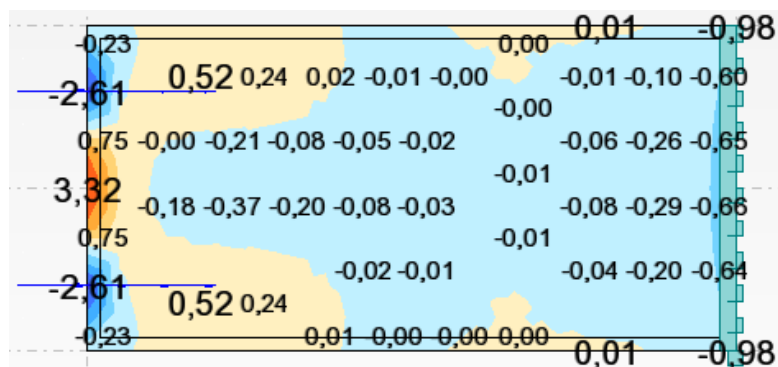
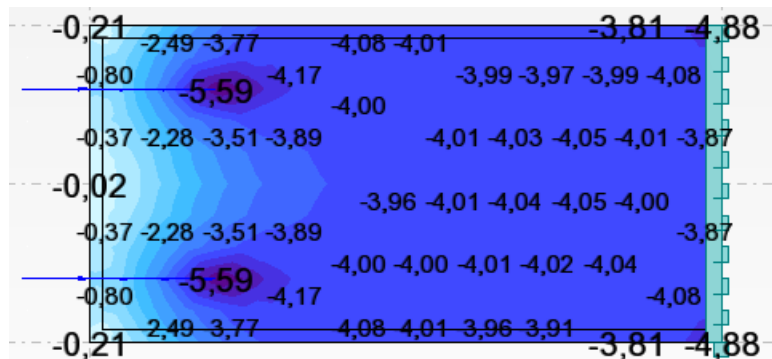
Rys. D.5 Rozkład naprężeń podłużnych (na górze) i poprzecznych (na dole) tarczy o wymiarach 1,0 x 0,1 x 4,0 m (do środka symetrii) przy rozstawie splotów 0,3 m (n = 4), sile sprężającej P = 200 kN i długości transmisji 0,4 m



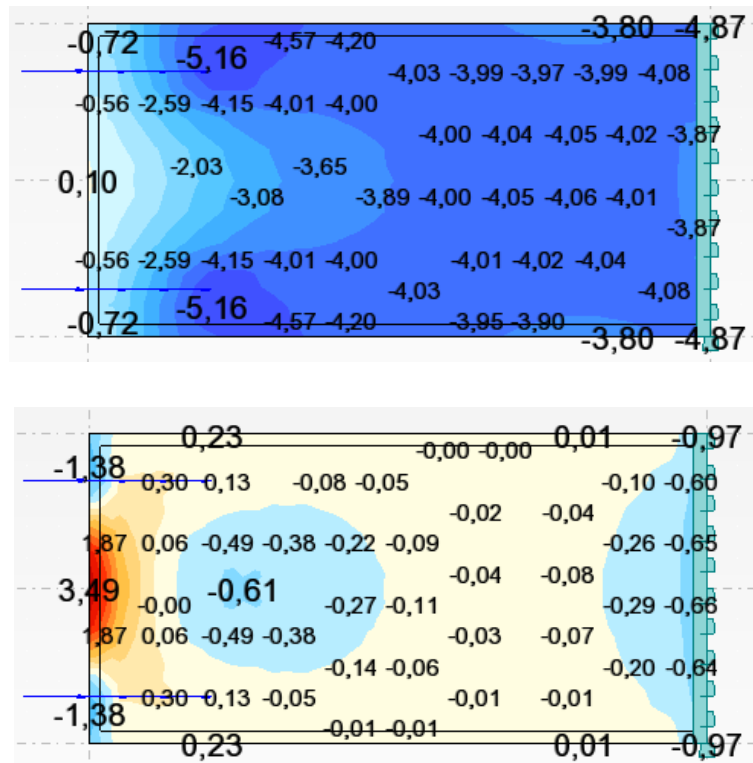
Rys. D.6 Rozkład naprężeń podłużnych (na górze) i poprzecznych (na dole) tarczy o wymiarach 1,0 x 0,1 x 4,0 m (do środka symetrii) przy rozstawie splotów 0,4 m (n = 3), sile sprężającej P = 200 kN i długości transmisji 0,4 m



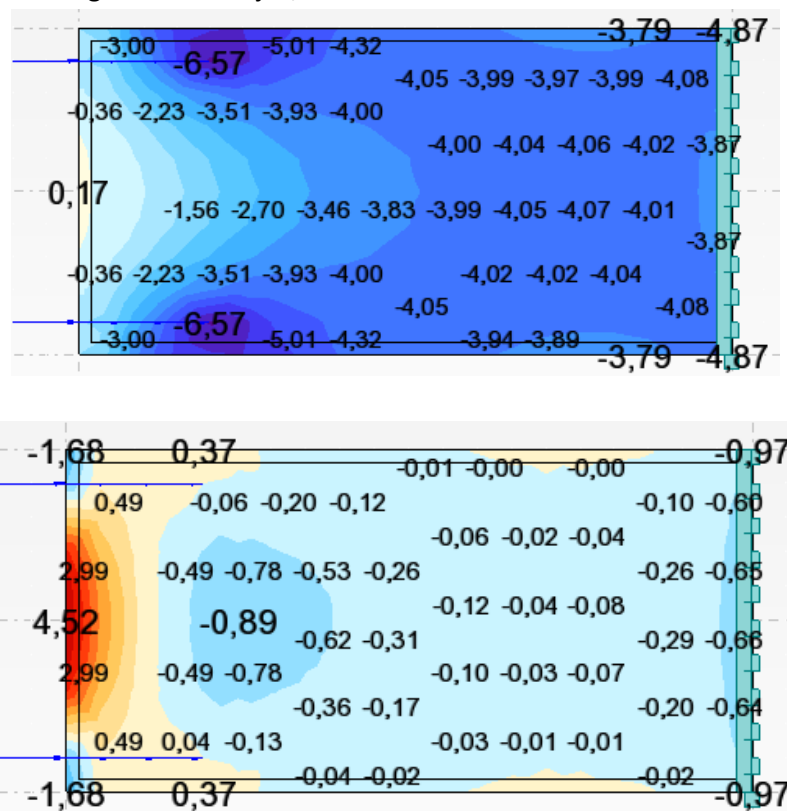
Rys. D.7 Rozkład naprężeń podłużnych (na górze) i poprzecznych (na dole) tarczy o wymiarach 1,0 x 0,1 x 4,0 m (do środka symetrii) przy rozstawie splotów 0,5 m ( $n = 2$ ), sile sprężającej  $P = 200$  kN i długości transmisji 0,4 m



Rys. D.8 Rozkład naprężeń podłużnych (na górze) i poprzecznych (na dole) tarczy o wymiarach 1,0 x 0,1 x 4,0 m (do środka symetrii) przy rozstawie splotów 0,6 m ( $n = 2$ ), sile sprężającej  $P = 200$  kN i długości transmisji 0,4 m



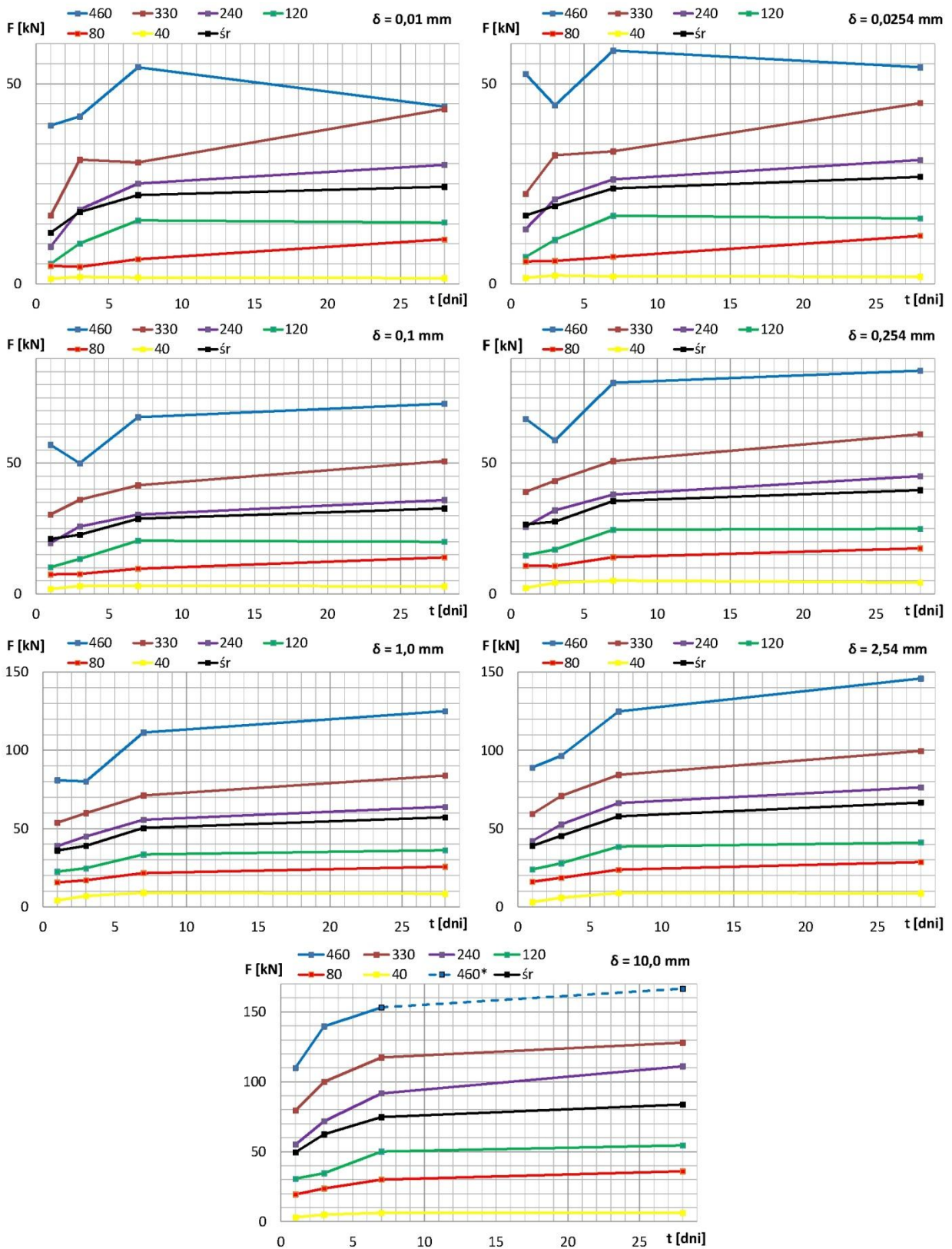
Rys. D.9 Rozkład naprężeń podłużnych (na górze) i poprzecznych (na dole) tarczy o wymiarach 1,0 x 0,1 x 4,0 m (do środka symetrii) przy rozstawie splotów 0,7 m ( $n = 2$ ), siły sprężającej  $P = 200$  kN i długości transmisji 0,4 m



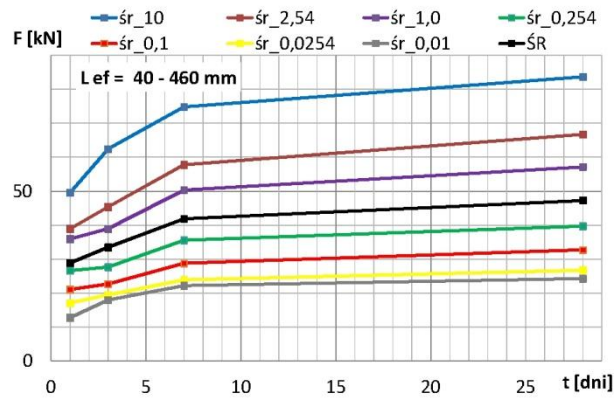
Rys. D.10 Rozkład naprężeń podłużnych (na górze) i poprzecznych (na dole) tarczy o wymiarach 1,0 x 0,1 x 4,0 m (do środka symetrii) przy rozstawie splotów 0,8 m ( $n = 2$ ), siły sprężającej  $P = 200$  kN i długości transmisji 0,4 m



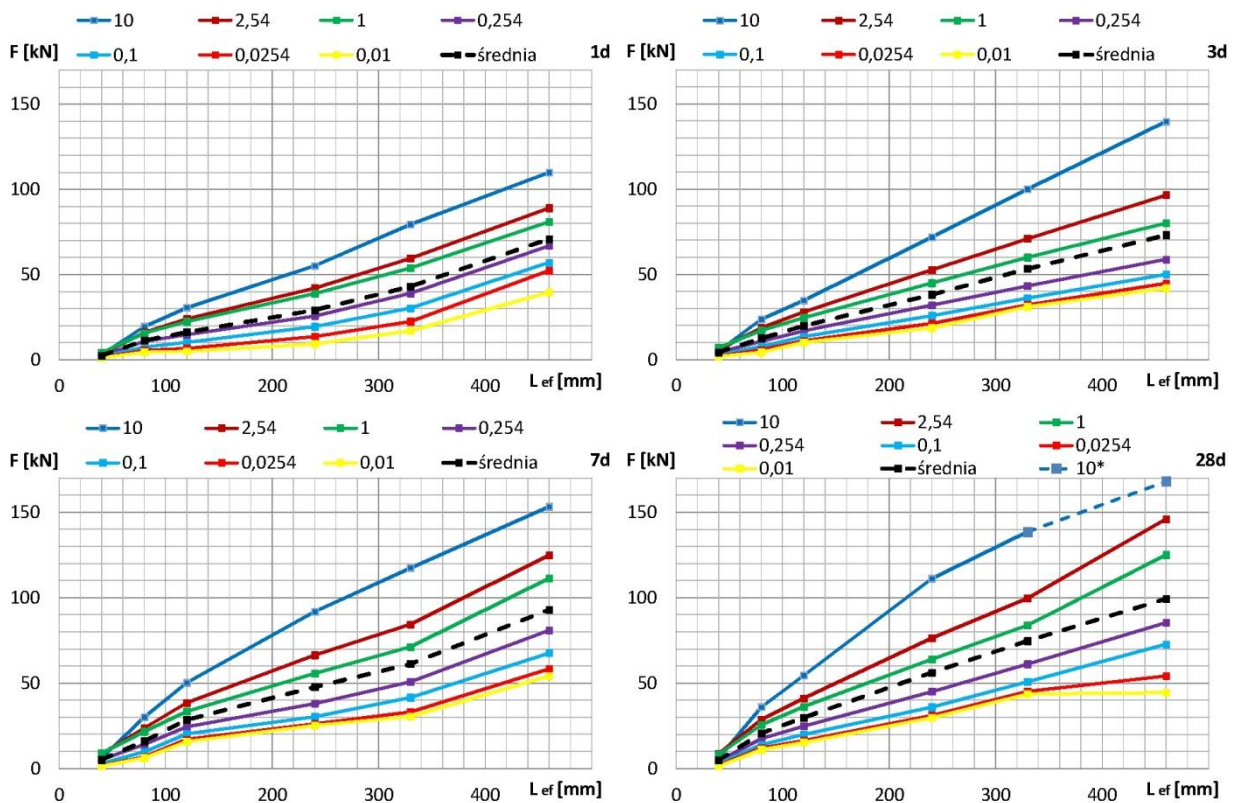
### ZAŁĄCZNIK E



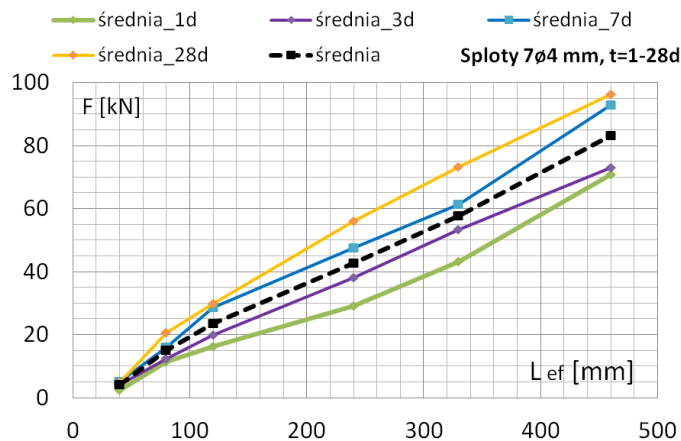
Rys. E.1 Wykresy zależności siły wyciągającej splot 7 $\phi$ 4 mm od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności



Rys. E.2 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot 7 $\phi$ 4 mm od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności

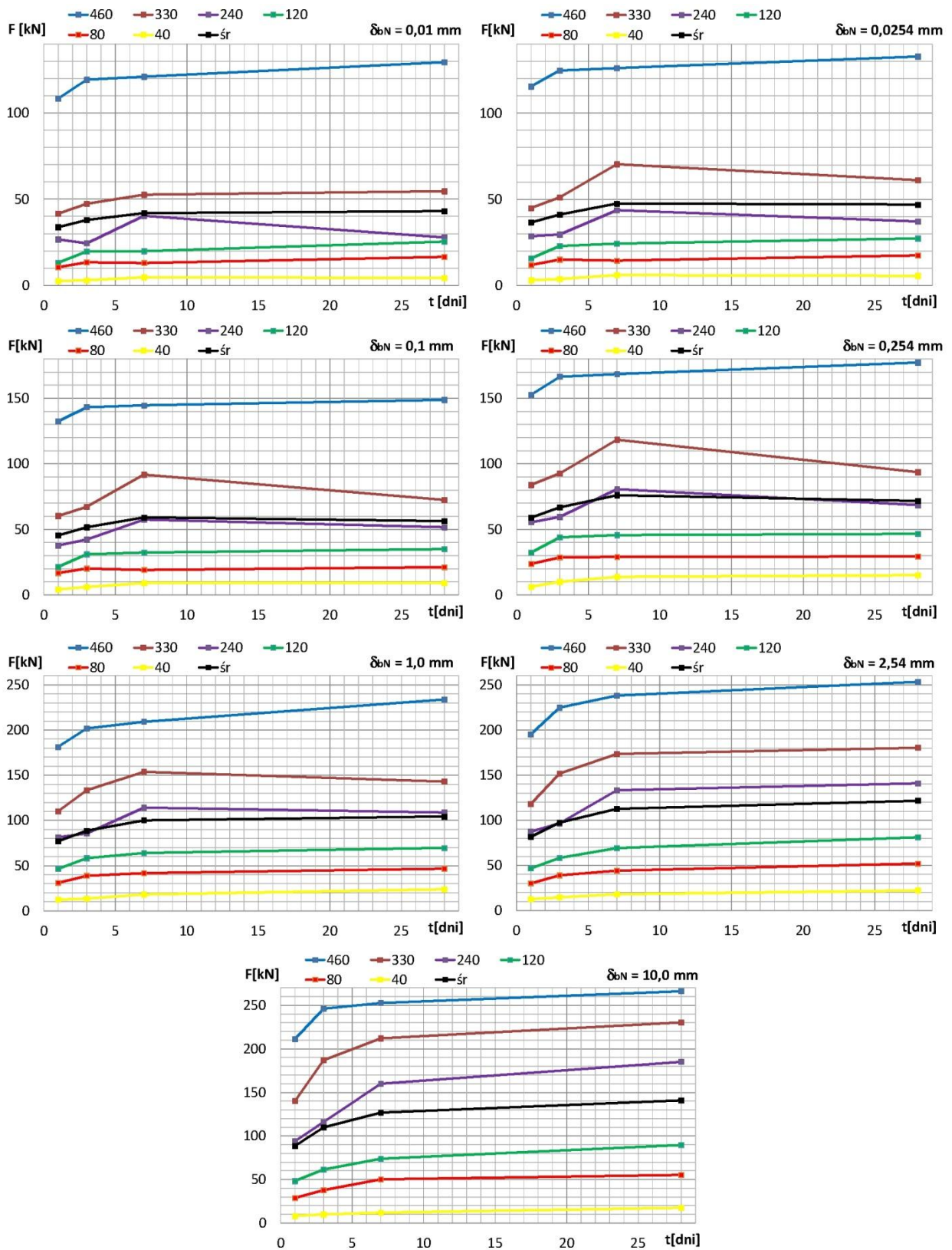


Rys. E.3 Wykresy zależności siły wyciągającej splot 7 $\phi$ 4 mm od czynnej długości przyczepności po 1, 3, 7 i 28 dniach dla poszczególnych długości poślizgu

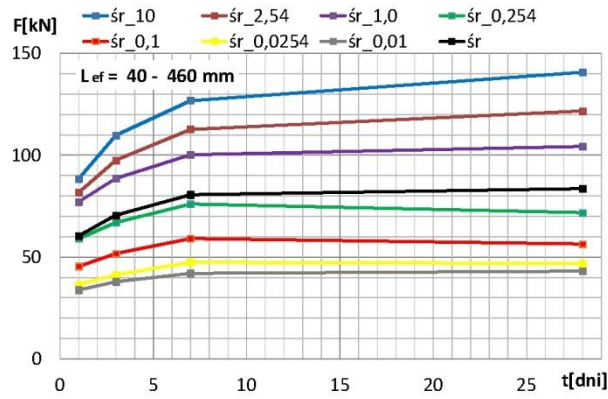




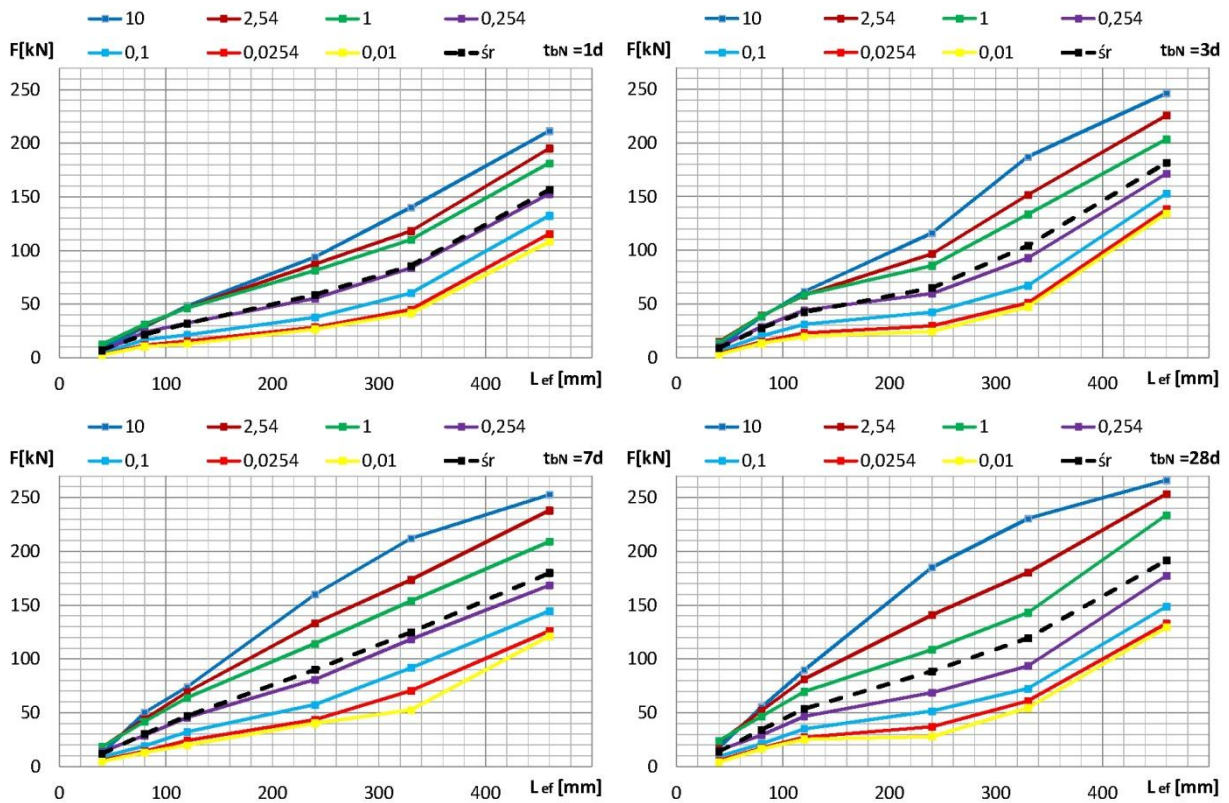
Rys. E.4 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot 7 $\phi$ 4 mm od czynnej długości przyczepności po 1, 3, 7 i 28 dniach dla poszczególnych długości poślizgu



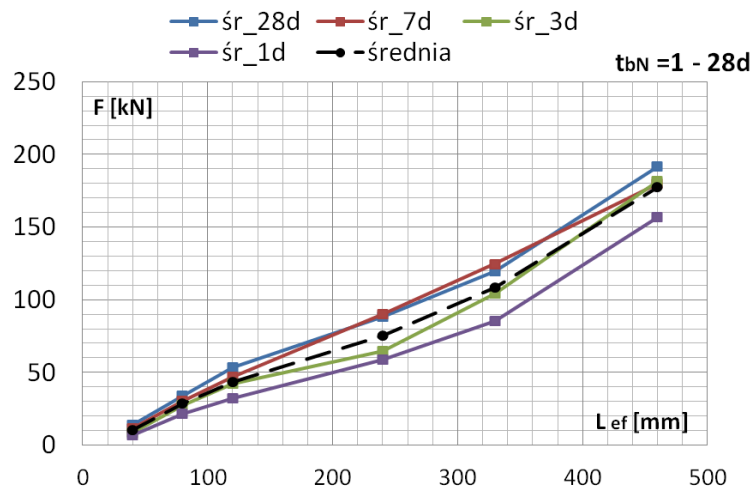
Rys. E.5 Wykresy zależności siły wyciągającej splot 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności



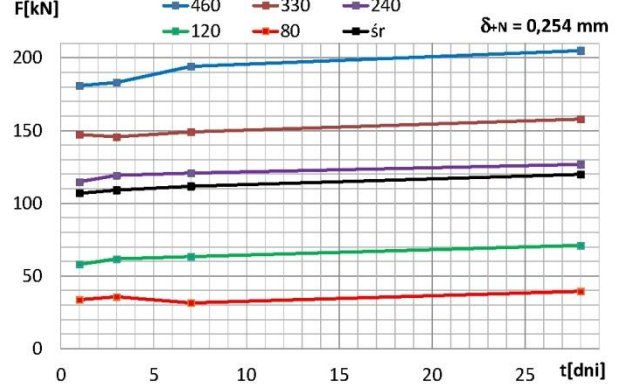
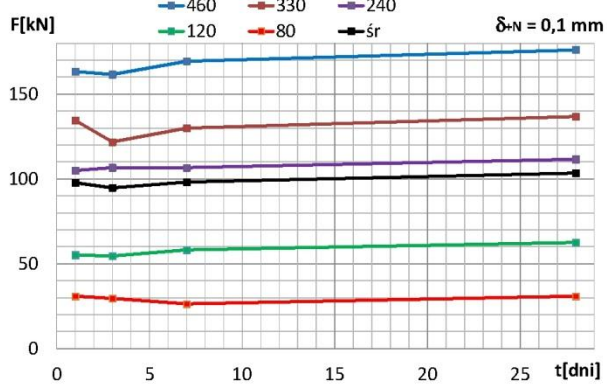
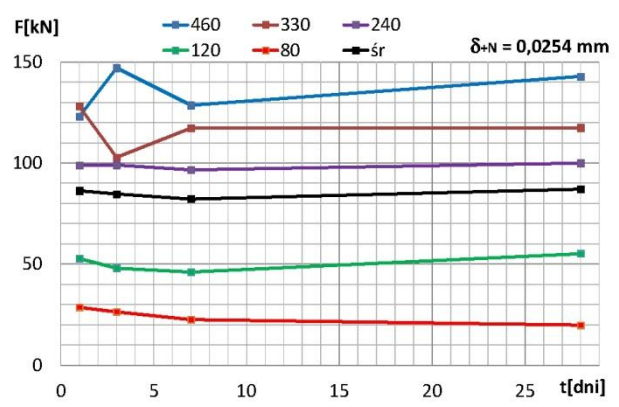
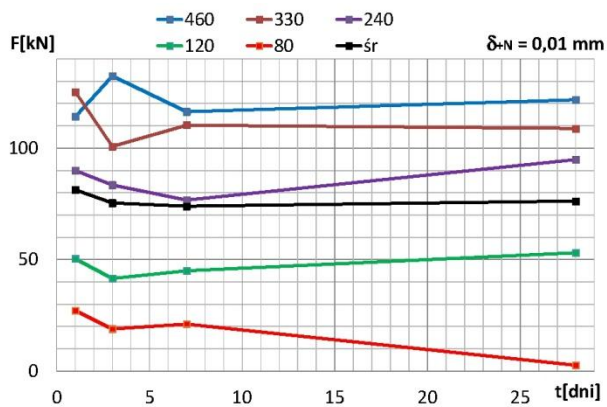
Rys. E.6 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności

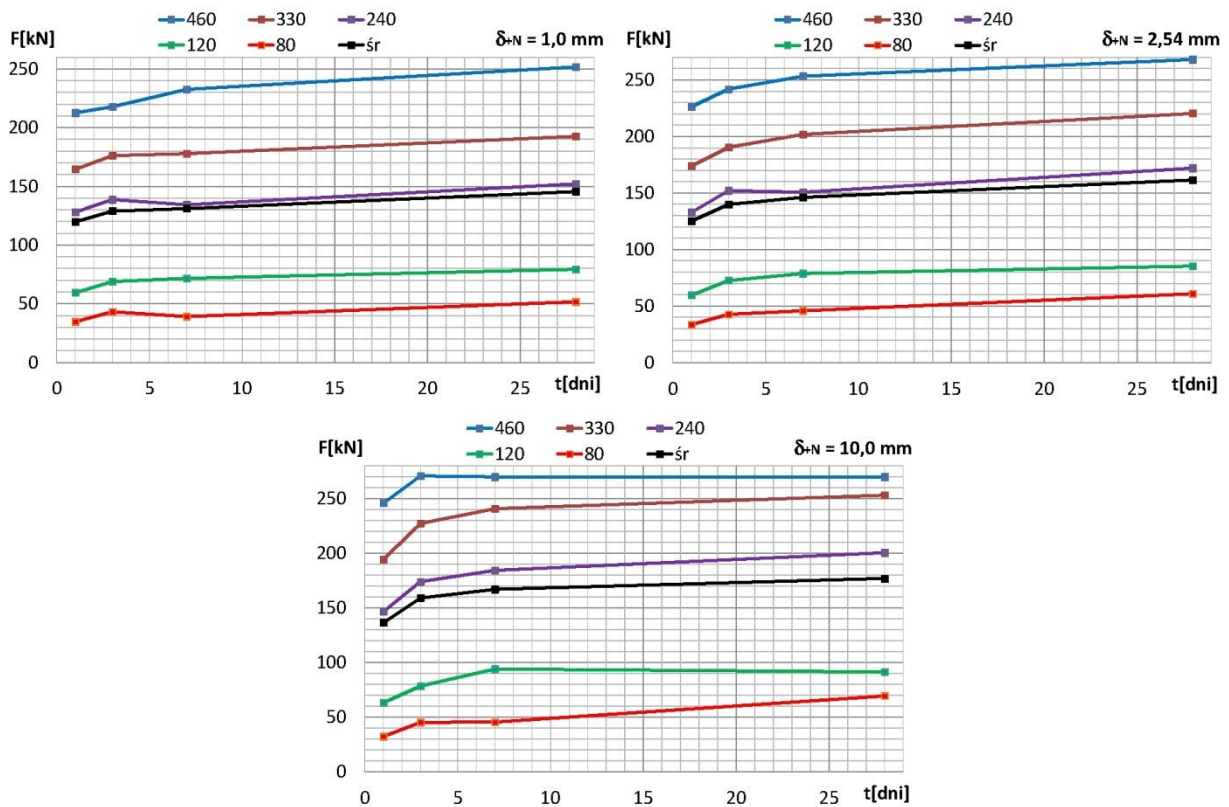


Rys. E.7 Wykresy zależności siły wyciągającej splot 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu od czynnej długości przyczepności po 1, 3, 7 i 28 dniach dla poszczególnych długości poślizgu

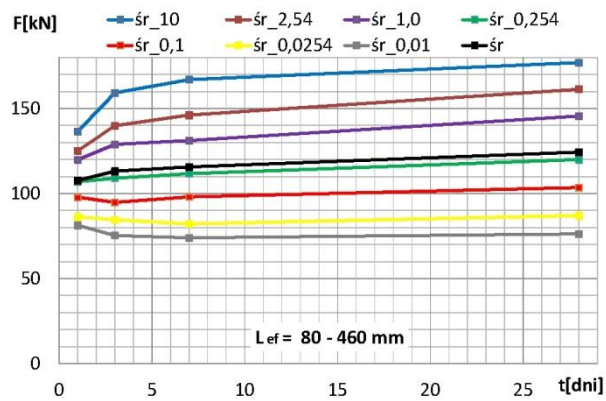


Rys. E.8 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot  $7\phi 5$  mm bez naciągu od czynnej długości przyczepności po 1, 3, 7 i 28 dniach dla poszczególnych długości poślizgu



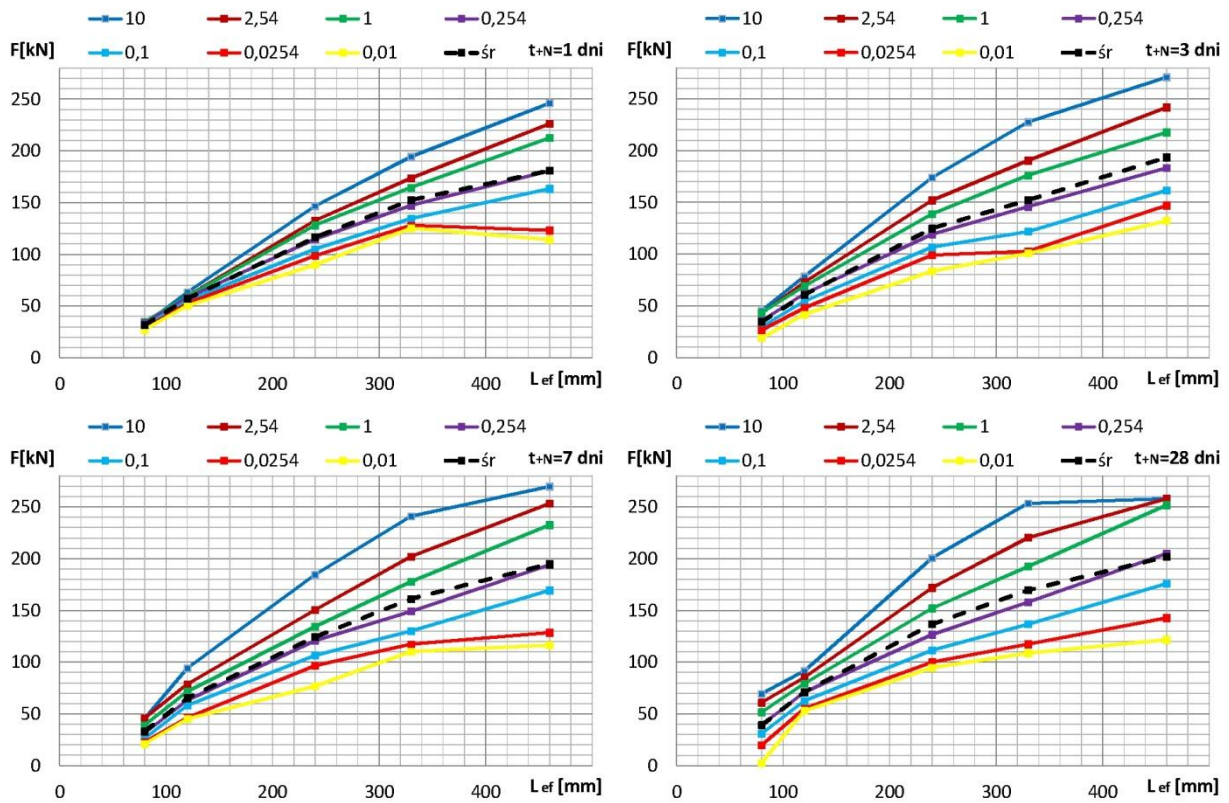


Rys. E.9 Wykresy zależności siły wyciągającej splot 7 $\phi$ 5 mm pod naciągiem od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności

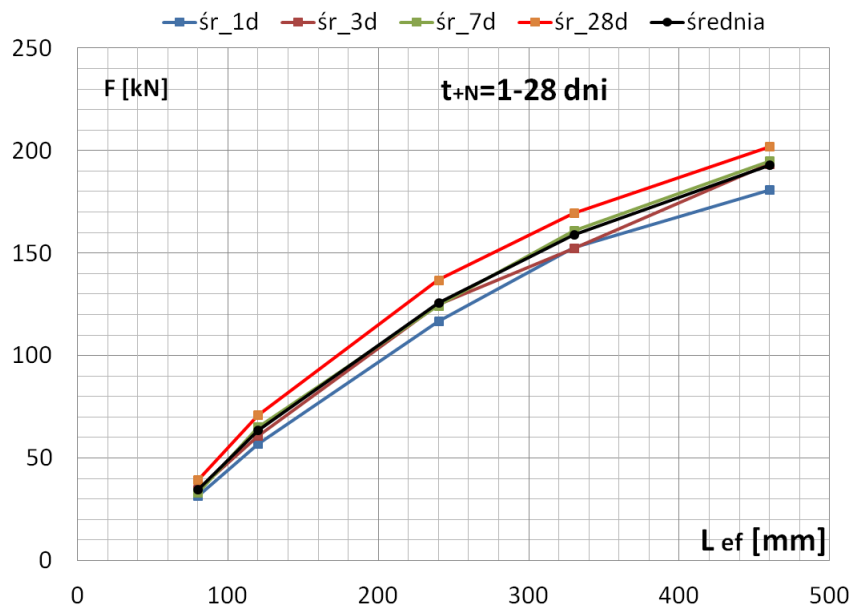


Rys. E.10 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot 7 $\phi$ 5 mm pod naciągiem od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności



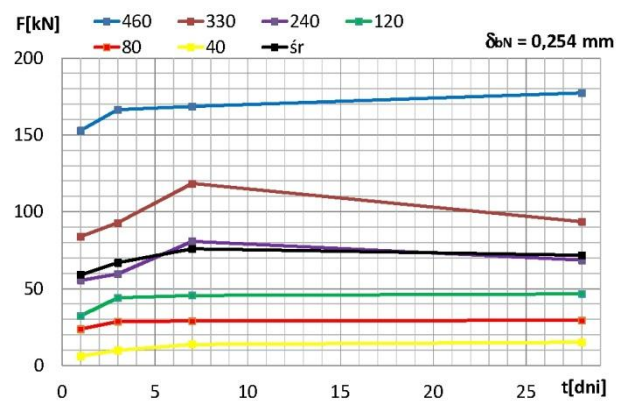
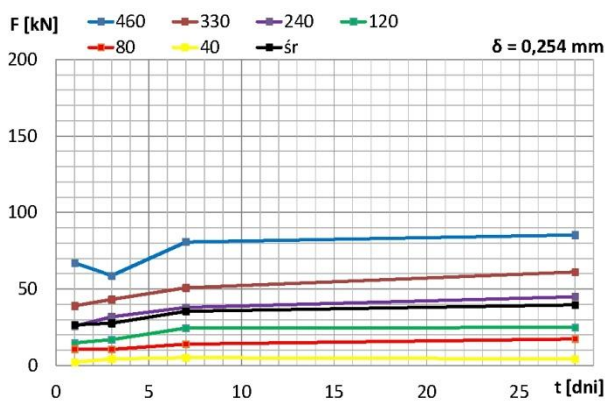
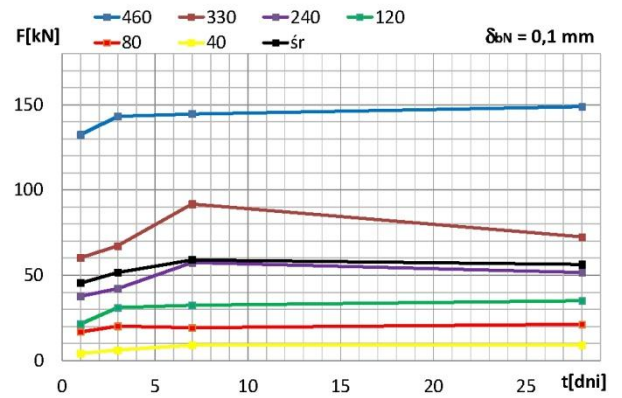
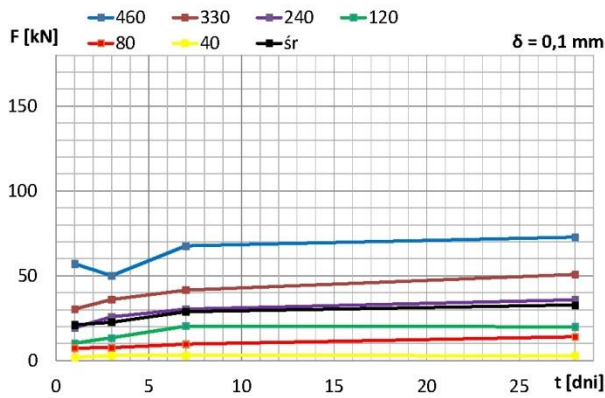
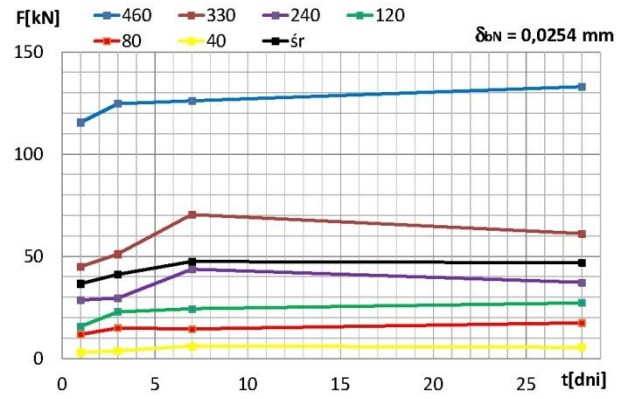
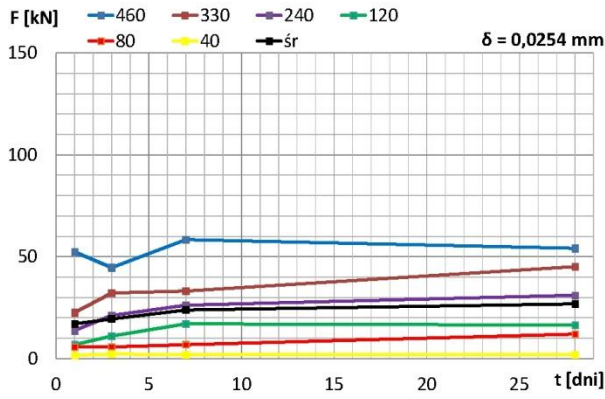
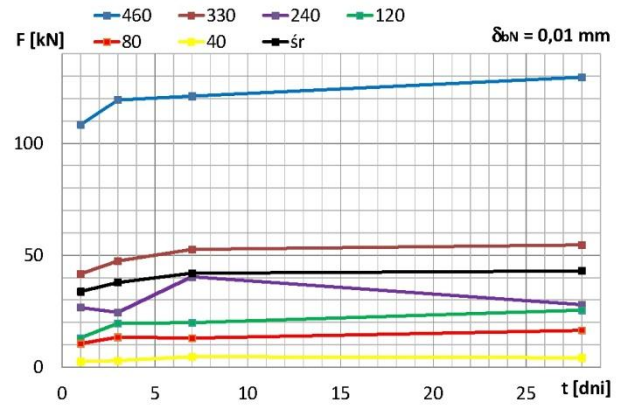
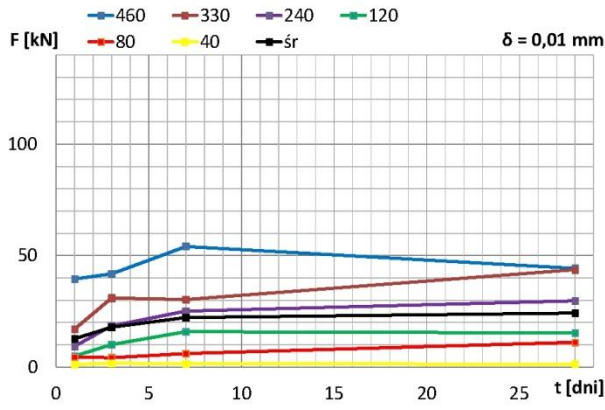


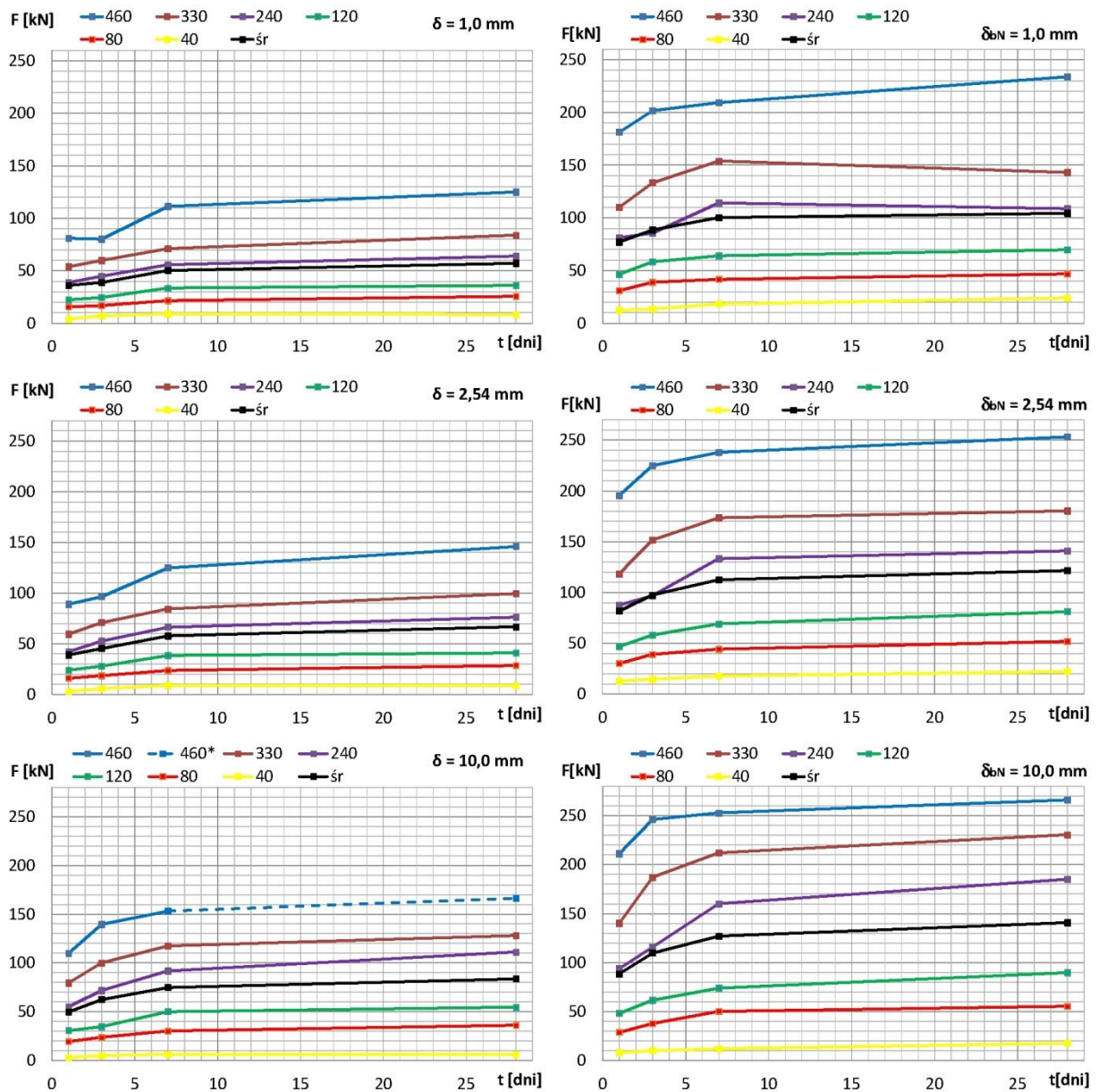
Rys. E.11 Wykresy zależności siły wyciągającej splot  $7\phi 5$  mm z naciągiem od czynnej długości przyczepności po 1, 3, 7 i 28 dniach dla poszczególnych długości poślizgu



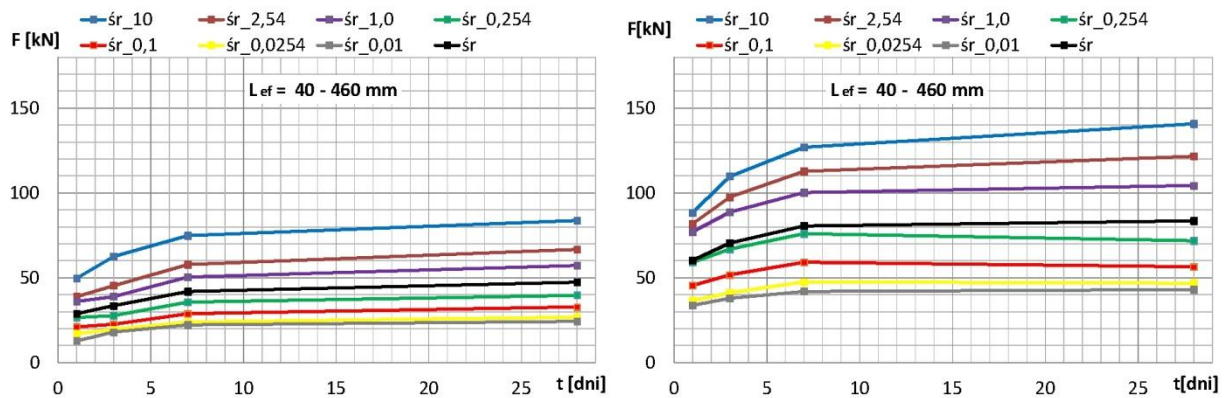
Rys. E.12 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot  $7\phi 5$  mm z naciągiem od czynnej długości przyczepności po 1, 3, 7 i 28 dniach dla poszczególnych długości poślizgu

WPLYW DŁUGOŚCI TRANSMISJI SIŁY NACIĄGOWEJ I ROZSTAWU CIĘGIEN SPRĘŻAJĄCYCH NA STAN ODKSZTAŁCENIA  
W STRUNOBETONOWEJ TARCZY Z BETONU WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI





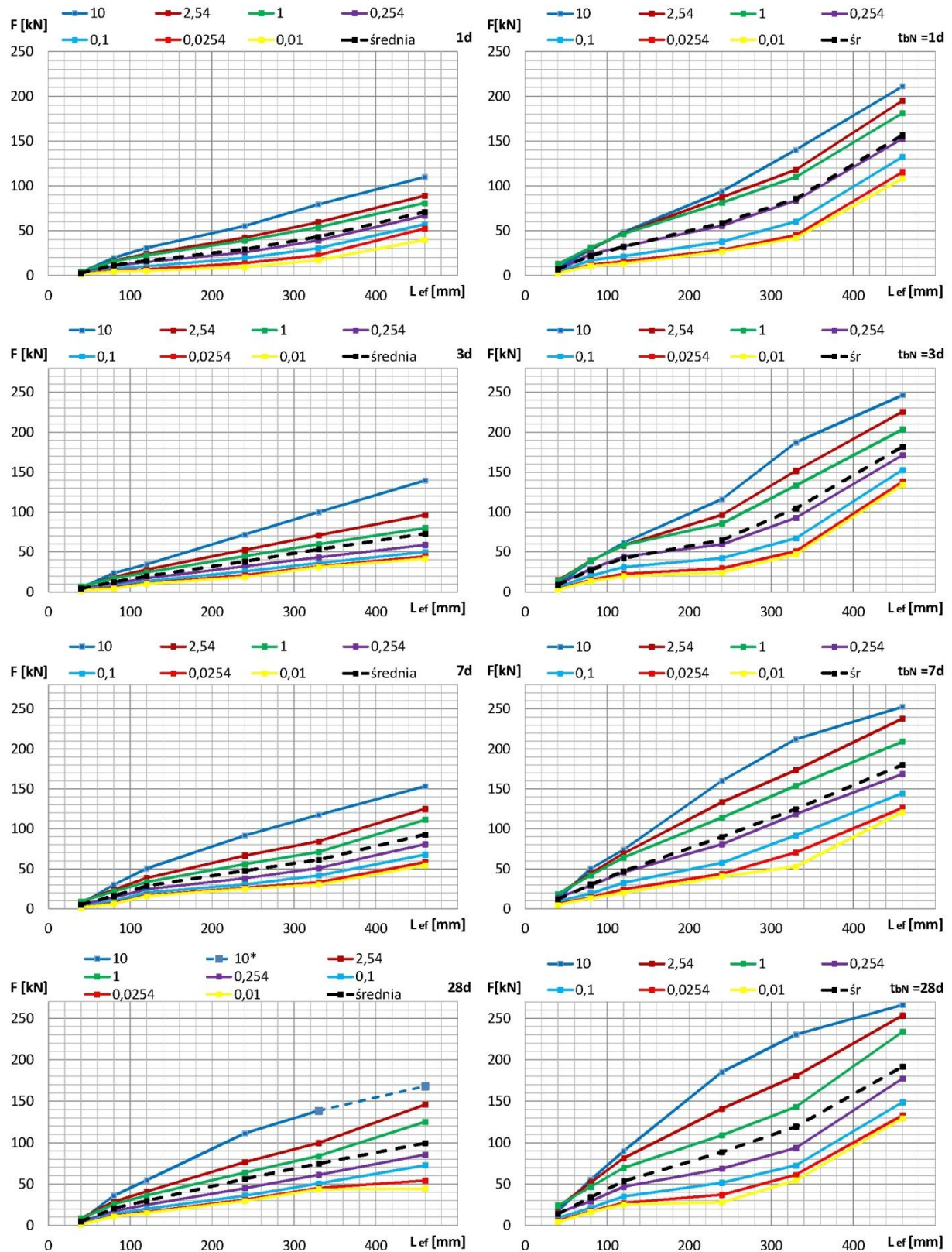
Rys. E.13 Wykresy zależności siły wyciągającej splot 7 $\phi$ 4 mm i 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności



Rys. E.14 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot 7 $\phi$ 4 mm i 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności



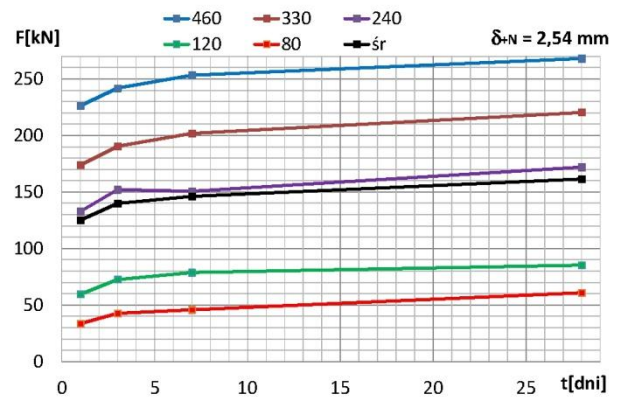
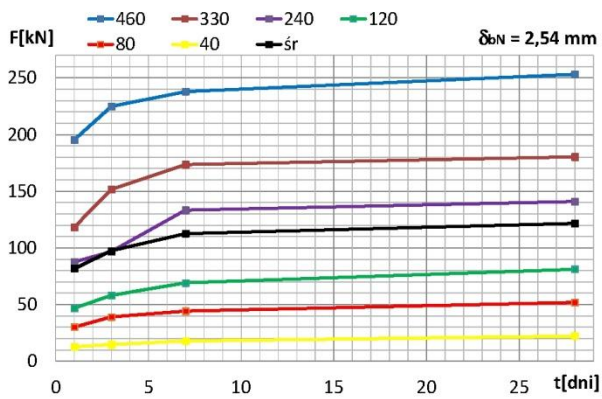
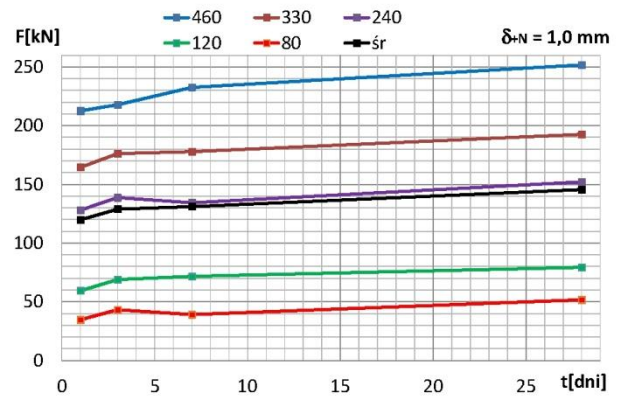
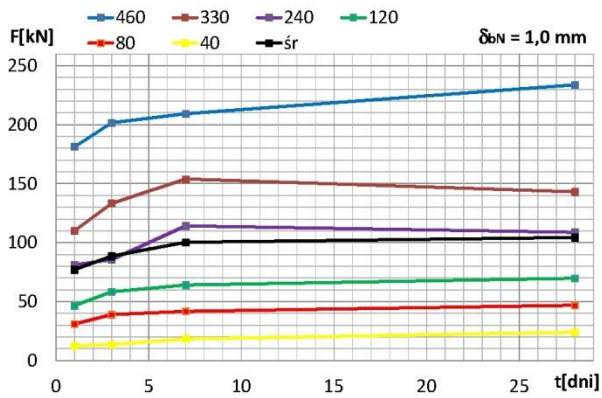
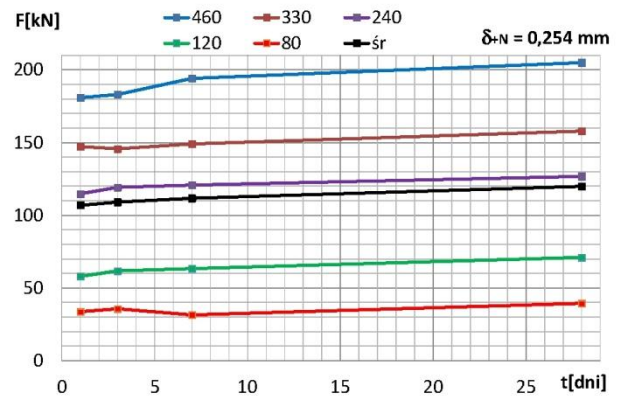
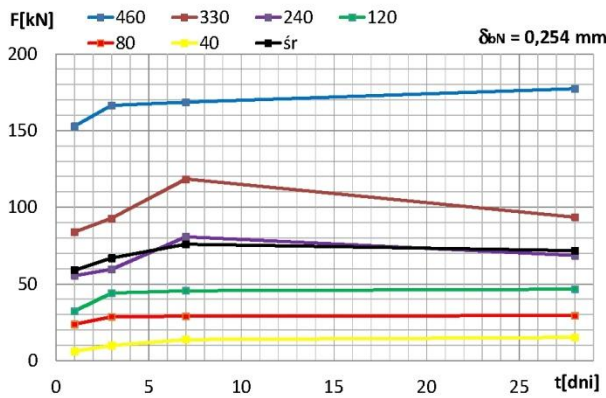
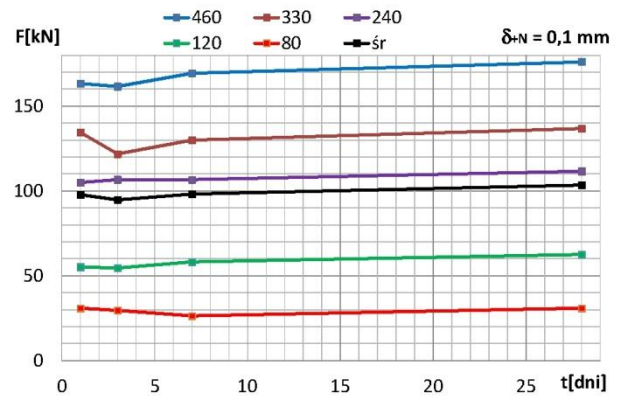
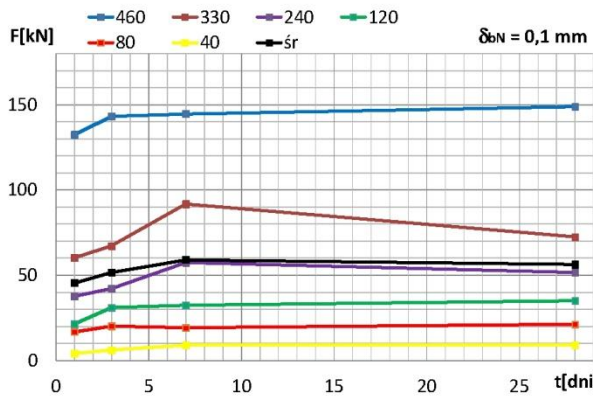
Rys. E.15 Wykresy zależności siły wyciągającej od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów dla splotów 7 $\phi$ 4 mm i 7 $\phi$ 5 mm okrągłych



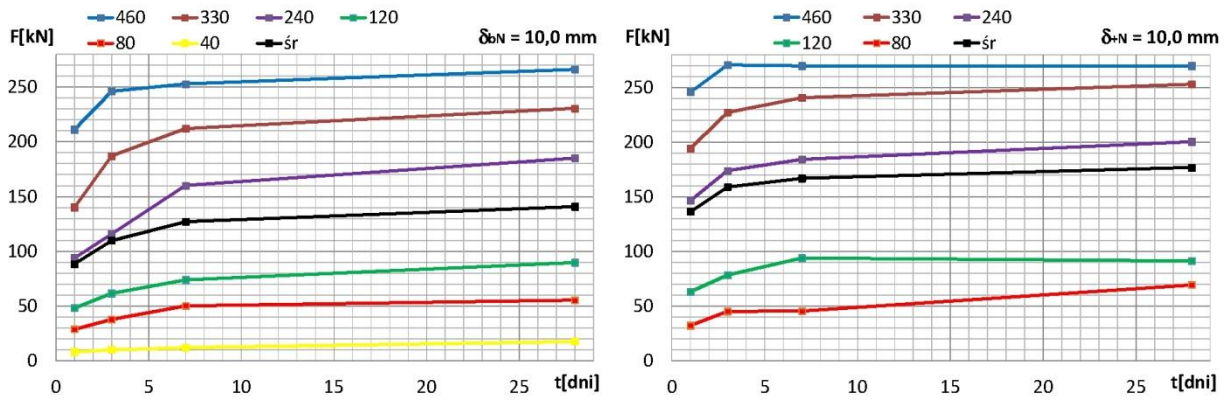
Rys. E.16 Wykresy zależności siły wyciągającej splot 7 $\phi$ 4 mm i 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu od czynnej długości przyczepności po 1, 3, 7 i 28 dniach dla poszczególnych długości poślizgu



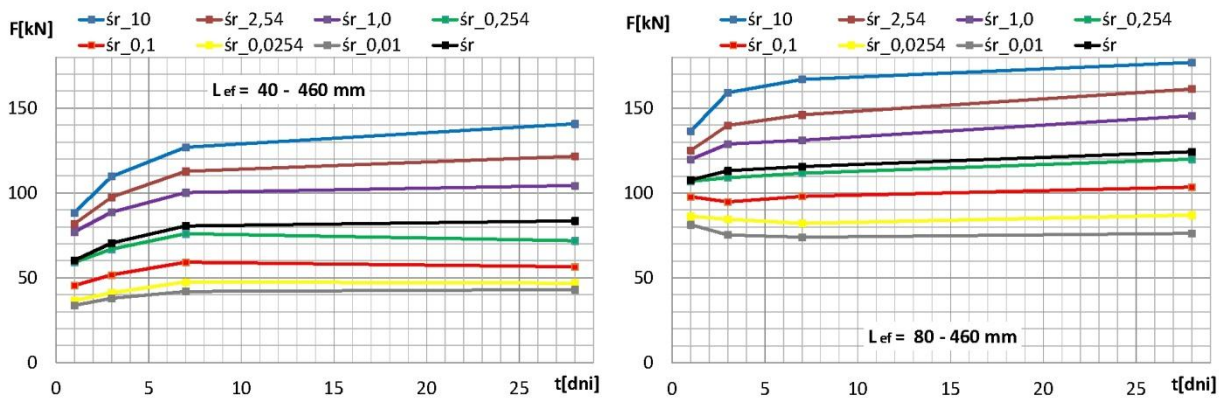
WPLYW DŁUGOŚCI TRANSMISJI SIŁY NACIĄGOWEJ I ROZSTAWU CIĘGIEN SPRĘŻAJĄCYCH NA STAN ODKSZTAŁCENIA  
W STRUNOBETONOWEJ TARCZY Z BETONU WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI



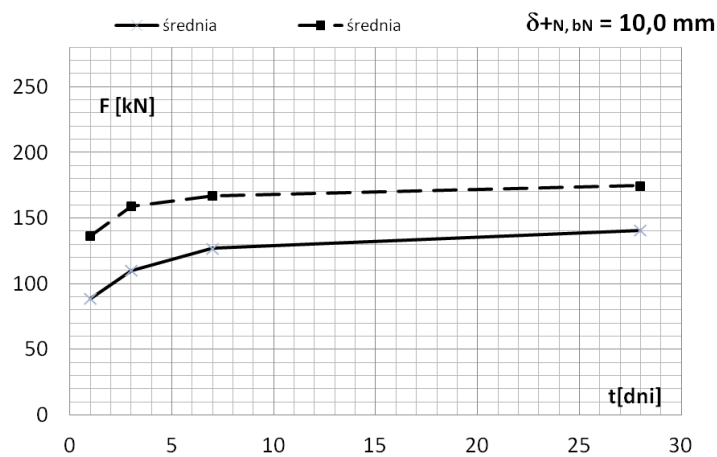




Rys. E.19 Wykresy zależności siły wyciągającej splot 7φ5 mm bez naciągu i 7φ5 mm z naciągiem od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności

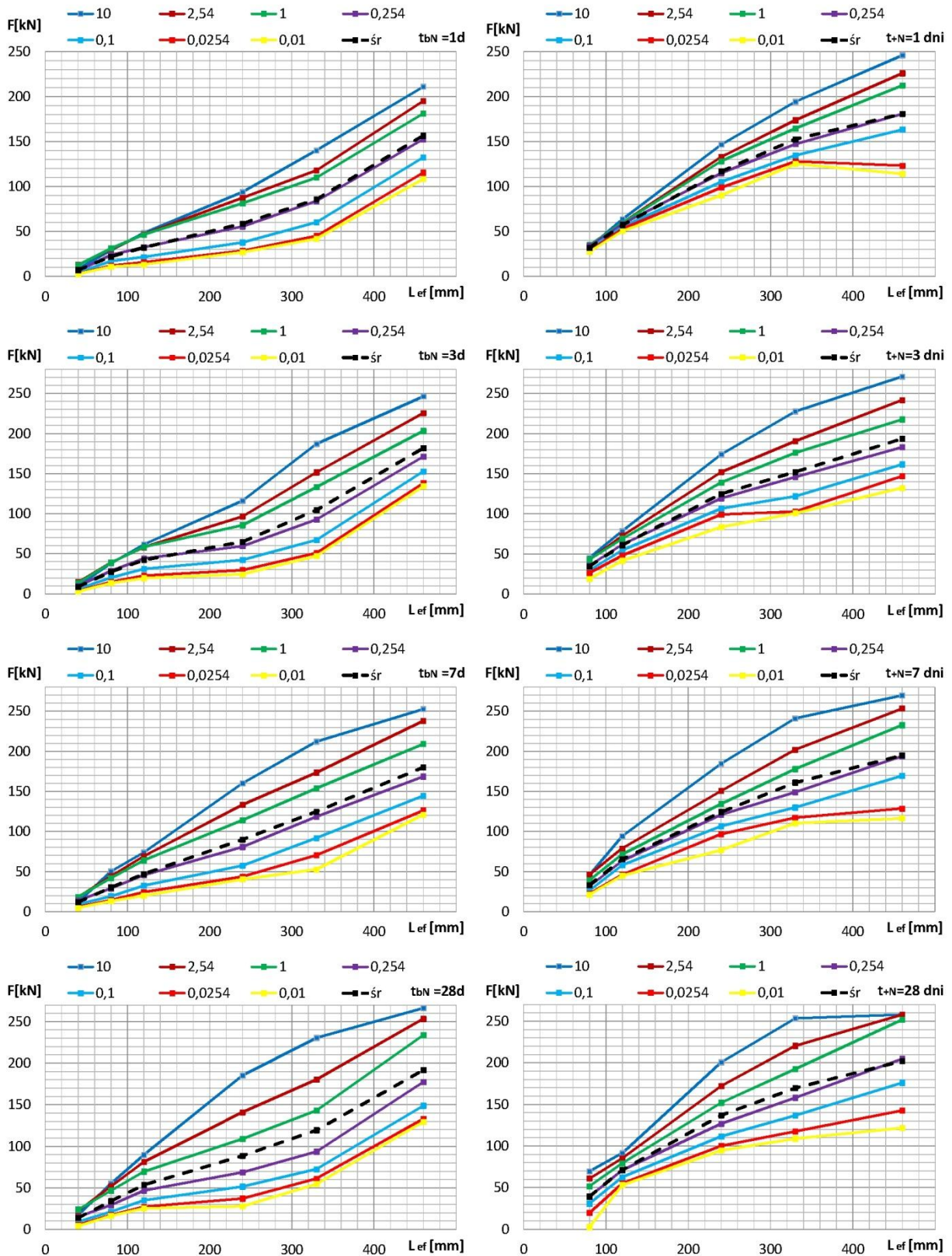


Rys. E.20 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot 7φ5 mm bez naciągu i 7φ5 mm z naciągiem od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności

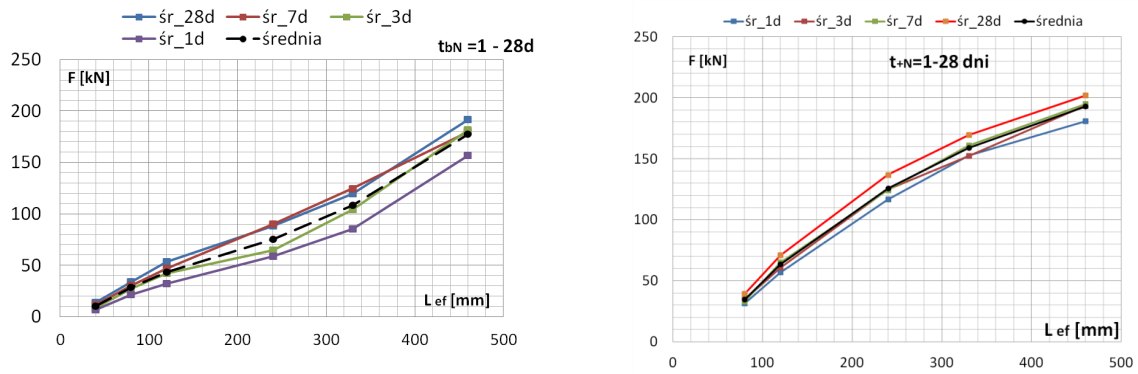


Rys. E.21 Porównanie zależności siły wyciągającej w funkcji czasu na poziomie poszczególnych poślizgów dla splotów 7 φ5 mm bez naciągu i z naciągiem

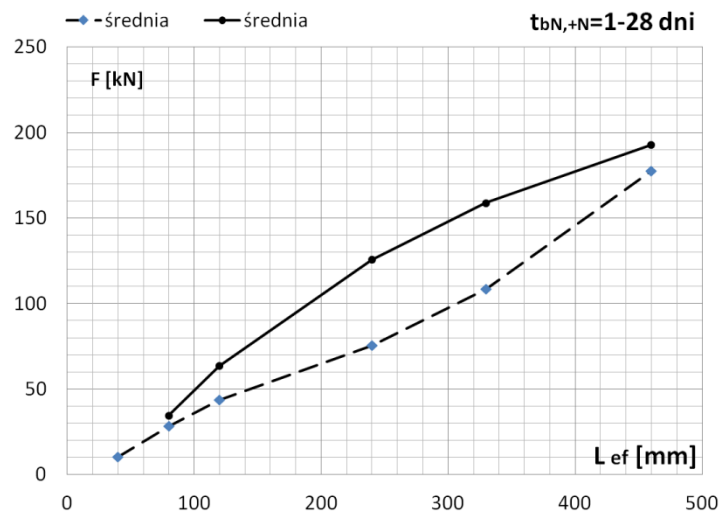
WPŁYW DŁUGOŚCI TRANSMISJI SIŁY NACIĄGOWEJ I ROZSTAWU CIĘGIEN SPRĘŻAJĄCYCH NA STAN ODKSZTAŁCENIA  
W STRUNOBETONOWEJ TARCZY Z BETONU WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI



Rys . E.22 Wykresy zależności siły wyciągającej splot 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu i 7 $\phi$ 5 mm z naciągiem od czynnej długości przyczepności po 1, 3, 7 i 28 dniach dla poszczególnych długości poślizgu



Rys. E.23 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu i 7 $\phi$ 5 z naciągiem od czynnej długości przyczepności po 1, 3, 7 i 28 dniach dla poszczególnych długości poślizgu



Rys. E.24 Porównanie zależności siły wyciągającej w funkcji czasu na poziomie poszczególnych poślizgów dla splotów 7  $\phi$ 5 mm bez naciągu i z naciągiem

## LITERATURA

- [N1] AASHTO 1996: *Standard Specifications for Highway Bridges*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc., 16th Edition, Washington D.C., 1996.
- [N2] AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications*, U.S. Customary Units, 2nd Edition, Interim Revisions 2003.
- [N3] ACI 318-02: *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02)* American Concrete Institute, Detroit, 2002
- [N4] CEB-FIB Model Code 1990, Bulletin D'Information N°195, Comité Euro-International du Béton: mars, 1990
- [N5] DIBt: Richtlinien für die Prüfung von Spannstählen auf ihre Eignung zur Verankerung durch sofortigen Verbund, Mitteilungen Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, Juni 1980
- [N6] DIN 1045-1: 07-2001. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion
- [N7] DIN 1045-1: 08-2008. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion.
- [N8] EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Fassung Oktober 2005.
- [N9] fib (CEB-FIP) Model Code, fib Bulletin 55, first complete draft Vol.1, 2010
- [N10] PN-EN 1992-1-1:2004+AC:2008: Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [N11] RILEM/CEB/FIP: Technical recommendations for the testing and use of construction materials. E&FN Spon, U.K. 1983.
- [N12] Comité Euro-International du Béton: CEB/FIP High Performance Concrete, Recommended Extensions to the Model Code 90, Research Needs; Bulletin d'Information Heft 228, July 1995.
- [N13] PN-EN ISO 6892-1: 2010. *Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej*. Warszawa: PKN 2010
- [N14] PN-EN 206-1 Beton - Część 1: Wymaganie, właściwości, produkcja i zgodność
- 
- [1] **Abendroth R., Member, ASCE, Russell A. S. i Donghui Yuan** *Epoxy-coated and Uncoated Strand Transfer Lengths for PC Panels* Journal of Structural Engineering May 1997, strony 550 - 560
- [2] **Abrishami H. H., Mitchell D.** *Bond Characteristic of Pretensioned Strand* ACI Materials Journal", May-June 1993 str. 228 - 235
- [3] **Ajdukiewicz A.** 2000. *Rozwój badań i zastosowań betonów wysokowartościowych*. Konferencja Beton na progu nowego milenium. Polski Cement, Kraków.
- [4] **Alavi-Fard M., Marzouk H.** 2004. *Bond Behaviour of High Strength Concrete*. Magazine of Concrete Research, Vol. 9.



- [5] **Al-Jahdali F. A., Wafa F. F., Shihata S. A. 1994.** Development Length for Straight Deformed Bars in High-Strength Concrete/High-Performance Concrete, Proceeding of the ACI International Conference, Singapore, 1994, ACI - SP - 149
- [6] **Arbelaez, C.A.; Martí, J.R.; Serna, P.; Caro, A.:** *Effects of the Properties and Composition of the Concrete on the Transmission and Anchorage Lengths of Prestressed Strand.* 5th International PhD Symposium in Civil Engineering, Delft, 16.-19. Juni 2004, Band 2, S. 1015-1022.
- [7] **Azizinamini A., Chisala M., Ghosh S. K. 1995.** *Tension Development Length of Reinforcing Bars Embedded in High-Strength Concrete.* Engineering Structures, Vol. 17, No. 7.
- [8] **Azizinamini A., Stark M., Roller J. J., Ghosh S. K. 1993.** *Bond Performance of Reinforcing Bars Embedded in High-Strength Concrete.* ACI Structural Journal, Vol. 90, No. 5.
- [9] **Balázs György L.** *Transfer Control of Prestressing Stands,* PCI Journal listopad-grudzień 1992 strony 60 - 71
- [10] **Barnes, R.W.; Burns, N.H.; Kreger, M.E.:** *Development Length of 0.6-Inch Prestressing Strand in Standard I-Shaped Pretensioned Concrete Beams.* Research Report 1388-1, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, TX, Research Study 0-1388, Dezember 1999.
- [11] **Barnes R.W., Grove J.W., Burns N.H.** *Experimental Assessment of Factors Affecting Transfer Length,* w ACI Structural Journal November-December 2003, strony 740 - 748
- [12] **Betram G., Hegger J., 2012.** *Verbundverhalten von vorgespannten Litzen i UHPC, Teil 1: Versuche zur Verbundfestigkeit und zur Übertragungslänge,* Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010), Heft 6, strony 379 - 389.
- [13] **Betram G., Hegger J., 2012.** *Verbundverhalten von vorgespannten Litzen i UHPC, Teil 2: Ableitung eines Verbundmodells zur Beschreibung der Übertragungslänge,* Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), Heft 1, strony 23 - 31.
- [14] **Bigaj A. J. 1995.** *Bond behaviour of deformed bars in NSC and HSC,* Report 25.5-95-II, TU Delf, Faculty of Civil Engineering, Delft, 1995
- [15] **Birkenmaier, M.:** *Verbundprobleme bei Spannbettvorspannung,* Schweizerische Bauzeitung, 95. Jahrgang, Heft 26, Juni 1977
- [16] **Birrcher D. B., Bayrak O., Kreger M. E. 2010,** *Effects of Increasing Allowable Compressive Stress at Prestress Transfer* ACI Structural Journal January-February 2010, strony 21 - 31
- [17] **Browne R. D. 1972.** *Thermal Movement in Concrete,* Concrete, November No. 6 strony 51 - 53
- [18] **Bruggeling, A.S.G. 1999.** *Controlling Transmission of prestress by bond in progress.* Festschrift zum 60. Geburtstag von Gyorg Ivanyi, 1999
- [19] **Bruggeling, A.S.G. 2001.** *Übertragen der Vorspannung mittels Verbund.* Beton-und Stahlbetonbau 96, 2001, Heft 3, S. 109-123
- [20] **Bruggeling, A.S.G. 2001.** *Transmission of prestress by bond.* Internal Report of TG 9.4 to fib Commission 9, 2001
- [21] **Bruggeling, A.S.G., Huyghe G. 1991.** *Prefabrication with Concrete.* A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1991, strony 380

- [22] **Buckner C. D., 1995**, *A Review of Strand Development Length for Pretensioned Concrete Members* PCI Journal March-April 1995, strony 84 - 105
- [23] **Buckner C. D., Logan D. R., Russell B. W., Burns N. H., Tadros M. K., Baishya M. C. 1996**, *A Review of Strand Development Length for Pretensioned Concrete Members* PCI Journal March-April 1996, strony 112 - 127
- [24] **Butnet, E.F.P., Marefat, M. S 1992**: *Anchorage bond of seven-wire strand*, International Conference Bond in Concrete, Riga, October 1992
- [25] **Byung Hwan Oh, Eui Sung Kim** *Realistic Evaluation of transfer Length in Pretensioned, Prestressed Concrete Members*, ACI Structural Journal listopad-grudzień 2000, strony 821 - 830
- [26] **Byung Hwan Oh, Si N. Lim, Myung K. Lee, Sung W. Yoo 2014**, *Analysis and Prediction of Transfer Length in Pretentioned, Prestressed Concrete Members*, ACI Structural Journal May-June 2014, strony 549 - 559
- [27] **Bülte S.**, *Zum Verbundverhalten von Spannstahl mit sofortigem Verbund unter Betriebsbeanspruchung*, Aachen, 2008
- [28] **Castrodale, R.W.:** *A Study of Pretensioned High Strength Concrete Girders in Composite Highway Bridges*. Dissertation, University of Texas, Austin, Mai 1988.
- [29] **Ciampi V., Elinghausen R., Bertero V., Popov E. 1982**. *Analytical Model for Deformed Bar Bond under Generalized Excitations*. Report of the University of Berkeley.
- [30] **Córdova, C.R.; Burns, N.H.; Carrasquillo, R.L.; Fowler, D.W.:** *Transfer and Development Length of 0.6-Inch Diameter Prestressing Strand at 2-Inch Spacing in Fully Bonded Normal Strength Concrete Composite Texas Type C Beams*. Research Report 589-3, Center for Transportation Research, University of Texas, Austin, Research Study 9-589, Januar 1997.
- [31] **Cousins T.E., Badeaux M.H., Moustafa S.**, *Proposed Test for Determining Bond Characteristics of Prestressing Strands*, PCI Journal Januar-Februar 1992, str. 66 - 73
- [32] **Cousins, T.E.; Johnston, D. W.; Zia, P.:** *Transfer and Development Length of Epoxy Coated and Uncoated Prestressing Strand*. PCI Journal, Band 35, Heft 4, Juli-August 1990, S. 92-103.
- [33] **Cousins, T.E.; Johnston, D.W.; Zia, P.:** *Development Length of Epoxy-Coated Prestressing Strand*. ACI Materials Journal, Band 87, Heft 4, 1990, S. 309-318.
- [34] **Cousins, T.E.; Stallings, J.M.; Simmons, M.B.:** *Reduced Strand Spacing in Pretensioned, Prestressed Members*. ACI Structural Journal, Band 91, Heft 3, Mai-Juni 1994, S. 277-286.
- [35] **Czerski Z.** *Mechanizm działania przyczepności w strunobetonie*. Inżynieria i Budownictwo, nr 6, 1967
- [36] **Darwin D., Tholen M. L., Idun E. K., Zuo J. 1996**. *Splice Strength of High Relative Rib Area Reinforcing Bars*. ACI Structural Journal, Vol. 93, No. 1.
- [37] **Deatherage, J.H.; Burdette, E.G.; Chew, C.K.:** *Development Length and Lateral Spacing Requirements of Prestressing Strand for Prestressed Concrete Bridge Girders*. PCI Journal, Band 39, Heft 1, Januar-Februar 1994, S. 70-83.
- [38] **Deatherage, J.H.; Burdett, E.G.:** *Development Length and Lateral Spacing Requirements of Prestressing Strand for Prestressed Concrete Bridge Products*. PCI Report, Transportation Center, University of Tennessee, Knoxville, September 2001, S. 127 ff.

- [39] **de Larrard F., Schaller I., Fuchs J. 1993.** *Effect of Bar Diameter on the Bond Strength of Passive Reinforcement in High-Performance Concrete.* ACI Materials Journal, Vol 90, No. 4, July-August 1993
- [40] **Den Uijl, J.A. 1976:** *Verbundeigenschaften von Spannlitzen unter einmaliger und wiederholter Beanspruchung,* Beitrag zum 6. Forschungskolloquium des DAfStb in Delft, Heron, Vol. 21, Nr. 2, 1976.
- [41] **Den Uijl, J.A.:** *Verbundverhalten von Spanndraht-Litzen im Zusammenhang mit Rißbildung im Eintragungsbereich,* Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 1, Bauverlag GmbH, 1985, Seiten 28 - 36
- [42] **den Uijl, J.:** *Transfer Length of Prestressing Strand in HPC.* Progress in Concrete Research, Band 4, TU Delft, 1995.
- [43] **Den Uijl, J.A. 1996.** *Bond of Strands in High Performance Concrete.* Proceeding of the 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete, Paris, 1996
- [44] **Den Uijl, J.A.; Bigaj, A.J. 1996:** *A bond model for ribbed bars based on concrete confinement.* In: HERON, Volume 41, No. 3, pp. 201–226.
- [45] **Dyba M. 2014,** *Wpływ parametrów technologicznych na przyczepność betonu wysokowartościowego do stalowych splotów sprężających.* Praca doktorska, Politechnika Krakowska
- [46] **Dybel P. 2012.** *Wpływ składu i właściwości betonów wysokowartościowych na przyczepność do stalowych prętów zbrojeniowych.* Kraków : PK, 2012. Praca doktorska
- [47] **Eligehausen, R. 1979.** *Lapped splices of ribbed bars with straight ends.* Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Vol. 301.
- [48] **Ezeldin S. A., Balaguru P. N. 1989.** *Bond Behaviour of Normal and High-Strength Fiber Reinforced Concrete,* ACI Materials Journal, Vol.86, No. 5, September-October 1989
- [49] **Fehling E. 1990.** *Zur Energiedissipation und Steifigkeit von Stahlbetonbauteilen unter besondere Berücksichtigung von Rißbildung und verschieblichem Verbund.* Dissertation, Darmstadt, 1990.
- [50] **Flaga K., Mierzwa J. 1992.** *Betony o dużej trwałości i wysokiej wytrzymałości (HSC) jako realizacja nowej materiałowo-technologicznej koncepcji kompozytu konstrukcyjnego.* Przegląd Budowlany 8-9.
- [51] **Furtak K., Śliwiński J. 2004.** *Materiały budowlane w mostownictwie.* Wydawnictwa Komunikacji i łączności, Warszawa.
- [52] **Girgis A. F. M., Tuan C. Y., 2005,** *Bond Strength and Transfer Length of Pretensioned Bridge Girders Cast With Self-Consolidating Concrete* PCI Journal November-December 2005 strony 72 - 87
- [53] **Godycki-Ćwirko T.,** *Mechanika betonu,* Arkady, Warszawa 1982
- [54] **Goto Y. 1971.** *Cracks formed in concrete around deformed tension bars.* ACI Journal, Proceedings, Vol. 68, No. 4. strony 244 - 251
- [55] **Gross, S.P.; Burns, N.H.:** *Transfer and Development Length of 15.2 mm Diameter Prestressing Strand in High Performance Concrete: Results of the Hoblitzell-Buckner Beam Tests.* Research Report 580-2, Center for Transportation Research, University of Texas, Austin, Juni 1995.

- [56] **Grove, J.W.:** *Transfer and Development Length of Debonded 15.2 mm (0.6 in) Diameter Prestressing Strand in AASHTO Type I Girder Specimens*. Master's Thesis, University of Texas, Austin, August 1998.
- [57] **Hanson N., Kaar P. 1959.** *Flexural Bond Test of Pretensioned Prestressed Beams*. ACI Journal Proceeding V. 55, No. 7, Jan. 1959 strony 783 - 803
- [58] **Hegger, J., Nitsch, A.:** *Verbundverhalten von Litzen in hochfestem Beton*, Bericht Nr. 54/99 des Instituts für Massivbau der RWTH Aachen, April 1999
- [59] **Hegger, J.; Rauscher, S.:** *Querkrafttragfähigkeit von mittel- bis hochbewehrten Spannbetonfertigteilen aus selbstverdichtendem Beton*. DBV 239. Berichts-Nr. 99/2004, Institut für Massivbau, RWTH Aachen, 2004.
- [60] **Hegger, J., Will, N.; Bülte, S.:** *Verbundverhalten von Spannstahl mit sofortigem Verbund unter Betriebsbeanspruchung und Längsrissbildung*. Bericht- Nr. 176/2007, Instituts für Massivbau, RWTH Aachen, September 2007.
- [61] **Hegger, J.; Will, J; Kommer, B.; Brameshuber, W.; Uebachs, S.:** *Einsatz von selbstverdichtendem Beton für vorgespannte Bauteile*. Institutsbericht Nr.: 116/2004 des Instituts für Massivbau der RWTH Aachen, September 2006.
- [62] **Hegger, J.; Will, J; Kommer, B.:** *Verbundverankerungen in hochfestem Leichtbeton*. DIBt, Berichts-Nr. 115/2004, Institut für Massivbau, RWTH Aachen, 2005.
- [63] **Hegger, J.; Will, J; Kommer, B.:** *Verbundverankerungen von Spannstählen sowie Querkrafttragfähigkeit bei Spannbetonfertigteilen aus selbstverdichtendem Beton*. DIBt, Berichts-Nr. 122/2004, Institut für Massivbau, RWTH Aachen, 2006.
- [64] **Hwang S.-J., Lee Y.-Y., Lee C.-S. 1994.** *Effect of Silica Fume on the Splice Strength of Deformed Effect of Silica Fume on the Splice Strength of Deformed Bars of High-Performance Concrete*. ACI Structural Journal, Vol. 91, No. 3.
- [65] **Ho Park, Jae-Yeol Cho 2014,** *Bond-Slip-Strain Relationship in Transfer Zone of Pretensioned Concrete Elementes* ACI Structural Journal May-June 20014, str 503 - 513
- [66] **Huang, Z.; Engström; B.; Magnusson, J.:** *Experimental and Analytical Studies of the Bond Behaviour of Deformed Bars in High Strength Concrete*, 4th International Symposium on Utilization of HSC/ HPC, Paris, 1996, S. 1115 - 1124.
- [67] **Hoyer E. 1939.** *Der Stahlsaitenbeton*, Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Berlin Wien Leipzig, 1939
- [68] **Hoyer E., Friedrich E. 1939.** *Beitrag zur Frage der Haftspannung in Eisenbetonbauteilen*. beton und Eisen, Vol.50, No.9, strony 717 - 736
- [69] **Issa, M.A.; Sen, R.; Amer, A.:** *Comparative Study of Transfer Length in Fiberglass and Steel Pretensioned Concrete Members*. PCI Journal, Band 38, Heft 6, November / Dezember 1993, S. 52-63.
- [70] **Jasiczak J., Mikołajczyk P. 2003.** *Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami*. Przegląd tendencji krajowych i zagranicznych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- [71] **Jasiczak J., Wdowska A., Rudnicki T. 2008.** *Betony ultrawysokowartościowe*. Wyd. Stowarzyszenie Producentów Cementu. Kraków

- [72] **Jaccoud, J.-P.; Farra, B., Leclercq, A.:** *Improvement of Existing Codes to their Application to Crack Control of HSC/ HPC Structures.* 4th International Symposium on Utilization of HSC/ HPC, Paris, 1996, S. 1155–1161
- [73] **Kaar P. H., LaFraugh R. W., Maas M. A.,** *Influence of Concrete Strength on Strand Transfer Length* PCI Journal V. 8. No. 5 October 1963 strony 47-67
- [74] **Kahn L. F., Dill J. C., Reutlinger C. G.,** *Transfer and Development Length of 15-mm Strand in High Performance Concrete Girders* Journal of Structural Engineering July 2002, strony 913 - 921
- [75] **Kaku T., Iizuka S., Yamada M., Zhang J. 1992.** *A Proposal of Bond Strength Equation for Reinforced Members including High Strength Concrete Level.* CEB/Riga Technical University: International Conference - Bond in Concrete - From Research to Practice, Proceeding Topics 3 - 7, Riga, 1992
- [76] **Kaszyńska M. 2002.** *BWW: możliwości, cechy, zastosowania.* XVII Ogólnopolska Konferencja Warsztat pracy projektanta konstrukcji, Ustroń.
- [77] **Keuning R. W., Sozen M. A., Siess C. P. 1962.** *A Study of Anchorage Bond in Prestressed Concrete.* No 251. University of Illinois Structural Research Series
- [78] **Kilgore, J.H.:** *Transfer and Development Length of Debonded 0,6 inch Diameter Prestressing Strand in AASHTO Type I Concrete Beams.* University of Texas at Austin, Master's Thesis, 1997.
- [79] **Kommer B. 2008,** *Zur Verbundverankerung bei Vorspannung mit sofortigem Verbund in Hochleistungsbeton,* Aachen, 2008
- [80] **Kose Mehmet M., Burkett W. R.,** *Formulation of New Development Length Equation for 0,6 in. Prestressing Strand* PCI Journal September-October 2005 strony 96 - 105
- [81] **Kose Mehmet M., Burkett W. R.,** *Evaluation of Code Requirement for 0,6 in. (15 mm) Prestressing Strand* ACI Structural Journal May-June 2005, str 422 - 428
- [82] **Krips M. 1985.** *Rissbreitenbeschränkung in Stahlbeton und Spannbeton.* Ernst und Sohn – Verlag für Architektur und Technische Wissenschaften, Berlin.
- [83] **Kucharska L., Brandt A. M. 1993.** *Skład, technologia i właściwości mechaniczne betonów wysokowartościowych.* Inżynieria i Budownictwo, nr 9.
- [84] **Kupfer; H.; Müller; H.H.:** *Verbund von Spannstahl in Beton (Vorspannung mit sofortigem Verbund),* Forschungsbericht Nr. 1130, Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München, Juni 1987.
- [85] **Kurz W. 1997.** *Ein mechanisches Model zur Beschreibung des Verbundes zwischen Stahl und Beton,* Dissertation, Darmstadt, 1997
- [86] **Kuś S. 1968.** *Sploty jako ciągnia w konstrukcjach strunobetonowych.* Instytut techniki Budowlanej, Warszawa 1968, praca habilitacyjna
- [87] **Kuś S., Misiak R.** *Własności wytrzymałościowe splotów i lin.* Inżynieria i Budownictwo, nr 7, 1968.
- [88] **Kuś S. 2013.** *O projektowaniu strefy podporowej w elementach strunobetonowych.* Inżynieria i Budownictwo nr 5/2013 strony 291 - 292
- [89] **König G. 1991.** *High strength concrete.* Darmstadt Concrete, 6.
- [90] **König, G.; Bergner, H.; Grimm, R.; Held, M.; Rimmel, G.; Simsch, G.:** *Hochfester Beton, Sachstandsbericht - Teil 2: Bemessung und Konstruktion.* DAfStb, Heft 438, Beuth-Verlag, 1994.

- König G., Remml G., Held M., Grimm R., Fahlhaber T. 1991.** *High strength concrete*. Darmstädter Massivbau – Seminar, Band 6. Inst. f. Massivbau TH Darmstadt.
- [91] **Lane, S.N.:** *Transfer Lengths of Uncoated and Epoxy-Coated Strands in Rectangular Prestressed Concrete Specimens*. Riga: Technical University, RTU, 1992. International Conference “Bond in Concrete from Research to Practice”, Proceedings, Riga, Latvia, 15.-17. Oktober 1992, Band 2, S. 5.62-5.70.
- [92] **Lane, S.N.:** *A New Development Length Equation for Pretensioned Strands in Bridge Beams and Piles*. Final Report No. FHWA-RD-98-116, Structures Division, Federal Highway Administration, Georgetown Pike, McLean, Dezember 1998.
- [93] **Larson, K. H., Peterman, R. J., Esmaeily, A. 2007.** *Bond Characteristics of Self- Consolidating Concrete for Prestressed Bridge Girders*. PCI Journal, 52 (4), 44-57.
- [94] **Leonhardt, F.:** *Vorlesungen über Massivbau – Teil 5*, Springer Verlag
- [95] **Logan R.D.** *Acceptance Criteria for Bond Quality of Strand for Pretensioned Prestressed Concrete Applications* w PCI Journal March-April 1997 strony 52 - 90
- [96] **Lutz, B.A.; Russel, B.W.; Burns, N.H.:** *Measurement of Development Length of 0.5-inch and 0.6-inch Diameter Prestressing Strand in Fully Bonded Concrete Beams*. Research Report 1210-3, Center for Transportation Research, University of Texas, Austin, Februar 1992.
- [97] **Mahmoud Z. I., Rizkalla S. H., Zaghoul E. R. 1999.** *Transfer and Development Lengths of Carbon Fiber Reinforcement Polymers Prestressing Reinforcing*. ACI Structural Journal, Vol. 96, No 4 (July-August) strony 594 - 602
- [98] **Mainz, J.:** *Modellierung des Verbundtragverhaltens von Betonrippenstahl*. Berichte aus dem konstruktiven Ingenieurbau der TU München, Heft 9/93, Dissertation, 1993.
- [99] **Martin H. 1973.** *Zusammenhang zwischen Oberflächenbeschaffenheit, Verbund und Springwirkung von Bewehrungsstählen unter Kurzzeitbelastungen*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 228.
- [100] **Martin, H.:** *Einfluß der Betonzusammensetzung auf das Verbundverhalten von Bewehrungsstählen*, Fortschritte im konstruktiven Ingenieurbau, Festschrift für Gallus Rehm zum 60. Geburtstag, Berlin 1984
- [101] **Martin H., Noakowski P. 1981.** *Bond behavior in reinforced concrete*. Research Report IV, München Technical University, München, Germany.
- [102] **Martin, L.D.; Scott, N.L.:** *Development of Prestressing Strand in Pretensioned Members*. ACI Journal, Band 74, Heft 8, 1976, S. 453-456.
- [103] **Marti-Vargas J.R., Arbelaez C.A., Fernandez-Prada M.A., Serna-Ros P., Miguel-Sosa P.F.** *Transfer and Development Lengths of Concentrically Prestressed Concrete* w PCI Journal September-October 2006, strony 74 - 85
- [104] **Martí-Vargas, J.R.; Serna-Ros, P.; Arbeláez, C.A.; Rigueira-Víctor, J.W.:** *Transfer and Anchorage Bond Behaviour in Self-Compacting Concrete*. Materiales de Construcción, Band 56, Heft 284, 2006, S. 27-42.



- [105] **Marti-Vargas, J.R., Arbelaez, C.A., Serna-Ros, P.; Navarro-Gregori, J.; Pallares-Rubio, L.:** *Analytical Model for Transfer Length Prediction of 13 mm Prestressing Strand*. Structural Engineering and Mechanics, Vol. 26, No. 2, 2007.
- [106] **Mitchell D., Cook W. D., Khan A.A., Tham T. 1993.** *Influence of High Strength Concrete on Transfer and Development Length of Pretensioning Strand* PCI Journal N 3 1993, strony 52 - 66
- [107] **Moustafa S. 1974.** *Pull-out Strength of Strands and Lifting Loops*. Technical Bulletin 74-B5. Concrete Technology Corp.
- [108] **Myers J. J., Volz J. S., ...** *Self-Consolidating Concrete (SCC) for Infrastructure Elements Report B – Bond, Transfer Length, and Development Length of Prestressing Strand*
- [109] **Mayer U., Eligehausen R. 1998.** *Bond behavior of ribbed bars at inelastic steel strains*. Proc. 2nd Int. PhD Symposium in Civil Engineering, Technical University of Budapest, Budapest, Hungary.
- [110] **Nacken R. 1937.** *Das Problem der Zementverfestigung*, Zement, Heft 3, 1937
- [111] **Nassar, A.J.:** *Investigation of Transfer Length, Development Length, Flexural Strength and Prestress Loss Trend in Fully Bonded High Strength Lightweight Prestressed Girders*. Master's Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, Mai 2002.
- [112] **Neville A. 2000.** *Właściwości betonu*. Polski Cement, Kraków
- [113] **Nijhawam C. 1978** *Discussion of Development Length of Prestressing Strands*. PCI Journal, V,23, No. 4, 1978, strony 99 - 102
- [114] **Nitsch A. 2001,** *Spannbetonfertigteile mit teilweiser Vorspannung aus hochfesten Beton*, Aachen, 2001
- [115] **Noakowski P. 1978.** *Die Bewehrung von Stahlbetonbauteilen bei Zwangbeanspruchung infolge Temperatur*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 296.
- [116] **Noakowski P.** *Nachweisverfahren für Verankerung, Verformung, Zwangbeanspruchung und Rissbreite. Kontinuierliche Theorie der Mitwirkung des Betons auf Zug. Rechenhilfen für die Praxis*. DAfStb, Heft 394, Beuth-Verlag, 1988.
- [117] **Noakowski P., Martin H. 1981.** *Verbundverhalten von betonstählen. Untersuchung auf der Grundlage von Ausziehversuchen*. BAfStb Heft 319, Berlin, Ernst&Sohn, 1981
- [118] **Noghabai K. 1995.** *Splitting of Concrete in the Anchoring Zone of Deformed Bars*. Licentiate Thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 1995
- [119] **Oh, B.H.; Kim, E.S.:** *Realistic Evaluation of Transfer Lengths in Pretensioned, Prestressed Concrete Members*. ACI Structural Journal, Band 97, Heft 6, 2000, S. 821-830.
- [120] **Oh B. H., Lim S. N., Lee M. K., Yoo S. W. 2014.** *Analysis and Prediction of Transfer Length in Pretensioned, Prestressed Concrete Members*. ACI Structural Journal/May-June 2014, strony 549 - 559
- [121] **Oleśniewicz A. 1975.** *Statistical Evaluation of Transmission Length of Strands*, Research and Design Centre for Industrial Building, Warszawa, Polska
- [122] **Over, R.S.; Au, T.:** *Prestress Transfer Bond of Pretensioned Strands in Concrete*, ACI Journal, Proceedings, Band 62, Heft 111, November 1965, S. 1451- 1459.

- [123] **Östlund L. 1963.** *Influence covering layer by deformed bars (Ks-steel) on the splitting risk.* Sweden, brak wydawnictwa 1963
- [124] **Peterman R. J. 2001.** *The Effects of As-Cast Depth and Concrete Fluidity on Strand Bond PCI* Journal May-June 2007, strony 72 - 101
- [125] **Peterman, R.; Ramirez, J.; Olek, J.:** *Evaluation of Strand Transfer and Development Lengths in Pretensioned Girders with Semi-Lightweight Concrete.* Report No. FHWA-IN-JTRP-99/3, Federal Highway Administration, Washington D.C., Juli 1999.
- [126] **Piasta J., Piasta W. 1992.** *Kruszywa a beton wysokiej wytrzymałości.* Przegląd Budowlany, nr 8/9.
- [127] **Plähn, J.:** *Untersuchungen über den Einfluss von Betonzusammensetzung auf die Sicherheit der Verbundverankerung von Spanndrahtlitzen.* Abschlussbericht, University of Hannover, 1980.
- [128] **Pogany, A.:** *Neuere Untersuchungen über das Wesen der Haftfestigkeit,* Zement, Heft 19, 1940
- [129] **Pozolo A. M. i Andrawes B. 2001** *Transfer Length in Prestressed Self-Consolidating Concrete Box and I-Girdes.* ACI Structural Journal May-June 2011, 108(3), strony 341 - 349
- [130] **Proske, T.; Graubner, C.A.:** *Anwendungsorientierte Entwicklung von hochfestem Selbstverdichtendem Beton mit sehr hoher Frühfestigkeit zur Herstellung von vorgespannten Bauteilen mit sofortigem Verbund.* Abschlussbericht AiF 13623 N, TU Darmstadt, Institut für Massivbau, Januar 2006.
- [131] **Radomski W. 1993.** *Niektóre problemy obliczeniowo-teoretyczne i techniczne związane z zastosowaniem betonów wysokiej wytrzymałości.* Inżynieria i Budownictwo, nr 9.
- [132] **Ramirez, J. A. and Russell, B. W. (2008).** *Transfer, Development, and Splice Length for Strand/Reinforcement in High-Strength Concrete.* Washington D.C.: Transportation Research Board.
- [133] **Rose, D. R. and Russell, B. W. (1997).** *Investigation of Standardized Tests to Measure the Bond Performance of Prestressing Strand.* PCI Journal, 42 (4), 56-80.
- [134] **Rehm G. 1961.** *Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton,* Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 138, Ernst & Sohn, Berlin 1961
- [135] **Rehm G. 1969.** *Evaluation criteria for high-bond rebars.* Festschrift Rüsck.
- [136] **Rehm G., Martin H., Noakowski, P.:** *Einfluß der Profilierung und des Betons auf die Verbundqualität von Stahl und Beton (Ausziehversuche an gefrästen Stählen),* Forschungsbericht Nr. 2203, Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Hochschule München, Mai 1970
- [137] **Rehm, G.:** *Kriterien zur Beurteilung von Bewehrungsstäben mit hochwertigem Verbund,* Stahlbetonbau, Berichte aus Forschung und Praxis, Festschrift Rüsck, Ernst & Sohn, Berlin 1969
- [138] **Reinhardt H. W. 1992.** *Bond of Steel to Strain-Softening Concrete Taking Account of Loading Rate.* Fracture Mechanics of Concrete Structure, str. 809, Elsevier, London, New York, 1992
- [139] **Reuter M., Elgehausen R. 1992.** *On the influence that the load introduction by means of fastening devices has on the load-bearing capacity of R/C members.* Bauingenieur, 67.
- [140] **Rodt V. 1940.** *Der Erhärtungsvorgang auf physikalische Grundlage,* Zement, Heft 22, 1940

- [141] **Rose D. R., Russell B. W.**, *Investigation of Standardized Tests to measure the Bond Performance of Prestressing Stands* Research Report, Fears Structural Engineering Laboratory, School of Civil Engineering and Environmental science, University of Oklahoma, Norman, OK, July 1996 212pp
- [142] **Ruhnau, J., Kupfer, H.**: *Spaltzug-, Stirn- und Schubbewehrung im Eintragungsbereich von Spannbett-Trägern*. Beton- und Stahlbetonbau, Heft 7, 1977, Seiten 175-179
- [143] **Russel, B.W.; Burns, N.H.**: *Static and Fatigue Behavior of Pretensioned Composite Bridge Girders made with High Strength Concrete*. PCI Journal, Band 38, Heft 3, 1993, S. 116-128.
- [144] **Russel, B.W.; Burns, N.H.**: *Design Guidelines for Transfer, Development and Debonding of Large Diameter Seven Wire Strands in Pretensioned Concrete Girders*. Research Report 1210-5F, Center for Transportation Research, University of Texas, Austin, Januar 1993.
- [145] **Russell B., Ned H. Burns 1996**. *Measured transfer Lengths of 0.5 and 0.6 in. Strands in Pretensioned Concrete* w PCI Journal September-October 1996, strony 44 - 65
- [146] **Seruga A. 1995**. *Analiza studialna naprężenia i odkształcenia w powłokach zbiorników cylindrycznych z betonu sprężonego*. Politechnika Krakowska, Seria Inżynieria Lądowa, Monografia 289
- [147] **Seruga A. 2008**. Zbiorniki z prefabrykowanymi elementami strunobetonowymi sprężone obwodowymi ciągnami bez przyczepności. INSTAL Nr 2, 2008, str. 41 - 46
- [148] **Seruga A., Ślaga Ł., 2012**. *Odchyłki od zaplanowanego położenia prefabrykatów powstające w czasie montażu i ich wpływ na przemieszczenia płyt w wyniku sprężenia ściany zbiornika w systemie C8*. Czasopismo Techniczne, Politechnika Krakowska, Budownictwo, Zeszyt 3-B/2012, str. 155 - 178
- [149] **Seruga A., Jaromska E. 2012**. *Długość transmisji siły sprężającej w płytowych elementach strunobetonowych*. Czasopismo Techniczne, Politechnika Krakowska, Budownictwo, Zeszyt 4-B (21) 2012
- [150] **Shahawy, M.A.; Issa, M.; Batchelor, B.**: *Strand Transfer Lengths in Full Scale AASHTO Prestressed Concrete Girders*. PCI Journal, Band 37, Heft 3, Mai / Juni 1992, S. 84-96.
- [151] **Shahawy, M.**: *A Critical Evaluation of the AASHTO Provisions for Strand Development Length of Prestressed Concrete Members*. PCI Journal, Band 46, Heft 4, 2001, S. 94 – 117.
- [152] **Shing, P.B.; Cooke, D.E.; Frangopol, D.M.; Leonard, M.A.; McMullen, M.L.; Hutter, W.**: *Strand Development and Transfer Length Tests on High Performance Concrete Box Girders*. PCI Journal, Band 45, Heft 5, September-Oktober 2000, S. 96-109.
- [153] **Steinberg, E.; Beier, J.T.; Sargand, S.**: *Effects of Sudden Prestress Force Transfer in Pretensioned Concrete Beams*. PCI Journal, Band 46, Heft 1, Januar- Februar 2001, S. 64-57.
- [154] **Stocker, M. F., Sozen, M. A.**: *Bond characteristics of prestressed strand, Investigations of prestressed reinforced concrete of Highway bridges*, University of Illinois, Structural Research, Series No. 344, 1969.
- [155] **Schießl, A.**: *Die Druckfestigkeit von Scheiben aus Hochleistungsbeton und selbstverdichtendem Beton unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der Rissneigung*. DAfStb, Heft 548, Beuth-Verlag, 2005.

- [156] **Tadros, M.K.; Baishya, M.C.:** *Discussion of „A Review of Strand Development Length for Prestensioned Concrete Members”*. PCI Journal, Band 41, Heft 2, 1996, S. 112-127.
- [157] **Tepfers R. 1973.** *A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices of deformed bars*. Report 73-2 str. 328, Chalmers University of Technology, Göteborg, 1973
- [158] **Trost, H., Cordes, H., Thormählen, U., Hagen, H.:** *Teilweise Vorspannung - Verbundfestigkeit von Spanngliedern und ihre Bedeutung für Rißbildung und Rißbreitenbeschränkung*, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 310, Ernst & Sohn, Berlin 1980
- [159] **Tue, N. V.:** *Zur Spannungsumlagerung im Spannbeton bei der Rißbildung unter statischer und wiederholter Belastung*, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 435, Ernst & Sohn, Berlin 1993
- [160] **Tue, N. V., Krumbach, R.:** *Verbundverhalten des neuen tiefgerippten Betonstahls in hochfestem Beton*, 35. Forschungskolloquium des DAfStb, Leipzig, März 1998, Seiten 239 - 246
- [161] **van der Veen C 1990.** *Cryogenic Bond Stress-Slip Relationship*. Delft University of Technology, Doctoral Thesis, Delft, Niederlande, 1990
- [162] **Weiß D., Holschemacher K. 2003.** *Some aspects about the bond of reinforcement in ultra high strength concrete*. Leipzig Annual Civil Engineering Report, No. 8.
- [163] **Wolska-Kotańska C. 1991.** *Pyły krzemionkowe – Wartościowy dodatek pucolanowy do betonu*. Materiały Budowlane, nr 2.
- [164] **Wölfel, E., Krüger, F.:** *Verbundverankerung von Spannstählen – Zulassungsprüfung und Anwendungsbedingungen*, Mitteilungen Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, Juni 1980. 198
- [165] **Würzner, K.:** *Über die Ursache der Haftung des Betons an Eisen in Eisenbetonkonstruktionen*, Zement, Heft 19, 1937
- [166] **Zia, P.; Mostafa, T. 1997.** *Development length of prestressing strands*. PCI Journal 22(5), 1997, pp. 54-65
- [167] **Zhiming T., Zhiman Y. 1992.** *Bond Behaviour of Deformed Bars in High Strength Concrete*. CEB/Riga Technical University: International Conference - Bond in Concrete - From Research to Practice, Preceding Topics 3 - 7, Riga 1992
- [168] **Zuo J., Darwin D. 1998.** *Bond Strength of High Relative Rib Area Reinforcing Bars*. SM Report No. 46, University of Kansas Center for Research, Lawrence.
- [169] **Zuo J., Darwin D. 2000.** *Splice Strength of Conventional and High Relative Rib Area Bars In Normal and High-Strength Concrete*. ACI Structural Journal, Vol. 97, No. S65

## SPIS RYSUNKÓW

- Rys. 3.1 Różne powierzchnie stalowych prętów według *Rehma* [134]
- Rys. 3.2 Przenoszenie sił w przypadku przyczepności tnącej [114]
- Rys. 3.3 Model zniszczenia wspornika betonowego wg *Rehma* (po lewej) i równowaga w pierścieniu wg *Tepfersa* (po prawej)
- Rys. 3.4 Model prętowy za zębem stalowego pręta zbrojeniowego (po lewej - *Fehling* [49]) i model kratownicowy (po prawej - *Kurz* [85])
- Rys. 3.5 Idealizacja zachowania zębrowanego pręta w bloku betonowym [7]
- Rys. 3.6 Udział poszczególnych rodzajów przyczepności (zależność ścinanie poślizg-przemieszczenie na podstawie badań pull-out) [158]
- Rys. 3.7 Udział poszczególnych rodzajów przyczepności (zależność ścinanie poślizg-przemieszczenie na podstawie badań pull-out) [136]
- Rys. 3.8 Mechanizm zniszczenia przyczepności stali zbrojeniowej
- Rys. 3.9 Zasady obliczania sprowadzonej powierzchni żeber [53]
- Rys. 3.10 Stosowane w badaniach nad przyczepnością przykładowe próbki i ich obciążenia [53]
- Rys. 3.11 Zależność przyczepności od położenia prętów i kierunku betonowania wg *Rehma* (1961) [134]
- Rys. 3.12 Powstawanie pustych przestrzeni i porów pod leżącymi prętami w wyniku sedymentacji i zbierania się wody wg *Rehma* (1961) [134]
- Rys. 3.13 Zależność naprężenie przyczepności - poślizg wg poszczególnych źródeł [85]
- Rys. 3.14 Sprowadzona powierzchnia żeber splotu [158]
- Rys. 3.15. Efekt Hoyera gładkiej stali sprężającej w wyniku wprowadzenia siły [142], po prawej zaznaczony pierścień rozciągany
- Rys. 3.16 Efekt Hoyera gładkiej stali sprężającej w wyniku wprowadzenia siły [27]
- Rys. 3.17 Oznaczenia i schemat splotu [86]
- Rys. 3.18 Oznaczenie sił działających na splot w czasie kotwienia (po lewej) [88] i rozkład siły podłużnej w splotcie (po prawej) [86]
- Rys. 3.19 Możliwe warianty zerwania przyczepności między betonem a stalą w splotcie w wyniku poślizgu. Grubą linią zaznaczono powierzchnie ścięcia [88].
- Rys. 3.20 Schematyczny widok próbek do badań pull-out zalecany przez RILEM [N11]
- Rys. 3.21 Przykładowe warianty próbek stosowane w badaniach przyczepności betonu do prętów
- Rys. 3.22 Układ splotów w badaniu pull-out wg procedury *Moustafa*
- Rys. 3.23 Próbką do badań wg metody NASP [108]
- Rys. 3.24 Warianty badań przyczepności na belkach
- Rys. 3.25 Schemat badań push-in (*Keuning* i inni) [77]
- Rys. 3.26 Ogólny widok ramy badawczej [31].
- Rys. 3.27 Układ sił działających na blok betonowy [31]
- Rys. 3.28 Rozkład naprężeń w splotcie na długości bloku betonowego [31]
- Rys. 3.29 Schemat badań pull-out bez skrępowania skręcenia (na górze) i ze skrępowaniem skręcenia (na dole) [114]
- Rys. 3.30 Schemat badań bez skrępowania skręcenia próbek (po lewej) i ze skrępowaniem obrotu (po prawej) [27]
- Rys. 3.31 Próbki użyte do badań przez *A. Nitscha* (po lewej) oraz przekroje poprzeczne próbek z różnym przyjęciem otuliny betonowej (po prawej)
- Rys. 3.32 Wydłużenia poprzeczne podczas badań pull-out wg [24]

- Rys. 04.1 Wyidealizowana zależność pomiędzy odkształceniem betonu i długością próbki (po lewej) i typowy wykres uzyskany doświadczalnie [108] (po prawej)
- Rys. 4.2 Metoda pomiarów odkształceń na zewnętrznych powierzchniach elementu.
- Rys. 4.3 Wyidealizowana zmiana naprężeń w splocie na długości strunobetonowej belki po zwolnieniu naciągu (po lewej) i po przyłożeniu obciążenia zewnętrznego (po prawej) [2].
- Rys. 4.4 Techniki badania symulacji zachowania się przyczepności na długości transmisji [2].
- Rys. 4.5 Technika badania symulacji zachowania się przyczepności na długości przyczepności przy zginaniu [2].
- Rys. 4.6 Porównanie zależności naprężenie przyczepności – poślizg na długości transmisji dla splotów o średnicy 9,5; 13 i 16 mm [33] (po lewej), porównanie zależności naprężenie przyczepności – poślizg na długości przyczepności przy zginaniu dla splotów o średnicy 9,5; 13 i 16 mm (po prawej) [2].
- Rys. 4.7 Schemat badań ECADA [103]
- Rys. 4.8 Cykl obliczeniowy wg Bruggelina (po lewej) i zależność między przeniesionym sprężeniem i poślizgiem czoła (po prawej) [19].
- Rys. 4.9 Stanowisko badań opracowane przez *Nitscha* [114]
- Rys. 4.10 Analiza banku danych
- Rys. 4.11 Wykres odkształcenia i długość transmisji dla próbki z pełną przyczepnością (po lewej) i o niepełnej przyczepności (metoda 95% średniego maksymalnego odkształcenia) [148]
- Rys. 4.12 Wykres zależności powierzchniowego odkształcenia początkowego i długotrwałego w zależności od końca belki [11]
- 
- Rys. 5.1 Wykresy rozkładu wytrzymałości betonu na ściskanie określonego na walcach i kostkach w zależności od wieku betonu dla BWW i betonu zastosowanego w płycie C8
- Rys. 5.2 Wykresy rozkładu wytrzymałości betonu na osiowe rozciąganie i przez rozłupywanie w zależności od wieku betonu dla BWW i betonu zastosowanego w płycie C8
- Rys. 5.3 Charakterystyki splotu 7 $\phi$ 4mm : a), b) - przekrój splotu, średnice pojedynczych drutów i całego splotu c) - powierzchnia ścinanego betonu, d) - obwód splotu
- Rys. 5.4 Badanie splotów w maszynie Zwick-Roell Z1200
- Rys. 5.5 Sploty przed włożeniem do maszyny wytrzymałościowej i po badaniach
- Rys. 5.6 Wykres zależności siły wyciągającej od wydłużenia dla splotów 7 $\phi$ 4 mm (wyniki statycznej próby rozciągania)
- Rys. 5.7 Charakterystyki splotu 7 $\phi$ 5 mm okrągłego: a), b) - przekrój splotu, średnice pojedynczych drutów i całego splotu c) - powierzchnia ścinanego betonu, d) - obwód splotu
- Rys. 5.8 Wykres zależności siły wyciągającej od wydłużenia dla splotów 7 $\phi$ 5 mm (wyniki statycznej próby rozciągania)
- Rys. 5.9 Charakterystyki splotu 7 $\phi$ 5mm zamkniętego: a), b) - przekrój splotu, średnice pojedynczych drutów i całego splotu c) - powierzchnia ścinanego betonu, d) - obwód splotu
- 
- Rys. 6.1 Widok zbiornika w systemie C14 w trakcie realizacji. Na pierwszym planie widoczny pilaster, w tyle standardowe płyty montowane po obwodzie koła.
- Rys. 6.2 Widok zbiornika w systemie C14 przed sprężeniem
- Rys. 6.3 Widok zbiornika w systemie C8 w trakcie realizacji
- Rys. 6.4 Widok prefabrykowanych płyt strunobetonowych w systemie C8 z rozmieszczeniem splotów
- Rys. 6.5 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z pięcioma splotami



- Rys. 6.6 Mapa naprężeń w kierunku poprzecznym tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z pięcioma splotami
- Rys. 6.7 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z czterema splotami
- Rys. 6.8 Mapa naprężeń w kierunku poprzecznym tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z czterema splotami
- Rys. 6.9 Rozkłady naprężeń ściskających w "piku" w zależności od rozstawu dwóch splotów 7φ5 mm dla poszczególnych szerokości elementów
- Rys. 6.10 Rozkłady naprężeń rozciągających na czole tarczy w zależności od rozstawu dwóch splotów 7φ5 mm dla poszczególnych szerokości elementów
- Rys. 6.11 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,6 m z otworem
- Rys. 6.12 Mapa naprężeń w kierunku poprzecznym tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,6 m z otworem
- Rys. 6.13 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym tarczy o wymiarach 1,2 x 0,1 x 4,0 m z trzema splotami w rozstawie 0,5 m.
- Rys. 6.14 Mapa naprężeń w kierunku poprzecznym tarczy o wymiarach 1,2 x 0,1 x 4,0 m z trzema splotami w rozstawie 0,5 m.
- Rys. 6.15 Rozkłady odkształceń betonu ( $\mu\epsilon$ ) w kierunku podłużnym w funkcji odległości od czoła tarczy dla poszczególnych długości transmisji siły naciągowej, w osi splotu
- Rys. 6.16 Rozkłady odkształceń betonu ( $\mu\epsilon$ ) w kierunku podłużnym w funkcji odległości od czoła tarczy dla poszczególnych długości transmisji siły naciągowej, w "niecce" (brak splotu)
- Rys. 6.17 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym tarczy o wymiarach 1,0 x 0,10 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,67 m
- Rys. 6.18 Mapa naprężeń w kierunku poprzecznym tarczy o wymiarach 1,0 x 0,10 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,67 m
- 
- Rys. 7.1 Przekrój przez próbkę z zaznaczeniem długości efektywnej
- Rys. 7.2 Przygotowane próbki z nawiniętym sznurkiem konopnym
- Rys. 7.3 Schemat próbek w fazie wstępnej
- Rys. 7.4 Próbki przygotowane do betonowania w fazie I
- Rys. 7.5 Próbki z umocowaniem motylkowym
- Rys. 7.6 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7φ5 mm zamkniętych o długości czynnej 40 mm dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni
- Rys. 7.7 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7φ5 mm zamkniętych o długości czynnej 80 mm dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni
- Rys. 7.8 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7φ5 mm zamkniętych o długości czynnej 120 mm dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni
- Rys. 7.9 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7φ5 mm zamkniętych o długości czynnej 40, 80, 120 i 240 mm dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni
- Rys. 7.10 Przygotowane sploty do badań zasadniczych
- Rys. 7.11 Przygotowane próbki do badań zasadniczych
- Rys. 7.12 Widok mieszalnika (po lewej) i mieszanka betonowa w trakcie wytwarzania (po prawej).
- Rys. 7.13 Mieszanka betonowa bezpośrednio przed betonowaniem (po lewej) i układanie betonu w próbkach (po prawej)
- Rys. 7.14 Próbki po betonowaniu w fazie zasadniczej

- Rys. 7.15 Próbki przygotowane do badań
- Rys. 7.16 Widok próbki o czynnej długości przyczepności 460 mm na stanowisku badawczym
- Rys. 7.17 Widok obu części betonowej próbki po rozłupaniu
- Rys. 7.18 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7 $\phi$ 4 mm okrągłych, o długości czynnej 40 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni
- Rys. 7.19 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7 $\phi$ 4 mm okrągłych, o długości czynnej 80 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni
- Rys. 7.20 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7 $\phi$ 4 mm okrągłych, o długości czynnej 120 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni
- Rys. 7.21 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7 $\phi$ 4 mm okrągłych, o długości czynnej 240 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni
- Rys. 7.22 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7 $\phi$ 4 mm okrągłych, o długości czynnej 330 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni
- Rys. 7.23 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7 $\phi$ 4 mm okrągłych, o długości czynnej 460 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni
- Rys. 7.24 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7 $\phi$ 5 mm okrągłych, o długości czynnej 40 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni
- Rys. 7.25 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7 $\phi$ 5 mm okrągłych o długości czynnej 80 mm dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni
- Rys. 7.26 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7 $\phi$ 5 mm okrągłych o długości czynnej 120 mm dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni
- Rys. 7.27 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7 $\phi$ 5 mm okrągłych o długości czynnej 240 mm dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni
- Rys. 7.28 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7 $\phi$ 5 mm okrągłych o długości czynnej 330 mm dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni
- Rys. 7.29 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7 $\phi$ 5 mm okrągłych o długości czynnej 460 mm dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni
- Rys. 7.30 Formy wykorzystane podczas wytwarzania próbek z widocznym splotem zaopatrzoną w tulejkę plastikową
- Rys. 7.31 Projekt stanowiska ze szczegółami A i B - rysunek poprawić L = 7, m
- Rys. 7.32 Przygotowane formy do betonowania w fazie I
- Rys. 7.33 Przygotowane formy do betonowania w fazie II
- Rys. 7.34 Tor naciągowy po betonowaniu (na pierwszym planie i w głębi widać próbki przygotowane do badań)
- Rys. 7.35 Próbki po betonowaniu następnego dnia, przed zwolnieniem naciągu
- Rys. 7.37 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7 $\phi$ 5 mm okrągłych, o długości czynnej 120 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni pod naciągiem
- Rys. 7.38 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7 $\phi$ 5 mm okrągłych, o długości czynnej 240 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni pod naciągiem
- Rys. 7.39 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7 $\phi$ 5 mm okrągłych, o długości czynnej 330 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni pod naciągiem
- Rys. 7.40 Zależność siły wyciągającej od poślizgu dla splotów 7 $\phi$ 5 mm okrągłych, o długości czynnej 460 mm, dla wieku betonu 1 dzień, 3, 7 i 28 dni pod naciągiem
- Rys. 8.1 Przekrój splotu otwartego i zamkniętego

- Rys. 8.2 Rozkłady średnich wartości naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm zamkniętych bez naciągu w funkcji czasu
- Rys. 8.3 Rozkłady średnich wartości naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm zamkniętych bez naciągu w funkcji efektywnej długości przyczepności
- Rys. 8.4 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot 7φ4 mm od wieku betonu dla poszczególnych poziomów, przy różnych czynnych długościach przyczepności
- Rys. 8.5 Wykresy zależności naprężeń przyczepności BWW do splotu 7φ4 mm w funkcji wieku betonu dla poszczególnych poziomów poślizgu przy różnych czynnych długościach przyczepności
- Rys. 8.6 Wykresy zależności średnich naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm w funkcji wieku betonu dla poszczególnych poziomów poślizgu przy różnych czynnych długościach
- Rys. 8.7 Wykresy zależności średnich sił wyciągających sploty 7φ4 mm od czynnej długości przyczepności i wieku betonu
- Rys. 8.8 Wykresy zależności naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm od efektywnej długości przyczepności dla poszczególnych dni pomiarowych
- Rys. 8.9 Wykresy zależności średnich naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm od efektywnej długości przyczepności dla poszczególnych dni pomiarowych
- Rys. 8.10 Wykresy zależności średnich sił wyciągających 7φ5 mm bez naciągu od wieku betonu dla poszczególnych poziomów, przy różnych czynnych długościach przyczepności
- Rys. 8.11 Wykres zależności naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm bez naciągu w funkcji wieku betonu dla poszczególnych poziomów poślizgu przy różnych efektywnych długościach przyczepności
- Rys. 8.12 Wykresy zależności średnich naprężeń przyczepności BWW do splotów 7 φ5 mm bez naciągu w funkcji wieku betonu dla poszczególnych poziomów poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności
- Rys. 8.13 Wykresy zależności średnich sił wyciągających sploty 7φ5 mm bez naciągu od czynnej długości przyczepności i wieku betonu
- Rys. 8.14 Wykresy zależności naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm bez naciągu od efektywnej długości przyczepności dla poszczególnych dni pomiarowych
- Rys. 8.15 Wykresy zależności średnich naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm bez naciągu od efektywnej długości przyczepności i wieku betonu
- Rys. 8.16 Wykresy zależności średnich sił wyciągających sploty 7φ5 mm z naciągiem od wieku betonu dla poszczególnych poziomów poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności
- Rys. 8.17 Wykresy zależności naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm z naciągiem od wieku betonu dla poszczególnych poziomów poślizgu przy różnych czynnych efektywnych długościach przyczepności
- Rys. 8.18 Wykresy zależności średnich naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm z naciągiem w funkcji wieku betonu dla poszczególnych poziomów poślizgów przy różnych efektywnych długości przyczepności
- Rys. 8.19 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot 7φ5 mm z naciągiem od efektywnej długości przyczepności i wieku betonu
- Rys. 8.20 Zależność naprężenia przyczepności w funkcji długości efektywnej przyczepności w poszczególnych dniach (1, 3, 7 i 28) dla splotów 7φ5 mm z naciągiem
- Rys. 8.21 Średnie naprężenia przyczepności w funkcji długości efektywnej przyczepności w poszczególnych dniach (1, 3, 7 i 28) i średnia ze wszystkich dni dla splotów 7φ5 mm z naciągiem

- Rys. 8.22 Rozkłady średnich względnych przyrostów naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm na poszczególnych poziomach poślizgu w zależności od wieku betonu
- Rys. 8.23 Rozkłady średnich względnych przyrostów naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm bez naciągu na poszczególnych poziomach poślizgu w zależności od wieku betonu
- Rys. 8.24 Rozkłady średnich względnych przyrostów naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm z naciągiem na poszczególnych poziomach poślizgu w zależności od wieku betonu
- Rys. 8.25 Rozkłady względnych przyrostów naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm na tle względnych przyrostów właściwości mechanicznych betonu w funkcji wieku betonu
- Rys. 8.26 Rozkłady względnych przyrostów naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm bez naciągu na tle względnych przyrostów właściwości mechanicznych betonu w funkcji wieku betonu
- Rys. 8.27 Rozkłady względnych przyrostów naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm z naciągiem na tle względnych przyrostów właściwości mechanicznych betonu w funkcji wieku betonu
- Rys. 8.28 Rozkłady względnych średnich przyrostów naprężenia przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm, 7φ5 mm bez naciągu oraz 7φ5 mm z naciągiem w zależności od wieku betonu
- Rys. 8.29 Rozkłady średnich wartości naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm i 7φ5 mm okrągłych bez naciągu w funkcji czasu dla poszczególnych poziomów poślizgów
- Rys. 8.30 Rozkłady średnich wartości naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm i 7φ5 mm okrągłych bez naciągu w funkcji efektywnej długości przyczepności
- Rys. 8.30 Rozkłady średnich wartości naprężenia przyczepności BWW do splotów 7 φ5 mm bez naciągu i z naciągiem w funkcji wieku betonu
- Rys. 8.31 Rozkłady średnich wartości naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm bez naciągu i z naciągiem w funkcji efektywnej długości przyczepności.
- Rys. 8.32 Rozkłady przyrostów średnich wartości sił wyciągających sploty 7φ5 mm z naciągiem i bez naciągu w zależności od wieku betonu
- Rys. 8.33 Rozkłady średnich przyrostów sił wyciągających sploty 7φ5 mm bez naciągu i z naciągiem w funkcji czasu wyrażony w procentach z poszczególnych efektywnych długościach przyczepności dla różnych poziomów poślizgu
- Rys. 8.34 Wykres zależności różnic sił wyciągających między splotami 7φ5 mm bez naciągu i z naciągiem w funkcji czasu wyrażony w procentach dla poszczególnych poziomów poślizgu w poszczególnych efektywnych długościach przyczepności
- Rys. 8.35 Zestawienie średnich zależności różnic sił wyciągających między splotami 7φ5 mm bez naciągu i z naciągiem w funkcji czasu wyrażony w procentach z poszczególnych poziomów poślizgu w różnych efektywnych długościach przyczepności
- Rys. 9.1 Ogólny widok toru naciągowego przed ułożeniem betonu (agregaty naciągowe u góry rysunku)
- Rys. 9.2 Przekrój poprzeczny prefabrykowanego elementu
- Rys. 9.3 Ogólny widok prefabrykowanej płyty i rozmieszczenie punktów pomiarowych
- Rys. 9.4 Widok zakotwienia biernego przed zwolnieniem siły naciągowej
- Rys. 9.5 Ogólny widok prefabrykowanej płyty i rozmieszczenie punktów pomiarowych
- Rys. 9.6 Wygładzone rozkłady odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu określone wzdłuż linii pomiarowej 1.
- Rys. 9.7 Wygładzone rozkłady odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu określone wzdłuż linii pomiarowej 2.
- Rys. 9.8 Wygładzone rozkłady odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu określone wzdłuż linii pomiarowej 3.

- Rys. 9.9 Wygładzone rozkłady odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu określone wzdłuż linii pomiarowej 4.
- Rys. 9.10 Wygładzone rozkłady odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu określone wzdłuż linii pomiarowej 5.
- Rys. 9.11 Rozkład średnich odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu otrzymanych w linii splotów (linia 1, 2, 4 i 5) w porównaniu z odkształceniami ( $\mu\epsilon$ ) betonu określonymi wzdłuż podłużnej osi płyty (linia 3)
- Rys. 9.12 Zestawienie rozkładów odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu otrzymane z badań doświadczalnych pięciu linii pomiarowych
- Rys. 9.13 Rozkład średnich wartości odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu z pięciu linii pomiarowych
- Rys. 9.14 Rozkłady współczynnika zmienności do wartości średnich odkształceń betonu z czterech i pięciu linii pomiarowych.
- Rys. 9.15 Podział przekroju płyty na pięć części
- Rys. 9.16 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym płyty dla długości transmisji 700 mm (strona pras naciągowych)
- Rys. 9.17 Mapa naprężeń w kierunku poprzecznym płyty dla długości transmisji 700 mm (strona pras naciągowych)
- Rys. 9.18 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym płyty dla długości transmisji 950 mm (strona zwalniania naciągu)
- Rys. 9.19 Mapa naprężeń w kierunku poprzecznym płyty dla długości transmisji 950 mm (strona zwalniania naciągu)
- Rys. 9.20 Rozkłady odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) w betonie wzdłuż pięciu linii pomiarowych dla długości transmisji 700 mm (MES)
- Rys. 9.21 Rozkłady odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) w betonie wzdłuż pięciu linii pomiarowych dla długości transmisji 950 mm (MES)
- Rys. 9.22 Rozkłady odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) poprzecznych dla długości transmisji 700 mm (strona pras naciągowych) (MES)
- Rys. 9.23 Rozkłady odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) poprzecznych dla długości transmisji 950 mm (strona zwalniania naciągu) (MES)
- Rys. 9.24 Porównanie rzeczywistych odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) z numerycznymi (linia 1)
- Rys. 9.25 Porównanie rzeczywistych odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) z numerycznymi (linia 2)
- Rys. 9.26 Porównanie rzeczywistych odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) z numerycznymi (linia 3)
- Rys. 9.27 Porównanie rzeczywistych odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) z numerycznymi (linia 4)
- Rys. 9.28 Porównanie rzeczywistych odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) z numerycznymi (linia 5)
- Rys. 9.29 Porównanie średnich wartości odkształceń doświadczalnych i obliczeniowych (MES) z czterech linii splotów
- Rys. 9.30 Porównanie średnich wartości odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) doświadczalnych i obliczeniowych (MES) z pięciu linii pomiarowych
- Rys. 9.31 Schemat stanowiska badawczego
- Rys. 9.32 Widok stalowych form usytuowanych na płytach OSB
- Rys. 9.33 Szczegół połączenia naroża (po lewej) i widok stalowej formy z przeciągniętymi splotami (po prawej)
- Rys. 9.34 Poszczególne etapy realizacji sprężenia
- Rys. 9.35 Przygotowana forma z ceownikami z naciągniętymi splotami sprężającymi
- Rys. 9.36 Płyta po zabetonowaniu i podczas pielęgnacji
- Rys. 9.37 Rozmieszenie punktów pomiarowych
- Rys. 9.38 Zwolnienie naciągu siły sprężającej

- Rys. 9.39 Tarcza z zaznaczoną podłużną osią i osiami splotów oraz punktami pomiarowymi temperatury
- Rys. 9.40 Wykres zależności podłużnego odkształcenia betonu na zewnętrznej powierzchni elementu w funkcji odległości od czoła tarczy w osi 1 dla kolejnych dni pomiarowych
- Rys. 9.41 Wykres zależności podłużnego odkształcenia betonu na zewnętrznej powierzchni elementu w funkcji odległości od czoła tarczy w osi 2 dla kolejnych dni pomiarowych
- Rys. 9.42 Wykres zależności podłużnego odkształcenia betonu na zewnętrznej powierzchni elementu w funkcji odległości od czoła tarczy w osi dla kolejnych dni pomiarowych
- Rys. 9.43 Zależność odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotu 1 i 2 w funkcji odległości od czoła tarczy bezpośrednio po zwolnieniu naciągu (1d)
- Rys. 9.44 Zależność odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotu 1 i 2 w funkcji odległości od czoła tarczy w chwili 2d
- Rys. 9.45 Zależność odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotu 1 i 2 w funkcji odległości od czoła tarczy w chwili 3d
- Rys. 9.46 Zależność odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotu 1 i 2 w funkcji odległości od czoła tarczy w chwili 7d
- Rys. 9.47 Zależność odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotu 1 i 2 w funkcji odległości od czoła tarczy w chwili 14d
- Rys. 9.48 Zależność odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotu 1 i 2 w funkcji odległości od czoła tarczy w chwili 21d
- Rys. 9.49 Zależność odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotu 1 i 2 w funkcji odległości od czoła tarczy w chwili 28d
- Rys. 9.50 Zależność odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotu 1 i 2 w funkcji odległości od czoła tarczy w chwili 56d
- Rys. 9.51 Odkształcenie ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotów 1 i 2 oraz w osi tarczy (po lewej) oraz uśredniona wartość z obu splotów i w osi tarczy wraz z 95% prostą (po prawej) bezpośrednio po zwolnieniu naciągu (1d)
- Rys. 9.52 Odkształcenie ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotów 1 i 2 oraz w osi tarczy (po lewej) oraz uśredniona wartość z obu splotów i w osi tarczy wraz z 95% prostą (po prawej) po 2 dniach
- Rys. 9.53 Odkształcenie ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotów 1 i 2 oraz w osi tarczy (po lewej) oraz uśredniona wartość z obu splotów i w osi tarczy wraz z 95% prostą (po prawej) po 3 dniach
- Rys. 9.54 Odkształcenie ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotów 1 i 2 oraz w osi tarczy (po lewej) oraz uśredniona wartość z obu splotów i w osi tarczy wraz z 95% prostą (po prawej) po 7 dniach
- Rys. 9.55 Odkształcenie ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotów 1 i 2 oraz w osi tarczy (po lewej) oraz uśredniona wartość z obu splotów i w osi tarczy wraz z 95% prostą (po prawej) po 14 dniach
- Rys. 9.56 Odkształcenie ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotów 1 i 2 oraz w osi tarczy (po lewej) oraz uśredniona wartość z obu splotów i w osi tarczy wraz z 95% prostą (po prawej) po 21 dniach
- Rys. 9.57 Odkształcenie ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotów 1 i 2 oraz w osi tarczy (po lewej) oraz uśredniona wartość z obu splotów i w osi tarczy wraz z 95% prostą (po prawej) po 28 dniach
- Rys. 9.58 Odkształcenie ( $\mu\epsilon$ ) betonu wzdłuż splotów 1 i 2 oraz w osi tarczy (po lewej) oraz uśredniona wartość z obu splotów i w osi tarczy wraz z 95% prostą (po prawej) po 56 dniach
- Rys. 9.59 Usytuowanie poprzecznych linii pomiarowych (na niebiesko zaznaczono linie MES)
- Rys. 9.60 Wykresy rozkładu poprzecznych odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) tarczy w kolejnych dniach pomiarowych
- Rys. 9.61 Rozkład odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) poprzecznych analizy MES w liniach 1, 2 i 3 elementu numerycznego

- Rys. 9.62 Rozkład doświadczalnych odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) poprzecznych po obydwóch stronach tarczy w liniach 1, 3 i 5 w chwili zwolnienia naciągu
- Rys. 9.63 Rozkład odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) poprzecznych doświadczalnych i numerycznych dla linii pomiarowej 1
- Rys. 9.64 Rozkład odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) poprzecznych doświadczalnych i numerycznych dla linii pomiarowej 3 (odpowiada 2 nitce w MES)
- Rys. 9.65 Rozkład odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) poprzecznych doświadczalnych i numerycznych dla linii pomiarowej 5 (odpowiada 3 nitce w MES)
- Rys. 9.66 Pomierzone i obliczone (MES) odkształcenia betonu w chwili zwolnienia naciągu
- Rys. 9.67 Zestawienie doświadczalnych i obliczeniowych rozkładów odkształceń ( $\mu\epsilon$ ) betonu w funkcji czasu

### Załącznik A

- Rys. A.1 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,6 m
- Rys. A.2 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,4 m
- Rys. A.3 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,2 m
- Rys. A.4 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,0 m
- Rys. A.5 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,8 m
- Rys. A.6 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,6 m
- Rys. A.7 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,6 m
- Rys. A.8 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,4 m
- Rys. A.9 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,2 m
- Rys. A.10 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,0 m
- Rys. A.11 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,8 m
- Rys. A.12 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,6 m
- Rys. A.13 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,6 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,4 m
- Rys. A.14 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,6 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,2 m
- Rys. A.15 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,6 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,0 m



- Rys. A.16 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,6 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,8 m
- Rys. A.17 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,6 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,6 m
- Rys. A.18 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,4 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,2 m
- Rys. A.19 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,4 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,0 m
- Rys. A.20 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,4 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,8 m
- Rys. A.21 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,4 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,6 m
- Rys. A.22 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,2 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 1,0 m
- Rys. A.23 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,2 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,8 m
- Rys. A.24 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i w kierunku poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,2 x 0,1 x 4,0 m z dwoma splotami w rozstawie 0,6 m

#### **Załącznik B**

- Rys. B.1 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,6 m
- Rys. B.2 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,4 m
- Rys. B.3 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 2,0 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,2 m
- Rys. B.4 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,6 m
- Rys. B.5 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,4 m ,
- Rys. B.6 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,2 m
- Rys. B.7 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,8 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,0 m
- Rys. B.8 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,6 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,4 m
- Rys. B.9 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,6 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,2 m
- Rys. B.10 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,6 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,0 m
- Rys. B.11 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,4 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,2 m
- Rys. B.12 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,4 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,0 m

Rys. B.13 Mapa naprężeń w kierunku podłużnym (po lewej) i poprzecznym (po prawej) tarczy o wymiarach 1,2 x 0,1 x 4,0 m z otworem z dwoma splotami w rozstawie 1,0 m

### Załącznik C

Rys. C.1 Mapa naprężeń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) dla  $b = 1,60$  m przy dwóch splotach w rozstawie  $a = 1,32$  m

Rys. C.2 Przebieg odkształceń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) w funkcji odległości od czoła tarczy dla  $b = 1,60$  m przy dwóch splotach w rozstawie  $a = 1,32$  m

Rys. C.3 Mapa naprężeń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) dla  $b = 1,60$  m przy dwóch splotach w rozstawie  $a = 1,0$  m

Rys. C.4 Przebieg odkształceń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) w funkcji odległości od czoła tarczy dla  $b = 1,60$  m przy dwóch splotach w rozstawie  $a = 1,0$  m

Rys. C.5 Mapa naprężeń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) dla  $b = 1,60$  m przy dwóch splotach w rozstawie  $a = 0,66$  m

Rys. C.6 Przebieg odkształceń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) w funkcji odległości od czoła tarczy dla  $b = 1,60$  m przy dwóch splotach w rozstawie  $a = 0,66$  m

Rys. C.7 Mapa naprężeń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) dla  $b = 1,60$  m przy trzech splotach w rozstawie  $a = 0,66$  m

Rys. C.8 Przebieg odkształceń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) w funkcji odległości od czoła tarczy dla  $b = 1,60$  m przy trzech splotach w rozstawie  $a = 0,66$  m

Rys. C.9 Mapa naprężeń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) dla  $b = 1,60$  m przy pięciu splotach w rozstawie  $a = 0,33$  m

Rys. C.10 Przebieg odkształceń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) w funkcji odległości od czoła tarczy dla  $b = 1,60$  m przy pięciu splotach w rozstawie  $a = 0,33$  m

Rys. C.11 Mapa naprężeń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) dla  $b = 1,0$  m przy dwóch splotach w rozstawie  $a = 0,8$  m

Rys. C.12 Przebieg odkształceń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) w funkcji odległości od czoła tarczy dla  $b = 1,0$  m przy dwóch splotach w rozstawie  $a = 0,8$  m

Rys. C.13 Mapa naprężeń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) dla  $b = 1,0$  m przy trzech splotach w rozstawie  $a = 0,4$  m

Rys. C.14 Przebieg odkształceń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) w funkcji odległości od czoła tarczy dla  $b = 1,0$  m przy trzech splotach w rozstawie  $a = 0,4$  m

Rys. C.15 Mapa naprężeń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) dla  $b = 1,0$  m przy czterech splotach w rozstawie  $a = 0,30$  i  $0,20$  m

Rys. C.16 Przebieg odkształceń podłużnych (po lewej) i poprzecznych (po prawej) w funkcji odległości od czoła tarczy dla  $b = 1,0$  m przy czterech splotach w rozstawie  $a = 0,30$  i  $0,20$  m

### Załącznik D

Rys. D.1 Rozkład naprężeń podłużnych (na górze) i poprzecznych (na dole) tarczy o wymiarach 1,0 x 0,1 x 4,0 m (do środka symetrii) przy rozstawie splotów 0,1 m, sile sprężającej  $P = 200$  kN i długości transmisji 0,4 m

Rys. D.2 Rozkład naprężeń podłużnych (na górze) i poprzecznych (na dole) tarczy o wymiarach 1,0 x 0,1 x 4,0 m (do środka symetrii) przy rozstawie splotów 0,15 m ( $n = 7$ ), sile sprężającej  $P = 200$  kN i długości transmisji 0,4 m

- Rys. D.3 Rozkład naprężeń podłużnych (na górze) i poprzecznych (na dole) tarczy o wymiarach 1,0 x 0,1 x 4,0 m (do środka symetrii) przy rozstawie splotów 0,15 m ( $n = 6$ ), sile sprężającej  $P = 200$  kN i długości transmisji 0,4 m
- Rys. D.4 Rozkład naprężeń podłużnych (na górze) i poprzecznych (na dole) tarczy o wymiarach 1,0 x 0,1 x 4,0 m (do środka symetrii) przy rozstawie splotów 0,2 m ( $n = 5$ ), sile sprężającej  $P = 200$  kN i długości transmisji 0,4 m
- Rys. D.5 Rozkład naprężeń podłużnych (na górze) i poprzecznych (na dole) tarczy o wymiarach 1,0 x 0,1 x 4,0 m (do środka symetrii) przy rozstawie splotów 0,3 m ( $n = 4$ ), sile sprężającej  $P = 200$  kN i długości transmisji 0,4 m
- Rys. D.6 Rozkład naprężeń podłużnych (na górze) i poprzecznych (na dole) tarczy o wymiarach 1,0 x 0,1 x 4,0 m (do środka symetrii) przy rozstawie splotów 0,4 m ( $n = 3$ ), sile sprężającej  $P = 200$  kN i długości transmisji 0,4 m
- Rys. D.7 Rozkład naprężeń podłużnych (na górze) i poprzecznych (na dole) tarczy o wymiarach 1,0 x 0,1 x 4,0 m (do środka symetrii) przy rozstawie splotów 0,5 m ( $n = 2$ ), sile sprężającej  $P = 200$  kN i długości transmisji 0,4 m
- Rys. D.8 Rozkład naprężeń podłużnych (na górze) i poprzecznych (na dole) tarczy o wymiarach 1,0 x 0,1 x 4,0 m (do środka symetrii) przy rozstawie splotów 0,6 m ( $n = 2$ ), sile sprężającej  $P = 200$  kN i długości transmisji 0,4 m
- Rys. D.9 Rozkład naprężeń podłużnych (na górze) i poprzecznych (na dole) tarczy o wymiarach 1,0 x 0,1 x 4,0 m (do środka symetrii) przy rozstawie splotów 0,7 m ( $n = 2$ ), sile sprężającej  $P = 200$  kN i długości transmisji 0,4 m
- Rys. D.10 Rozkład naprężeń podłużnych (na górze) i poprzecznych (na dole) tarczy o wymiarach 1,0 x 0,1 x 4,0 m (do środka symetrii) przy rozstawie splotów 0,8 m ( $n = 2$ ), sile sprężającej  $P = 200$  kN i długości transmisji 0,4 m

### Załącznik E

- Rys. E.1 Wykresy zależności siły wyciągającej splot 7 $\phi$ 4 mm od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności
- Rys. E.2 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot 7 $\phi$ 4 mm od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności
- Rys. E.3 Wykresy zależności siły wyciągającej splot 7 $\phi$ 4 mm od czynnej długości przyczepności po 1, 3, 7 i 28 dniach dla poszczególnych długości poślizgu
- Rys. E.4 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot 7 $\phi$ 4 mm od czynnej długości przyczepności po 1, 3, 7 i 28 dniach dla poszczególnych długości poślizgu
- Rys. E.5 Wykresy zależności siły wyciągającej splot 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności
- Rys. E.6 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności
- Rys. E.7 Wykresy zależności siły wyciągającej splot 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu od czynnej długości przyczepności po 1, 3, 7 i 28 dniach dla poszczególnych długości poślizgu
- Rys. E.8 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot 7 $\phi$ 5 mm bez naciągu od czynnej długości przyczepności po 1, 3, 7 i 28 dniach dla poszczególnych długości poślizgu
- Rys. E.9 Wykresy zależności siły wyciągającej splot 7 $\phi$ 5 mm pod naciągiem od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności

- Rys. E.10 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot  $7\phi 5$  mm pod naciągiem od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności
- Rys. E.11 Wykresy zależności siły wyciągającej splot  $7\phi 5$  mm z naciągiem od czynnej długości przyczepności po 1, 3, 7 i 28 dniach dla poszczególnych długości poślizgu
- Rys. E.12 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot  $7\phi 5$  mm z naciągiem od czynnej długości przyczepności po 1, 3, 7 i 28 dniach dla poszczególnych długości poślizgu
- Rys. E.13 Wykresy zależności siły wyciągającej splot  $7\phi 4$  mm i  $7\phi 5$  mm bez naciągu od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności
- Rys. E.14 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot  $7\phi 4$  mm i  $7\phi 5$  mm bez naciągu od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności
- Rys. E.15 Wykresy zależności siły wyciągającej od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów dla splotów  $7\phi 4$  mm i  $7\phi 5$  mm okrągłych
- Rys. E.16 Wykresy zależności siły wyciągającej splot  $7\phi 4$  mm i  $7\phi 5$  mm bez naciągu od czynnej długości przyczepności po 1, 3, 7 i 28 dniach dla poszczególnych długości poślizgu
- Rys. E.17 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot  $7\phi 4$  mm i  $7\phi 5$  mm bez naciągu od czynnej długości przyczepności po 1, 3, 7 i 28 dniach dla poszczególnych długości poślizgu
- Rys. E.18 Wykresy zależności siły wyciągającej od długości czynnej przyczepności dla 1, 3, 7 i 28 dnia dla splotów  $7\phi 4$  mm i  $7\phi 5$  mm okrągłych
- Rys. E.19 Wykresy zależności siły wyciągającej splot  $7\phi 5$  mm bez naciągu i  $7\phi 5$  mm z naciągiem od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności
- Rys. E.20 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot  $7\phi 5$  mm bez naciągu i  $7\phi 5$  mm z naciągiem od wieku betonu dla poszczególnych poślizgów przy różnych czynnych długościach przyczepności
- Rys. E.21 Porównanie zależności siły wyciągającej w funkcji czasu na poziomie poszczególnych poślizgów dla splotów  $7\phi 5$  mm bez naciągu i z naciągiem
- Rys. E.22 Wykresy zależności siły wyciągającej splot  $7\phi 5$  mm bez naciągu i  $7\phi 5$  mm z naciągiem od czynnej długości przyczepności po 1, 3, 7 i 28 dniach dla poszczególnych długości poślizgu
- Rys. E.23 Wykresy zależności średnich sił wyciągających splot  $7\phi 5$  mm bez naciągu i  $7\phi 5$  z naciągiem od czynnej długości przyczepności po 1, 3, 7 i 28 dniach dla poszczególnych długości poślizgu
- Rys. E.24 Porównanie zależności siły wyciągającej w funkcji czasu na poziomie poszczególnych poślizgów dla splotów  $7\phi 5$  mm bez naciągu i z naciągiem

## SPIS TABEL

Tabela 3.1	Zestawienie wzorów zaproponowanych przez poszczególnych badaczy [114]
Tabela 3.2	Zestawienie badań niemieckich
Tabela 4.1	Zestawienie przeprowadzonych badań [27]
Tabela 4.2	Zestawienie zaproponowanych wzorów na długość transmisji i zakotwienia
Tabela 4.3	Zmienne występujące we wzorach na obliczanie długości transmisji
Tabela 5.1	Skład mieszanki betonowej C40/50
Tabela 5.2	Właściwości mechaniczne betonu
Tabela 5.3	Receptura mieszanki betonowej 1 m <sup>3</sup> oraz zastosowanych zarobów
Tabela 5.4	Charakterystyki wytrzymałościowe zastosowanego BWW
Tabela 5.5	Cechy mechaniczne i geometryczne splotów
Tabela 5.6	Właściwości splotu Y186057-12,9
Tabela 5.7	Charakterystyki splotów 7φ4 mm (wyniki statycznej próby rozciągania)
Tabela 5.8	Charakterystyki splotów 7φ 5 mm okrągłe (wyniki statycznej próby rozciągania)
Tabela 6.1	Wartości naprężeń ściskających w "piku" i rozciągających na czole tarczy w funkcji rozstawu dwóch splotów 7φ5 mm dla poszczególnych szerokości tarczy
Tabela 7.1	Zestawienie liczby przebadanych próbek w badaniach wstępnych
Tabela 7.2	Zestawienie liczby przebadanych próbek łącznie w badaniach wstępnych i zasadniczych ze splotem bez naciągu
Tabela 7.3	Siły wrywające splot 7φ4 mm po odłączeniu ekstensometru
Tabela 7.4	Siły wrywające splot 7φ5 mm po odłączeniu ekstensometru (28 dni)
Tabela 7.5	Liczba przebadanych próbek pod naciągiem
Tabela 7.6	Siły wrywające splot 7φ5 mm pod naciągiem po odłączeniu ekstensometru (28 dni)
Tabela 8.1	Cechy geometryczne splotów
Tabela 8.2	Średnie naprężenia przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm w funkcji wieku betonu i poślizgu splotu
Tabela 8.3	Naprężenia przyczepności uzyskane dla splotów 7φ4 mm bez naciągu i ich względne przyrosty w funkcji wieku betonu
Tabela 8.4	Średnie naprężenia przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm bez naciągu w funkcji wieku betonu i poślizgu splotów.
Tabela 8.5	Naprężenia przyczepności uzyskane dla splotów 7φ5 mm bez naciągu i ich względne przyrosty w funkcji wieku betonu
Tabela 8.6	Naprężenia przyczepności betonu BWW do splotów 7φ5 mm z naciągiem w funkcji wieku betonu i poślizgu
Tabela 8.7	Naprężenia przyczepności uzyskane dla splotów 7φ5 mm z naciągiem i ich względne przyrosty w funkcji wieku betonu
Tabela 8.8	Stosunek średnich naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm z naciągiem do 7φ5 mm bez naciągu w zależności od wieku betonu dla poszczególnych poziomów poślizgu
Tabela 8.9	Stosunek średnich naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ5 mm z naciągiem do 7φ5 mm bez naciągu w zależności od wieku betonu dla poszczególnych efektywnych długości przyczepności
Tabela 9.1	Długości transmisji dla poszczególnych linii pomiarowych

Tabela 9.2	Zestawienie wartości naprężeń i odkształceń w betonie przypadających na poszczególne powierzchnie
Tabela 9.3	Odkształcenie betonu na górnej powierzchni tarczy
Tabela 9.4	Wartości temperatury w tarczy
Tabela 9.5	Wyznaczone doświadczalnie długości transmisji $L_t$ [mm]
Tabela 9.6	Obliczone i pomierzone wartości odkształceń betonu w kierunku podłużnym tarczy
Tabela 9.7	Obliczone długości transmisji dla przypadku "Jastrowie" i "Kraków" wg poszczególnych wzorów