BUDOWNICTWO
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
CIVIL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
4-B/2012
ZESZYT 21
ROK 109
ISSUE 21
YEAR 109

ANDRZEJ SERUGA, EWA JAROMSKA*

DŁUGOŚĆ TRANSMISJI SIŁY SPRĘŻAJĄCEJ W PŁYTOWYCH ELEMENTACH STRUNOBETONOWYCH

TRANSMISSION LENGTH OF TENSIONING FORCE IN PRESTRESSED CONCRETE PANEL ELEMENTS

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z obliczaniem długości transmisji, długości dyspersji i długości zakotwienia w elementach strunobetonowych według podstawowych norm: MC 1990, 2010 i PN-EN 1992-1-1:2008. Dodatkowo w analizie uwzględniono normy: DIN 1045-1, DIN 4227, PN-EN 1992-1-1:2002 i ACI 318. Przytoczony przykład obliczeniowy dotyczący produkowanej płyty strunobetonowej ściany zbiornika, wykazał znaczną różnicę między długością transmisji wyznaczoną na drodze doświadczalnej a obliczoną według zależności normowych.

Słowa kluczowe: *długość transmisji*, *dyspersji i zakotwienia*, *naprężenia przyczepności*

Abstract

In the paper there are discussed the problems dealing with the calculation of transmission length, development length and anchorage length in prestressed concrete elements according to codes: Model Code 1990, 2010; PN-EN 1992-1-1:2008. Additionally the codes DIN 1045-1 and ACI 318 were taken into consideration. Calculation example for prestressed concrete tank wall panel under construction, has pointed the serious difference in obtained values of transmission length from experimental investigation and from codes relationship.

Keywords: *transmission length*, *development length*, *anchorage length*, *bond strength*

* Dr hab. inż. Andrzej Seruga, prof. PK, mgr inż. Ewa Jaromska, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

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. Po zmontowaniu całego obwodu, ściana sprężana jest w kierunku obwodowym za pomocą stalowych wewnętrznych lub zewnętrznych cięgien obwodowych.

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. Elementy prefabrykowane mogą również ulec wcześniej zarysowaniu np. podczas transportu lub montażu [13, 14]. 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. Rozkład naprężeń ściskających w przekroju poprzecznym na wysokości płyty zależy od liczby wprowadzonych splotów, ich rozstawu i długości transmisji sił naciągowej.

Dla projektanta zbiornika o ścianie wykonanej z takich elementów bardzo ważnym czynnikiem jest znajomość długości transmisji, a w szczególności rozwój 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 południkowe naprężenia rozciągające, powstałe od obwodowego sprężenia lub parcia cieczy, wprowadzonych na torze naciągowym wartości 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 równoleżnikowym. Z uwagi na malejącą wartość naprężeń ściskających w kierunku południkowym, wynikającą z rozwoju naprężeń przyczepności w strefie zakotwienia splotów, istnieje możliwość nie spełnienia kryterium zarysowania w tym rejonie ściany zbiornika, co musi być uwzględnione na etapie projektowania. Celem podjętych analiz jest opracowanie takiego rozwiązania elementu strunobetonowego, w którym długość transmisji byłaby jak najmniejsza, a odpowiadające jej naprężenia ściskające w kierunku podłużnym byłyby równomiernie rozłożone na szerokości elementu prefabrykowanego również na długości transmisji siły sprężającej.

W celu dokonania wstępnego rozpoznania tego problemu, przeprowadzono badania doświadczalne podczas produkcji prefabrykowanych elementów strunobetonowych stosowanych do montażu ścian zbiorników typu C-8. W badaniach tych skoncentrowano się w pierwszym etapie na długości transmisji siły naciągowej. Otrzymane z badań wyniki doświadczalne będą stanowić podstawę do prowadzenia dalszych analiz.

Należy nadmienić, że zagadnienie związane z obliczaniem długości transmisji w ujęciu dotychczasowych norm w odniesieniu do Model Code 2010, było przedmiotem analizy w pracy [10] dotyczącej długości zakotwienia cięgien w elementach strunobetonowych.

2. Długości transmisji według wybranych norm

Poniżej zestawiono istniejące regulacje normatywne krajowe i międzynarodowe odnośnie do zakotwienia cięgien sprężających w elementach strunobetonowych. Oznaczenia występujące we wzorach zawartych w tym rozdziale zostały dopasowane do obecnie obowiązującej normy EC-2. Oryginalny zapis jest podany w klamrach kwadratowych. Niektóre normy w tym również Model Code 1990, 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, zostały przytoczone w niniejszej pracy. Autorzy pracy uznali, iż 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.

2.1. CEB-FIP MODEL CODE 1990 [1]

2.1.1. Naprężenia przyczepności

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

$$f_{bpd} = \eta_{p1} \cdot \eta_{p2} \cdot f_{ctd} \tag{1}$$

gdzie:

$\eta_{p1} = 1{,}4$ – dla użebrowanych 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 ≤ 250 mm od krawędzi dolnej lub ≥ 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.

W celu wyznaczenia długości transmisji należy wstawić wytrzymałość betonu na rozciąganie w chwili wprowadzenia 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.

Na podstawie naprężeń przyczepności f_{bpd} ze wzoru (1) oblicza się podstawową długość zakotwienia l_{bp} (2):

$$l_{bp} = \frac{A_{sp}}{d_p \cdot \pi} \cdot \frac{f_{pd}}{f_{bpd}} \quad ; \quad \left[l_{pb} = \frac{A_{sp}}{\phi \cdot \pi} \cdot \frac{f_{pd}}{f_{bpd}} \right] \tag{2}$$

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,
$= 7d_p/36$ – dla 7-drutowych splotów.

2.1.2. Długość transmisji

Długość transmisji została zdefiniowana równaniem:

$$l_{bpd} = \alpha_8 \cdot \alpha_9 \cdot \alpha_{10} \cdot l_{bp} \cdot \sigma_{pm0}/f_{pd} \quad ; \quad [l_{bpt} = \alpha_8 \cdot \alpha_9 \cdot \alpha_{10} \cdot l_{bp} \cdot \sigma_{pi}/f_{pd}] \tag{3}$$

gdzie:

α_8 = 1,0 – przy stopniowym wprowadzeniu sprężenia,
= 1,25 – przy nagłym wprowadzeniu sprężenia,

α_9 = 1,0 – przy obliczeniach nośności momentów i sił poprzecznych,
= 0,5 – przy obliczeniach naprężeń poprzecznych na czole strefy zakotwienia

α_{10} = 0,5 – dla splotów,
= 0,7 – dla użebrowanych drutów,

σ_{pm0} = – naprężenia w stali sprężającej po stratach doraźnych, bezpośrednio przed wprowadzeniem siły sprężającej,

f_{pd} = f_{pk}/γ_p – granica plastyczności stali sprężającej f_{pk} zredukowana o częściowy współczynnik bezpieczeństwa.

2.1.3. Długość dyspersji

Długość dyspersji $l_{p,eff}$ jest to długość, od której ustala się w przekroju elementu liniowy rozkład naprężeń w wyniku sprężenia. Oblicza się ją według następującego wzoru:

$$l_{p,eff} = \sqrt{h^2 + (0,6 l_{bpd})^2} > l_{bpd} \quad ; \quad [l_p = \sqrt{h^2 + (0,6 l_{bpt})^2} > l_{bpt}] \tag{4}$$

gdzie:

h – wysokość przekroju.

Równanie ma zastosowanie tylko w elementach o przekroju prostokątnym, z cięgnami sprężającymi usytuowanymi w strefie dolnej. Dla innych przekrojów należy ustalić długość dyspersji oraz odpowiadający lokalny rozkład naprężeń w oparciu o teorię sprężystości.

2.1.4. Długość zakotwienia

Długość zakotwienia l_{ba} oblicza się według MC 90 w następujący sposób:

$$l_{ba} = l_{bpd} + l_{bp} \frac{\sigma_{pd} - \sigma_{pcs}}{f_{pd}} \quad ; \quad \left[l_{bpd} = l_{bpt} + l_{bp} \frac{\sigma_{pd} - \sigma_{pcs}}{f_{pd}} \right] \tag{5}$$

gdzie:

σ_{pd} – naprężenie w stali sprężającej od obciążenia obliczeniowego ($\sigma_{pd} \le f_{pd}$)

σ_{pcs} – naprężenie w stali sprężającej po odjęciu wszystkich strat od pełzania, skurczu i relaksacji stali sprężającej

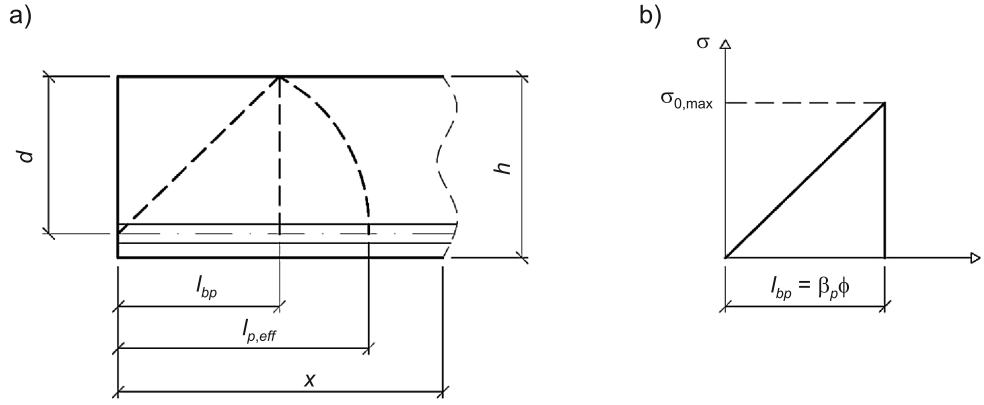
Nie bierze się tutaj pod uwagę, w przeciwieństwie do innych norm (np. DIN 1045-1), możliwości powstania rys w obszarze zakotwienia. Zakłada się wprowadzenie siły sprężającej bez zarysowania. Zaznacza się jednak, że w razie potrzeby należy przedsięwziąć dodatkowe kroki w celu bezpiecznego zakotwienia.

2.2. EUROCODE 2 – EC2 1992 [2] i PN-B-03264:2002 [3]

2.2.1. Długość transmisji

Na długość transmisji l_{bp} według EC2-1-1 wpływa średnica, rodzaj cięgna sprężającego oraz ukształtowanie jego powierzchni jak również wytrzymałość betonu i stopień zagęszczenia betonu. Wartości mają się opierać na wynikach badań doświadczalnych będących rezultatem zastosowanego typu cięgna sprężającego. W celach obliczeniowych jako długość transmisji l_{bp} została ustalona wielokrotność średnicy nominalnej d_s splotu lub drutu:

$$l_{bp} = \beta_b \cdot d_s \tag{6}$$



Rys. 1. Przekazywanie siły sprężającej w betonie [2]

Fig. 1. Transmission of tensioning force to concrete [2]

Współczynnik β_b należy przyjąć według tabeli podanej przez normę, która dotyczy zarówno splotów jak również użebrowanych drutów/prętów. Nie dopuszcza się prętów gładkich.

$$l_{bpd} = \{0{,}8 \cdot l_{bp}; 1{,}2 \cdot l_{bp}\} \tag{7}$$

Współczynniki w powyższym równaniu, które uwzględniają rozrzut długości transmisji, należy każdorazowo przyjąć niekorzystnie ze względu na rozważane obciążenie. Również tutaj nie dokonano żadnych ustaleń odnośnie BWW.

Tabela 1

Zestawienie parametrów do obliczania długości transmisji wg EC 2 i PN-B-03264: 2002

[2] EUROCODE 2 – EC2 $l_{bp} = \beta_b \cdot d_s$	
β_b	d_s
z tabeli	$= \phi$

[3] PN-B-03264: 2002 $l_{bp} = \beta_p \cdot \phi$	
β_b	ϕ
z tabeli	$= d_s$

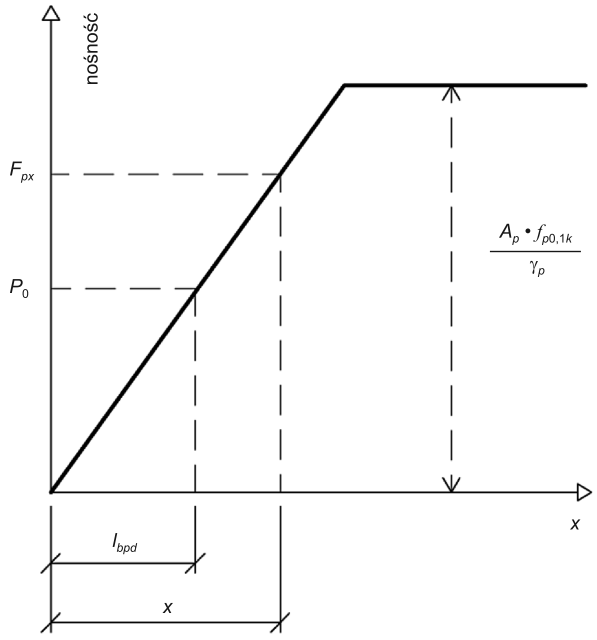
2.2.2. Długość dyspersji

Długość dyspersji $l_{p,eff}$ w elementach o przekroju prostokątnym, z prostymi cięgnami sprężającymi usytuowanymi w strefie dolnej, oblicza się wg następującego wzoru:

$$l_{p,eff} = \sqrt{l_{pbd}^2 + d^2} \tag{8}$$

2.2.3. Długość zakotwienia

Według EC2 zakotwienie zależy od stanu obszaru zakotwienia (zarysowany lub nie). Długość zakotwienia l_{ba} jest rozumiana w zależności od naprężeń rozciągających σ_{ct} przy uwzględnieniu miarodajnej siły sprężającej P_0.



Rys. 2. Obliczeniowy rozkład siły sprężającej w strefie zakotwienia w strunobetonie [2]

Fig. 2. Design tensioning force distribution in prestressed concrete element anchorage zone [2]

$\sigma_{ct} \le f_{ct,0,05}$ – nie są wymagane żadne dodatkowe obliczenia zakotwienia,
$\sigma_{ct} > f_{ct,0,05}$ – konieczne jest obliczenie przeniesienia siły rozciągającej.

Możliwa do przeniesienia siła naciągowa cięgien sprężających F_{px} jest określona na podstawie rys. 2 i wzoru (9).

$$F_{px} = \frac{x}{l_{bpd}} P_0 \le A_p \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_p} \tag{9}$$

2.3. DIN 4227 [4]

Niemiecka norma DIN 4227-1 została w międzyczasie zastąpiona przez EC2 lub DIN 1045-1. Metoda stosowana w DIN 4227 została uwzględniona w zestawieniach w celach porównawczych między dotychczasową koncepcją wymiarowania a obowiązującą koncepcją według DIN 1045-1.

2.3.1. Długość transmisji

W DIN 4227 część 1, długość transmisji l_{bp} jest obliczana ze wzoru (10) na podstawie współczynnika przyczepności k_1, który określa dopuszczalne naprężenie w stali sprężającej w zależności od wytrzymałości betonu, przy jednoczesnym wyeliminowaniu rys w obszarze zakotwienia.

$$l_{bp} = k_1 \cdot d_p \qquad \text{[zapis oryginalny: } l_{ii} = k_1 \cdot d_v\text{]} \tag{10}$$

gdzie:

$k_1 =$ – współczynnik przyczepności z atestu stali sprężającej obowiązującego wg DIN 4227 część 4 (również dla betonów lekkich),

$k_1 = 110 - f_{cj}$ – dla splotów 7ϕ4 mm (0,5 cala),

$k_1 = 45$ – dla drutów 12 mm i betonu B 35,

$k_1 = 40$ – dla drutów 12 mm i betonu B 45,

$k_1 = 35$ – dla drutów 12 mm i betonu B 55,

$f_{cj} =$ – wytrzymałość betonu na ściskanie w chwili zwalniania naciągu wyrażona w MPa (kostki 15×15×15 cm).

Należy zauważyć, że dotychczasowa norma DIN 4227 dopuszczała mniejsze naprężenia w stali sprężającej ($\sigma_{zul} = \sigma_{dop} = 0{,}65 \cdot f_{pk} = 0{,}65 \cdot 1770 = 1150$ N/mm^2) niż DIN 1045-1 oparta na badaniach (*zul* σ_{pm0} = *dop* $\sigma_{pm0} = 0{,}85 \cdot f_{p0,1k} = 0{,}85 \cdot 1570 = 1320$ N/mm^2). Odpowiadająca dopuszczalna siła naciągowa dla badanych splotów 0,5" wynosi 107 kN według „starej" i 125 kN według „nowej" DIN. Dlatego wartości obliczeniowe można tylko warunkowo porównać (w szczególności w ULS, graniczny stan użytkowania).

W DIN 4227 część 1, ujęte są betony tylko do wytrzymałości nominalnej 55 N/mm^2. DIN 4227 część 4, dopuszcza betony lekkie tylko do wytrzymałości nominalnej 55 N/mm^2. BWW lub samozagęszczalne nie są ujęte. W regulacjach Niemieckiej Komisji Żelbetowej wykluczone było stosowanie sprężenia do betonów samozagęszczalnych i BWW [11] i [12].

2.3.2. Długość dyspersji

Długość dyspersji $l_{p,eff}$, od której ustala się w elemencie liniowy rozkład w wyniku sprężenia, oblicza się według następującego wzoru:

$$l_{p,eff} = \sqrt{s^2 + (0{,}6 l_{bp})^2} \geq l_{bp} \tag{11}$$

gdzie:

s – długość zaburzenia, która jest potrzebna do rozszerzenia skoncentrowanych sił sprężających, aż do uzyskania liniowego rozkładu naprężeń.

Powyższy wzór dotyczy tylko cięgien sprężających w elementach strunobetonowych.

Tabela 2

Zestawienie parametrów do obliczania długości transmisji wg DIN 4227

[4] DIN 4227 $l_{bp} = k_1 \cdot d_p$	
k_1	d_p
z tabeli	$= \phi$

2.3.3. Długość zakotwienia

Wystarczające zakotwienie w stanie zniszczenia jest obliczeniowo zapewnione, kiedy jest spełniony jeden z dwóch warunków a) lub b).

a) Długość zakotwienia l_{ba} cięgien sprężających musi znajdować się w obszarze, który w obliczeniowym stanie zniszczenia jest wolny od rys powstałych w wyniku naprężeń rozciągających przy zginaniu (strefa a) i przy ścinaniu.

Naprężenie główne rozciągające σ_1 należy sprawdzić w odstępie $0{,}5 \cdot d_0$ od krawędzi podparcia. Nie może ono przekraczać wartości naprężeń rozciągających według tabeli 9 (wiersz 49 lub wiersz 50) DIN 4227-1 [4]. W tabeli 9 [4] podane są maksymalne naprężenia główne rozciągające w stanie granicznym użytkowania i obliczeniowym stanie zniszczenia, według klas betonu. Według części 4 należy ograniczyć główne naprężenia rozciągające do 80% przy stosowaniu betonu lekkiego.

Długość zakotwienia l_{ba} wynosi:

$$l_{ba} = \frac{F_u}{\sigma_p \cdot A_p} l_{bp} \tag{12}$$

gdzie:

$$F_u = \frac{M_u}{z} + Q_u \frac{v}{h}$$

F_u – siła rozciągająca cięgna sprężające w obliczeniowym stanie zniszczenia,

M_u – moment zginający w obliczeniowym stanie zniszczenia,

Q_u – siła poprzeczna na podporze w obliczeniowym stanie zniszczenia,

$\sigma_p = 0{,}75 \cdot f_{p0,02k}$ lub $0{,}55 \cdot f_{pk}$ – dopuszczalne naprężenie w stali sprężającej według atestów,

A_p – powierzchnia przekroju cięgna sprężającego przeprowadzonego poza punkt podparcia,

ν – współczynnik rozdziału według DIN 1045 ($\nu = 1{,}0 \cdot d$).

Człon $Q_u \cdot v/h$ należy uwzględnić tylko wtedy, kiedy w pobliżu długości zakotwienia zakłada się wystąpienie rys w wyniku ścinania.

b) Obliczeniowe przewieszenie cięgien sprężających znajdujących się w strefie zakotwienia przyczepności poza zewnętrzną krawędzią podpory, musi spełniać warunek długości l_1 określony równaniem (13). Przy bezpośrednim podparciu wystarczy przewieszenie o wartości 2/3 l_1.

$$l_1 = \frac{F_{Au}}{\sigma_p \cdot A_p} l_{bp} \tag{13}$$

gdzie:

$$F_{Au} = Q_u \frac{v}{h}$$

Jeżeli część wyżej zdefiniowanej siły rozciągającej F_{Au} według DIN 1045 jest przeniesiona przez zbrojenie podłużne ze stali zwykłej, należy obliczyć przewieszenie cięgien sprężających tylko dla zredukowanej siły rozciągającej $\Delta Z_{Au} = F_{Au} - A_s \cdot \beta_s$ (A_s – pole przekroju stali zwykłej, β_s – wytrzymałość stali na rozciąganie).

2.4. DIN 1045-1 [5], [6]

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.

2.4.1. Długość transmisji

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

$$l_{bp} = \alpha_1 \frac{A_p}{\pi \cdot d_p} \cdot \frac{\sigma_{pm0}}{f_{bp} \cdot \eta_1} \tag{14}$$

gdzie:

α = 1,0	–	przy stopniowym wprowadzeniu sprężenia,
= 1,25	–	przy nagłym wprowadzeniu sprężenia,
η_1 = 1,0	–	dla betonu normalnego,
= 0,4 + 0,6 (ρ/2200)	–	dla betonu lekkiego gdzie ρ w [kg/m³],
A_p	–	przekrój nominalny splotu lub drutu,
d_p	–	średnica nominalna splotu lub drutu,
σ_{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 $A_p \leq 150$ mm^2 i drutów o $d_p \leq 8{,}0$ mm. Stosując użebrowane pręty o średnicy $d_p \leq 12{,}0$ mm należy wartości naprężenia przyczepności określić na podstawie danych doświadczalnych. Jako przybliżenie można stosować wartości z tabeli w normie DIN.

Wartość obliczeniową długości transmisji wyznacza się według równania

$$l_{bpd} = \{0{,}8 \cdot l_{bp}; 1{,}2 \cdot l_{bp}\} \tag{15}$$

przy czym miarodajna jest wartość mniej korzystna.

Tabela 3

Zestawienie parametrów do obliczenia długość transmisji wg DIN 1045-1

[6] DIN 1045-1: 2008 $l_{bp} = \alpha_1 \frac{A_p}{\pi \cdot d_p} \cdot \frac{\sigma_{pm0}}{f_{bp} \cdot \eta_1}$							
α_1		A_p	d_p	σ_{pm0}	f_{bp}	η_1	
zwolnienie stopniowe	zwolnienie nagłe	przekrój	średnica nominalna	naprężenia po zwolnieniu naciągu	naprężenia przyczepności	normalny	lekki
1	1,25					1	0,4+0,6(ρ/2200)

2.4.2. Długość dyspersji

Długość dyspersji określa odległość od czoła elementu, od której ustala się w elemencie liniowy przebieg naprężeń w wyniku wprowadzenia siły sprężającej.

$$l_{p,eff} = \sqrt{l_{pbd}^2 + d^2} \tag{16}$$

gdzie:

d – wysokość efektywna.

Równanie to zachowuje swoją ważność tylko dla przekrojów prostokątnych. Dla innych form przekroju należy ustalić długość dyspersji oraz odpowiadający lokalny rozkład naprężeń w oparciu o teorię sprężystości.

2.4.3. Długość zakotwienia

Przy obliczeniu długości zakotwienia l_{ba} rozróżniamy dwa przypadki:

a) Tworzenie się rys poza długością l_{pd} (rys. 3a):

$$l_{ba} = l_{bpd} + \frac{A_p}{\pi \cdot d_p} \cdot \frac{\sigma_{pd} - \sigma_{pmt}}{f_{bp} \cdot \eta_1 \cdot \eta_p} \tag{17}$$

b) Tworzenie się rys na długości l_{pd} (rys. 3b)):

$$l_{ba} = l_r + \frac{A_p}{\pi \cdot d_p} \cdot \frac{\sigma_{pd} - \sigma_{pt}(x = l_r)}{f_{bp} \cdot \eta_1 \cdot \eta_p} \tag{18}$$

gdzie:

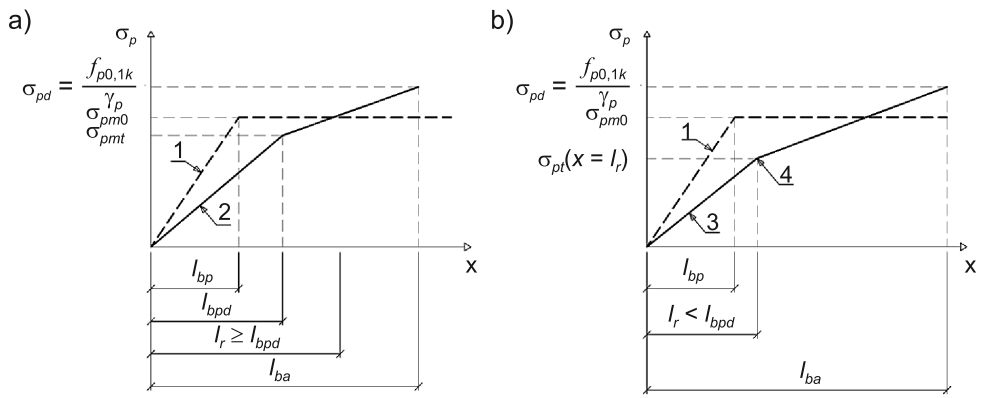
$\eta_p = 0{,}5$ – dla splotów i profilowanych drutów,
$= 0{,}7$ – dla użebrowanych drutów,
$\eta_1 = 1{,}0$ – dla betonu normalnego,
$= 0{,}4 + 0{,}6\ (\rho/2200)$ – dla betonu lekkiego, gdzie ρ w [kg/m³],
$\sigma_{pd}, \sigma_{pmt}, \sigma_{pt}$ – wyznacza się według rys. 3.

Siłę rozciągającą w stali $F_{Ed}(x)$, która ma być przejęta przez element i która wynika z obwiedni sił rozciągających, oblicza się według wzoru (19). Siła ta, w przypadku powstania rys na długości transmisji l_{bpd}, winna być przejęta przez element niezarysowany poza zewnętrzną krawędzią podparcia.

$$F_{Ed}(x) = \frac{M_{Ed}(x)}{z} + \frac{1}{2} V_{Ed}(x)(\cot\theta - \cot\alpha) \tag{19}$$

gdzie:

$M_{Ed}(x)$ – obliczeniowy moment w punkcie x, który należy przenieść,
z – wewnętrzne ramię sił,
$V_{Ed}(x)$ – odpowiadająca obliczeniowa siła poprzeczna, którą należy przenieść,
θ – kąt między krzyżulcami ściskającymi w betonie a osią podłużną elementu,
α – kąt między zbrojeniem na siłę poprzeczną a osią podłużną elementu.



Rys. 3. Przebieg naprężeń w stali sprężającej w strefie zakotwienia cięgien elementów strunobetonowych wg [6]
Fig. 3. Design tensioning force distribution in prestressed concrete element anchorage zone [6]

2.5. PN-EN 1992-1-1:2008 [7]

2.5.1. Długość transmisji

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

$$l_{pt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \phi \cdot \sigma_{pm0} / f_{bpt} \tag{20}$$

gdzie:

α_1 = 1,0 – przy stopniowym zwalnianiu naciągu,
= 1,25 – przy nagłym zwalnianiu naciągu,
α_2 = 0,25 – dla cięgien o kołowym przekroju poprzecznym,
= 0,19 – dla splotów trzydrutowych i siedmiodrutowych,
ϕ – średnica nominalna cięgien,
σ_{pm0} – naprężenie w cięgnie natychmiast po zwolnieniu naciągu.

2.5.2. Długość dyspersji

Długość dyspersji jest długością odcinka, poza którą zakłada się liniowy rozkład naprężeń normalnych w betonie. Norma zaleca stosowanie wzoru określającego długość dyspersji:

$$l_{disp} = \sqrt{l_{pt}^2 + d^2} \tag{21}$$

Norma przewiduje również inną możliwość określania narastania siły sprężającej na długości cięgien w przypadkach uzasadnionych. Długość transmisji powinna być wtedy dostosowana do przyjętej koncepcji rozwiązania.

2.5.3. Długość zakotwienia

Całkowita długość zakotwienia potrzebna do zakotwienia cięgna o naprężeniu σ_{pd} wynosi:

$$l_{bpd} = l_{pt2} + \alpha_2 \cdot \phi \frac{\sigma_{pd} - \sigma_{pm\infty}}{f_{bpd}} \tag{22}$$

gdzie:

l_{pt2} – jest górną obliczeniową wartością długości transmisji według pkt. 8.10.2.2(3),
α_2 – określa się według pkt. 8.10.2.2(2) jak we wzorze na długość transmisji,
σ_{pd} – jest naprężeniem w cięgnie odpowiadającym sile określonej w (1),
$\sigma_{pm\infty}$ – jest naprężeniem od sprężenia po wszystkich stratach,
f_{bpd} – jest wytrzymałością ze względu na przyczepność określona wzorem:

$$f_{bpd} = \eta_{p2} \cdot \eta_1 \cdot f_{ctd} \tag{23}$$

gdzie:

η_{p2} = 1,4 – dla drutów nagniatanych,
= 1,2 – dla splotu siedmiodrutowego,
η_1 – zależy od warunków przyczepności: η_1 = 1,0 (dobre warunki), η_1 = 0,7 (pozostałe przypadki),
f_{ctd} – wytrzymałość obliczeniowa betonu na rozciąganie osiowe.

2.6. ACI 318-02 [8]

2.6.1. Długość zakotwienia

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:

$$l_{ba} = \frac{\sigma_{pm0}}{21} \cdot d_p + \frac{1}{7} \cdot (f_{pd} - \sigma_{pm0}) \cdot d_p \tag{24}$$

oryginalny zapis:

$$\left[l_d = \left(\frac{f_{se}}{3000} \right) \cdot d_b + \left(\frac{f_{ps} - f_{se}}{1000} \right) \cdot d_b \right] \tag{24a}$$

gdzie:

- l_{ba} – długość zakotwienia,
- σ_{pm0} – efektywne naprężenia w stali sprężającej [N/mm^2],
- 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:

$$l_{bp} = \frac{\sigma_{pm0}}{21} \cdot d_p \tag{25}$$

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

$$l_{\Delta} = \frac{1}{7} \cdot (f_{pd} - \sigma_{pm0}) \cdot d_p \tag{26}$$

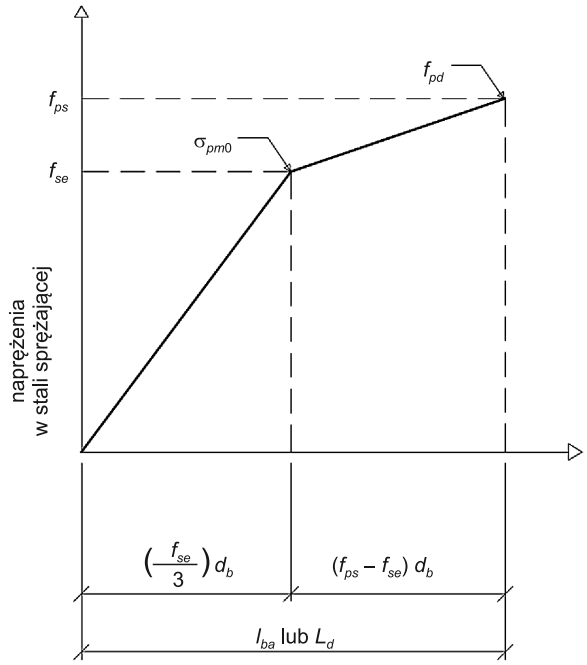
Rysunek 4 wyjaśnia te zależności, które są porównywalne z DIN 1045-1.

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

Tabela 4

Zestawienie parametrów do obliczenia długości transmisji wg ACI 318

[8] ACI 318-02 $l_{bp} = \sigma_{pm0} \cdot d_p/21$	
d_p	σ_{pm0}



Rys. 4. Idealizowana dwuliniowa zależność naprężeń w stali sprężającej od odległości swobodnego końca splotu wg [8]
Fig. 4. Idealized bilinear relationship between steel stress and distance from the free end of strand [8]

2.7. Model Code 2010 [9]

2.7.1. 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, który jest konieczny do osiągnięcia obliczeniowego naprężenia w stali.

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

2.7.2. Obliczeniowa wytrzymałość przyczepności

Obliczeniowa wartość wytrzymałości przyczepności dla cięgien sprężających wyraża się wzorem:

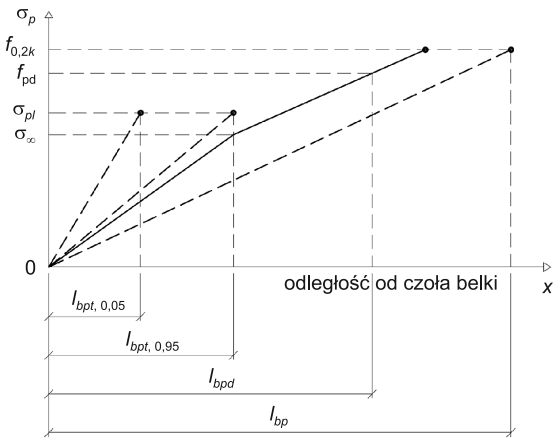
$$f_{bpd} = \eta_{p1}\, \eta_{p2} f_{ctd} \tag{27}$$

gdzie:

$f_{ctd} = f_{ctk,\min}(t)/1{,}5$ – minimalna obliczeniowa wytrzymałość betonu na rozciąganie osiowe dla długości transmisji w chwili przekazania siły sprężającej; dla długości zakotwienia wytrzymałość 28-dniowa;

η_{p1} – współczynnik uwzględniający rodzaj cięgien sprężających:
$\eta_{p1} = 1{,}4$ – dla drutów nagniatanych i profilowanych;
$\eta_{p1} = 1{,}2$ – dla splotów 7-drutowych;

η_{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.



Rys. 5. Różnice pomiędzy naprężeniami w stali wzdłuż strefy zakotwienia elementu strunobetonowego [9]

Fig. 5. Variation in steel stress along the anchorage zone of a pretensioned member [9]

2.7.3. Podstawowa długość zakotwienia

Podstawowa długość zakotwienia pojedynczego cięgna sprężającego wynosi:

$$l_{bp} = \frac{A_{sp}}{\phi\pi}\frac{f_{ptd}}{f_{bpd}} \tag{28}$$

gdzie:

$$f_{ptd} = \frac{f_{ptk}}{1{,}15},$$

f_{ptk} – charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie zbrojenia sprężającego.

Podstawowa długość zakotwienia określa długość, która jest wymagana do osiągnięcia pełnej wytrzymałości w cięgnie.

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

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

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

2.7.4. Długość transmisji

Długość transmisji cięgien sprężających wynosi:

$$l_{bpt} = \alpha_{p1}\alpha_{p2}\alpha_{p3} l_{pb} \frac{\sigma_{pi}}{f_{ptd}} \tag{29}$$

gdzie:

σ_{pi} – naprężenie w stali sprężającej zaraz po zwolnieniu naciągu,

α_{p1} – współczynnik uwzględniający sposób zwolnienia naciągu:
- $\alpha_{p1} = 1{,}00$ – dla stopniowego zwalniania naciągu;
- $\alpha_{p1} = 1{,}25$ – dla nagłego zwolnienia naciągu;

α_{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;

α_{p3} – współczynnik uwzględniający wpływ jakości przyczepności:
- $\alpha_{p3} = 0{,}5$ – dla splotów;
- $\alpha_{p3} = 0{,}7$ – dla drutów nagniatanych lub profilowanych (żebrowanych).

Użycie blisko rozmieszczonych strzemion lub spiral 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 poślizgu (δ_e) cięgna na licu elementu betonowego. Jednakże, kiedy element betonowy jest odcinany z dłuższego elementu w produkcji, poślizg nie może być dokładnie oszacowany. Zakładając liniowy rozkład naprężeń w stali wzdłuż długości transmisji wartość poślizgu może być wyrażona wzorem:

$$\delta_e = 0{,}5 \frac{\sigma_{pi}}{E_p} l_{bpt} \tag{30}$$

gdzie:

$\alpha_{p2} = 1{,}0$ – w równaniu l_{bpt} (29),

E_p – moduł sprężystości stali sprężającej.

Tabela 5

Zestawienie parametrów do obliczenia długości transmisji wg EN 1992-1-1:2004÷AC:2008/EC 2008

EN 1992-1-1:2004+AC: 2008/EC 2008 [7]

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

α_1		α_2		ϕ	σ_{pm0}	f_{bpt}											
										$f_{ctd}(t)$							
										$f_{ctm}(t)$							
										$\beta_{cc}(t)$			α				
stopniowo	nagle	kołowy	3+7-drut			η_{p1}	η_1	0,7	α_{ct}	s kl. cementu 0,2/0,25/0,38	t	$\beta_{cc}(t)$ $\exp[s(1-\sqrt{(28/t)})]$	$t < 28$ $\alpha = 1,0$	$t \geq 28$ $\alpha = 2/3$	f_{ctm} tabl. 3.1	γ_c	
1	1,25	0,25	0,19														

Tabela 6

Zestawienie parametrów do obliczenia długości transmisji wg Model Code 1990 i 2010

Model Code 1990 i 2010 [9]

$l_{bpt} = \alpha_{p1} \cdot \alpha_{p2} \cdot \alpha_{p3} \cdot (\sigma_{pi}/f_{ptd}) \cdot l_{bp}$ gdzie $l_{bp} = (A_{sp}/\pi\phi) \cdot (f_{ptd}/f_{bpd})$

$l_{bpt} = \alpha_{p1} \cdot \alpha_{p2} \cdot \alpha_{p3} \cdot (\sigma_{pi}/f_{ptd}) \cdot (A_{sp}/\pi\phi) \cdot (f_{ptd}/f_{bpd})$

f_{ptd} – wyraz występuje w liczniku i mianowniku, więc: $l_{bpt} = \alpha_{p1} \cdot \alpha_{p2} \cdot \alpha_{p3} \cdot (\sigma_{pi}/f_{bpd}) \cdot (A_{sp}/\pi\phi)$

α_{p1}		α_{p2}		α_{p3}		σ_{pi}	l_{bp}											
										f_{bpd}								
												$f_{ctd} = f_{ctk,\min}(t)/\gamma_c$						
												$f_{ctm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{ctk,\min}$						
stopniowo	nagle	M/Q	p	płaskie	sploty	naprężenia po zwolnieniu σ_{pm0}	A_{sp}	ϕ	π	η_{p1}	η_{p2}	$\beta_{cc} = \exp[s(1-\sqrt{(28/t)})]$		$f_{ctk,\min}$ tabl. 5.1-5	γ_c			
												s kl. cementu 0,2/0,25/0,38	t					
1	1,25	1	0,5	0,5	0,7													

2.7.5. Projektowanie długości zakotwienia

Obliczeniowa długość zakotwienia cięgien sprężających wynosi:

$$l_{bpd} = l_{bpt} + l_{bp} \frac{\sigma_{pd} - \sigma_{pcs}}{f_{ptd}} \tag{31}$$

gdzie:

σ_{pd} – naprężenie w cięgnie wywołane obciążeniem obliczeniowym ($\sigma_{pd} \leq f_{ptd}$),
σ_{pcs} – naprężenie w cięgnie po uwzględnieniu wszystkich strat;

Jeśli zachodzi konieczność, wymaganą nośność zakotwienia można uzyskać przez dodatkowe zakotwienie końca lub zastosowanie zbrojenia zwykłego.

2.7.6. Długość dyspersji

Długość dyspersji jest odległością od lica elementu do poprzecznego przekroju betonowego, poza którym rozkład podłużnych naprężeń jest liniowy.

Dla prostokątnych przekrojów i prostych cięgien umieszczonych w pobliżu dolnej krawędzi przekroju betonowego długość dyspersji wyrażona jest wzorem:

$$l_p = \sqrt{[h^2 + (0,6 \cdot l_{bpt})^2]} > l_{bpt} \tag{32}$$

gdzie:

h – całkowita wysokość przekroju betonowego.

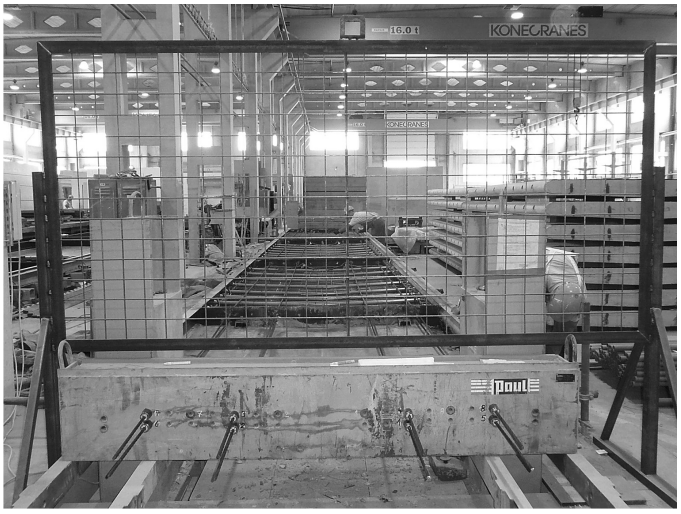
Dla przekrojów innych niż prostokątne długość dyspersji może być określona w podobny sposób przy założeniach jak dla elementów kablobetonowych.

Zestawienie danych potrzebnych przy obliczaniu długości transmisji według PN-EN 1992-1-1:2008 i Model Code 2010 zestawiono odpowiednio w tabelach 5 i 6.

3. Badania doświadczalne i otrzymane wyniki

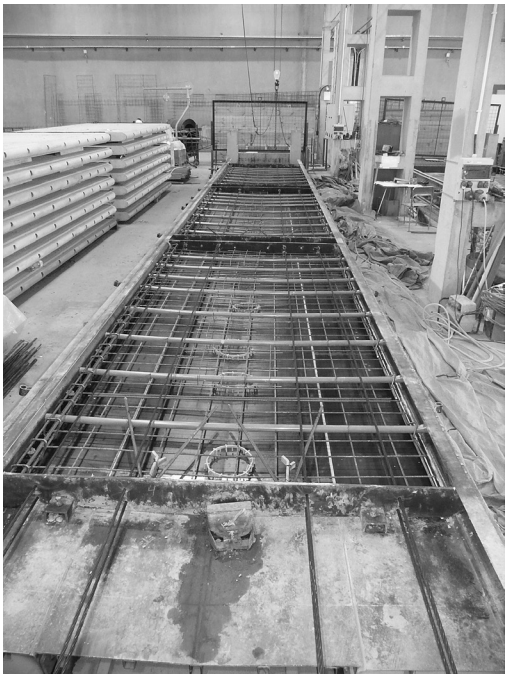
Prefabrykowane elementy ściany zbiornika produkowane są w Zakładzie Prefabrykacji firmy Precon Polska sp. z o.o. na torze naciągowym o długości 20,16 m (rys. 6). W analizowanym przypadku w jednym cyklu produkcyjnym wykonywane były 3 elementy prefabrykowane o długości 4,65 m. Do produkcji płyt poza zbrojeniem zwykłym, stosowano 8 splotów typu 7 ϕ 4 mm o średnicy nominalnej 13 mm i powierzchni przekroju poprzecznego 100 mm^2. 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.

Badania przeprowadzono na pierwszej płycie od strony agregatu naciągowego (górna część rys. 6). Po ułożeniu zbrojenia zwykłego i splotów sprężających zrealizowano naciąg we wszystkich splotach o sile docelowej 130 kN (rys. 7). W dalszej kolejności ułożono mieszankę betonową, zagęszczono i po osadzeniu wszystkich niezbędnych elementów montażowych płyty, zatarto powierzchnię górną (wewnętrzna powierzchnia ściany zbiornika). Wszystkie elementy na torze naciągowym zostały przykryte zestawem trzech mat osłaniających elementy przed odprowadzeniem ciepła.



Rys. 6. Ogólny widok toru naciągowego podczas układania zbrojenia

Fig. 6. General view of the pretensioning bed at the time of reinforcement stabilization



Rys. 7. Ogólny widok toru naciągowego przed ułożeniem betonu

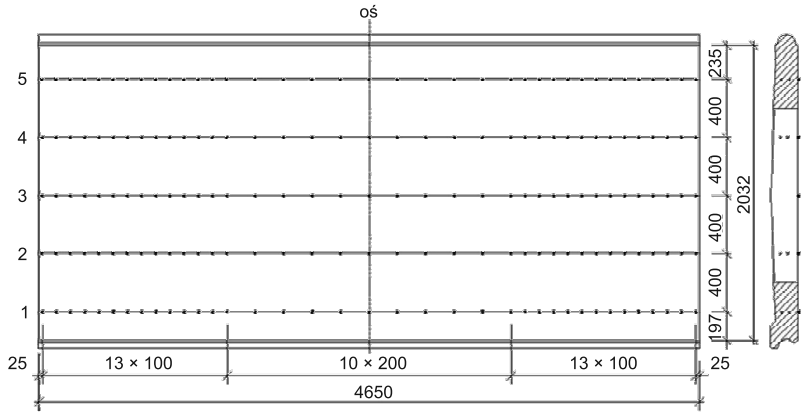
Fig. 7. General view of pretensioning bed before concreting

Do produkcji płyt stosowana jest mieszanka betonowa na kruszywie bazaltowym o uziarnieniu 2–8 i 8–16, CEM I 52,5R, dodatki napowietrzające i plastyfikujące. Wymagana minimalna wytrzymałość betonu na ściskanie w chwili rozformowania elementu winna wynosić 35 MPa. W trakcie betonowania elementów pobrano próbki, które posłużyły do określenia wytrzymałości betonu na ściskanie i na rozciąganie oraz modułu sprężystości betonu. Elementy po uformowaniu przykryto odpowiednimi matami zapewniającymi stałe warunki dojrzewania betonu. Podstawą do podjęcia decyzji o zwolnieniu naciągu po 20 godzinach dojrzewania była określona doświadczalnie wytrzymałość betonu na ściskanie wynosząca 41 MPa. Uzyskane parametry betonu w wyniku badań doświadczalnych przeprowadzonych w Laboratorium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej zestawiono w tabeli 7.

Tabela 7

Odkształcenia betonu na powierzchni płyty po zwolnieniu naciągu

Właściwości mechaniczne betonu	2 dni	7 dni	28 dni
Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie (próbka 150 × 150 × 150 mm) [MPa]	$f_{cm} = 46{,}44$	$f_{cm} = 61{,}33$	$f_{cm} = 75{,}41$
Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie (próbka ϕ150 × 300 mm) [MPa]	$f_{cm} = 40{,}94$	$f_{cm} = 53{,}29$	$f_{cm} = 67{,}91$
Średni moduł sprężystości betonu na ściskanie [MPa]	$E_{cm} = 34\,300$	$E_{cm} = 40\,200$	$E_{cm} = 42\,180$
Średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie osiowe [MPa]	–	$f_{ct} = 2{,}40$	$f_{ct} = 2{,}90$
Średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie przez rozłupanie [MPa]	–	$f_{ct,sp} = 3{,}96$	$f_{ct,sp} = 4{,}75$



Rys. 8. Ogólny widok prefabrykowanej płyty i rozmieszczenie punktów pomiarowych

Fig. 8. General view of precast panel and localization of measuring points

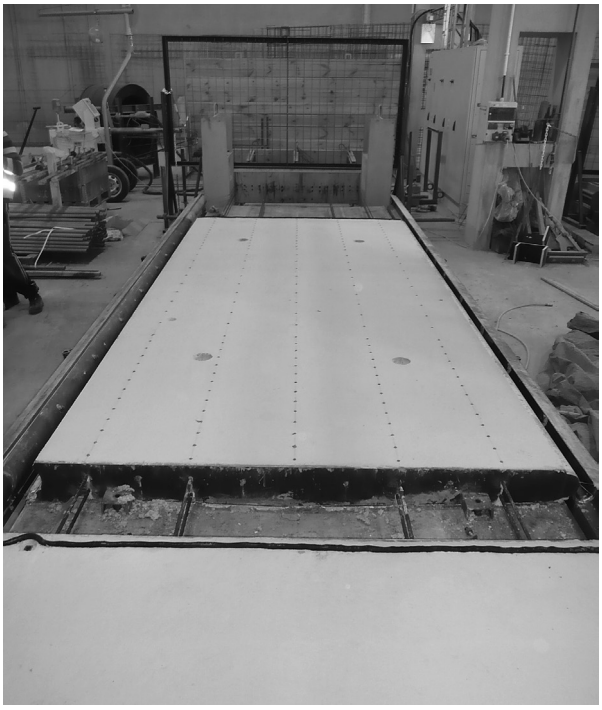
Przed zwolnieniem naciągu naklejono punkty pomiarowe wzdłuż pięciu linii (rys. 8). Na wewnętrznej powierzchni elementu prefabrykowanego reper pierwszy i ostatni naklejono w odległości 25 mm od końców płyty. Następnie idąc w kierunku osi płyty naklejono punkty pomiarowe w odległości co 100 mm, a dalej co 200 mm. Wzajemnie usytuowanie punktów pomiarowych i przekrój poprzeczny płyty przedstawiono na rys. 8 i 9. 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. Widok siłowników cylindrycznych przed zwolnieniem naciągu przedstawiono na rys. 11.

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. Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 8. Na ich podstawie można wyznaczyć doświadczalne długości transmisji po stronie czynnej (punkty początkowe) i po stronie biernej (punkty końcowe). Otrzymane rozkłady odkształceń betonu wzdłuż linii pomiarowych 1 i 5 przedstawiono na rys. 10.

Tabela 8

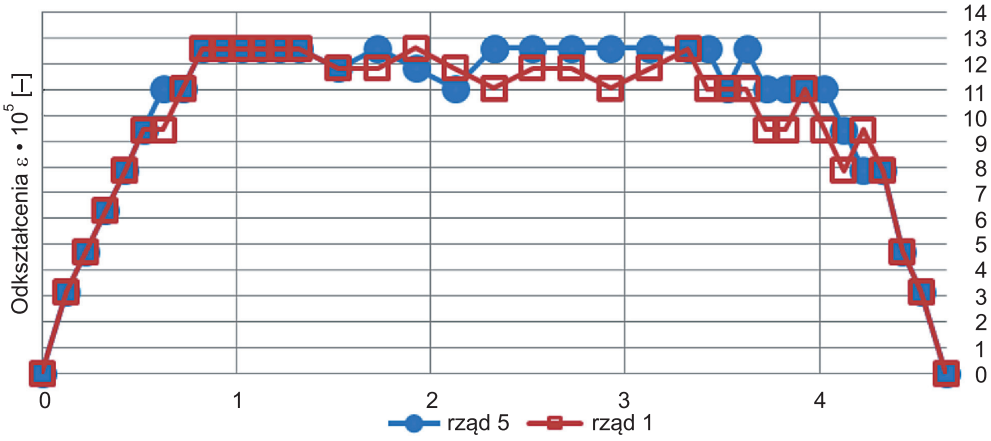
Odkształcenia betonu na powierzchni płyty po zwolnieniu naciągu

Nr punktu	l [m]	Długość odcinka [mm]	Długość odcinka [mm]	Strona czynna (lewa)		Strona bierna (prawa)	
				odkształcenia $\varepsilon \cdot 10^5$		odkształcenia $\varepsilon \cdot 10^5$	
				1	5	1	5
1	0,125	13 × 100 mm	100	3,150	3,150	3,150	3,150
2	0,225		100	4,725	4,725	4,725	4,725
3	0,325		100	6,300	6,300	7,875	7,875
4	0,425		100	7,875	7,875	9,450	7,875
5	0,525		100	9,450	9,450	7,875	9,450
6	0,625		100	9,450	11,025	9,450	11,025
7	0,725		100	11,025	11,025	11,025	11,025
8	0,825		100	**12,600**	**12,600**	9,450	11,025
9	0,925		100	12,600	12,600	9,450	11,025
10	1,025		100	12,600	12,600	11,025	**12,600**
11	1,125		100	12,600	12,600	**12,600**	11,025
12	1,225		100	12,600	12,600	11,025	12,600
13	1,325		100	12,600	12,600	12,600	12,600
14	1,525	5 × 200 mm	200	11,835	11,835	11,835	12,624
15	1,725		200	11,835	12,624	11,046	12,624
16	1,925		200	12,624	11,835	11,835	11,835
17	2,125		200	11,835	11,046	11,835	11,046
18	2,325		200	11,046	12,624	11,046	12,624



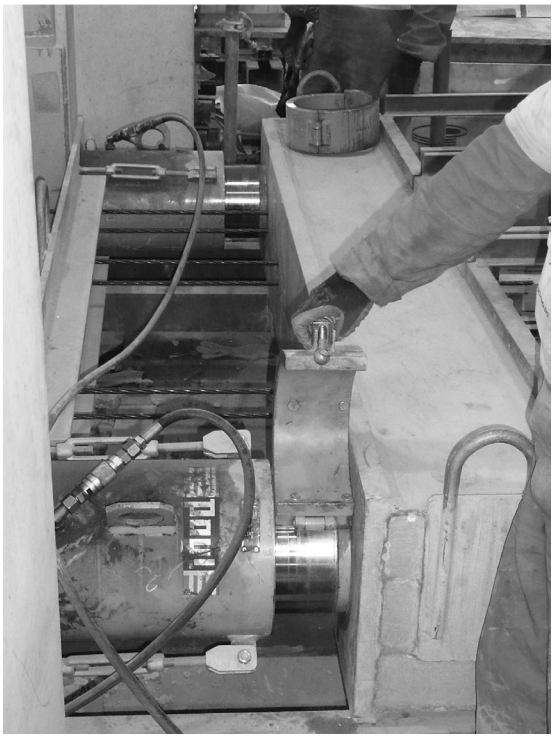
Rys. 9. Ogólny widok prefabrykowanej płyty i rozmieszczenie punktów pomiarowych

Fig. 9. General view of precast panel and localization of measuring points



Rys. 10. Rozkład odkształceń betonu w linii cięgien sprężających 1 i 5

Fig. 10. Concrete strains distribution along the pre-stressing tendons 1 and 5



Rys. 11. Widok zakotwienia biernego przed zwolnieniem siły naciągowej

Fig. 11. General view of passive anchorage before tensioning force released

4. Długości transmisji obliczone wg przedstawionych norm

Na podstawie wzorów przytoczonych w punkcie 2, przynależnych do poszczególnych przedstawionych norm, zostały obliczone długości transmisji i zamieszczone w tabelach 9 i 10. Prezentowane wyniki w tabeli 9 dotyczą 28-dniowej wytrzymałości betonu. Wymienione w niej normy nie uwzględniają zmian długości transmisji w czasie.

Tabela 9

Długości transmisji wg DIN 1045-1, EC2, PN-B-03264: 2002, DIN 4227 i ACI 318

BETON	l_{bp} [mm]				
	EC 2	PN-B-03264: 2002	DIN 1045-1	DIN 4227	ACI
C40/50	774	774	677	903	753
C45/55	710	710	648	839	753
C50/60	645	645	621	774	753
C55/67	–*	–*	597	–*	753

*nie określone przez normę

Tabela 10

Długości transmisji wg PN-EN 1992-1-1: 2004+AC: 2008 oraz Model Code 1990 i 2010

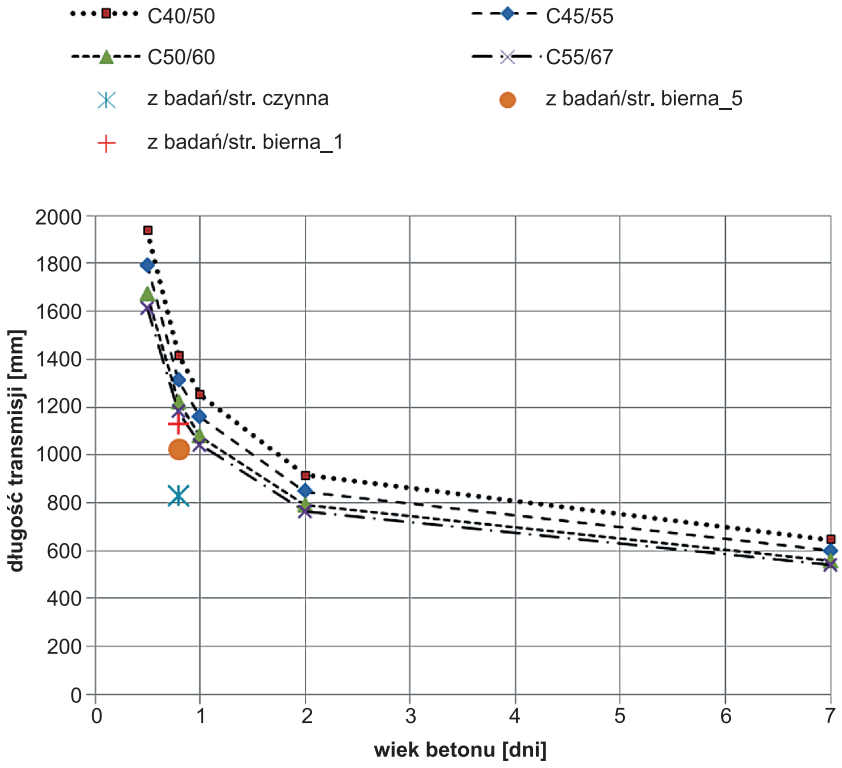
BETON	t	Model Code 2010			EN 1992-1-1: 2004+AC:2008/EC 2008
		l_{bpt} dla $f_{ct,\min}$		l_{bpt} dla f_{ctm}	l_{pt}
		$\alpha_{p2} = 0{,}5$	$\alpha_{p2} = 1{,}0$	$\alpha_{p2} = 1{,}0$	
	dni	mm	mm	mm	mm
C40/50	0,5	1 937	3 874	2 767	1 962
	0,8	1 416	2 832	2 023	1 434
	1	1 250	2 499	1 785	1 266
	2	917	1 833	1 309	929
	7	647	1 294	924	655
	28	530	1 059	757	537
C45/55	0,5	1 794	3 587	2 549	1 807
	0,8	1 311	2 622	1 863	1 321
	1	1 157	2 314	1 644	1 166
	2	849	1 697	1 206	855
	7	599	1 198	851	604
	28	490	981	697	494
C50/60	0,5	1 670	3 340	2 362	1 675
	0,8	1 221	2 441	1 727	1 224
	1	1 077	2 154	1 524	1 081
	2	790	1 580	1 118	793
	7	558	1 115	789	559
	28	457	913	646	458
C55/67	0,5	1 614	3 228	2 306	1 635
	0,8	1 180	2 360	1 686	1 195
	1	1 041	2 083	1 488	1 055
	2	764	1 528	1 091	774
	7	539	1 078	770	546
	28	441	883	631	447

Dla betonu klasy C 55/67 normy nie podają wartości tabelarycznych do określenia długości transmisji.

Model Code i PN-EN 1992-1-1: 2004+AC: 2008 dają możliwość określenia długości transmisji po dowolnym czasie dojrzewania betonu.

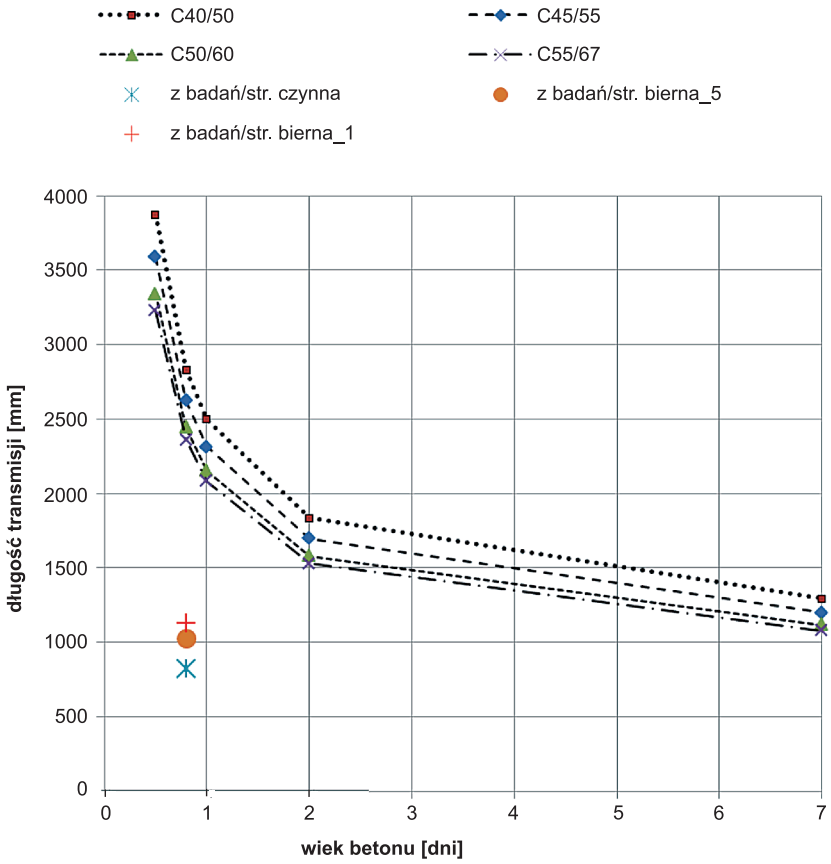
Zależności długości transmisji od wieku dojrzewania betonu w chwili zwolnienia naciągu, dla analizowanych klas betonu, przy przyjęciu współczynnika $\alpha_{p2} = 0{,}5$ i 1,0 przedstawiono odpowiednio na rysunkach na rys. 12 i 13. Na obu rysunkach dodatkowo naniesiono trzy punkty pomiarowe określające długości transmisji, wyznaczone na podstawie pomiarów odkształceń betonu. Punkt dolny oznacza długość transmisji od strony czynnej, natomiast punkt środkowy i górny oznaczają długości transmisji od strony biernej zakotwienia elementu prefabrykowanego.

Zaznaczone na rys. 12 i 13 punkty doświadczalne zostały wyznaczone w oparciu o uzyskany rozkład odkształceń betonu (po 20 godzinach) na długości płyty w osi splotów (tabela 8). Średnie wartości odkształceń betonu obliczone na odcinku między długościami transmisji po stronie czynnej i biernej w liniach pomiarowych 1 i 5 wynoszą odpowiednio: $12{,}03 \cdot 10^{-5}$ oraz $12{,}257 \cdot 10^{-5}$.



Rys. 12. Obliczenie długości transmisji wg wg Model Code 2010 dla $\alpha_{p2} = 0{,}5$

Fig. 12. Transmission length according to Model Code 2010 for $\alpha_{p2} = 0.5$



Rys. 13. Obliczenie długości transmisji wg Model Code 2010 dla $\alpha_{p2} = 1{,}0$

Fig. 13. Transmission length according to Model Code 2010 for $\alpha_{p2} = 1.0$

5. Analiza porównawcza i wynikające wnioski

Normy dotychczasowe Eurocode 2: 1992, PN-B-03264:2002, ACI 318 jak również niemieckie DIN 4227 i DIN 1045-1 podają wzory na określenie długości transmisji niezależnie od czasu wprowadzenia siły sprężającej. W ostatnich latach nastąpił zwrot w podejściu do zagadnienia i nowsze normy wchodzące w życie takie jak Model Code 2010 oraz wcześniejsza MC 1990, jak również EC2 w najnowszym ujęciu, która weszła jako obowiązująca polska norma PN–EN 1992-1-1:2008, pozwalają wyznaczyć długość transmisji po dowolnym czasie tzn. w czasie wczesnego dojrzewania betonu (do 28 dni).

Wartości długości transmisji wynikające z zależności według prezentowanych norm posługujących się wytrzymałością 28-dniową dla betonu klasy C50/60 zawarte są w przedziale od 645 do 774 mm (tabela 9). Obliczone długości transmisji przeprowadzone dla 20 go-

dzinnego okresu dojrzewania betonu klasy C 50/60 wynoszą 1,22 m (α_{p2} = 0,5) i 2,44 m (dla α_{p2} = 1,0) (tabela 10). Wartości długości transmisji dla α_{p2} = 0,5 są większe od uzyskanych doświadczalnie nawet do 48%.

Długości transmisji wyznaczone na podstawie wyników doświadczalnych (rys. 12 i 13) wynoszą 0,825 m po stronie czynnej i 1,025 m oraz 1,125 m po stronie biernej. Maksymalna różnica dochodzi zatem do 36%.

Elementy strunobetonowe są wykonywane w zakładach prefabrykacji na torze naciągowym (również jako elementy indywidualne). Ze względu na charakter produkcji i związane z tym koszty, naciąg zwalniany jest po kilkunastu godzinach. Z tego względu istotnym czynnikiem przy wykonywaniu elementów strunobetonowych jest znajomość długości transmisji w zależności od czasu dojrzewania betonu. Zadaniem projektanta zatem jest określenie czasu, po którym przekazanie siły sprężającej na beton będzie dopuszczalne. Obecnie dwie normy dają taką możliwość tzn. określenie długości transmisji w funkcji czasu MC i EC2 2008 (PN).

Podane zależności normowe pozwalające określić wytrzymałości betonu i moduł sprężystości betonu w czasie krótszym niż 28 dni, nie uwzględniają zastosowanego kruszywa. Należy je stosować w przypadku betonów na kruszywie kwarcytowym. Analizowane elementy prefabrykowane zostały wykonane na kruszywie bazaltowym a zatem należałoby przeprowadzić korektę obliczeń przez opracowanie nowych zależności na rozwój wytrzymałości w czasie i modułu sprężystości.

Badania są kontynuowane z jednoczesną analizą numeryczną w celu określenia rzeczywistego rozkładu naprężeń ściskających w prefabrykowanym elemencie płytowym, w zależności od sposobu rozmieszczenia cięgien w przekroju.

Literatura

[1] CEB-FIP Model Code 1990, Bulletin D'Information N°195, Comité Euro-International du Béton: mars1990.

[2] Eurocode 2: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau, DIN ENV 1992-1-1, 1992.

[3] PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.

[4] DIN 4227-1, Teil 1: Spannbeton; Bauteile aus Spannleichtbeton. Februar 1986.

[5] DIN 1045-1: 07-2001. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion.

[6] DIN 1045-1: 08-2008. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion.

[7] PN-EN 1992-1-1:2004+AC:2008: Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków

[8] ACI 318-02: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and *Commentary (ACI 318R-02) American Concrete Institute*, Detroit 2002.

[9] fib (CEB-FIP) Model Code, fib Bulletin 55, first complete draft, Vol. 1, 2010.

[10] Łapko A., Baj A., *Efekty naprężeń poprzecznych i długość zakotwienia cięgien sprężających w strunobetonie*, Konferencja Naukowo-Techniczna KONSTRUKCJE SPRĘŻONE, 21–23 marca 2012, Kraków.

[11] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) Richtlinie für hochfester Beton, Ergänzung zu DIN 1045/07.88 für die Festigkeitsklassen B 65 bis B115. August 1995.
[12] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVR--Richtlinie), Ergänzung zu DIN 1045. November 2001.
[13] Seruga A., *Kołowe zbiorniki prefabrykowane na wodę sprężone cięgnami zewnętrznymi*, Inżynieria i Budownictwo, 2008, nr 12, 662-665.
[14] Seruga A., *Zbiorniki z prefabrykowanych elementów strunobetonowych sprężone obwodowymi cięgnami bez przyczepności*, nr 2 – Instal, 2008, 41-46.