

# Wpływ osiadania fundamentu na wybraną konstrukcję masztu

Monika Matuszkiewicz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Katedra Konstrukcji Metalowych, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji, Politechnika Koszalińska, e-mail: m.mat@wilsig.tu.koszalin.pl*

**Streszczenie:** W pracy, na przykładzie pewnej realnej konstrukcji masztu o trzonie kratowym, przeprowadzono analizę wpływu osiadania fundamentu centralnego masztu na stan sił i przemieszczeń w maszcie. Obliczenia przeprowadzono dla stanu wstępnego sprzężenia i obciążenia konstrukcji wiatrem. Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń statycznych sformułowano pewne uwagi i wnioski końcowe, które mogą znaleźć zastosowanie w praktycznym projektowaniu masztów.

**Słowa kluczowe:** maszt z odciągami, trzon kratowy, osiadanie fundamentu

## 1. Wprowadzenie

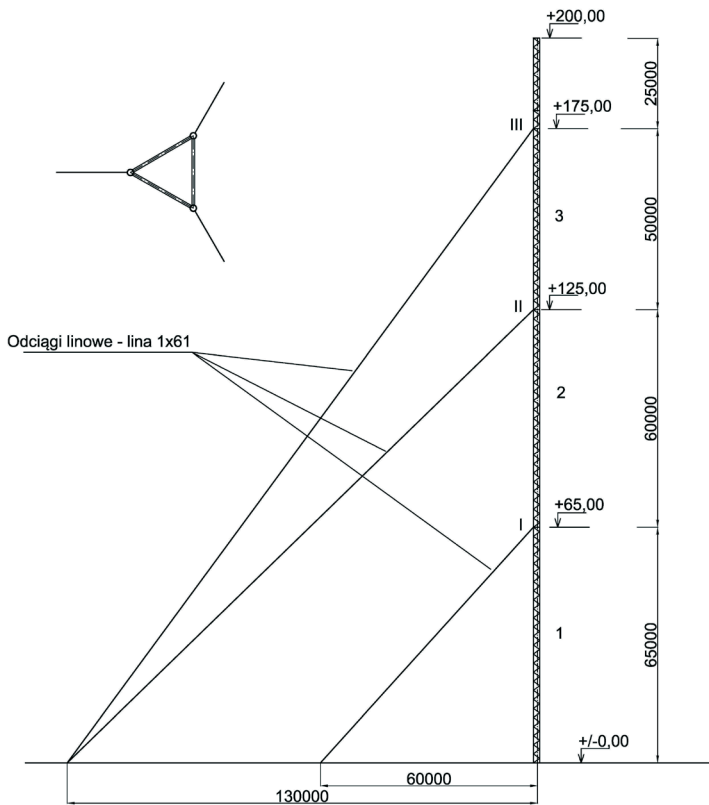
Zgodnie z zaleceniami normy [1], w uzasadnionych przypadkach należy uwzględnić w projektowaniu masztów oddziaływania spowodowane osiadaniem fundamentów. Oddziaływania te mogą mieć znaczenie w sytuacjach, gdy osiadanie podstawy trzonu masztu i fundamentów odciągów jest zróżnicowane. Ma to często miejsce, gdy projektuje się masywne, skrzyniowe fundamenty pod odciaży, których ciężar niweluje wypadkową siłę wyrwywającą od zakotwionych lin.

Osiadanie jest wynikiem między innymi procesów konsolidacyjnych zachodzących w gruncie pod wpływem zewnętrznego obciążenia. W gruntach niespoistych proces osiadania pod wpływem ciężaru własnego konstrukcji praktycznie przebiega w czasie budowy i z końcem budowy osiąga wartość końcową. Uregulowanie zatem odpowiednich (założonych na etapie projektowania) sił wstępnego napięcia odciągów masztu następuje już po tym procesie. W gruntach spoistych, w których ze względu na małą przepuszczalność utrudniony jest odpływ wody z przestrzeni porowych, proces konsolidacji może być bardzo powolny i długi, a pełną konsolidację gruntu osiąga się nawet po kilkunastu latach. W takim przypadku może okazać się, że założone wartości sił napinających odciaży są po pewnym czasie od zakończenia budowy nieaktualne, a spadek sił w odciągach zmienia sztywności podpór sprężystych w trzonie masztu, co wpływa na zachowanie całej konstrukcji. W pracy, na przykładzie pewnego masztu, przeanalizowano wpływ osiadania podstawy masztu na stan sił i przemieszczeń konstrukcji masztu.

## 2. Analiza porównawcza

### 2.1. Opis konstrukcji masztu

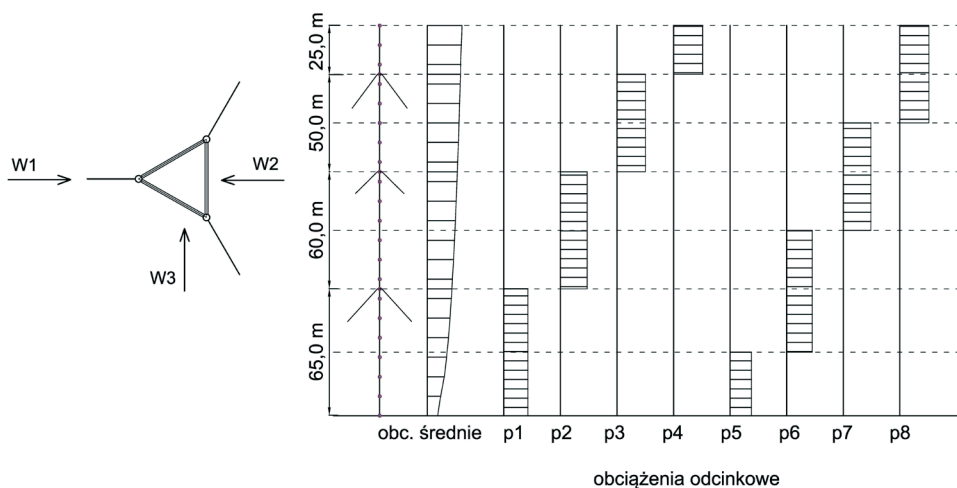
Trzon masztu wysokości 200 m zaprojektowano w postaci stalowej, trójściennej kratownicy przestrzennej o szerokości boku  $a = 2,0$  m (rys. 1). Krawężniki zaprojektowano z rur  $\emptyset 168,3/12,5$  mm, a skratowanie z rur  $\emptyset 76,1/4,0$  mm. Linowe odciaży, zamocowane na poziomach 65,0 m, 125,0 m i 175,0 m, są zaprojektowane z lin średnicy  $\emptyset 32$  mm o konstrukcji 1 x 61, wytrzymałości  $R_r = 1570$  MPa i minimalnej sile zrywającej równej 823,0 kN. Wartości sił wstępnego napięcia odciągów na wszystkich poziomach są jednakowe i wynoszą 75 kN (zgodnie z [1] – nie przekraczają 10% wartości siły zrywającej odciaży). Trzon masztu został podzielony na segmenty montażowe długości 10,0 m łączone doczołowo na śruby wysokiej wytrzymałości.



Rys. 1. Schemat masztu

## 2.2. Oddziaływania

W obliczeniach uwzględniono ciężar własny konstrukcji, pominięto natomiast, ze względu na uproszczenie obliczeń, obciążenia związane z wyposażeniem masztu. Lokalizację masztu przyjęto w 2. strefie obciążenia wiatrem zgodnie z [2], na terenie kategorii II. Bazowa wartość ciśnienia prędkości wiatru dla strefy 2. wynosi  $0,42 \text{ kN/m}^2$ . Maszt został zakwalifikowany do 2. klasy niezawodności, stąd współczynniki częściowe od obciążeń przyjęto o wartościach  $\gamma_G = 1,1$  dla obciążeń stałych i  $\gamma_W = 1,4$  dla obciążenia wiatrem. Schemat obciążenia wiatrem konstrukcji masztu przyjęty zgodnie z [1], przedstawiono na rys. 2. Schemat ten składa się z dwóch rodzajów obciążenia: z obciążenia średniego na całej wysokości masztu oraz – dodatkowo – z tzw. obciążeń odcinkowych działających tylko na pewne fragmenty masztu.



Rys. 2. Schematy i kierunki obciążenia wiatrem masztu zgodnie z [1]

### 2.3. Obliczenia statyczne

Obliczenia przeprowadzono przy wykorzystaniu programu Mast, opisanego w [3]. Zastosowano globalną analizę sprężystą według teorii II rzędu, z uwzględnieniem nieliniowych właściwości odciągów. Kratowy trzon masztu zastąpiono w obliczeniach numerycznych pełnościennym prętem o odpowiednich charakterystykach geometryczno-wytrzymałościowych, z uwzględnieniem podatności na ściskanie, zginanie, ścinanie i skręcanie. Zakres obliczeń obejmował analizę statyczną konstrukcji w stanie wstępnego sprężenia oraz w stanie obciążenia wiatrem. Ze względu na dużą prędkość obliczeń uwzględniono tylko kierunek obciążenia wiatrem W2, dla którego konstrukcja ma najmniejszą sztywność (rys. 2). W obu stanach obciążenia konstrukcji przeprowadzono obliczenia z uwzględnieniem następujących wartości osiadania fundamentu trzonu masztu:  $w = 0$  cm (brak osiadań),  $w = 1$  cm,  $w = 2$  cm,  $w = 3$  cm,  $w = 5$  cm i  $w = 10$  cm.

W obliczeniach masztu od obciążenia wiatrem zastosowano procedurę wyznaczania ekstremalnych sił wewnętrznych w elementach konstrukcji masztu zgodnie z [1]. Procedura ta jest dość skomplikowana i polega na obliczeniu masztu od średniego obciążenia wiatrem i szeregu kombinacji tego obciążenia z kolejnymi obciążeniami odcinkowymi (por. np. [4]).

### 2.4. Wyniki obliczeń

Obliczenia przeprowadzono osobno dla stanów granicznych nośności i użyteczności. Poniżej zestawiono uzyskane ekstremalne wartości sił wewnętrznych w elementach konstrukcji masztu: w tab. 1 i 2 wartości sił podłużnych w przęsłach trzonu masztu w stanie wstępnego sprężenia i obciążenia wiatrem, w tab. 3 i 4 wartości momentów zginających w trzonie masztu w sytuacji obciążenia wiatrem – odpowiednio momenty przęsłowe i podporowe, a w tab. 5 i 6 podano wartości sił w odciągach masztu w stanie wstępnego sprężenia i w stanie obciążenia wiatrem.

Tablica 1. Wartości sił podłużnych [kN] w przęsłach trzonu masztu w stanie wstępnego sprężenia

Przęsło	Wartości osiadań fundamentu trzonu masztu [cm]					
	$w = 0$	$w = 1$	$w = 2$	$w = 3$	$w = 5$	$w = 10$
1	-1112,0	-990,4	-969,6	-949,8	-913,7	-845,4
2	-688,3	-680,3	-672,5	-665,0	-650,7	-618,9
3	-373,7	-369,5	-365,4	-361,5	-353,9	-337,0

Tablica 2. Wartości sił podłużnych [kN] w przęsłach trzonu masztu w stanie obciążenia wiatrem – kierunek działania wiatru W2

Przęsło	Wartości osiadań fundamentu trzonu masztu [cm]					
	w = 0	w = 1	w = 2	w = 3	w = 5	w = 10
1	-1121,5	-1110,9	-1101,3	-1092,8	-1076,8	-1046,7
2	-787,2	-784,9	-782,6	-780,7	-777,8	-779,5
3	-455,9	-456,8	-457,6	-458,7	-461,3	-472,7

Tablica 3. Wartości momentów zginających [kNm] w trzonie masztu – momenty przęsłowe (kierunek działania wiatru W2)

Przęsło	Wartości osiadań fundamentu trzonu masztu [cm]					
	w = 0	w = 1	w = 2	w = 3	w = 5	w = 10
1	-630,7	-641,5	-655,2	-670,1	-700,3	-782,8
2	-579,9	-598,6	-616,9	-636,4	-676,8	-791,1
3	634,6	654,4	671,6	689,1	727,1	830,9

Tablica 4. Wartości momentów zginających [kNm] w trzonie masztu – momenty podporowe w miejscach zamocowania odciągów (kierunek działania wiatru W2)

podpora	Wartości osiadań fundamentu trzonu masztu [cm]					
	w = 0	w = 1	w = 2	w = 3	w = 5	w = 10
I	514,7	496,7	477,7	459,5	426,9	349,8
II	788,6	809,9	828,5	848,3	1107,8	1027,6
III	528,4	528,7	530,5	532,5	537,3	549,7

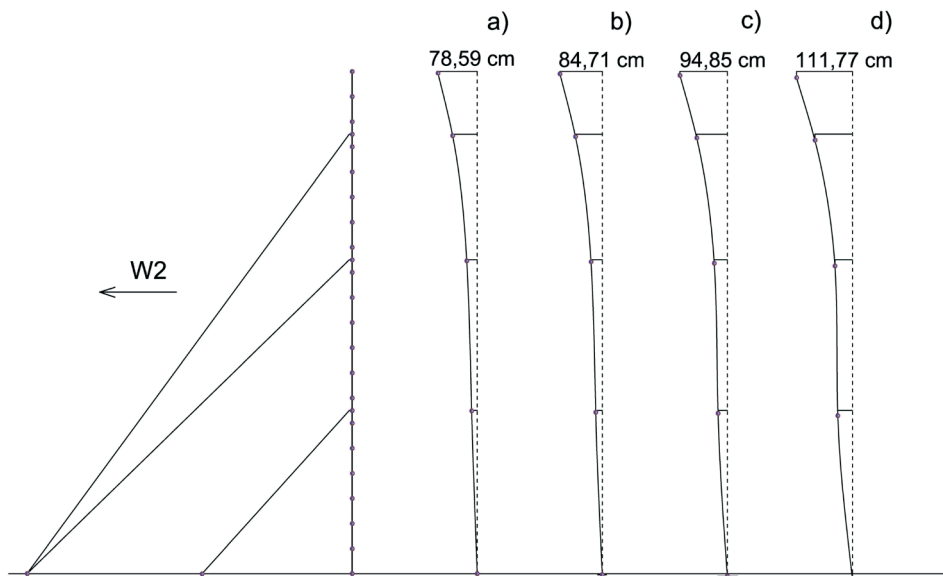
Tablica 5. Maksymalne wartości sił [kN] w odciągach masztu w stanie wstępnego sprzężenia

Poziom odciągów	Wartości osiadań fundamentu trzonu masztu [cm]					
	w = 0	w = 1	w = 2	w = 3	w = 5	w = 10
I	76,2	70,1	64,3	58,7	48,9	32,5
II	77,7	75,9	74,1	72,4	69,2	62,1
III	79,7	77,9	76,3	74,6	71,5	64,5

Tablica 6. Maksymalne wartości sił [kN] w odciągach masztu w w stanie obciążenia wiatrem – kierunek działania wiatru W2

Poziom odciągów		Wartości osiadań fundamentu trzonu masztu [cm]					
		w = 0	w = 1	w = 2	w = 3	w = 5	w = 10
I	Odciąg nawietrzny	139,1	139,1	139,8	140,5	141,5	142,5
	Odciąg zawietrzny	73,1	62,4	52,4	43,9	32,1	20,1
II	Odciąg nawietrzny	130,1	129,0	128,2	127,2	125,6	121,8
	Odciąg zawietrzny	64,9	62,4	59,7	56,9	51,6	40,8
III	Odciąg nawietrzny	166,5	166,4	165,9	165,6	165,0	164,7
	Odciąg zawietrzny	49,1	52,1	50,4	48,0	44,5	46,5

Uzyskane na podstawie obliczeń numerycznych wartości przemieszczeń trzonu masztu w stanie obciążenia wiatrem przedstawiono w formie graficznej na rys. 3.



Rys. 3. Przesunięcia trzonu masztu od obciążenia wiatrem i pionowego osiadania fundamentu: a)  $w = 0$ , b)  $w = 2$  cm, c)  $w = 5$  cm, d)  $w = 10$  cm

### 3. Uwagi i wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonej analizy wpływu osiadania fundamentu centralnego masztu na stan sił i przemieszczeń konstrukcji można stwierdzić, że już stosunkowo nieduże wartości przemieszczeń pionowych trzonu masztu powodują znaczące spadki sił wstępnego napięcia odciągów i tym samym wpływają na zmniejszenie sztywności podpór sprężystych trzonu masztu. Można przy tym zauważyć, że im niższy poziom zamocowania odciągów, tym bardziej znaczące są w nich spadki sił. Przykładowo, obliczone dla stanu wstępnego sprężenia maksymalne wartości sił w odciągach najwyższych, po uwzględnieniu osiadania fundamentu  $w = 3$  cm, zmniejszyły się od 79,7 kN do 74,6 kN (około 6,5 %), podczas gdy wartości sił w odciągach najniższych zmniejszyły się aż o 23 % (z 76,2 kN do 58,7 kN). Osiadanie fundamentu o wartości 5 cm powoduje oczywiście jeszcze większy spadek sił wstępnego napięcia, który dla najniższego odciągu wyniósł ponad 35 %. Przy dodatkowym obciążeniu wiatrem uwzględnienie osiadania fundamentu ma wpływ na wzrost przede wszystkim momentów przesłowych w trzonie masztu. Przykładowo, przy osiadaniu fundamentu o wartości 3 cm procentowy wzrost momentów zginających w przesłach trzonu masztu, w stosunku do obliczeń nieuwzględniających tego osiadania, wynosi ponad 6 % dla pierwszego przesła, ponad 9 % dla przesła drugiego i ponad 8 % dla przesła trzeciego.

Osiadanie fundamentu ma mniejszy wpływ na spadek maksymalnych sił w odciągach w sytuacji, gdy konstrukcja poddana jest działaniu wiatru (dotyczy to oczywiście odciągów po stronie nawietrznej – wartości sił w odciągach po stronie zawietrznej przy niektórych obciążeniach odcinkowych spadały praktycznie do zera). Można to wytłumaczyć w ten sposób, że pod wpływem tego obciążenia maszt osiągnie pewną sztywność, choć ze względu na spadek sił wstępnego napięcia w odciągach konstrukcja będzie bardziej wychylona od pionu, niż by to miało miejsce w przypadku braku osiadania fundamentu. Większe przemieszczenia poziome trzonu masztu mogą stanowić problem w przypadku, gdy maszt jest wyposażony w aparaturę (np. anteny) wrażliwą na takie przemieszczenia.

Osiadanie centralnego fundamentu masztu o 3 ÷ 5 cm w dłuższym czasie jest realne i szczególnie może dotyczyć masztów posadowionych na nieskonsolidowanych gruntach spoistych, typu ily lub gliny, o dużym stopniu wilgotności.

## Literatura

- 1 PN-EN 1993-3-1. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-1: Wieże, maszty i kominy. Wieże i maszty.
- 2 PN-EN 1991-1-4. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru.
- 3 Pałkowski Sz. Konstrukcje stalowe. Wybrane zagadnienia obliczania i projektowania. PWN, Warszawa 2009.
- 4 Matuszkiewicz M. Obliczanie kratowych masztów z odciągami według PN-EN 1993-3-1. Inżynieria i Budownictwo 4 (2010) 194-199.

## An influence of foundation settlement on the selected mast structure

Monika Matuszkiewicz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Department of Steel Structures, Faculty of Civil and Environmental Engineering and Geodesy, Koszalin University of Technology, e-mail: m.mat@wilsig.tu.koszalin.pl*

**Abstract:** The influence of the mast foundation settlement on the static behaviour of the mast structure was analyzed on the basis of a lattice shaft mast. The calculations were made for the pre-stress condition and wind-load condition of the structure. Basing on the results of static calculations some remarks and conclusions were drawn.

**Keywords:** guyed mast, lattice shaft, foundation settlement