



MARCIN SKWAREK, [marcin.skwarek@pracowniaprojektowa.com.pl](mailto:marcin.skwarek@pracowniaprojektowa.com.pl)

Pracownia Projektowa M.Skwarek, J.Hulimka Sp. J.

JACEK HULIMKA, [jacek.hulimka@polsl.pl](mailto:jacek.hulimka@polsl.pl)

Politechnika Śląska w Gliwicach, Katedra Inżynierii Budowlanej

## **STALOWA, KRATOWA WIEŻA TELEKOMUNIKACYJNA ZAGROŻONA AWARIĄ? O OCENIE NOŚNOŚCI WIEŻ W DIAGNOSTYCE KONSTRUKCJI**

### **IS THE STEEL LATTICED TOWER FOR TELECOMMUNICATION THREATENED FAILURE? ABOUT ESTIMATE OF LOAD CAPACITY OF LATTICED TOWERS IN DIAGNOSTICS OF CONSTRUCTIONS**

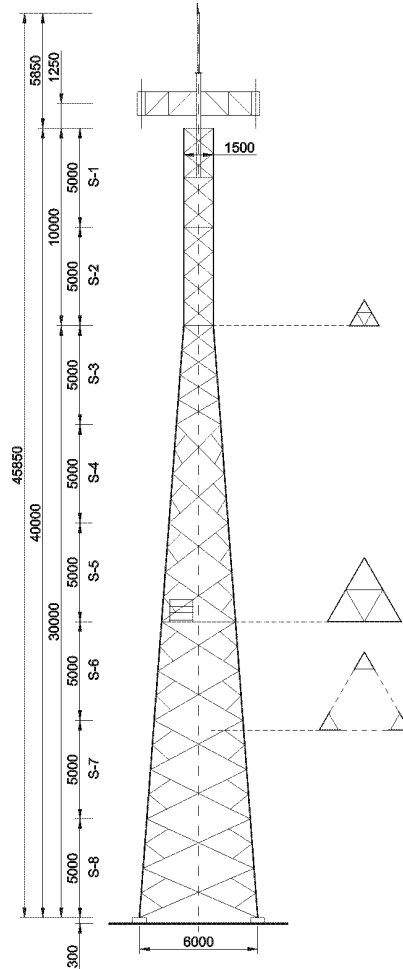
**Streszczenie** Referat ten powstał na bazie sięgających blisko dziesięć lat wstecz doświadczeń autorów dotyczących opisywanego obiektu, a związanych z wykonywanymi ekspertyzami czy też opracowaniami projektowymi. W roku 2008, w efekcie prac innego zespołu autorskiego, które wykazały zagrożenie utratą nośności i stateczności krawężników wieży, konstrukcja została wzmocniona. Ostatnie prace własne związane z oceną możliwości dodatkowego obciążenia przedmiotowej konstrukcji, a wykonywane w obliczu wprowadzenia norm „Eurokod”, lecz z dyskusyjną zdaniem autorów możliwością stosowania Norm Polskich, ujawniają niesłychanie dużą rozbieżność wyników obliczeń. Okazuje się bowiem, że obecnie konstrukcja, nawet bez uwzględnienia wykonanego wzmocnienia, posiada rezerwy nośności – różne, w zależności od przyjmowanych regulacji normowych. W podsumowaniu zawarto postulat o konieczności jednoznacznego ustanowienia norm PN-EN jako jedynych obowiązujących.

**Abstract** This paper has been created based on ten years backwards experience of authors concerning an object described here, but with executable expertises relate as well as project elaboration. In year 2008, in effect of other work of author group, which have indicated threat loss of capacity and stability of tower legs, construction has been strengthened. Last personal work related with estimate of additional capability of objective load of construction, but execute in face of introduction of norm „Eurocode”, but in author's opinion with discussion capability of application of Polish Codes, they expose big divergence of results of account. So, it turns out, that construction has reserve of load capacity even without taking into consideration executed reinforcement presently – different, depending on code regulations assumptions. In recapitulation is included a postulate about necessity unequivocal establishment PN-EN codes as sole obligatory.

### **1. Opis obiektu i jego historia**

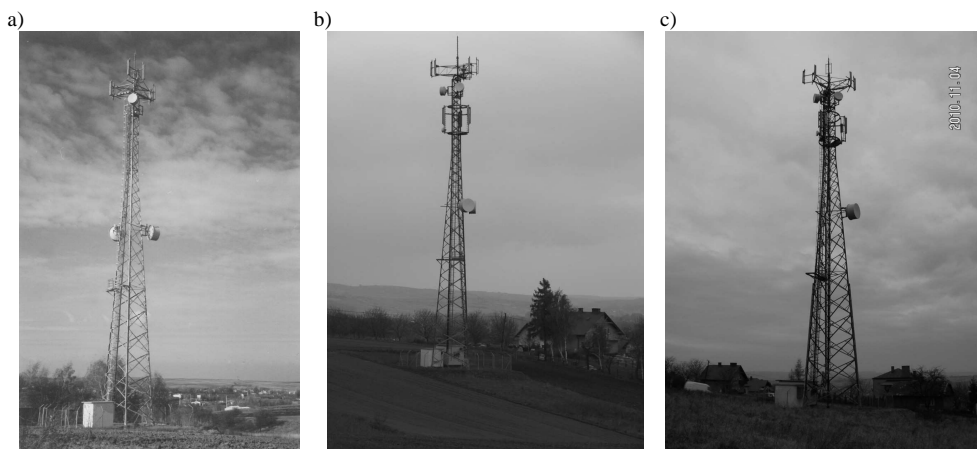
Przedstawiony obiekt to stalowa wieża telekomunikacyjna o łącznej wysokości niespełna 46 m. Zasadniczą jej konstrukcję stanowi trzon kratowy o wysokości 40 m, zbudowany na planie trójkąta równobocznego, wykonany w całości z walcowanych kątowników równoramiennych. Przekrój krawężników, począwszy od L90×90×11, zwiększa się ku dołowi, do L150×150×15. Skratowania natomiast mają przekroje od L40×40×4 do L90×90×6. Połączenia elementów trzonu, zarówno styki montażowe krawężników jak i połączenia skra-

towań, wykonano jako skręcane śrubami, zakładkowe. Mimo trójkątnego rzutu podstawy wieży zastosowano tu przepony (tężniki) poziome, spinając także ze sobą węzły sąsiednich ścian, w miejscu połączenia skratowań drugorzędnych z krzyżulcami głównymi. Trzon posadowiono na trzech niezależnych stopach fundamentowych, łącząc je z krawężnikami poprzez połączenia przegubowe (sworznie). Wieża posiada nadbudowaną głowicę, wspierającą się na centralnym słupie pełnościennym (rura okrągła) zamocowanym w trzonie kratowym. Jest to element przeznaczony do montażu anten.



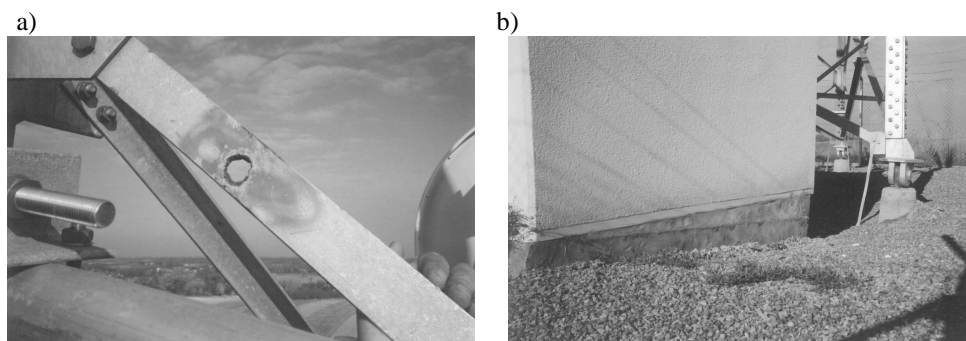
Rys. 1. Sylwetka wieży, podstawowe wymiary i oznaczenie segmentów trzonu

Obiekt wzniesiony został w roku 2000, na podstawie dokumentacji projektowej datowanej na luty tegoż roku. W tym samym roku, jesienią, miała miejsce pierwsza z prac wykonywanych przez autorów referatu. Opracowano wtedy ekspertyzę określającą możliwość montażu dodatkowych instalacji antenowych – ponad pierwotnie planowane i zamontowane w trakcie budowy wieży. Wobec pozytywnych wyników wykonanych wówczas obliczeń dopuszczono do realizacji planowanego zamierzenia, wykonując także projekt konstrukcji wsporczych i pomostu obsługowego dla nowych anten.



Rys. 2. Widok wieży w kolejnych latach: a) rok 2000; b) rok 2006; c) rok 2010

Pomimo krótkiej wówczas historii obiektu, nie był on pozbawiony wad wykonawczych. Najistotniejsze z nich to wypalenie otworu w pręcie skratowania celem montażu drążka usztywniającego czasę anteny linii radiowej  $\phi$  1,8 m (rys. 3a) oraz niedostateczne zagęszczenie gruntu przy zasypywaniu wykopu, po wykonaniu fundamentów wieży (rys. 3b). Ta druga wada ujawniła się w silnym osiadaniu żelbetowego kontenera ustawionego obok wieży, skutkującym koniecznością nadbetonowania jego fundamentów. W ekspertyzie zalecono naspawanie nakładki w miejscu wypalonego otworu oraz uzupełnienie gruntu zasypowego w miejscach obserwowanych osiadań.



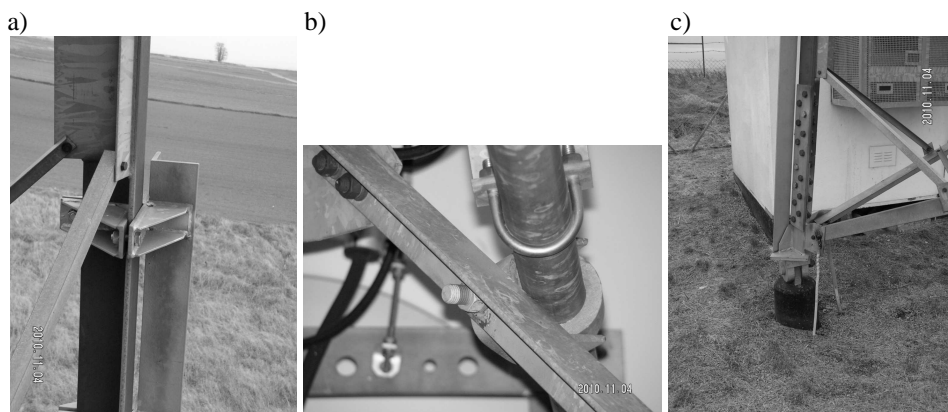
Fot. 3. Istotne wady zauważone podczas przeglądu w 2000 r. (opis w tekście)

Kolejna styczność autorów z przedmiotowym obiektem miała miejsce w roku 2006, kiedy przeprowadzono analizę możliwości montażu kolejnych anten, w obrębie zaprojektowanych wcześniej przez siebie konstrukcji wsporczych. Wykonane obliczenia ponownie przyniosły pozytywny rezultat, wobec czego prace zakończono dokumentacją techniczną dotyczącą montażu planowanych instalacji antenowych.

Kolejny rozdział w historii obiektu to rok 2008 i prace projektowe wykonane przez inny zespół autorski. Przeprowadzona w tym czasie analiza obliczeniowa konstrukcji, pod kątem kolejnego zamierzenia polegającego na rozbudowie systemów antenowych, ujawniła istotne (1,21) przekroczenie nośności obliczeniowej (stateczności) krawężników wieży w dolnej części trzonu, w segmencie S-7. Choć nie napisano tego wprost, z przedstawionego wyciągu

z obliczeń wnioskować można o niedostatecznej nośności elementów trzonu wieży także w stanie wówczas zastanym – co ważne, przed realizacją zamierzenia z 2006 r. Wobec takich wniosków Inwestor zlecił zaprojektowanie i wykonanie wzmocnień krawężników wieży, co zrealizowane zostało poprzez rozbudowę przekroju krawężnika do dwugałęzowego (usztynwienie), w trzech najniższych segmentach wieży.

Opis historii obiektu kończą tu wnioski z przeglądu wykonanego ponownie przez autorów referatu – w listopadzie roku 2010. Wizytacja obiektu, jak i każdorazowo wcześniej, związana była z planowanym montażem kolejnych anten. Stan jaki zastano, to zrealizowane wszystkie poprzednie zamierzenia związane z modernizacją lub rozbudową instalacji antenowych oraz wzmocnione krawężniki wieży w segmentach S-8, S-7 i częściowo S-6.



Rys. 4. Fotografie z przeglądu konstrukcji wykonanej w roku 2010

Tablica 1. Specyfikacja instalacji antenowych (liczba szt., rozmiar, wys. npt. – opis w tekście)

| Rodzaj instalacji      | Rok 2000   | Rok 2006   | Rok 2008  | Rok 2010   |
|------------------------|--|--|---|--|
| Anteny linii radiowych | 2szt., $\phi$ 1,2 m, 38,5 m<br>2szt., $\phi$ 1,8 m, 22,5 m<br>1szt., $\phi$ 0,6 m, 33,9 m  | 2szt., $\phi$ 1,2 m, 38,5 m<br>2szt., $\phi$ 1,8 m, 22,5 m<br>1szt., $\phi$ 0,6 m, 33,9 m<br>1szt., $\phi$ 0,6 m, 38,5 m | 2szt., $\phi$ 1,2 m, 38,5 m<br>1szt., $\phi$ 1,8 m, 22,5 m<br>1szt., $\phi$ 1,8 m, 22,5 m<br>1szt., $\phi$ 0,6 m, 38,5 m<br>1szt., $\phi$ 0,6 m, 33,9 m<br>1szt., $\phi$ 1,2 m, 22,5 m<br>1szt., $\phi$ 0,3 m, 38,5 m | 2szt., $\phi$ 1,2 m, 38,5 m<br>1szt., $\phi$ 1,8 m, 22,5 m<br>1szt., $\phi$ 0,6 m, 38,5 m<br>1szt., $\phi$ 0,6 m, 33,9 m<br>1szt., $\phi$ 0,6 m, 22,5 m                                  |
| Anteny panelowe        | 6szt., 1,93×0,26 m, 41,5 m<br>6szt., 2,25×0,26 m, 35,9 m                                   | 6szt., 1,93×0,26 m, 41,5 m<br>6szt., 2,25×0,26 m, 35,9 m<br>3szt., 1,32×0,34 m, 35,9 m                                   | 6szt., 1,93×0,26 m, 41,5 m<br>6szt., 2,25×0,26 m, 35,9 m<br>3szt., 1,32×0,34 m, 35,9 m<br>3szt., 1,40×0,20 m, 43,7 m  | 6szt., 1,93×0,26 m, 41,5 m<br>6szt., 2,25×0,26 m, 35,9 m<br>3szt., 1,32×0,34 m, 35,9 m<br>3szt., 1,40×0,20 m, 43,7 m<br>3szt., 2,00×0,60 m, 31,0 m                                       |
| Kable antenowe         | 3×2szt., $d = 28$ mm<br>4×2szt., $d = 16$ mm<br>3×2szt., $d = 28$ mm<br>1szt., $d = 16$ mm | 3×2szt., $d = 28$ mm<br>5×2szt., $d = 16$ mm<br>3×2szt., $d = 28$ mm<br>1szt., $d = 16$ mm<br>3×2szt., $d = 28$ mm       | 3×2szt., $d = 28$ mm<br>5×2szt., $d = 16$ mm<br>3×2szt., $d = 28$ mm<br>1szt., $d = 16$ mm<br>3×2szt., $d = 28$ mm<br>3×2szt., $d = 50$ mm<br>1szt., $d = 16$ mm  | 3×2szt., $d = 28$ mm<br>4×2szt., $d = 16$ mm<br>3×2szt., $d = 28$ mm<br>1szt., $d = 16$ mm<br>3×2szt., $d = 28$ mm<br>3×2szt., $d = 50$ mm<br>2×3szt., $d = 16$ mm<br>1szt., $d = 16$ mm |
| Przypadek obciążenia   | P1   | P2   | P3  | P4   |

Detal wykonania wzmocnienia (usztywnienia) krawężników przedstawia rys. 4a. Stwierdzono ponadto, iż powstałe zapadlisko w obrębie kontenera technicznego nadal nie zostało zlikwidowane (rys. 4c), a wypalony otwór w krzyżulcu nie został zaślepiony, a wykorzystany do montażu drążka usztywniającego reflektor anteny linii radiowej (rys. 4b).

Opis historii obiektu uzupełnia tablica 1, gdzie przedstawiono specyfikację systemów antenowych w kolejnych latach. Każdorazowo podkreślenie opisu części instalacji antenowej linią przerywaną oznacza, iż jest to element planowany w danym okresie. Odpowiednio, przekreślenie opisu oznacza planowany demontaż elementu. Dodatkowo, w ostatnim wierszu tablicy, zamieszczono nazwę przypadku obciążenia, co wykorzystane zostanie w opisie wykonanych obliczeń.

## 2. Opis przeprowadzonych obliczeń

Rozpatrywany obiekt położony jest na Pogórze Rzeszowskim, w paśmie granicznym strefy obciążenia wiatrem. Do obliczeń przyjmowano następujące założenia:

- strefa obciążenia wiatrem wg [1] – III,
- strefa obciążenia wiatrem wg [3] – 3,
- rzędna terenu – 245 m npm.,
- kategoria terenu wg [1] – A,
- kategoria chropowatości terenu wg [3] – II,
- średni stopień bezpieczeństwa konstrukcji wg [4],
- normalna klasa niezawodności wg [5],
- pośrednia (2) klasa niezawodności konstrukcji wg [6].

Dla wykonanych obliczeń i dalszej analizy ich wyników, istotnym jest fakt dwukrotnej zmiany norm projektowych w trakcie eksploatacji konstrukcji. Rozpatrywano tu zatem wyniki obliczeń prowadzonych w sześciu przypadkach, stosownie dla wymienionych w tablicy 1 układów obciążenia od instalacji antenowych. Uwzględnione przypadki obliczeniowe zestawiono poniżej.

Tablica 2. Zestawienie przypadków obliczeniowych

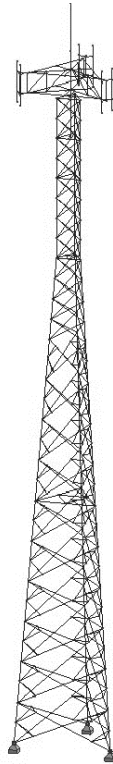
| Oznaczenie przypadku obliczeniowego | A        | B        | C        | D        | E             | F        |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|---------------|----------|
| Układ obciążeń                      | P1       | P2       | P3       | P4       | P4            | P4       |
| Stosowane normy                     | [1], [4] | [1], [5] | [1], [5] | [3], [6] | [1], [2], [5] | [1], [5] |

Pierwsze dwa z podanych przypadków dotyczą archiwalnych prac własnych. Przypadek obliczeniowy „C” to przeprowadzone na potrzeby referatu obliczenia własne, wg założeń przyjętych przez inny zespół autorski do obliczeń w roku 2008, na podstawie których wykonano później wzmocnienia. Kolejny przypadek „D” to praca związana z bieżącym zleceniem Inwestora, natomiast dwa ostatnie wprowadzono dla porównania wyników obliczeń uzyskiwanych na podstawie różnych przepisów normowych.

Temat metodyki obliczeń wg wszystkich przywołanych tu norm, poruszony został i znakomicie przedstawiony w pracy [7]. Nie sposób jest w tym miejscu zacytować bądź przedstawić podobny, tak obszerny materiał. Autorzy niniejszej pracy chcą jednak zaznaczyć, że podane w [7] procedury wg norm [3] i [6] to tylko jedna z możliwych ścieżek postępowania. Przywoływane tu normy PN-EN podają w wielu miejscach możliwość alternatywnego rozwiązania, co nie pozostaje obojętne dla wyniku obliczeń. Istotnymi różnicami wykonywanych tu analiz wg norm „Eurokod” w stosunku do procedury opisanej w artykule [7] są:

- zastosowanie logarymicznego profilu prędkości wiatru wg rozdziału 4 normy [3], w miejsce podanego w załączniku krajowym profilu zapisanego funkcją potęgową,
- przeprowadzenie obliczeń i wyznaczenie rzeczywistej wartości współczynnika odpowiadzi pozarezonansowej  $B^2$  w miejsce przyjmowanej (bezpiecznej wg [3]) wartości  $B^2 = 1$ ,
- uwzględnienie współczynnika redukcyjnego  $K_A$  przy wyznaczaniu współczynników siły oddziaływania wiatru (w tym dla konstrukcji) zgodnie z warunkami przedstawionymi w pkt. B.2.3. normy [6],
- zastosowanie częściowych współczynników oddziaływań zgodnie z przyjętą klasą niezawodności konstrukcji, wg tablicy A.2. normy [6] (np.: w tym wypadku dla obciążenia wiatrem  $\gamma_0 = 1,4$ ).

Obliczenia prowadzono z zastosowaniem licencjonowanego oprogramowania Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2011 (wcześniej, w przypadku prac archiwalnych Robot Millennium). Stosowano przestrzenny model konstrukcji, uwzględniając uciążlenie krawężników wieży oraz głównych elementów skratowania (krzyżulców).



Rys. 5. Model obliczeniowy wieży

### 3. Wyniki obliczeń w aspekcie różnych przepisów normowych

Podstawowe wyniki obliczeń wyprowadzono w postaci największego współczynnika wykorzystania nośności krawężników trzonu kratowego wieży, jak również największego sprężystego przemieszczenia wierzchołka konstrukcji kratowej pod działaniem wiatru. Wyniki te zestawiono w tablicy poniżej.

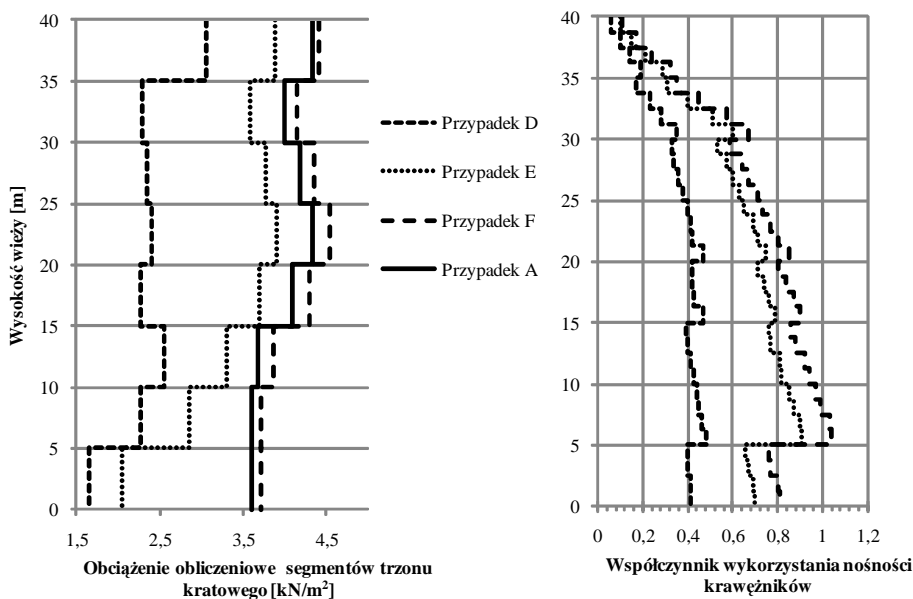
Tablica 3. Zestawienie podstawowych wyników obliczeń

| Oznaczenie przypadku obliczeniowego                        | A    | B    | C    | D    | E    | F    |
|--|------|------|------|------|------|------|
| Największy współczynnik wykorzystania nośności krawężnika  | 0,91 | 0,96 | 0,97 | 0,48 | 0,91 | 1,04 |
| Największe przemieszczenie poziome wierzchołka trzonu [cm] | 18,5 | 19,7 | 20,5 | 14,7 | 16,5 | 21,8 |

Zaznaczyć należy, że obliczenia we wszystkich wymienionych przypadkach przeprowadzone zostały bez uwzględnienia zaprojektowanych i wykonanych w roku 2008 wzmocnień. Nośność (stateczność) prętów skratowania we wszystkich przypadkach jest wystarczająca.

W analizie przedstawionych wyżej wyników wg kolejności opisanych przypadków obliczeniowych, konieczne jest w pierwszym rzędzie skomentowanie wyników otrzymanych dla przypadku „C”. Jest to bowiem przypadek analizowany uprzednio przez inny zespół autorski (2008 r.), na podstawie których to analiz postawiony został wniosek o konieczności wzmocnienia wieży (największy wsp. wykorzystania nośności 1,21). Wnikliwa lektura wspomnianego opracowania ujawnia przyczyny tak znacznej rozbieżności wyników. Otóż jego autorzy znacznie przeszacowali obciążenia, nie stosując w swoich obliczeniach współczynnika redukcyjnego do współczynnika oporu aerodynamicznego wg normy [5] (dotyczy drabin), traktując przy tym głowicę wieży jako zbiór pojedynczych kształtowników ułożonych w jednej płaszczyźnie (sumując powierzchnie), gdzie w rzeczywistości jest to przestrzenny ustrój kratowy o podstawie trójkąta równobocznego.

Najistotniejsze z punktu widzenia tematu niniejszej pracy jest jednak porównanie wyników obliczeń uzyskanych w przypadkach „D” do „F”. Porównanie takie najlepiej prezentują przedstawione niżej wykresy.



Rys. 6. Porównanie wyników obliczeń (opis w tekście)

Zestawiono tu wyniki sprawdzenia nośności (stateczności) krawężników trzonu wieży (po prawej), pokazując jednocześnie różnice w wartościach obliczeniowych obciążenia samego trzonu kratowego i dodatkowo prezentując wartości wyznaczone w przypadku „A”,

a więc pierwotne, dla których projektowano konstrukcję. Widoczna jest tu, co najważniejsze, spora rozbieżność wyników uzyskanych w przypadku „D”, a więc obliczeń prowadzonych wg norm PN-EN oraz w przypadku „E”, gdzie stosowano normy polskie, rzecz jasna z poprawką do normy obciążenia wiatrem.

Istotnie większe wartości obciążenia obliczeniowego wiatrem dla przypadków „A” i „F”, są wynikiem zmiany bazowych wartości prędkości (ciśnienia prędkości) wiatru w normach [3] i [2] w stosunku do poprzedniej [1]. Jest to szczególnie istotne dla rozpatrywanej, „granicznej” lokalizacji stref pierwszej i trzeciej. Zmiana normy obciążenia wiatrem traktuje bowiem granicę tych stref jako umowną, pozostawiając te same zależności opisujące bazową (charakterystyczną) wartość prędkości wiatru. Można powiedzieć, że obecnie przejście ze strefy pierwszej do trzeciej, dla lokalizacji położonych w obrębie linii je rozgraniczającej, nie powoduje „niefizycznego” skoku wartości obciążenia wiatrem.

Przedstawiony wykres rozkładu obciążenia obliczeniowego wiatrem dla przypadku „D” pokazuje też, pomiędzy poziomem 15,0 m i 35,0 m, wpływ uwzględnienia współczynnika redukcyjnego do współczynnika siły oddziaływania wiatru (aerodynamicznego). Wyniki analizy warunków normowych [6] i porównanie powierzchni elementów wyposażenia przesłaniających konstrukcję i samej konstrukcji, nakazują bowiem zastosowanie współczynnika  $K_A = 0,8$  do współczynnika siły oddziaływania wiatru dla trzonu kratowego, a nie dla elementu wyposażenia (w tym wypadku drabin wraz z kablami antenowymi).

#### 4. Podsumowanie

W niniejszej pracy, na przykładzie wybranego obiektu i jego historii, pokazano istotne rozbieżności wyników obliczeń stalowych wież kratowych, jakie można uzyskać w następstwie zastosowania różnych norm. Obecna sytuacja, w której formalnie z dniem 31 marca 2010 r. Polskie Normy zastąpione zostały normami „Eurokod”, a jednocześnie dopuszcza się stosowanie wycofanych normatywów, może prowadzić i często prowadzi do drastycznych rozbieżności wyników obliczeń, co nieomal uniemożliwia jednoznaczną ocenę nośności istniejących konstrukcji. Autorzy zaznaczają tu, że przedstawiony w referacie przykładowy obiekt, jest jednym z wielu im znanych, w których występują podobne rozbieżności. Sytuacja taka, prócz oczywistych problemów merytorycznych, powoduje dodatkowo dezorientację potencjalnego Inwestora, otrzymującego od różnych zespołów autorskich często sprzeczne ze sobą wnioski, dotyczące w istocie takich samych, powtarzalnych konstrukcji. Zdaniem autorów konieczne jest jak najszybsze uznanie norm PN-EN jako jedynych obowiązujących, oczywiście z wyjątkami, gdzie takich dokumentów jeszcze nie wprowadzono.

#### Literatura

1. PN-77/B-02011 Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem.
2. PN-B-02011:1977/Az1:2009 Zmiana do Polskiej Normy. Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem.
3. PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływanie wiatru.
4. PN-79/B-03204 Konstrukcje stalowe. Maszty oraz wieże radiowe i telewizyjne. Obliczenia statyczne i projektowanie.
5. PN-B-03204:2002 Konstrukcje stalowe. Wieże i maszty. Projektowanie i wykonanie.
6. PN-EN 1993-3-1:2008 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-1: Wieże, maszty i kominy. Wieże i maszty.
7. Rykaluk K.: Obciążenie wiatrem wież stalowych w ujęciu norm polskich i europejskich, Inżynieria i Budownictwo, Nr 7/2009, s.367÷374.