

ELEKTROWNIE WIATROWE



prof. dr hab. inż.
Piotr Noakowski



mgr inż. Bartosz Michalak
Project Manager
Exponent

Siłownie wiatrowe są w krajach wysoko rozwiniętych technologią masową i dynamicznie rozwijającą się. Nic dziwnego więc, że postęp techniczny w tym zakresie obok wszystkich sukcesów jest również konfrontowany z szeregiem wyzwań. Zrodziły one w produkcji energii z wiatru istotne trendy rozwojowe.

Sytuację świata na polu potrzeb i rodzaju energii można rozpoznać przez prześledzenie rozwoju wypadków w XX wieku [13]: wzrost zużycia energii, spadek znaczenia drewna i węgla, wzrost udziału nowych źródeł energii (70%). Reakcję świata na aktualne zagrożenia można określić na podstawie ekstrapolacji obecnej sytuacji do połowy XXI wieku [13]: dalszy wzrost zużycia energii o 100%, udział odnawialnych źródeł energii na poziomie 40% (wiatr, woda, biotechnologie, słońce, geotermia). Szczególnie pouczający jest przy tym rozwój sytuacji na polu odnawialnych źródeł energii w Europie w najbliższych latach [1, 6, 12, 13]: wzrost udziału odnawialnych źródeł energii do 15%, wkład siłowni wiatrowych w tym sektorze – do poziomu 52%.

Przewiduje się, że za dziesięć lat 1/3 całej energii światowej będzie pochodziła ze źródeł odnawialnych, z tego około połowa z siły wiatru [1, 3, 13] – rys. 1.

Energia z wiatru

Wiadomo, że energia czerpana z wiatru jest „czysta” oraz wolna od drogich i niepewnych w dostawach paliw kopalnych. Nic dziwnego zatem, że szereg krajów wysoko rozwiniętych forsuje budowę siłowni wiatrowych. 80% europejskiej energii czerpanej z wiatru jest produkowana przez trzy kraje posiadające w 2009 roku następującą liczbę pojedynczych siłowni [13]: Dania – około 3500, Hiszpania – około 17000, Niemcy – około 25000.

W rozwoju energii zdobywanej z wiatru zaznaczają się dzisiaj dwa trendy [3, 13]: wzrost wysokości siłowni do 125 m i wydajności do 5 MW w obszarze onshore (na lądzie) oraz podwojenie się liczby siłowni i to wyłącznie w obszarze offshore (na morzu) do roku 2020.

Podstawy wymiarowania

Siłownie wiatrowe składają się z następujących czterech głównych części [3, 6] – rys. 2 i 3:

- fundamentu – który stanowią płyty betonowe w przypadku siłowni onshore, często na palach; a w przypadku siłowni offshore rozległe konstrukcje stalowe, z reguły na palach;
- trzonu ze stożkową powłoką stalową przy wysokościach do 100 m; betonowego – ze sprężonych pierścieni prefabrykowanych; betonowanego w ślizgu, często (zbędnie) sprężanego i wyposażanego w głowicę stalową;
- gondoli – czyli głównej części siłowni ważącej do 150 ton i zawierającej następujące elementy: piastę wirnika, wał napędowy, przekładnię, prądnicę, układ orientacji i dźwigar nośny;
- łopaty (skrzydeł) wirnika – czyli najbardziej wyszukanej (high tech) części całej siłowni.

Trzony siłowni wiatrowych są poddane następującym oddziaływaniom [5]:

- ciężar własny: łopaty wirnika, gondola, oblodzenie z uwagi na jego ciężar, trzon;
- wiatr: faza produkcji, faza montażu, efekty dynamiczne, odrywanie się wirów powietrznych (wzbudzenie wirowe);
- fale morskie: stan zmęczenia materiału, zagrożenie korozją;
- temperatura od nasłonecznienia i mrozu, wilgotność.

Wymiarowanie trzonu polega na zapewnieniu mu nośności przez celowe dobranie następujących cech konstrukcyjnych [5, 7, 9, 10]: formy, grubości ścian, zbrojenia pionowego i poziomego.

Nośność trzonu należy dowieść przez spełnienie następujących 3 warunków [5, 7, 9, 10]: 1. wytrzymałości materiału w odniesieniu do jednorazowego, wysokiego wzrostu obciążeń, 2. stateczności systemu przy uwzględnieniu przyrostu momentów w wyniku wychylenia trzonu oraz 3. zmęczenia materiału w wyniku akumulacji skutków wielu dobowych obciążeń.

Użytkowalność trzonu należy dowieść przez ograniczenie czterech cech zachowania się konstrukcji [5, 9, 10]: wychylenia w wypadku wrażliwości urządzeń mechanicznych w gondoli, naprężenia w stali po zarysowaniu betonu w celu uniknięcia uplastycznienia zbrojenia, naprężenia



PARTNER TEMATU



w betonie do wartości $0,6 f_{ck}$, szerokości rys z punktu widzenia przeniesienia sił poprzecznych, trwałości i estetyki.

Dwa kierunki nośności

Dalsze rozważania odnoszą się do następujących dwóch podstawowych kierunków nośności wież [7, 9, 10]:

1. Nośności pionowej w odniesieniu do obciążenia wiatrem. Ustala się ją przy założeniu monolitycznych przekrojów wieży, co ma miejsce przy elastycznym zachowaniu się zbrojenia obwodowego i braku szerokich pionowych rys skośnych.
2. Nośności poziomej w odniesieniu do obciążenia temperaturą. Ustala się ją z punktu widzenia zapewnienia elastycznego zachowania się zbrojenia obwodowego i ograniczenia szerokości rys pionowych zwłaszcza w odniesieniu do możliwości powstania rys skośnych.

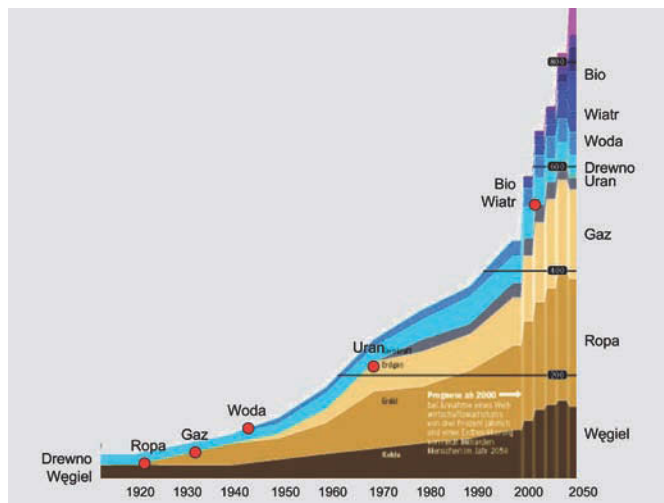
Nośność pionowa

Trzony siłowni wiatrowych mają z reguły pierścieniowe przekroje i stożkową formę. Wymiarowanie ich na nośność pionową w odniesieniu do wiatru polega na dobraniu odpowiednich wymiarów konstrukcji i sprawdzeniu dla nich granicznych wyteżeń $\epsilon_c < \epsilon_{cu} = 2\%$. Ustalane w ten sposób na całej wysokości cechy konstrukcyjne to:

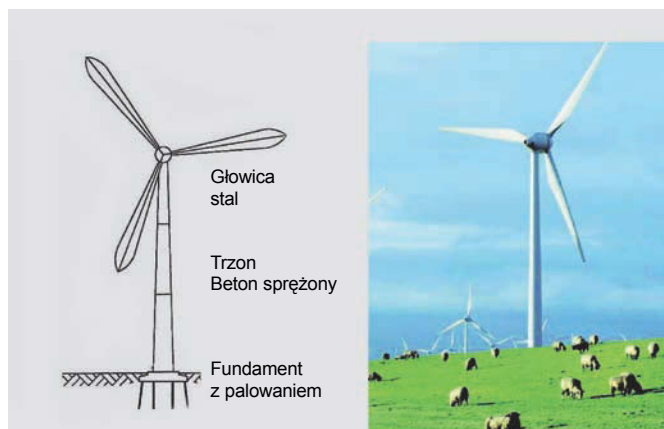
- forma trzonu w odniesieniu do średnicy D ,
- rozkład grubości ściany t ,
- stopień równomiernie rozłożonego zbrojenia pionowego ρ_v ,
- dodatkowe zbrojenie na brzegach otworów $\Delta\rho$.

Proces wymiarowania na nośność pionową składa się z następujących kroków [7, 9, 10]:

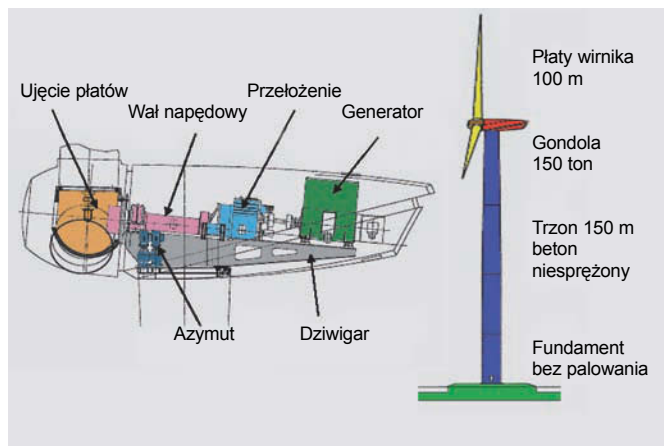
1. Modelowanie przez podział wspornika na elementy za pomocą węzłów obliczeniowych.
2. Przypisanie węzłom wartości D , t , ρ_v wraz z odpowiednimi prawami odkształcalności.



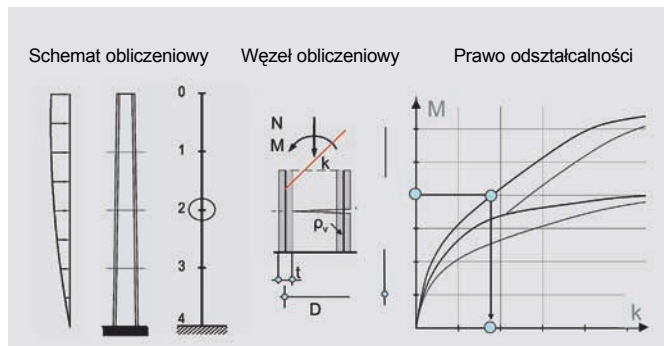
Rys. 1. Energetyka światowa – rozwój sytuacji



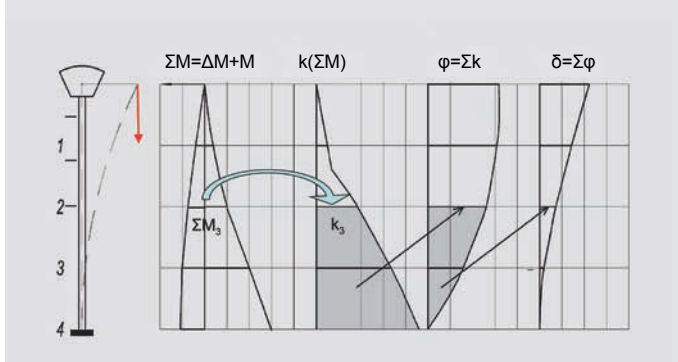
Rys. 2. Typowa wysoka siłownia onshore



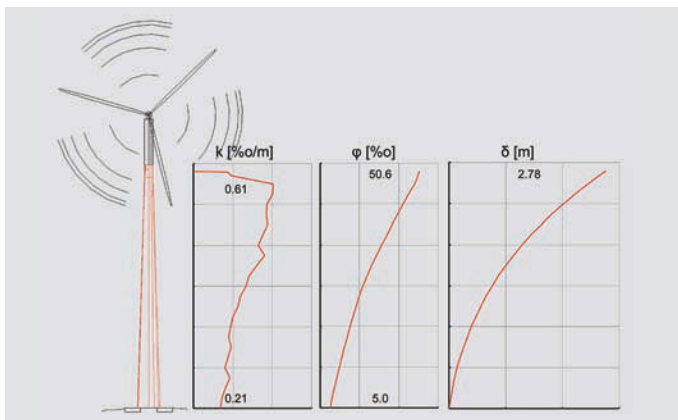
Rys. 3. Konstrukcja siłowni wiatrowej



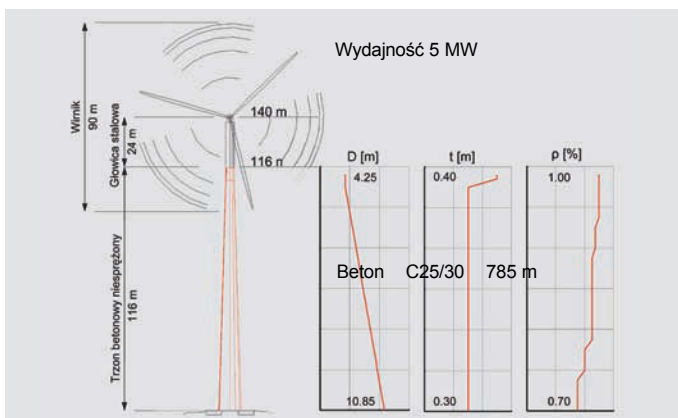
Rys. 4. Nośność pionowa, modelowanie trzonu



Rys. 5. Nośność pionowa, ustalanie wychylek



Rys. 6. Nośność pionowa, odkształcenia



Rys. 7. Przykład wymiarowania trzonu nowego typu siłowni wiatrowej z niesprężonym trzonem żelbetowym

Tab. 1. Przykładowe parametry nowego typu siłowni wiatrowej z niesprężonym trzonem żelbetowym.

Beton	C25/30
Stal	S500
Wydajność	5 MW
Lok. gondoli	140 m
Średnica wirnika	90 m
Trzon żelbetowy	116 m
Głowica stalowa	24 m

Tab. 2. Wyniki wymiarowania w odniesieniu do nośności pionowej potwierdzając właściwość postępowania:

		dół	góra	
Średnice	D (m)	10,85	4,25	forma stożkowa
Grubość ścian	t (m)	0,30	0,40	pogrubienie tylko przy głowicy
Zbrojenie pionowe	ρ _v (%)	2 x 0,35	2 x 0,50	przeciętnie 0,90
Zbrojenie poziome	ρ _h (%)	2 x 0,20	2 x 0,40	przyrost tylko przy głowicy

Zapotrzebowanie betonu w trzonie – 785 m³
 Zapotrzebowanie stali netto – 77 t (uwzględnienie odpadów i zaktadek, przyjmując współczynnik 1.35)
 Współczynnik zużycia stali – 178 kg/m³ (normalna wartość dla wysoko obciążonych wież)

3. Obliczenie sił podłużnych od ciężaru własnego i momentów zginających od obciążenia wiatrem.
4. Wielokrotne obliczenie wychylenia i momentów drugiego rzędu aż do konwergencji wyników.
5. Ustalenie odkształceń lokalnych w celu oceny wytyżeń na zasadzie równowagi sił oddziałujących M i N z siłami wewnętrznymi wynikającymi z naprężeń.
6. Przy negatywnej ocenie wytyżeń powrót do kroku (2) w celu poprawy wymiarów.

W ten iteracyjny sposób powstają wieże o równomiernym wykorzystaniu wytrzymałości, co oznacza, że odkształcenie betonu w większości przekrojów jest zbliżone do 2%. Wieże takie spełniają obydwie warunki prawidłowego wymiarowania – bezpieczeństwo i ekonomikę.

Elementy wymiarowania pionowego

Węzeł obliczeniowy, rys. 4 [9, 10] – jest to zespół przekrojów w stanie I i II, które wspólnie zachowują się w sposób uśredniony zgodnie z prawem odkształcalności. Prawo odkształcalności, rys. 4 [2, 7, 8, 9, 10] jest to nieliniowa zależność M-k dla węzłów nasyconych zbrojeniem i poddanych ścisłaniu. Zależność ta ujmuje następujące zjawiska prowadzące do zmniejszenia sztywności na zginanie przy rosnącym obciążeniu:

- początkowy brak zarysowania w stanie I,
- wstępne zarysowanie nacechowane pojedynczymi, oddalonymi od siebie rysami,
- końcowe zarysowanie nacechowane licznymi zazębiającymi się strefami rysoprzyległymi,
- uplastycznienie stali w miejscach rys.

Wchylenie i momenty drugiego rzędu [2, 7, 8, 9, 10] w tym punkcie należy ustalić w następującym procesie podwójnego numerycznego całkowania krzywizn uzyskanych z nieliniowych praw odkształcalności (rys. 5 i 6):

- momenty od obciążenia wiatrem M i momenty drugiego rzędu ΔM z aktualnych wychyleń,
- krzywizny $k(M+\Delta M)$ w pojedynczych węzłach z ich praw odkształcalności,
- obroty $\varphi = \Sigma k$ jako numeryczne całkowanie krzywizn,
- wychylenia $\delta = \Sigma \varphi = \Sigma \Sigma k$ jako numeryczne całkowanie obrotów,
- momenty drugiego rzędu ΔM z aktualnych wychyleń.

Wyniki przykładowego wymiarowania trzonu nowego typu siłowni wiatrowej z niesprężonym trzonem żelbetowym, o określonych w tabeli 1 parametrach, zaprezentowano w tabeli 2. W tabeli 3 ujęte zostały natomiast wyniki analizy wytyżeń.

Nośność pozioma

Ściany trzonów siłowni wiatrowych mają „płytkowe” przekroje pionowe. Wymiarowanie ich na nośność poziomą w odniesieniu do różnicy temperatur polega na dobraniu odpowiedniego zbrojenia obwodowego w celu zachowania w chwili zarysowania następujących wartości granicznych [2, 5, 7, 8, 9, 10]: naprężenia w stali $\sigma_s < \text{dozw}\sigma_s = 500/1,25 = 400 \text{ MN/m}^2$ oraz rozwarcia rys $w_k < \text{dozw}w_k = 0,20 \text{ mm}$.

Ustalane w ten sposób na całej wysokości cechy konstrukcyjne to: stopień zbrojenia obwodowego ρ_h na obu krawędziach ściany.

Proces wymiarowania na nośność poziomą składa się z następujących kroków [8, 9, 10]:

1. Modelowanie odcinka pierścienia za pomocą prostej belki utwierdzonej.
2. Przyporządkowanie belce wartości t, ρ_v , wraz z odpowiednimi prawami odkształcalności.
3. Ustalenie momentu rysującego M_{cr} z wytrzymałości betonu na rozciąganie.
4. Obliczenie naprężenia w stali σ_{cr} z momentu rysującego.
5. Obliczenie rozwarcia rysy w_k z momentu rysującego.

6. Przy negatywnej ocenie wyników powrót do kroku (2) w celu poprawy stopni zbrojenia.

W ten sposób powstają wieże o równomiernie korzystnym zachowaniu się na bez mała całej wysokości. Wieże takie spełniają warunki bezpieczeństwa i ekonomiki.

Elementy wymiarowania poziomego

Prawidłowości – rys. 9 [8, 9, 10] – zasady zachowania się zamkniętych pierścieni lub belek utwierdzonych przy wzbudzeniu sił wymuszonych w wyniku różnic temperatur:

(1) Miarodajność momentu rysującego M_{cr}

$$M_{cr} \approx f_{ct} h^2 / 6 = 2,6 \times 0,32 / 6 = 0,039 \text{ MNm},$$

(2) Niezależność temperatury rysującej DT_{cr} od wytrzymałości betonu f_c

$$k_T = k_M \rightarrow a_T \Delta T_{cr} / h = 2 f_{ct} / (E_c h)$$

$$\Delta T_{cr} = 2 f_{ct} / (a_T E_c) = 2 \times 2,6 / (0,00001 \times 30000) = 17 \text{ K},$$

(3) Zależność naprężenia w stali σ_{cr} od wytrzymałości betonu na rozciąganie f_{ct}

$$M^I = M^{II} \rightarrow f_{ct} h^2 / 6 \approx \sigma_{cr} A_s 0,8 h$$

$$\sigma_{cr} = 0,2 f_{ct} / \rho = 0,2 \times 2,6 / 0,002 = 260 \text{ MN/m}^2.$$

Prawo odkształcalności – rys. 9 [2, 7, 8, 9, 10] – nieliniowa zależność $M - k$ dla przekrojów prostokątnych ze zbrojeniem na brzegach i podanych czystemu zginaniu – ujmuje malejącą sztywność w wyniku następujących zjawisk:

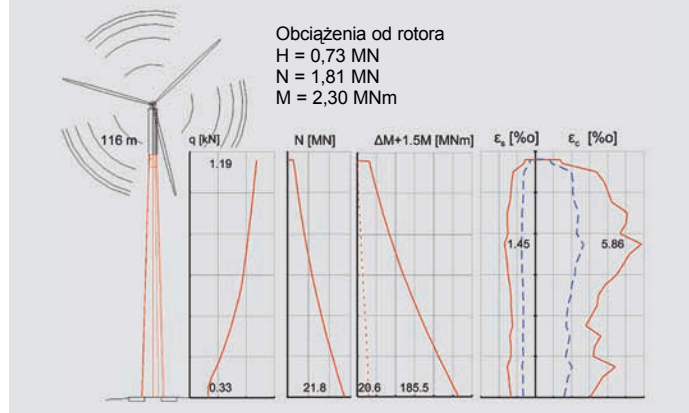
- początkowy brak zarysowania w Stanie I (dla porównania teoretyczny „nagi” Stan II),
- wstępne zarysowanie nacechowane pojedynczymi, oddalonymi od siebie rysami,
- końcowe zarysowanie nacechowane licznymi ząbującymi się strefami rysoprzyległymi,
- uplastycznienie stali w miejscach rys.

Wyniki wymiarowania zostały zobrazowane na rys. 11.

Perspektywy i wyzwania

Siłowne wiatrowe są w krajach wysoko rozwiniętych technologią masową i dynamicznie rozwijającą się. Nic dziwnego więc, że postęp techniczny w tej dziedzinie obok wszystkich sukcesów jest również konfrontowany z szeregiem wyzwań [1, 3, 12, 13] w zakresie:

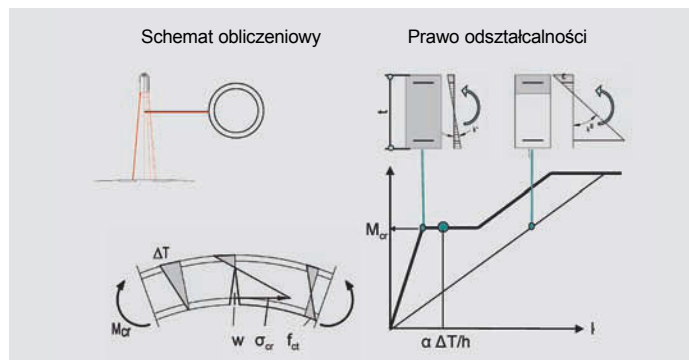
- produkcji:
 - brak czasu na rozwój techniczny z racji prymatu produkcji,
 - krótkie terminy dostaw odbijające się negatywnie na jakości urządzeń,
 - brak części zamiennych z przeciężenia dostawców,
 - niechęć niektórych urzędów i grup związanych z ochroną środowiska,
 - ciągła potrzeba „repowering”, czyli zastępowania starszych urządzeń nowymi z racji szybkiego postępu technicznego;
- awarii:
 - szkody spowodowane korozją, zwłaszcza na polu offshore,
 - odpadanie części łopat wirnika pod wpływem sił odśrodkowych,
 - pożary maszynowni po uderzeniach pioruna,
 - zawalenie się szczególnie w czasie silnych burz,
 - krótka żywotność z powodu zmęczenia materiału trzonów;
- logistyki:
 - nierównomierna i nieprzewidywalna dyspozycyjność wiatru w skali miesięcznej i rocznej,
 - konieczność utrzymywania normalnych elektrowni na wypadek zaostoi wiatru,
 - brak możliwości magazynowania nadwyżek energii w okresach nasilenia wiatru,
 - brak możliwości pobierania prądu z odległych i zmieniających się rejonów silnego wiatru.



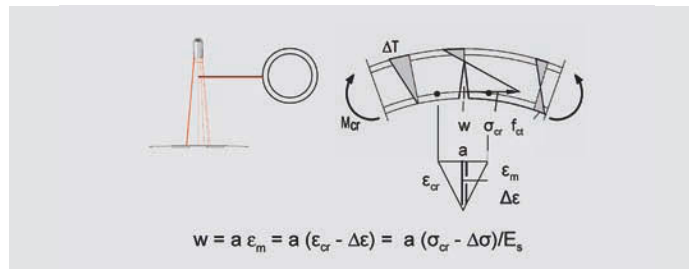
Rys. 8. Analiza wyteżeń

Tab. 3. Wyniki z analizy wyteżeń

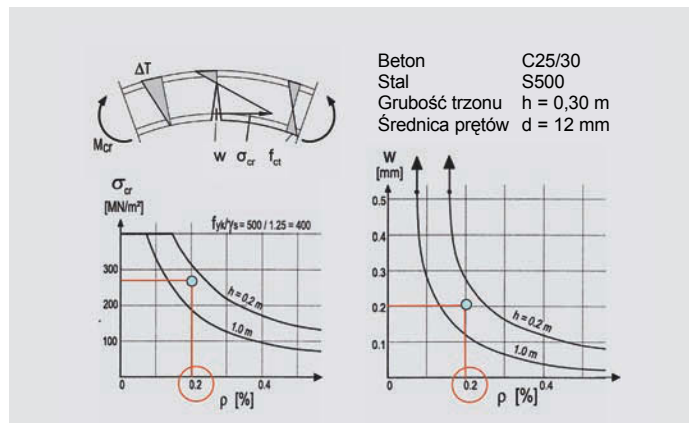
Siła wiatru	q (kN/m ²)	1,19	
Siła podłużna	N (MN)	21,8	
Design moment z wiatru	1,5 M (MNm)	185,5	
Moment 2. rzędu	ΔM (MNm)	21,6	12% pełnego momentu z wiatru
Odkształcenie betonu	ε _c (‰)	1,45	< 2,00 ‰ wyteżenie graniczne
Odkształcenie stali	ε _s (‰)	5,86	



Rys. 9. Nośność pozioma, modelowanie trzonu



Rys. 10. Nośność pozioma, rozwarcie rysy



Rys. 11. Nośność pozioma, wyniki wymiarowania

Trendy rozwojowe

Powyższe wyzwania zrodziły szereg trendów rozwojowych [1, 3, 12, 13]:

- **Wzrost wydajności (ob. siłownia Repower w Brunsbüttel):**
 - Wzrost wysokości trzonu od 30 m do 125 m w ciągu ostatnich 25 lat.
 - Odpowiednie powiększenie średnicy wirnika od 15 m do 115 m.
- **Forsowanie siłowni offshore (ob. Park offshore Vesta na wybrzeżu Danii)**
 - Przybytek nowych jednostek w obszarach repowering i parków offshore.
 - W sumie podwojenie się liczby siłowni i to prawie wyłącznie w obszarze offshore do 2020.
- **Magazynowanie energii**
 - Pompowanie wody do pojemników górskich.
 - Płynne baterie na bazie Vanadium z nieograniczoną wydajnością i liczbą cykli.
 - Pompowanie powietrza pod ziemię.
- **Poprawa techniki przekazywania prądu**
 - Integracja niesterowalnych siłowni wszelkiego typu: wiatr, bio, słońce, pojemniki
 - Globalnie (kontynentalnie) rozbudowane sieci przekaźnikowych do roli pojemnika prądu.
 - Przejście do rozproszonej lokalizacji zespołów siłowni
 - Budowa nowych sieci przekaźnikowych na prąd stały w celu zmniejszenia strat prądu
- **Redukcja kosztów budowy**
 - Forsowanie trzonów z betonu niesprężonego w celu osiągnięcia następujących korzyści:
 - Uniknięciu drogiego sprężania
 - Mniejszych kosztów zapewniania jakości
 - Wyższą trwałość uproszczonej konstrukcji

Literatura

- [1] Bundesverband Windenergie: Marktübersicht 1989-2006.
- [2] DIN EN 13084: Freistehende Schornsteine, Teil 2: Betonschornsteine. April 2002.
- [3] Gasch R., Twele J., Windkraftanlagen, Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb, B.G. Teubner Verlag/GWW Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2007.
- [4] Grünberg J., Funke G., Stavesand J., Göhlmann J., Fernmeldetürme und Windenergieanlagen in Massivbauweise, Betonkalender 2006, Ernst und Sohn
- [5] Deutsches Institut für Bautechnik, DIBt: Richtlinie für Windenergieanlagen, Richtlinie, Reihe B, Heft 8, März 2004.
- [6] Langnickel, U., Wind Energy, VGB-Fachtagung Essen, 2005.
- [7] Nieser, H., Engel, V., Industrieschornsteine in Massivbauart. Kommentar DIN 1056.
- [8] Noakowski, P., Gerstle, K., Tower Structures Subjected to Temperature and Wind. Structural Journal of the American Concrete Institute, 1990.
- [9] Noakowski, P., Schäfer, H.G., Steifigkeitsorientierte Statik im Stahlbetonbau. Buch, Ernst & Sohn, 2003.
- [10] Noakowski, P., Harling, A., Breddermann, M., Rost, M., Turmartige Bauwerke, Grundlagen CICIND, DIN V1056, DIN EN13084, Betonkalender 2006, Ernst & Sohn.
- [11] Noakowski, P., Harling, A., Breddermann, M., Rost, M., Verstärkung turmartiger Bauwerke, VDI Bautechnik, Jahrbuch 2008.
- [12] Windblatt: Enercon Magazin für Wind Energie, Ausgabe 01/2008
- [13] Spiegel Spezial: Neue Energien, Wege aus der Klimakatastrophe, 155 Seiten, 1/2007.

Abstract. *Wind power plants. Calculations, perspectives. Wind power plants are a rapidly developing mass technology. No wonder that the branch, apart from all the success, is as well confronted with a number of challenges. The article presents the challenges and development trends in the branch of wind power plants and the basic principles of their dimensioning and calculations, with examples.*

Keywords: *wind power plants, onshore, offshore, vertical and horizon load bearing capacity.*

O autorze

Profil zawodowy: *Studia na Politechnice Warszawskiej, projektant w firmie Strabag w Kolonii, praca doktorska i habilitacja na Technische Hochschule München, kierownik wydziału w firmie Karrena, Visiting Profesor w Boulder i Stanford, dyrektor w Firmie Exponent Düsseldorf, przysięgły rzeczoznawca sądowy, profesor na Śląskim Uniwersytecie Technologicznym w Gliwicach, profesor na Technischen Universität Dortmund.*

Zakres aktywności zawodowej: *Budowle przemysłowe, konstrukcje wieżowe i ogniodoporne; zaawansowane projektowanie, zabezpieczenie jakości; ocena stanu technicznego, naprawy i wzmocnienia; zapobieganie szkodom, wyjaśnianie awarii*

Autor/współautor publikacji w zakresie: *Obliczanie strzałki ugięcia, sił wymuszonych i szerokości rysy; statyka konstrukcji żelbetonowych; konstrukcje wieżowe, wymiarowanie i przykłady obliczeń; wymiarowanie konstrukcji wieżowych; wzmocnianie kominów przemysłowych; wymiarowanie konstrukcji ogniodopornych.*



Fot. 1. Siłownia Brunsbüttel

W KOLEJNYM NUMERZE:

Projektowanie geotechniczne posadowienia elektrowni wiatrowych



Adam Zaremba

Projektant, Kierownik Działu Projektowego Menard Polska Sp. z o.o.

W ostatniej dekadzie możemy zaobserwować niemal paraboliczny wzrost ilości budowanych w Polsce turbin wiatrowych, tworzących parki wiatrowe dochodzące do 150 siłowni. Niestety za wymogami rynku nie podążają krajowe normy i wytyczne, dlatego należy wspierać się i bazować na doświadczeniach krajów z dużo większym doświadczeniem w tej dziedzinie. W artykule, zostaną przedstawione najczęstsze problemy, z jakimi można się spotkać podczas projektowania i wykonawstwa posadowień turbin wiatrowych oraz metody analizy jak niektóre z nich rozwiązać.