

# Elektrownie wiatrowe środowisko, wymiarowanie, perspektywy

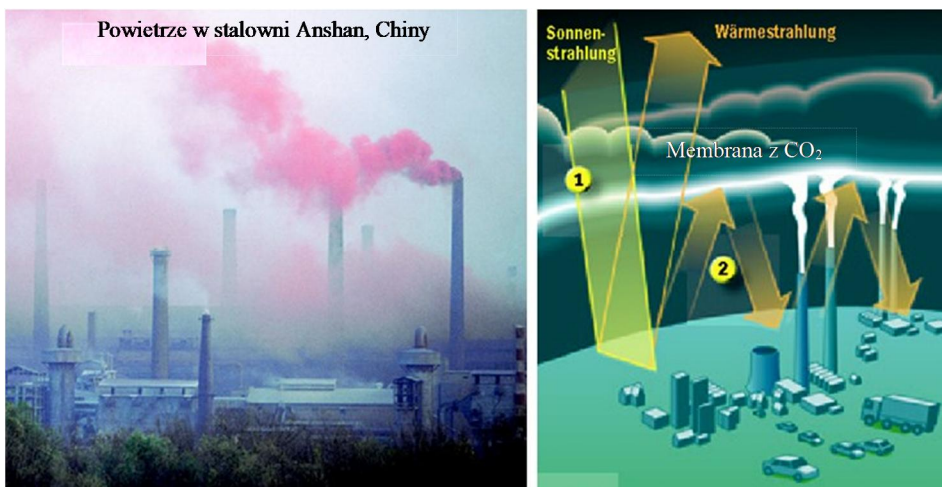
PIOTR NOAKOWSKI, KATARZYNA LEMAŃSKA  
Technische Universität Dortmund, Constructure GmbH Düsseldorf

## 1. Środowisko i energetyka

### 1.1. Efekt cieplarniany, rys. 1

- Dzisiejszy świat jest konfrontowany z dwoma globalnymi zagrożeniami:
- efektem cieplarnianym w wyniku nadużywania paliw kopalnych,
  - uzależnieniem od tychże niepewnych politycznie źródeł energii.

Efekt cieplarniany jest wynikiem hamowania powrotu ciepła z nasłonecznionej ziemi do wszechświata przez gęstą membranę powstałą z unoszących się gazów. Gazy te, przede wszystkim dwutlenek węgla i metan, są nie do pokonania dla dużej części powrotnego promieniowania ciepłego ziemi. Zjawisko to, spowodowane między innymi codziennym zużyciem 12 milionów ropy i 12,5 milionów ton węgla [25], potęguje się jako wynik gonienia świata przez Chiny i Indie.



Rys. 1. Mechanizm powstawania efektu cieplarnianego. Spiegel Spezial [25].

### 1.2. Zmiany klimatyczne, rys. 2

Nawet gdyby udało się zastopować trend ku zwiększeniu zużycia paliw kopalnych, to ocieplenie atmosfery ziemskiej w roku 2100 może wynieść  $6^{\circ}\text{C}$  a związane z tym podniesienie poziomu mórz 59 cm [25]. Już dzisiaj wiadomo, że współczesne klęski żywiołowe jak rozpad

lodowców na Alasce, posuchy w Etiopii i powódzie w obszarze Missisipi są konsekwencją globalnego ocieplenia atmosfery.



Rys. 2. Klęski żywiołowe jako prawdopodobna reakcja klimatu. *Spiegel Spezial* [25].

### 1.3. Rodzaje energii, rys. 3

Sytuację świata na polu potrzeb i rodzaju energii można rozpoznać przez prześledzenie rozwoju wypadków w XX wieku [1, 11, 12, 08, 23, 24, 25]:

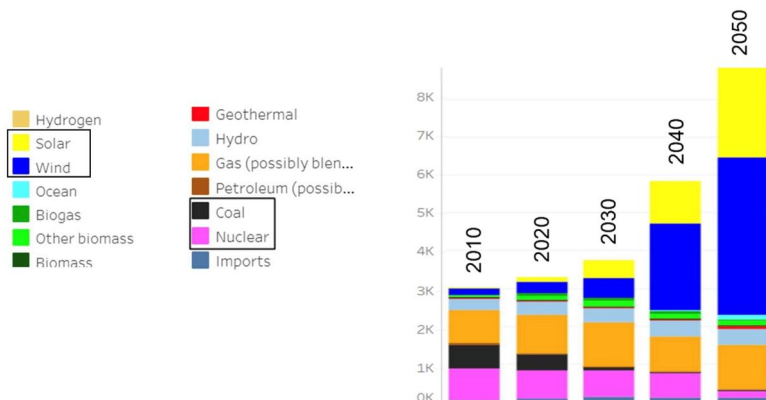
- wzrost zużycia energii o współczynnik 13,
- spadek znaczenia drewna i węgla ze 100 do 30%,
- udział nowych źródeł energii w stopniu 70% (ropa 1920, gaz 1930, woda 1940, uran 1970).

Reakcję świata na powyższe zagrożenia można rozpoznać na podstawie ekstrapolacji obecnej sytuacji do połowy XXI wieku [25]:

- dalszy wzrost zużycia energii o 100%,
- udział odnawialnych źródeł energii w stopniu 40% (wiatr, woda, bio, słońce, geotermika).

Szczególnie pouczający jest przy tym rozwój sytuacji na polu wszystkich źródeł energii w świecie w do roku 2050 [31]:

- wzrost zapotrzebowania na energię o współczynnik 3 od 2010 do 2050,
- spadek udziału węgla i uranu z 50 do 20% w tym samym czasie,
- wzrost udziału słońca i wiatry z 5 do 75%,
- wzrost udziału wiatry z 5 do 60%.



Rys. 3. Rozwój sytuacji w energetyce światowej. EWEA [31].

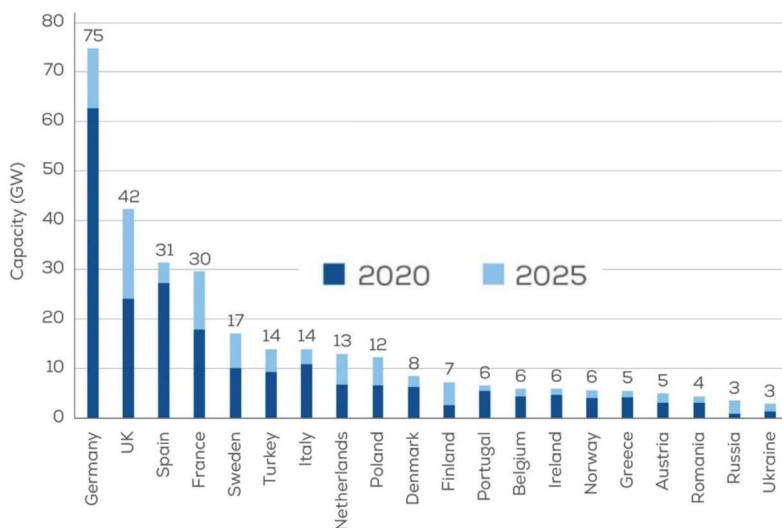
#### 1.4. Energia z wiatru, rys. 4, 5

Wiadomo, że energia czerpana z wiatru jest „czysta” i wolna od drogich i niepewnych w dostawach paliw kopalnych. Nic dziwnego zatem, że szereg krajów wysoko rozwiniętych forsuje budowę siłowni wiatrowych [13]:

- Dania 860 MW/milion mieszkańców,
  - Szwecja 550 MW/milion mieszkańców,
  - Niemcy 501 MW/milion mieszkańców,
  - Hiszpania 495 MW/milion mieszkańców,
- Polska ma na tym polu sporo do nadrobienia.

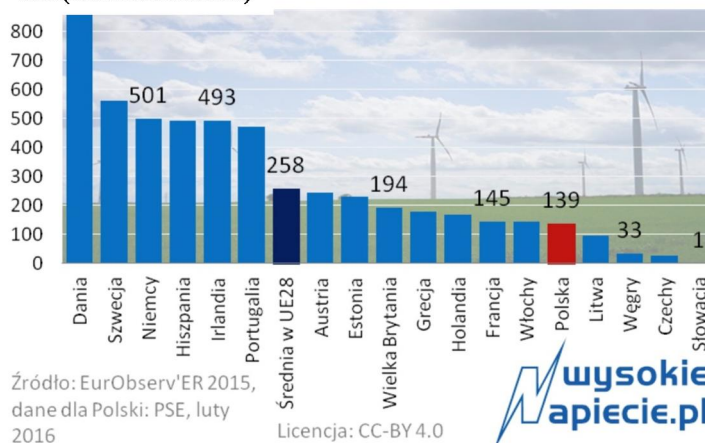
W rozwoju energii zdobywanej z wiatru zaznaczają się dzisiaj dwa trendy [13]:

- wzrost wysokości siłowni do 175 m i wydajności do 10 MW w obszarze offshore,
- podwojenie się liczby siłowni i to głównie w obszarze offshore do roku 2025.



Rys. 4. Ogólna moc siłowni wiatrowych w krajach EU. Wind Energy Europe [33].

MW/(milion mieszkańców)



Rys. 5. Względna moc siłowni wiatrowych w krajach EU w 2015 r. Wysokie Napięcie [36].

## 2. Podstawy wymiarowania

### 2.1. Cechy konstrukcji

Siłownie wiatrowe składają się z następujących czterech głównych części rys. 6 [7]:

#### Fundament

Płyty betonowe w wypadku siłowni offshore, często na palach.

Rozległe konstrukcje stalowe w wypadku siłowni offshore, z reguły na palach.

#### Trzon

Konus stalowy przy wysokościach do 100 m.

Konus betonowy ze sprężonych pierścieni prefabrykowanych.

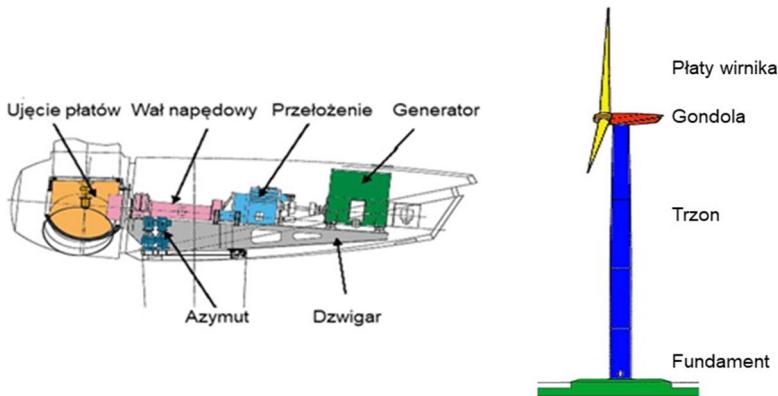
Konus betonowany w ślizgu, często (zbędnie) sprężany i zaopatrywany głowicą stalową.

#### Gondola (maszynownia), rys. 7

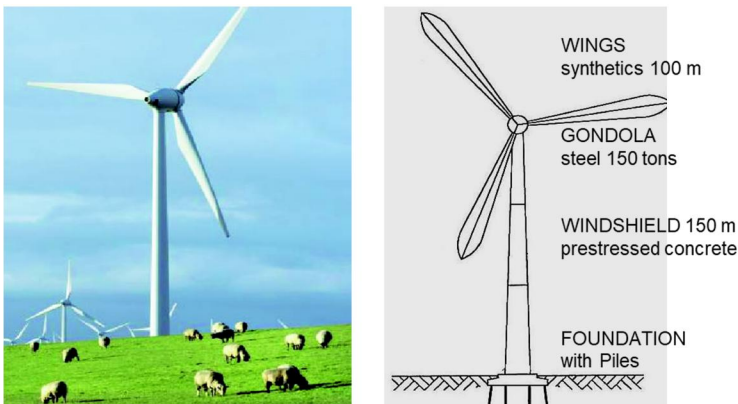
Główna część siłowni ważąca do 150 ton i zawierająca następujące elementy – ujęcie płatów wirnika, wał napędowy, przełożenie, generator, azymut i dźwigar niosący.

#### Płaty wirnika

Najbardziej wyszukana (high tech) część całej siłowni.



Rys. 6. Konstrukcja typowej siłowni wiatrowej offshore. Fuhrländer [5].



Rys. 7. Typowa siłownia wiatrowa offshore, Betonkalender 2006 [3, 7].

## 2.2. Zasady wymiarowania

Trzony siłowni wiatrowych są poddane następującym oddziaływaniom [9]:

- ciężar własny: Płaty wirnika, gondola, oblodzenie, trzon,
- wiatr: Stan produkcji, stan montażu, efekty dynamiczne, oddzielanie się wirów powietrza,
- fale morskie: Stan zmęczenia materiału, zagrożenie korozją,
- wymuszone: Kosa pozycja, temperatura z nasłonecznienia i mrozu, wilgotność.

Wymiarowanie trzonu polega na zapewnieniu mu nośności i wytrzymałości przez celowe dobranie następujących cech konstrukcyjnych [19, 21]:

- forma,
- grubość ściany,
- zbrojenie pionowe,
- zbrojenie poziome.

Nośność trzonu należy dowieść przez spełnienie następujących 3 warunków [9]:

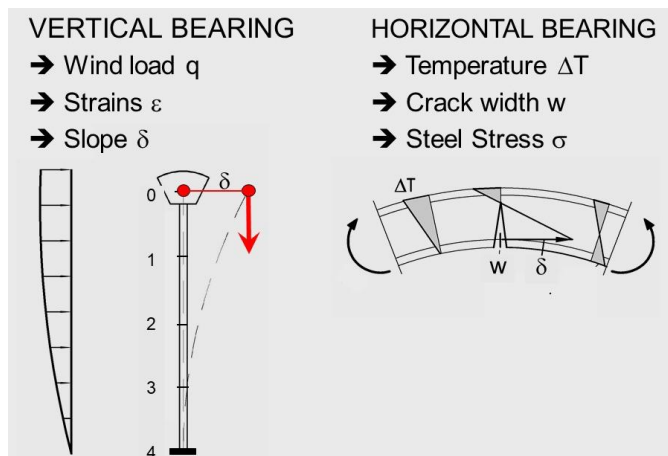
- wytrzymałość materiału w odniesieniu do jednorazowego, wysokiego nasilenia obciążeń,
- stateczność systemu przy uwzględnieniu przyrostu momentów w wyniku wychyłu trzonu,
- zmęczenia materiału w wyniku akumulacji skutków wielu codziennych obciążeń.

Użytkowość trzonu należy dowieść przez ograniczenie następujących 4 cech zachowania się konstrukcji [9, 19, 21]:

- wychyłki w wypadku wrażliwości urządzeń mechanicznych w gondoli,
- naprężenia w stali po zarysowaniu betonu w celu uniknięcia uplastycznienia zbrojenia,
- naprężenia w betonie do wartości  $0,6 f_{ck}$ ,
- szerokość rys z punktu widzenia przenoszenia sił poprzecznych, trwałości i estetyki.

## 2.3. Kierunki nośności, rys. 8

Dalsze wywody odnoszą się do następujących dwóch podstawowych kierunków nośności wież [19, 21]:



Rys. 8. Pionowy i poziomy kierunek nośności. Betonkalender 2006 [15 do 24].

### Nośność pionowa w odniesieniu do obciążenia wiatrem

Ustalanie przy założeniu monolitycznych przekrojów wieży, co ma miejsce przy elastycznym zachowaniu się zbrojenia obwodowego i braku szerokich pionowych rys skrośnych.

Nośność pozioma w odniesieniu do obciążenia temperaturą.

Ustalanie z punktu widzenia zapewnienia elastycznego zachowania się zbrojenia obwodowego i ograniczenia szerokości rys pionowych zwłaszcza w odniesieniu do możliwości powstania rys skośnych.

### 3. Nośność pionowa

#### 3.1. Proces wymiarowania

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 ku zachowaniu granicznych wytyżeń  $\varepsilon_c < \varepsilon_{cu} = 2\text{‰}$ .

Ustalane w ten sposób na całej wysokości cechy konstrukcyjne są jak następuje:

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

Proces wymiarowania na nośność pionową składa się z następujących kroków [19, 21]:

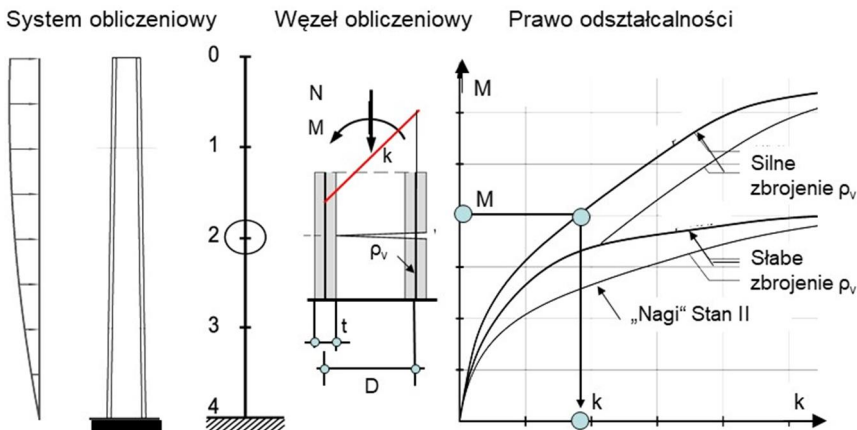
- (0) modelowanie przez podział wysięgnika na elementy za pomocą węzłów obliczeniowych,
- (1) przypisanie węzłom wartości  $D$ ,  $t$ ,  $\rho_v$  wraz z odpowiednimi prawami odkształcalności,
- (2) obliczenie sił podłużnych z ciężaru własnego i momentów zginających z wiatru,
- (3) wielokrotne obliczenie wychyłów i momentów 2. rzędu aż do konwergencji wyników,
- (4) ustalenie odkształceń lokalnych ku ocenie wytyżeń na zasadzie równowagi sił,
- (5) przy negatywnej ocenie wytyżeń powrót do kroku (1) w celu poprawy wymiarów.

W ten iteracyjny sposób powstają wieże o równomiernym wykorzystaniu wytrzymałości, co oznacza, że odkształcenie betonu w każdym przekroju jest zbliżone do  $2\text{‰}$ . Wieże takie spełniają obydwa warunki prawidłowego wymiarowania – bezpieczeństwo i ekonomikę.

#### 3.2. Elementy wymiarowania

Węzeł obliczeniowy, rys. 9 [19, 21]:

Jest to zespół przekrojów w stanie I i II, które wspólnie zachowują się w sposób uśredniony zgodnie z prawem odkształcalności.



Rys. 9. Zasady modelowania trzonu w odniesieniu do nośności pionowej. Steifigkeitsorientierte Statik [4, 14, 19, 21, 24].



*Prawo odkształcalności*, rys. 9 [4, 14, 19, 21]:

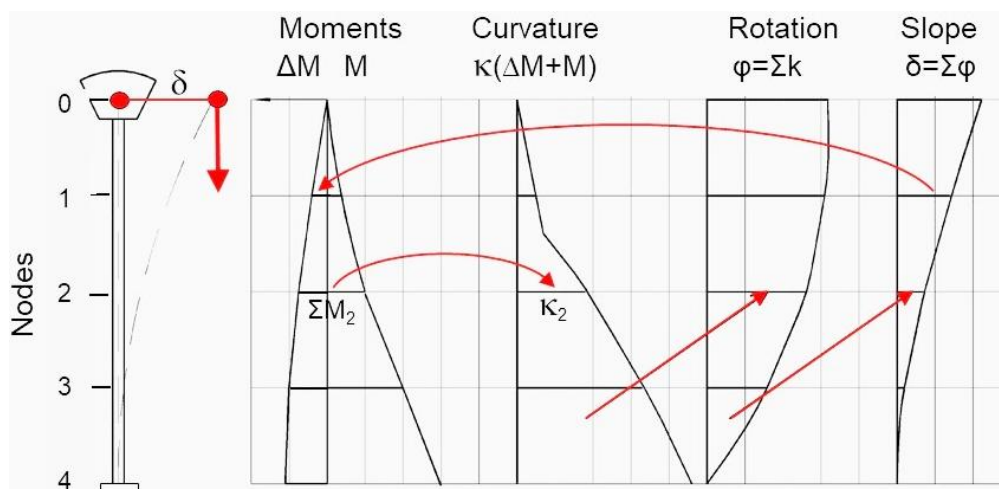
Jest to nieliniowa zależność  $M$ - $k$  dla węzłów nasyconych zbrojeniem i poddanych ścisaniu. Zależność ta ujmuje następujące zjawiska prowadzące do malenia sztywność na zginanie przy rosnącym obciążeniu:

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

*Wychyły i momenty 2. rzędu*, rys. 10 [4, 19, 21]:

Ustalenie w następującym procesie podwójnego numerycznego całkowania krzywizn uzyskanych z nieliniowych praw odkształcalności:

- momenty z wiatru  $M$  i momenty 2. rzędu  $\Delta M$  z aktualnych wychylek,
- krzywizny  $k(M+\Delta M)$  w pojedynczych węzłach z ich praw odkształcalności,
- obroty  $\varphi = \Sigma k$  jako numeryczne całkowanie krzywizn,
- wychyły  $\delta = \Sigma \varphi = \Sigma \Sigma k$  jako numeryczne całkowanie obrotów,
- momenty 2. rzędu  $\Delta M$  z aktualnych wychylek.



Rys. 10. Zasady ustalania wychyleń wieży i momentów 2. rzędu. Stefigkeitsorientierte Statik [2, 04, 19, 21, 24].

### 3.3 Przykład wymiarowania,

Procedury powyższe zostały zastosowane w celu wymiarowania trzonu nowego typu siłowni wiatrowej z niesprężonym trzonem żelbetowym:

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

## Rozważany trzon, rys. 11

Średnice	$D$ [m]	10,85	4,25	forma stożkowa.
Grubość ścian	$t$ [m]	0,30	0,40	pogrubienie tylko przy głowicy.
Zbrojenie pionowe	$\rho_v$ [%]	2'0,35	2'0,50	przeciętnie 0,90.
Zbrojenie poziome	$\rho_h$ [%]	2'0,20	2'0,40	przyrost tylko przy głowicy.

Zużycie materiału leży w normalnym obszarze dla wysoko obciążonych wież z betonu niesprężonego:

- zapotrzebowanie betonu w trzonie  $785 \text{ m}^3$ ,
- zapotrzebowanie stali netto  $77 \text{ t}$  bez uwzględnienia odpadów i zakładów,
- współczynnik zużycia stali  $132 \text{ kg/m}^3$  przy uwzględnieniu odpadów faktorem  $1,35$ .

## Analiza wytrzymałości, rys. 12

Siła wiatru  $q = 1,19 \text{ kN/m}^2$ .

Siła podłużna  $N = 21,8 \text{ MN}$ .

Design moment z wiatru  $1,5 M = 185,5 \text{ MNm}$ .

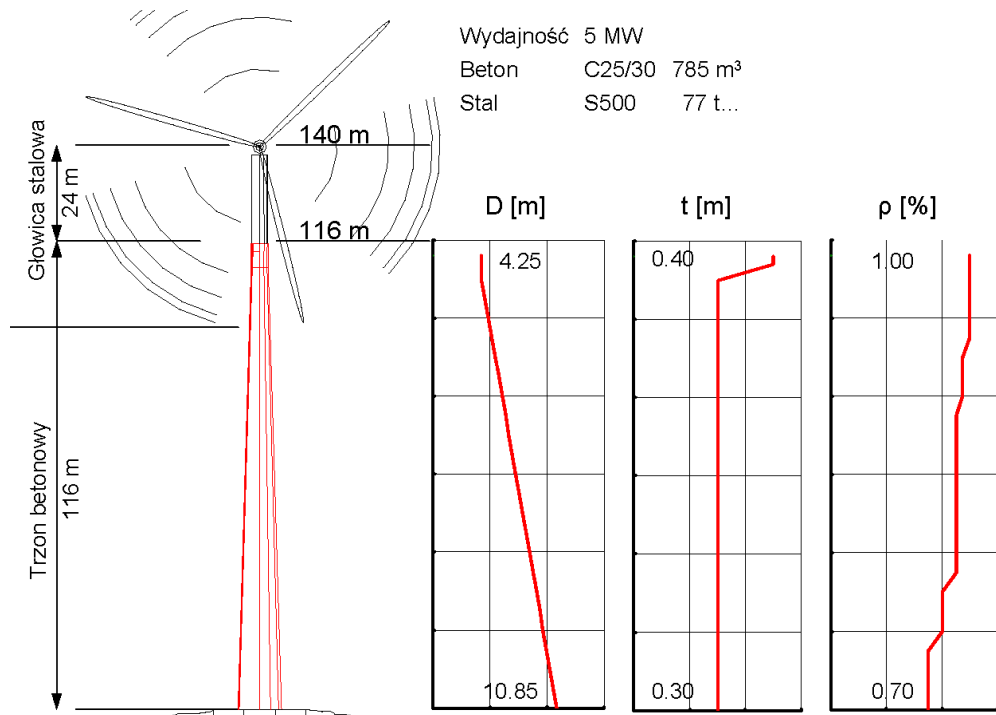
Moment 2. rzędu  $\Delta M = 21,6 \text{ MNm}$  12% pełnego momentu z wiatru.

Odształcenie betonu  $\epsilon_c = 1,45 < 2,00\%$  wytrzymałościowe.

Odształcenie stali  $\epsilon_s = 5,86\%$ .

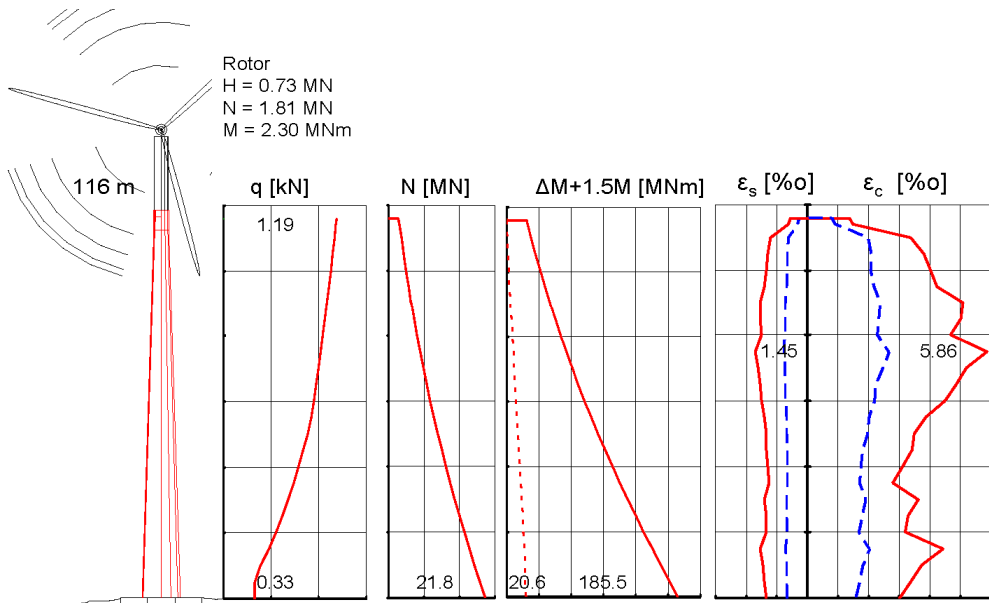
## Analiza wychyłów, rys. 13

		dół	góra	
Krzywizny	$k$ [%/m]	0,21	0,61.	
Obroty	$\varphi$ [%]	5,0	50,6	założenie kosej pozycji u podnóża trzonu.
Wychyłki	$\delta$ [m]	0	2,78	wartość determinująca momenty 2. rzędu.

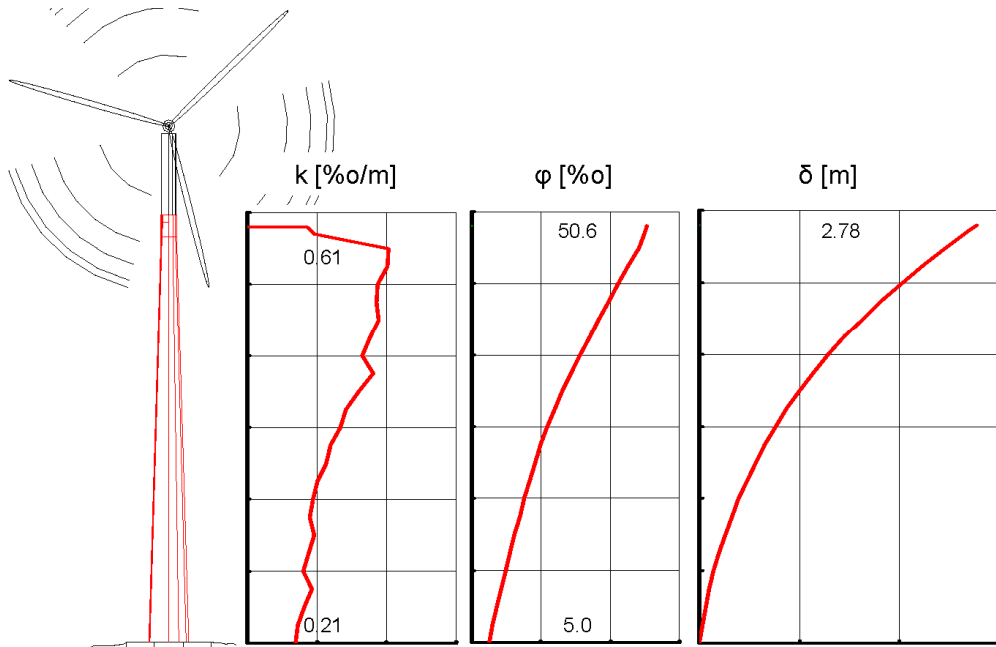


Rys. 11. Trzon siłowni wiatrowej nowego typu bez sprężenia. Constructure [4, 19, 21].





Rys. 12. Obciążenia i wyciężenia rozważanej siłowni. Constructure [4, 19, 21, 24].



Rys. 13. Krzywizny, obroty i wychyły rozważanej siłowni. Constructure [4, 19, 21, 24].

## 4. Nośność pozioma

### 4.1. Proces wymiarowania

Ściany trzonów siłowni wiatrowych mają „płytkowe” przekroje pionowe. Wymiarowanie ich na nośność poziomą w odniesieniu do różnicy temperatur polega na dobraniu odpowiedniego zbrojenia obwodowego ku zachowaniu w chwili zarysowania następujących wartości granicznych [14, 15, 18, 19, 20, 21, 22]:

Naprężenia w stali  $\sigma_s < \text{dozw}\sigma_s = 500/1,25 = 400 \text{ MN/m}^2$ ,

Rozwarcie rys  $w_k < \text{dozw}w_k = 0,20 \text{ mm}$ .

Ustalane w ten sposób na całej wysokości cechy konstrukcyjne są jak następuje:

- stopień zbrojenia obwodowego  $\rho_v$  po stronie zewnętrznej,
- stopień zbrojenia obwodowego  $\rho_v$  po stronie wewnętrznej.

Proces wymiarowania na nośność poziomą składa się z następujących kroków [19, 21]:

- (0) Modelowanie odcinka pierścienia za pomocą prostej belki utwierdzonej.
- (1) Przyporządkowanie belce wartości  $t$ ,  $\rho_v$  wraz z odpowiednimi prawami odkształcalności.
- (2) Ustalenie momentu rysującego  $M_{cr}$  z wytrzymałości betonu na rozciąganie.
- (3) Obliczenie naprężenia w stali  $\sigma_{cr}$  z momentu rysującego.
- (4) Obliczenie rozwarcia rysy  $w_k$  z momentu rysującego.
- (5) Przy negatywnej ocenie wyników powrót do kroku (1) w celu poprawy stopni zbrojenia.

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

### 4.2. Elementy wymiarowania

*Prawidłowości*, rys. 14 [15, 19, 21]:

Zasady zachowania się zamkniętych pierścieni lub belek utwierdzonych przy wzbudzeniu sił wymuszonych w wyniku różnic temperatur:

- (1) Miarodajność momentu rysującego  $M_{cr}$

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

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

$$k_T = k_M \text{ } \mathbf{P} \text{ } a_T DT_{cr}/h = 2 f_{ct}/(E_c h)$$

$$DT_{cr} = 2 f_{ct}/(a_T E_c) = 2' 2,6/(0,0001 30000) = 17 \text{ K}$$

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

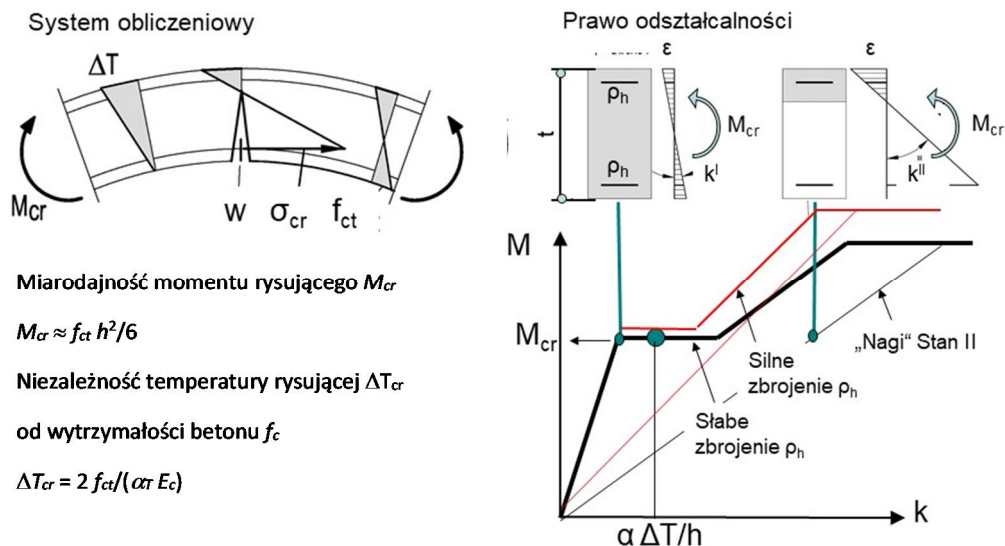
$$M^I = M^{II} \text{ } \mathbf{P} \text{ } f_{ct} h^2/6 \gg s_{cr} A_s 0,8 h$$

$$s_{cr} = 0,2 f_{ct}/r = 0,2' 2,6/0,002 = 260 \text{ MN/m}^2$$

*Prawo odkształcalności*, rys. 14 [4, 14, 15, 19, 21]:

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 zazębiającymi się strefami rysoprzyległymi,
- uplastycznienie stali w miejscach rys.



Rys. 14. Zasady modelowania trzonu w odniesieniu do nośności poziomej. Stufigkeitsorientierte Statik [2, 4, 14, 15, 19, 21, 24].

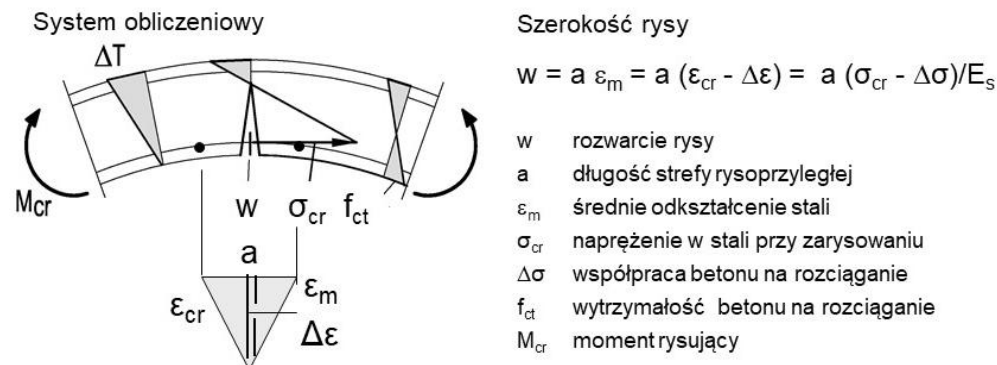
Szerokość rysy, rys. 15 [15, 19, 21]:

Rozwarcie rysy jest ustalane zgodnie z następującą zależnością

$$w = a \epsilon_m = a (\epsilon_{cr} - D\epsilon) = a (\sigma_{cr} - D\sigma)/E_s$$

Zależność ta ma następujące podstawy:

- figura odkształceń może być opisana podstawą a i wysokości  $\epsilon_{cr}$ ,
- podstawa a odpowiada długości w której z racji poślizgu stali wobec betonu powstaje rysa,
- wysokość  $\epsilon_{cr}$  jest odkształceniem stali po zarysowaniu,
- odkształcenie stali można uśrednić wartością  $\epsilon_m$ ,
- szerokość rysy w jest więc iloczynem wartości a i  $\epsilon_m$ ,
- wartość  $\epsilon_m$  można wyrazić różnicą wartości  $\epsilon_{cr}$  i współpracy betonu na rozciąganie  $\Delta\epsilon$ .



Rys. 15. Zasady ustalania szerokości rysy. Stufigkeitsorientierte Statik [4, 14, 15, 19, 21, 24].

- Szerokość rysy
- $$w = a \epsilon_m = a (\epsilon_{cr} - \Delta\epsilon) = a (\sigma_{cr} - \Delta\sigma)/E_s$$
- w    rozwarcie rysy
  - a    długość strefy rysoprzyległej
  - $\epsilon_m$     średnie odkształcenie stali
  - $\sigma_{cr}$     napężenie w stali przy zarysowaniu
  - $\Delta\sigma$     współpraca betonu na rozciąganie
  - $f_{ct}$     wytrzymałość betonu na rozciąganie
  - $M_{cr}$     moment rysujący

## 4.2. Przykład wymiarowania, rys. 16

Procedury powyższe zostały zastosowane w celu dalszego (zob. roz. 3) wymiarowania nowego typu siłowni wiatrowej z niesprężonym trzonem żelbetowym.

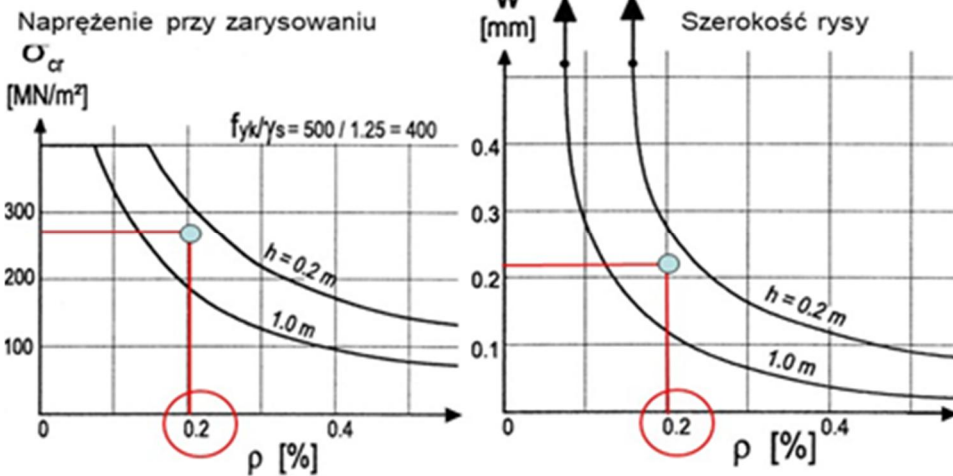
Beton	C25/30
Stal	S500
Trzon żelbetowy	116 m
Grubość ściany	0,30 m

Wyniki wymiarowania trzonu żelbetowego w odniesieniu do nośności poziomej wobec różnicy temperatur są jak następuje:

- średnica prętów  $d_s = 12$  mm,
- rozstaw prętów  $s = 19$  cm,
- stopień zbrojenie zewnątrz  $\rho_h = 0,20\%$ ,
- stopień zbrojenia wewnątrz  $\rho_h = 0,20\%$ ,
- naprężenie w stali  $\sigma_s = 280$  MN/m<sup>2</sup> <  $dozw\sigma_s = 400$  MN/m<sup>2</sup>
- rozwarcie rysy  $w_k = 0,22$  mm  $\approx dozw w_k = 0,20$  mm

### Cechy konstrukcji

Beton C25/30  
Stal S500



Rys. 16. Wyniki wymiarowanie zbrojenia obwodowego. Constructure Düsseldorf [15, 19, 21, 24].

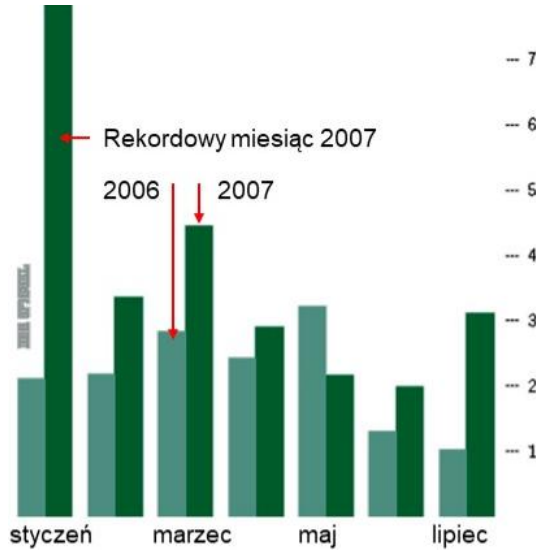
## 5. Perspektywy

### 5.1. Główne wyzwania

Siłownie wiatrowe są stosunkowo nową i szybko rozwijającą się technologią i jest jako taka konfrontowana z szeregiem wyzwań [1, 2, 3, 23, 24, 25–35].

Logistyka, rys. 17, [3]

Nierównomierna i nieprzewidywalna dyspozycyjność wiatru w skali miesięcznej i rocznej.  
Konieczność utrzymywania normalnych elektrowni na wypadek zastoju wiatru.  
Brak możliwości magazynowania nadwyżek energii w okresach nadwyżki wiatru.  
Brak możliwości pobierania prądu z odległych rejonów silnych wiatrów.



Rys. 17. Nierównomierna dyspozycyjność wiatru w Niemczech. VDEW [3].

Awarie, rys. 18, [29]



Rys. 18. Typowy wypadek awarii siłowni wiatrowych. Der Spiegel [1, 2, 3].

Szkody spowodowane korozją, zwłaszcza na obszarze offshore.  
Odpadanie części płatów wirnika pod wpływem sił odśrodkowych.  
Pożary maszynowni po uderzeniach pioruna.  
Zawalanie się w czasie szczególnie silnych burz.  
Krótka żywotność z powodu zmęczenie materiału wirników i trzonów.

*Produkcja i operacja*, rys. 18, [29]

Presja urzędów i grup związanych z ochroną środowiska.  
Brak czasu na rozwój techniczny z racji prymatu produkcji.  
Krótkie terminy dostaw odbijające się negatywnie na jakości urządzeń.  
Brak części zamiennych z przeciążenia dostawców.  
Ciągła potrzeba „Repowering” starszych urządzeń z racji szybkiego postępu technicznego.



Rys. 19. Dogład techniczny maszynowni przy pomocy helikoptera. Der Spiegel [1, 2, 3].

## 5.2. Trendy rozwojowe

Powyższe wyzwania wyzwoliły w produkcji energii z wiatru następujące trendy rozwojowe [1, 2, 3, 13]:

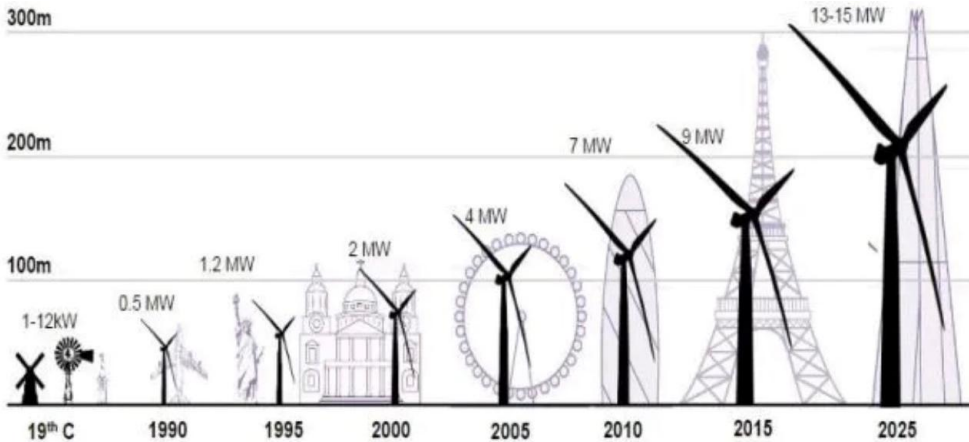
*Wzrost wydajności*, rys. 20, [33]

Wzrost wysokości trzonu od 30 do 125 m w ciągu ostatnich 25 lat.

Odpowiednie powiększenie średnicy wirnika od 15 (0,5 trzonu) do 115 m (0,9 trzonu).

Wykładnik trendu: Siłownia Repower w Brunsbüttel o wydajności 5 MW.





Rys. 20. Wzrost wysokości trzonu i średnicy wirnika. Clean Future [1, 29].

*Forsowanie siłowni Offshore, rys. 21, 22 [34]*

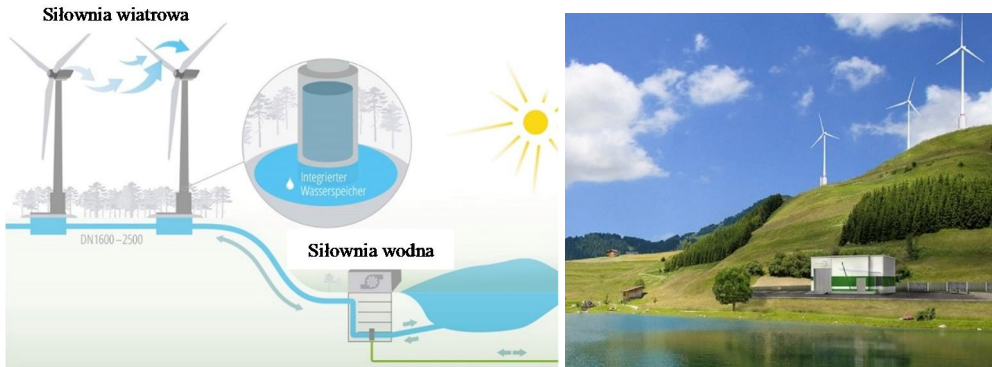
Stagnacje liczby siłowni offshore z powodu przestrzegania odległości do domostw.  
 Przybytek nowych jednostek offshore w obszarach repowering und parków offshore.  
 W sumie podwojenie się liczby siłowni i to prawie wyłącznie w obszarze offshore do 2020.  
 Wykładnik trendu: Park offshore Vesta na wybrzeżu Danii o wydajności 160 MW.



Rys. 21. Konstrukcja podstawy turbin offshore. Shutterstock [1, 34].

*Magazynowanie energii, rys. 22, [35]*

Nocne pompowanie wody z doliny do zbiornika w stopie wieży.  
 Płynne baterie na bazie Vanadium z nieograniczoną wydajnością i liczbą cykli.  
 Pompowanie powietrza pod ziemię.  
 Duże koła zamachowe.



Rys. 22. Magazynowanie energii drogą pompowania wody. Max Bögl Wind AG [30, 35].

### Przekaz prądu [3]

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.

### Koszty wznoszenia

Forsowanie trzonów z betonu niesprężonego w celu osiągnięcia następujących korzyści w porównaniu ze sprężeniem:

- niższe koszty wzniesienia dzięki uniknięciu drogiego sprężania.
- mniejszy nakład w odniesieniu do zapewniania jakości,
- wyższa trwałość uproszczonej konstrukcji,
- ograniczanie drogiego palowania fundamentów.

## Wnioski

Dzisiejszy świat jest konfrontowany z dwoma globalnymi zagrożeniami:

- efektem cieplarnianym w wyniku nadużywania paliw kopalnych,
- uzależnieniem od tychże niepewnych politycznie źródeł energii.

Efekt cieplarniany jest wynikiem hamowania powrotu ciepła z nasłonecznionej ziemi do wszechświata przez gęstą membranę powstałą wskutek gazów powstających przy używaniu paliw kopalnianych. Sytuacja ta prowadzi do wzmożenia gnębiących ludzkość katastrof klimatycznych.

Jedną z reakcji wysoko rozwiniętych krajów jest wykorzystywanie odnawialnych źródeł energii takich jak słońce, woda i wiatr. Wiatr jest przy tym najważniejszą czystą alternatywą wobec paliw kopalnych, a wiatraki należą w związku z tym do najważniejszych konstrukcji budowlanych.

W związku z tym niniejszy artykuł zajmuje się następującym zagadnieniami:

- powody obciążenia klimatu wyziewami przemysłowymi,
- podstawy wymiarowania: cechy konstrukcji, zasady analizy, kierunki nośności:
  - nośność pionowa wobec parcia wiatru: proces wymiarowania, elementy analizy, przykłady obliczeń,
  - nośność pozioma w odniesieniu do temperatury: proces wymiarowania, elementy analizy, przykłady obliczeń,
- aktualne wyzwania i kierunki dalszego rozwoju

## Conclusions

The today's world is confronted by two global threats:

- warming effect caused probably by the excessive use of fossil fuels,
- dependence on these becoming short sources of energy.

The warming effect is caused by a membrane of gases produced among others during the conventional energy generation. There are voices claiming that some of the current natural disasters are consequences of such air pollution.

One of the reactions of the highly developed world is to use renewable energy sources such as bio, water and wind. Wind is definitive the most important clean alternatives to fossil fuels and so windmills belong to the most important structures of the near future.

Consequently, the paper addresses the following issues:

- causes of the climate impairment by industrial gases,
- basis of Structural Design: Structural features, design principles, bearing direction:
  - vertical Bearing Direction: Design process, design tools, design example,
  - horizontal Bearing Direction: Design process, design tools, design example,
- current challenges and directions of the evolution,

## Literatura

1. Bundesverband Windenergie, BWE: Zahlen und Fakten 2022.
2. Der Spiegel 34/2007: Unerwartete Kräfte.
3. Der Spiegel 36/2007: Wankelmut des Windes.
4. DIN EN 13084: Freistehende Schornsteine, Teil 2: Betonschornsteine. April 2018.
5. Fuhrländer: Innovationsfelder für Industrie und Wissenschaft, Comeback eines Windkraftpioniers 2018.
6. Gasch R., Twele J.: Windkraftanlagen, Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb, B.G. Teubner Verlag/GWW Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2007.
7. Grünberg J., Funke G., Stavesand J., Göhlmann J.: Fernmeldeturme und Windenergieanlagen in Massivbauweise, Betonkalender 2006, Ernst und Sohn.
8. Dena, Deutsche Energie Agentur: Beraten und Planen, Newsletter 2022.
9. Deutsches Institut für Bautechnik: DIBt Richtlinie für Windenergieanlagen 2019.
10. Dewi GmbH, Deutsches Windenergie Institut: Windkraft-Journal 2021.
11. Hoffmeister, H., Nöthen J.: Reinforced Concrete Towers for Wind Energy Plants.
12. Kohler S.: Ergebnisse der Dena-Netzstudie, Vortragsmanuskript 2014.
13. Langnickel, U.: Wind Energy, VGB-Fachtagung Essen, 2012.
14. Nieser, H., Engel, V.: Industrieschornsteine in Massivbauart. Kommentar DIN 1056.
15. Noakowski, P., Gerstle, K.: Tower Structures Subjected to Temperature and Wind. Structural Journal of the American Concrete Institute (1990).
16. Noakowski, P., Moncarz, P.: Stiffness oriented design of concrete structures. Księga jubileuszowa Prof. Tadeusza Godyckiego, Politechnika Gdańska, 1998.
17. Noakowski, P., Breddermann, M., Harling, A., Pohl, B.: Cracks in Masts of centrifugal concrete, 4th International Conference AMCM. Kraków, 2002.
18. Noakowski, P.: Budownictwo przemysłowe w różnych krajach świata IV Konferencja Naukowo-Techniczna Budownictwo w Energetyce, Turów, maj 2014.
19. Noakowski, P., Schäfer, H.G.: Steifigkeitsorientierte Statik im Stahlbetonbau. Buch, Ernst&Sohn, 2006.
20. Noakowski, P., Breddermann, M., Harling: Wzmocnianie konstrukcji wieżowych. XXI Konferencja Awarie Budowlane, Międzyzdroje, maj 2003.
21. Noakowski, P., Harling, A., Breddermann, M., Rost, M.: Turmartige Bauwerke, Grundlagen CICIND, DIN V1056, DIN EN13084, Betonkalender 2006, Ernst & Sohn.
22. Noakowski, P., Harling, A., Rost, M.: Verstärkung turmartiger Bauwerke, VDI Bautechnik, Jahrbuch 2008.
23. Noakowski, P., Harling, A., Rost, M.: Windkraftwerke, Umwelt, Bemessung, Perspektiven, Ernst&Sohn, Berlin, Bautechnik 86 (2009), Heft 9.
24. Noakowski, P.: Wind PP in 5 Key Words, Conference "Redefining Cities...", Warsaw 2019.

25. Spiegel Spezial: Neue Energien, Wege aus der Klimakatastrophe, 155 Seiten, 1/2007.
26. Noakowski, P.: Windmills, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Wykłady 2022.
27. Noakowski, P.: Windenergieanlagen, TU Dortmund, Bauingenieurwesen, Vorlesungen 2022.
28. Windblatt - Enercon Magazin für Wind Energie, Ausgabe 01/2019.
29. Clean Future: Evolution of Wind Turbine Heights and Output, 2022.
30. Stuttgarter Zeitung: Naturstromspeicher, 10.06.2016.
31. EWEA: Wind Energy, The Facts, 2021.
32. Nutech Industrial Parts: History of Windmills, 2018.
33. Wind Energy in Europe: Installations per country, 2022.
34. Shutterstack: Wind Turbine development, 2021.
35. Max Bögl Wind AG: Nature-Energiespeicher, 2020.
36. Portal WysokieNapiecie.pl: Moc Siłowni Wiatrowych w EU, 2022.

### **Wind power plants environment, dimensioning, perspectives**