

Michał CŹWIK

Marian GIŹEJOWSKI

Politechnika Warszawska

Adam GOLIGER

CSIR Built Environment, Republika Południowej Afryki

## **PORÓWNANIE ODDZIAŁYWANIA WIATRU NA BUDYNKI WEDŁUG NORM POLSKICH I POŁUDNIOWOAFRYKAŃSKICH. CZEŚĆ 1. PODSTAWY NORMALIZACJI OBLICZEŃ**

Przedstawiono zasady określania oddziaływania wiatru na budynki według norm krajowych i południowoafrykańskich. Uwzględniono charakterystyki prędkości wiatru, sposób konwersji na ciśnienie prędkości wiatru oraz metody obliczania obciążenia powierzchni i konstrukcji, a także porównano procedury obliczeniowe.

### **1. Wprowadzenie**

Globalizacja usług budowlanych i szybki rozwój komputerowych metod obliczeniowych sprawiają, że zachodzi konieczność opracowywania zharmonizowanych zasad określania oddziaływania wiatru na konstrukcje. Zmiany w zasadach określania tych oddziaływań są wprowadzane do normalizacji krajów na różnych kontynentach. Prace związane z nowelizacją zasad obliczania oddziaływań wiatrowych na konstrukcje budowlane podjęto m.in. w Republice Południowej Afryki, w związku z wprowadzeniem nowej normy wiatrowej SANS 10160-3:2010 [1], która zastąpiła dotychczas obowiązującą normę SANS 10160-1989 [2]. Ponieważ w pracach normalizacyjnych w RPA wykorzystuje się podejście przyjęte w Eurokodzie EN 1991-1-4 [3], który wprowadzono również w Polsce jako normę PN-EN 1991-1-4 [4], istnieje możliwość wzajemnego porównania zasad określania oddziaływania wiatru na budynki ujętych w normach w RPA i Polsce oraz dyskusji różnic w stosunku do zasad ujętych w normach zastępowanych, odpowiednio SANS 10160-1989 [2] i PN-77/B-02011 [5, 6]. Podstawy normalizacji oddziaływania wiatru na konstrukcje budowlane były omawiane przez Goligera i in. [7, 8] oraz Dunańskiego i in. [9] – w odniesieniu

do normalizacji w RPA, a także przez Żurańskiego i in. [10-14] – w przypadku normalizacji krajowej.

W artykule omówiono nowe zasady określania oddziaływania wiatru na budynki według norm polskich i południowoafrykańskich, przyjmując jako podstawę normę europejską EN 1991-1-4 [3]. Uwzględniono charakterystyki prędkości wiatru, sposób konwersji na ciśnienie prędkości wiatru oraz metody obliczania obciążenia konstrukcji od wiatru, a także porównano procedury obliczeniowe dla reprezentatywnych typów konstrukcji, jak budynki halowe i wielokondygnacyjne. Szczególną uwagę poświęcono zagadnieniom, które w sposób istotny wpływają na wartość obciążenia wiatrem i w ujęciu nowych norm zostały różnie rozwiązane. Zrezygnowano z opisu współczynników ciśnienia, gdyż normy PN-EN 1991-1-4 [4] i SANS 10160-3:2010 [1] bezpośrednio przejęły wartości z EN 1991-1-4 [3] i nie różnią się w tym zakresie.

W ramach procedury wprowadzania nowej normy południowoafrykańskiej zmieniono nazwę dotychczas obowiązującej normy z SABS 0160-1989 na SANS 10160-1989 [2]. Na potrzeby niniejszego artykułu, jedynie w celu ułatwienia odróżnienia norm południowoafrykańskich, zastępowana norma południowoafrykańska SANS 10160-1989 [2] oznaczana będzie jej poprzednim akronimem, tj. SABS 0160.

## 2. Charakterystyki prędkości wiatru

Polska jest położona na półkuli północnej pomiędzy równoleżnikami 54°50'N (Jastrzębia Góra) i 49°00'N (szczyt Opołonek), leży więc w strefie wiatrów zachodnich komórki cyrkulacyjnej Ferrela. Podstawowe wartości bazowej prędkości wiatru w normie PN-EN [4] zostały podane w Załączniku krajowym, zgodnie z którym Polska została podzielona na trzy strefy obciążenia wiatrem (rys. 1., tab. 1.). Przeważająca część kraju leży w strefie 1., gdzie wartość podstawowej bazowej prędkości wiatru dla przeważających terenów nizinnych (zlokalizowanych na wysokości poniżej 300 m n.p.m.) wynosi 22 m/s. Podział kraju na strefy obciążenia wiatrem w normie PN-B [5, 6] został (z małą korektą) przyjęty w Załączniku krajowym do PN-EN [4]. Odpowiednio duża baza danych meteorologicznych umożliwiła w normie PN-EN [4] określenie współczynnika kierunkowego (tab. 2.), zmniejszającego bazową prędkość wiatru. Wartości współczynnika odzwierciedlające charakterystykę wiatrową Polski znacznie redukują przede wszystkim wschodnie kierunki wiejącego wiatru. Norma PN-B [5, 6] nie wskazuje możliwości redukcji prędkości wiatru ze względu na kierunek, z którego wieje.

Republika Południowej Afryki znajduje się na półkuli południowej pomiędzy równoleżnikami 22°07'S i 34°52'S na pasie niżów średnich szerokości. Przeważają wiatry wschodnie wiejące znad Oceanu Indyjskiego. Norma SANS [1] dzieli obszar Republiki Południowej Afryki również na trzy strefy obciąże-



Rys. 1. Podział Polski na strefy obciążenia wiatrem, na podstawie [4, 6]

Tabela 1. Wartości podstawowe bazowej prędkości wiatru dla Polski, na podstawie [4, 6]

Strefa	$V_{b,0}$ [m/s]	$V_{b,0}$ [m/s]
	$a \leq 300$ m	$a > 300$ m
1.	22	$22 \cdot [1 + 0,6(a - 300)]$
2.	26	26
3.	22	$22 \cdot [1 + 0,6(a - 300)]$

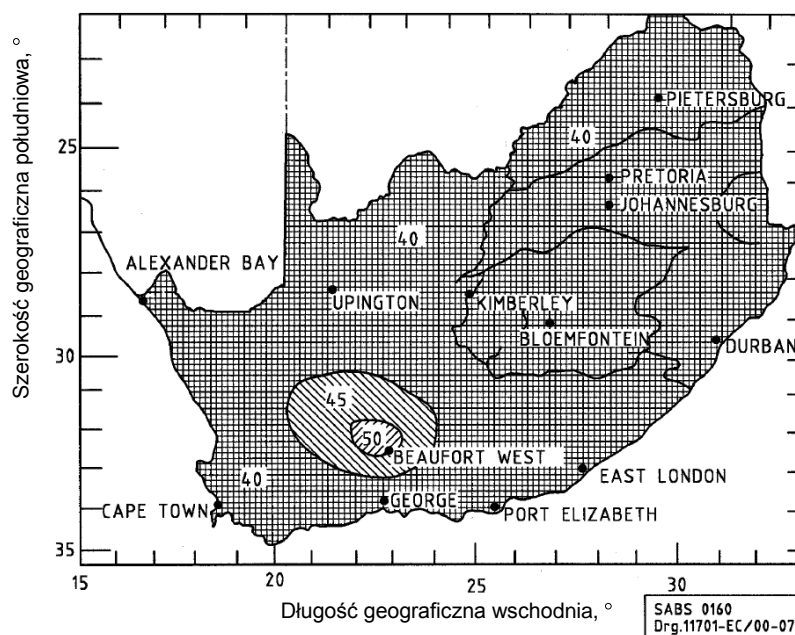
 $a$  – wysokość nad poziomem morza [m].

Tabela 2. Wartości współczynnika kierunkowego w Polsce, na podstawie [4]

Stre- fa	Kierunek wiatru (sektor)												
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1.	0,8	0,7						0,8	0,9	1,0		0,9	
2.	1,0	0,9	0,8	0,7				0,8	0,9	1,0			
3.	0,8	0,7				0,9		1,0					

UWAGA: Sektor 1. oznacza kierunek północny 0° (360°).





Rys. 3. Podział RPA na strefy obciążenia wiatrem, na podstawie [1]

Podstawową wartością bazowej prędkości wiatru w normach EN [3], PN-EN [4] i SANS [1] jest wartość będąca kwantylem rozkładu prawdopodobieństwa wartości średniej 10-minutowej, o rocznym prawdopodobieństwie przekroczenia 0,02, która jest niezależna od kierunku wiatru i pory roku, na wysokości 10 m nad poziomem gruntu, w otwartym niezalesionym terenie wiejskim i o pojedynczych przeszkodach oddalonych od siebie przynajmniej na odległość ich 20-krotnej wysokości. Opis terenu odpowiada kategorii II terenu według norm [3] i [4] oraz kategorii B według normy [1]. W normie PN-B [5, 6] podstawowa wartość jest określona jako charakterystyczna prędkość wiatru. Swoją charakterystyką odpowiada wartości bazowej prędkości wiatru opisanej w [1, 3, 4]. Norma SABS [2] podaje regionalną podstawową prędkość wiatru, charakteryzującą się czasem uśredniania równym 3 s.

Podstawowe wartości prędkości wiatru mogą być modyfikowane przez uwzględnienie współczynników związanych z innym niż 50-letni okres powrotu, kierunku wiatru i porą roku. W tablicy 1. zostały przedstawione charakterystyki wielkości podstawowych prędkości wiatru dla poszczególnych norm oraz możliwości uwzględnienia współczynników zmieniających.

Intensywność i charakter występujących przeszkód terenowych są odzwierciedlone przez normowe kategorie chropowatości terenu oraz wykresy prędkości średniej wiatru w funkcji wysokości nad poziom terenu, zwane profilami pionowymi wiatru. Podziały na poszczególne kategorie oparte są na skali chropowa-

Tablica 1. Charakterystyki wielkości podstawowych prędkości wiatru oraz współczynniki zmieniające, na podstawie [1-5]

Wielkości podstawowe i współczynniki zmieniające	Norma				
	PN-B	PN-EN	EN	SANS	SABS
Wielkość podstawowa	$V_k$	$v_{b,0}$	$v_{b,0}$	$v_{b,0}$	$V$
Czas uśredniania	10 min	10 min	10 min	10 min	3 s
Roczne prawdopodobieństwo przekroczenia / okres powrotu	2% 50 lat	2% 50 lat	2% 50 lat	2% 50 lat	2% 50 lat
Kategoria terenu odniesienia	B	II	II	A	2
Wysokość odniesienia	10 m	10 m	10 m	10 m	10 m
Wpływ wysokości terenu nad poziom morza	dla strefy 1. i 3., dla $H > 300$ m	dla strefy 1. i 3., dla $H > 300$ m	dopuszcza	–	–
Wpływ rocznego prawdopodobieństwa przekroczenia	–	$c_{prob}$	$c_{prob}$	$c_{prob}$	$K_r$
Wpływ kierunku wiatru	–	$c_{dir}$	$c_{dir}$	–	–
Wpływ pory roku	–	$c_{season} = 1,0$	$c_{season}$	–	–

UWAGA:

1)  $c_{prob} = \left( \frac{1 - K \cdot \ln - \ln 1 - p}{1 - K \cdot \ln - \ln 0,98} \right)^n = \left( \frac{1 - 0,2 \cdot \ln - \ln 1 - p}{1 - 0,2 \cdot \ln - \ln 0,98} \right)^{0,5}$

2)  $K_r$  z nomogramu

Współczynnik korekcyjny

Okres powrotu w latach

SABS 0160  
Drg.11703-EC/00-07

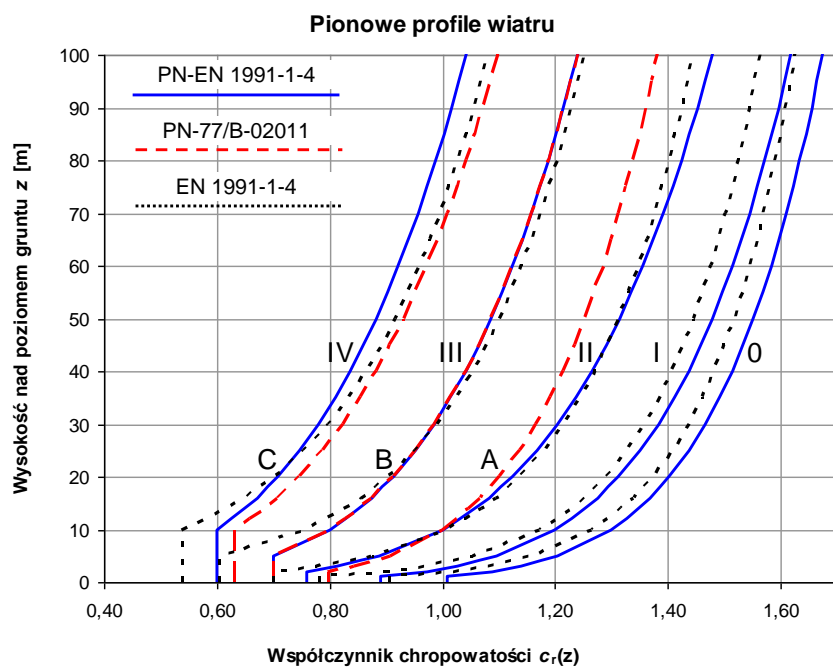
tości powierzchni. Podobnie jak w Eurokodzie EN 1991-1-4 [3], w aktualnej polskiej normie PN-EN 1991-1-4:2008 [4] wyróżniono pięć kategorii terenu. W południowoafrykańskiej SANS 10160-3:2009 [1] wyróżnione zostały tylko cztery kategorie. W tabeli 3. porównano podział na kategorie dla EN [3], PN-EN [4] i SANS [1] oraz dla wycofanych norm polskiej PN-B [5] i południowoafrykańskiej SABS [2].

Tabela 3. Podział na kategorie terenu, na podstawie [1-5]

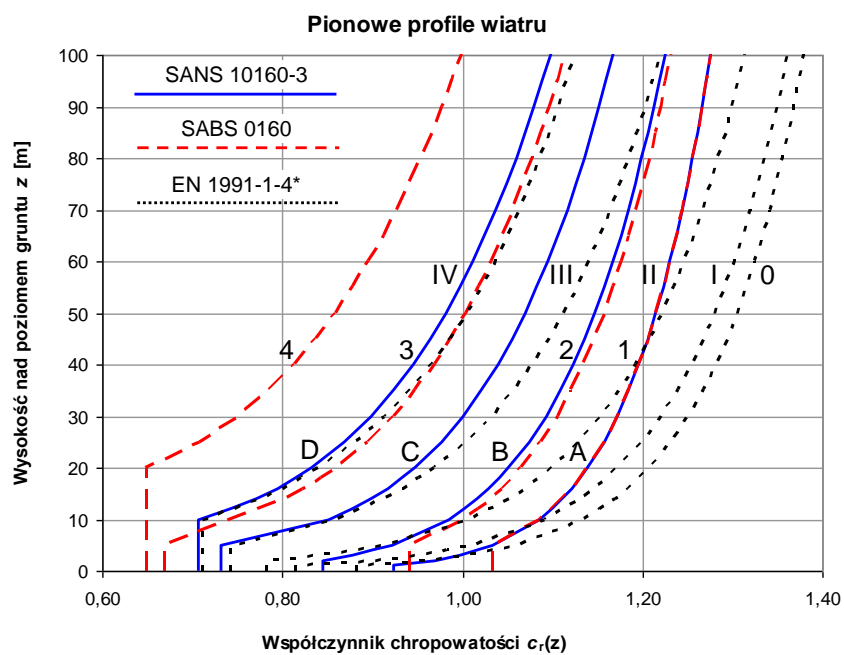
Opis terenu	Kategoria terenu				
	PN-B	PN-EN	EN	SANS	SABS
Obszary morskie i przybrzeżne wystawione na otwarte morze	–	0	0	–	–
Jeziora lub tereny płaskie, poziome o nieznacznej roślinności i bez przeszkód terenowych	–	I	I	A	–
Tereny o niskiej roślinności, takiej jak trawa, i o pojedynczych przeszkodach, takich jak drzewa i budynki	A	II	II	B	1.
Tereny regularnie pokryte roślinnością lub budynkami albo o pojedynczych przeszkodach (takie jak wsie, tereny podmiejskie, stałe lasy)	B	III	III	C	2. i 3.
Tereny regularnie pokryte wysokimi budynkami i wieloma przeszkodami (takie jak tereny miejskie i centra miast)	C	IV	IV	D	4.

Załącznik krajowy do normy PN-EN [4] nie wprowadził odrębnych zasad opisu kategorii terenu w porównaniu z EN [3]. Kategorie opisane w PN-EN [4] numerem I, II, III i IV odpowiadają odpowiednio kategoriom A, B, C i D w normie SANS [1], a kategorie II, III i IV kategoriom A, B i C normy PN-B [5]. W porównaniu z PN-B [5] w normie PN-EN [4] zostały dodane dwie kategorie charakteryzujące brzegi morskie – kategoria 0 i jeziora – kategoria I (rys. 4.). Trochę inaczej rzecz ma się w przypadku kategorii terenu opisanych w SABS [2]. W opracowywaniu nowej normy południowoafrykańskiej zrezygnowano bowiem z kategorii 4., opisującej pionowy profil wiatru dla terenów silnie zurbanizowanych. Stało się tak dlatego, że niezbędna do rozwinięcia takiego profilu odległość nad terenem o wymaganej chropowatości (ok. 7 km) przewyższała wielkość centrów miast w RPA. Jednocześnie zaproponowana w normie SANS [1] kategoria C wypełniła lukę pomiędzy kategoriami 2. i 3. w SABS [2] (rys. 5.).

Dla poszczególnych kategorii terenu zostały określone funkcje pionowych profili wiatru. W odróżnieniu od normy europejskiej, gdzie zależność prędkości wiatru od wysokości nad terenem jest opisana za pomocą funkcji logarytmicznej, w Załączniku krajowym do PN-EN [4], a także w normie południowoafry-



Rys. 4. Porównanie pionowych profili wiatru według EN [3], PN-EN [4] i PN-B [5, 6]



Rys. 5. Porównanie pionowych profili wiatru według EN [3], SANS [2] i SABS [1]; wykres dla EN 1991-1-4\* znormalizowany zgodnie z równaniem (1)



kańskiej, zastosowano wzór potęgowy. Pionowy profil prędkości wiatru w normie SABS [2] jest zależny od klasy obiektu lub elementu. Rozróżniono trzy klasy obiektu lub elementu: A – elementy budowli oraz małe obszary dachów, B – główne elementy konstrukcyjne oraz całe obiekty, których żaden z charakterystycznych wymiarów (wysokość, długość i szerokość) nie przekracza 50 m, C – całe obiekty, których co najmniej jeden z charakterystycznych wymiarów przekracza 50 m. Podział ten jest związany z zastosowaniem odpowiedniej długości czasu uśredniania porywów wiatru, która wynosi odpowiednio 3, 5 i 10 s. Na potrzeby porównania profili wiatru poszczególnych norm dla normy SABS [2] przyjęto klasę A obiektu, czyli odpowiedni dla okresu uśredniania wynoszącego 3 s. W tabeli 4. porównano współczynniki chropowatości i parametrów terenu dla poszczególnych kategorii terenu.

Podstawową cechą każdej normy jest zakres stosowalności. W odniesieniu do budynków normy EN [3] i PN-EN [4] ograniczają możliwość stosowania do budynków o wysokości do 200 m. Norma SANS [1] jest w tej kwestii bardziej restrykcyjna i zezwala na zastosowanie jedynie w przypadku budynków o maksymalnej wysokości wynoszącej 100 m. Normy zastąpione przez wymienione, czyli SABS 0160 [2] i PN-B-02011 [5, 6], nie wskazywały jednoznacznie zakresu stosowalności w zależności od wysokości projektowanych obiektów. W związku z tym postanowiono ograniczyć dalsze rozważania, a w tym porównanie pionowych profili wiatru do budynków o wysokości do 100 m.

Wykresy pionowych profili wiatru w normach SABS [2] i SANS [1] służą przeliczeniu wartości podstawowej prędkości wiatru o czasie uśredniania 3 s na prędkość charakterystyczną na danej wysokości o czasie uśredniania wynoszącym również 3 s. Inna sytuacja ma miejsce w normach EN [3], PN-EN [4] i PN-B [5], gdzie za pomocą współczynnika chropowatości przelicza się bazową prędkość wiatru o czasie uśredniania równym 10 min na średnią prędkość wiatru na danej wysokości również o czasie uśredniania równym 10 min. W celu porównania poszczególnych profili wiatru wykresy z norm PN-EN [4] i EN [3] na rys. 5. i 6. zestawiono z wykresami z norm południowoafrykańskich, przeskalowując je z uwzględnieniem porywistości wiatru (przeliczenie wartości średnich 10 min na wartości szczytowe 3 s) oraz przeliczenia wartości bazowej prędkości wiatru o czasie uśredniania 10 min na wartość bazową o czasie uśredniania 3 s, zgodnie ze wzorami (1) i (2). Profile wiatru pokazane na rys. 4. nie zostały zmodyfikowane. Na potrzeby porównania przyjęto  $c_o(z) = 1$ , tak jak dla terenu płaskiego, oraz  $k_t = 1$ , zgodnie z zaleceniami normowymi.

$$c_{r,EN}(z)^* = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot \frac{1 + 7 \cdot I_v(z)^{0,5}}{\left[1 + 7 \cdot I_{v,II}(10)\right]^{0,5}} \quad (1)$$

Tabela 4. Porównanie współczynników chropowatości i parametrów terenu dla poszczególnych kategorii terenu, na podstawie [1-5]

Kategoria terenu wg EN i parametry terenu	Norma				
	PN-B	PN-EN	EN	SANS	SABS
$c_r(z)$ Katego- ria terenu	$k_t \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha$	$k_r \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha$	$k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$	$1,36 \cdot \left(\frac{z - z_0}{z_g - z_0}\right)^\alpha$	$1,36 \cdot \left(\frac{z - z_0}{z_g - z_0}\right)^\alpha$
0	$k_t = 1,00$ $\alpha = 0,14$ $z_{\min} = 2$ $z_g = 300$	$k_r = 1,3$ $\alpha = 0,11$ $z_{\min} = 1$ $z_{\max} = 200$	$k_r = 0,156$ $z_0 = 0,003$ $z_{\min} = 1$ $z_{\max} = 200$	$\alpha = 0,070$ $z_0 = 0$ $z_{\min} = 1$ $z_g = 250$	—
I	—	$k_r = 1,2$ $\alpha = 0,13$ $z_{\min} = 1$ $z_{\max} = 200$	$k_r = 0,170$ $z_0 = 0,010$ $z_{\min} = 1$ $z_{\max} = 200$	—	—
II	—	$k_r = 1,0$ $\alpha = 0,17$ $z_{\min} = 2$ $z_{\max} = 300$	$k_r = 0,190$ $z_0 = 0,050$ $z_{\min} = 2$ $z_{\max} = 200$	$\alpha = 0,095$ $z_0 = 0$ $z_{\min} = 2$ $z_g = 300$	$\alpha = 0,070$ $z_0 = 0$ $z_{\min} = 5$ $z_g = 250$
III	$k_t = 0,80$ $\alpha = 0,19$ $z_{\min} = 5$ $z_g = 400$	$k_r = 0,8$ $\alpha = 0,19$ $z_{\min} = 5$ $z_{\max} = 400$	$k_r = 0,215$ $z_0 = 0,300$ $z_{\min} = 5$ $z_{\max} = 200$	$\alpha = 0,120$ $z_0 = 3$ $z_{\min} = 5$ $z_g = 350$	$\alpha = 0,090$ $z_0 = 0$ $z_{\min} = 5$ $z_g = 300$
					$\alpha = 0,140$ $z_0 = 5$ $z_{\min} = 7,5$ $z_g = 400$
IV	$k_t = 0,63$ $\alpha = 0,24$ $z_{\min} = 10$ $z_g = 500$	$k_r = 0,6$ $\alpha = 0,24$ $z_{\min} = 10$ $z_{\max} = 500$	$k_r = 0,234$ $z_0 = 1,000$ $z_{\min} = 10$ $z_{\max} = 200$	$\alpha = 0,150$ $z_0 = 5$ $z_{\min} = 10$ $z_g = 400$	$\alpha = 0,180$ $z_0 = 12$ $z_{\min} = 20$ $z_g = 500$
UWAGI: 1) dla EN współczynnik terenu został obliczony zgodnie ze wzorem: $k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07}$ 2) dla PN-B parametry terenu zostały zaczerpnięte z pracy [1]					

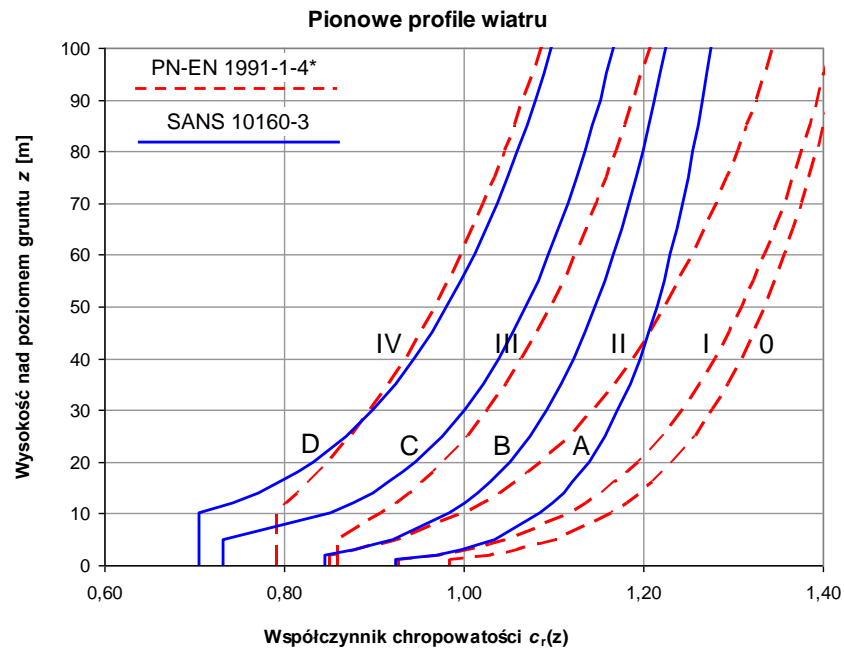
$$c_{r,PN-EN}(z)^* = k_r \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \cdot \frac{1 + 7 \cdot I_v(z)^{0,5}}{\left[1 + 7 \cdot I_{v,II}(10)\right]^{0,5}} \quad (2)$$

gdzie

$$I_v(z) = \frac{1}{\ln(z/z_0)} \quad (3)$$

$$I_{v,II}(10) = \frac{1}{\ln(10/z_{0,II})} = \frac{1}{\ln(10/0,05)} = 0,189 \quad (4)$$

Charakter profili wiatru dla normy PN-EN [4] pokazują wyraźne różnice w stosunku do profili normowych SANS [1] (rys. 6.). Wraz ze wzrostem wysokości wykresy z rys. 6. normy południowoafrykańskiej wykazują szybką zbieżność do prędkości gradientowej (rys. 5.). Profile prędkości wskazane w normie PN-EN [4], jak również w EN [3], nie dążą asymptotycznie do wartości wiatru gradientowego. Dysproporcja ta jest szczególnie wyraźna dla terenów „gładkich” (kategorie I i II), gdzie na wysokości 100 m różnice sięgają ok. 10%.



Rys. 6. Porównanie pionowych profili wiatru według PN-EN [4] i SANS [2]; wykres dla PN-EN 1991-1-4\* znormalizowany zgodnie z równaniem (2)

W niższych partiach różnice są mniejsze i na wysokości 10 m n.p.t. nie przekraczają 3%. Profile terenów „chropowatych” normy polskiej (kategorie III i IV) na wysokości 5 m n.p.t. dają wyniki odpowiednio wyższe o 7 i 12% w porównaniu z normą południowoafrykańską. Powyżej 15 m n.p.t. różnice dla tych terenów nie przekraczają 5%.

Poza współczynnikiem chropowatości w obliczeniach prędkości wiatru uwzględnia się również wpływ ukształtowania terenu. W normach EN [3], PN-EN [4] i SANS [1] wpływ skarp i pojedynczych wzniesień na prędkość wiatru został uwzględniony w postaci współczynnika orografii występującego w równaniu na średnią prędkość wiatru. Założono, że jeżeli rzeźba terenu (wzgórza, skarpy itp.) zwiększa prędkość wiatru o mniej niż 5%, to efekty można pominąć w obliczeniach. W normach PN-B [5] i SABS [2] wpływ ukształtowania terenu uwzględniony był poprzez przyjęcie dla budowli projektowanych na lub w pobliżu skarp i wzniesień o nachyleniu ponad 1:3, niższego niż rzeczywisty, umownego poziomu gruntu.

### 3. Metody obliczania wartości ciśnienia prędkości wiatru

O wielkości obciążenia wiatrem budowli i ich elementów bezpośrednio decyduje wartość szczytowa ciśnienia prędkości wiatru. W normie EN [3] i PN-EN [4] wartość ta wyznaczana jest jako iloczyn wartości bazowej ciśnienia prędkości  $q_b$  i współczynnika ekspozycji  $c_e(z)$ . Wartość bazowa ciśnienia prędkości jest obliczana według równania  $q_b = 0,5 \cdot \rho \cdot v_b^2$ . Współczynnik ekspozycji w PN-EN [4] został podany w Załączniku krajowym (tab. 5.), a dla normy EN [3] w postaci:

$$c_e(z) = 1 + 7I_v(z) \cdot c_r(z)c_o(z)^2 \quad (5)$$

gdzie

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_l}{c_o(z) \ln(z/z_0)} \quad (6)$$

Dla  $c_o(z) = 1,0$  oraz zgodnie z zaleceniem normowym  $k_l = 1,0$  wzór na współczynnik ekspozycji przyjmuje postać:

$$c_e(z) = c_r^2(z) \left[ 1 + \frac{7}{\ln(z/z_0)} \right] \quad (7)$$

Tabela 5. Współczynnik ekspozycji, na podstawie [4]

Kategoria terenu	$c_e(z)$	$z_{\min}$ [m]	$z_{\max}$ [m]
0	$3,0 \left( \frac{z}{10} \right)^{0,17}$	1	200
I	$2,8 \left( \frac{z}{10} \right)^{0,19}$	1	200
II	$2,3 \left( \frac{z}{10} \right)^{0,24}$	2	300
III	$1,9 \left( \frac{z}{10} \right)^{0,26}$	5	400
IV	$1,5 \left( \frac{z}{10} \right)^{0,29}$	10	500

UWAGA:  $c_e(z)$  dla wysokości  $z > z_{\max}$  należy przyjmować jak dla  $z_{\max}$ .

Współczynnik ekspozycji, oprócz rodzaju terenu i wysokości nad nim, tak jak ma to miejsce w PN-B [5, 6], uwzględnia również przeliczenie wartości średniej ciśnienia na wartość chwilową uwzględniając intensywność turbulencji. W normie PN-B [5, 6] na potrzeby rozważenia porywów wiatru wprowadzono rozróżnienie budowli na podatne i niepodatne na działanie porywów wiatru. W przypadku konstrukcji niepodatnych przeliczenie wartości średniej 10-minutowej ciśnienia wiatru na wartość chwilową jest realizowane za pomocą stałego współczynnika działania porywów wiatru  $\beta = 1,8$ . Odpowiada on przeliczeniu na wartość od 10 do 15 s. Stały współczynnik  $\beta = 2,2$  służy do przeliczenia wymienionych wartości na wartość 3-sekundową i jest wykorzystywany do obliczania obciążenia wiatrem małych elementów budowli. Określając obciążenia na budowle podatne, współczynnik  $\beta$  jest obliczany z uwzględnieniem rozmiarów budowli, podstawowego okresu drgań własnych, logarytmicznego dekrementu tłumienia oraz prędkości i turbulentności wiatru. Obliczenia według normy SABS [2] są prowadzone od samego początku na wartościach szczytowych prędkości i ciśnienia wiatru, nie przewiduje się więc przeliczania wartości średnich na chwilowe i odwrotnie. Przeliczenie wartości średniej na chwilową zgodnie z założeniami SANS [1] następuje w momencie obliczania wartości szczytowej prędkości wiatru. Współczynnik porywistości jest stały i wynosi 1,4. Ponieważ ciśnienie prędkości wiatru jest wprost proporcjonalne do kwadratu prędkości wiatru, współczynnik ten dla przeliczania ciśnienia średniego na chwilowe osiąga wartość 1,96.

Na rysunkach 7-9. przedstawiono wykresy współczynników ekspozycji dla poszczególnych norm. Ponieważ w normach SABS [2] i SANS [1] nie przewidziano zastosowania współczynnika  $c_e(z)$ , na potrzeby porównania przekształ-

cono równanie na ciśnienie prędkości wiatru zgodnie ze wzorami (8) i (9) oraz wyszczególniono składniki odpowiadające współczynnikowi ekspozycji w pozostałych normach. Dodatkowo w przypadku normy SABS [2] uwzględniono współczynnik przeliczenia prędkości wiatru o czasie uśredniania 10 min na czas uśredniania 3 s, zgodnie z SANS [1] równy 1,4. Stąd

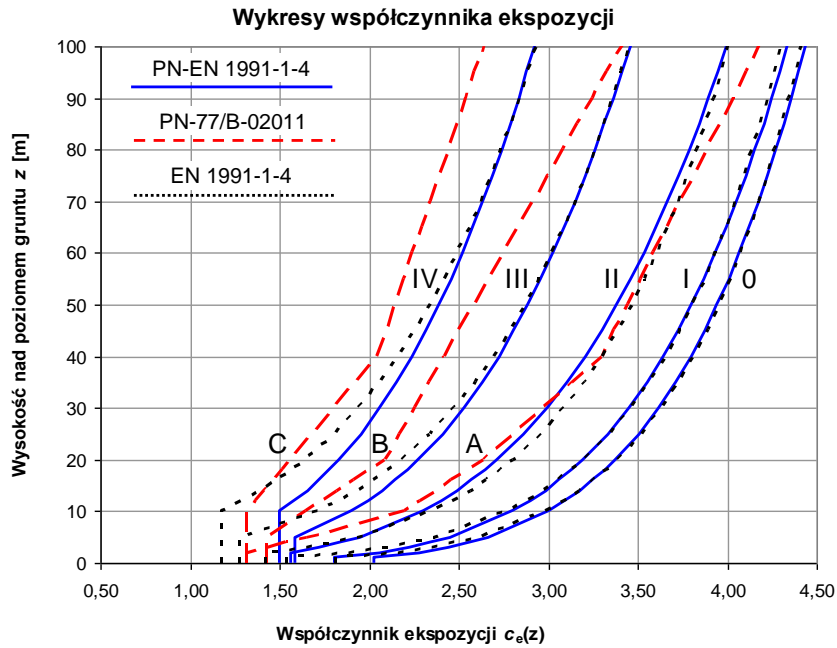
- dla SANS [1]

$$q_z = \frac{1}{2} \rho V_p^2(z) = \frac{1}{2} \rho \left[ c_r(z) v_{b,peak} \right]^2 = \frac{1}{2} \rho c_r(z) 1,4 v_b^2 =$$

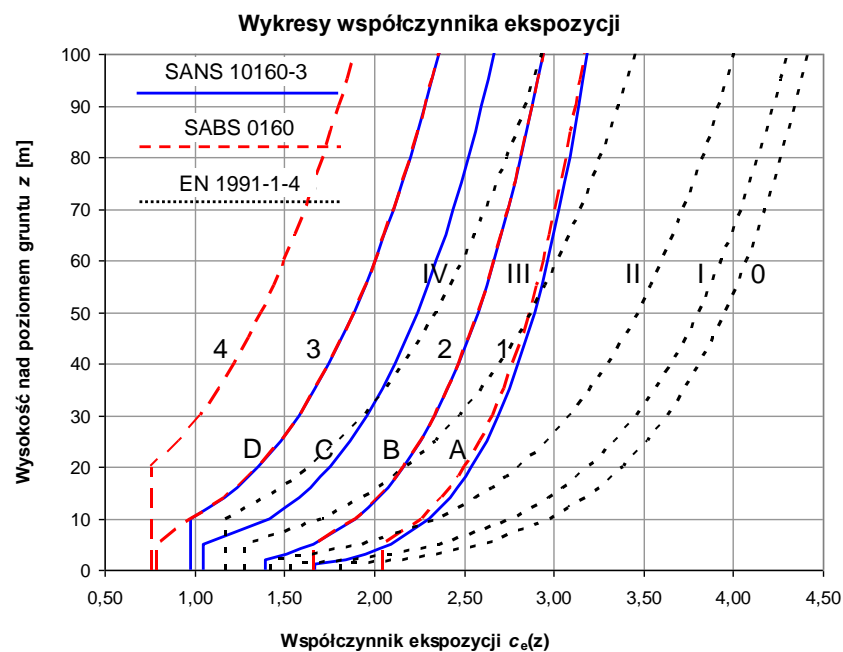
$$= \frac{1}{2} \rho v_b^2 \cdot \left[ 1,36 \left( \frac{z - z_0}{z_g - z_0} \right)^\alpha 1,4 \right]^2 \quad (8)$$

- dla SABS [2]

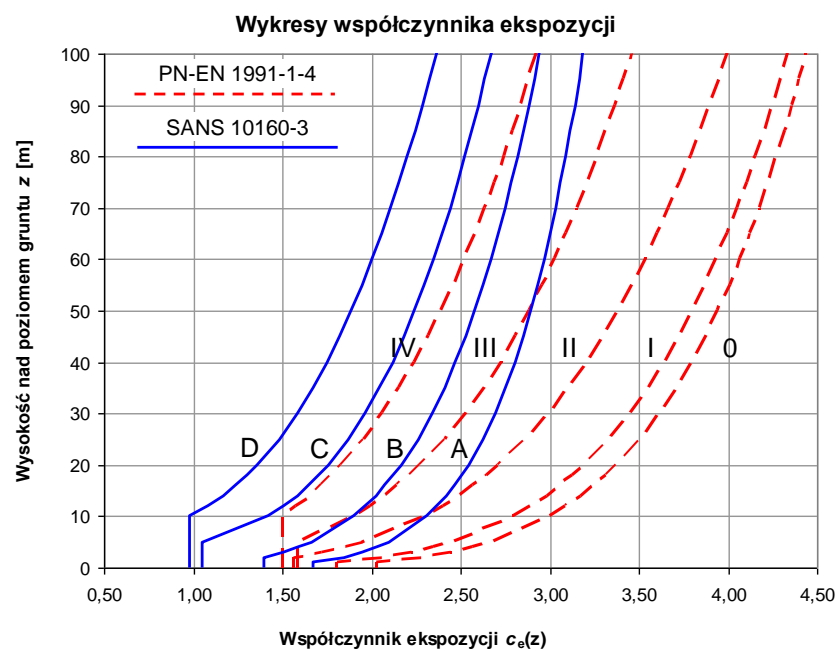
$$q_z = k_p V_z^2(z) = \frac{1}{2} \rho \cdot \left[ 1,36 \left( \frac{z - z_o}{z_g - z_o} \right)^\alpha V \right]^2 = \frac{1}{2} \rho v_b^2 \cdot \left[ 1,36 \left( \frac{z - z_o}{z_g - z_o} \right)^\alpha 1,4 \right]^2 \quad (9)$$



Rys. 7. Porównanie współczynnika ekspozycji według EN [3], PN-EN [4] i PN-B [5, 6]



Rys. 8. Porównanie współczynnika ekspozycji według EN [3], SANS [2] i SABS [1]; wykres SANS 10160-3 zgodnie z równaniem (8) i SABS 0160 zgodnie z równaniem (9)



Rys. 9. Porównanie współczynnika ekspozycji według PN-EN [4] i SANS [2]; wykres SANS 10160-3 zgodnie z równaniem (8)

Ponieważ w normie PN-B [5, 6] współczynnik  $C_e(z)$  nie realizuje zmiany wartości średnich na szczytowe, przyjęto, że wartość szczytowa jest iloczynem współczynnika ekspozycji  $C_e(z)$  w wartości współczynnika działania porywów wiatru  $\beta = 2,2$ . Na potrzeby porównania przyjęto  $c_o(z) = 1$  oraz klasę A obiektu dla normy SABS [2].

Wykresy współczynnika ekspozycji dla poszczególnych norm i kategorii terenów są bardzo podobne co do charakteru krzywych obrazujących współczynnik chropowatości. Zwiększenie różnic pomiędzy normami południowoafrykańskimi a polską i europejską wynika z zastosowania współczynnika działania porywów wiatru, który dla normy SANS [1] jest stały i wynosi 1,96. Analogiczny współczynnik według eurokodów na wysokości 10 m w terenie otwartym wynosi 2,32. Jednocześnie zależy on od intensywności turbulencji, a więc od rodzaju terenu i wysokości nad nim. W przypadku normy PN-B [5, 6] analogiczny współczynnik jest stały i wynosi  $\beta = 2,2$ .

Inną wielkością bezpośrednio wpływającą na wielkość ciśnienia wiatru jest gęstość powietrza. Norma EN [3] wskazuje wartość zalecaną równą  $1,25 \text{ kg/m}^3$ , jednocześnie przewidując możliwość zastosowania innych wartości w załącznikach krajowych. W normie PN-EN [4] przewidziano zmianę gęstości powietrza jedynie dla terenów położonych powyżej 300 m n.p.m. w III strefie obciążenia wiatrem. Zmiana ta jest realizowana za pomocą mnożnika do wartości podstawowej ciśnienia prędkości wiatru, zależnego od wysokości terenu nad poziomem morza, który wynosi  $[(20000 - A)/(20000 + A)]$ , gdzie A oznacza wysokość nad poziomem morza. Zakładając z pewną dokładnością, że na wysokości 0 m n.p.m. gęstość powietrza wynosi  $1,25 \text{ kg/m}^3$ , to dla wysokości równych 500, 1000, 1500 i 2000 m n.p.m. wartości gęstości będą wynosić odpowiednio: 1,19, 1,13, 1,08 i  $1,02 \text{ kg/m}^3$ . W normie PN-B [5, 6] dla stref I i II podano gęstość powietrza równą  $1,23 \text{ kg/m}^3$ . Zmienną gęstość powietrza uwzględniono tylko w strefie III, gdzie do wysokości 200 m n.p.m. gęstość ta wynosi  $1,23 \text{ kg/m}^3$ , a powyżej jest zmienna liniowo, zgodnie ze wzorem wskazanym w PN-EN [4]. Normy SANS [1] i SABS [2] zakładają gęstość powietrza równą  $1,20 \text{ kg/m}^3$  dla wysokości wynoszącej 0 m n.p.m.,  $1,12 \text{ kg/m}^3$  dla 500 m,  $1,06 \text{ kg/m}^3$  dla 1000 m,  $1,00 \text{ kg/m}^3$  dla 1500 m oraz  $0,94 \text{ kg/m}^3$  dla 2000 m n.p.m. Pomiedzy poszczególnymi wartościami dopuszcza się interpolację liniową.

#### 4. Metody określania obciążenia konstrukcji

Obszerny zakres norm związany z procedurami konwersji ciśnienia prędkości wiatru na obciążenia powierzchni i konstrukcji, a w szczególności ze współczynnikami ciśnienia i siły, powoduje, że nie jest możliwe przedstawienie szczegółowych zagadnień z tym związanych. W niniejszym artykule wskazano więc jedynie najistotniejsze różnice dotyczące sposobów szacowania obciążeń przegród budynków oraz ogólne wnioski.



Istotną różnicą pomiędzy normami polskimi i europejską a południowoafrykańskimi, wpływającą na wartości obciążenia budynków od wiatru, jest współczynnik konstrukcyjny  $c_s c_d$ . W normie SANS [1] wskazano, że dla obiektów objętych tą normą współczynnik konstrukcyjny powinien być stały, równy 1,0. Norma EN [3], a za nią PN-EN [4], podaje bardzo szczegółowe procedury obliczania tego współczynnika. W normie SABS [2], poza krótkimi komentarzami, nie podano dokładnej procedury szacowania dynamicznego oddziaływania wiatru na konstrukcje, natomiast w PN-B [5, 6] została podana procedura obliczania współczynnika działania porywów wiatru dla budowli podatnych na dynamiczne działanie wiatru.

Metody wyznaczania współczynników ciśnienia, a także same współczynniki, są dla budynków niemal identyczne w normach EN [3], PN-EN [4] i SANS [1]. Normy SABS [2] i PN-B [5, 8] znacznie się różnią od norm je zastępujących. Jak wskazano na przykładzie dwóch reprezentatywnych typów budynków [12], współczynniki ciśnienia wyznaczone według poprzedniej wersji normy PN-B [5, 6], poza nielicznymi przypadkami, takimi jak np. część połaci nawietrznej dachu dwuspadowego, są niższe co do wartości bezwzględnej od tych wyznaczonych według nowej normy PN-EN [4]. Jednocześnie wskazano współczynnik ciśnienia wewnętrznego niewystępujący w normie PN-B jako czynnik zwiększający różnice w wynikach obciążenia wiatrem [5, 6]. Porównując obie normy, należy także zauważyć, że w nowej normie [4] liczba wariantów obciążenia przegród budynków jest dużo większa, a współczynniki obciążenia zewnętrznego zostały dodatkowo podzielone ze względu na rozmiary elementów, co poza możliwością dokładniejszego oszacowania obciążeń zauważalnie zwiększyło pracochłonność obliczeń oraz w niektórych przypadkach stwarza pewne utrudnienia w analizie porównawczej obu norm.

Porównania oddziaływań wiatru według norm południowoafrykańskich dokonano w opracowaniach [7, 9]. Wnioski płynące z tych opracowań nie są tak jednoznaczne, jak wnioski wynikające z porównania norm polskich, pozwalają jednak na sformułowanie kilku ogólnych spostrzeżeń. Sumaryczne wartości bezwzględne obciążenia wiatrem prostopadłym do kalenicy dachu dwuspadowego są w przypadku normy SANS [1] wyższe dla połaci zawietrznych (ok. 50%) i w większości przypadków niższe dla nawietrznych (do ok. 50%). W rezultacie obciążenie całego dachu przyjmuje bardziej symetryczny charakter. Wartości obciążeń dachu przy wietrze wiejącym wzdłuż kalenicy nie wykazują wyraźnych różnic. W przypadku dachów płaskich bardzo trudno wskazać stałą tendencję. Na różnice w wartościach obciążenia zdecydowany wpływ mają wymiary budynków i kierunki wiatru. Związane jest to z bardziej szczegółowym podziałem powierzchni dachu w „nowej” normie [1]. Wartości obciążenia ścian nawietrznych nie wykazują dużych różnic. Wyraźnie wyższe obciążenia w przypadku normy [1] występują na ścianach równoległych do kierunku wiatru (nawet ponad dwukrotnie) i ścianach zawietrznych, gdzie w niektórych przypadkach obciążenie było niemal czterokrotnie wyższe.

W przypadku szacowania obciążenia wiatrem ścian budynków we wszystkich porównywanych normach uwzględniono zmienną zależną od wysokości budynku wartość szczytowego ciśnienia prędkości. Zgodnie z normą EN [3] budynki w tym zakresie zostały podzielone na trzy grupy. Dla budynków, których wysokość nie przekracza szerokości (wymiaru prostopadłego do kierunku wiatru), wartość szczytowego ciśnienia prędkości jest obliczana dla wysokości odniesienia równej wysokości budynku. Budynki, których wysokość mieści się w granicach od szerokości do podwojonej szerokości, należy podzielić na dwie części: dolną rozciągającą się w górę od poziomu podstawy do wysokości równej szerokości i pozostałą część górną. Dla powstałych obszarów wartość szczytowego ciśnienia prędkości jest liczona dla najwyższych ich punktów. Pozostałe budynki, czyli te, których wysokość jest większa od podwojonej szerokości, należy traktować jako złożone z kilku części, tj. dolnej – od poziomu podstawy do wysokości równej szerokości budynku, górnej – od górnej krawędzi do poziomu odpowiadającego szerokości budynku i pośredniej. Część pośrednia może zostać dodatkowo podzielona, jednak autorzy normy EN [3] pozostawili określenie zasad podziału do decyzji komitetom tworzącym załączniki krajowe. Zgodnie z Załącznikiem krajowym do PN-EN [4] obszar pośredni, między częścią górną a dolną, dzieli się na jak najmniejszą liczbę części, lecz o wymiarach w pionie nie większych niż szerokość budynku.

Dla powstałych obszarów, podobnie jak dla pozostałych typów budynków, wartość szczytowego ciśnienia prędkości jest liczona dla najwyższych ich punktów. Procedura w normie SANS [1] w tym zakresie jest identyczna, jak w EN [3], z tą jednak różnicą, że nie wskazano sposobu podziału obszaru pośredniego. Norma SABS [2] wskazuje możliwość zastosowania zmiennych wartości szczytowego ciśnienia prędkości zgodnie z pionowymi profilami wiatru, jednak nie została wskazana szczegółowa procedura dzielenia przegród na poszczególne obszary. Warto w tym miejscu wspomnieć, że istotną różnicą pomiędzy starą normą południowoafrykańską a pozostałymi normami jest wskazanie w SABS [2] jako górnej wysokości odniesienia w obliczaniu obciążenia ścian – wysokości ściany a nie wysokości budynku, jak ma to miejsce w pozostałych normach [1, 3-6]. Różnica ta może spowodować istotne dysproporcje w wartościach obciążenia ścian dla budynków przekrytych dachami o dużych kątach nachylenia. Norma PN-B [5, 6] zakłada podział budynków na dwie grupy. Dla budynków, których wysokość nie przekracza podwojonej szerokości (wymiaru prostopadłego do kierunku wiatru), współczynnik ekspozycji jest stały i określony dla wysokości budynku. Dla drugiej grupy budynków, których wysokość jest większa od podwojonej szerokości, należy przyjmować zmienną wartość współczynnika ekspozycji. Zgodnie z zapisami normy zamiast liniowo zmiennego rozkładu wartości można przyjmować rozkład skokowy o wartościach stałych równych średnim na odcinkach nie dłuższych niż 10 m. Procedura PN-B [5, 6] jest więc w tej kwestii różna od tej zastosowanej w EN [3] i PN-EN [4], gdzie przyjmuje

się, że ciśnienie działające na dany obszar odpowiada ciśnieniu w najwyższym punkcie tego obszaru.

## 5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono sposób wyznaczania obciążenia wiatrem budynków według nowych norm polskiej PN-EN 1991-1-4 [4], europejskiej EN 1991-1-4 [3] i południowoafrykańskiej SANS 10160 [9]. W aspektach związanych z obliczaniem ciśnienia prędkości wiatru porównano zasady ujęte w nowych normach z zasadami ujętymi w normach zastępowanych, odpowiednio SABS 0160-1989 [2] i PN-77/B-02011 [5, 6]. Czynnikiem zwiększającym obciążenie obliczane zgodnie z zasadami normy SANS [1], w porównaniu z nową normą polską [4] i europejską [3], są większe wartości podstawowej bazowej prędkości wiatru, założenie stałego współczynnika konstrukcyjnego  $c_{scd} = 1$  oraz zastosowanie stałego współczynnika kierunkowego  $c_{dir} = 1$ . Czynnikiem zmniejszającym obciążenie są natomiast mniejsze wartości współczynnika ekspozycji związane z użyciem stałego współczynnika działania porywów wiatru równego 1,96 (przy analogicznym współczynniku według eurokodów, na wysokości 10 m w terenie otwartym równym 2,32) oraz mniejsze wartości gęstości powietrza.

*Niniejszy artykuł powstał jako wynik badań w projekcie badawczym realizowanym w ramach Umowy o Współpracy Naukowo-Technicznej między rządami RP i RPA.*

## Literatura

- [1] SANS 10160-3:2010. South African National Standard. Basis of structural design and actions for buildings and industrial structures. Part 3: Wind actions. South African Bureau of Standards, Pretoria.
- [2] SANS 10160-1989 (Reprinted 1994). South African Standard Code of practice for the general procedures and loadings to be adopted in the design of buildings, South African Bureau of Standards, Pretoria.
- [3] EN 1991-1-4. Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-4: General actions – Wind actions.
- [4] PN-EN 1991-1-4:2008. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru.
- [5] PN-B-02011:1977. Obciążenia w obliczeniach statycznych – Obciążenie wiatrem.
- [6] PN-B-02011:1977/Az1:2009. Zmiana do Polskiej Normy – Obciążenia w obliczeniach statycznych – Obciążenie wiatrem.
- [7] Goliger A.M., Retief J.V., Dunański P.E.: Background to SANS 10160. Part 3. Wind actions. 3-1 Review of codification of wind-loading for structural design, J.V. Retief, P.E. Dunański (ed.), Sun Media, Stellenbosch 2009.

- [8] Goliger A.M., Retief J.V., Dunański P.E., Kruger A.C.: Background to SANS 10160. Part 3. Wind actions. 3-2 Revised wind-loading design procedures for SANS 10160, J.V. Retief, P.E. Dunański (ed.), Sun Media, Stellenbosch 2009.
- [9] Dunański P.E., Dunański W.I., Retief J.V., Goliger A.: Comparison of wind load effects – calculated according to SABS 0160-1989 and the proposed procedure based on prEN 1991-1-4.6. Internal Report, ISE – Institute of Civil Engineering, University of Stellenbosch, Stellenbosch 2005.
- [10] Żuranski J.A.: Obciążenia wiatrem budowli i konstrukcji, wyd. 2., Arkady, Warszawa 1978.
- [11] Żuranski J.A.: Wpływ warunków klimatycznych i terenowych na obciążenie wiatrem konstrukcji budowlanych, Wydaw. Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 2005.
- [12] Żuranski J.A.: Oddziaływania wiatru na konstrukcje budowlane w ujęciu normy PN-EN 1991-1-4:2008, Inżynieria i Budownictwo, nr 7/2010, s. 360-367.
- [13] Żuranski J.A., Gaczek M.: Obciążenie wiatrem budynków w ujęciu normy PN-EN 1991-1-4:2008, Inżynieria i Budownictwo, nr 9/2010, s. 494-501.
- [14] Żuranski J.A.: Oddziaływania na konstrukcje, [w:] Budownictwo ogólne: Stalowe konstrukcje budynków – Projektowanie według eurokodów z przykładami obliczeń, t. V, pod red. M.A. Giżejowskiego i J. Ziółko, Arkady, Warszawa 2010.

## **COMPARISON OF WIND ACTIONS ON BUILDINGS ACCORDING TO POLISH AND SOUTH-AFRICAN CODES.**

### **PART 1. BASIS FOR CODIFICATION PROCEDURES**

#### **Summary**

Aspects of the wind action determination for buildings according new South African and Polish design codes are described. The wind speed, conversion rules for velocity pressure and wind pressure on surfaces and construction as well as calculation procedures are included.