

## **Badania stanów granicznych stalowych kasetonów elewacyjnych**

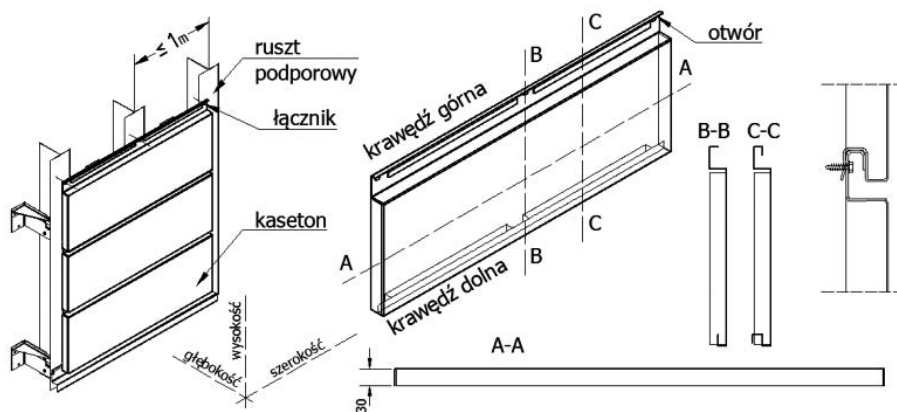
**Dr inż. Piotr Lewandowski, dr hab. inż. Elżbieta Urbańska-Galewska, prof. nadzw. PG  
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska**

Wraz z rozwojem technologii wytwarzania konstrukcji stalowych coraz częściej wyroby ze stali są stosowane nie tylko do konstrukcji nośnych, ale również do elewacyjnych elementów wykończeniowych w formie tzw. kasetonów elewacyjnych.

Ze względu na brak modeli obliczeniowych układów płytowych odzwierciedlających rzeczywiste warunki podparcia płyt, przy projektowaniu kasetonów są stosowane uproszczone modele obliczeniowe. Do obliczeń przyjmuje się albo płyty sztywno podparte na obwodzie, albo płyty podparte przegubowo. Z kolei do wyznaczenia sił działających na łączniki, w zastępczych mo-

delach obliczeniowych przyjmuje się uproszczenie redukujące przestrzenną geometrię kasetonu do jednowymiarowego układu belki swobodnie podpartej o długości równej szerokości kasetonu. W rzeczywistości płyta kasetonu elewacyjnego jest płytą sprężystie podpartą na obwodzie. Podpory sprężyste są utworzone przez jedno- lub wielokrotne zagięcia wszystkich czterech krawędzi kasetonu (rys. 1b) oraz punktowe podparcie na ruszcie systemowym.

Stosowane w praktyce przybliżone metody obliczeniowe prowadzą do nieefektywnych rozwiązań konstrukcji kasetonów.



Rys. 1. Konstrukcja elewacji z kasetonów: a) mocowanie kasetonów do ściany budynku, b) konstrukcja pojedynczego kasetonu, c) szczegół zamka łączącego kasetony w pionie [3]

Ciągłe dążenie do minimalizacji masy konstrukcji powoduje, że stalowe okładziny kasetonowe są coraz cieńsze, przez co bardziej podatne na wszelakie deformacje, zarówno w czasie montażu, jak i eksploatacji. Pomimo bogatej literatury dotyczącej zginania płyt z uwzględnieniem ich warunków podparcia [1, 2, 5, 6] wciąż brakuje rozwiązań odzwierciedlających rzeczywiste warunki podparcia stalowych płyt kasetonowych.

### PROGRAM I ZAKRES BADAŃ

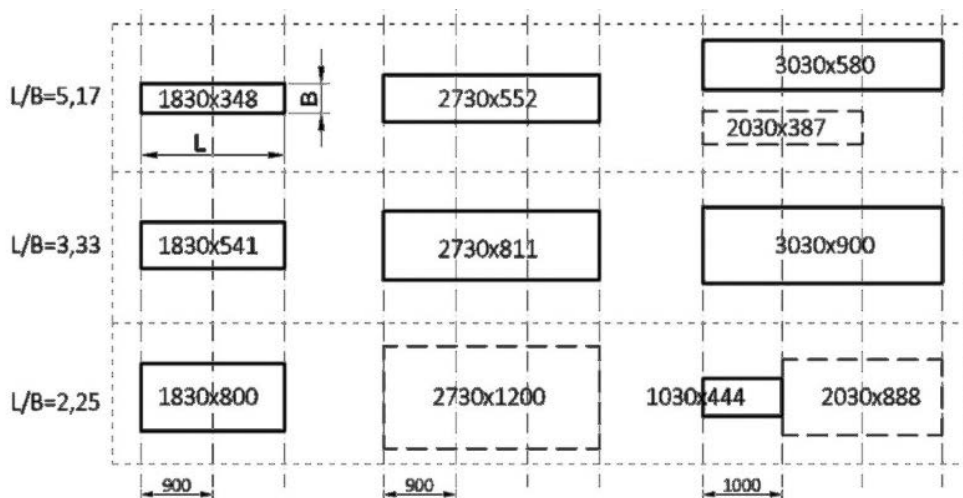
W celu określenia rzeczywistych deformacji płyt sprężyste podpartych na obwodzie opracowano program badań stalowych płyt kasetonowych w skali 1:1. Na rys. 1 przedstawiono schemat konstrukcji elewacji zbudowanej z analizowanego rodzaju kasetonu. Badania eksperymentalne zaprojektowano i przeprowadzono na kasetonach o stosunku boków lica kasetonu  $L/B > 2$ , gdzie:  $L$  – szerokość kasetonu,  $B$  – wysokość kasetonu. Wymiary powierzchni lica kasetonu zmieniały się od  $440 \times 1030$  mm do  $1200 \times 2730$  mm. Badania przeprowadzono na jedenastu rodzajach płyt. W celu uzyskania wiarygodnych wyników (ze względu na losowość pomiarów) każdy rodzaj kasetonu był przebadany siedmiokrotnie. Na rys. 2 przedstawiono rodzaje badanych kasetonów z uwzględnieniem stosunku boków płyty  $L/B$  oraz

różnym rozstawem rusztu podporowego (900 oraz 1000 mm). Ostatecznie przebadano 3 rodzaje kasetonów na obciążenie parciem wiatru oraz 11 rodzajów na ssanie wiatru.

### STANOWISKO BADAWCZE

Stanowisko badawcze zaprojektowano w sposób umożliwiający przeprowadzanie badań płyt obciążonych zarówno parciem, jak i ssaniem wiatru. Widoczne na rys. 3 stanowisko badawcze pozwalało na mocowanie płyt kasetonowych na stalowym ruszcie podporowym, a przez to odwzorowanie rzeczywistych warunków podparcia płyty w przypadku parcia wiatru.

Obciążenia kasetonów parciem oraz ssaniem wiatru zrealizowano za pomocą wody. Metoda obciążania płyt polegała na wlewaniu wody do uprzednio przygotowanych form umieszczonych bezpośrednio na powierzchni kasetonów. Metodę tę wykorzystano zarówno w przypadku symulującego ssanie i parcie wiatru, z tym, że przeprowadzenie badań płyt obciążonych ssaniem wiatru wymagało przekonstruowania stanowiska. Systemowy ruszt podporowy, a z nim płytę kasetonu, podwieszano od dołu do elementów nośnych stanowiska. Dzięki takiemu rozwiązaniu woda wywierała nacisk na odwrotną stronę kasetonu, tym samym symulując obciążenie ssaniem wiatru.



Rys. 2. Wymiary badanych kasetonów

— kasetony obciążone parciem i ssaniem wiatru, - - - kasetony obciążone ssaniem wiatru



Rys. 3. Zdjęcie stanowiska badawczego z opisnymi elementami składowymi (fot. P. Lewandowski)

Stanowisko badawcze usytuowano w Hali Hydro Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej. Lokalizacja ta miała na celu wykorzystanie warunków technicznych dostępnych w obiekcie. W hali tej, ze względu na specyfikę prowadzonych badań przez Katedrę Hydrotechniki, pod wierzchnią płytą stropu, stanowiącego posadzkę hali, znajduje się układ kanałów spływowych i zbiorników podziemnych na wodę z systemem pomp umożliwiających przepompowywanie jej w różne miejsca hali. Konstrukcja stropu nad kanałami i jego nośność warunkowały wymiary stanowiska badawczego. Wymiary stanowiska w rzucie wynosiły  $2000 \times 4000$  mm, a schemat statyczny konstrukcji stanowiska zakładał podparcie układu belek na czterech słupach wykonanych z dwuteowników walcowanych HEA100. Przyjęto, że dopuszczalne maksymalne obciążenie, które można przyłożyć na powierzchni stanowiska wynosi  $5 \text{ kN/m}^2$ , co przekładało się na maksymalną reakcję podporową  $R = 10 \text{ kN}$ . W obliczeniach nośności płyty stropowej pod punktowym obciążeniem uzyskano spełnienie warunku nośności, co pozwoliło na bezpieczny montaż stanowiska w wybranej lokalizacji. Usytuowanie stanowiska w tym właśnie miejscu pozwoliło na zbudowanie specjalnego zamkniętego układu hydraulicznego, który wykorzystano do obciążania badanych płyt. Wodę za pomocą pompy zasysano ze zbiornika

umieszczonego w piwnicy Hali Hydro w celu obciążenia płyt, natomiast po skończeniu badania wypompowywano ją do kanału ściekowego znajdującego się pod stanowiskiem badawczym, skąd sphywała ponownie do wyżej wymienionego zbiornika.

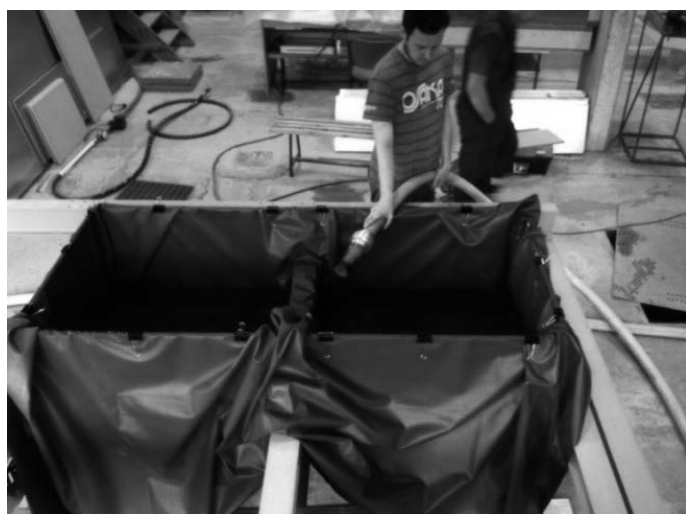
Do symulacji obciążeń wykorzystano układ zasilania wodą dostępny w Hali Hydro. W układ ten wpięto dwa wodomierze. Jeden wodomierz, o wysokim przepływie równym  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ , pozwalał na monitorowanie objętości wody na stanowisku, co w późniejszym etapie umożliwiała określenie przyłożonego obciążenia wyrażonego w  $\text{kN/m}^2$ . Drugi wodomierz, o mniejszym przepływie –  $1 \text{ m}^3/\text{h}$ , służył do kontroli ilości wody zlewanej ze stanowiska w czasie odciążania płyty.

Podczas obciążania kasetonów elewacyjnych rejestrowano: ilość wody w litrach, odkształcenia materiału odczytywane z rozety tensometrycznej oraz ugięcia płyty kasetonu odczytywane z czujników przemieszczeń.

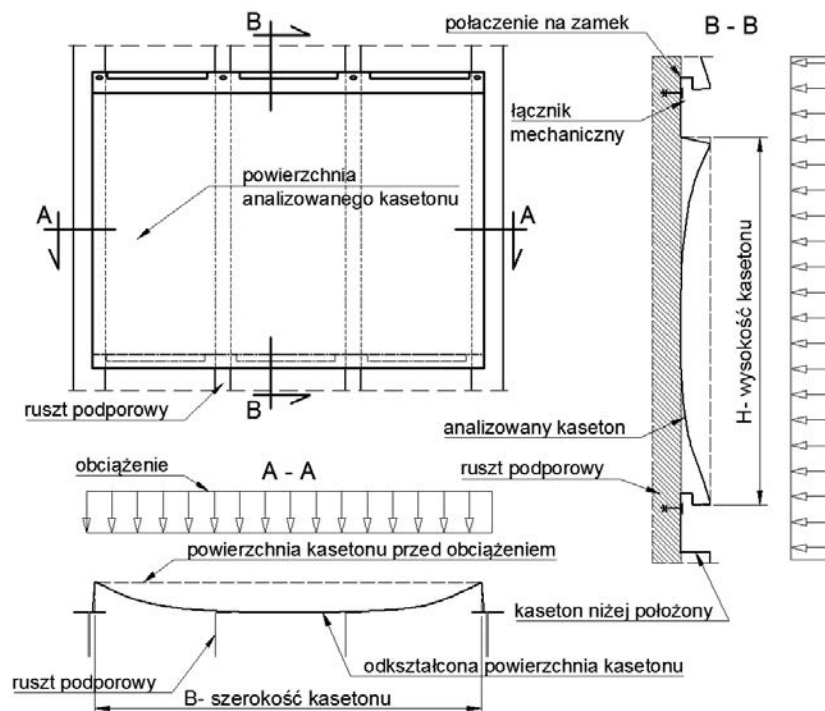
## WYNIKI BADAŃ

### Parcie wiatru

W trakcie przeprowadzonych badań zaobserwowano, że niektóre kasetony pod wpływem działania obciążenia symulującego parcie wiatru znacząco uginają się, opierając się o konstrukcję rusztu podporowego (rys. 5). Dochodzi również do miejscowego oparcia się górnej krawędzi kasetonu na częściach powierzchni styku z rusztem. Dodatkowo szereg łączników zabezpiecza krawędź górną przed podniesieniem, które mogłoby być wywołane efektem dźwigni od uginającej się płaszczyzny lica kasetonu. Krawędzie boczne kasetonu opierają się o systemowy ruszt podporowy, jednakże ze względu na uginającą się płaszczyznę lica kasetonu mogą doznać małych translacji poziomych. Z badań doświadczalnych wynika, że ruszt podporowy również wykazuje tendencję do ugięć pod wpływem obciążenia zgodnego z programem badań. W przypadku kasetonów o większych wysokościach, już przy niewielkich wartościach obciążenia, może dochodzić do znacznych odkształceń lica kasetonu i oparcia się odkształconej płaszczyzny powierzchni na ruszcie podporowym. Krawędź dolna kasetonu nie doznaje zauważalnych odkształceń.



Rys. 4. Napelnianie komór wanny wodą (fot. P. Lewandowski)



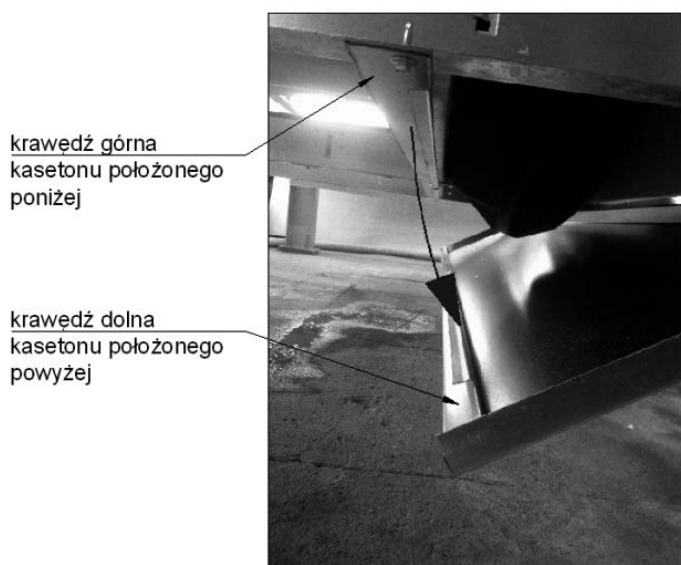
Rys. 5. Schemat deформacji kasetonu elewacyjnego pod wpływem działania parcia wiatru

Ponadto, na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że odkształcenia powierzchni lica kasetonu przy obciążeniu parciem wiatru w określonym programem badań zakresie są sprężyste.

### Ssanie wiatru

W czasie przeprowadzania badań kasetonów obciążanych ssaniem wiatru uzyskano stan awaryjny okładziny elewacyjnej. Podczas obciążania płyty kasetonu dochodziło do wysunięcia krawędzi dolnej badanego kasetonu z krawędzi górnej kasetonu położonego niżej (rys. 1 i 7). W przypadku ssania wiatru krawę-

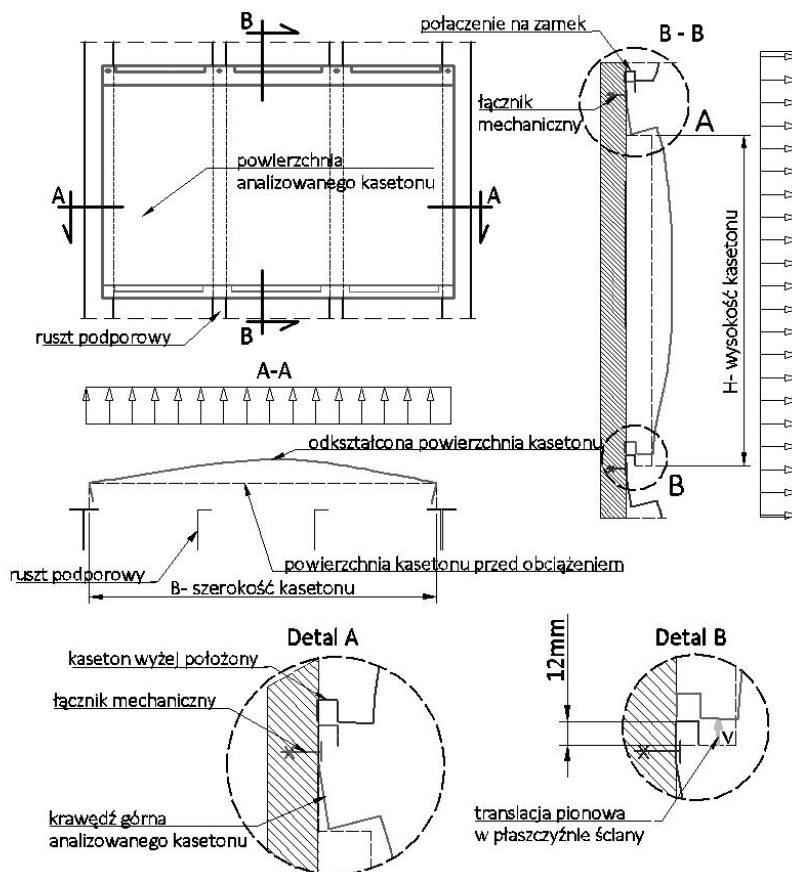
dzie boczne nie stanowią podpór przenoszących część obciążenia, jak to ma miejsce w przypadku parcia wiatru. Krawędzie te są unoszone przez odkształcającą się powierzchnię lica kasetonu. Wynika to z zamocowania kasetonu jedynie na krawędziach poziomych, górnej i dolnej. Górną krawędź kasetonu zabezpieczono przed wyrwaniem łącznikami mechanicznymi przykręconymi do rusztu. W miejscu wkrętów istnieje więc punktowe podparcie krawędzi ze względu na translacje w płaszczyźnie płyty. Odkształcająca się płaszczyzna lica kasetonu wraz z zagiętą górną krawędzią próbują unieść się w kierunku prostopadłym do płaszczyzny rusztu, lecz translacja ta jest zablokowana przez łącznik. Dochodzi do miejscowego oparcia górnej krawędzi kasetonu na elementach rusztu (rys. 7). W ten sposób powstaje efekt dźwigni i następuje lokalne uplastycznienie się krawędzi górnej kasetonu w okolicach łącznika, (rys. 8). Ponadto należy zwrócić uwagę na fakt, że powierzchnia kasetonu nie tylko ugina się, lecz również przemieszcza w płaszczyźnie płyty (rys. 8 strona lewa). Na górnej krawędzi przesuw ten jest blokowany przez łącznik, niestety na dolnej krawędzi istnieje jedynie połączenie kleszczowe kasetonów. Przy zwiększającym się obciążeniu przemieszczenia płyty ku górnej zablokowanej krawędzi również rosną, co powoduje wysunięcie się dolnej krawędzi kasetonu z połączenia pomiędzy kasetonami (rys. 6).



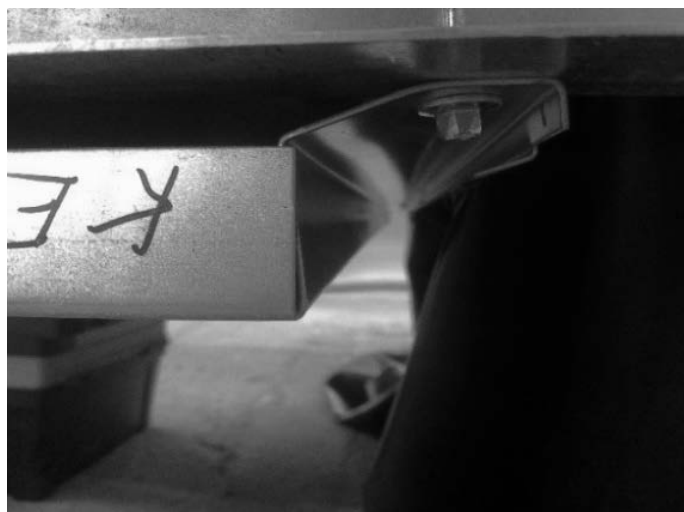
Rys.6. Wysunięcie się kasetonu z systemowego zamka pod wpływem obciążenia symulującego ssanie wiatru (fot. P. Lewandowski)

### PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań eksperymentalnych wynika, że stanem krytycznym jest przypadek ssania wiatru na elewację, bowiem może prowadzić do sytuacji awaryjnej polegającej na wysunięciu się krawędzi dolnej płyty kasetonu z zamka systemowego. W celu zobrazowania istotności zagadnienia podano przykładową mapę intensywności parcia wiatru w zależności od regionu Polski. Obliczenia charakterystycznej prędkości wiatru



Rys. 7. Schemat deformacji kasetonu elewacyjnego pod wpływem działania ssania wiatru

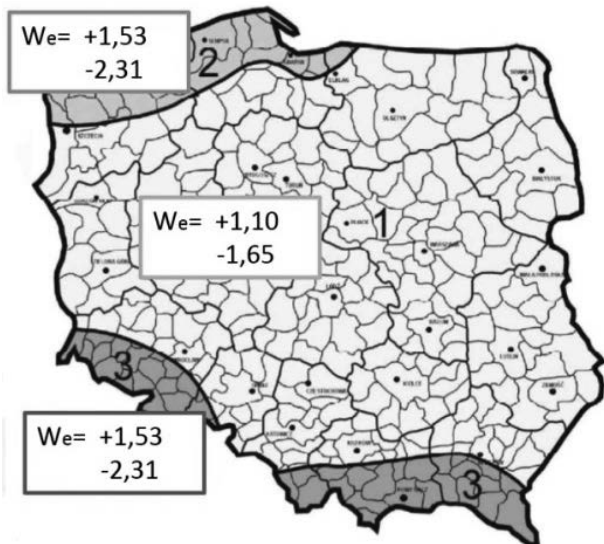


Rys. 8. Deformacje plastyczne w okolicach łącznika przy obciążeniu ssaniem wiatru (fot. P. Lewandowski)

na elewację budynku przeprowadzono dla obiektu o wysokości 15 m położonego na terenie nieosłoniętym przed porywami wiatru według [4]. Na rys. 9 zaznaczono charakterystyczne ciśnienie prędkości wiatru analizowanego przykładu dla trzech miast leżących w trzech strefach wiatrowych Polski: Gdańska, Warszawy oraz Krynicy Górskiej. Znak „+” oznacza parcie wiatru, a „-” oznacza ssanie wiatru na elewację. Obciążenie wyrażono w  $[kN/m^2]$ .

W tabl. 1 zestawiono wartości siły niszczącej uzyskane w czasie badań kasetonów obciążonych ssaniem wiatru. Znak „+” oznacza spełnienie warunków SGN, a „-” ich przekroczenie

w danej strefie wiatrowej do podanego przykładu obliczeniowego. Z zestawienia w tabl. 1 wynika, że połowa kasetonów podanych badaniom nie mogłaby być wmontowana w konstrukcje osłonowe na terenie Polski, gdyż siła niszcząca kasetony jest mniejsza niż charakterystyczne ciśnienie prędkości wiatru na elewację. Błędny dobór elementów osłonowych spowodowałby awarię elewacji. Należy również zauważyć, że wymiary kasetonów nr 1 ÷ 9 nie odbiegają znacznie od wymiarów popularnie stosowanych okładzin elewacyjnych, stąd dodatkowo należy podkreślić potrzebę dalszych badań w zakresie nośności okładzin kasetonowych.



Rys. 9. Charakterystyczne wartości ciśnienia wiatru w poszczególnych strefach wiatrowych dla budynku o wysokości 15 m do schematu parcia i ssania wiatru na przegrodę pionową. Wartości wyrażone w [kN/m<sup>2</sup>]

### LITERATURA

1. Golaś J.: Wstęp do teorii płyt, Opole: Wyższa Szkoła Inżynierska w Opolu, 1972.
2. Gould Phillip L.: Analysis of shells and plates. New Jersey: Prentice Hall, 1999.
3. Lewandowski P., Urbańska-Galewska E.: Wpływ warunków brzegowych na naprężenia stalowych okładzin kasetonowych. Zeszyty Naukowe Po-

Tabl. 1. Zestawienie możliwości zastosowania przebadanych kasetonów w poszczególnych strefach wiatrowych Polski

Lp.	Wymiary łoża kasetonu	Siła niszcząca z badań [kN/m <sup>2</sup> ]	Charakterystyczne ciśnienie wiatru na elewację		
			strefa 1 $w_{\max} = -1,65$ [kN/m <sup>2</sup> ]	strefa 2 $w_{\max} = -2,31$ [kN/m <sup>2</sup> ]	strefa 3 $w_{\max} = -2,31$ [kN/m <sup>2</sup> ]
1	1030 × 444	–	+	+	+
2	1830 × 348	–	+	+	+
3	1830 × 541	3,9	+	+	+
4	2030 × 387	3,8	+	+	+
5	1830 × 800	1,9	+	–	–
6	2730 × 552	1,5	–	–	–
7	2030 × 888	1,4	–	–	–
8	2730 × 811	0,9	–	–	–
9	2730 × 1200	0,6	–	–	–

litechniki Rzeszowskiej, Seria: Budownictwo i Inżynieria Środowiska 2011, Z. 58, 265-270.

4. PN-EN 1991-1-4 Oddziaływania na konstrukcje – Oddziaływania wiatru.
5. Szilard R.: Theories and Applications of Plate Analysis Wiley, New Jersey 2004.
6. Timoshenko S. P., Woinowsky-Krieger S.: Theory of plates and shells. 1959.