

Jak rozumieć różne obciążenia balastowe

Systemy na dachy płaskie: Raz po raz eksperci i producenci dochodzą do różnych wniosków dotyczących balastowania systemów fotowoltaicznych na dachy płaskie. Aby dowiedzieć się, dlaczego tak się dzieje i jak należy rozumieć te rozbieżności, producenci spotkali się z czołowymi ekspertami. Martin Schäfer z firmy Baywa r.e. przedstawia swoją kalkulację i wyjaśnia metody obliczeń swojej firmy.

Dlaczego uzyskuje się różne wyniki dotyczące balastowania? Obliczanie balastu dla systemów mocowań na dachach płaskich jest niewątpliwie skomplikowanym przedsięwzięciem. Oczywiście główne zdanie w tej dyskusji mają eksperci ds. aerodynamiki i oceny wpływu wiatru, a nie bez powodu jest to odrębna dziedzina wiedzy fachowej. Jednakże efekty ich pomiarów, modelowania i obliczeń nie są jeszcze ostatecznym wynikiem. Z tymi rezultatami muszą sobie poradzić producenci

systemów mocowań. Na obu tych polach, przy wewnętrznej analizie aerodynamiki wiatru i przy późniejszym stosowaniu rezultatów przez producentów systemów, pojawiają się rozbieżności.

Podczas webinarium magazynu pv z września 2017 roku Peter Grass z PMT i Thorsten Kray z Instytutu Aerodynamiki Przemysłowej I.F.I. w Aachen wykazali, że producenci podali bardzo różne masy balastowe dla tego samego systemu



Zdjęcie: Baywa

Próby przenoszenia obciążenia służą do określania sztywności i możliwości przenoszenia szczytowych wartości ssania wiatru. Są one określone w badaniach w tunelu aerodynamicznym

Najważniejsze informacje w skrócie

Do tej pory producenci i eksperci w dziedzinie wiatru nie obliczali w jednolity sposób balastu dla systemów fotowoltaicznych na dachy płaskie. W tym artykule firma Baywa r.e. stawia na przejrzystość i omawia możliwe różnice.

W łańcuchu właściciel budynku, instalator, producent, inżynier budownictwa, ekspert od wiatru, każdy ponosi część odpowiedzialności.

Eksperti od wiatru uśredniają wpływ podmuchów na określoną liczbę modułów, tzw. powierzchnia przejmująca obciążenie. Im jest on większy, tym mniejszy jest wpływ podmuchów i tym mniejszy jest wymagany balast.

Producent musi upewnić się, że wyniki ekspertyz wiatru są możliwe do zastosowania i że system mocowań jest wystarczająco sztywny dla powierzchni przejmującej obciążenie.

Producenci muszą prawidłowo określić współczynniki bezpieczeństwa na podstawie norm Eurokod, regulacji krajowych i krajowych przepisów prawa budowlanego. Czasami wymaga to interpretowania tych norm.

Instalator musi wybrać odpowiednią kategorię terenu.

fotowoltaicznego na dach płaski. Często nie jest do końca jasne, w jaki sposób uzyskuje się różne wartości balastu, co jest spowodowane między innymi następującymi kwestiami:

- Instalator i specjalista ds. planowania przyjmują jako użytkownicy inne założenia odnośnie prędkości wiatru (kategoria terenu, okres obserwacji 25 lub 50 lat).
- Użytkownicy przyjmują różne współczynniki bezpieczeństwa dla klasy konsekwencji uszkodzeń, które są co prawda określone w Eurokodach, ale nie są uwzględnione w przepisach budowlanych w Niemczech.
- W uzgodnieniu z producentami, eksperci ds. wiatru dzielą moduły na różne grupy w celu określenia współczynników ssania wywołanego wiatrem podczas badań w tunelu aerodynamicznym.
- Sztywność systemów mocowań jest różna.
- Producenci tolerują różne poziomy odkształceń przy pomiarze sztywności systemu za pomocą przenoszenia obciążenia, a przenoszenie obciążenia jest uwzględniane w różny sposób.
- Aerodynamika systemów różni się od siebie.

Aby w miarę możliwości uzgodnić jednolite podejście, grupa ekspertów inżynierii budowlanej Niemieckiego Związku Przemysłu Solarnego (BSW-Solar), w ramach której producenci systemów mocowań koordynują swoje działania, spotkała się z trzema szczególnie zaangażowanymi ekspertami w dziedzinie tuneli aerodynamicznych w Niemczech: Hansem Ruscheweyhem z Ruscheweyh-Consult, Thorstenem Krayem i Michaeliem Buselmeierem z Wacker Ingenieure.

Okazało się, że istnieje norma dotycząca punktu pierwszego, która określa sposób postępowania i co do której eksperci są zgodni. W odniesieniu do punktu drugiego istnieje norma europejska, lecz w praktyce nie można jej zastosować w Niemczech. Dyskusja toczy się szczególnie odnośnie do punktów trzy, cztery i pięć, dla których nie istnieją jeszcze normy.

Szczególnie w tym kontekście uważamy, że przejrzystość przeprowadzanych obliczeń ma ogromne znaczenie. Poniżej opisujemy zatem procedurę stosowaną w firmie Baywa r.e.

Przedstawione podejście dotyczące określania wymaganego balastu systemów fotowoltaicznych na dachach płaskich opiera się na wymiarowaniu konstrukcji nośnych w branży budowlanej wraz z odpowiednimi wymogami bezpieczeństwa oraz, w razie potrzeby, na uproszczonych założeniach po bezpiecznej stronie. Jak wynika z naszych wcześniejszych doświadczeń w firmie Baywa r.e. w oparciu o tysiące instalacji na dachy płaskie zrealizowanych w ciągu ostatnich dziesięciu lat, takie podejście sprawdziło się. Jak dotąd zanotowano jedynie pojedyncze częściowe uszkodzenie będącej w trakcie budowy instalacji na dach płaski, która została uszkodzona przez tornado.

W oparciu o prędkość wiatru podmuchowego z uwzględnieniem współczynników bezpieczeństwa określonych w normach, obciążenie ssania wywołanego wiatrem na instalację jest określone za pomocą współczynników aerodynamicznych (wartości cpe), które są parametrami systemowymi i są mierzone w tunelu aerodynamicznym. Następnie należy wykazać, że statyka systemu i balast są wystarczające, aby wytrzymać obliczone siły ssania wywołanego wiatrem. Nawet przy lokalnych porywistych podmuchach wiatru, instalacja nie może unosić się zbyt mocno i nie może też ulec awarii.

Określanie prędkości wiatru

Ciśnienie prędkości wiatru podmuchowego, a dokładniej szczytowe ciśnienie prędkości lub ciśnienie dynamiczne, pod kątem którego musi być zaprojektowany system na dach płaski, jest określane dla miejsca montażu zgodnie z normą DIN EN 1991-1-4/NA i zależy przede wszystkim od następujących czynników

- Wysokość budynku
- Zakładany okres (np. 25 lat eksploatacji systemu fotowoltaicznego)
- Obszar obciążenia wiatrem (lokalizacja)
- Kategoria terenu (otoczenie)
- Topografia

Przyporządkowanie do danej kategorii terenu jest zazwyczaj dokonywane przez użytkownika oprogramowania konstrukcyjnego, na przykład przez instalatora, przy czym przyporządkowanie jest podatne na błędy. W przypadku systemów fotowoltaicznych na obszarach mieszkalnych obowiązuje klasyfikacja dla Niemiec zgodnie z normą DIN EN 1991-1-4/NA załącznik B.2 (patrz **Tabela 1**).

Dlatego też w przypadku wielu typowych systemów na dachy płaskie, które znajdują się w środku obszaru przemysłowego, ale jednocześnie bliżej niż jeden kilometr od granicy osiedla mieszkalnego, należy wybrać kategorię terenu II (wiejski). Nazwa kategorii terenu nie odpowiada zatem bezpośredniemu otoczeniu i sąsiedztwu danego budynku. Tylko wówczas, gdy odległość od granicy osiedla mieszkalnego jest większa niż trzy kilometry, można zastosować kategorię terenu III (osiedle) w Niemczech, która zakłada niższe prędkości.

Odległość od granicy osiedla	Kategoria terenu KT	Skrócona nazwa KT
do 1km	II	wiejski
1 - 3 km	II-III	profil mieszany
ponad 3 km	III	osiedle

Tabela 1: Kategorie terenu w obszarze osiedla zgodnie z normą DIN EN 1991-1-4/NA Załącznik B.2.

Statyczne zweryfikowane wartości na podstawie norm Eurokod

Poniżej przedstawiono poszczególne zweryfikowane wartości z **Tabeli 2**. Można tam znaleźć współczynniki bezpieczeństwa do zastosowania: $\gamma_{Q,inf}$ dla masy własnej, γ_Q dla obciążenia wiatrem. Są one mnożone przez współczynnik bezpieczeństwa k_{Fi} z klasy niezawodności RC. RC wynika z klasy konsekwencji uszkodzeń CC.

W przypadku weryfikacji unoszenia się (EQU) należy wykazać, jak pokazano na rysunku 1a, że ssanie wywołane wiatrem W_s jest mniejsze niż suma masy własnej ΣG przy zastosowaniu odpowiednich współczynników bezpieczeństwa.

W normie Eurokod nie ma specjalnej regulacji dotyczącej weryfikacji poślizgu systemów fotowoltaicznych z balastem (weryfikacja stabilności położenia). Do weryfikacji stabilności położenia pod kątem poślizgu można zastosować, analogicznie do antypoślizgowości fundamentu w obszarze geotechniki, kategorię przypadku obciążenia GEO; jest ona przypisywana stanowi granicznemu uszkodzenia podłoża. W związku z tym statyczna siła tarcia musi być większa niż poziome składowe energii wiatru i należy uwzględnić odpowiednie współczynniki bezpieczeństwa (**rys. 1b**).

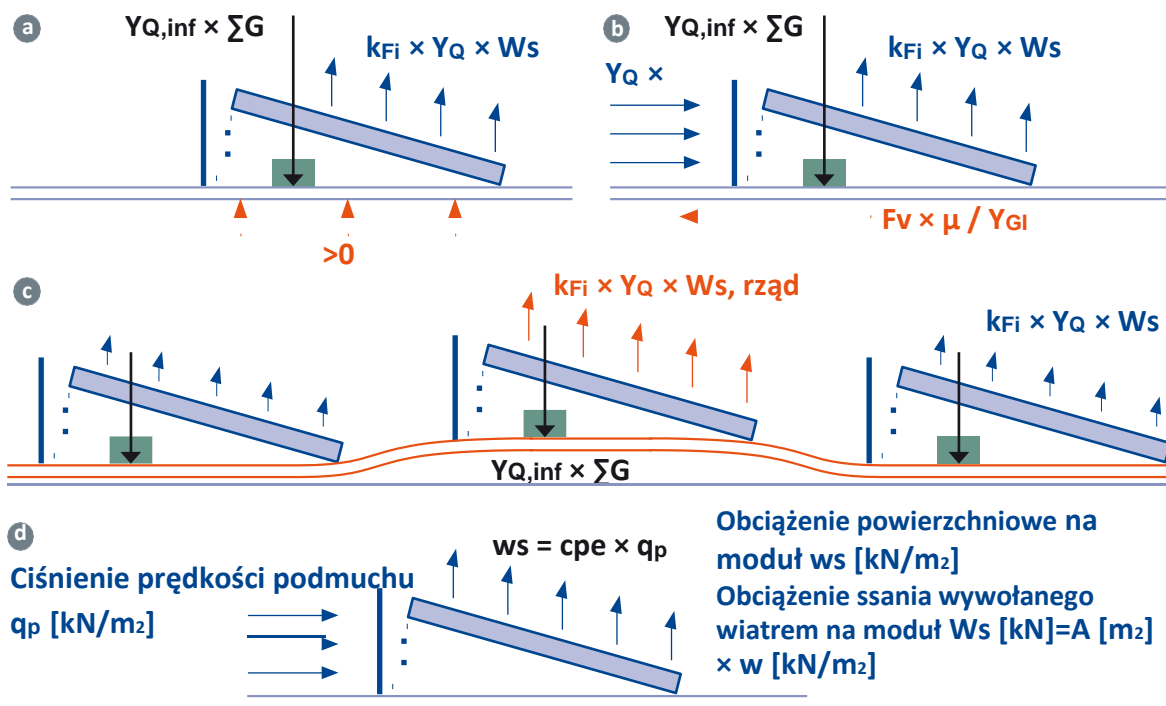
Prawo budowlane określa zasady weryfikacji i wymiarowania typowych konstrukcji budowlanych, takich jak ściany murywane, stropy żelbetowe, hale stalowe, fundamenty. Nie istnieją żadne specjalne przepisy dotyczące systemów fotowoltaicznych. W tym względzie należy brać pod uwagę konstrukcje podobne. System fotowoltaiczny z balastem można traktować jako fundament stojący na podłożu, jeśli porównuje się jego przesuwanie ze stabilnością położenia fundamentu.

Unoszenie można traktować jako weryfikację zakotwienia kotwy płatwiowej, która zapobiega oderwaniu się płatwi z konstrukcją dachową nad nią.

Z drugiej strony, przenoszenie obciążenia stanowi decydujący czynnik przy weryfikacji unoszenia się systemu fotowoltaicznego. Z kolei elementy metalowe są narażone na naprężenia zginające, co jest bardziej zbliżone z weryfikacją konstrukcyjną STR. Nie zawsze jest możliwe jednoznaczne przypisanie, który z tzw. „stanów granicznych nośności” (EQU, GEO, STR) ma być wybrany jako format weryfikacji. Dlatego też może się zdarzyć, że różni producenci różnie będą traktować system fotowoltaiczny.

Różne stany graniczne o różnych współczynnikach bezpieczeństwa są również łączone przez niektórych w celu uproszczenia w jeden stan graniczny o jednolitych współczynnikach bezpieczeństwa. Na przykład większość producentów stosuje EQU do weryfikacji poślizgu, gdzie balast po stronie obciążenia zmniejsza się o współczynnik $\gamma_{G,inf} = 0,9$ zamiast dzielić opór (współczynnik tarcia) przez współczynnik bezpieczeństwa $\gamma_M = 1,1$ (GEO), co daje prawie taki sam wynik końcowy.

Jako pocieszenie można dodać, że wybór stanu granicznego (EQU, GEO, STR) z odpowiednimi czynnikami bezpieczeństwa ma stosunkowo niewielki wpływ na wynik końcowy. W przypadku weryfikacji nośności komponentów przy lokalnym obciążeniu ssaniem wywołanym wiatrem wiatru.



Rysunek 1: a) Weryfikacja unoszenia się (EQU) b) Weryfikacja przesuwania się (GEO) c) Weryfikacja nośności (komponenty) d) Ciśnienie prędkości poddmuchu, współczynnik aerodynamiczny i obciążenie ssania wywołanego wiatrem. Czerwone strzałki oznaczają obciążenie krytyczne, które ma być kontrolowane przez weryfikację omówioną w tekście na odpowiednim rysunku. Czarne strzałki oznaczają siły ciężkości zielonych bloków balastowych.

Rysunki: magazyn pv/Harald Schütt

Kategoria terenowa IV (miejski) występuje tylko w bardzo nielicznych przypadkach w centrach dużych miast.

Jeśli kategoria terenu zostanie wybrana prawidłowo, zakładane ciśnienie prędkości podmuchu odpowiada wartości, która statystycznie jest osiągnięta tylko raz w ciągu 50 lat.

Uwzględnianie współczynników bezpieczeństwa

Wymagania dotyczące bezpieczeństwa systemów mocowań w odniesieniu do nośności i prawdopodobieństwa uszkodzenia wynikają z koncepcji bezpieczeństwa norm Eurokod, tzn. ze stosunkowo wysokich wymagań dotyczących stateczności budynków. Jeżeli za podstawę przyjmie się tę koncepcję bezpieczeństwa, to wymiarowanie nośności jest projektowane matematycznie w taki sposób, że w typowej klasie uszkodzeń lub klasie konsekwencji uszkodzeń, uszkodzenie w zakresie nośności występuje corocznie raz na milion konstrukcji.

Współczynniki bezpieczeństwa w tym zakresie są regulowane w normie Eurokod 0 dla poszczególnych krajów (dla Niemiec): DIN EN 1990/NA:2010-

12) i są uzupełniane lub zmieniane szczegółowymi przepisami

w ramach załączników krajowych „NA”. W polu informacyjnym na tej stronie przedstawiono te weryfikacje instalacji pod kątem obciążenia wiatrem. W zależności od rodzaju uszkodzenia uwzględniane są różne czynniki bezpieczeństwa i współczynniki bezpieczeństwa. W niektórych przypadkach wyraźnie określono, w jaki sposób należy je przyjmować. Czasami wymagana jest interpretacja norm. Informacje te pokazują, jak radzimy sobie z tym w firmie Baywa r.e.

Zgodnie z normą Eurokod zasadniczo można dodatkowo wybrać klasę niezawodności RC oraz klasę konsekwencji uszkodzeń CC. Pozwala to na zmniejszenie niezbędnego balastu, jeśli szacuje się, że konsekwencje uszkodzenia będą mniejsze, na przykład jeśli jest bardzo mało prawdopodobne, że w danym miejscu ludzie mogą zostać uderzeni przez spadające elementy instalacji podczas burzy. Jednak właśnie aby uniknąć tej dyskusji i nie dopuścić do tego, aby współczynniki bezpieczeństwa stały się przedmiotem rozważań, załączniki B, C i D normy DIN 1990/NA dotyczące klas konsekwencji uszkodzeń zostały wyraźnie wyłączone z załącznika A 1.2.1/1 do Wzorcowych przepisów wykonawczych w zakresie Technicznych przepisów budowlanych

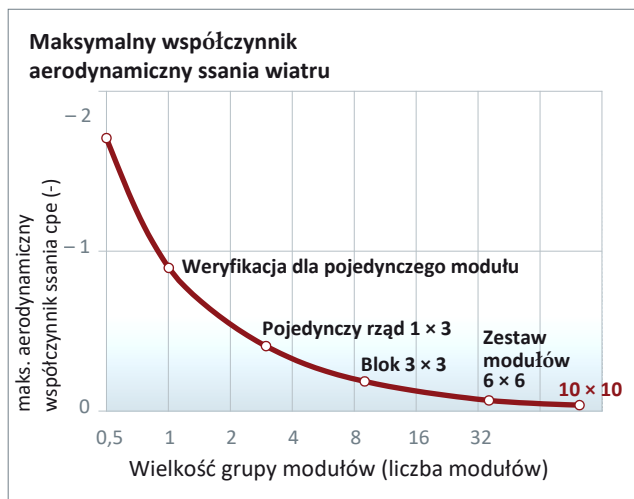
	Rodzaj uszkodzenia	Symbol	Wartość	Źródło (DIN EN 1990, NA = załącznik krajowy)
Obciążenia zmienne (wiatr)				
Obciążenie wiatrem		γ_a	1,5	NA Tab. NA. ust.1.2(A) oraz (B)
Klasa konsekwencji uszkodzeń		K_{fi}		NA zał. B i C
Obciążenia stałe (ciężar własny modułu, system mocowań, balast)				
Weryfikacja unoszenia się	EQU	γ_{stb}	0,9	NA ust. 6.4.1 a) NA NDP ust.1.3.1. (3) Tab. NA. ust.1.2(A)
			0,95*	NA. ust.1.2(A)
Weryfikacja poślizgu/stabilność położenia	GEO	$\gamma_{G,inf}$	1	ust. 6.4.1 c) NA NDP ust.1.3.1. (5) Tab. NA. ust.1.2(B)
Weryfikacja nośności komponentów	STR	$\gamma_{G,inf}$	1	Ust. 6.4.1 b) i Tab. A1.2(B) Tab. NA.ust.1.2.
Wartości rezystancji/nośności				
Weryfikacja poślizgu (współczynnik tarcia)	GEO	γ_{Gl}	1,1	NA. ust.1.2(B) przypis 2 DIN 1054 Tab. A2.3
Weryfikacji nośności (Bezpieczeństwo materiałowe)	głównie STR	γ_M	1,1	DIN EN 1999 (alu)
			do ok. 2	DIN EN 1993 (stal) DIN EN 1995 (drewno) DIN EN 1993 (beton)
				W stosownych przypadkach, zezwolenie na budowę
*Jeśli w wyniku kontroli wykluczone zostanie z wystarczającą niezawodnością przekroczenie dolej granicy obciążeń stałych. W tym celu należałoby przeprowadzić co najmniej losowe ważenie ciężaru modułu i balastu.				

Tabela 2: Współczynniki bezpieczeństwa służące do weryfikacji systemu fotowoltaicznego pod kątem obciążenia wiatrem, określone na podstawie źródeł podanych w normie Eurokod „Podstawy projektowania konstrukcji”. Dane odnoszą się do niemieckiej wersji DIN EN 1990 (NA: załącznik krajowy).

(przenoszenie obciążenia) przy lokalnym podmuchu wiatru (w przykładzie na schemacie 1c w środkowym rzędzie), jak również podpór i zacisków modułów, należy zastosować klasę weryfikacji STR wraz z odpowiednimi współczynnikami bezpieczeństwa. Na przykład w przypadku szyny podłogowej należy sprawdzić wynikową siłę F_d z zastosowanymi wartościami bezpieczeństwa obciążenia, oraz zdolność do zginania lub rozciągania pomniejszoną o współczynnik bezpieczeństwa materiału γ_M .

Przy weryfikacji elementów systemu mocowań (np. szyn, wsporników, połączeń śrubowych) stosuje się współczynniki bezpieczeństwa materiałowego zależne od materiału.

W przypadku metali (aluminium, stal, stal nierdzewna) ich wartość dla γ_M kształtuje się zazwyczaj na poziomie 1,1. Jeśli chodzi o miejscowe uszkodzenia spowodowane rozciąganiem (pęknięcie śruby, wyrwanie z rowka szyny), należy stosować wyższe współczynniki bezpieczeństwa, na poziomie 1,25. Jeszcze wyższe wartości dotyczą wyrwania z drewna i betonu (kołków/zakotwień). Dopuszczenia wydawane przez nadzór budowlany zawierają indywidualne cząstkowe współczynniki bezpieczeństwa dla dopuszczonych komponentów. Producent systemu mocowań musi odpowiednio uwzględnić te współczynniki bezpieczeństwa dla swojego systemu w oprogramowaniu konstrukcyjnym. Ponadto musi gromadzić informacje o dopuszczalnym obciążeniu lub odkształceniu, do którego może nastąpić przeniesienie obciążenia.



Rysunek 2: Zależność współczynnika ssania dla różnych analizowanych wielkości powierzchni obciążenia. Również pozycja modułów w zestawie modułów i odstęp między rzędami mają wpływ na wartości cpe.

Następnie należy określić klasy konsekwencji uszkodzeń w odpowiedniej normie aplikacyjnej: takie normy aplikacyjne istnieją na przykład dla szklarni, ale brak jest takich norm aplikacyjnych dla fotowoltaiki. Chociaż norma Eurokod

„Czasami wymagana jest interpretacja norm”.

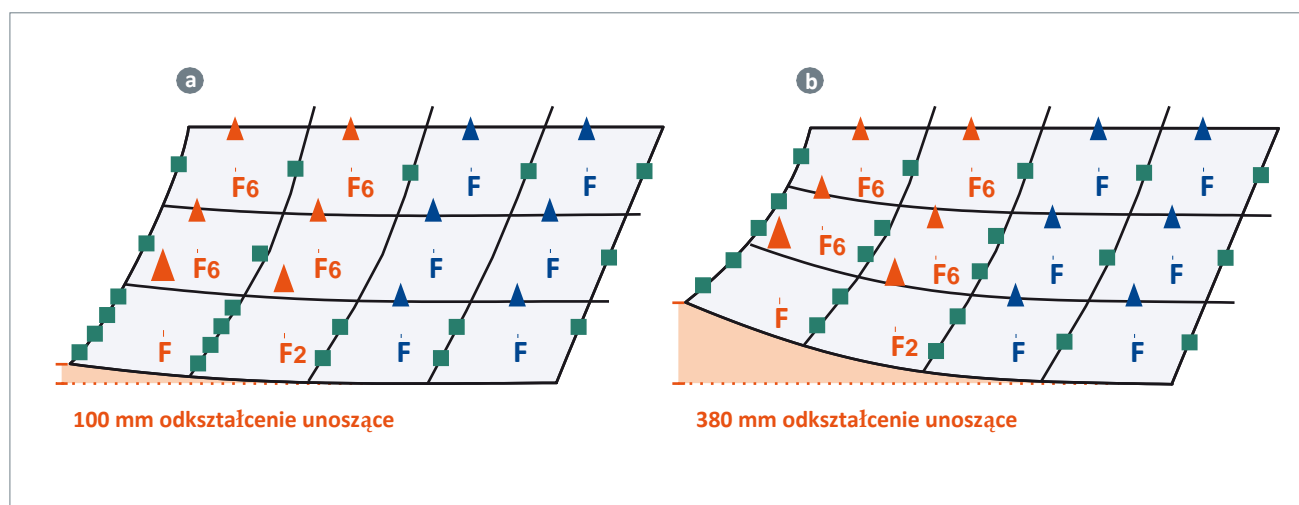
przewiduje taką możliwość, nie powinna być stosowana w budownictwie, a więc również w przypadku systemów fotowoltaicznych w Niemczech. Czasami jednak tak się zdarza, co również prowadzi do różnic w balastach, które poszczególni projektanci obliczają dla tego samego budynku.

Jednak przy tym podejściu nie bierze się pod uwagę istotnego źródła błędów. „Rzeczywista częstotliwość awarii jest zasadniczo związana z błędami ludzkimi, które nie są brane pod uwagę przy określaniu cząstkowych współczynników bezpieczeństwa”, stwierdza norma DIN EN 1990:2010-12 ust. C.6 (2). Ma to miejsce na przykład w przypadku systemu mocowań fotowoltaiki, gdy śruby nie są prawidłowo dokręcone lub zapomniano o balastowaniu.

Szczególną rolę odgrywają współczynniki ssania wywołanego wiatrem cpe. Współczynniki ssania wywołanego wiatrem, nazywane współczynnikami aerodynamicznymi cpe, różnią się od innych wartości cpe wyszczególnionych w normie tym, że zależą one od indywidualnej aerodynamiki systemu mocowań i są określane doświadczalnie - i że pojawia się najwięcej dyskusji na temat ich określania i interpretacji. Przykładowo, wartość współczynnika cpe -0,4 oznacza, że na moduł działa 0,4-krotność ciśnienia prędkości jako unoszące ssanie spowodowane wiatrem (wykres 1d). (Rysunek 1d). Ujemny znak oznacza tu ssanie spowodowane wiatrem.

Wartości cpe muszą być określone doświadczalnie, ponieważ nie ma znormalizowanych wartości wynikających z normy obciążenia wiatrem dla systemów fotowoltaicznych. Co prawda, wzorem do uniesionych systemów fotowoltaicznych, można byłoby się oprzeć na wolnostojących dachach pochyłych. Jednak podawane w tym przypadku wartości cpe wynoszą około -1, a lokalnie do -3 (DIN EN 1991-1-4 Tab. a tym samym skutkowało to balastem znacznie przekraczającym 50 kilogramów na moduł, co byłoby nieopłacalne. Dlatego też współczynniki ssania wywołanego wiatrem dla systemów mocowań na dachach płaskich są zazwyczaj określane za pomocą testów w tunelach aerodynamicznym. Norma dotycząca obciążenia wiatrem DIN EN 1991-1-4/NA NDP do 1,5 (2) dopuszcza przeprowadzenie badania współczynnika ssania wywołanego wiatrem w odpowiednim tunelu aerodynamicznym, pod warunkiem, że badanie w tunelu aerodynamicznym zostanie przeprowadzone zgodnie z kartą informacyjną Stowarzyszenia Technologii Wiatrowych WTG e.V.

Dla systemów aerodynamicznych, grupa specjalistów BSW kilka lat temu starała się opracować jednolite, znormalizowane wartości cpe pod kątem normy. Ze względu na różną geometrię badanych systemów fotowoltaicznych na dachy płaskie oraz



Rysunek 3: Sytuacja, gdy ssanie wywołane wiatrem uderza w moduł narożny. a) Balast skoncentrowany na krawędziach. b) Balast rozłożony w 6 pozycjach w obszarze narożnym. Oznaczenia sił: F₁: ssanie spowodowane wiatrem obliczone dla pojedynczego modułu. F_{2R} = 2 · F₂ - F₁: ssanie resztkowe na pojedynczy rząd z 2 modułami, na które działa siła ssąca F₂. F_{6R} = 6 · F₆ - F_{2R} - F₁: ssanie resztkowe na blok modułów z 2 · 3 modułów o sile ssącej F₆. F₉: ssanie spowodowane wiatrem na 3 · 3 moduły.

różne strategie oceny badań w tunelu aerodynamicznym, zwłaszcza w odniesieniu do klasyfikacji obszaru, nie udało się opracować jednolitych, znormalizowanych wartości w oparciu o ocenę znanych wyników badań, zwłaszcza ze względu na różną klasyfikację modułów i obszarów dachowych przez ekspertów ds. wiatru.

Wartości c_{pe} zależą również od rozważanej powierzchni przejmującej obciążenie: Zawirowania wiatru wywołują krótkotrwałe szczytowe siły ssania wiatru dla poszczególnych modułów. Jeśli weźmiemy pod uwagę sumę sił ssania wywołanego wiatrem dla całej instalacji, uśrednione ssanie spowodowane wiatrem będzie znacznie niższe. Jest to zazwyczaj uwzględniane przez różne wartości c_{pe} dla różnych wielkości przyjmowania obciążenia.

„Rzeczywista częstotliwość awarii jest zasadniczo związana z błędami ludzkimi”.

Ale sposób, w jaki należy je ustalić, nie jest jasno określony. Norma Eurokod upraszcza i wylicza dla różnych form budynków jedynie przy użyciu wartości tabelarycznych dla powierzchni przejmującej obciążenie, c_{pe1} na jeden metr kwadratowy (przykład: pokrycia z blachy trapezowej) i c_{pe10} na dziesięć metrów kwadratowych (przykład: płatwia środkowa wieży dachowej) (patrz DIN EN 1991-1-4 ust. 7.2.1.). W Niemczech nie ma znormalizowanej definicji powierzchni lub grupy na potrzeby badań w tunelach aerodynamicznych, chociaż w innych krajach istnieje uznany stan techniki w tym zakresie. Trzy wiodące firmy zajmujące się badaniami w tunelach aerodynamicznych w zakresie fotowoltaicznych systemów na dachy płaskie w Niemczech wybrały różne klasyfikacje, co częściowo wyjaśnia różne wartości balastu.

Przypadki obciążeń: przykład podziału powierzchni

Poniżej znajduje się klasyfikacja firmy Wacker Ingenieure, którą stosujemy w narzędziu projektowym firmy Baywa r.e. Cała powierzchnia jest podzielona na pojedyncze moduły, pojedyncze rzędy z dwoma do trzech modułów obok siebie i bloki obejmujące trzy na dwa lub trzy na trzy moduły.

Ciśnienie prędkości podmuchu jest symulowane w tunelu aerodynamicznym tak realistycznie jak to tylko możliwe przez przeszkody, które prowadzą do zawirowań i podmuchów wiatru w skali modelowej dla wybranego rozmiaru bloku modułów. Oznacza to, że wszystkie wartości aerodynamiczne odnoszą się do ciśnienia prędkości podmuchu. Głównie z powodu zawirowań wywołanych przez budynki powstają efekty z lokalnie silnym efektem unoszenia i stosunkowo wysoką wartością c_{pe} w obszarze np. jednego modułu. Natomiast na moduły sąsiadujące wywierany jest mniejszy efekt, a w niektórych przypadkach być nawet efekt nacisku. To oznacza, że średnio w danym momencie w odniesieniu do większej powierzchni, na którą składa się trzy na trzy moduły, ssanie wiatru na moduł jest mniejsze niż

Obliczenia balastu dla bloku modułów

Wartość znamionowa siły ssania wiatru jest obliczana na podstawie:

- $w_{sd} [kN/m^2] = k_{Fi} [-] \cdot \gamma_Q [-] \cdot c_{pe} [-] \cdot q_p [kN/m^2]$

Jako przykład liczbowy wybieramy ciśnienie prędkości podmuchu $q_p = 0,65 kN/m^2$ i dużą powierzchnię przejmującą obciążenie z blokiem trzy na trzy moduły. Po przeprowadzeniu prób przeniesienia obciążenia, lokalne szczytowe siły ssania wiatru działające na pojedynczy moduł mogą zostać rozłożone na cały blok modułów. W przypadku tego bloku dla systemu mocowań novotegra firmy Baywa r.e. uzyskuje się c_{pe} w wysokości $-0,15$ na moduł. Zatem otrzymujemy:

- $w_{sd} [kN/m^2] = 0,9 \cdot 1,5 \cdot -0,15 \cdot 0,65 kN/m^2 = -0,13 kN/m^2$
- $W_{sd} [kN] = -0,13 kN/m^2 \cdot 1,68 m^2$ powierzchnia modułu = $-0,22 kN$ na moduł

Typowa masa własna systemu to:

- waga własna modułu $18 kg$ + system mocowań $2 kg = 20 kg = 0,20 kN$

Wartość ta musi być również pomniejszona o współczynnik bezpieczeństwa $\gamma_{G,inf}$ (patrz tabela 2):

- $G_d = G_k \cdot \gamma_{G,inf} = 0,20 kN \cdot 0,9 = 0,18 kN$

W rezultacie otrzymujemy siłę potrzebną do uniesienia, która wynosi:

- $F_d = -0,22 kN + 0,18 kN = -0,04 kN$

Siła ta może być wywierana przy użyciu obciążenia o wadze czterech kilogramów. Należy jednak również wziąć pod uwagę współczynnik bezpieczeństwa dla masy własnej balastu $\gamma_{G,inf} = 0,9$. W związku z tym balastowania na moduł musi wynosić:

- $m = 4 kg / 0,9 = 4,5 kg$

w przypadku pojedynczego modułu. Ma to jednak zastosowanie tylko wtedy, gdy system mocowań jest wystarczająco sztywny, aby rozłożyć lokalne siły szczytowe w obrębie wybranej wielkości bloku modułów. **Rysunek 2** przedstawia z uwzględnieniem rozmiaru typowe wartości c_{pe} stosowane dla różnych wielkości grup i powierzchni obciążeń.

Wartość c_{pe} jest następnie określana dla rozpatrywanego rozmiaru bloku modułów. W przypadku bloków wykonuje się następnie testy na przenoszenie obciążeń (patrz rozdział Testy dotyczące przenoszenia obciążeń) w celu określenia, w jaki sposób siły są rozkładane w systemie mocowań i w jaki sposób określona w tunelu aerodynamicznym siła wywierana lokalnie na moduł może być rozłożona na dany blok.

Od wartości c_{pe} do balastu dla bloku modułów

Przykładowe obliczenia, patrz ramka informacyjna na tej stronie, wskazują, że dla powierzchni trzy na trzy moduły wymagany jest balast o masie $4,5 kg$ na moduł. Obliczona w ten sposób wartość balastu dla wnętrza zestawu modułów może być rozumiana jako rodzaj minimalnego balastu, który musi być zawsze obecny.

Obliczenia te zakładają, że ze względu na zawirowania wiatru, poszczególne moduły narażone są zazwyczaj na znacznie wyższe krótkotrwałe ssanie wiatru niż cała grupa (blok modułów) po środku. W przypadku bloku trzy na trzy moduły pozwala to na zmniejszenie wartości cpe w porównaniu do pojedynczego modułu. Ściśle rzecz biorąc, dla każdego modułu należałoby przeprowadzić oddzielne obliczenia z lokalnym szczytem ssania wiatru jako osobnym przypadkiem obciążenia. W praktyce inżynierskiej obliczenia te przeprowadzane są dla różnych typowych przypadków i bada się, w jakim stopniu dane obciążenie może być rozłożone na sąsiednie moduły.

„Wartości cpe zależą również od rozważanej powierzchni przejmującej obciążenie”.

Na krawędzi zestawu modułów wartość lokalnego ssania wywołanego wiatrem jest zazwyczaj wyższa niż na środku zestawu modułów. Lokalne ssanie wywołane wiatrem może działać na każdy moduł i jest oceniane na podstawie wyników z tunelu aerodynamicznego dla różnych obszarów modułów (np. narożnik, pierwszy rząd, krawędź boczna, środek). Klasyfikacja ta jest dokonywana indywidualnie dla każdego typu systemu mocowań (południowy lub wschód-zachód, równoległe do dachu) i różni się w zależności od ekspertyzy z tunelu aerodynamicznego.

Jeżeli teraz przeprowadzimy te same obliczenia co dla bloku modułów w polu informacyjnym w odniesieniu do obciążenia pojedynczego modułu z lokalnym szczytem ssania wiatru, z badania w tunelu aerodynamicznym dla systemu Baywa-r.e. okaże się na przykład, że wartość cpe dla modułu w drugim rzędzie instalacji wynosi

-0,65 w porównaniu z -0,15 w przypadku modułu w bloku modułów. Spowodowałyby to powstanie na tym pojedynczym module siły ssania wiatru

o wartości 0,95 kN, która musiałaby zostać zrównoważona masą 95 kg. Dla przypomnienia: w przypadku bloku trzy na trzy moduły siła ta wynosiła 0,22 kN, co stanowiło jedną czwartą tej wartości.

Test przenoszenia obciążenia – środek zestawu modułów

Dopuszczalny rozkład obciążenia w bloku modułów wynika ze sztywności systemu i nośności systemu mocowań. Ustala się to podczas badań porównawczych za pomocą tzw. testów przenoszenia obciążenia. W odniesieniu do poszczególnych modułów w zainstalowanym zestawie modułów wywierana jest siła ciągnąca, aby zbadać jaką lokalną siłę ssania wiatru można wywierać na poszczególne moduły bez doprowadzenia do zniszczenia połączeń systemu i spowodowania awarii. Jednocześnie równoległe do zastosowanej siły mierzone jest również odkształcenie.

Im większa siła ciągnięcia, tym większe odkształcenie. Większe przeniesienie obciążenia powoduje więc również większe odkształcenia i naprężenia w systemie mocowań. Jednak duże odkształcenia oznaczają również możliwość spadku zastosowanego balastu i konieczność jego zabezpieczenia. Ponadto, w przypadku większych odkształceń, wiatr może wiać pod modułem, a wartości współczynników ssania wywołanego wiatrem i lokalnego ssania wiatru mogą wzrosnąć. Ten przypadek z unoszeniem nie jest zwykle badany w tunelu aerodynamicznym i dlatego nie jest uwzględniany w badaniach z tunelu aerodynamicznego.

Jeśli więc odkształcenia spowodowane bardzo silnym ssaniem wiatru staną się tak duże, że przekroczą pewną wartość graniczną, wówczas należy zastosować dodatkowy balast: dotyczy to zatem przypadku lokalnego ssania wywołanego wiatrem na skutek niewystarczającego przenoszenia obciążenia i pełnego rozkładu lokalnego obciążenia ssania wiatru. Na przykład: jeśli zamiast bloku modułów zawierającego trzy na trzy moduły zastosujemy bardzo dużą powierzchnię dystrybucji, tj. blok modułów składający się z pięciu na pięć modułów, wówczas podczas unoszenia będą występować znacznie większe odkształcenia niż podczas dystrybucji na mniejszy zestaw modułów. Przy zastosowaniu większego zestawu modułów, lokalne ssanie wywołane wiatrem może być rozprowadzane na 24 sąsiednie moduły tylko przy bardzo małym obciążeniu ssaniem wiatru i przy bardzo dużej stabilności systemu.

Dyskusja dotycząca powierzchni przenoszącej obciążenie

Wielkość powierzchni przenoszących obciążenie dobranych w teście w tunelu aerodynamicznym oraz sposób oszacowania dopuszczalnych sił w obrębie tych powierzchni znacząco wpływa na uzyskane ostatecznie wartości balastu. Oczywiście, dąży się do tego, aby bloki modułów były jak największe, aby uzyskać jak najmniejszą wartość cpe i zminimalizować wymagania dotyczące balastu. Typowe rozmiary bloków modułów to na przykład dwa na dwa (zwykle przyjmowany przez firmę Ruscheweyh Consult), trzy na trzy (Wacker), a w niektórych przypadkach do cztery na cztery (dla takiego bloku podaje wartości firma I.F.I.).

Thorsten Kray powołuje się na broszurę z lutego 2020 r. opublikowaną przez amerykańską firmę ubezpieczeniową FM Global. Zawiera ona szczegółowe informacje dotyczące określania powierzchni oddziaływania obciążenia. Można ją określić np. eksperymentalnie lub za pomocą tzw. reguły 4-6-9. Reguła ta zakłada, że cztery moduły mogą być umieszczone jako grupa w obszarze narożnym, sześć modułów na krawędzi i dziewięć modułów w obszarze wewnętrznym. Oznacza to, że w próbach w tunelu aerodynamicznym konieczne jest także rozróżnienie różnorodnych powierzchni oddziaływania obciążenia oraz oszacowanie współczynników ciśnienia dla tych powierzchni. Jednak eksperci ds. wiatru nie biorą wtedy pod uwagę szczegółowych aspektów dotyczących sztywności. Jest to zadanie producenta systemu mocowań. W przeszłości producenci byli na ogół wdzięczni za wszelkie wskazówki od ekspertów ds. wiatru. Jednak kiedy mówią oni na przykład, że można traktować trzy na trzy moduły jako spójne, nie stanowi to żadnej wskazówki z punktu widzenia statyki. Ekspert ds. wiatru zna system mocowań tylko pod kątem geometrii, ale nie pod kątem sztywności i wytrzymałości, które nie wchodzą w zakres opinii eksperta ds. wiatru.

Dlatego też ostatecznie to inżynier budownictwa na zlecenie producenta musi udowodnić, że zakładane przez eksperta ds. wiatru powierzchnie przenoszące obciążenie mogą być wykonane w ramach systemu mocowań i że jest on wystarczająco sztywny. Często rezygnowano z tego, najwyraźniej z niewiedzy i wygody. Dopiero niedawno, również zainspirowane dyskusją na temat balastu w ramach webinaru magazynu pv, niektóre firmy podjęły inicjatywę nadrobienia zaniedbań, a częściowo również dostosowania obliczeń tak, aby teraz podawać wyższe wartości balastu. Pragnieniem uczestników spotkania ekspertów ds. wiatru przy BSW jest ustalenie jednolitej procedury.

Dużą rolę odgrywa również położenie systemu fotowoltaicznego na dachu. Zasadniczo można powiedzieć, że jeśli zestaw fotowoltaiczny jest oddalony o kilka długości od krawędzi dachu, wartości cpe są znacznie niższe w porównaniu do położenia zestawu w narożniku dachu. Z tego powodu Thorsten Kray różni różnie strefy dachu, których wymiary zależą od wymiarów budynku. Lokalna odległość od krawędzi dachu (do pięciu metrów) została szczegółowo zbadana, przede wszystkim przez Holgera Ruscheweya, który określił odpowiadający wpływ tej odległości na współczynniki ssania wywołanego wiatrem (patrz również odpowiedzi Holgera Ruscheweya w czasopiśmie pv marzec 2020 r., str. 68).

Dopuszcza się również różne wartości dozwolonych odkształceń poszczególnych konstrukcji producentów systemów mocowań; nie ma tu jednolitej procedury i z reguły nie ma żadnych danych na ten temat. Istnieją bardzo rozbieżne opinie w tym zakresie; ich rozpiętość wynosi od zera centymetrów, tzn. braku unoszenia (Ruscheweyh Consult), do kilku decymetrów. My dopuszczamy maksymalnie dziesięć centymetrów lokalnego uniesienia. Jest to również zbliżone z innymi producentami oraz z sugestią Holgera Kraya, aby postępować zgodnie z wytycznymi firmy FM Global Insurance w USA.

Test przenoszenia obciążenia – róg zestawu modułów

Większość systemów mocowań posiada wystarczającą sztywność systemu w odniesieniu do modułów środkowych, aby umożliwić rozłożenie lokalnego obciążenia ssania wywołanego wiatrem na sąsiednie moduły. Inaczej jest jednak w przypadku krawędzi zestawu modułów, a szczególnie modułu narożnego w zestawie modułów. Jeżeli pociągniemy za moduł narożny, opór jest stosunkowo niewielki, zasadniczo jest to masa własna modułu i umieszczony tam balast. Sąsiednie moduły wywierają jedynie nieznaczny wpływ.

Najbardziej niekorzystny przypadek pokazano na **Rys. 3** ze schematem obciążenia, który dotyczy sytuacji, gdy podmuch wiatru działa dokładnie na moduł narożny. Sąsiedni moduł również przyjmuje stosunkowo duże obciążenie ssaniem wiatru, co znalazło odzwierciedlenie w ocenie ssania wiatru dla dwóch sąsiednich modułów w rzędzie. Moduły znajdujące się dalej otrzymują w tym samym momencie stosunkowo niewielkie ssanie wiatru, co zostało oszacowane na podstawie badania w tunelu aerodynamicznym jednoczesnego obciążenia ssaniem wiatru bloku modułów o rozmiarze dwa na trzy. Obciążenie ssania wywołanego wiatrem, które występuje średnio dla tego bloku, jest zatem tym momencie skupione na przednim rzędzie. W poniższym przykładzie zastosowano taką ilość balastu, że obliczone odkształcenie pod wpływem najbardziej niekorzystnego obciążenia wiatrem nie przekracza 100 milimetrów.

Aby pomieścić ten skoncentrowany balast, mogą być wymagane dodatkowe koryta balastowe. Instalator będzie starał się rozłożyć balast na tyle, na ile to możliwe, aby nie trzeba było go układać na stosie lub wykorzystywać dodatkowe koryta balastowe. Przy takim rozmieszczeniu, przy zachowaniu takiego samego balastu, powstaje znacznie większe odkształcenie, wynoszące 380 milimetrów (**Rysunek 3b**). To byłoby niebezpieczne i należy tego unikać.

Odkształcenie zależy od sztywności systemu, tzn. z jednej strony od sztywności szyn podłogowych (kierunek poprzeczny), a z drugiej strony od sztywności zestawienia modułów i deflektora wiatrowego (kierunek wzdłużny). W wariantcie obliczeniowym dotyczącym układu wyjątkowo

materiałochłonnego i sztywnego, sztywność w kierunku wzdłużnym, a także poprzecznym uległa czterokrotnemu zwiększeniu w celu zmniejszenia odkształceń. Ale nawet w tym przypadku maksymalne odkształcenie unoszące wynosi 270 milimetrów i nadal jest zbyt duże.

Dlatego też nie jest dopuszczalne późniejsze przenoszenie balastu z krawędzi do środka. Taka była również opinia większości uczestników spotkania ekspertów ds. wiatru. Łatwiejsze jest przesunięcie ze środka na zewnątrz, jak również późniejsze przesunięcie niewielkiego balastu w środku zestawu modułów: Zamiast umieszczać pod każdym modułem ważącą cztery kilogramy połowę betonowego bloku, bardziej praktyczne jest umieszczenie pod co drugim modułem pełnego ośmiokilogramowego bloku.

Trzeba rozważyć również inne przypadki: Gdy podmuch wiatru uderzy chwilę później w drugi rząd modułów, powstaje tam zwiększone obciążenie ssaniem wiatru. Jak wykazały testy w tunelu aerodynamicznym, jest ono jednak nieco mniejsze z racji osłonięcia przed wiatrem. Dodatkowo, drugi rząd modułów jest mocowany do pierwszego i trzeciego rzędu, a tym samym drugi rząd potrzebuje znacznie mniej balastu. Można to określić na podstawie dalszych obliczeń. Dodatkowo należy zbadać, co się stanie, gdy lokalne siły ssania wiatru będą oddziaływać na pojedynczy rząd. Ze względu na typową wysokość około trzech do czterech centymetrów szyny podłogowe są dość giętkie i przy większym obciążeniu wiatrem mogą tu wystąpić duże odkształcenia, tak że jeden rząd modułów unosi się i szyny podłogowe ulegają przeciążeniu (rysunek 1c). W takim przypadku ssanie wiatru na pojedynczy rząd ma decydujące znaczenie, biorąc pod uwagę ograniczone rozłożenie obciążenia na sąsiadujące rzędy modułów. Powoduje to, że balast jest większy niż minimalny balast dla bloku modułów. Generalnie większe wartości balastu uzyskuje się dla rogu i krawędzi instalacji. Można to zilustrować, wyobrażając sobie grządkę sałaty przykrytą folią, która jest obciążona kamieniami na krawędzi i w rogach, tak aby folia była przytrzymywana na brzegach i wiatr nie wiał pod folią.

Niektóre parametry mają zostać w przyszłości znormalizowane w branży; na przykład istnieje propozycja, aby lokalne unoszenie się systemu fotowoltaicznego w przypadku pomiaru lokalnego unoszenia się wywołanego ssaniem wiatru było ograniczone do dziesięciu centymetrów. Ponadto określenie przenoszenia obciążenia powinno opierać się na badaniach lub dowodach matematycznych, a nie tylko na ogólnym założeniu, że pewna liczba modułów jest zaangażowana w przenoszenie obciążenia per se.

Martin Schäfer



Autor

Martin Schäfer jest doktorem inżynierii budownictwa pracującym dla firmy Baywa r.e. i od 15 lat jest zaangażowany w rozwój systemu mocowań systemu fotowoltaicznego novotegra. Jest on również odpowiedzialny za badania nośności systemu mocowań i dostarcza dane wejściowe do oprogramowania „Solar-Planit”, które zostało opracowane specjalnie do projektowania tego systemu mocowań. Jest rzecznikiem grupy ekspertów inżynierii budowlanej Niemieckiego Związku Przemysłu Solarnego.