



Opinia techniczna – wrzesień 2023

Analiza bezpieczeństwa dachów
hal wielkopowierzchniowych
w sytuacji niezamierzonego
obciążenia wynikającego
z gwałtownych opadów deszczu.

www.pekabex.com

O Centrum Badań i Rozwoju PEKABEX

Pekabex jako wiodący wytwórca konstrukcji prefabrykowanych i jedna z największych firm budowlanych w Polsce, posiada znaczący potencjał badawczo-rozwojowy w postaci wykwalifikowanej kadry i stale rozbudowywanego parku maszynowego. Wyodrębnienie dedykowanej tym pracom jednostki i określenie agendy jej dalszych prac pozwoliło na dalszy rozwój i usystematyzowania tych działań oraz na odzwierciedlenie założeń strategicznych firmy.

Osiągnięcie celów strategicznych wymaga centralizacji i rozwoju obszaru badawczo-rozwojowego Grupy Pekabex i powołanie multidyscyplinarnej jednostki integrującej oraz rozwijającej dotychczasowo podejmowane działania innowacyjne, badającej technologie, procesy i produkty sektora budowlanego, w szczególności związane z produkcją elementów prefabrykowanych. Utworzenie dedykowanej struktury poświęconej B+R+I jest praktyką stosowaną przez najbardziej innowacyjne firmy w skali światowej. Prowadzenie tego rodzaju prac, tj. działań o wysokim poziomie ryzyka i często dłuższym, niż standardowy, horyzoncie czasowym, wymaga odmiennego podejścia, niż w przypadku standardowej działalności biznesowej. Dedykowane procesy zarządzania projektami, tworzenie zespołów składających się z pracowników odpowiedzialnych za różne obszary działalności firmy, zarządzanie dyfuzją know-how z otoczenia czy portfelowa ocena prowadzonych działań są najbardziej efektywnie implementowane i zarządzane w ramach osobnej jednostki organizacyjnej przedsiębiorstwa.

Dzięki stworzeniu w 2017 r. Centrum Badań i Rozwoju Pekabex uczestniczy aktywnie we wzmacnianiu innowacyjności polskiej gospodarki i promowaniu prac badawczo-rozwojowych na terenie naszego kraju oraz poza jego granicami. W ramach prac Centrum Badań i Rozwoju współpracuje z wyższymi uczelniami technicznymi na terenie całego kraju.

Więcej informacji o celach i aktualnych pracach na stronie:

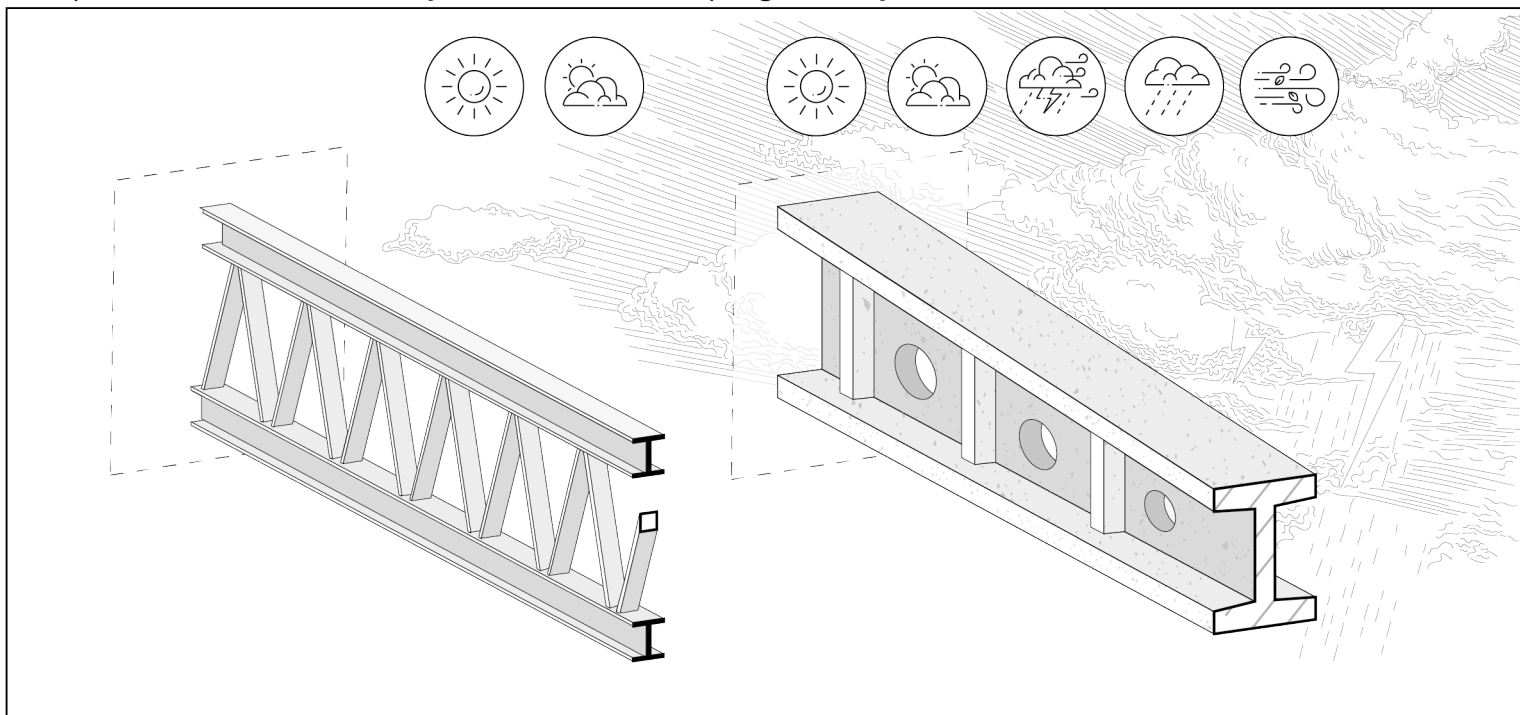
<https://pekabex.com/o-firmie/centrum-badan-i-rozwoju/>



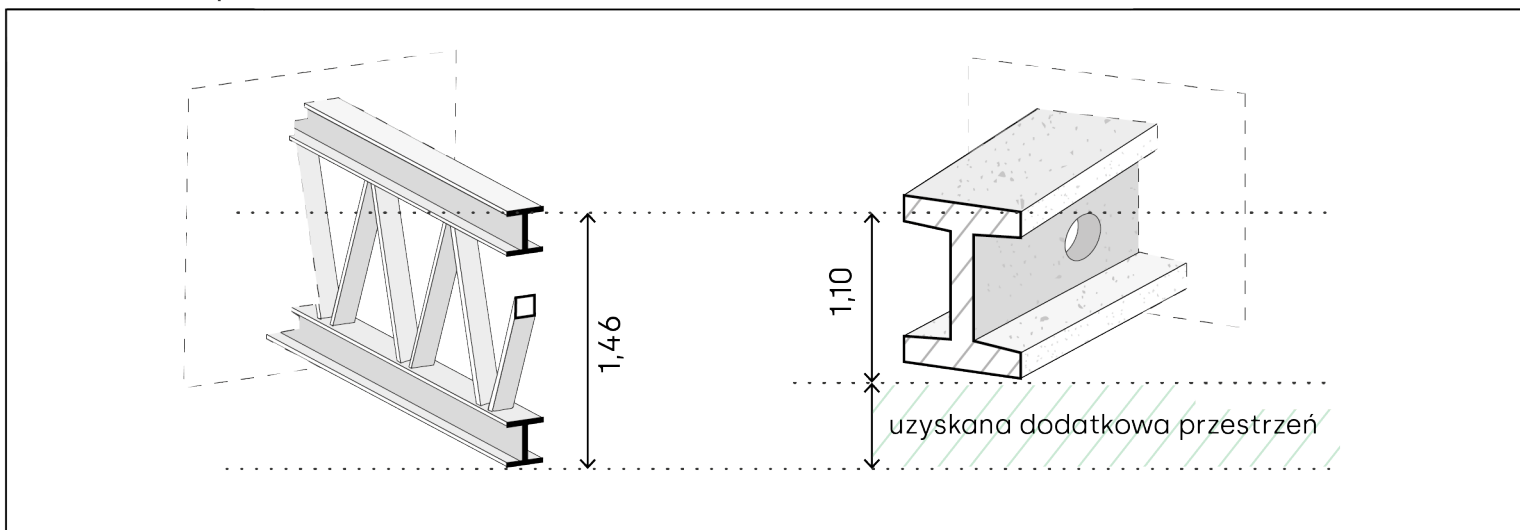
Spis treści

<u>Podstawa opracowania</u>	str. 8
<u>Przyczyny katastrof budowlanych</u>	str. 11
<u>Obciążenia dźwigara dachowego – współczynnik obliczeniowy ciężaru własnego</u>	str. 12
<u>Bezwładność dźwigarów dachowych</u>	str. 18
<u>Charakterystyka dźwigarów stalowych i strunobetonowych</u>	str. 19
<u>Podsumowanie i wnioski</u>	str. 20
<u>Literatura: książki i artykuły, normy, strony internetowe</u>	str. 22

Bezpieczeństwo w różnych warunkach pogodowych

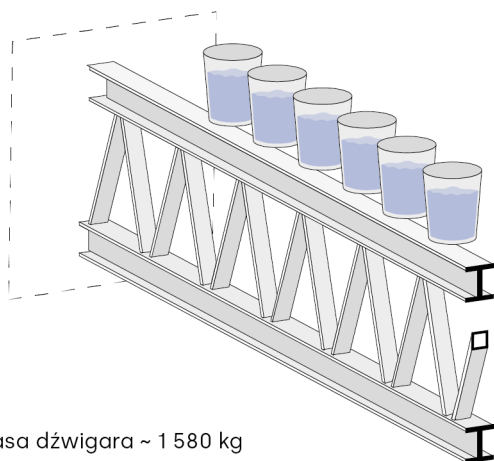


Dodatkowa przestrzeń



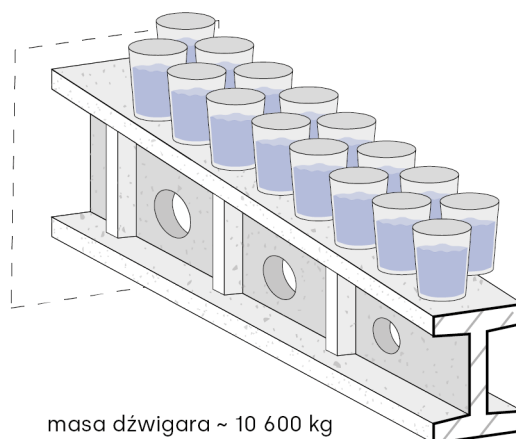
Zapas obciążeń z uwagi na masę własną

uzyskany margines obciążenia: 3,7 kg/m²
co przekłada się na ok. 55 wiader wody



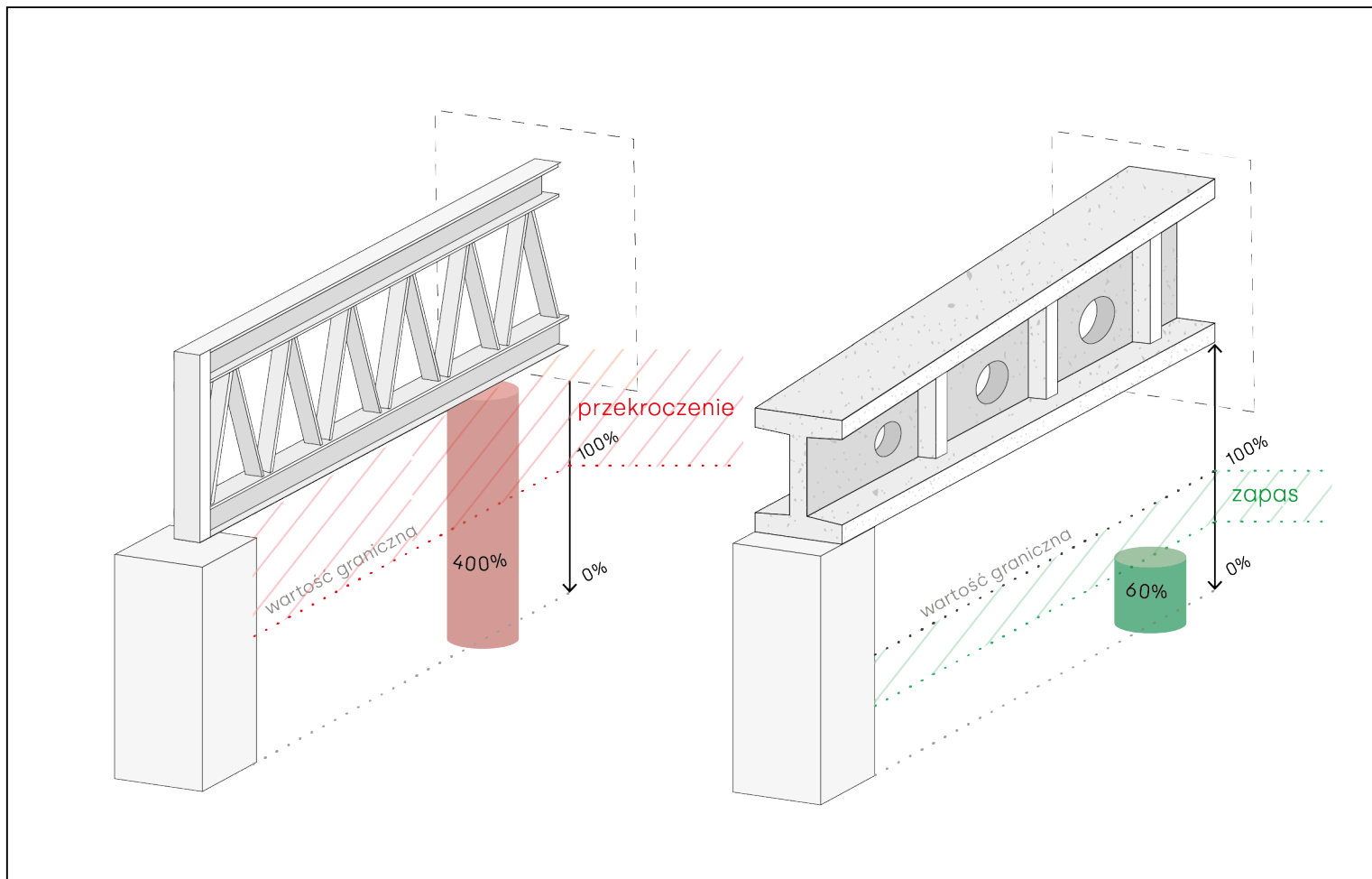
masa dźwigara ~ 1 580 kg

uzyskany margines obciążenia: 24,3 kg/m²
co przekłada się na ok. 365 wiader wody

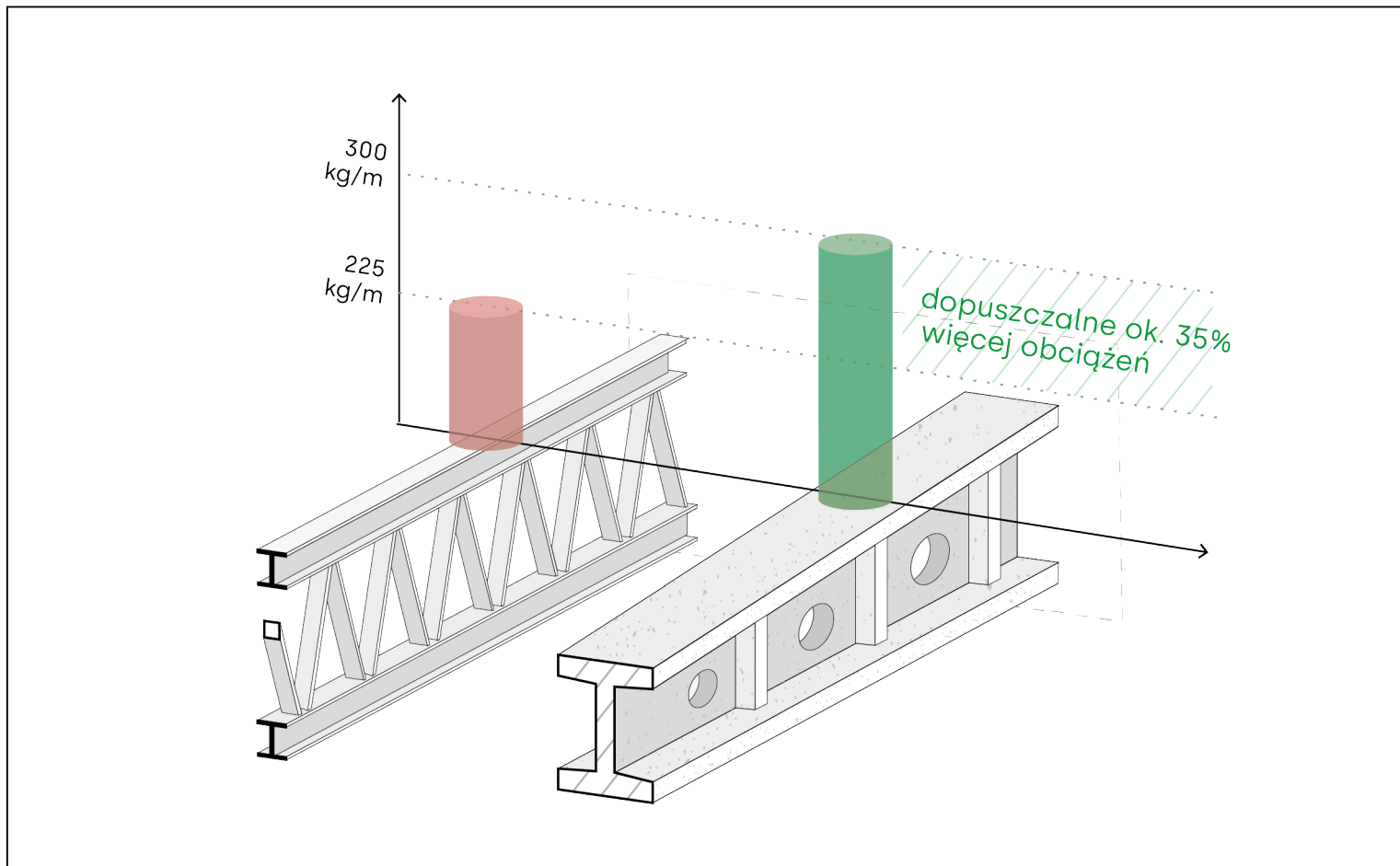


masa dźwigara ~ 10 600 kg

Wykorzystanie dodatkowego zapasu obciążenia podczas ulewnego deszczu dla dźwigara stalowego i betonowego



Większa bezwładność na dodatkowe obciążenia



**W Polsce rocznie
ma miejsce około
500 katastrof
budowlanych.**

Wstęp

Według danych Głównego Inspektora Nadzoru Budowlanego głównymi przyczynami katastrof w latach 2014-2021 były zdarzenia losowe: m.in. silne wiatry, intensywne opady atmosferyczne, pożary. W 2021 r. obiekty budowlane, które uległy katastrofom w podziale na rodzaje, to: 4,9% budynki magazynowe, 1,5% obiekty przemysłowe.

Zawalenie się 18 sierpnia 2023 r. dachu hali w Szczecinie poruszyło opinię publiczną oraz media. Dach zawalił się nad częścią hali, która ma ponad 10 tysięcy metrów kwadratowych, wewnątrz znajdowały się wówczas 144 osoby. Wszystkich udało się ewakuować.

Z dostępnych informacji medialnych wynika, że w tym czasie nad miastem przeszedł front burzowy. Prawdopodobnymi bezpośrednimi przyczynami katastrofy były intensywne opady deszczu i silny wiatr oraz niedrożność systemu odpływowego, mogąca wynikać z różnych przyczyn, w tym z niewłaściwego serwisowania czy też niewłaściwe zaprojektowanie przekrojów. Walący się dach oparł się na regałach magazynowych, dzięki czemu uniknięto tragicznych skutków.

Przy założeniu kompletnie niedrożnego systemu odwadniającego, po 15 minutach opadów ulewnego deszczu na jednym metrze kwadratowym dachu zbierze się 15,3 mm słupa wody, co odpowiada ciężarowi równemu 15,3 kg/m².

- **Dodatkowy zapas dla dachu stalowego zaprojektowanego zgodnie z obowiązującymi normami wynosi 3,7 kg/m². Ulewny, 15 minutowy deszcz powoduje ponad 4-krotne przekroczenie dodatkowego zapasu obciążeń dźwigara stalowego.**
- **W przypadku dachu żelbetowego zapas ten wynosi 24,3 kg/m². Analogiczny ulewny deszcz, dla dźwigara żelbetowego, spowoduje wykorzystanie jedynie 60% zapasu.**
- **Stosując model PANDa do wyznaczenia czasu trwania intensywnych opadów, wybranie pełnego zapasu obciążeń dla kratownicy stalowej (3,7 kg/m²) nastąpi w czasie poniżej 5 minut.**
- **Analogicznie, dla dźwigara strunobetonowego, pełne wybranie zapasu (24,3 kg/m²) ma miejsce po ponad 60 min.**

Biorąc pod uwagę istniejące ryzyka, obecnie obowiązujące wytyczne projektowe wymagają przeformułowania ze względów bezpieczeństwa.

Podstawa opracowania

Podstawę do opracowania niniejszej opinii technicznej stanowią liczne doniesienia medialne dotyczące zawalenia się części dachu hali wielkopowierzchniowej, do którego doszło 18 sierpnia 2023 r. w Szczecinie przy ulicy Kabłowej (fot. 1).

Zdarzenie to miało miejsce, kiedy nad miastem przechodził silny front burzowy [S1]. W województwie zachodniopomorskim (11 powiatów) IMGW-PIB wydał ostrzeżenie drugiego stopnia o burzach około godz. 18:00. Prognozowano burze, którym miejscami będą towarzyszyć silne opady deszczu od 25 mm do 40 mm, lokalnie w wyniku kumulacji opadów z kolejno przechodzących nad obszarem komórek burzowych do 50 mm oraz porywy wiatru do 90 km/h [1].

Mając na uwadze dynamikę oraz coraz częstsze występowanie na naszym terenie (Europa Środkowa) gwałtownych zjawisk atmosferycznych, zasadne jest poświęcenie tym zjawiskom należytej uwagi. Jak zauważają autorzy pracy [2], wśród przyczyn wywołujących katastrofy budowlane występują wpływy atmosferyczne i środowiskowe. Na świecie do jednych z najczęstszych zaliczane były trzęsienia ziemi, powodzie i wiatry huraganowe [3], a w Polsce na pierwszym miejscu [2] najbardziej destrukcyjnymi czynnikami atmosferycznymi i środowiskowymi są m.in.: powodzie, wiatry huraganowe i opady. Świadome odbieranie czynników zewnętrznych ze zmieniającego się klimatu, zmusza do przeanalizowania sytuacji obliczeniowej, niezamierzonego obciążenia, wynikającego z gwałtownych opadów deszczu.



fot. 2. Gromadzące się na krawędzi dachu zanieczyszczenia wpływające na skuteczność systemu odwadniającego powierzchnię dachu [16-S2]



fot. 1. Szczecin. Zawalony dach hali przy ul. Kablowej [S1]

Motywacją do przeprowadzenia analizy jest poczucie odpowiedzialności za realizowane w Polsce konstrukcje obiektów wielkopowierzchniowych.

W wytycznych do projektowania konstrukcji, w wytycznych normowych, oddziaływanie ulewnego deszczu nie widnieje jako indywidualnie wyszczególnione (w porównaniu do np. śniegu, wiatru, obciążeń użytkowych). Efektem tego jest, w powszechnym podejściu, jego pomijanie, zarówno z uwagi na brak wytycznych normowych oraz założenie a priori, że obciążenie to zawsze będzie miało mniejszą wartość niż obciążenie śniegiem. Taki stan rzeczy wydaje się słuszny w przypadku odpowiednio zaprojektowanego oraz sprawnego systemu odwodnienia dachu. Jednak nawet przy spełnieniu powyższych, w trakcie eksploatacji obiektu, na połaci dachu, w obrębie punktów zbiorczych mogą gromadzić się zanieczyszczenia wpływające na drożność systemu odwadniającego (fot. 2). Przedstawiona sytuacja obrazuje, że wykonana w dalszej części opinii analiza ma nie tylko charakter teoretyczny, ale przede wszystkim praktyczny.

Motywacją do
przeprowadzenia
analizy jest poczucie
odpowiedzialności za
realizowane w Polsce
konstrukcje obiektów
wielkopowierzchniowych.

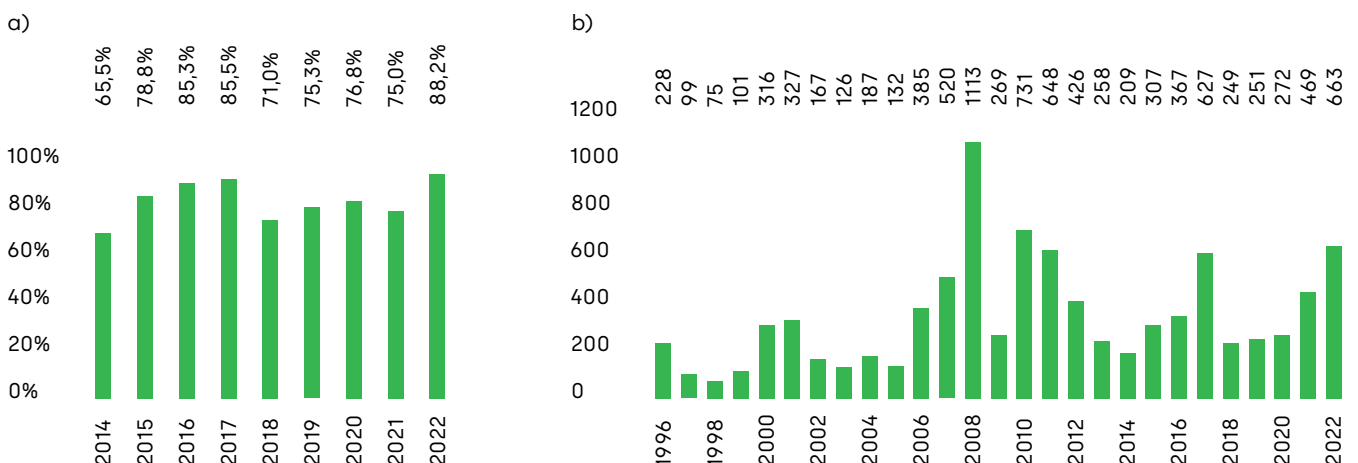


Przyczyny katastrof budowlanych

Każda katastrofa budowlana niesie za sobą zagrożenie bezpieczeństwa życia, zdrowia i mienia. Jak wynika z analiz, prowadzonych przez GUND, przyczyny katastrof mogą mieć różne podłoże.

Na podstawie analiz z lat 2014-2021 dostrzec można wyraźnie przodujący odsetek zdarzeń losowych będących główną przyczyną zaistniałych katastrof budowlanych. Na rysunku 1a) przedstawiony jest procentowy udział katastrof budowlanych wynikający ze zdarzeń losowych na tle wszystkich katastrof odnotowanych w danym roku. Za zdarzenia losowe w ujęciu raportowym uznawane są: silne wiatry, intensywne opady atmosferyczne, pożary, ale także te związane z działaniami człowieka, np. wybuch gazu, czy też wypadki komunikacyjne.

W latach 1995-2022 odnotowano w Polsce 9 573 katastrofy budowlane. W ostatnim raportowym roku – 2022 – było ich 663. Liczbę katastrof na przestrzeni lat przedstawiono na wykresie na rysunku 1b). Analizując dane gromadzone przez GUND [5] dotyczące procentowego udziału zdarzeń losowych we wszystkich katastrofach budowlanych oraz samą liczbę katastrof widać, że liczba zdarzeń losowych jest bardzo znacząca. Pomimo zachowania należytej skrupulatności prac na etapie projektowania konstrukcji oraz wznoszenia obiektu budowlanego liczba katastrof spowodowanych oddziaływaniami losowymi może budzić niepokój. Dodatkowo obserwuje się tendencję wzrostową liczby katastrof mających miejsce w Polsce w ostatnich latach. Mając na uwadze utrzymujący się na wysokim poziomie procent zdarzeń losowych, wywołujących katastrofy, wyraźnie widać, że zmieniające się warunki klimatyczne [4] silnie oddziałują na wznoszone konstrukcje.



rys. 1. Katastrofy budowlane w latach: a) 2014-2022, procentowy udział zdarzeń losowych powodujących katastrofę, b) 1996-2022, ilość raportowanych katastrof [5, 6].

Obciążenia dźwigara dachowego – współczynnik obliczeniowy ciężaru własnego

Przedmiotem niniejszej opinii jest analiza porównawcza dźwigarów strunobetonowych w odniesieniu do stalowych dźwigarów kratowych wraz z próbą identyfikacji zapasów bezpieczeństwa w optymalnie zaprojektowanych konstrukcjach. Analizie poddano dźwigary dachowe o rozpiętości w osiach równej 24,0 m oraz rozstawie układów poprzecznych równym 6,25 m.

Pod zestawione w tablicy nr 1 obciążenia zaprojektowano wytężone na +/- 90% dźwigary: kratownicę stalową o wysokości równej 1,46 m oraz dwuspadowy dźwigar strunobetonowy o wysokości w kalenicy równej 1,10 m. Obciążenia warstwami wykończeniowymi oraz obciążenie zmienne użytkowe przyjęto jak dla standardowych hal wielkopowierzchniowych.

Obciążenia zmienne środowiskowe zebrano dla miejscowości Szczecin, zgodnie z normami PN-EN 1991-1-3 [N1] oraz PN-EN 1991-1-4 [N2]. Kratownica stalowa została zaprojektowana zgodnie z normą PN-EN 1993-1-1 [N3], z założeniem pełnej współpracy ściskanego pasa kratownicy z poszyciem wykonanym z blachy trapezowej (zabezpieczenie pasa ściskanego przed wyboczeniem). Dźwigar strunobetonowy został zaprojektowany zgodnie z normą PN-EN 1992-1-1 [N4].

Tablica 1 – Obciążenia dachu hali magazynowej (powierzchniowe)						
NR	Rodzaj obciążenia	Obciążenie charakterystyczne		Współczynnik obliczeniowy	Obciążenie obliczeniowe	
		q_k [kN/m ²]			Y_f [-]	q_d [kN/m ²]
Obciążenie stałe						
1.1	Warstwy wykończeniowe: Membrana dachowa PCV Wetna mineralna (0,13m) Folia PE Blacha trapezowa T130 (0,80mm)	0,01 0,15 0,01 0,10		1,35		0,01 0,20 0,01 0,13
	SUMA	0,27				0,36
Obciążenie zmienne (użytkowe)						
2.1	Instalacje wewnętrzne – podwieszane	0,15		1,50		0,23
2.2	Instalacja fotowoltaiczna z podkonstrukcją	0,25				0,38
	SUMA	0,40				0,60
Obciążenie zmienne (środowiskowe)						
3.1	Śnieg (Strefa 2) (Dach płaski: nachylenie połaci 2%)	Kalenica: 0,72 Kosz: 0,77		1,50	Kalenica: 1,08 Kosz: 1,16	
3.2	Wiatr* (strefa graniczna 1 i 2) Obszar dachu „+I” (parcie) Wew. podciśnienie (ssanie)	0,18 0,27				0,27 0,41
	SUMA	0,45				0,68
*Obciążenie od wiatru wskazano tylko dla obszaru „+I” z uwagi, że jest to jedyny obszar zgodny co do zwrotu działania z obciążeniami grawitacyjnymi. W przypadku projektu należy analizować także pozostałe obszary dla dachu płaskiego.						



W tym punkcie skupiono się jedynie na zapasie obliczeniowym, jaki generowany jest przez współczynnik obliczeniowy dla ciężaru własnego dźwigarów dachowych. Norma PN-EN 1990 [N5] nakłada na obciążenia stałe konstrukcji współczynnik obliczeniowy o wartości równej 1,35. Do takich obciążeń zalicza się także ciężar własny konstrukcji – ciężar własny dźwigarów dachowych. Kratownica stalowa dobrana zgodnie z powyższym opisem ma masę równą ok. 1 580 kg.

Dźwigar strunobetonowy, spełniający przyjęte w analizie założenia, ma masę ok. 10 600 kg. Wykonując elementy prefabrykowane (zarówno kratownicę stalową jak i dźwigar strunobetonowy) w kontrolowanych warunkach produkcyjnych przytoczone masy są masami w przybliżeniu dokładnymi (bez znacznych odchyień). W tym miejscu można potraktować, że 35% dodatkowego obciążenia, jakie przyjmowane jest w kombinacji obliczeniowej dla ciężaru własnego konstrukcji, stanowi pewnego rodzaju ukryty zapas obliczeniowy. Po przeliczeniu tego zapasu na metr kwadratowy powierzchni dachu, w przypadku kratownicy stalowej mowa o wartości 3,7 kg/m², natomiast w przypadku dźwigarów strunobetonowych mowa o wartości 24,3 kg/m². Dodatkowy zapas obciążenia w przypadku zastosowania jako element konstrukcyjny dachu dźwigarów strunobetonowych stanowi więc 20,6 kg/m².

Tablica 2 – Obciążenia dźwigara dachowego (obc. pow. wg Tab.1)				
NR	Rodzaj obciążenia	Obciążenie charakterystyczne	Współczynnik obliczeniowy	Obciążenie obliczeniowe
		q _k [kN/m]	Y _f [-]	q _d [kN/m]
Obciążenie stałe				
1.1	Warstwy wykończeniowe (1.1)	1,69	1,35	2,28
1.2a	Wariant 1: Ciężar kratownicy stalowej (ok. 1 580 kg)	0,66	1,35	0,89
1.2b	Wariant 2: Ciężar dźwigara sprężonego (ok. 10 600 kg)	4,35	1,35	5,87
Zapas obc. dźwigar stalowy: 0,89 - 0,66 = 0,23 kN/m 3,7 kg/m ²				
Zapas obc. dźwigar betonowy: 5,87 - 4,35 = 1,52 kN/m 24,3 kg/m ²				
Dodatkowy zapas obciążenia dla dźwigara betonowego w stosunku do dźwigara stalowego na 1 m długości:				
1,52 - 0,23 1,29 kN/m (129 kg/m) = 20,6 kg/m²				

Zbierając obciążenie z powierzchni wynikającej z rozpiętości dźwigarów oraz ich rozstawu poprzecznego (powierzchnia przypadająca na jeden element dachowy) zapas obciążenia równy jest odpowiednio:

- w przypadku kratownicy stalowej: 552 kg,
- w przypadku dźwigara strunobetonowego: 3 648 kg.

Dodatkowy zapas obciążenia dla dźwigara strunobetonowego w stosunku do dźwigara stalowego stanowi więc 3 096 kg/element.

Poddając pod rozważania zagadnienie bezpieczeństwa konstrukcji hal wielkopowierzchniowych w sytuacji niezamierzonego obciążenia pochodzenia klimatycznego, należy poświęcić należytą uwagę opadom deszczu. W porównaniu obciążeń klimatycznych (śnieg, wiatr) oraz możliwości ich realnych odstępstw co do wartości oddziaływań od założeń normowych, przypadek obciążenia konstrukcji deszczem nie jest rozważany przez normy opisujące oddziaływania na konstrukcje. Można więc przyjąć, że jakiegokolwiek wystąpienie obciążenia konstrukcji deszczem jest obciążeniem niezamierzonym. We wstępie do niniejszego opracowania wskazano przyczynę pomijania tego obciążenia w powszechnym podejściu. Raz jeszcze należy jednak podkreślić, że w trakcie eksploatacji obiektu drożność systemu odwadniającego może zostać zaburzona lub, jak zauważa się w [N1], w niektórych przypadkach może dojść do zablokowania odwodnienia podczas topnienia i zamarzania śniegu. Taki stan rzeczy prowadzi do gromadzenia się wody na dachach hal wielkopowierzchniowych [4].

Obserwowane, zachodzące aktualnie oraz prognozowane na najbliższe dekady, zmiany częstości i intensywności opadów zmuszają do poważnych refleksji, a w konsekwencji przekładają się na konkretne wyzwania. Zarówno krótkotrwałe opady nawalne o małym najczęściej zasięgu terytorialnym, jak i długotrwałe opady deszczu o mniejszej intensywności, lecz o dużym zasięgu mogą wywołać znaczące szkody w infrastrukturze urbanistyczno-przemysłowej [4].

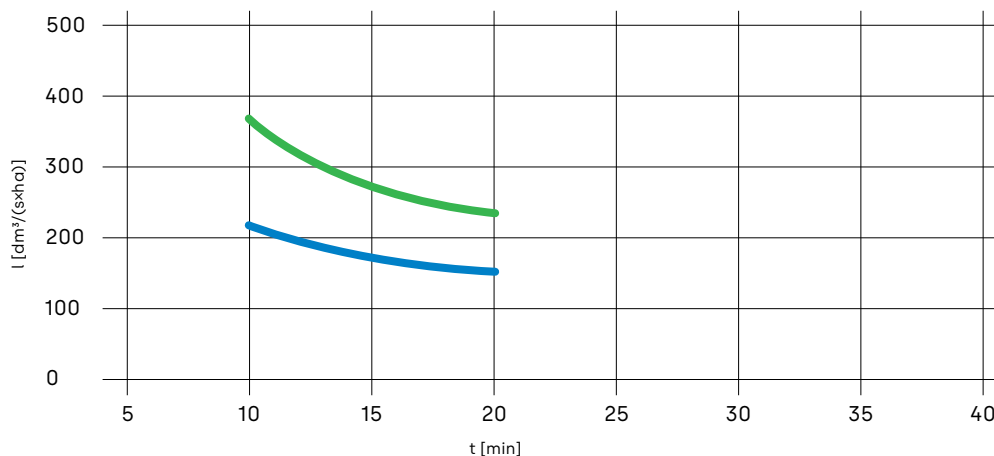
W niniejszej opinii pochyłono się także nad wyznaczeniem ilości wody, jaka jest w stanie nagromadzić się na dachu wielkopowierzchniowej hali w trakcie trwania intensywnych opadów. Metodę obliczenia natężenia deszczu przyjmuje projektant instalacji w uzgodnieniu z inwestorem lub gestorem sieci deszczowej. Większość projektantów instalacji korzysta w tym celu z metody Błaszczyka [S4]. Standardem jest przyjmowanie natężenia deszczu, obliczonego wg równania Błaszczyka [7], dla 15-minutowego deszczu obliczeniowego o częstotliwości powtarzania się raz na pięć lat $c = 5$, tj. dla prawdopodobieństwa $p = 20\%$ jako wartość $q = 131,4 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$ (miarodajne natężenie deszczu). Przy założeniu kompletnie niedrożnego systemu odwadniającego, po 15 minutach opadów deszczu o takiej intensywności na jednym metrze kwadratowym dachu zbierze się 11,8 mm słupa wody, co odpowiada ciężarowi równemu $11,8 \text{ kg/m}^2$.





W sytuacji niezamierzonego obciążenia pochodzenia klimatycznego, należy poświęcić należytą uwagę opadom deszczu.

Dalsze stosowanie modelu Błaszczyka, jako standardu, wpływa na zmniejszenie bezpieczeństwa projektowanych i modernizowanych systemów odwodnienia w Polsce [8], co przekłada się także na bezpieczeństwo użytkowania hal wielkopowierzchniowych. Nieaktualność modelu Błaszczyka wynika przede wszystkim ze zmian rozkładów w czasie i przestrzeni ilości opadów, których głównym czynnikiem są silne zmiany klimatyczne [9]. W Niemczech znaczenie tego zagadnienia zostało zauważone trzydzieści lat temu, a jego rozwiązaniem jest aktualizowany systematycznie ogólnokrajowy atlas opadowy KOSTRA (niem. KOordinierte STarkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertungen). W Polsce standard ten został osiągnięty w ramach opracowania Polskiego Atlasu Natężeń Deszczów (PANDa), zapewnia on cyfrową platformę zawierającą informacje o natężeniach deszczów miarodajnych dla wszystkich miast w Polsce. Traktując jak poprzednio, jako punkt odniesienia 15-minutowy opad deszczu o prawdopodobieństwie wystąpienia $p = 20\%$ ($c = 5$ lat), miarodajne natężenie deszczu q będzie równe $169,89 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$ (rys. 2). Przy założeniu kompletnie niedroźnego systemu odwadniającego, po 15 minutach opadów deszczu o takiej intensywności na jednym metrze kwadratowym dachu zbierze się $15,3 \text{ mm}$ słupa wody, co odpowiada ciężarowi $15,3 \text{ kg}/\text{m}^2$.



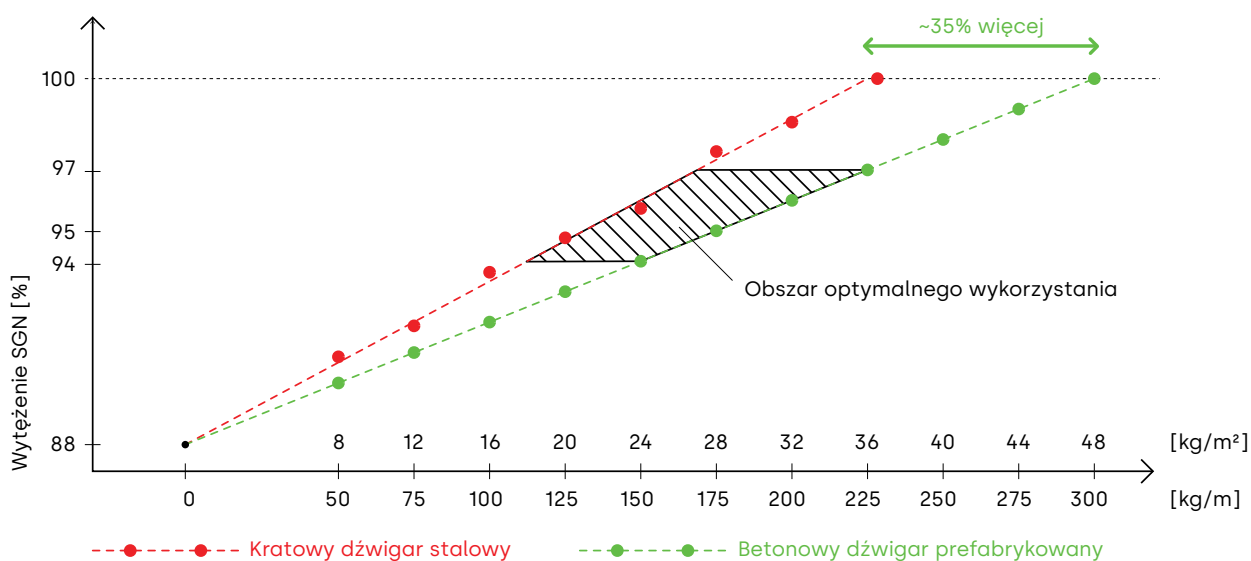
rys. 2. Miarodajne natężenie deszczu w zależności od długości trwania opadów (linia niebieska – prawdopodobieństwo $p = 20\%$, linia zielona – prawdopodobieństwo $p = 2\%$) [PANDa].

Przedstawione powyżej dane liczbowe wyraźnie wskazują, że takie dodatkowe obciążenie stanowiłoby ponad 4-krotne przekroczenie zapasu obliczeniowego, omawianego w niniejszym punkcie opinii dla kratownicy stalowej, oraz ok. 60% wybranie zapasu w przypadku dźwigara strunobetonowego.

Stosując model PANDa do wyznaczenia czasu trwania intensywnych opadów jakie, przy całkowicie niedroźnej instalacji odwodnieniowej, spowodowałyby wybranie omawianego pełnego zapasu kratownicy stalowej ($3,7 \text{ kg}/\text{m}^2$) otrzymano wartość poniżej 5 minut. Postępując analogicznie w przypadku dźwigara strunobetonowego, pełne wybranie omawianego zapasu ($24,3 \text{ kg}/\text{m}^2$) uzyskano by po upływie ponad 60 minut.

Bezwnadność dźwigarów dachowych

Kolejnym krokiem przeprowadzonej analizy jest wykazanie „bezwnadności” analizowanych dźwigarów dachowych. W tym celu przeanalizowano i dobrano na ten sam zestaw obciążeń zewnętrznych elementy tak, aby ich wyężenie z uwagi na zginanie w Stanie Granicznym Nośności (SGN) było sobie równe i wynosiło ok. 88%. Następnie dokonywano zwiększania obciążeń ze skokiem 25 kg/mb długości dźwigara. Wyniki przedstawiono na wykresie poniżej (rys. 3).



rys. 3. Wykorzystanie nośności dźwigara dachowego wraz ze wzrostem dodatkowego obciążenia zewnętrznego (dodatkowe kilogramy na metr długości dźwigara [kg/m], dodatkowe kilogramy na m² dachu [kg/m²]).

Przedstawione na powyższym wykresie dane obrazują wyraźnie większą bezwnadność dachu wykonanego z zastosowaniem jako elementów konstrukcyjnych dźwigarów strunobetonowych. Przy wzroście o tę samą wartość wyężenia w SGN, do dźwigara strunobetonowego można dołożyć około 35% obciążenia więcej niż ma to miejsce w przypadku kratownicy stalowej. Wzrost obciążenia zewnętrznego o tę samą wartość powoduje wyraźnie szybszy wzrost wyężenia kratownicy stalowej niż dźwigara strunobetonowego.

Charakterystyka dźwigarów stalowych i strunobetonowych

Cechą charakterystyczną wielkopowierzchniowych dachów stalowych, wykonanych z zastosowaniem kratownic stalowych, jest lekka konstrukcja dachu. W przytoczonym w opinii przykładzie ciężar kratownicy stalowej jest ponad 6-krotnie mniejszy niż w przypadku zastosowania dźwigara strunobetonowego. Taka dysproporcja masy przekłada się na smukłość konstrukcji. Optymalnie, z uwagi na kryterium masy elementu konstrukcyjnego, zaprojektowane dachy stalowe uwzględniają (co zostało założone także w tej opinii) współpracę dźwigara kratowego z poszyciem dachu (blachą trapezową). Kratownice stalowe charakteryzują się znacznie mniejszą stabilnością (większą wrażliwością na utratę stateczności) w porównaniu do dźwigarów strunobetonowych.

Widok konstrukcji hali wielkopowierzchniowej wykonanej z zastosowaniem kratownic stalowych, przedstawiono na fot. 3, natomiast hali z zastosowaniem dźwigarów strunobetonowych na fot. 4. Subiektywny odbiór stabilności dachu w przypadku obu rodzajów zastosowanych dźwigarów jest zgoła odmienny.



fot. 3. Dach hali wykonany w technologii prefabrykacji stalowej [S5]



fot. 4. Dach hali wykonany w technologii prefabrykacji strunobetonowej [PEKABEX]

Dodatkowo, kratowe dźwigary stalowe transportowane są z zakładu prefabrykacji w krótszych fragmentach, które są łączone na miejscu w jeden dźwigar o pełnej rozpiętości (np. 24 m). Potęczenia te są przeważnie projektowane jako skręcane i zlokalizowane w okolicach środka rozpiętości, tj. w miejscu występowania największych sił wewnętrznych. Skręcane połączenia nawet poprawnie i bezpiecznie zaprojektowane, jednak zlokalizowane w tak newralgicznym miejscu i przeznaczone do wykonania na budowie, wprowadzają potencjalne dodatkowe punkty do pomyłki (np. wykorzystanie śrub o niewłaściwej klasie wytrzymałości). Miejsce to jest tym bardziej newralgiczne w sytuacji wyjątkowej (np. krótkotrwałych mocnych opadów deszczu). W przeciwieństwie do dźwigarów stalowych, prefabrykowane dźwigary strunobetonowe wykonywane są w całości w kontrolowanych warunkach zakładu prefabrykacji i transportowane do miejsca wbudowania jako jeden element.

Pośrednio związany z poprzednią cechą jest charakter zniszczenia omawianych dźwigarów w momencie przeciążenia konstrukcji. Dźwigary strunobetonowe, w momencie przekroczenia projektowych sił wewnętrznych, charakteryzują się pojawiającym się licznym zarysowaniem konstrukcji. Coraz szersze zarysowanie świadczy o niezamierzonej pracy elementu oraz sugeruje konieczność bezpiecznej ewakuacji, a także wykonania szczegółowych oględzin specjalistów zajmujących się konstrukcjami strunobetonowymi. Użytkownik hali wykonanej w technologii strunobetonowej otrzymuje więc możliwość zareagowania, zanim dojdzie do uszkodzenia elementu konstrukcyjnego. W przypadku kratownic stalowych, choć sama stal jako materiał wykazuje możliwość znacznego uplastycznienia i bezpiecznej reakcji na przeciążenie konstrukcji, przeciążenie węzłów konstrukcyjnych w miejscach połączeń technologicznych elementów należy do zjawisk dynamicznych. Zerwanie jednego łącznika w styku może prowadzić do gwałtownego wzrostu wyężenia pozostałych i lawinowego efektu uszkodzenia węzła.

Podsumowanie

Oczekiwanym założeniem jest, że poprawnie zaprojektowana konstrukcja jak i każdy jej element, powinien pracować niezawodnie przez wiele lat. W rzeczywistości nie jest tak zawsze, o czym świadczą przytoczone w pkt.2 opracowania dane statystyczne. Brak odpowiedniej konserwacji i utrzymania, błędne założenia, zmieniające się warunki klimatyczne oraz błędy ludzkie prowadzą niejednokrotnie do awarii, a nawet katastrof. W kontekście opisanych czynników, dodatkowe zapasy bezpieczeństwa „tkwiące” w konstrukcji oraz jej gotowość do przyjęcia oddziaływań niezamierzonych staje się jeszcze bardziej istotna i pożądana.

Wykazane w niniejszej opinii technicznej analizy pozwalają uznać dźwigary strunobetonowe za wyraźnie odporniejsze na niekontrolowane przeciążenia niż kratownice stalowe. Dachy wielkopowierzchniowe wykonane w technologii strunobetonowej charakteryzują się dużą bezwładnością oraz stabilnością, co przekłada się na wzrost zapasów bezpieczeństwa użytkowania takich obiektów.

Zmieniające się jednak warunki atmosferyczne zmuszają do refleksji oraz konieczności wprowadzenia zmian do obowiązujących normatywów. Sytuacje, w których intensywne opady deszczu mogą negatywnie oddziaływać na bezpieczeństwo użytkowania obiektów wielkopowierzchniowych są wyraźnym powodem do takich zmian. Dachy wielkopowierzchniowe, gdzie powierzchnia zbierania opadów deszczu jest znaczna, są tym efektem obciążone najbardziej.

Powyższe wnioski o zmieniających się warunkach klimatycznych oraz realnym przypadku występowania niekontrolowanego dodatkowego obciążenia od intensywnych opadów deszczu jest także poparte raportem Polskiego Instytutu Ekonomicznego (PIE), wskazującym, że ekstremalne zjawiska pogodowe doprowadziły do znacznych strat gospodarczych w krajach członkowskich UE. Za największą część strat odpowiadają powodzie (ponad 45%), następnie burze i grad (ok. 33%), natomiast upały, susze, pożary lasów i silne mrozy stanowiły 20% całkowitych strat w okresie 1980-2021 [S6].

Wnioski

Analiza przeprowadzona w niniejszej opinii wyraźnie pokazuje, że dach wielkopowierzchniowy wykonany w technologii strunobetonowej charakteryzuje się ponad 6-krotnie większym ukrytym zapasem bezpieczeństwa wynikającym z zastosowanych współczynników obliczeniowych dla ciężaru własnego dźwigarów dachowych. Dodatkowo zapas obciążenia dla dźwigara strunobetonowego w stosunku do dźwigara stalowego stanowi w analizowanym przypadku 3 096 kg/element (20,6 kg/m² dachu).

Ponadto wykazano wyraźnie większą bezwładność dachu wykonanego z zastosowaniem dźwigarów strunobetonowych jako elementów konstrukcyjnych w odniesieniu do dźwigarów stalowych. Wzrost obciążenia zewnętrznego o tę samą wartość powoduje wyraźnie szybszy wzrost wyężenia kratownicy stalowej niż dźwigara strunobetonowego. Przy wzroście wyężenia w SGN o tę samą wartość, do dźwigara strunobetonowego można dołożyć około 35% obciążenia więcej niż ma to miejsce w przypadku analizowanej kratownicy stalowej.



 Dakabaw

 Pekabex

Literatura: książki i artykuły, normy, strony internetowe

KSIAŻKI I ARTYKUŁY

- [1] Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, Biuro Meteorologicznych Prognoz Morskich w Gdyni, Wykaz obowiązujących ostrzeżeń, Województwo Zachodniopomorskie – ostrzeżenia meteorologiczne zbiorczo nr 146.
- [2] L. Runkiewicz, J. Sieczkowski, Czynniki atmosferyczne i środowiskowe wpływające na zagrożenia, awarie i katastrofy obiektów budowlanych, Przegląd Budowlany, 10/2017.
- [3] L. Runkiewicz, W. Kędra, Analiza katastrof i awarii konstrukcji budowlanych w latach 1978-1982, Wydawnictwo ITB, Warszawa, 1985.
- [4] Wojciechowski S., Józefczyk Ł., Sulik P., Bezpieczeństwo dachów hal wielkopowierzchniowych wykonanych w technologii prefabrykacji strunobetonowej w sytuacji wystąpienia niezamierzonego obciążenia, BTA, 2023.
- [5] Cudak M., Katastrofy Budowlane w 2022 roku, GUND, Warszawa 2023.
- [6] Dłużniewski A., Katastrofy Budowlane w 2021 roku, GUND, Warszawa 2022.
- [7] Kotowski A., Kaźmierczak B., Danczewicz A., Modelowanie opadów do wymiarowania kanalizacji, Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Warszawa 2010.
- [8] Licznar P., Zaleski J., redaktorzy. Metodyka opracowania Polskiego Atlasu Natężenia Deszczów (PANDa). Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy; 2020. (Licznar P., Zaleski J. Seria publikacji naukowo-badawczych IMGW-PIB).
- [9] Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Zespół redakcyjny: H. Lee, J. Romero]. IPCC 2023, Genewa, Szwajcaria, 184 strona.

NORMY

- [N1] PN-EN 1991-1-3:2005 Eurokod 1 – Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-3: Oddziaływania ogólne – Obciążenie śniegiem
- [N2] PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1 – Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru
- [N3] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3 – Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [N4] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [N5] PN-EN 1990:2004 Eurokod – Podstawy projektowania konstrukcji

STRONY INTERNETOWE

- [S1] <https://tvn24.pl/pomorze/szczecin-czesciowo-zawalil-sie-dach-hali-przy-ulicy-kablowej-7297979> (09.2023)
- [S2] <https://westernspecialtycontractors.com/roof-housekeeping/> (09.2023)
- [S3] <https://www.gunb.gov.pl/strona/katastrofy-budowlane> (12.2023)
- [S4] <https://poradnikprojektanta.pl/jak-wyznaczyc-miarodajne-natezenie-deszczu-dane-opadowe-w-polsce/> (09.2023)
- [S5] <https://www.pmservices.pl/realizacje/nadzor-inwestorski-realizacje/panattoni-park-szczecin-i> (09.2023)
- [S6] <https://obserwatorgospodarczy.pl/2023/05/12/ekstremalne-zjawiska-pogodowe-doprowadzily-do-miliardowych-strat-w-ue/> (09.2023)



Opracował:

Zespół Działu Badań i Rozwoju Pekabex

Łukasz Józefczyk, mgr inż.

Szymon Wojciechowski, dr inż.

Poznań, 2 lutego 2024 r.

© PEKABEX

 **Pekabex**

Grupa Pekabex

ul. Szarych Szeregów 27

60-462 Poznań

www.pekabex.com