

Bronisław GOSOWSKI<sup>1</sup>

Paweł LORKOWSKI<sup>2</sup>

Michał REDECKI<sup>3</sup>

## ANALIZA WĘZŁÓW ŚWIETLIKÓW HALI WYKONANYCH WADLIWIE ORAZ POPRAWNIE Z RUR PROSTOKĄTNYCH

Przedstawiono wadliwą konstrukcję węzłów świetlików podłużnych hali przemysłowej, wykonanych z rur prostokątnych. Efektem tego były pękające w nich szyby. Analizie poddano pracę statyczną świetlików jako konstrukcji przestrzennych, współpracujących z konstrukcją dachu. Siły wewnętrzne w konstrukcji świetlików wyznaczono programem SOFiSTiK. Otrzymane w ten sposób siły ściskające lub rozciągające w ryglach świetlików, stanowiły odpowiednie obciążenia węzłów. Analizowano ponadto, z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES), zachowanie się pod wpływem wyżej wymienionych obciążeń, węzłów wykonanych z rur prostokątnych: wadliwie, poprawnie, a także według proponowanego sposobu naprawy. Było to konieczne, gdyż omawiane w pracy węzły konstrukcji świetlików, nie są ujęte w normie PN-EN 1993-1-8:2006 (/AC:2009 oraz /Ap2:2011). Węzły wykonane wadliwie pokazano na rys. 1., poprawnie – na rys. 8., a zgodnie z propozycją naprawy – na rys. 11. Natomiast zachowanie się węzłów wadliwych pokazano na rys. 6. i 7., poprawnych – na rys. 9. i 10., a wzmocnionych według wdrożonej koncepcji – na rys. 12. Referat zakończono wnioskami i zaleceniami odnośnie do naprawy i poprawnego konstruowania tego typu węzłów.

**Słowa kluczowe:** konstrukcja stalowa, świetlik hali, węzeł, rura prostokątna.

### 1. Wstęp

Przeanalizowano wadliwie zaprojektowaną i zrealizowaną konstrukcję świetlików podłużnych hali przemysłowej. Konsekwencją błędów projektowych było pękanie w trakcie eksploatacji szyb świetlików wykonanych

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Bronisław Gosowski, Instytut Budownictwa PWr, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, tel. +71 320 41 22; [bronislaw.gosowski@pwr.wroc.pl](mailto:bronislaw.gosowski@pwr.wroc.pl).

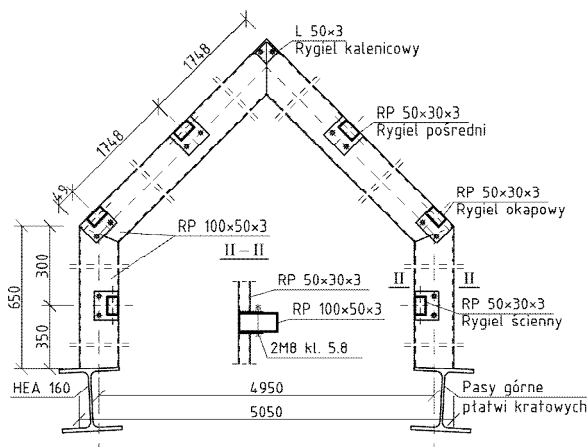
<sup>2</sup> Paweł Lorkowski, Instytut Budownictwa PWr, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, tel. + 71 320 38 15, [pawel.lorkowski@pwr.wroc.pl](mailto:pawel.lorkowski@pwr.wroc.pl).

<sup>3</sup> Michał Radecki, Instytut Budownictwa PWr, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, tel. + 71 320 38 15, [michal.redecki@pwr.wroc.pl](mailto:michal.redecki@pwr.wroc.pl)

ze szkła zbrojonego. Przyczyną tego stanu było przyjęcie zbyt uproszczonego modelu obliczeniowego świetlików, a ponadto wadliwie zaprojektowane połączenia elementów wykonanych z rur prostokątnych. Analizując świetliki uwzględniono współpracę ich konstrukcji z dachem. Efektem przestrzennej pracy świetlika były siły podłużne w ryglach powodujące ścisnienie lub rozciąganie węzłów. Wartości sił wewnętrznych w konstrukcji świetlika wyznaczono korzystając programu SOFiSTiK [1]. Węzły elementów rurowych świetlików zostały natomiast zamodelowane w programie ABAQUS [2]. W pracy przedstawiono wyniki analiz rzeczywistej pracy węzłów, ponadto zaprezentowano propozycje ich prawidłowego wykonania oraz naprawy. Pracę zakończono wnioskami i zaleceniami odnośnie do poprawnego konstruowania tego typu węzłów.

## 2. Opis konstrukcji hali i świetlików

Analizowane świetliki podłużne wykonano w hali produkcyjnej o rzucie prostokąta, o wymiarach w osiach 175,6 na 40 m. Hala jest podzielona na dwa nierówne oddylatowane segmenty. W kierunku poprzecznym ma ona dwie nawy o rozpiętości w osiach słupów po 20 m. Dach każdej z naw wykonany jest jako dwuspadowy o wysokościach powyżej poziomu terenu w strefie okapów i koszy ok. 8 m, a w kalenicach, w których zlokalizowano świetliki ok. 12 m.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny konstrukcji świetlika

Fig. 1. Skylight structure cross-section.



Rys. 2. Widok świetlika od wnętrza hali

Fig. 2. Internal view of the skylight.

Układy poprzeczne hali stanowią ramy blachownicowe o rozpiętościach naw 20 m w rozstawach co 15 m. Inaczej rozwiązano układy przydylatacyjne i końcowy, który umieszczono w odległości 20 m. Na ryglach ram oparto jednoprzęsłowe, kratownicowe płatwie o rozpiętości dostosowanej do rozstawu

układów poprzecznych (15 lub 20 m), rozmieszczone na dachu co ok. 2,5 m lub 5,0 m.

Płatwie kratownicowe o rozpiętości zarówno 15 m, jak i 20 m wykonano jako: podświetlikowe, pośrednie i koszowe (okapowe), różniące się między sobą wymiarami pasa górnego i wysokością. Płatwie koszowe (okapowe) i pośrednie rozstawione są co ok. 2,5 m, a ich pasy górne połączone stężeniem połąciovym podłużnym. Płatwie podświetlikowe znajdują się natomiast w odległościach co 5,0 m i stanowią między innymi konstrukcję wsporczą dla rozstawionych w odstępach co ok. 1,2-1,25 m ram poprzecznych trójkątnych świetlików podłużnych, odcinkowych, zlokalizowanych w kalenicy każdej z naw. Długości świetlików wykonanych wzdłuż hali są zróżnicowane [3]. Na początku hali mamy dwa świetliki o długości po ok. 45 m, a dalej świetliki o długościach ok. 22,5 i 12,5 m.

Konstrukcja nośna świetlików (por rys. 1 i 2) została zaprojektowana i wykonana z rur prostokątnych. Ramy poprzeczne świetlików z rur 100×50×3 mm, rozstawione wzdłuż płatwi podświetlikowych co 1,2 do 1,25 m, połączone zostały w ścianach bocznych ryglami wykonanymi z rur 50×30×3 mm, a w kalenicy z giętego kątownika 50×50×3 mm. Oszklenie świetlików wykonane jest w postaci szyb zespolonych o konfiguracji: wewnętrzna szyba zbrojona o grubości 6 mm, pustka 12 mm wypełniona argonem i zewnętrzna szyba matowa o grubości 5 mm. Wymiary szyb zespolonych wynoszą w przybliżeniu 1,2×1,75 m i są dostosowane do rozstawu ram i rygli świetlika, do których są mocowane. Pola oszklone świetlików nie zostały stężone. Stężenia te są niezbędne do zapewnienia geometrycznej niezmienności konstrukcji świetlików na długości.

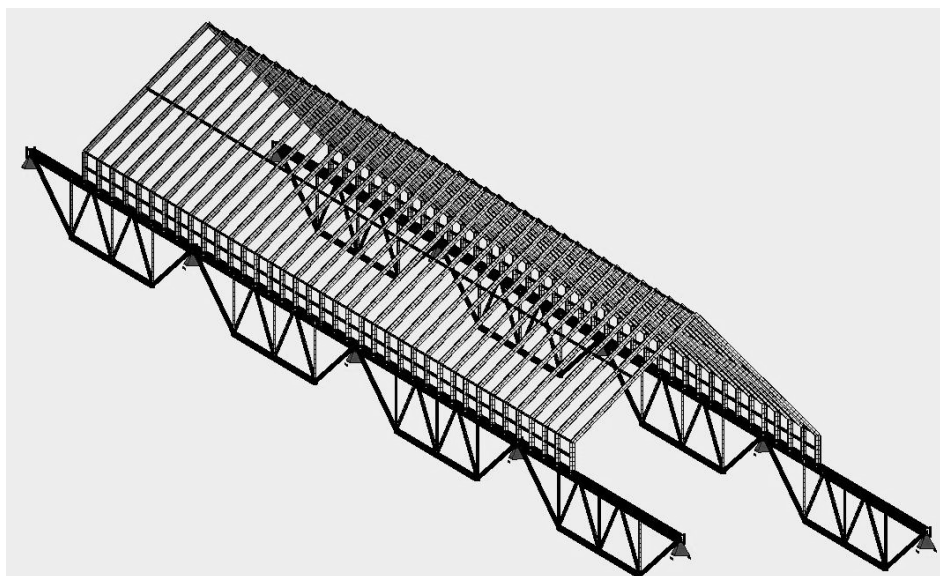
Połączenia rygli ściennych, okapowych i pośrednich zaprojektowano jako doczołowe na mimośrodzie (por. rys. 1). Blachę czołową gr. 3 mm zespolono z ryglami przy pomocy spoiny pachwinowej, a z drugiej strony dwiema śrubami M8 kl. 5.8 do ramy układu poprzecznego świetlików w taki sposób, że w zależności od rodzaju rygiel licuje z wewnętrzną lub zewnętrzną krawędzią ramy, natomiast połączenie śrubowe znajduje się w osi układu. Spowodowało to wystąpienie dodatkowego zginania w ryglu, co również przyczyniło się do pęknięcia szyb świetlików.

### **3. Analiza statyczna świetlika jako konstrukcji przestrzennej**

Obliczenia świetlika w projekcie ograniczono do rozpatrzenia układu poprzecznego, jako dwuprzegubowej ramy płaskiej podpartej niepodatnie na płatwiach, a także rygli świetlika, jako prętów swobodnie podpartych, zginanych wyłącznie obciążeniem poprzecznym.

Chcąc uwzględnić rzeczywistą pracę statyczną świetlików, zmodelowano je w programie SOFiSTiK [1] jako konstrukcje przestrzenne. Rozpatrywano

przy tym konstrukcje złożone z ram poprzecznych świetlików, które połączone są między sobą ryglami, współpracujących z kratowymi płatwiami podświetlikowymi. Analizie poddano świetliki o długości 45 m, których konstrukcja przechodzi nieprzerwanie nad trzema ryglami układów poprzecznych hali rozstawionych co 15 m (por. rys. 3). Model ten to konstrukcja przestrzenna, która ma 432 węzły i 791 prętów w sumie podzielonych na 9938 elementów skończonych.

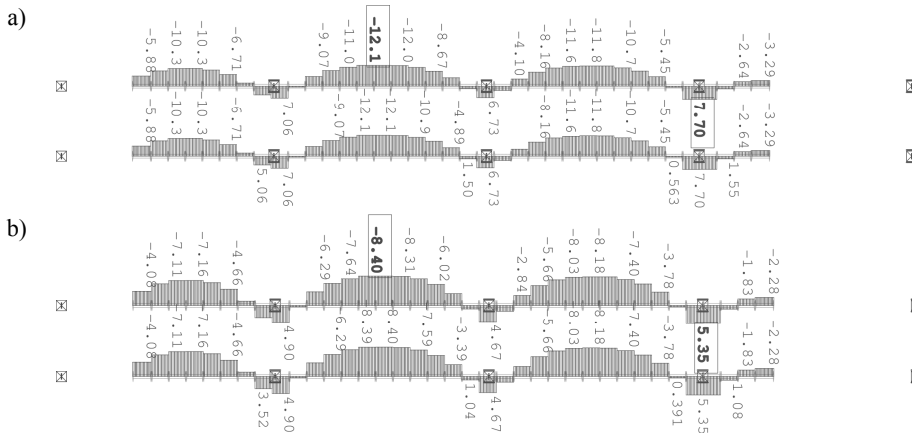


Rys. 3. Widok przestrzennego prętowego modelu świetlika

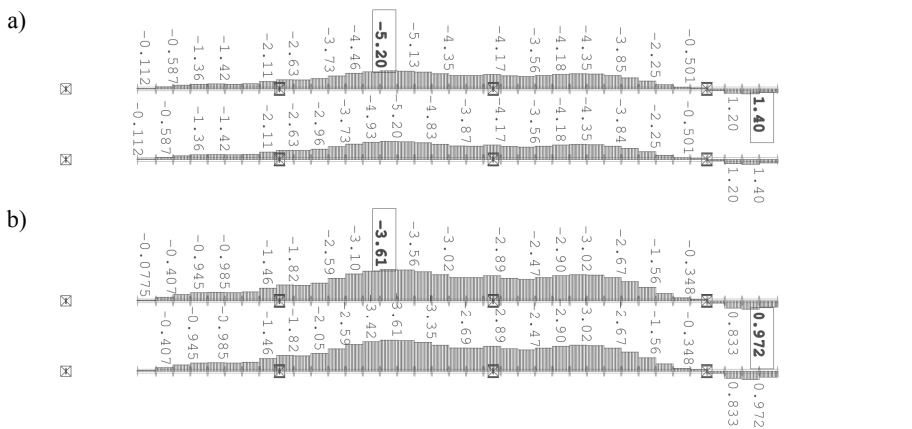
Fig. 3. Spatial view of skylight numerical bar model.

Skupiono się głównie nad ustaleniem wpływu pracy przestrzennej konstrukcji świetlików na wyężenie jej elementów składowych. Powyższe nie było uwzględniane podczas projektowania świetlików. W związku z tym obciążenie analizowanych konstrukcji przestrzennych przykładano, jako odpowiednie obciążenie równomiernie rozłożone wzdłuż płatwi podświetlikowych. Rozpatrywano przy tym następujące obciążenia ustalone dla hali, zgodnie z obowiązującymi normami, na poziomie obliczeniowym: stałe – **3,72** kN/m, śniegiem – **5,36** kN/m, ssaniem wiatru – 2,10 kN/m, a także łączne (stałe i śnieg) – **9,08** kN/m. Powyższe obciążenia przykładano jako jednakowe do obu płatwi. Przeanalizowano ponadto przypadek niesymetrycznego obciążenia ssaniem wiatru, w którym płatwie modelu przestrzennego obciążone były różnie: jedna – 1,70 kN/m, a druga – 0,83 kN/m. Obciążenia jednak z udziałem ssania wiatru w analizowanym zagadnieniu nie były tak istotne, jak te, które podano wyżej pismem wytłuszczonym. Należy w tym miejscu

podkreślić, że maksymalne ugięcia płatwi od obciążeń obliczeniowych rozważanych konstrukcji wynoszą 3,49 cm. Taki sposób postępowania wydaje się uzasadniony na etapie analizy SGN elementów świetlika (rygle, węzły).



Rys. 4. Siły osiowe [kN] w ryglach ściennych (widok z góry), od obc.: a) śniegiem, b) stałego  
 Fig. 4. Axial forces [kN] in wall beams (plane view) from a) snow, b) dead load.



Rys. 5. Siły osiowe [kN] w ryglach okapowych (widok z góry), od obc.: a) śniegiem, b) stałego  
 Fig. 5. Axial forces [kN] in eave beams (plane view) from a) snow, b) dead load.

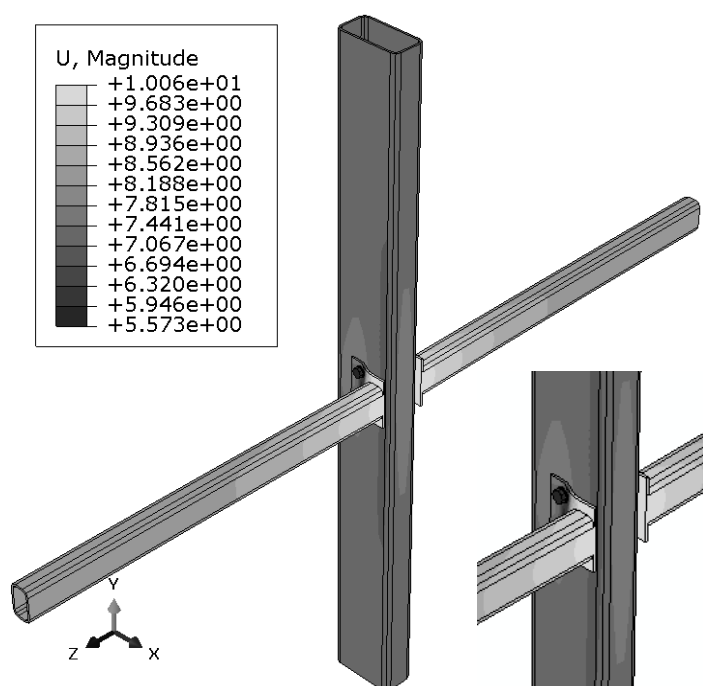
#### 4. Zachowanie się węzłów w ujęciu MES

Omawiane w pracy węzły konstrukcji świetlików, nie są ujęte w normie PN-EN 1993-1-8:2006 (/AC:2009 oraz /Ap2:2011), w związku z tym konieczna była analiza ich zachowania się, którą przeprowadzono metodą elementów skończonych (MES). Wynikające z przestrzennej pracy konstrukcji świetlika

siły wewnętrzne w elementach podłużnych (ryglach), zostały wyznaczone programem SOFiSTiK. Siły te przyjęto jako obciążenie węzłów, wykonanych z rur prostokątnych w trzech wersjach: wadliwie, poprawnie oraz według rozwiązania wdrożonego.

#### 4.1. Rozwiązanie istniejące

Korzystając z programu ABAQUS [2], bazującego na metodzie elementów skończonych, zamodelowano węzeł połączenia rygla ściennego (por. rys. 1.) z ramą poprzeczną świetlika.



Rys. 6. Zachowanie się połączenia rygli z ramą świetlika w wersji pierwotnej – rozciąganie

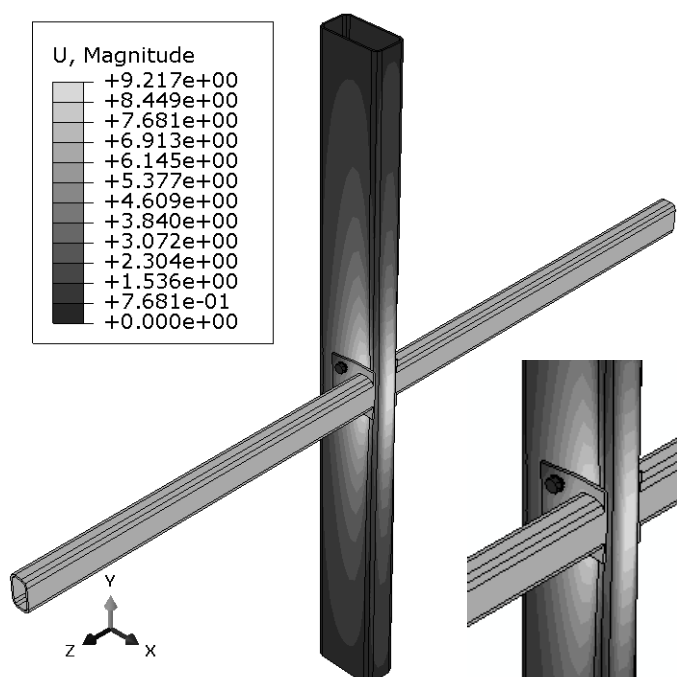
Fig. 6. Behaviour of faulty beam to skylight frame joint – tension.

Model węzła podzielono na 5482 prostopadłościennych, ośmiowęzłowych elementów skończonych ze zredukowanym całkowaniem (C3D8R). Maksymalne wymiary tych elementów nie przekraczają 5. lub 10. mm, przy grubości 1,5 lub 3 mm. Gęstszą siatkę zastosowano w miejscach koncentracji naprężeń. Obciążenie węzła wykonano w dwóch wariantach. Za każdym razem obciążeniem węzła była siła osiowa w ryglach ściennych od efektu łącznego obciążenia stałego i śniegu (por. rys. 4 i 5), przy czym jeden wariant dotyczył

ekstremalnej siły ściskającej (-20,5 kN), a drugi rozciągającej (13,5 kN). W obu przypadkach potwierdzono niedoskonałość węzła.

W wypadku rozciągania, mimośrodowe połączenie rygła powodowało odginanie się blachy węzłowej od ramy świetlika na odległość 8,4 mm oraz moment zginający w ryglu (por. rys. 6). Moment ten powodował wygięcie rygła o strzałce 4,9 mm.

Ściskanie powodowało natomiast zapadanie się dłuższych ścianek rury ramy świetlika na głębokość 9,2 mm oraz wybrzuszenie się ścianek prostopadłych o maksymalnej wartości 8,8 mm (por. rys. 7).

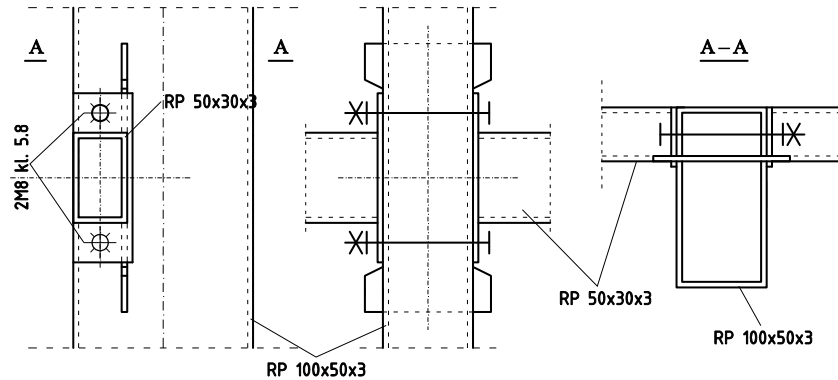


Rys. 7. Zachowanie się połączenia rygli z ramą świetlika w wersji pierwotnej – ściskanie

Fig. 7. Behaviour of faulty beam to skylight frame joint – compression.

#### 4.2. Rozwiązanie zalecane

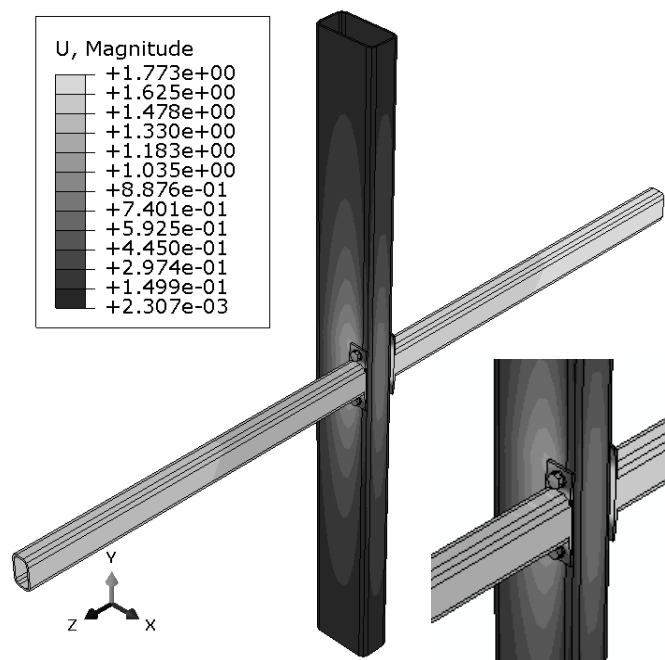
Bazując na rozwiązaniu MES jak w p. 4.1, zamodelowano węzeł o konstrukcji zalecanej. Liczba elementów wynosiła 5654. Zastosowano w nim blachę węzłową o takiej samej grubości (3 mm), przy czym połączenie śrubowe rygli wykonano w ich osi, aby wyeliminować mimośród w wypadku rozciągania. W celu przeciwdziałania zapadaniu się szerszych ścianek rury ramy świetlika, zastosowano element dystansowy w postaci blachy o grubości 4 mm, znajdującej się na przedłużeniu ścianki rygła, co pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Połączenie rygli z ramą świetlika w wersji zalecanej

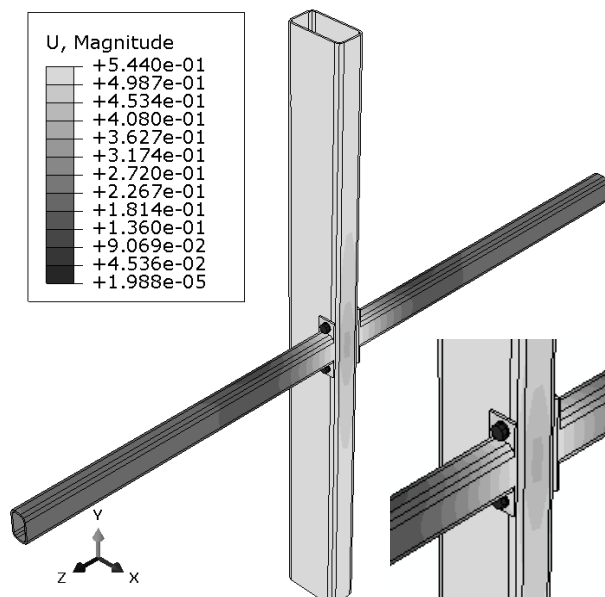
Fig. 8. Proper beam to skylight frame joint.

Takie skonstruowanie węzła pozwoliłoby ograniczyć negatywne skutki rozwiązania zastosowanego pierwotnie. W ten sposób wyeliminowano mimośrodowe rozciąganie rygla, a w konsekwencji jego zginanie. Zmniejszył się również prześwit pomiędzy ramą świetlika a blachą czołową do 1,3 mm. (por. rys. 9).



Rys. 9. Zachowanie się połączenia rygli z ramą świetlika w wersji zalecanej – rozciąganie

Fig. 9. Behaviour of proper beam to skylight frame joint – tension.



Rys. 10. Zachowanie się połączenia rygli z ramą świetlika w wersji zalecanej – ściskanie

Fig. 10. Behaviour of proper beam to skylight frame joint – compression.

W przypadku ściskania rygli blacha dystansowa zredukowała zapadanie się dłuższej ścianki rury ramy świetlika. Spowodowało to zmniejszenie wybrzuszenia się prostopadłej, krótszej ścianki do ok. 0,4 mm (por. rys. 10).

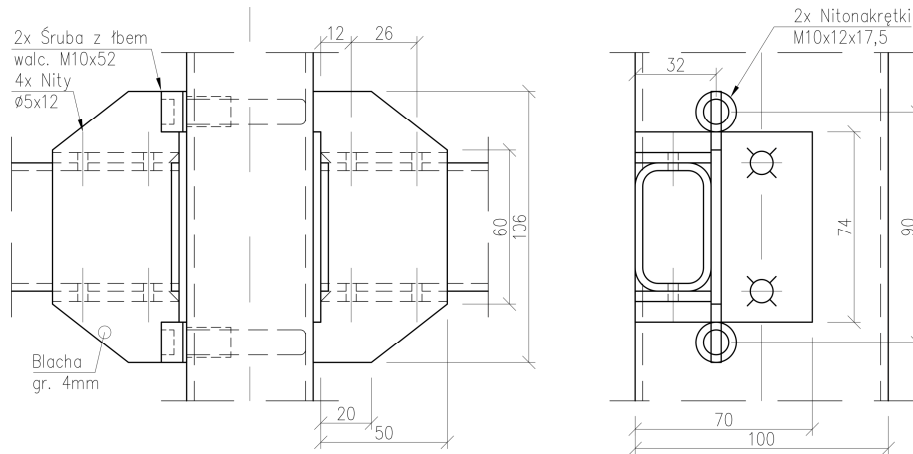
### 4.3. Rozwiązanie wdrożone

Na istniejącym obiekcie niemożliwe było zastosowanie rozwiązania proponowanego w p. 4.2 [3]. Zaistniała więc konieczność wzmocnienia węzłów najlepiej bez demontowania konstrukcji. Problem zapadających się ścianek występujący przy ściskaniu rozwiązano przez zastosowanie stalowych nitonakrętek M10×12×17,5 mm i śrub M10×52 mm (rys. 11). Obciążenie z rygli na łby śrub przekazywane jest przez docisk za pośrednictwem odpowiednio ukształtowanych blach o grubości 4 mm. Blachy te były mocowane do rygli za pomocą 4 stalowych nitów jednostronnych  $\phi 5 \times 12$  mm [4]. Siły podłużne w ryglach powstają wskutek przemieszczeń ram poprzecznych świetlika wraz z dachem. W przypadku sił rozciągających rygle, rozwiązaniem wystarczającym okazało się zastosowanie podkładek sprężystych pod łby i nakrętki śrub M8.

Węzeł zamodelowano podobnie jak w p. 4.1 i 4.2, jednak ze względu na bardziej skomplikowany kształt (nity, dodatkowe blachy i śruby) dopuszczono

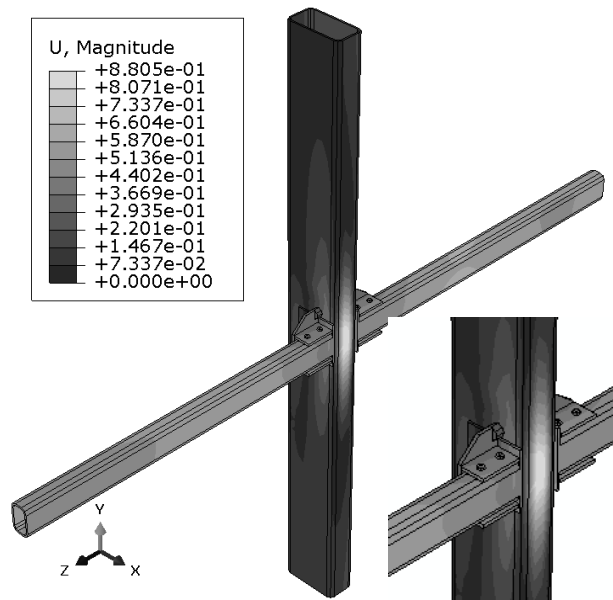
siatkowanie MES elementami pięciociennymi, sześciowzłowymi (C3D6). Liczba elementów wynosi 7182, z czego 7003 to el. C3D8R, a 179 to C3D6.

Śruby M10 jako element dystansowy spełniły swoje zadanie. Zapadanie się dłuższej ścianki rury ramy świetlika jest pomijalnie małe, natomiast wybrzuszenie krótszej ścianki wynosi ok. 0,8 mm (por. rys. 12).



Rys. 11. Połączenie rygli ściennych z ramą świetlika w wersji wdrożonej

Fig. 11. Strengthened wall beam to frame joint.



Rys. 12. Zachowanie się połączenia rygli z ramą świetlika w wersji wdrożonej – ściskanie

Fig. 12. Behaviour of strengthened wall beam to frame joint – compression.

## 5. Wnioski i uwagi ogólne

Projektując świetliki podłużne w halach wskazane byłoby ograniczanie ich długości do rozstawów układów poprzecznych. W przypadku świetlików zdecydowanie krótszych od odległości między układami poprzecznymi, możliwe jest projektowanie świetlików jako konstrukcji płaskich. Decydując się na ciągle świetliki przechodzące nad wieloma układami poprzecznymi, konieczne jest, jak pokazano w pracy, uwzględnienie ich współpracy z konstrukcją dachu, co możliwe jest projektując ich konstrukcję jako przestrzenną. To pociąga za sobą konieczność odpowiedniego podejścia do projektowania węzłów elementów z rur prostokątnych.

Konstruując przedmiotowy węzeł w projekcie, popełniono szereg błędów, które uniemożliwiały właściwe użytkowanie obiektu [3]. Chcąc uniknąć podobnych problemów należy dostosować się do podanych niżej zaleceń.

Projektując węzły z rur prostokątnych należy brać pod uwagę możliwość deformacji wiotkich ścianek tego typu kształtowników. Ma to szczególne znaczenie w przypadku sił ściskających. Ograniczenie możliwości odkształcania się przekroju rury można zrealizować poprzez umieszczenie wewnątrz elementów dystansowych, takich jak wspawane blachy lub dodatkowe śruby wkręcone w ścianki. Gorszym rozwiązaniem, ze względu na zużycie materiałów, jest zastosowanie rur o odpowiednio dobranej grubości ścianek.

W przypadku projektowania węzła na siły rozciągające, blacha węzłowa musi spełniać nie tylko warunki stanu granicznego nośności, ale również użytkowości. Zapominanie o tym warunku skutkuje zbyt dużą szczeliną (odspojeniem) pomiędzy blachą a ścianką kształtownika.

Połączenia śrubowe w analizowanych węzłach powinno projektować się w ten sposób, aby oś łączników pokrywała się z osiami prętów dochodzących do węzła. Nie przestrzeganie tego zalecenia skutkować będzie momentem zginającym w efekcie mimośrodowego rozciągania.

### Literatura

- [1] SOFiSTiK Manuals ver. 2012, SOFiSTiK AG, Oberschleissheim 2012.
- [2] ABAQUS 6.11 Online Documentation, Dassault Systèmes, 2011.
- [3] Gosowski B., Lorkowski P., Redecki M.: *Błędy na etapie projektowania przyczyną stanu awaryjnego świetlików hali przemysłowej*. XXVI konferencja naukowo-techniczna Awarie budowlane, Szczecin-Międzyzdroje, 21-24 maja 2013, Red. Maria Kaszyńska, Wydawnictwo Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, Szczecin 2013, s. 499-506
- [4] Gosowski B., Kubica E.: *Badania laboratoryjne konstrukcji metalowych*. Wydanie IV znowelizowane i rozszerzone, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.

## **ANALYSIS OF FAULTY AND PROPER INDUSTRIAL SKYLIGHTS JOINTS MADE OF HOLLOW SECTIONS**

### **S u m m a r y**

Faulty structure of joints in longitudinal skylights in industrial building made of structural hollow sections is presented. Static analysis is taken into consideration as spatial construction and cooperating with roof structure. Internal forces in skylight bars were determined using SOFiSTiK software. Obtained in that way, compressive and tensional forces were used as proper nodal loads. Moreover, joints were modelled in commercial software Abaqus using finite element method (FEM) to obtain the behaviour under mentioned nodal loads made of rectangular hollow sections: faulty, correctly and according to proposed overhaul. It was necessary, because discussed skylight joints are not referenced to Eurocode PN-EN 1993-1-8:2006 (/AC:2009 and /Ap2:2011). Faulty joints are presented on Fig. 1, proper – on Fig. 8, according to proposed overhaul – on Fig. 11. On the other hand the behaviour of faulty joints is shown on Fig. 6 and 7, proper – on Fig. 9 and 10, according to proposed strengthened – on Fig. 12. Paper ends with conclusions and recommendations about repair and proper construction of that kind of joints.

**Key words:** steel structures, skylights, joint, hollow section.

DOI: 10.7862/rb.2013.19

*Przesłano do redakcji: w kwietniu 2013 r.*

*Przyjęto do druku: w lipcu 2013 r.*