KONSTRUKCJE STALOWE W EUROPIE

Jednokondygnacyjne konstrukcje stalowe
Część 5: Projekt wykonawczy kratownic

Jednokondygnacyjne konstrukcje stalowe
Część 5: Projekt wykonawczy kratownic

PRZEDMOWA

Niniejsza publikacja stanowi piątą część przewodnika projektanta zatytułowanego *Jednokondygnacyjne konstrukcje stalowe*.

Przewodnik *Jednokondygnacyjne konstrukcje stalowe* składa się z następujących 11 części:

Część 1: Poradnik architekta
Część 2: Projekt koncepcyjny
Część 3: Oddziaływania
Część 4: Projekt wykonawczy ram portalowych
Część 5: Projekt wykonawczy kratownic
Część 6: Projekt wykonawczy słupów złożonych
Część 7: Inżynieria pożarowa
Część 8: Przegrody zewnętrzne budynku
Część 9: Wprowadzenie do oprogramowania komputerowego
Część 10: Wzorcowa specyfikacja konstrukcji
Część 11: Połączenia zginane

Jednokondygnacyjne konstrukcje stalowe to jeden z dwóch przewodników projektanta. Drugi przewodnik nosi tytuł *Wielokondygnacyjne konstrukcje stalowe.*

Obydwa przewodniki projektanta powstały w ramach europejskiego projektu „Wspieranie rozwoju rynku kształtowników na potrzeby hal przemysłowych i niskich budynków (SECHALO) RFS2-CT-2008-0030”.

Przewodniki projektanta zostały opracowane pod kierownictwem firm ArcelorMittal, Peiner Träger oraz Corus. Treść techniczna została przygotowana przez ośrodki badawcze CTICM oraz SCI współpracujące w ramach joint venture Steel Alliance.

Spis treści

		Nr strony
PRZEDMOWA		iii
STRESZCZENIE		vi
1	WPROWADZENIE	1
1.1	Definicja	1
1.2	Zastosowanie kratownic w budynkach jednokondygnacyjnych	1
1.3	Różne kształty kratownic	4
1.4	Wybrane aspekty projektowania kratownic konstrukcji dachowych	7
1.5	Projektowanie wiatrownic	10
2	WPROWADZENIE DO PROJEKTU WYKONAWCZEGO	12
2.1	Wymagania ogólne	12
2.2	Omówienie przykładu praktycznego	14
3	ANALIZA GLOBALNA	17
3.1	Ogólne	17
3.2	Modelowanie	18
3.3	Modelowanie przykładu praktycznego	19
3.4	Uproszczona analiza globalna przykładu praktycznego	21
3.5	Siły drugorzędne	23
3.6	Wpływ luzu powstałego w wyniku ugięć	24
3.7	Modyfikacja kratownicy w celu przeprowadzenia urządzeń	27
4	WERYFIKACJA ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH	31
4.1	Weryfikacja ściskanych elementów konstrukcyjnych	31
4.2	Weryfikacja elementów poddawanych rozciąganiu	45
5	WERYFIKACJA POŁĄCZEŃ	48
5.1	Charakterystyka połączenia kratownicy ze słupkiem	48
5.2	Ciągłość pasa dźwigara	51
5.3	Połączenie krzyżulców z pasami dźwigara	52
LITERATURA		55
ZAŁĄCZNIK A	Przykład praktyczny — Projektowanie ciągłego połączenia pasa przy zastosowaniu połączeń z blachami nakładkowymi	57
ZAŁĄCZNIK B	Przykład praktyczny — Projekt węzła kratownicy z blachą węzłową	85

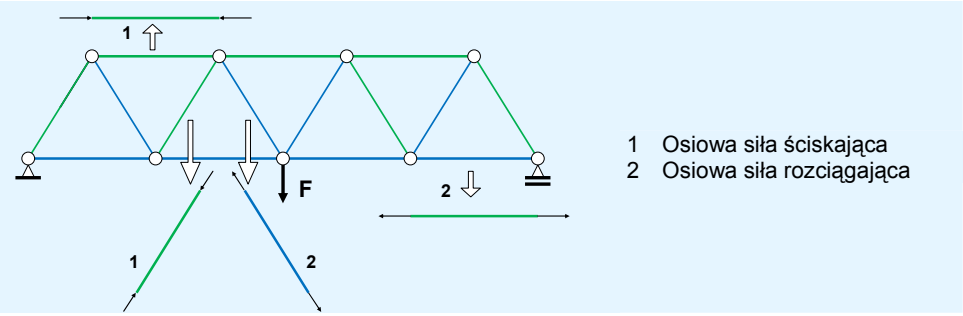
STRESZCZENIE

Niniejsza publikacja dostarcza wskazówek w zakresie projektowania kratownic budynków jednokondygnacyjnych. Zastosowanie konstrukcji z wykorzystaniem kratownic pozwala na wznoszenie budynków o dowolnych rozmiarach i kształtach. Niniejszy dokument wyjaśnia, iż możliwe jest zastosowanie kratownic zarówno dwu-, jak i trójwymiarowych. Kratownica w formie dwuwymiarowej to zasadniczo belka służąca do podparcia konstrukcji dachowej budynku, o rozpiętości do 120 metrów w przypadku dużych budynków przemysłowych. Kratownica w formie trójwymiarowej może być wykorzystywana do pokrycia dużych przestrzeni bez konieczności stosowania podpór pośrednich. Ta forma jest często wykorzystywana przy wznoszeniu dużych hal wystawowych. Informacje szczegółowe zawarte w niniejszym dokumencie odnoszą się głównie do konstrukcji wykorzystujących kratownice dwuwymiarowe składające się z kształtowników walcowanych, ale zasady te znajdują zastosowanie w przypadku wszystkich form konstrukcji kratownic.

1 WPROWADZENIE

1.1 Definicja

Kratownica jest zasadniczo układem triangulowanym składającym się zazwyczaj z prostych, wzajemnie połączonych elementów konstrukcyjnych. Czasem stosuje się nazwę dźwigar kratowy. Poszczególne elementy są połączone w węzłach. Często zakłada się, że są to połączenia nominalnie przegubowe. Siły zewnętrzne oddziałujące na układ oraz reakcje na podporach oddziałują na ogół w węzłach. Gdy wszystkie elementy i przyłożone siły znajdują się w jednej płaszczyźnie, układ określany jest jako kratownica płaska lub dwuwymiarowa.



Rysunek 1.1 Elementy kratownicy prostej poddane działaniu sił osiowych

Główną siłą oddziałującą na każdy element konstrukcyjny jest osiowa siła rozciągająca lub ściskająca. Gdy połączenia w węzłach są sztywne, występuje zginanie wtórne. Zjawisko to omówiono poniżej.

1.2 Zastosowanie kratownic w budynkach jednokondygnacyjnych

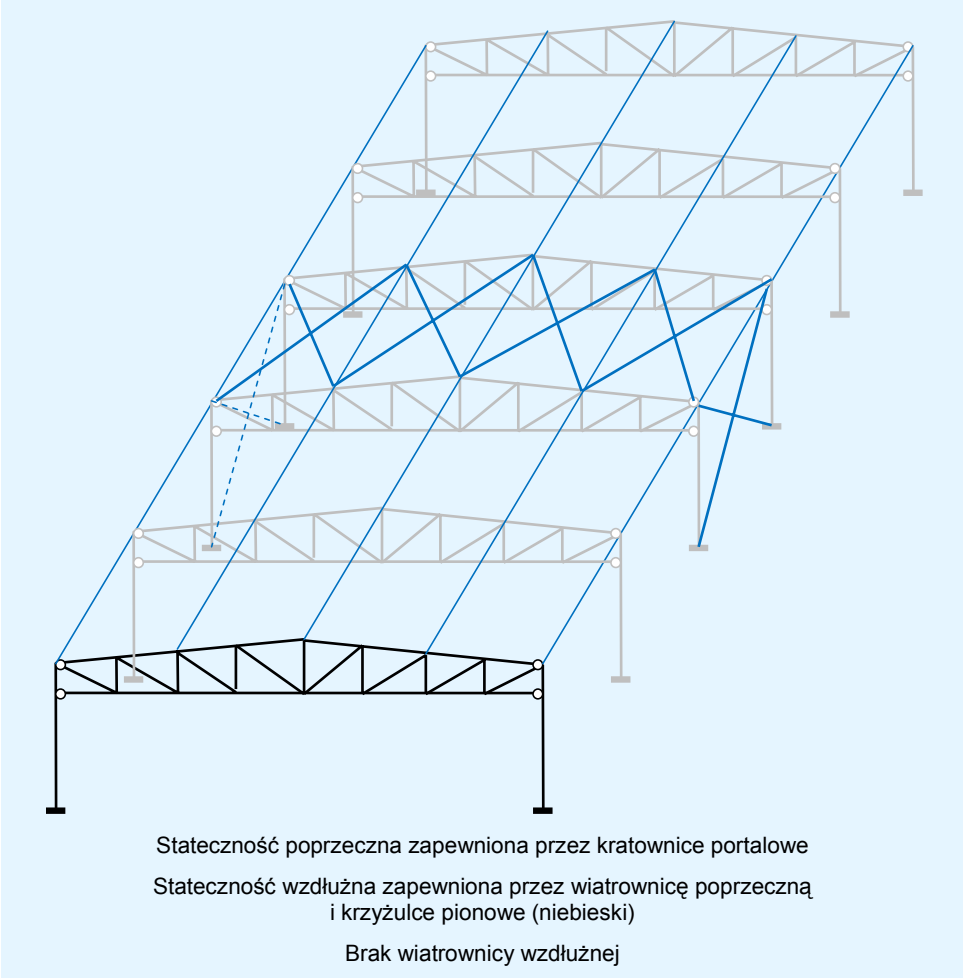
Kratownice znajdują szerokie zastosowanie w typowych, jednokondygnacyjnych budynkach przemysłowych, pełniąc dwie główne funkcje:

- Przenoszenie obciążeń dachu:
  - obciążeń grawitacyjnych (ciężar własny, pokrycie dachowe oraz urządzenia znajdujące się na dachu lub podwieszone do konstrukcji, obciążenie śniegiem),
  - oddziaływań związanych z wiatrem (w tym unoszenie przez wiatr związane z podciśnieniem).
- Zapewnienie stateczności poziomej:
  - wiatrownice na poziomie dachu lub na poziomach pośrednich (jeśli są wymagane),
  - stężenie pionowe w ścianach bocznych i/lub szczytowych.

Dwa rodzaje ogólnego układu konstrukcji typowego budynku jednokondygnacyjnego przedstawiono na rysunku 1.2 oraz rysunku 1.3.

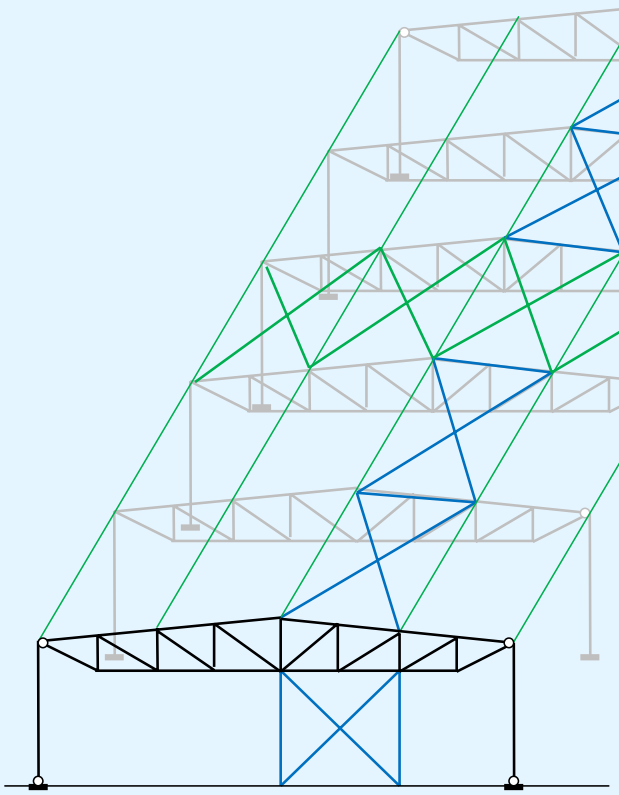
W pierwszym przypadku (rysunek 1.2) stateczność poprzeczna konstrukcji jest zapewniona przez szereg kratownic portalowych: połączenia pomiędzy kratownicą i słupami zapewniają nośność przy zginaniu (moment całkowity). Konstrukcja portalowa poddawana jest obciążeniom pochodzącym od płatwi i szyn bocznych.

W celu zapewnienia stateczności wzdłużnej konstrukcji stosuje się poprzeczną wiatrownicę dachową wraz ze stężeniem ścian bocznych. W tym układzie siły wywołane wzdłużnym obciążeniem wiatrem są przenoszone ze ścian szczytowych na ściany boczne, a następnie na fundamenty.



Rysunek 1.2 Układ ramy portalowej

W drugim przypadku, jak pokazano na rysunku 1.3, każda kratownica pionowa i dwa słupy na których jest ona rozpięta stanowią konstrukcję z belek swobodnie podpartych: połączenie pomiędzy kratownicą i słupem nie kompensuje działania całkowitego momentu zginającego, a obie podstawy słupów są połączone przegubowo. Na szczytowym poziomie konstrukcji prostej wymagane jest zastosowanie utwierdzenia poprzecznego. Jest ono zapewnione przez zastosowanie wiatrownicy wzdłużnej, która siły poprzeczne wywołane działaniem wiatru na ściany boczne przenosi na stężone ściany szczytowe.



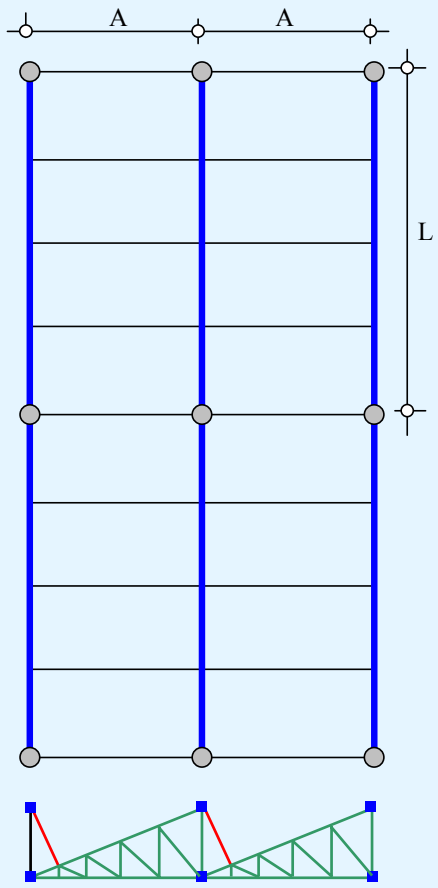
Kratownice pionowe są swobodnie podparte na słupach

Stateczność poprzeczna zapewniona przez wiatrownicę wzdłużną i stężenia pionowe ścian szczytowych (niebieski)

Stateczność wzdłużna zapewniona przez wiatrownicę poprzeczną i krzyżulce pionowe (zielony)

Rysunek 1.3 Układ belki i słupa

Kolejny układ przedstawiono na rysunku 1.4. Konstrukcja dachu składa się z kratownic głównych rozpiętych od słupa do słupa oraz kratownic drugorzędnych rozpiętych między kratownicami głównymi.



Na przedstawionym rzucie poziomym kratownice główne zaznaczono kolorem niebieskim: ich rozpiętość L stanowi dłuższy bok siatki słupów.

Rozpiętość kratownic drugorzędnych A jest mniejsza (odległość pomiędzy kratownicami głównymi).

Ten układ jest obecnie wykorzystywany w konstrukcjach „dachu pilastego”, jak zilustrowano na przekroju pionowym:

- główne belki stanowią kratownice z równoległymi pasami,
- belki drugorzędne (zielony) są trójkątne.

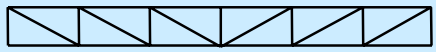
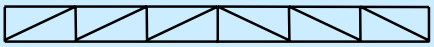
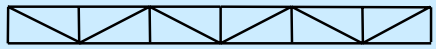
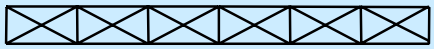
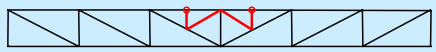
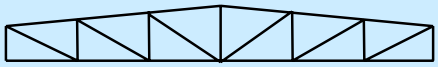
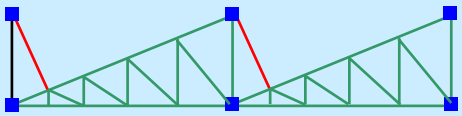
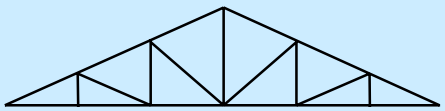
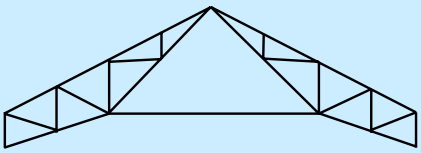
Kolorem czerwonym oznaczono elementy podpierające okna skierowane na północ.

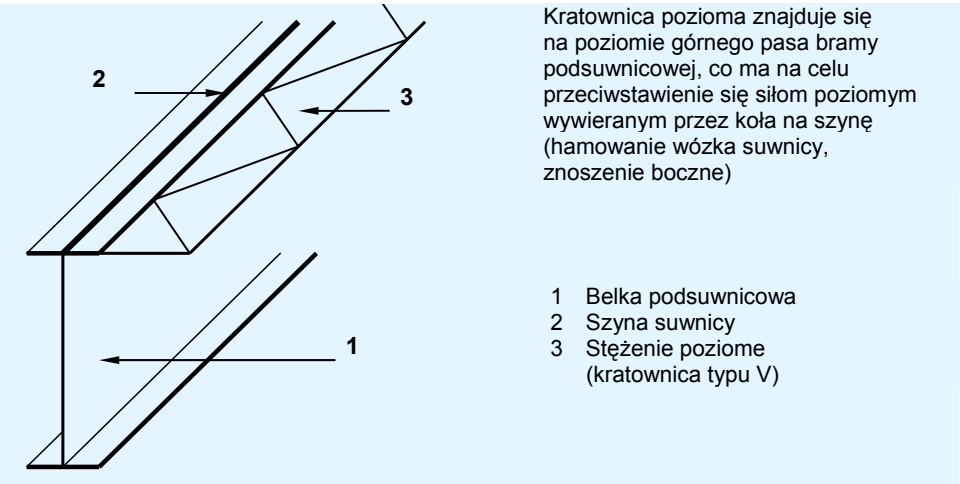
Rysunek 1.4 Ogólny układ 3

1.3 Różne kształty kratownic

Kratownice dostępne są w szerokim zakresie kształtów. Przykłady powszechnie stosowanych kształtów przedstawiono w tabeli 1.1.

Tabela 1.1 Główne typy kratownic

	Wszystkie spośród wyszczególnionych rodzajów kratownic mogą być stosowane zarówno w przypadku konstrukcji kratownic portalowych (patrz rysunek 1.2), jak i w konstrukcjach kratownic prostych (patrz rysunek 1.3).	Duże rozpiętości: od 20 do 100 m	**Kratownica Pratta:** W przypadku kratownicy Pratta ukośne elementy konstrukcyjne są poddawane rozciąganiu ze względu na obciążenia grawitacyjne. Ten rodzaj kratownicy stosowany jest, gdy obciążenia grawitacyjne są dominujące.
			W przypadku przedstawionej kratownicy ukośne elementy konstrukcyjne są poddawane rozciąganiu ze względu na obciążenia związane z unoszeniem. Ten rodzaj kratownicy stosowany jest, gdy obciążenia związane z unoszeniem są dominujące, jak w przypadku konstrukcji otwartych.
			**Kratownica Warrena:** W przypadku tego rodzaju kratownicy ukośne elementy konstrukcyjne są poddawane alternatywnie rozciąganiu oraz ściskaniu. Ten rodzaj kratownicy wykorzystywany jest również w charakterze kratownicy poziomej bram/belek podsuwnicowych (patrz rysunek 1.5).
		Istnieją dwa rodzaje kratownic typu X: • jeżeli ukośne elementy konstrukcyjne są projektowane na ściskanie, kratownica typu X stanowi złożenie dwóch kratownic Warrena; • jeżeli nośność ukośnych elementów konstrukcyjnych poddanych ściskaniu jest pomijana, zachowanie jest takie samo jak w przypadku kratownicy Pratta. Kratownice o takim kształcie są częściej stosowane w funkcji wiatrownic, gdzie ukośne elementy konstrukcyjne są bardzo długie.	
		Możliwe jest dodanie elementów drugorzędnych w celu: • stworzenia pośrednich punktów przyłożenia obciążenia, • ograniczenia długości wyboczeniowej elementów poddanych ściskaniu (bez wpływania na całkowite zachowanie konstrukcji).	
		W przypadku wszystkich zilustrowanych powyżej form możliwe jest zastosowanie pojedynczego lub podwójnego nachylenia względem górnego pasa kratownicy podpierającej dach. Niniejszy przykład przedstawia kratownicę dwuspadową.	
	Swobodnie podparte, mniejsze rozpiętości od 10 do 15 m	Pas górny przedstawionych kratownic trójkątnych o pojedynczym nachyleniu, część „dachu pilastego” Okna skierowane na północ	
		**Kratownica typu fink:** Ten rodzaj kratownicy jest częściej stosowany w konstrukcjach dachowych domów.	
			



Rysunek 1.5 Stężenie poziome belki podsuwnicowej

Na rysunku 1.6 oraz rysunku 1.7 przedstawiono kilka przykładów kratownic opisanych w tabeli 1.1.

Rysunek 1.6 Kratownica typu N — rozpiętość 100 m

Rysunek 1.7 Kratownica typu N (wraz z płatwiami kratownicowymi typu N)

1.4 Wybrane aspekty projektowania kratownic konstrukcji dachowych

1.4.1 Kratownica czy belka dwuteowa

Przy tej samej wadze elementów stalowych kratownica zapewnia lepsze własności w zakresie nośności i sztywność niż belka dwuteowa. Różnica ta pogłębia się w przypadku dużych rozpiętości i/lub dużych obciążeń.

Zalety zastosowania kratownicy są w pełni wykorzystane, gdy wysokość kratownicy nie jest ograniczona innymi czynnikami niż sama sprawność konstrukcyjna (np. ograniczenie całkowitej wysokości budynku).

Jednak produkcja kratownicy jest na ogół bardziej czasochłonna niż belki dwuteowej, nawet przy uwzględnieniu udoskonalonych urządzeń produkcyjnych pozwalających na optymalizację czasu wytwarzania.

Równowaga pomiędzy minimalną wagą a minimalnym kosztem zależy od wielu czynników: wyposażenia oddziału produkcyjnego, lokalnych kosztów produkcji, jednostkowej ceny stali itd. Kratownice są zazwyczaj rozwiązaniem uzasadnionym ekonomicznie w przypadku rozpiętości powyżej 20 lub 25 m.

Zaletą stosowania kratownic w konstrukcjach dachowych jest możliwość przeprowadzenia przewodów oraz rur stanowiących niezbędną część instalacji budynku przez elementy usztywniające kratownicy.

1.4.2 Informacje ogólne dotyczące geometrii

Aby zapewnić odpowiednie zachowanie się konstrukcji, stosunek rozpiętości do wysokości kratownicy powinien zawierać się w przedziale od 10 do 15.

Projekt architektoniczny budynku określa jego geometrię zewnętrzną oraz decyduje o spadku/spadkach zastosowanych w przypadku górnego pasa kratownicy.

W zależności od przeznaczenia przestrzeni wewnętrznej można zastosować poziomy pas dolny (np. gdy do pasa mają być podwieszone przenośniki) albo nachylony pas wewnętrzny, dzięki czemu uwolniona zostaje maksymalna dostępna przestrzeń (patrz ostatni przykład w tabeli 1.1).

W celu zapewnienia efektywnego rozmieszczenia elementów kratownicy pomiędzy pasami zaleca się przyjęcie następujących założeń:

- nachylenie elementów ukośnych w stosunku do pasów powinno zawierać się w przedziale od 35° do 55°;
- obciążenia skupione powinny być przyłożone wyłącznie w węzłach;
- zastosowana orientacja elementów ukośnych powinna zapewniać, że najdłuższe elementy są poddawane rozciąganiu (elementy krótsze są poddawane ściskaniu).

1.4.3 Przekrój elementów konstrukcyjnych

Istnieje wiele rozwiązań. Główne kryteria są następujące:

- kształtowniki powinny być symetryczne pod względem wyginania z płaszczyzny pionowej kratownicy,
- w przypadku elementów poddawanych ściskaniu nośność przy wyboczeniu w płaszczyźnie pionowej kratownicy powinna być podobna do nośności przy wyboczeniu z płaszczyzny.

Bardzo popularnym rozwiązaniem, zwłaszcza w przypadku budynków przemysłowych, jest zastosowanie elementów złożonych z dwóch kątowników połączonych przy użyciu śrub z pionowymi blachami węzłowymi i połączonych pośrednio przewiązkami, zarówno w przypadku pasów, jak i elementów wewnętrznych. Jest to rozwiązanie bardzo proste, a zarazem skuteczne.

W przypadku elementów poddawanych działaniu dużych sił, dobrym rozwiązaniem jest zastosowanie:

- pasów wykonanych z kształtowników IPE, HEA lub HEB bądź elementu złożonego z dwóch ceowników (UPE);
- krzyżulców złożonych z dwóch kątowników połączonych przewiązkami.

Środnik kształtownika IPE/HEA/HEB pasa jest zorientowany pionowo bądź poziomo. Ponieważ łatwiej jest zwiększyć nośność pasów na wyboczenie w płaszczyźnie (przez dodanie ukośnych elementów drugorzędnych) niż na wyboczenie z płaszczyzny, skuteczniejsze jest poziome zorientowane środnika w przypadku pasów poddawanych ściskaniu. Z kolei łatwiej jest połączyć płatwie z górnym pasem, jeżeli środnik zorientowany jest pionowo.

Dobrym rozwiązaniem może być zastosowanie pionowego środnika w przypadku pasa górnego, a poziomego w przypadku pasa dolnego.

Inna grupa rozwiązań zakłada zastosowanie w roli pasów i/lub elementów wewnętrznych kształtowników zamkniętych.

1.4.4 Typy połączeń

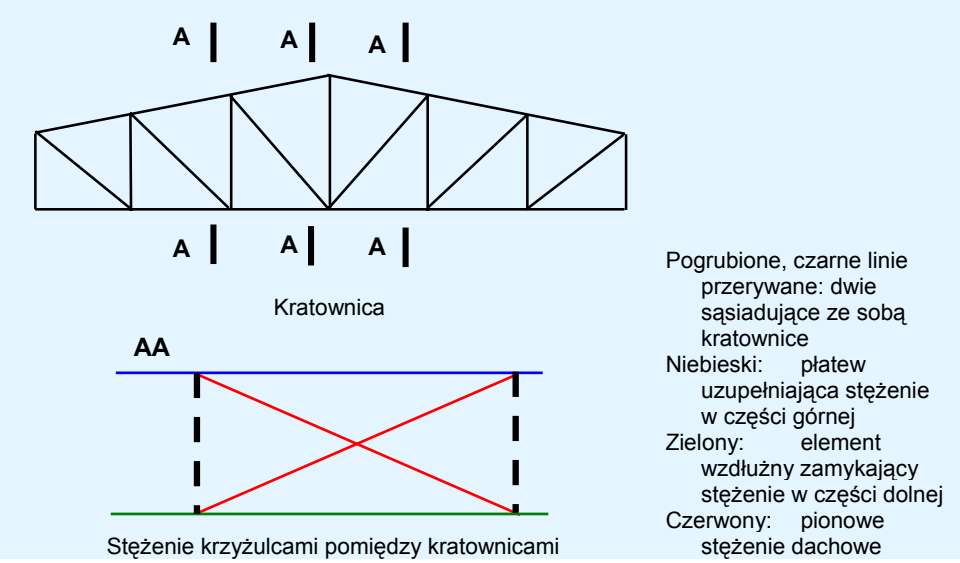
W przypadku każdego typu kształtowników można zaprojektować połączenia śrubowe lub połączenia spawane. Zazwyczaj na miejscu budowy częściej stosuje się połączenia śrubowe. W przypadku połączeń śrubowanych, w których śruby obciążone są w kierunku prostopadłym do ich trzonu, konieczne jest przeprowadzenie analizy konsekwencji poluzowania połączeń. W celu ograniczenia tych konsekwencji (zazwyczaj objawiających się zwiększeniem ugięć) można zastosować rozwiązania obejmujące np. użycie śrub sprężanych lub zmniejszenie rozmiaru otworu.

1.4.5 Stateczność poprzeczna

Konieczne jest projektowanie pasów poddawanych ściskaniu względem wyboczenia z płaszczyzny. W przypadku kratownic swobodnie podpartych górny pas poddawany jest ściskaniu ze względu na obciążenie grawitacyjne, natomiast dolny pas poddawany jest ściskaniu ze względu na obciążenia związane z unoszeniem. W przypadku kratownic portalowych każdy pas poddawany jest częściowo ściskaniu i częściowo rozciąganiu.

Utwierdzenie boczne pasa górnego jest zazwyczaj zapewnione przez płatwie oraz poprzeczną wiatrownicę dachową.

W celu utwierdzenia dolnego pasa może być wymagane zastosowanie dodatkowego stężenia, jak przedstawiono na rysunku 1.8. Takie stężenie pozwala ograniczyć długość wyboczeniową dolnego pasa przy wyboczeniu z płaszczyzny kratownicy do odległości pomiędzy punktami stężonymi bocznie: służą one do przeniesienia sił utwierdzenia na poziom pasa górnego, na którym znajduje się główna część stężenia dachowego. Ten typ stężenia stosowany jest również w przypadku, kiedy do dolnego pasa dźwigara przyłożone jest obciążenie poziome (np. siły wywołane hamowaniem przenośnika podwieszanego).



Rysunek 1.8 Stężenie boczne

Płatwie dachowe służą często jako część stężenia pasa górnego. Wprowadzenie elementów wzdłużnych w pasie dolnym pozwala na zapewnienie stateczności kratownic przez to samo stężenie pionowe.

Możliwe jest zastosowanie poziomej wiatrownicy na wysokości pasów dolnych przy użyciu elementów wzdłużnych, które zapewniają stateczność wszystkich kratownic.

1.5 Projektowanie wiatrownic

1.5.1 Wiatrownica poprzeczna

Zazwyczaj wiatrownica poprzeczna ma następującą konstrukcję (patrz rysunek 1.2):

- Wiatrownica ma formę kratownicy typu X umieszczonej równolegle do płaszczyzny dachu.
- Pasy wiatrownicy są górnymi pasami dwóch przylegających do siebie kratownic pionowych. Oznacza to, że siły osiowe występujące w tych elementach wynikające z obciążenia kratownicy pionowej oraz obciążenia wiatrownicy muszą być zsumowane (w celu przyjęcia właściwej kombinacji oddziaływań).
- Słupkami wiatrownicy są zwykle płatwie dachowe. Oznacza to, że płatwie te obok zginania powodowanego obciążeniem dachu poddawane są także ściskaniu.
- W przypadku wiatrownicy o dużej rozpiętości możliwe jest także stosowanie osobnych słupków (zwykle o przekroju rurowym), które nie pełnią funkcji płatwi.
- Ukośne elementy konstrukcyjne są łączone w płaszczyźnie słupków. Jeżeli słupki te są płatwiami, ukośne elementy konstrukcyjne są łączone u dołu tych płatwi. W przypadku dużych kratownic typu X uwzględniane jest jedynie rozciąganie krzyżulców i możliwe jest zastosowanie pojedynczych kątowników lub kabli.

Wygodnie jest rozmieścić wiatrownice poprzeczne na obu końcach budynku, ale ważne jest wówczas właściwe uwzględnienie rozszerzalności cieplnej, która może być przyczyną powstawania znacznych sił, gdy elementy wzdłużne są mocowane pomiędzy dwoma układami stężeń, w szczególności w przypadku budynków dłuższych niż 60 m.

Aby umożliwić kompensację rozszerzania się elementów wzdłużnych, wiatrownica poprzeczna może zostać umieszczona pośrodku budynku, ale wymagane jest wtedy zapewnienie przenoszenia obciążeń wynikających z oddziaływania wiatru ze ścian szczytowych na środkowe stężenie wiatrowe.

Wiatrownice poprzeczne są czasem umieszczane w drugich i przedostatnich przęsłach dachu, ponieważ w sytuacji, gdy płatwie używane są w roli słupków wiatrownicy, przęsła te w mniejszym stopniu podlegają uginaniu pod wpływem obciążenia dachu.

Poddawane ściskaniu płatwie pełniące funkcję słupków wiatrownicy muszą czasem być wzmacniane:

- w celu wzmocnienia płatwi IPE: zastosować spawane kątowniki lub ceowniki (UPE);
- w celu wzmocnienia płatwi formowanych na zimno: zwiększyć grubość odpowiedniego przęsła lub, jeśli nie jest to wystarczające, zwiększyć dwukrotnie przekrój płatwi (z łącznikiem w przypadku płatwi zetowych, połączeniem „plecami” w przypadku płatwi typu sigma).

1.5.2 Wiatrownica wzdłużna

Stosowanie wiatrownicy wzdłużnej (pomiędzy stężonymi końcami ściany szczytowej) jest konieczne w budynkach, w których kratownice dachowe nie mają konstrukcji portalowej.

Ogólny układ jest podobny do tego opisanego w przypadku wiatrownic poprzecznych:

- kratownica typu X,
- pasy w małych budynkach są dwiema liniami płatwi lub elementami dodatkowymi (zwykle o przekroju rurowym),
- słupki są górnymi pasami kolejnych statecznych kratownic dachowych.

2 WPROWADZENIE DO PROJEKTU WYKONAWCZEGO

W kolejnych rozdziałach przedstawiono projekt wykonawczy kratownicy, odwołując się do „przykładu praktycznego”. Niniejszy rozdział zawiera podsumowanie ogólnych wymagań oraz informacje wstępne dotyczące przykładu. Kolejne rozdziały obejmują następujące tematy:

Rozdział 3: Analiza globalna,

Rozdział 4: Weryfikacja elementów konstrukcyjnych,

Rozdział 5: Weryfikacja połączeń.

Szczegółowe obliczenia do weryfikacji połączenia blachy węzłowej oraz styku pasa podano w Załącznikach A oraz B.

2.1 Wymagania ogólne

W projekcie uwzględnione zostaną następujące parametry:

- estetyka,
- geometria (długość przęsła, wysokość, podniesienie itp.),
- oddziaływania.

Należy rozpatrzyć następujące wymagania:

- wymagania prawne,
- wymagania kontraktowe w odniesieniu do norm,
- szczegółowe wymagania kontraktowe.

Kompletny projekt składa się z zestawu dokumentów wykonawczych dotyczących danej konstrukcji.

Charakter wymagań prawnych jest różny w różnych krajach. Ich celem jest zazwyczaj ochrona ludzi. Odnoszą się w szczególności do zachowania budynku pod wpływem zjawisk sejsmicznych oraz w warunkach pożaru (patrz przewodnik *Jednokondygnacyjne konstrukcje stalowe. Inżynieria pożarowa*[1]).

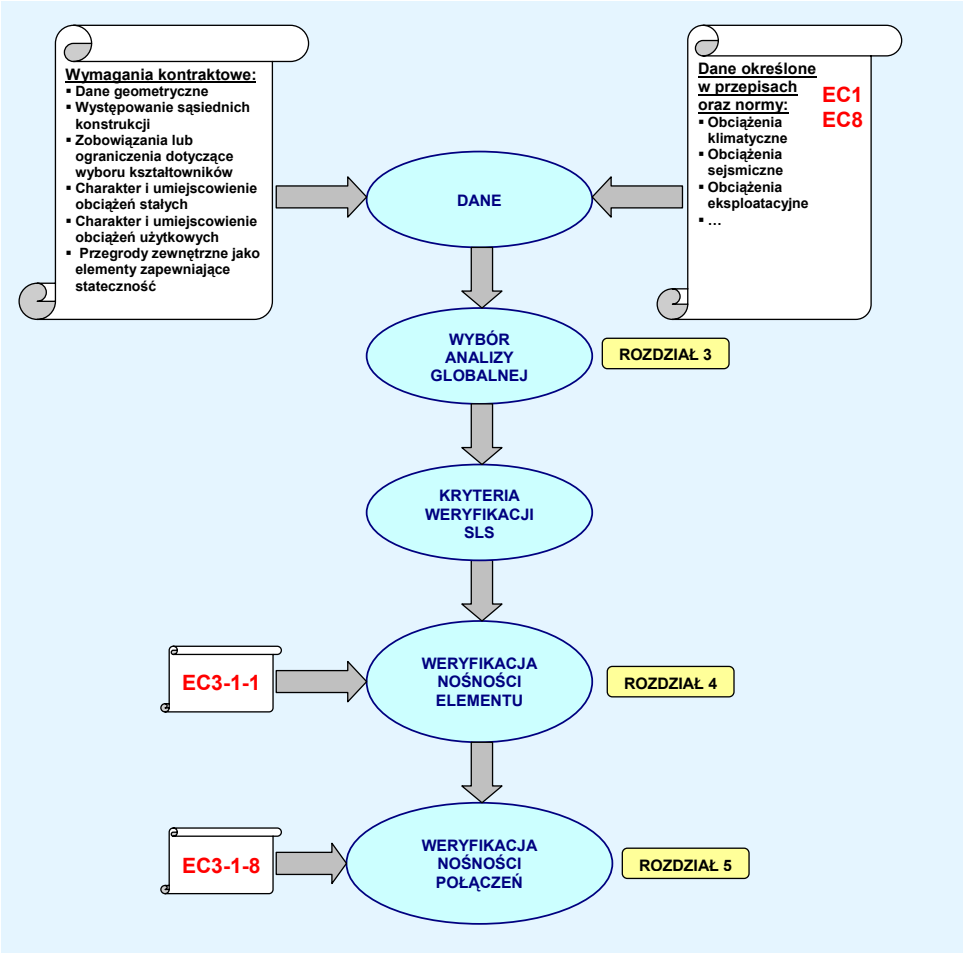
Zawarte w normach wymagania dotyczą określania uwzględnianych oddziaływań, używanych metod analizy oraz kryteriów weryfikacji w odniesieniu do nośności oraz sztywności.

Nie ma ograniczenia co do liczby wymagań szczegółowych, jakie mogą być narzucone względem poszczególnych budynków, ale dotyczą one głównie geometrii konstrukcji i mają wpływ na wyznaczanie oddziaływań, w szczególności tych klimatycznych.

Zobowiązania oraz układy wzajemnie na siebie oddziałujące związane z projektem wykonawczym mogą obejmować:

- zakaz stosowania rur jako dolnych pasów kratownic, do których klient planuje podwiesić urządzenia przemysłowe;
- zobowiązanie do stosowania rur jako pasów kratownicy podyktowane względami estetycznymi;
- wykorzystanie dachu do zapewnienia stateczności niektórych elementów konstrukcyjnych.

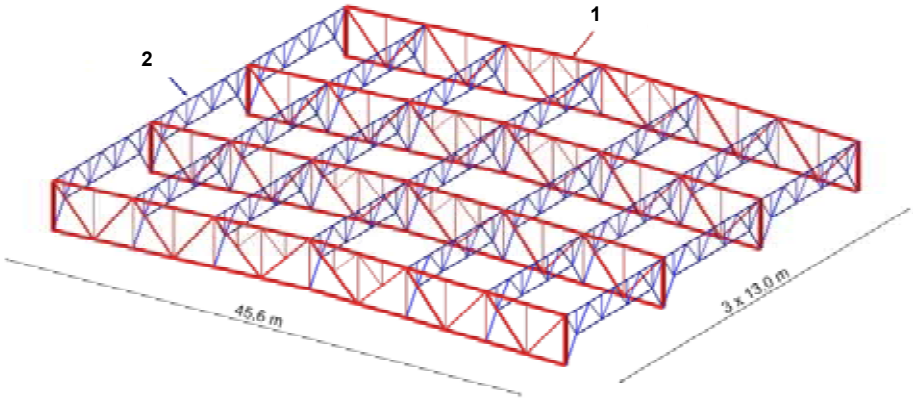
Na poniższym schemacie blokowym przedstawiono główne etapy projektowania elementów konstrukcyjnych.



Rysunek 2.1 Schemat blokowy projektowania elementu konstrukcyjnego

2.2 Omówienie przykładu praktycznego

Przykład praktyczny rozpatrywany w kolejnych rozdziałach dotyczy kratownicy o dużej rozpiętości podtrzymującej dach budynku przemysłowego za pomocą płatwi kratownicowych. Przykład ten opracowano, bazując bezpośrednio na konstrukcji rzeczywistej i uproszczono go w celu uzyskania lepszego poglądu.



1 Kratownica główna
2 Płatew kratownicowa

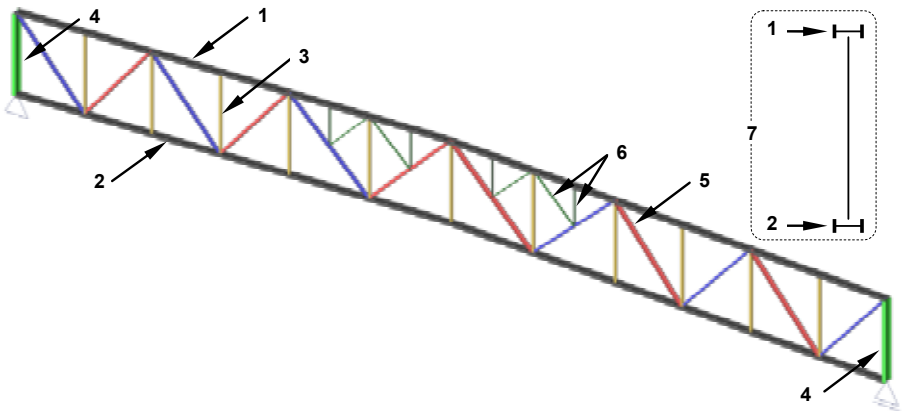
Uwaga: stężenie poziome nie jest ukazane na rysunku, aczkolwiek zaprojektowane jest w sposób gwarantujący efektywne utwierdzenie boczne głównych kratownic za pomocą płatwi.

Rysunek 2.2 Przykład praktyczny — ogólny układ dachu

Dach obiektu jest symetrycznym dachem dwuspadowym, a jego nachylenie po każdej stronie wynosi 3%.

Rozpiętość każdej kratownicy głównej wynosi 45,60 m. Wszystkie kratownice są swobodnie podparte u góry słupów (nie ma przenoszenia momentu pomiędzy kratownicą a słupem).

Ogólna stateczność poprzeczna budynku zapewniona jest przez unieruchomienie słupów na poziomie podłoża. Stateczność wzdłużną gwarantują układ stężeń dachowych i stężone sekcje ścian.



1 Górny pas IPE 330 ze środnikiem poziomym
2 Dolny pas IPE 330 ze środnikiem poziomym
3 Słupek — kątownik pojedynczy L 100 x 100 x 10
4 Górna część słupa (IPE 450)
5 Krzyżulce — kątownik podwójny
6 Elementy kratownicy drugorzędnej
7 Szkic przekroju poprzecznego

Rysunek 2.3 Przykład praktyczny — wygląd kratownicy

Kratownica została przedstawiona na rysunku 2.3. Pasy kratownicy są równoległe i wykonane z kształtowników IPE 330 z poziomymi środnikami. Krzyżulce wykonane są z kątowników bliźniaczych: dwa kątowniki $120 \times 120 \times 12$ krzyżulców poddawane rozciąganiu na skutek obciążenia grawitacyjnego (zaznaczone na rysunku powyżej na niebiesko), dwa kątowniki $150 \times 150 \times 15$ krzyżulców poddawane rozciąganiu na skutek obciążenia grawitacyjnego (zaznaczone na rysunku powyżej na czerwono). Słupki wykonane są z kątowników pojedynczych $100 \times 100 \times 10$.

Należy zauważyć, że w panelach środkowych zastosowano krzyżulce drugorzędne oraz słupki. Zazwyczaj będą one montowane w celu osiągnięcia któregoś z następujących celów:

- umożliwienie przyłożenia obciążenia punktowego pomiędzy węzłami głównymi bez konsekwencji w postaci dalszego ugięcia pasa górnego,
- zmniejszenie wyboczenia centralnych elementów konstrukcyjnych górnego pasa w płaszczyźnie kratownicy.

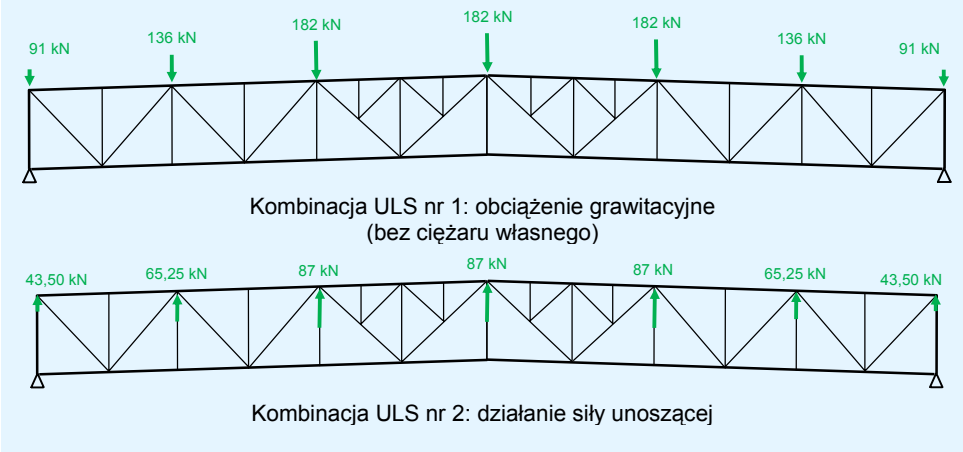
W tym przykładzie kratownice drugorzędne zmniejszają długość wyboczeniową.

Pary kątowników tworzących przekrój krzyżulca są połączona ze sobą przewiązkami, co zapewnia oddziaływanie łączne w odniesieniu do wyboczenia pomiędzy węzłami kratownicy. Aby zastosowane przewiązki spełniały swoją rolę, muszą zapobiegać miejscowemu ześlizgiwaniu się jednego kątownika względem drugiego. Więcej informacji można znaleźć w punkcie 4.1.3.

Każdy pas jest wytwarzany w dwóch częściach (patrz rysunek 3.6). Krzyżulce oraz słupki są przykręcane za pomocą śrub na obu końcach do poziomych blach węzłowych, które to z kolei spawane są do poziomych środników pasów IPE 330 dźwigarów. Szczegółowe rysunki tego typu połączenia można znaleźć w Załączniku A oraz punktach 5.2 i 5.3.

Słupy podpierające kratownicę są kształtownikami typu IPE 450 ze środnikiem prostopadłym do płaszczyzny belki kratownicy.

W celu zilustrowania wszystkich poruszanych tu kwestii belka kratownicy z przykładu praktycznego została zaprojektowana na dwie sytuacje: przypadek obciążenia grawitacyjnego i przypadek obciążenia powodowanego siłą unoszenia wiatru. Obciążenia te odpowiadają kombinacji oddziaływań wyznaczonych zgodnie z normą EN 1990 w celu weryfikacji odniesionej do stanu granicznego nośności (ULS).



Rysunek 2.4 Przykład praktyczny — kombinacje obciążeń

3 ANALIZA GLOBALNA

3.1 Ogólne

W punkcie 1.1 opisano ogólne zachowanie kratownicy. W rzeczywistości zachowanie konstrukcji różni się od tego uzyskanego na drodze rozważań teoretycznych i jego analiza wymaga uwzględnienia odchyłek. Oprócz działania sił osiowych odchyłki obejmują w szczególności zginanie elementów konstrukcyjnych. Te momenty zginające znane pod nazwą „momentów drugorzędnych" mogą generować znaczne dodatkowe naprężenia w elementach tworzących kratownice.

Odchyłki uwzględniane w projektowaniu przyjmują różne formy:

- Zazwyczaj nie wszystkie elementy tworzące konstrukcje są połączone przegubowo w swoim pierwotnym węźle i końcowym. W szczególności pasy kratownic są zwykle wytwarzane tylko w jednej długości, zaś płatwie kratownicowe w kilku długościach: ciągłe pasy są wówczas łączone w swoich węzłach pierwotnych i końcowych na sztywno. Obracanie się węzłów powodowane ogólną deformacją belki kratownicy wywołuje z kolei moment zginający w połączonych na sztywno elementach — im sztywniejsze są elementy konstrukcyjne pasa, tym większe są występujące w nich momenty (patrz punkt 3.4).
- Elementy konstrukcyjne nie zawsze są dokładnie wyrównane w swoich pierwotnych i końcowych węzłach. Momenty zginające powodowane niewspółosiowością zwiększają się proporcjonalnie do wielkości tej niewspółosiowości i do sztywności elementów. Zjawisko to zilustrowano w punkcie 3.6.
- Obciążenia nie zawsze są przykładane bezpośrednio do węzłów i gdy nie zastosowano drugorzędnych elementów konstrukcyjnych triangulujących punkt przyłożenia obciążeń pomiędzy węzłami, powstają momenty zginające.

3.2 Modelowanie

Należy rozważyć klika kwestii odnoszących się do modelowania kratownic.

Zawsze wygodniej jest pracować na modelach ograniczonych. Na przykład projektując budynki standardowe, często pracuje się na modelach dwuwymiarowych (rama portalowa, wiatrownica, stężenie pionowe) zamiast na niepowtarzalnych oraz globalnych modelach trójwymiarowych i podejście to jest zwykle uzasadnione. Kratownica, gdy jest połączona ze słupami przegubowo, może być modelowana nawet bez podpierających ją słupów.

Niemniej należy zauważyć, że:

- Jeżeli stosowane są modele oddzielne, w celu zweryfikowania nośności niektórych elementów konieczne może okazać się połączenie wyników z kliku analiz. Przykład: górny pas kratownicy pełni także rolę pasa wiatrownicy.
- W przypadku zastosowania globalnego modelu trójwymiarowego możliwe jest zaobserwowanie zginania „ubocznego", które często daje jedynie pozornie dokładne odwzorowanie procesów zachowywania się konstrukcji. Dlatego z reguły preferowane są modele dwuwymiarowe.

W przykładzie praktycznym, w którym kratownica podparta jest swobodnie na słupach, wybrany model projektowy przedstawia jedynie tę kratownicę.

Po określeniu zakresu modelu i zaadaptowaniu go zgodnie z planowanym zastosowaniem otrzymanych wyników, ważne jest uwzględnienie rodzaju połączeń wewnętrznych. Obecnie w modelowaniu elementów konstrukcyjnych wybór dokonywany jest pomiędzy „elementem połączonym w węźle przegubowo” a „elementem połączonym z węzłem na sztywno”. Możliwość modelowania połączeń półsztywnych wymieniona w normie EN 1993 jest rzadko stosowana w odniesieniu do kratownic.

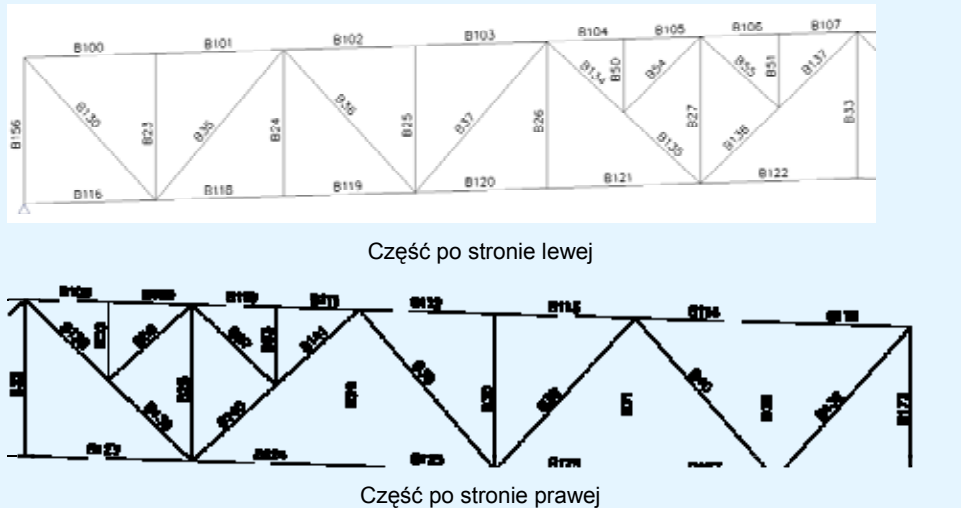
W przypadku kratownic model jest zwykle reprezentowany jako:

- **pasy ciągłe** (i tym samym elementy konstrukcyjne pasów połączone na sztywno na obu końcach) lub
- **elementy kratownicy** (krzyżulce i elementy pionowe) łączone przegubowo z pasami.

3.3 Modelowanie przykładu praktycznego

W rozważanym przykładzie praktycznym krzyżulce kratownicy są połączone z pasami przegubowo, aczkolwiek połączenia wykonywane są przy pomocy śrub o wysokiej wytrzymałości, odpowiednich do sprężania z kontrolą dokręcania. Zapewnia to połączenie sztywne bez luzu pomiędzy krzyżulcem a połączeniowymi blachami węzłowymi. Połączenie może być uważane za przegubowe, ponieważ pionowe blachy węzłowe są spawane w środkowej części poziomego, niezbyt sztywnego środnika IPE 330.

Modelowanie przedstawiono na rysunku 3.1. Poszczególne elementy konstrukcyjne zostały ponumerowane.

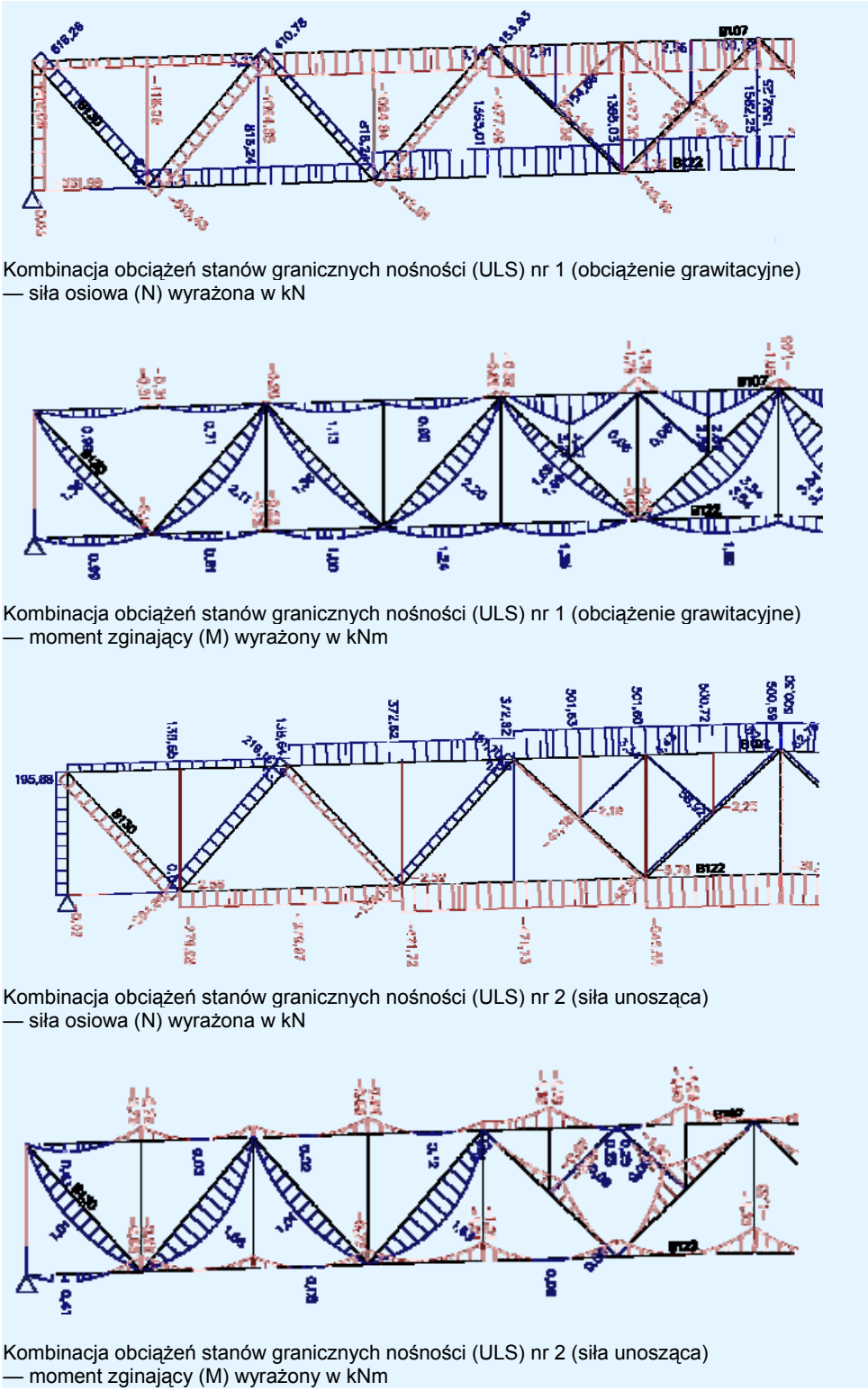


Rysunek 3.1 Model komputerowy

Ważne jest, aby model odzwierciedlał niewspółśrodkowości występujące w konstrukcji rzeczywistej. Mogą mieć one znaczny wpływ, jak przedstawiono w punkcie 3.6.1.

Ważne jest także, by modelowanie obciążeń odzwierciedlało stan faktyczny. W szczególności przykładanie do węzłów kratownicy obciążeń, które w rzeczywistości występują pomiędzy węzłami grozi pominięciem efektu zginania o całkiem znaczących skutkach.

Najważniejsze wyniki analizy dotyczącej lewej części kratownicy zaprezentowano na rysunku 3.2.



Rysunek 3.2 Przykład praktyczny — siły osiowe i momenty zginające

Warte odnotowania są kształty wykresów momentów występujących w elemencie konstrukcyjnym:

- w pasach i krzyżulcach ciężar własny generuje moment zginający o kształcie parabolicznym,
- w pasch modelowanie ciągłe (elementy konstrukcyjne połączone na sztywno na obu końcach) prowadzi do pojawienia się momentów na węzłach.

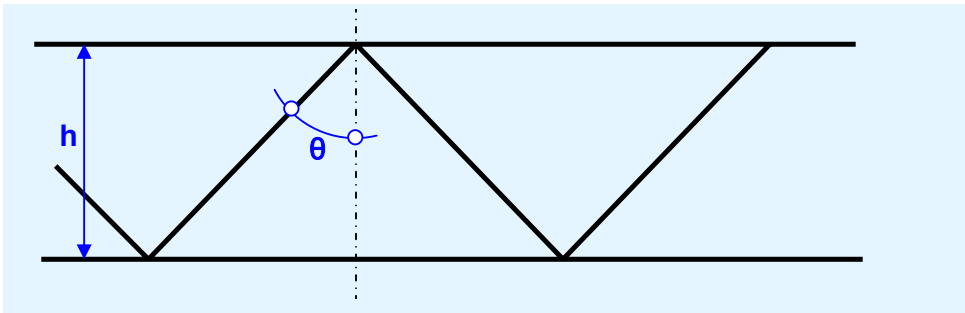
3.4 Uproszczona analiza globalna przykładu praktycznego

Belkę triangulowaną o stałej wysokości można przyrównać do belki dwuteowej. Takie porównanie jest możliwe i zapewnia dobre przybliżenie na przykład w odniesieniu do kratownic z równoległymi pasami.

Globalna siła ścinająca V_{global} oraz globalny moment zginający M_{global} w belce równoważnej zmieniają się w bardzo niewielkim stopniu wzdłuż panelu i mogą być przyrównane do wartości średnich w tym panelu. Zatem obciążenie osiowe można oszacować za pomocą następujących wyrażeń (patrz oznaczenia na rysunku 3.3):

$N_{\text{ch}} = \pm M_{\text{global}}/h$ w pasach,

$N_{\text{d}} = \pm V_{\text{global}}/\cos\theta$ w krzyżulcu.



Rysunek 3.3 Kratownica z równoległymi pasami — oznaczenie

Podobne oszacowanie można przeprowadzić także w przypadku odkształceń belki kratownicy przez obliczenie ich dla tego samego obciążenia w odniesieniu do belki równoważnej. W tym celu klasycznie korzysta się z teorii belki elementarnej, przyjmując moment bezwładności przekroju belki równoważnej wynoszący:

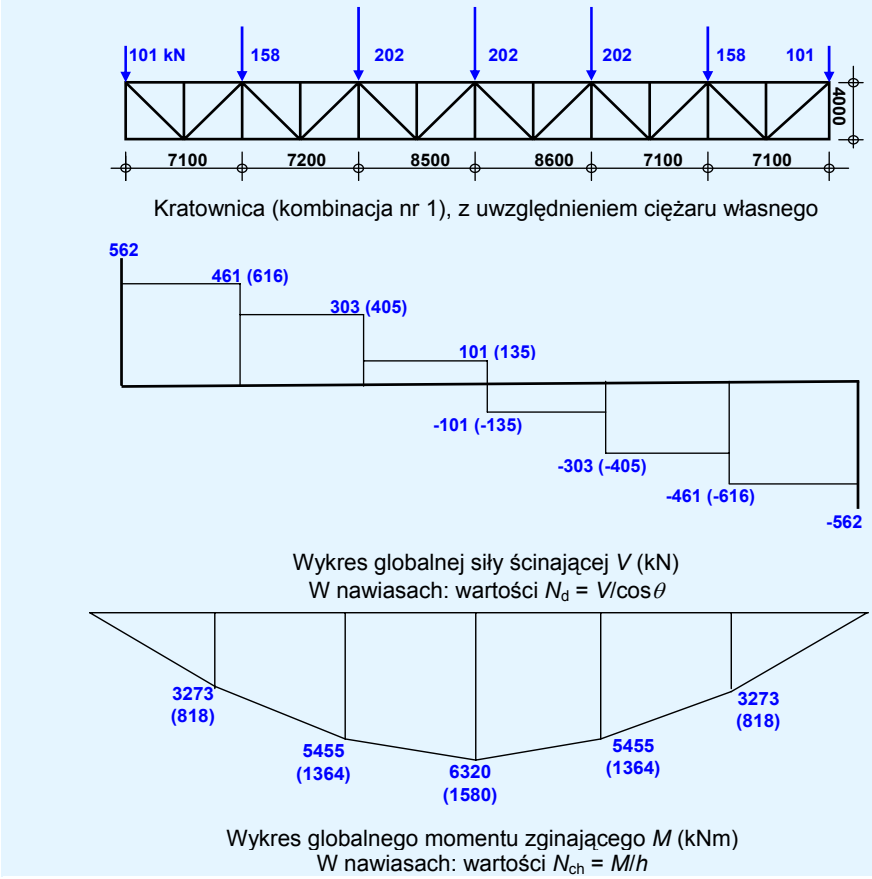
$$I = \sum_{i=1}^{2} A_{\text{ch},i} d_i^2$$

gdzie:

$A_{\text{ch},i}$ jest polem przekroju pasa i,

d_{i} jest odległością od środka masy obu pasów do środka masy pasa i.

Aby uwzględnić nie ujęte we wzorach podstawowych globalne odkształcenia wynikające ze ścinania, stosuje się zredukowany moduł sprężystości. Globalne odkształcenia przy ścinaniu nie mogą być w rzeczywistości pomijane w przypadku kratownic, ponieważ wynikają one z różnic w długościach krzyżulców i słupków. Wartość zredukowanego modułu sprężystości wyraźnie zależy od geometrii kratownicy, przekroju elementów konstrukcyjnych itp. W przypadku belki kratownicy o właściwych proporcjach pasów równoległych zredukowany moduł sprężystości wynosi ok. 160 000 N/mm^2 (zamiast 210 000 N/mm^2).



Rysunek 3.4 Przykład praktyczny — obliczenia przybliżone

Wartości sił osiowych występujących w pasach dźwigara uzyskane metodą uproszczoną, M_{global}/h, pokazano na rysunku 3.4. Wartości te są bardzo bliskie wartościom uzyskanym przy użyciu programu do analizy konstrukcji (patrz rysunek 3.2) w przypadku kształtowników znajdujących się w pobliżu miejsc przyłożenia obciążeń. Niewielka różnica wynika z nachylenia (3%) pasów kratownic wykorzystanych w przykładzie praktycznym, które nie zostało uwzględnione w obliczeniach ręcznych.

Również wartości sił osiowych występujących w krzyżulcach uzyskane metodą uproszczoną, $V_{global}/\cos\theta$, są bardzo zbliżone do wartości otrzymywanych przy użyciu programu komputerowego.

3.5 Siły drugorzędne

3.5.1 Wpływ sztywności pasa dźwigara

Elementy pasów kratownic używanych w konstrukcji są rzadko łączone w węzłach przegubowo. Częściej stosuje się połączenia sztywne, co oznacza, że należy zachować odpowiednie kąty między elementami przyłączonymi do tego samego węzła. W momencie odkształcania się konstrukcji pod wpływem obciążenia wszystkie końce elementów konstrukcyjnych obracają się o ten sam kąt wokół węzła. W tych warunkach obciążenia zginające (momenty zginające oraz siły ścinające) zwane siłami drugorzędnymi są dodawane do obciążeń osiowych występujących w elementach obliczonych przy założeniu, że węzły są przegubowe (siły podstawowe).

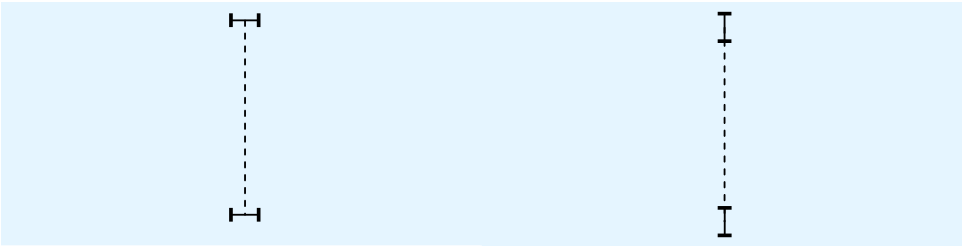
W projektowaniu przyjęło się stosowanie ciągłych elementów pasów dźwigara oraz przegubowych połączeń elementów kratownicy.

W rzeczywistości przekształcanie połączeń przegubowych w węzły sztywne nie powoduje prawie żadnych zmian w siłach osiowych występujących w elementach, ponieważ ścinanie przenoszone przez te elementy ma niewielki wpływ na równanie równowagi sił węzłowych, jak również — patrząc z drugiej strony — zginanie elementu powodowane drugorzędnymi momentami zginającymi przyczynia się jedynie do powstawania niewielkiej odchyłki w odległości pomiędzy końcami rozważanego elementu w porównaniu z różnicą w długości powodowaną oddziaływaniem siły osiowej.

Niemniej istotne jest, by triangulowane konstrukcje były projektowane właściwie — tak aby elementy były odpowiednio rozmieszczone, w sposób gwarantujący wytrzymanie naprężeń zginających, ale by nie były zbyt smukłe, aby uniknąć wyboczenia. Należy zauważyć, że im większa jest sztywność pasów (które zwykle są pasami ciągłymi) w porównaniu do globalnej sztywności belki kratownicy, tym większe są momenty powstające w pasach. Na przykład w przypadku wiatrownicy dachowej sztywność pasów jest relatywnie mała i równie niewielkie pozostają momenty drugorzędne.

W przypadku kratownic masywnych, tj. gdy sztywność giętna poszczególnych pasów nie jest znacznie mniejsza od globalnej sztywności kratownicy, konieczne może być uwzględnienie momentów drugorzędnych. Należy wówczas odpowiednio zaprojektować elementy oraz połączenia.

Zjawisko to można zilustrować w przykładzie praktycznym przez zastosowanie kształtowników IPE 330 jako „stojących” elementów pasów, zamiast elementów ułożonych płasko — jak w projekcie wstępnym (rysunek 3.5). Wówczas pasy, wykorzystując swoją dużą bezwładność, uginają się w płaszczyźnie pionowej elementu kratownicy. Wyniki obliczeń dobrze odzwierciedlają znaczący wzrost momentów drugorzędnych.



Rysunek 3.5 Opcje orientacji pasów

Wywoływany obciążeniem grawitacyjnym (ULS) moment zginający w pobliżu połowy rozpiętości pasa górnego utworzonego ze stojącego kształtownika IPE 300 wynosi 28,5 kNm. W przypadku kształtownika IPE 330 ułożonego płasko moment ten ma wartość 2,7 kNm.

Podobnie moment zginający w pasie dolnym wynosi odpowiednio 23,4 kNm w porównaniu do 1,7 kNm.

Mnożnik momentów zginających w przypadku pasa górnego ma wartość 11, a pasa dolnego — 14. Wartości te są porównywalne ze współczynnikiem bezwładności kształtownika IPE 330 (ok. 15).

3.5.2 Założenie połączeń sztywnych

W innych analizach wpływu sztywności elementu konstrukcyjnego na wartość momentów drugorzędnych kratownica z przykładu została przeliczona przy założeniu, że wszystkie połączenia wewnętrzne są sztywne (krzyżulce oraz elementy pionowe przymocowane w swoich pierwotnych węzłach końcowych). Porównanie wyników zestawiono w tabeli 3.1. W tabeli tej można zauważyć, że momenty na końcach mieszczą się w tym samym zakresie co momenty wynikające z ciężaru własnego krzyżulców.

Tabela 3.1 Wpływ zastosowania połączeń sztywnych zamiast przegubowych

	Środnik poziomy	Środnik pionowy
Moment na końcach krzyżulca poddawanego rozciąganiu (kątowniki podwójne 120 x 12)	1,03	1,17
Moment na końcach krzyżulca poddawanego ściskaniu (kątowniki podwójne 150 × 15)	1,30	2,35
Moment wynikający z ciężaru własnego (dla porównania)	*1,36*	*1,36*
Założenie krzyżulców dwuprzegubowych	Dopuszczalne	Dopuszczalne

Uwaga: momenty zginające podano w kNm.

3.6 Wpływ luzu powstałego w wyniku ugięć

Gdy połączenia pomiędzy elementami tworzącymi belkę kratownicy są połączeniami śrubowymi, w których śruby poddawane są ścinaniu (kategoria A w normie EN 1993-1-8[2]), luz wprowadzany w tych połączeniach może w znaczącym stopniu wpływać na przemieszczenie węzłów.

Aby ułatwić montaż, śruby są w rzeczywistości wkładane w otwory, które są większe od nich. Pod śruby o rozmiarach standardowych wykonywane są zwykle otwory większe o ponad 2 mm od danej śruby (zwykle jest to określane jako 2 mm luz).

Aby połączenie z luzem przenosiło na węzeł obciążenie wymagane przez przymocowany element, śruba musi się stykać z którąś z połączonych części: często nazywane jest to „wybieraniem luzu”. W przypadku połączonych elementów rozciąganych luz ten może być asymilowany jako wydłużenie dodatkowe do wydłużenia sprężystego takiego elementu. Analogicznie w przypadku połączonych elementów ściskanych luz jest asymilowany jako zmniejszenie długości, które sumuje się ze sprężystym skróceniem takiego elementu.

Sumaryczny luz występujący w różnych połączeniach konstrukcji kratownicy może prowadzić do znaczącego zwiększenia przemieszczeń, których konsekwencje mogą być różne — od mniej do bardziej poważnych. W odniesieniu do tych konsekwencji, należy zwrócić uwagę na to, że:

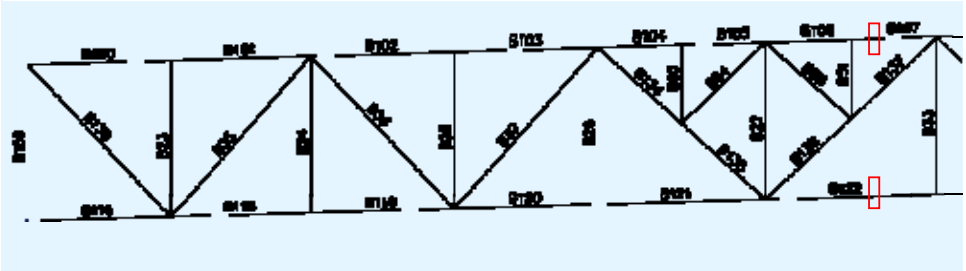
- W większości przypadków najgorsze są konsekwencje wizualne.
- Większe ugięcie może przyczyniać się do zmniejszenia wysokości efektywnej pod pasem dolnym, co może uniemożliwiać lub utrudniać takie wykorzystanie obiektu, jakie było dla niego przewidziane. Przykładowo dodatkowe ugięcie kratownicy podtrzymującej drzwi podwieszone w ścianie szczytowej hangaru lotniczego może uniemożliwiać wjazd i wyjazd samolotu przez te drzwi.
- Zwiększone ugięcie może prowadzić do zmniejszenia nachylenia podpieranego dachu, a nawet, jeżeli nachylenie nominalne było niewielkie, do odwrócenia nachylenia, z czym związane jest niebezpieczeństwo gromadzenia się wody.
- Jeżeli konstrukcja kratownicy nie jest układem statystycznie wyznaczalnym, mogą pojawiać się nieprzewidziane siły wewnętrzne.

Dlatego też w przypadku konstrukcji kratownicowych istotna jest kontrola wpływu luzu w połączeniach na przemieszczenia. Aby uzyskać taką kontrolę, często konieczne jest:

- ograniczanie luzów w połączeniach kategorii A: wiercenie z naddatkiem +1 mm albo nawet +0,5 mm i używanie ścinanych śrub na gładkich trzonach (w celu ograniczenia luzu powodowanego przez odkształcenie), lub
- używanie „śrub pasowanych”, lub
- używanie śrub sprężonych (połączenia kategorii C), lub
- stosowanie połączeń spawanych zamiast połączeń śrubowych.

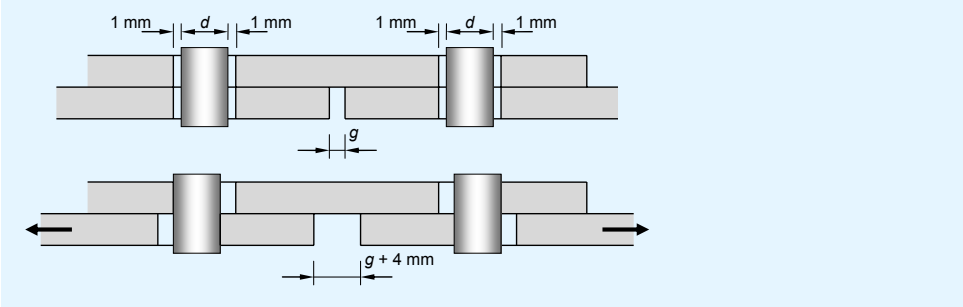
Gdy obciążenie elementów nie powoduje odwrócenia siły osiowej, możliwe jest obliczenie wartości wpływu luzu we wszystkich połączeniach. Poniższe obliczenia ilustrują to zjawisko w odniesieniu do rozpatrywanego przykładu praktycznego.

Każdy z pasów — górny i dolny — jest połączony w sposób ciągły z blachami nakładkowymi za pomocą śrub w okolicy połowy rozpiętości. Dodatkowo krzyżulce są połączone śrubowo na blachach węzłowych spawanych do pasów. Otwory są o 2 mm większe od średnicy śrub.



Rysunek 3.6 Przykład praktyczny — umiejscowienie połączeń pasa wykorzystujących blachy nakładkowe

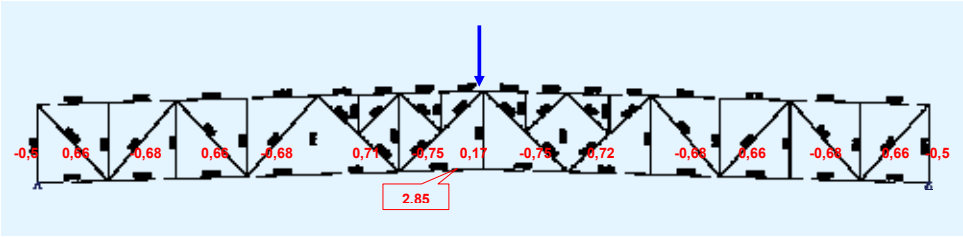
Wpływ luzu na ugięcie w połączeniach stykowych pasa może być obliczony przy założeniu, że śruby zostały wstępnie wyśrodkowane w otworach. Jeżeli średnica otworów wynosi d + 2 mm (gdzie d jest średnicą śruby), pas poddawany rozciąganiu wydłuża się o 4 mm, jak pokazano na rysunku 3.7.



Rysunek 3.7 Wpływ luzu pod obciążeniem

Aby krzyżulec mógł zostać obciążony, na każdym końcu należy przywrócić 2 mm luzu: długość krzyżulca rozciąganego zwiększa się o 4 mm; długość krzyżulca ściskanego zmniejsza się o 4 mm.

Ugięcie kratownicy powodowane luzem może zostać wyliczone przy uwzględnieniu wpływu obciążenia jednostkowego przyłożonego w połowie rozpiętości za pomocą równania Bertranda Fontviolanta.



Rysunek 3.8 Przykład praktyczny — siły osiowe ($N_{1,i}$) wywoływane obciążeniem jednostkowym

Ugięcie dane jest wzorem:

$$v = \sum_{i=1}^{i=b} N_{1,i} \frac{F_i l_i}{ES_i}$$

Gdzie:

$N_{1,i}$ jest siłą osiową generowaną w elemencie i przez siłę jednostkową oddziałująca w punkcie, w którym wymagane jest ugięcie;

l_i jest długością elementu i;

S_i jest polem powierzchni przekroju elementu i;

b jest liczbą elementów z połączeniami śrubowymi;

$\frac{F_i l_i}{ES_i}$ jest zmiana długości elementu i spowodowaną zachowaniem luzu

= ±4 mm w zależności od tego, czy pas jest ściskany czy rozciągany.

Wówczas:

$v = 4 \times (2{,}31 + 2{,}85 + 0{,}5 + 0{,}66 + 0{,}68 + 0{,}66 + 0{,}68 + 0{,}71 + 0{,}75 + \ldots$

$+ 0{,}17 + 0{,}75 + 0{,}72 + 0{,}68 + 0{,}66 + 0{,}68 + 0{,}66 + 0{,}5)$

$v = 58{,}4$ mm

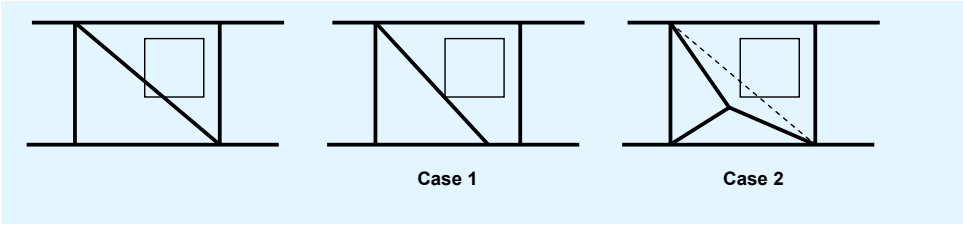
Jest to znaczne ugięcie dodatkowe w porównaniu z ugięciem wynikającym z działania kombinacji ULS (127 mm).

3.7 Modyfikacja kratownicy w celu przeprowadzenia urządzeń

Często okazuje się, że w celu zapewnienie wystarczającego przekroju dróg przejścia urządzeń (np. przez kanał o dużym przekroju) konieczna jest modyfikacja kratownicy.

Można skorzystać z kilku rozwiązań (Rysunek 3.9):

- można zwiększyć powierzchnię przejścia przez wprowadzenie niewspółśrodkowości połączenia jednego z pasów dźwigara (przypadek 1)
- lub „złamać" prosty kształt krzyżulca, triangulując punkt przełamania (przypadek 2).



Rysunek 3.9 Przejście kanału — miejscowa modyfikacja kratownicy

W przypadku 1 momenty drugorzędne wynikające z wprowadzenia niewspółśrodkowości zwiększają się wraz z wielkością niewspółśrodkowości. Jeżeli jest wybór, preferowanym rozwiązaniem jest wprowadzenie niewspółśrodkowości w tych pasach, w których występują najmniejsze naprężenia.

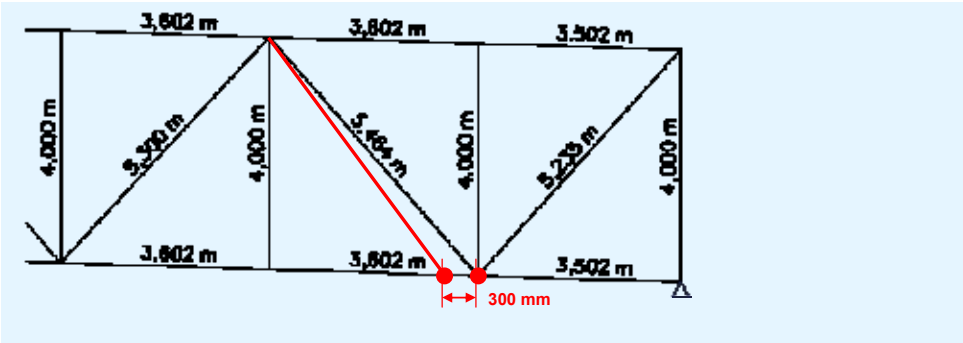
W przypadku 2 należy zwrócić uwagę na kilka zjawisk:

- Siła osiowa może znacząco wzrosnąć w niektórych pasach znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie zmodyfikowanego panelu (wzrost ten jest powodowany zmianą pozycji elementów konstrukcyjnych).
- Momenty „drugorzędne” pojawiają się na skutek utraty sztywności złamanych krzyżulców (w porównaniu ze sztywnością krzyżulców prostych), nawet gdy punkt przełamania jest triangulowany.
- Punkt przełamania musi być oczywiście triangulowany w płaszczyźnie kratownicy, a jeżeli złamany krzyżulec jest ściskany, musi być również utwierdzony z płaszczyzny (w miejscu, w którym spotykają się trzy elementy).

Oba te zjawiska (przypadek 1 oraz przypadek 2) zilustrowano w przykładzie praktycznym.

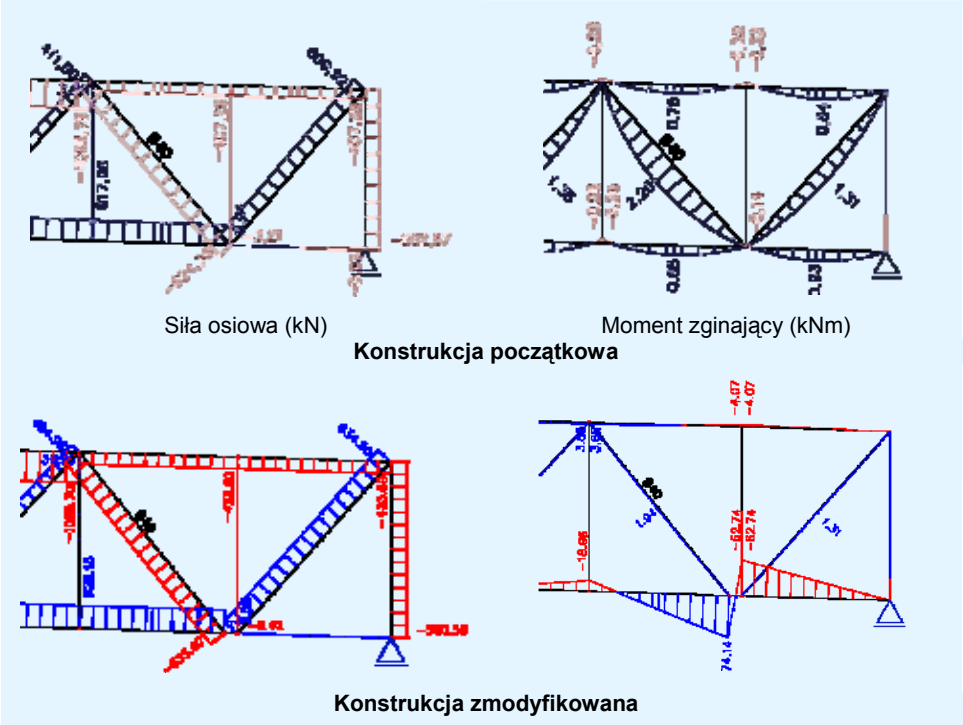
3.7.1 Wprowadzenie osi niewspółśrodkowej w krzyżulcu (przypadek 1)

Panel kratownicy, przez który należy przeprowadzić urządzenia, jest drugim panelem od podpory po prawej stronie. Na rysunku 3.10 pokazano część kratownicy, w której wprowadzono niewspółśrodkowość krzyżulca.



Rysunek 3.10 Przejście kanału — niewspółśrodkowość krzyżulca

Zmiany sił osiowych zmodyfikowanego obszaru przedstawiono na rysunku 3.11.



Rysunek 3.11 Wpływ niewspółśrodkowości krzyżulca pod obciążeniem grawitacyjnym w stanie granicznym nośności

Niewspółśrodkowość rzędu 300 mm wprowadza niedoskonałości do triangulacji.

Główną konsekwencją takiego układu jest znaczący wzrost wartości momentów zginających w pasie dolnym, z którym połączony jest niewspółśrodkowy krzyżulec. Moment wyliczony dla drugiego, licząc od podparcia po prawej stronie, elementu pasa wynosi 74,15 kNm, natomiast na elemencie pierwszy uzyskano wartość 62,72 kNm, co jest wartością znacznie wyższą niż dla konstrukcji początkowej bez niewspółśrodkowości.

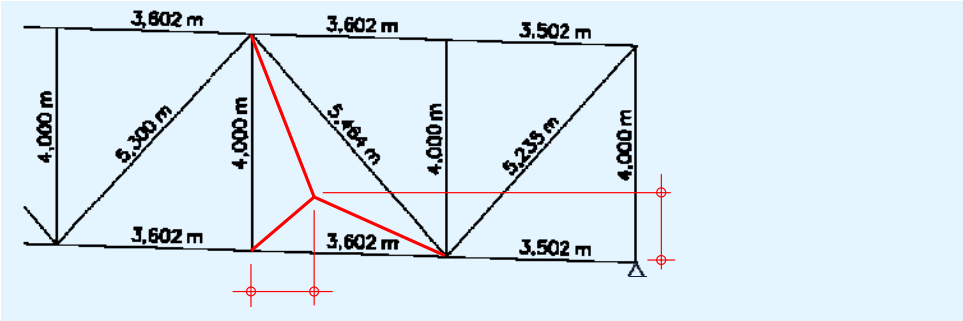
Nośność przy zginaniu sprężystym poziomego kształtownika IPE 330 wynosi:

$69{,}2 \times 0{,}355 = 24{,}57$ kNm

Dopuszczalna nośność przy zginaniu została więc znacznie przekroczona, pomijając wszelkie inne interakcje. Dlatego też w celu podparcia wprowadzonej niewspółśrodkowości osi wymagane będzie wzmocnienie elementu pasa dolnego.

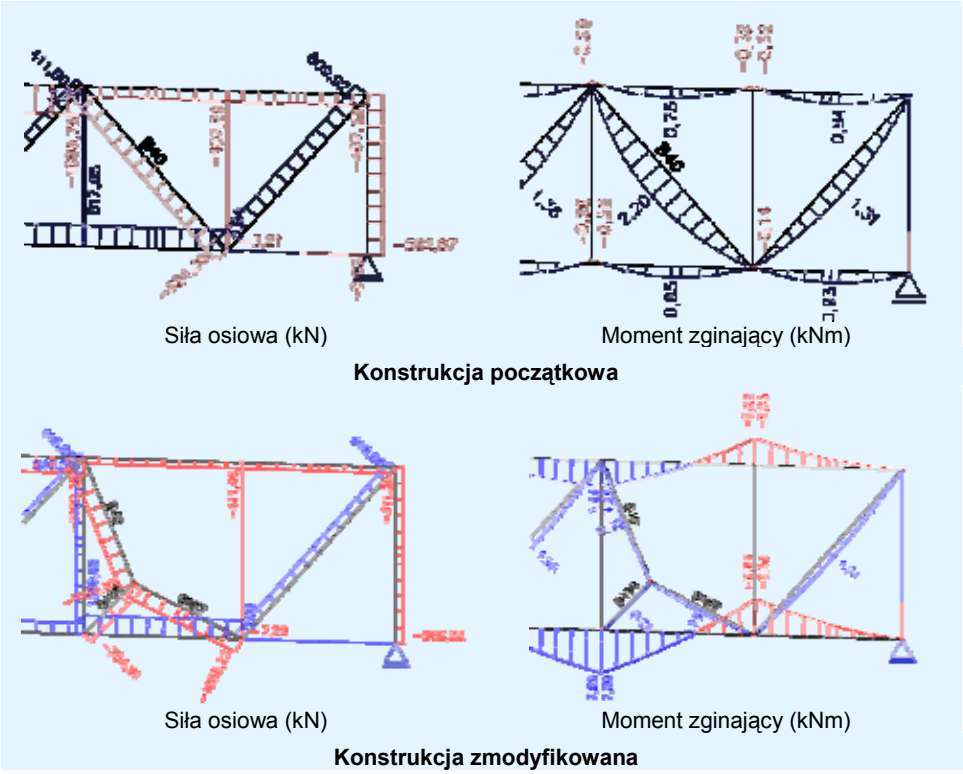
3.7.2 Krzyżulec „złamany" (przykład 2)

Panel kratownicy, przez który należy przeprowadzić urządzenia, jest taki sam jak w punkcie 3.7.1. Rysunek 3.12 przedstawia schemat „złamania" krzyżulca.



Rysunek 3.12 Przejście kanału — krzyżulec złamany

Rozwój naprężeń w zmodyfikowanym obszarze przedstawiono na schematach sekcji na rysunku 3.13.



Rysunek 3.13 Wpływ krzyżulca złamanego będącego pod obciążeniem grawitacyjnym w stanie granicznym nośności

Wpływ modyfikacji na obliczone naprężenia objawia się głównie w następujący sposób:

- można zaobserwować zauważalny wzrost siły osiowej w drugim od podpory po prawej stronie pasie dolnym (w panelu ze złamanym krzyżulcem): obliczona siła rozciągania wzrasta z 818 do 1350 kN,
- można również zaobserwować znaczący wzrost siły ściskającej w złamanym krzyżulcu w porównaniu do krzyżulca prostoliniowego konstrukcji początkowej: siła ściskająca wzrasta z 624 do 1090 kN,
- w przypadku dodatkowego elementu triangulowanego utrzymywana jest normalna wartości siły ściskającej równa 755 kN,
- w pasie dolnym obok wzrostu normalnej siły rozciągającej można zaobserwować również wzrost „drugorzędnych" momentów w trzech prawych panelach.

Dlatego też modyfikacja konstrukcji (krzyżulec złamany) ma znaczący wpływ na rozmiar elementów konstrukcyjnych.

4 WERYFIKACJA ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH

Jak można zauważyć w poprzednim rozdziale dotyczącym analizy globalnej, elementy konstrukcyjne poddawane są głównie oddziaływaniu sił osiowych.

Dało się także zauważyć, że w wielu przypadkach elementy konstrukcyjne są również poddawane naprężeniom pochodzącym od momentów zginających, tj. od momentów drugorzędnych.

4.1 Weryfikacja ściskanych elementów konstrukcyjnych

Nośność ściskanego elementu konstrukcyjnego obliczana jest przy uwzględnieniu różnych wariantów niestateczności:

- miejscowe wyboczenie kształtownika kontrolowane jest przez jego klasyfikację oraz, w razie konieczności, właściwości przekroju efektywnego (klasa 4);
- wyboczenie elementu konstrukcyjnego kontrolowane jest przez użycie w obliczeniach nośności współczynnika redukcyjnego.

W przypadku elementu poddanego ściskaniu należy rozważyć klika modeli wyboczenia. W odniesieniu do większości elementów kratownicy wystarczy obliczyć jedynie wyboczenie giętne elementów ściskanych w płaszczyźnie i z płaszczyzny konstrukcji kratownicy.

W każdym modelu wyboczenia nośność przy wyboczeniu otrzymywana jest na podstawie normy EN 1993-1-1[3] przez zredukowanie nośności przekroju poprzecznego. Stosowany współczynnik redukcyjny uzyskiwany jest na podstawie smukłości elementu konstrukcyjnego, która zależy od siły krytycznej przy wyboczeniu sprężystym.

W przypadku krzyżulców i elementów pionowych poddanych równomiernemu ściskaniu siła krytyczna przy wyboczeniu sprężystym jest określana na podstawie długości wyboczeniowej elementu zgodnie z normą EN 1993-1-1, 6.3.1.3. Zgodnie z Załącznikiem BB §BB.1 do normy EN 1993-1-1 należy uwzględnić następujące warunki:

- W przypadku wyboczenia w płaszczyźnie belki kratownicy: jako długość wyboczeniową przyjmuje się 90% długości układu (odległość pomiędzy węzłami), jeżeli element kratownicy połączony jest na każdym końcu co najmniej dwoma śrubami lub przyspawany (EN 1993-1-1 §BB.1.1(4)).

  (Wyjątek wyszczególniony w Załączniku BB dotyczy elementów kratownicy wykonanych z kątowników, do których odnoszą się inne kryteria oceny. Nie są one określone w tym załączniku, jeżeli dana reguła dotyczy również elementów składających się z dwóch par kątowników: dla uproszczenia zaleca się zachowanie długości wyboczeniowej o wartości 0,9 raza długości osi).
- W przypadku wyboczenia z płaszczyzny belki kratownicy przyjmuje się długość wyboczeniową równą długości układu.

Przy wyboczeniu elementów pasa kratownicy poddanych równomiernemu ściskaniu w płaszczyźnie kratownicy za długość wyboczeniową można przyjąć 90% długości jej układu (odległość pomiędzy węzłami).

Określenie siły krytycznej przy wyboczeniu sprężystym z płaszczyzny kratownicy może być trudniejsze z następujących powodów:

- nie ma konieczności, aby w każdym węźle kratownicy stosowane było podparcie boczne;
- punkty podparcia bocznego niekoniecznie są faktycznie sztywne.

Jeżeli podparcie boczne nie zostało zastosowane we wszystkich węzłach wzdłuż pasa, odcinek znajdujący się pomiędzy punktami podparcia jest poddawany różnej sile ściskania w poszczególnych przęsłach. W takiej sytuacji:

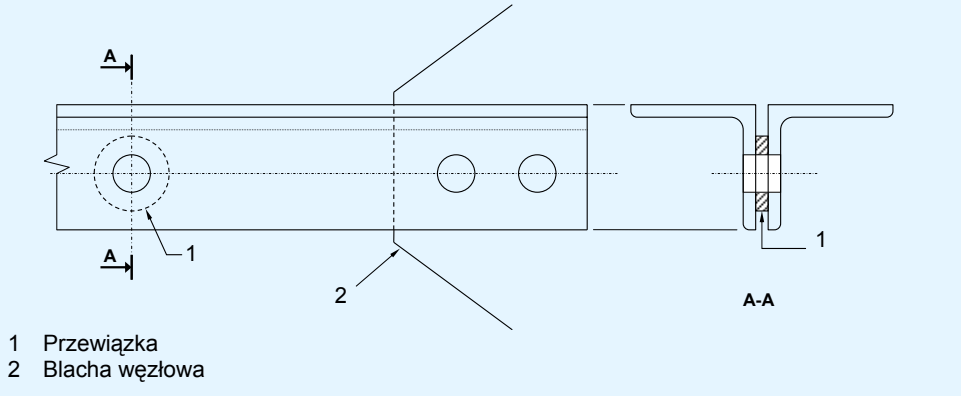
- podejście zachowawcze polega na użyciu maksymalnej wartości normalnej siły ściskającej oraz przyjęciu za długość wyboczeniową odległości pomiędzy podporami, choć może to prowadzić do niedoszacowania wartości nośności pasa;
- można zastosować metody zaawansowane polegające na ocenie równoważnej długości wyboczeniowej w warunkach oddziaływania stałej siły ściskającej.

W przykładzie praktycznym, gdzie kratownica podpiera dach z zastosowaniem płatwi na poziomie górnego pasa kratownicy:

- wszystkie płatwie połączone ze stężeniem dachowym można rozpatrywać jako sztywne punkty podparcia bocznego;
- płatwie pośrednie mogą być również rozpatrywane jako sztywne punkty podparcia, pod warunkiem że dach ma przypisaną rolę membrany (klasa konstrukcji 2 zgodnie z normą EN 1993-1-3);
- w przypadku pasa dolnego te boczne punkty podparcia są zapewnione przez dodatkowe elementy stężenia pionowego pomiędzy kratownicami (patrz stężenia pod płatwiami kratownicowymi na rysunku 2.2).

Rozważając kwestię określania nośności przy ściskaniu, należy również zauważyć, że powszechnie stosowanym rozwiązaniem są pary elementów konstrukcyjnych. Bardzo często elementy konstrukcyjne kratownicy składają się z dwóch kątowników lub dwóch ceowników (UPE).

Aby zapewnić, że takie elementy złożone będą zachowywać się odpowiednio w przypadku modelu wyboczenia giętnego, oba komponenty są łączone za pomocą niewielkich przewiązek (Rysunek 4.1). Ponieważ rolą tych elementów jest zapobieganie wzajemnemu przesunięciu jednego komponentu względem drugiego, muszą być one połączone bez luzów. Szczelina pomiędzy kątownikami oraz grubość przewiązek powinna być taka sama jak grubość blachy węzłowej, z którą połączony jest dany element złożony.



Rysunek 4.1 Elementy konstrukcyjne złożone z dwóch kątowników

Maksymalny odstęp pomiędzy połączeniami elementów konstrukcyjnych jest ograniczony przez normę EN 1993-1-1 do 15 wielokrotności minimalnego promienia bezwładności pojedynczego komponentu. W przeciwnym razie należy przeprowadzić bardziej złożoną analizę uwzględniającą sztywność ścinania elementu złożonego. To rozwiązanie jest bardzo ograniczające. Na przykład w celu połączenia dwóch kątowników 50 × 50 × 5 z zachowaniem ograniczenia dotyczącego odstępów konieczne byłoby zastosowanie przewiązki co 15 cm.

Aby zilustrować opisane wyżej zasady, w kolejnych punktach przedstawiono obliczenia odnoszące się do różnych typów elementów ściskanych wykorzystanych w konstrukcji kratownicy z przykładu praktycznego. Wyniki zaczerpnięto z podstawowego przykładu praktycznego:

- pasy IPE 330 ze środnikiem poziomym;
- zakłada się, że elementy usztywniające są połączone przegubowo na obu końcach;
- zakłada się, że pasy kratownicy są ciągłe.

4.1.1 Pas górny poddawany ściskaniu

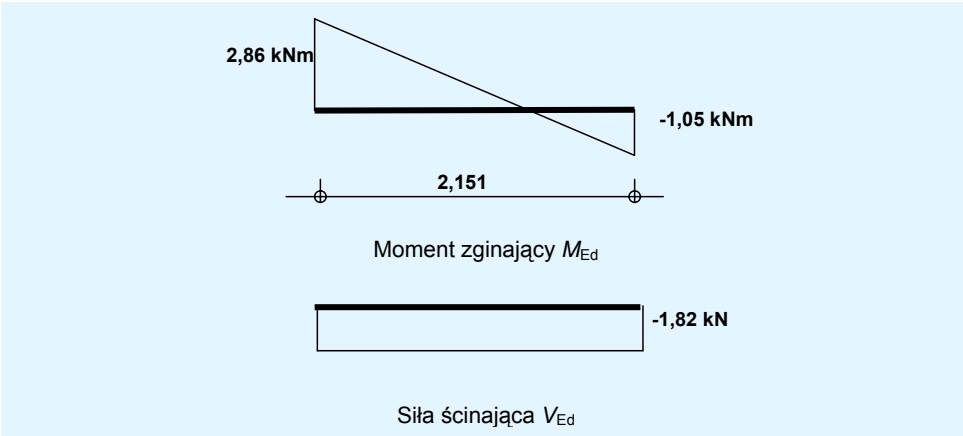
Przedstawione poniżej weryfikacje odnoszą się do elementu pasa górnego znajdującego się w połowie rozpiętości (element B107 na rysunku 3.1), w którym normalna siła ściskająca obliczona pod obciążeniem grawitacyjnym w stanie granicznym nośności (ULS) jest największa i wynosi:

$N_{Ed} = -1477$ kN

Kontrole uwzględniają równoczesne momenty zginające.

Należy zauważyć, że weryfikacją musi zostać objęty również pierwszy element od połowy rozpiętości, który nie jest utwierdzony przez kratownicę drugorzędną: mniejsza ściskająca siła osiowa, ale zwiększona długość wyboczeniowa w płaszczyźnie kratownicy. Ponieważ obliczenia są identyczne, nie są one oddzielnie przedstawione poniżej. Jeżeli weryfikacja wykaże niedostateczną nośność, w ramach wzmocnienia należy oczywiście wydłużyć kratownicę drugorzędną.

Wartości siły ścinającej oraz momentów zginających przedstawiono na rysunku 4.2.



Rysunek 4.2 Moment zginający i siła ścinająca w pasie górnym

Właściwości przekroju poprzecznego

W przypadku kształtownika IPE 330 z poziomym środnikiem (gatunek stali S355)

A = 62,6 cm^2

I_y = 11770 cm^4

I_z = 788 cm^4

$W_{el,z}$ = 98,5 cm^3

Klasa przekroju poprzecznego

Parametr materiałowy ma wartość:

ε = 0,81

Dla uproszczenia przekrój poprzeczny można rozpatrywać jako ściskany równomiernie, nawet jeżeli jest poddawany łącznemu oddziaływaniu siły osiowej i momentu zginającego.

Pasy ściskane są klasyfikowane jako pasy wystające (EN 1993-1-1 tabela 5.2, arkusz 2):

$$\frac{c}{t} = \frac{58{,}25}{11{,}5} = 5{,}1 < 9\varepsilon = 7{,}29$$

Pas należy do klasy 1.

Środnik jest klasyfikowany jako wewnętrzna część poddawana ściskaniu (EN 1993-1-1 tabela 5.2, arkusz 1):

$$\frac{c}{t} = \frac{271}{7{,}5} = 36{,}1 > 42\varepsilon = 34{,}02$$

Środnik należy do klasy 4.

Efektywne właściwości przekroju poprzecznego

Efektywne pole powierzchni A_{eff} jest obliczane pod względem czystego ściskania.

Pasy należą do klasy 1, tak więc są w pełni efektywne.

Szerokość efektywna środnika wyznaczana jest zgodnie z normą EN 1993-1-5 (tabela 4.1):

$\psi = 1 \Rightarrow k_\sigma = 4$

$$\bar{\lambda}_{\text{p}} = \frac{\frac{b}{t}}{28{,}4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{\frac{271}{7{,}5}}{28{,}4 \times 0{,}81 \times \sqrt{4}} = 0{,}782 > 0{,}673$$

$$\psi = 1 \Rightarrow k_\sigma = 4 \Rightarrow \bar{\lambda}_{\text{p}} = \frac{\frac{b}{t}}{28{,}4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{\frac{271}{7{,}5}}{28{,}4 \times 0{,}81 \times \sqrt{4}} = 0{,}782 > 0{,}673$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_{\text{p}} - 0{,}055(3+\psi)}{\bar{\lambda}_{\text{p}}^{\,2}} = 0{,}919 \Rightarrow b_{\text{eff}} = 0{,}919 \times 271 = 249 \text{ mm}$$

$b_{\text{e1}} = b_{\text{e2}} = 0{,}5 b_{\text{eff}} = 124{,}5$ mm

$b_{\text{eff}} = 0{,}919 \times 271 = 249$ mm

$b_{\text{e1}} = b_{\text{e2}} = 0{,}5\ b_{\text{eff}} = 124{,}5$ mm

Efektywne pole powierzchni przekroju wynosi:

$A_{\text{eff}} = 6260 - (271 - 249) \times 7{,}5 = 6095$ mm^2

Efektywny sprężysty wskaźnik wytrzymałości przekroju względem osi słabej ($W_{\text{eff,z}}$) jest obliczany pod względem czystego zginania.

Przy zwykłym zginaniu w płaszczyźnie kratownicy względem osi słabej pasy muszą należeć do klasy 1, a środnik nie podlega naprężeniom. Wówczas przekrój jest w pełni efektywny:

$W_{\text{eff,z}} = W_{\text{el,z}} = 98{,}5$ cm^3

Nośność przekroju poprzecznego

Element ściskany (EN 1993-1-1 §6.2.4):

$$N_{\text{c,Rd}} = \frac{A_{\text{eff}} f_{\text{y}}}{\gamma_{\text{M0}}} = \frac{6095 \times 0{,}355}{1{,}0} = 2164 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{\text{Ed}}}{N_{\text{c,Rd}}} = \frac{1477}{2164} = 0{,}683 < 1 \text{ OK}$$

Element zginany w płaszczyźnie kratownicy (EN 1993-1-1 §6.2.5):

$$M_{\text{z,Rd}} = \frac{W_{\text{eff,z}} f_{\text{y}}}{\gamma_{\text{M0}}} = \frac{98{,}5 \times 0{,}355}{1{,}0} = 34{,}97 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{\text{Ed}}}{M_{\text{z,Rd}}} = \frac{2{,}86}{34{,}97} = 0{,}082 < 1 \text{ OK}$$

Element poddawany ścinaniu (EN 1993-1-1 §6.2.6):

$A_{v,y} = 2\times160\times11{,}5 = 3680\ \text{mm}^2$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_{v,y}\dfrac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{3680\times\dfrac{0{,}355}{\sqrt{3}}}{1{,}0} = 754\ \text{kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{1{,}82}{754} = 0{,}002 < 1\ \text{OK}$$

Ponieważ $V_{Ed}/V_{pl,Rd}$ wynosi mniej niż 0,5, siła ścinająca nie wpływa na nośność przekroju poprzecznego przy obciążeniu momentem zginającym i siłą osiową.

Wzajemne oddziaływanie M-N (EN 1993-1-1 §6.2.93):

Wzajemne oddziaływanie M-N jest uwzględniane przez przyjęcie następującego kryterium:

0,683 + 0,082 = 0,765 < 1 OK

Nośność elementu na wyboczenie

Nośność przy wyboczeniu w płaszczyźnie kratownicy, tj. względem osi słabej przekroju poprzecznego (EN 1993-1-1 § 6.3.1)

Długość wyboczeniowa elementu pasa górnego jest równa 90% długości układu (EN 1993-1-1 §B.B.1.1):

$L_{cr,z} = 0{,}9 \times 2151 = 1936$ mm

Siła krytyczna przy wyboczeniu sprężystym wynosi:

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 EI_z}{l_z^{\,2}} = \frac{\pi^2\times21000\times788}{193{,}6^2} = 4357\ \text{kN}$$

Smukłość jest wyrażona wzorem:

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A_{eff}f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{6095\times0{,}355}{4357}} = 0{,}705$$

Krzywa wyboczeniowa, którą należy zastosować to krzywa **b** (EN 1993-1-1 tabela 6.2), a współczynnik imperfekcji wynosi:

$\alpha = 0{,}34$

$$\Phi_z = 0{,}5\times(1+\alpha(\bar{\lambda}_z - 0{,}2) + \bar{\lambda}_z^{\,2}) = 0{,}8344$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^{\,2} - \bar{\lambda}_z^{\,2}}} = \frac{1}{0{,}8344 + \sqrt{0{,}8344^2 - 0{,}705^2}} = 0{,}781$$

Zatem obliczeniowa nośność przy wyboczeniu wynosi:

$$N_{b,z,Rd} = \frac{\chi_z A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}781\times6095\times0{,}355}{1{,}0} = 1690\ \text{kN}$$

$N_{Ed} / N_{b,z,Rd} = 1477/1690 = 0{,}874$ OK

Nośność przy wyboczeniu z płaszczyzny kratownicy, tj. względem osi mocnej przekroju poprzecznego (EN 1993-1-1 § 6.3.1)

Podpory boczne pasa górnego składają się z płatwi kratownicowych rozmieszczonych w odstępach co 8 504 mm.

Normalna siła ściskająca pomiędzy podporami bocznymi jest prawie stała (patrz punkt 3.2).

Nie ma zatem potrzeby stosowania metody uwzględniającej nierównomierny rozkład sił.

Siła krytyczna przy wyboczeniu sprężystym wynosi:

$$N_{\mathrm{cr,y}} = \frac{\pi^2 E I_{\mathrm{y}}}{l_{\mathrm{y}}^{\,2}} = \frac{\pi^2 \times 21000 \times 11770}{850{,}4^2} = 3373\ \mathrm{kN}$$

Smukłość jest wyrażona wzorem:

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{y}} = \sqrt{\frac{A_{\mathrm{eff}} f_{\mathrm{y}}}{N_{\mathrm{cr,y}}}} = \sqrt{\frac{6095 \times 0{,}355}{3373}} = 0{,}8009$$

Krzywą wyboczeniową jest krzywa **a** (EN 1993-1-1 tabela 6.2), a współczynnik imperfekcji wynosi:

$$\alpha = 0{,}21$$

$$\Phi_y = 0{,}5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_{\mathrm{y}} - 0{,}2) + \bar{\lambda}_{\mathrm{y}}^{\,2}) = 0{,}8838$$

$$\chi_{\mathrm{y}} = \frac{1}{\Phi_{\mathrm{y}} + \sqrt{\Phi_{\mathrm{y}}^{\,2} - \bar{\lambda}_{\mathrm{y}}^{\,2}}} = \frac{1}{0{,}8838 + \sqrt{0{,}8838^2 - 0{,}8009^2}} = 0{,}7952$$

Zatem nośność przy ściskaniu wynosi:

$$N_{\mathrm{b,y,Rd}} = \frac{\chi_{\mathrm{y}} A_{\mathrm{eff}} f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M1}}} = \frac{0{,}7952 \times 6095 \times 0{,}355}{1{,}0} = 1720\ \mathrm{kN}$$

$N_{\mathrm{Ed}} / N_{\mathrm{b,y,Rd}}$ = 1477/1720 = 0,859 OK

Wzajemne oddziaływanie M-N (EN 1993-1-1 §6.3.3):

W przypadku elementu poddawanego zginaniu względem osi słabej (zginanie względem osi mocnej nie występuje) nie ma potrzeby rozpatrywania nośności przy zwichrzeniu. Przyjęto następujące kryteria:

$$\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{\chi_{\mathrm{y}}\, A_{\mathrm{eff}} f_{\mathrm{y}} / \gamma_{\mathrm{M1}}} + k_{\mathrm{yz}} \frac{M_{\mathrm{z,Ed}}}{W_{\mathrm{eff,z}} f_{\mathrm{y}} / \gamma_{\mathrm{M1}}} \le 1 \quad \text{(Równanie 6.61 w normie EN 1993-1-1)}$$

$$\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{\chi_{\mathrm{z}}\, A_{\mathrm{eff}} f_{\mathrm{y}} / \gamma_{\mathrm{M1}}} + k_{\mathrm{zz}} \frac{M_{\mathrm{z,Ed}}}{W_{\mathrm{eff,z}} f_{\mathrm{y}} / \gamma_{\mathrm{M1}}} \le 1 \quad \text{(Równanie 6.62 w normie EN 1993-1-1)}$$

Korzystając z obliczonych już nośności, kryteria te można również zapisać w sposób następujący:

$$\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{b,y,Rd}}} + k_{\mathrm{yz}} \frac{M_{\mathrm{z,Ed}}}{M_{\mathrm{z,Rd}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{b,z,Rd}}} + k_{\mathrm{zz}} \frac{M_{\mathrm{z,Ed}}}{M_{\mathrm{z,Rd}}} \leq 1$$

Współczynniki interakcji k_{yz} oraz k_{zz} są obliczane zgodnie z Załącznikiem A do normy EN 1993-1-1 w przypadku przekrojów klasy 4:

$$k_{\mathrm{yz}} = C_{\mathrm{mz}} \frac{\mu_{\mathrm{y}}}{1 - \frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{cr,z}}}}$$

gdzie:

$$C_{\mathrm{mz}} = 0{,}79 + 0{,}21\psi + 0{,}36(\psi - 0{,}33)\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{cr,z}}}$$

$$\psi = \frac{-1{,}05}{2{,}86} = -0{,}367$$

$$C_{\mathrm{mz}} = 0{,}628$$

$$\mu_{\mathrm{y}} = \frac{1 - \frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{cr,y}}}}{1 - \chi_y \frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{cr,y}}}} = \frac{1 - \frac{1477}{3373}}{1 - 0{,}7952\frac{1477}{3373}} = 0{,}8624$$

$$k_{\mathrm{yz}} = 0{,}628 \times \frac{0{,}8624}{1 - \frac{1477}{4357}} = 0{,}819$$

Pierwsze kryterium wzajemnego oddziaływania (równanie 6.61)

$$\frac{1477}{1720} + 0{,}819 \times \frac{2{,}86}{34{,}97} = 0{,}926 \ \leq 1 \ \text{OK}$$

$$k_{\mathrm{zz}} = C_{\mathrm{mz}} \frac{\mu_{\mathrm{z}}}{1 - \frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{cr,z}}}}$$

gdzie:

$$C_{\mathrm{mz}} = 0{,}628$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{cr,z}}}}{1 - \chi_z \frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{cr,z}}}} = \frac{1 - \frac{1477}{4357}}{1 - 0{,}781\frac{1477}{4357}} = 0{,}899$$

Zatem współczynnik k_{zz} można obliczyć w następujący sposób:

$$k_{zz} = 0{,}628 \times \frac{0{,}899}{1 - \frac{1477}{4357}} = 0{,}854$$

Drugie kryterium wzajemnego oddziaływania (równanie 6.62)

$$\frac{1477}{1690} + 0{,}854 \times \frac{2{,}86}{34{,}97} = 0{,}944 \ \leq 1 \ \text{OK}$$

Uwaga dotycząca kratownic drugorzędnych

Zastosowanie kratownic drugorzędnych w środkowej części kratownicy (patrz rysunek 2.3) pozwala na zmniejszenie o połowę długości wyboczeniowej pasa górnego w płaszczyźnie kratownicy.

Rozmiar kratownicy drugorzędnej jest dobierany tak, aby przenosiła ona obciążenie utwierdzenia zapobiegającego wyboczeniu, którego wartość zależy od siły ściskającej w podpieranym pasie oraz od jego współczynnika smukłości (patrz informacje na temat projektowania stalowych słupów kratowych w załączniku H4 do normy EN 1993-3-1).

4.1.2 Pas dolny poddawany ściskaniu

Biorąc pod uwagę pełen projekt konstrukcji, istotną rzeczą jest oczywiście sprawdzenie pasa dolnego poddawanego mniejszej sile ściskającej, ale nie podpartego kratownicą drugorzędną.

Weryfikacja pasa dolnego poddawanego ściskaniu jest podobna do opisanej w punkcie 4.1.1 weryfikacji pasa górnego poddawanego ściskaniu.

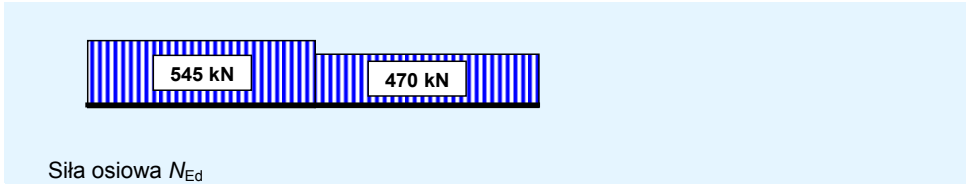
Utwierdzenie boczne pasa dolnego jest zapewnione w miejscu każdej płatwi (Rysunek 2.2).

Jedynym szczególnym punktem, którego opracowanie byłoby interesujące, jest analiza wyboczenia z płaszczyzny kratownicy.

Wyboczenie pasa dolnego należy rozpatrywać podobnie do wyboczenia pasa górnego, przyjmując długość równą odległości pomiędzy panelami kratownicy, ze względu na obecność stężeń podpanelowych (patrz rysunek 2.3).

Różnica polega na tym, że siła osiowa występująca w pasie dolnym jest zróżnicowana w dwóch kolejnych panelach na długości wyboczeniowej, podczas gdy siła ta była stała na długości wyboczeniowej pasa górnego.

Należy również zauważyć, że w przypadku elementu pasa o największym momencie zginającym zmienność siły osiowej jest niewielka. W projekcie rzeczywistym niewielkie zmniejszenie długości wyboczeniowej ze względu na zmienność normalnej siły osiowej może zostać bezpiecznie pominięte.



Rysunek 4.3 Siła osiowa występująca w pasie dolnym

4.1.3 Krzyżulec poddawany ściskaniu

Krzyżulec, którego nośność została obliczona poniżej dla przykładu, jest drugim krzyżulcem od prawej podpory (element B40 na rysunku 3.1) pod obciążeniem grawitacyjnym w stanie granicznym nośności (ULS).

Wartość siły ściskającej wynosi:

$N_{Ed} = -624{,}4$ kN

Zgodnie z powszechną praktyką moment zginający wywołany ciężarem własnym elementu konstrukcyjnego jest początkowo pomijany.

Wpływ tego momentu zostanie oceniony na etapie późniejszym.

Właściwości przekroju poprzecznego pojedynczego kątownika

W przypadku kątownika 150 × 150 × 15 L

$A = 43$ cm^2

$z_G = y_G = 4{,}25$ cm

$I_y = I_z = 898{,}1$ cm^4

$I_v = 369$ cm^4

W przypadku pary kątowników

Pole powierzchni przekroju:

$A = 2 \times 43 = 86$ cm^2

Geometryczny moment bezwładności przekroju z płaszczyzny kratownicy (zakłada się, że przekrój jest jednorodny) przy założeniu, że szczelina pomiędzy kątownikami wynosi 10 mm:

$I_y = 2 \times 898{,}1 + 2 \times 43 \times (4{,}25+1{,}0/2)^2 = 3737$ cm^4.

Geometryczny moment bezwładności przekroju w płaszczyźnie kratownicy:

$I_z = 2 \times 898{,}1 = 1796$ cm^4

Klasa przekroju poddawanego równomiernemu ściskaniu

Parametry materiałowy dla f_y = 355 N/mm^2: $\varepsilon = 0{,}81$

W przypadku kątownika (EN 1993-1-1 tabela 5.2, arkusz 3):

$$\frac{h}{t} = \frac{150}{15} = 10 \qquad < 15\varepsilon = 12{,}15$$

$$\frac{h+b}{2t} = \frac{2\times 150}{2\times 15} = 10 \qquad > 11{,}5\varepsilon = 9{,}31$$

Przekrój jest klasy 4 i przez to nie jest w pełni efektywnym przy ściskaniu równomiernym. Efektywne pole powierzchni przekroju poprzecznego należy obliczyć, odwołując się do normy EN 1993-1-5. Rezultatem tych obliczeń jest w pełni efektywne pole przekroju:

$A_{\text{eff}} = A = 86$ cm^2

Nośność przekroju poprzecznego

Nośność przekroju równomiernie ściskanego wyrażona jest wzorem:

$$N_{\text{c,Rd}} = \frac{Af_{\text{y}}}{\gamma_{\text{M0}}} = \frac{8600\times 0{,}355}{1{,}0} = 3053 \text{ kN}$$

Nośność elementu na wyboczenie

Nośność przy wyboczeniu w płaszczyźnie kratownicy

Długość wyboczeniowa jest równa:

0,9 × 5,464 = 4,918 m

Siła krytyczna przy wyboczeniu sprężystym wynosi:

$$N_{\text{cr,z}} = \frac{\pi^2 EI_{\text{z}}}{l_{\text{y}}^{\,2}} = \frac{\pi^2\times 21000\times 1796}{491{,}8^2} = 1539 \text{ kN}$$

Smukłość jest wyrażona wzorem:

$$\bar{\lambda}_{\text{z}} = \sqrt{\frac{Af_{\text{y}}}{N_{\text{cr,z}}}} = \sqrt{\frac{8600\times 0{,}355}{1539}} = 1{,}408$$

Krzywą wyboczeniową jest krzywa b (EN 1993-1-1 tabela 6.2), a współczynnik imperfekcji wynosi:

$$\alpha = 0{,}34$$

$$\Phi_z = 0{,}5\times(1+\alpha(\bar{\lambda}_{\text{z}} - 0{,}2) + \bar{\lambda}_{\text{z}}^{\,2}) = 1{,}697$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^{\,2} - \bar{\lambda}_z^{\,2}}} = \frac{1}{1{,}697 + \sqrt{1{,}697^2 - 1{,}408^2}} = 0{,}378$$

Zatem nośność przy wyboczeniu wynosi:

$$N_{\text{b,z,Rd}} = \frac{\chi_{\text{z}} Af_{\text{y}}}{\gamma_{\text{M1}}} = \frac{0{,}378\times 8600\times 0{,}355}{1{,}0} = 1154 \text{ kN}$$

Nośność przy wyboczeniu z płaszczyzny kratownicy

Długość wyboczeniowa jest równa długości układu: $L_{\mathrm{cr,y}}$ = 5,464 m.

Krytyczna siła osiowa wynosi:

$$N_{\mathrm{cr,y}} = \frac{\pi^2 EI_{\mathrm{y}}}{l_{\mathrm{y}}^{\,2}} = \frac{\pi^2 \times 21000 \times 3737}{546{,}5^2} = 2594\ \mathrm{kN}$$

Smukłość jest wyrażona wzorem:

$$\overline{\lambda}_y = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{8600x0{,}355}{2594}} = 1{,}085$$

Krzywa wyboczeniowa, którą należy zastosować to krzywa b (patrz norma EN 1993-1-1, tabela 6.2), a współczynnik imperfekcji wynosi:

$$\alpha = 0{,}34$$

$$\Phi_{\mathrm{y}} = 0{,}5 \times (1 + \alpha(\overline{\lambda}_{\mathrm{y}} - 0{,}2) + \overline{\lambda}_{\mathrm{z}}^{\,2}) = 1{,}239$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^{\,2} - \overline{\lambda}_y^{\,2}}} = \frac{1}{1{,}239 + \sqrt{1{,}239^2 - 1{,}085^2}} = 0{,}544$$

Obliczeniowa nośność przy wyboczeniu wynosi:

$$N_{b,y,Rd} = \frac{\chi_y A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}544 \times 8600 \times 0{,}355}{1{,}0} = 1661\ \mathrm{kN}$$

Wartość nośności przy wyboczeniu w płaszczyźnie kratownicy jest mniejsza i weryfikacja sprowadza się do warunku:

$$\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{b,Rd}}} = \frac{624{,}4}{1154} = 0{,}541 < 1{,}0\ \ \mathrm{OK}$$

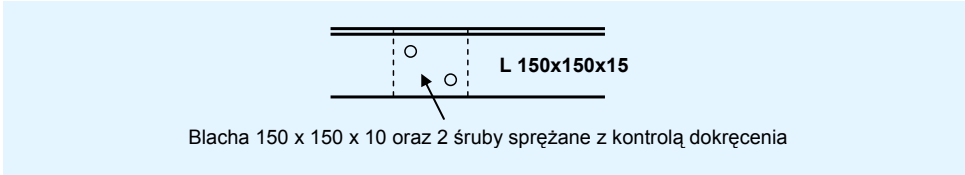
Nośność krzyżulca jest odpowiednia; jego przekrój można zoptymalizować.

Przewiązki łączące

Krzyżulec składa się z dwóch kątowników połączonych przewiązkami. Przeprowadzone wcześniej obliczenia nośności zakładały, że przekrój jest jednorodny (w przypadku wyboczenia z płaszczyzny kratownicy).

W celu potwierdzenia tej hipotezy w normie EN 1993-1-1 podano wymaganie dotyczące umieszczenia prętów łączących rozmieszczonych w odległościach nie większych niż 15 krotna wartość minimalnego promienia bezwładności pojedynczego kątownika. W przypadku kątownika 150 × 150 × 15 odległość ta wynosi 15 × 29,3 = 440 mm.

Biorąc pod uwagę zapas nośności, zalecane jest, by odstępy między prętami łączącymi były większe (koszt produkcji i montażu nie jest bez znaczenia). Zamiast stosowania 12 przewiązek łączących na jeden krzyżulec — jak wynika z powyższego warunku — można rozważyć zastosowanie jedynie 3 prętów umieszczonych w odległości 1366 mm od siebie.



Rysunek 4.4 Przewiązka łącząca

Aby przewiązki były efektywne, muszą być rozmieszczone w sposób przedstawiony na rysunku. Skutkuje to długością wyboczeniową względem osi głównej równą 0,7 × 1366 = 956 mm.

W przypadku tego rodzaju wyboczenia siła krytyczna przy wyboczeniu sprężystym wynosi:

$$N_{\mathrm{cr,v}} = \frac{\pi^2 EI_{\mathrm{v}}}{l_{\mathrm{v}}^{\,2}} = \frac{\pi^2 \times 210000 \times 369 \times 10^4}{956^2} \times 10^{-3} = 8368\ \mathrm{kN}$$

Smukłość pojedynczego kątownika wynosi:

$$\bar{\lambda}_v = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr,v}}} = \sqrt{\frac{4300 \times 355}{8368000}} = 0{,}427$$

Krzywa wyboczeniowa, którą należy zastosować to krzywa **b**, a współczynnik imperfekcji wynosi: $\alpha = 0{,}34$

$$\Phi_v = 0{,}5 \times (1 + 0{,}34 \times (\bar{\lambda}_v - 0{,}2) + \bar{\lambda}_v^{\,2}) = 0{,}630$$

$$\chi_{\mathrm{v}} = \frac{1}{\Phi_{\mathrm{v}} + \sqrt{\Phi_{\mathrm{v}}^{\,2} - \bar{\lambda}_{\mathrm{v}}^{\,2}}} = \frac{1}{0{,}630 + \sqrt{0{,}630^2 - 0{,}427^2}} = 0{,}915$$

Nośność przy ściskaniu można zachowawczo oszacować, obliczając odpowiedni współczynnik redukcyjny całego elementu konstrukcyjnego oraz pojedynczego kątownika pomiędzy przewiązkami:

$\chi = \mathrm{Min}(\chi_{\mathrm{y}}\ ;\ \chi_{\mathrm{z}}) \times \chi_{\mathrm{v}} = 0{,}378 \times 0{,}915 = 0{,}346$

Obliczeniowa nośność krzyżulca przy wyboczeniu wynosi:

$$N_{\mathrm{b,Rd}} = \frac{\chi A f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M1}}} = \frac{0{,}346 \times 8600 \times 355}{1{,}0} \times 10^{-3} = 1056\ \ \mathrm{kN}$$

$$\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{b,Rd}}} = \frac{624{,}4}{1056} = 0{,}591 < 1{,}0$$

Nośność przy ściskaniu jest odpowiednia.

Weryfikacja lokalna przekroju po prawej stronie połączenia z blachą węzłową

Weryfikację przeprowadzono w Załączniku B.

Wpływ momentu zginającego wynikającego z ciężaru własnego krzyżulca

Moment zginający wynosi:

$M_{y,Ed}$ = 2,20 kNm (patrz punkt 3.2 powyżej).

Sprężysty wskaźnik wytrzymałości przekroju poprzecznego przy zginaniu w płaszczyźnie kratownicy wynosi: $W_{el,z}$ = 167 cm^3.

Kryteria interakcji podano w § 6.3.3 normy EN 1993-1-1:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y A f_y / \gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{W_{el,z} f_y / \gamma_{M1}} \le 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z A f_y / \gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{W_{el,z} f_y / \gamma_{M1}} \le 1$$

gdzie:

Współczynnik k_{yz} wynosi:

$$k_{yz} = C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$$

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_v \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = \frac{1 - \frac{624,4}{2594}}{1 - 0,915 \times 0,544 \times \frac{624,4}{2594}} = 0,863$$

$$C_{mz} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} = 1 + 0,03 \frac{624,4}{1539} = 1,012$$

$$k_{yz} = 1,012 \times \frac{0,863}{1 - \frac{624,4}{1539}} = 1,47$$

Współczynnik k_{zz} wynosi:

$$k_{zz} = C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_v \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} = \frac{1 - \frac{624,4}{1539}}{1 - 0,915 \times 0,378 \times \frac{624,4}{1539}} = 0,691$$

$$k_{zz} = 1,012 \times \frac{0,691}{1 - \frac{624,4}{1539}} = 1,18$$

Skąd:

$$\frac{624400}{0{,}915\times 0{,}544\times 8600\times 355/1{,}0}+1{,}47\times\frac{2{,}20\times 10^6}{167000\times 355/1{,}0}=0{,}465\ \le 1$$

$$\frac{624400}{0{,}915\times 0{,}378\times 8600\times 355/1{,}0}+1{,}18\frac{2{,}20\times 10^6}{167000\times 355/1{,}0}=0{,}635\le 1$$

Jeśli uwzględniany jest moment zginający wynikający z ciężaru własnego krzyżulca, kryterium nośności należy zwiększyć z 0,591 do 0,635: oznacza to wzrost o 7%.

4.2 Weryfikacja elementów poddawanych rozciąganiu

Cechą charakterystyczną podczas sprawdzania nośności elementów rozciąganych jest występowanie kryteriów, które wymagają uwzględnienia przekroju netto elementu konstrukcyjnego. Właściwość tę omówiono w przykładzie praktycznym.

4.2.1 Dolny pas poddany rozciąganiu (płaskownik IPE 330)

Dolny pas poddany rozciąganiu jest weryfikowany pod względem sił obliczonych w okolicy połowy rozpiętości. Uwzględniając wyniki podane powyżej w punkcie 3.2:

N_{Ed} = 1582 kN

M_{Ed} = 1,69 kNm

Nośność przekroju przy rozciąganiu wyznacza się w oparciu o dwa stany — jeden w przekroju brutto, a drugi w przekroju netto:

Przekrój brutto

A = 6260 mm^2

$$N_{\mathrm{pl,Rd}}=\frac{Af_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}}=\frac{6260x0{,}355}{1{,}0}=2222\ \mathrm{kN}$$

Przekrój netto

$$A_{\mathrm{net}}=6260-(4\times 24\times 11{,}5)-(3\times 22\times 7{,}5)=4661\ \mathrm{mm}^2$$

$$N_{\mathrm{u,Rd}}=\frac{0{,}9A_{\mathrm{net}}f_{\mathrm{u}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}}=\frac{0{,}9\times 4661\times 0{,}51}{1{,}25}=1711\ \mathrm{kN}$$

Nośność przy rozciąganiu wyraża się zależnością:

$$N_{\mathrm{t,Rd}}=\min(N_{\mathrm{pl,Rd}},N_{\mathrm{u,Rd}})=1711\ \mathrm{kN}$$

Przy prostym zginaniu w płaszczyźnie kratownicy (EN 1993-1-1 paragraf 6.2.5) klasa 1 przekroju pozwala na wykorzystanie plastycznego wskaźnika wytrzymałości:

$$W_{\mathrm{pl}} = \frac{2 \times 1{,}15 \times 16^2}{4} = 147{,}2\ \mathrm{cm}^3$$

$$M_{\mathrm{pl,Rd}} = \frac{W_{\mathrm{pl}} f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}} = \frac{147{,}2 \times 0{,}355}{1{,}0} = 52{,}3\ \mathrm{kNm}$$

Weryfikacja:

$$\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{t,Rd}}} = \frac{1582}{1711} = 0{,}93$$

$$\frac{M_{\mathrm{Ed}}}{M_{\mathrm{Rd}}} = \frac{1{,}69}{52{,}3} = 0{,}03$$

Interakcja N-M: 0,93 + 0,03 = 0,96 < 1

4.2.2 Krzyżulec poddawany rozciąganiu (podwójne kątowniki L 120 × 120 × 12)

Sprawdzany jest krzyżulec na lewej podporze pod obciążeniem grawitacyjnym. Uwzględniając wyniki podane powyżej w punkcie 3.2:

N_{Ed} = 616,3 kN

M_{Ed} = 1,36 kNm

Nośność przy rozciąganiu

Nośność przekroju przy rozciąganiu wyznacza się w oparciu o dwa stany — jeden w przekroju brutto, a drugi w przekroju netto:

Przekrój brutto

$$N_{\mathrm{pl,Rd}} = \frac{A f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}} = \frac{5510 x 0{,}355}{1{,}0} = 1956\ \mathrm{kN}$$

Przekrój netto (patrz ustalenia opisane w Załączniku 2)

$$A_{\mathrm{net}} = 5510 - (2 \times 26 \times 12) = 4886\ \mathrm{mm}^2$$

W przypadku kątowników połączonych pojedynczym ramieniem norma EN 1993-1-8 zawiera dodatkowe wymaganie dotyczące wpływu mimośrodowości siły rozciągającej w kątowniku (odległość pomiędzy osią neutralną a oznaczeniem rozstawu) na siły (wystąpienie momentów drugorzędnych).

Ta metoda zakłada zastosowanie współczynnika redukcyjnego nośności w stosunku do kątownika (EN 1993-1-8 paragraf 3.10.3(2))

$$N_{\mathrm{u,Rd}} = \frac{\beta_3 A_{\mathrm{net}} f_{\mathrm{u}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}}$$

Współczynnik redukcyjny β_3 zależy od odległości p_1 pomiędzy osiami.

Gdy p_1= 2,5 *i* d_0 = 65 mm, β_3 = 0,5 (EN 1993-1-8 tabela 3.8)

NB.: Współczynniki redukcyjne β podano tylko w odniesieniu do kątownika prostego. W przypadku kątownika podwójnego stosuje się metodę zachowawczą. W trakcie analizy zachowania dwóch krzyżulców prostych w ramach połączenia zaleca się uwzględnienie wspomnianych zjawisk lokalnych.

$$N_{\mathrm{u,Rd}} = \frac{0{,}5 A_{\mathrm{net}} f_{\mathrm{u}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}} = \frac{0{,}5 \times 4886 \times 0{,}51}{1{,}25} = 997 \text{ kN}$$

Wówczas:

$$N_{\mathrm{t,Rd}} = \min(N_{\mathrm{pl,Rd}}, N_{\mathrm{u,Rd}}) = 997 \text{ kN}$$

Nośność przy zginaniu

Przy prostym zginaniu w płaszczyźnie kratownicy (EN 1993-1-1 paragraf 6.2.5):

$$W_{\mathrm{el}} = 85{,}46 \text{ cm}^3$$

$$M_{\mathrm{el,Rd}} = \frac{W_{\mathrm{el}} f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}} = \frac{85{,}46 \times 0{,}355}{1{,}0} = 30{,}3 \text{ kNm}$$

Weryfikacja:

$$\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{t,Rd}}} = \frac{616{,}3}{997} = 0{,}62 < 1$$

$$\frac{M_{\mathrm{Ed}}}{M_{\mathrm{Rd}}} = \frac{1{,}36}{30{,}3} = 0{,}05$$

Kryterium wzajemnego oddziaływania M-N: 0,62 + 0,05 = 0,67 < 1

5 WERYFIKACJA POŁĄCZEŃ

5.1 Charakterystyka połączenia kratownicy ze słupkiem

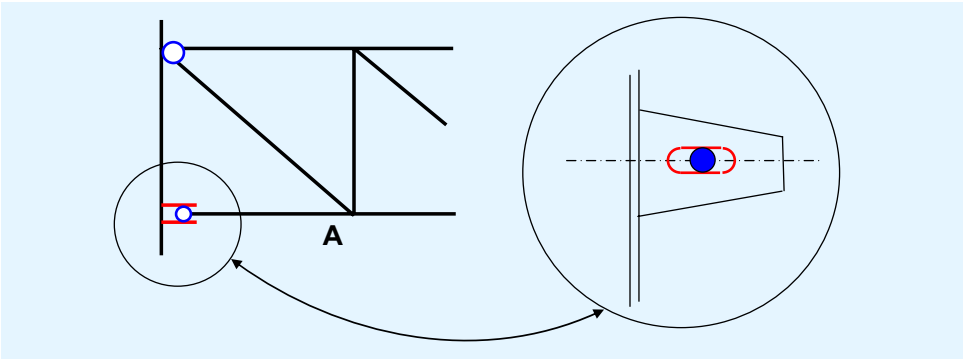
5.1.1 Ogólne

Istotne jest, aby połączyć kratownicę ze słupkiem zgodnie z założeniami przyjętymi podczas modelowania.

Należy w szczególności uwzględnić wymagania dotyczące wyboru połączenia stałego lub przegubowego. Różnica pomiędzy tymi dwoma rodzajami połączenia jest taka, że połączenie przegubowe pozwala na ugięcie niezależne od obrotu kratownicy i słupka. W zakresie obciążenia rezultat jest taki, że przegub nie przenosi żadnych momentów zginających z kratownicy na słupek — inaczej niż w połączeniu stałym.

Obrót w podporze kratownicy przejawia się różnicowym przemieszczeniem poziomym pomiędzy pierwotnym węzłem pasa górnego a pierwotnym węzłem pasa dolnego.

Aby umożliwić obrót globalny, konieczne jest zatem umożliwienie poziomego przemieszczenia końca jednego z pasów względem słupka: zwykle dopuszcza się przemieszczenie tego z pasów, który nie jest połączony z krzyżulcem na podporze.



Rysunek 5.1 Podłużny otwór w dolnym pasie kratownicy

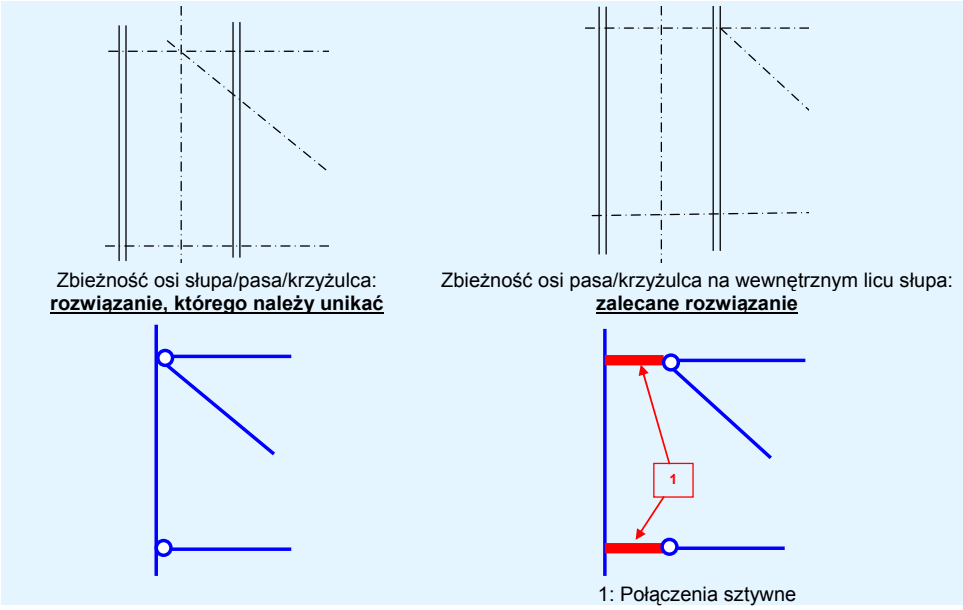
Przy takim układzie wartość siły osiowej w dolnym pasie w pierwszym panelu wynosi zero. Dolny pas pierwszej kratownicy można by zatem pozostawić krótki (co jest widoczne na wykresie w miejscu oznaczonym literą A), niemniej zaleca się jego przedłużenie i połączenie go ze słupkiem w celu zapewnienia stateczności poprzecznej kratownicy na poziomie dolnego pasa.

Przyłożenie tego typu oddziaływania przegubowego w przykładzie praktycznym podano poniżej w punkcie 5.1.2.

Natomiast w celu wykonania połączenia sztywnego kratownicy ze słupem należy wykonać połączenie bez luzu od każdego z pasów kratownicy do słupa.

5.1.2 Zbieżność osi w połączeniu kratownica-słup

Kolejną kwestią, którą należy wziąć po uwagę podczas wykonywania połączenia kratownicy na słupku jest zbieżność osi połączonych elementów oraz jej wpływ na modelowanie. Dostępne rozwiązania zilustrowano na rysunku 5.2.



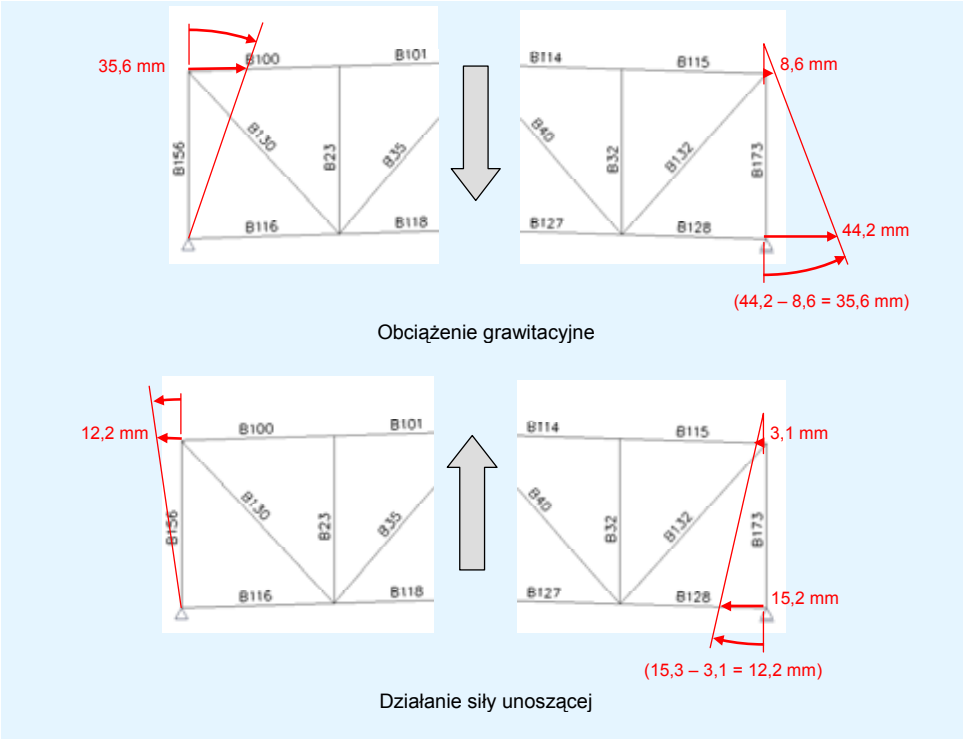
Rysunek 5.2 Sztywne połączenie kratownica-słup

W pierwszym przykładzie rzeczywiste połączenie nie jest zgodne z modelem: istnieje ryzyko powstania znacznych momentów drugorzędnych w krzyżulcu i pasie dźwigara. W drugim przykładzie zgodność jest dużo większa. Moment mimośrodowy jest wyraźnie podparty przez słupek, który charakteryzuje się większą nośnością przy zginaniu niż pas lub krzyżulec, szczególnie, gdy kratownica jest połączona przegubowo ze słupkiem.

Należy zauważyć, że podobna sytuacja nie występuje w przykładzie praktycznym, gdzie środnik słupków jest prostopadły do płaszczyzny kratownicy: zbieżność trzech osi nie powoduje wystąpienia momentów drugorzędnych.

5.1.3 Przykład praktyczny: ustalanie szczegółów połączenia przegubowego

Rysunek 5.3 przedstawia przemieszczenia poziome dolnych i górnych węzłów dwóch odcinków podpór w przypadkach występowania kombinacji obciążeń wynikających z oddziaływań grawitacyjnych w stanie granicznym nośności oraz w przypadkach występowania kombinacji obciążeń wynikających z działania sił podnoszących w stanie granicznym nośności. Można zaobserwować, że gdy konstrukcja jest symetryczna lub symetrycznie obciążona, każda z kombinacji obciążeń wytwarza takie same obroty globalne na obu odcinkach podpór.



Rysunek 5.3 Obroty na podporach kratownicy

Aby obroty globalne na podporach były swobodne (założenie przyjęte w przypadku kratownicy połączonej przegubowo ze słupem), otwory podłużne wykonane w słupie na połączeniu z dolnym pasem dźwigara muszą umożliwić ruch na odległość 35,6 mm w kierunku zewnętrznym oraz 12,2 mm w kierunku wewnętrznym. Oczywiście ostrożność nakazywałaby przyjęcie pewnego marginesu bezpieczeństwa w odniesieniu do wymiarów otworów podłużnych (w przybliżeniu 50 mm) oraz sprawdzenie po zakończeniu budowy, czy pod ciężarem własnym swoboda ruchu pozostała właściwa w obu kierunkach.

5.2 Ciągłość pasa dźwigara

Belki kratownicowe o dużej rozpiętości są często dostarczane na miejsce budowy w kilku częściach. Konieczne jest zatem zapewnienie ciągłych połączeń pasów pomiędzy tymi częściami. Preferowaną metodą wykonywania takich połączeń na miejscu budowy jest na ogół łączenie śrubowe, a nie spawanie.

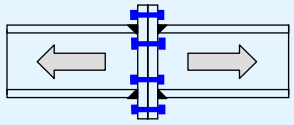
Projekt tych połączeń śrubowych zależy od rodzaju przekroju pasa, który ma zostać połączony. Można jednak wyróżnić dwa typy takich połączeń:

- te, w których śruby poddane są głównie obciążeniom rozciągającym: z użyciem blach doczołowych;
- te, w których śruby są obciążane prostopadle do ich trzonu: z użyciem blach nakładkowych.

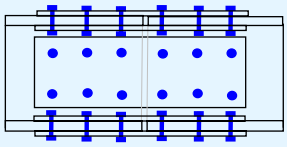
Gdy pasy dźwigara wykonane są z pojedynczego profilu/dwuteownika lub dwuteownika szerokostopowego, można zastosować dowolne z tych połączeń.

Gdy pasy dźwigara wykonane są z dwóch podwójnych kątowników lub ceowników, stosuje się na ogół połączenia stykowe.

Gdy pasy dźwigara wykonane są z przekrojów zamkniętych, stosuje się na ogół połączenia doczołowe (zastosowanie kształtowników zamkniętych wykracza poza zakres niniejszego przewodnika).



Ciągłość przy zastosowaniu połączeń doczołowych



Ciągłość przy zastosowaniu połączeń za pomocą blach nakładkowych

Rysunek 5.4 Ciągłość pasów dźwigara

Połączenie za pomocą blachy nakładkowej pokazane na rysunku 5.4 obejmuje podwójne blachy nakładkowe na środniku i pasach (co daje dwie powierzchnie oddziaływania sił ścinających). Jeśli wartość siły w styku jest niewielka, można zastosować pojedyncze zewnętrzne blachy nakładkowe, chociaż na środniku stosuje się zwykle blachy podwójne w celu zachowania symetrii w przenoszeniu siły osiowej.

Nośność połączeń stykowych pasów kratownicy należy zweryfikować przy obciążeniu dominującym z drugorzędnym momentem zginającym w płaszczyźnie kratownicy, zgodnie z normą EN 1993-1-8, dostosowując metodę komponentów opracowaną z myślą o połączeniach belka-słup. Weryfikacji tej można dokonać przy użyciu powszechnie dostępnego oprogramowania (szczegóły na stronie internetowej SteelBizFrance.com opracowanej przez ośrodek badawczy CTICM). Weryfikacja tego typu połączenia przeprowadzona na potrzeby przykładu praktycznego została przedstawiona w Załączniku A.

Równie ważne jak sprawdzenie nośności jest zapewnienie sztywności połączeń ciągłych pasów dźwigara. Jeżeli nośność połączenia belka-belka zapewniają blachy doczołowe, takie połączenie można na ogół uznać za sztywne.

Połączenia z blachą nakładkową są faktycznie sztywne tylko wtedy, gdy istnieje możliwość kontroli luzu (przykład oceny wpływu luzu w połączeniach śrubowych kratownicy rozpatrywanej w przykładzie praktycznym przedstawiono w punkcie 3.6). W przypadku połączeń z blachą nakładkową zaleca się zatem wybór jednej z poniższych opcji:

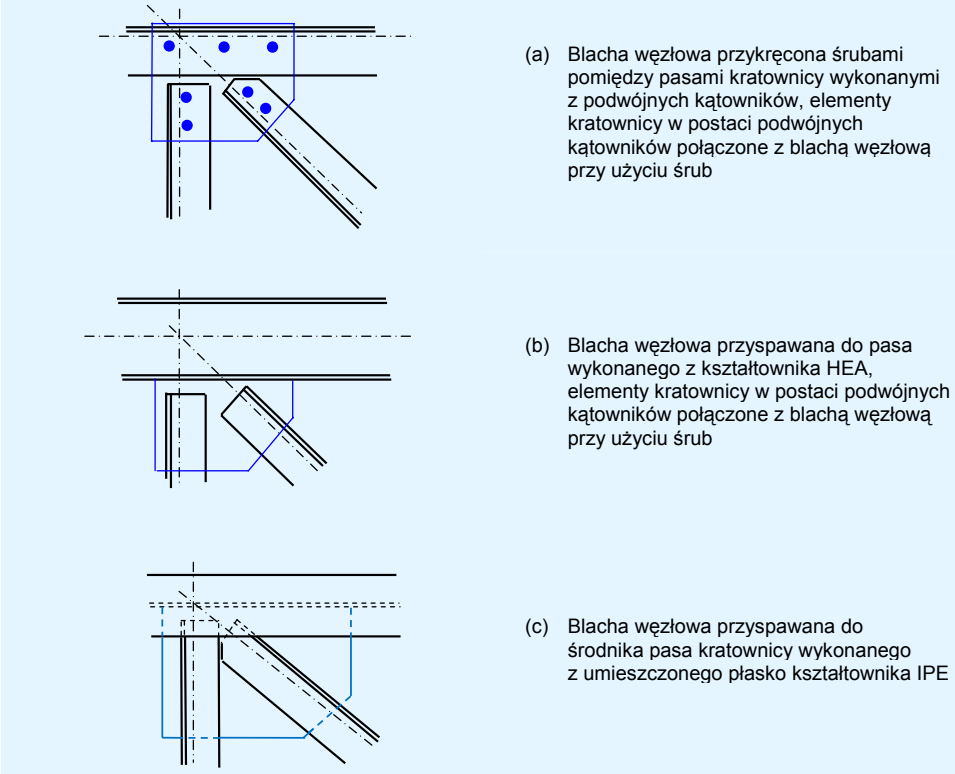
- zastosowanie śrub sprężonych z opcją kontroli dokręcenia, co pozwoli na przenoszenie obciążeń dzięki tarciu (bezpoślizgowe);
- zastosowanie śrub pasowanych, najlepiej obciążonych na trzonie w celu uniknięcia poślizgu pod wpływem obciążenia dzięki odkształceniu gwintu połączonych elementów.

5.3 Połączenie krzyżulców z pasami dźwigara

Połączenia krzyżulców i słupków z pasami można wykonać na wiele sposobów, w zależności od rodzaju przekrojów, które mają zostać połączone.

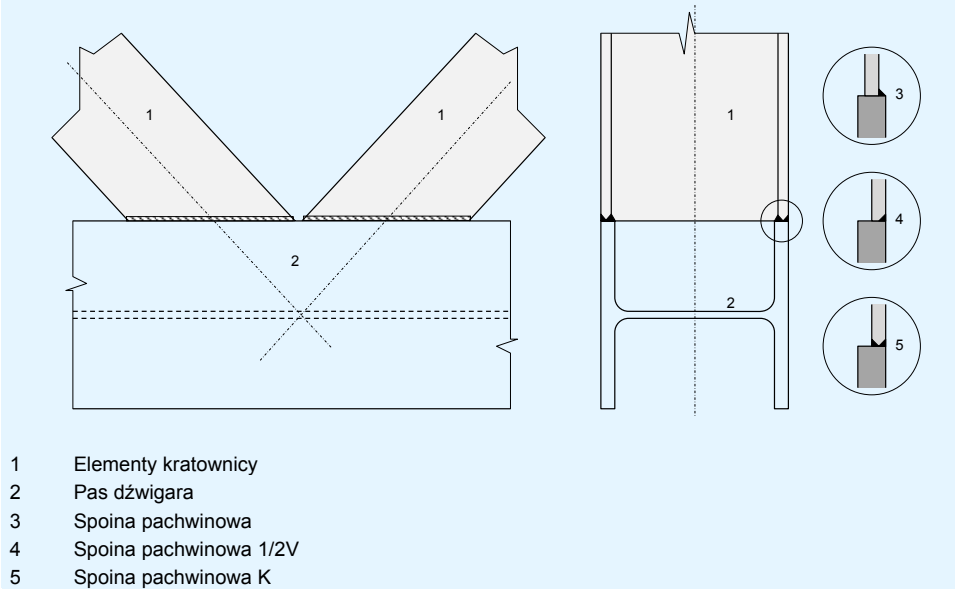
Gdy pasy wykonane są z elementów podwójnych (dwóch kątowników lub dwóch kształtowników UPE), powszechnie stosowaną praktyką jest umieszczenie blach węzłowych pomiędzy dwoma elementami składowymi pasa. Blachy węzłowe są zatem przyspawane lub przykręcane do pasów za pomocą śrub. Krzyżulce i słupki są połączone z blachą węzłową zwykle przy użyciu połączeń śrubowych.

Gdy pasy wykonane są z kształtowników IPE lub HEA/HEB, najczęściej stosowaną metodą łączenia jest użycie spawanej blachy węzłowej na pasie. Blachę węzłową mocuje się do pasa, gdy kształtownik umieszczany jest pionowo (środnik pionowy), lub do środnika, gdy kształtownik umieszczany jest płasko (środnik poziomy).



Rysunek 5.5 Połączenia kratownic na pasie

Gdy kształtowniki pasa dźwigara umieszczone są płasko, równie powszechne jest stosowanie elementów kratownicy wykonanych z kształtowników IPE lub HEA o tej samej wysokości co pasy dźwigara oraz łączenie ich przy użyciu podwójnych blach węzłowych — po jednej na każdym pasie kształtownika. Innym możliwym do zastosowania rozwiązaniem jest zaprojektowanie połączenia spawanego bez użycia blachy węzłowej, jak pokazano na rysunku 5.6.



Rysunek 5.6 Połączenie spawane pomiędzy elementami kratownicy a pasem

Gdy pasy dźwigara są złożone z kształtowników zamkniętych (poza zakresem niniejszego opracowania), stosuje się także połączenie przy użyciu blachy węzłowej przyspawanej do pasa dźwigara. Połączenia krzyżulców i słupków z pasami wykonuje się również przez spawanie bezpośrednie. Wówczas w przypadku połączeń z pasami z kształtowników okrągłych wymagana jest obróbka kształtowa.

Weryfikację nośności śrubowych lub spawanych połączeń z blachą węzłową opisanych powyżej zdefiniowano dokładnie w normie EN 1993-1-8. Nie opisano jednak weryfikacji nośności blachy węzłowej. Weryfikacja stosowanego w omawianym przykładzie praktycznym połączenia blachy węzłowej została podana w Załączniku B.

Należy zwrócić szczególną uwagę na właściwe sprawdzenie blach węzłowych — zwłaszcza tych, których znaczne części są nieusztywnione: wiele problemów dotyczących kratownic wynika z miejscowego wyboczenia blachy węzłowej. Na przykład w połączeniach pokazanych na rysunku 5.5(c), jeśli wysokość środnika umieszczonego płasko pasa nie jest wystarczająca, aby kątowniki składające się na elementy kratownicy mogły zostać połączone w pobliżu środnika, należy dokładnie zbadać nieusztywnioną część blachy węzłowej i jej stateczność.

Chociaż kratownice z kształtowników zamkniętych nie są przedmiotem niniejszego przewodnika, należy zauważyć, że w normie EN 1993-1-8 jeden rozdział dotyczy projektowania połączeń spawanych kształtowników zamkniętych.

W połączeniach z pasami należy także kontrolować poślizg (jak w przypadku pasów ciągłych), tak aby mieć kontrolę nad przemieszczeniami elementów konstrukcyjnych i zarazem nad rozkładem sił w przypadku konstrukcji hiperstatycznej.

LITERATURA

1 Jednokondygnacyjne konstrukcje stalowe. Część 7: Inżynieria pożarowa.

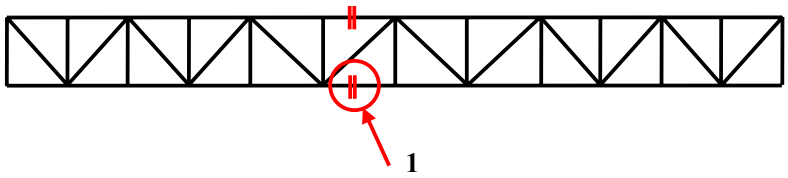
2 EN 1993-1-8:2005 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1.8 Projektowanie połączeń.

3 EN 1993-1-1: 2005, Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1.1 Reguły ogólne i reguły dla budynków.

ZAŁĄCZNIK A
Przykład praktyczny — Projektowanie ciągłego połączenia pasa przy zastosowaniu połączeń z blachami nakładkowymi

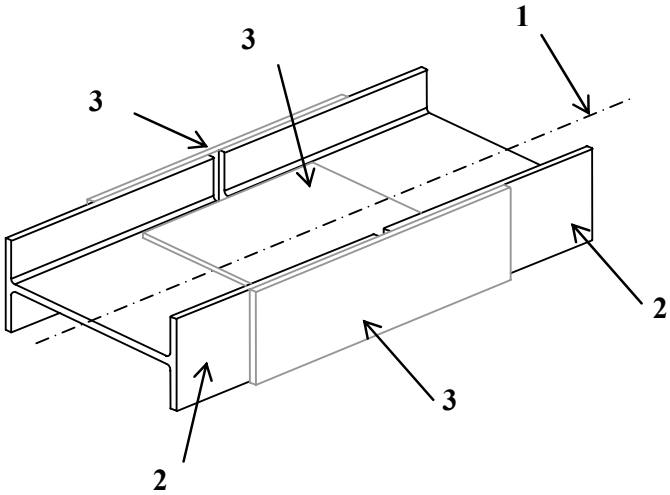
1. Połączenie stykowe przy użyciu nakładek mocowanych na śruby

Niniejszy arkusz obliczeniowy dotyczy połączenia za pomocą blachy nakładkowej zlokalizowanego na rysunku A.1. W połączeniu tym zastosowano podwójne blachy nakładkowe na środniku oraz pojedynczą zewnętrzną blachę nakładkową na pasach (patrz rysunek A.2).



1 Omawiane połączenie za pomocą blachy nakładkowej

Rysunek A.1 Umiejscowienie połączeń z blachami nakładkowymi



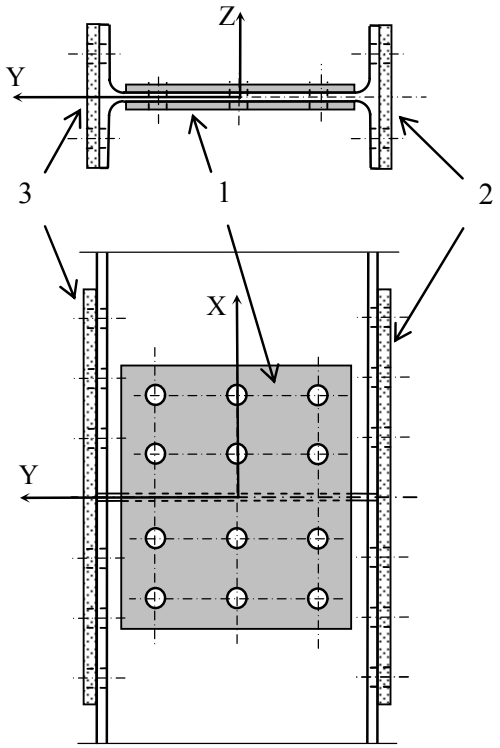
1 Oś wzdłużna
2 Dolne pasy dźwigara do montażu (IPE 330)
3 Połączenie za pomocą blachy nakładkowej

Rysunek A.2 Zapewnienie ciągłości pasów dźwigara przy użyciu połączeń z blachami nakładkowymi

Nośność tego połączenia należy sprawdzić w warunkach oddziaływania osiowej siły rozciągającej z drugorzędnym momentem w płaszczyźnie kratownicy.

Należy sprawdzić cztery nakładki połączone przy pomocy śrub (patrz rysunek A.3)

Bardzo ważne jest także zapewnienie sztywności połączenia ciągłych pasów dźwigara. Wymagane jest połączenie odporne na poślizg.



1 Nakładki środnika pasa dźwigara
2 Nakładka pasa 1 kształtownika (po prawej stronie)
3 Nakładka pasa 2 kształtownika (po lewej stronie)

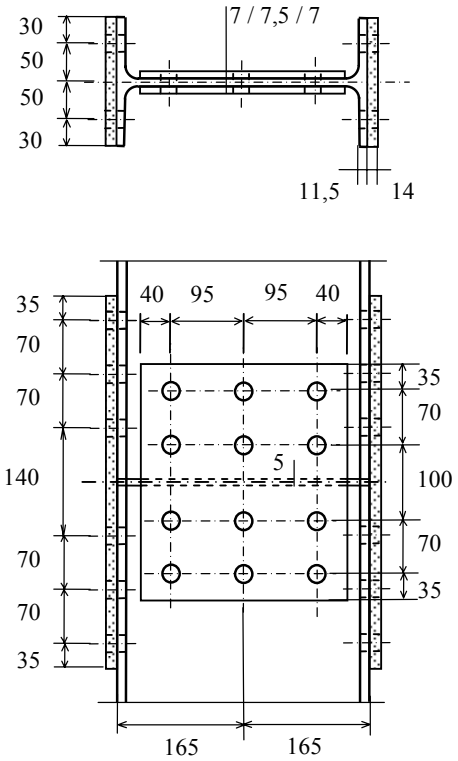
Rysunek A.3 Nakładki

Ogólny układ współrzędnych jest następujący:

płaszczyzna XOZ to płaszczyzna kratownicy,
płaszczyzna XOY to płaszczyzna środnika pasa dźwigara.

2. Dane podstawowe

Wymiary nakładek i rozmieszczenie otworów pokazano na rysunku A.4.



Rysunek A.4 Wymiary (w mm) i rozmieszczenie

Dane dotyczące materiałów (za wyjątkiem śrub)

Dwuteownik i nakładki wykonane ze stali gatunku S355 według normy EN 10025-2. — EN 1993-1-1 Tabela 3.1

Gatunek stali	S355	
Granica plastyczności	f_y	= 355 N/mm^2
Wytrzymałość na rozciąganie	f_u	= 510 N/mm^2

Dane dotyczące belki dwuteowej

Wysokość	h	= 330 mm
Szerokość pasa	b	= 160 mm
Grubość środnika	t_w	= 7,5 mm
Grubość pasa	t_f	= 11,5 mm
Promień zaokrąglenia między pasem a środnikiem	r	= 18 mm
Pole przekroju poprzecznego	A	= 62,61 cm^2
Moment bezwładności przekroju względem osi	I_y	= 788,1 cm^4
Plastyczny wskaźnik wytrzymałości	$W_{pl,y}$	= 153,7 cm^3

Dane dotyczące połączeń śrubowych

Kategoria połączeń śrubowych — Kategoria C

Klasa śrub — Klasa 10.9

Granica plastyczności — f_{yb} = 900 N/mm^2

Wytrzymałość na rozciąganie — f_{ub} = 1000 N/mm^2

EN 1993-1-8
Tabela 3.1

W przypadku nakładek pasów

- Nominalna średnica śruby — d_f = 22 mm
- Średnica otworu — $d_{0,f}$ = 24 mm

W przypadku nakładek środnika

- Nominalna średnica śruby — d_w = 18 mm
- Średnica otworu — $d_{0,w}$ = 20 mm

Współczynniki częściowe (zalecane wartości)

Stal konstrukcyjna	γ_{M0}	= 1,00
Stal konstrukcyjna	γ_{M2}	= 1,25
Śruby	γ_{M2}	= 1,25
Śruby	γ_{M3}	= 1,25

EN 1993-1-1
6.1 UWAGA 2B

EN 1993-1-8
2.2 UWAGA

Siły wewnętrzne

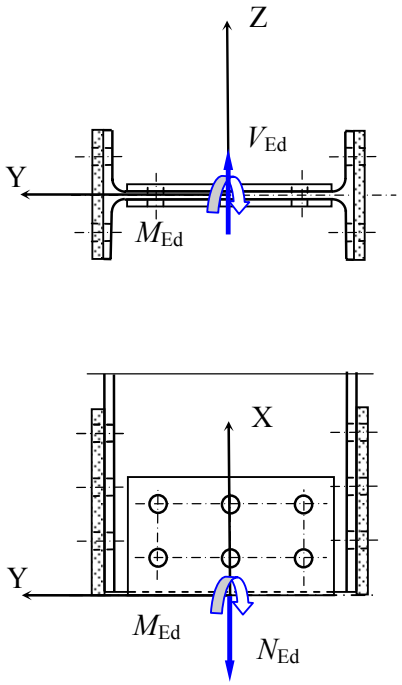
Informacje na temat kierunku sił wewnętrznych można znaleźć na rysunku A.5.

M_{Ed} = 1,71 kNm (względem osi *y-y*)

V_{Ed} = 1,7 kN

N_{Ed} = 1567,4 kN (siła rozciągająca)

Uwaga: nie trzeba brać pod uwagę momentu zginającego ani siły ścinającej. Wielkości te zostały jednak uwzględnione na niektórych etapach w celu zaprezentowania sposobu przeprowadzania obliczeń przy występowaniu tego typu sił wewnętrznych.



Rysunek A.5 Siły i momenty wewnętrzne

3. Klasyfikacja przekroju poprzecznego pasa dźwigara

Aby dokonać klasyfikacji przekroju poprzecznego, należy znać rozkład naprężeń normalnych.

EN 1993-1-1
Tabela 5.2
Arkusz 2 z 3

W przypadku środnika uwzględnia się naprężenie równomierne wynoszące:

$$\sigma_w = \frac{N_{Ed}}{A} = -250{,}34 \text{ N/mm}^2$$

W przypadku pasów wynosi ono:

$$\sigma_i = \frac{N_{Ed}}{A} - \frac{M_{Ed}}{I_{yy} / v_i}$$

Gdzie v_i to położenie analizowanego włókna.

W przypadku górnej części ($Z > 0$) pasa:

$$v_1 = b_f / 2 \text{ oraz } v_2 = t_w / 2 + r$$

$$\sigma_1 = 180{,}91 \text{ N/mm}^2,\ \sigma_2 = 245{,}62 \text{ N/mm}^2$$

Natomiast w przypadku dolnej części ($Z < 0$) pasa:

$$v_1 = -(b_f / 2) \text{ oraz } v_2 = -(t_w / 2 + r)$$

$$\sigma_1 = 319{,}78 \text{ N/mm2},\ \sigma_2 = 255{,}06 \text{ N/mm}^2$$

W świetle uzyskanych wyników przekrój poprzeczny poddany na całej powierzchni rozciąganiu uznaje się za przekrój klasy 1.

4. Analiza globalna przekroju poprzecznego pasa dźwigara

4.1. Wpływ siły ścinającej

EN 1993-1-1 6.2.10

Wyznaczenie $\dfrac{V_{\mathrm{Ed}}}{V_{\mathrm{pl,Rd}}}$

Przy: $A_{\mathrm{v}} = A - h_w t_{\mathrm{w}} = 3959\ \mathrm{mm}^2$

$$V_{\mathrm{pl,Rd}} = \frac{A_{\mathrm{v}}\left(f_{\mathrm{y}} / \sqrt{3}\right)}{\gamma_{\mathrm{M0}}} = 811{,}3\ \mathrm{kN}$$

EN 1993-1-1 6.2.6(2)

Skąd $\dfrac{V_{\mathrm{Ed}}}{V_{\mathrm{pl,Rd}}} = 0{,}002 < 0{,}5$

EN 1993-1-1 6.2.10 (2)

Zatem nie trzeba uwzględniać żadnej redukcji wynikającej z występowania siły ścinającej.

4.2. Kombinacja *M* + *N* — wpływ siły osiowej

EN 1993-1-1 6.2.9.1

$$N_{\mathrm{Ed}} = 1567{,}4 > \frac{h_{\mathrm{w}} t_{\mathrm{w}} f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}} = 817{,}4\ \mathrm{kN}$$

EN 1993-1-1 6.2.9.1 (5)

Należy uwzględnić naddatek ze względu na wpływ siły osiowej.

4.3. Kombinacja *M* + *N* — uwzględnienie otworów na elementy złączne

Siła osiowa

Przy oddziaływaniu osiowej siły rozciągającej należy przeanalizować otwory na elementy złączne.

Połączenie kategorii C ⇒ obliczeniowa nośność przy rozciąganiu wynosi:

EN 1993-1-1 6.2.3(4)

$$N_{\mathrm{t,Rd}} = N_{\mathrm{net,Rd}} = \frac{A_{\mathrm{net}} f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}}$$

W przypadku przekroju poprzecznego netto uwzględniono 7 otworów na element złączny (po 2 na pas i 3 na środnik).

Powierzchnia netto wynosi: $A_{\mathrm{net}} = 4707\ \mathrm{mm}^2$

Zatem: $N_{\mathrm{net,Rd}} = 1671\ \mathrm{kN}$

Moment zginający

Przy $A_f = b t_f$ oraz $A_{f,net} = A_f - 2 d_{0,f} t_f$

W przypadku każdego pasa poddanego rozciąganiu należy sprawdzić:

$$\frac{A_{f,net} 0{,}9 f_u}{\gamma_{M2}} = 473 < \frac{A_f f_y}{\gamma_{M0}} = 653{,}2 \text{ kN}$$

EN 1993-1-1 6.2.5 (4)

Należy zatem uwzględnić otwory na elementy złączne w pasie.

Przy $A_{net} = A - 4 d_{0,f} t_f - 3 d_{0,w} t_w$

W przypadku całej powierzchni rozciągania należy sprawdzić:

$$\frac{A_{net} 0{,}9 f_u}{\gamma_{M2}} = 1728{,}4 < \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = 2222{,}7 \text{ kN}$$

EN 1993-1-1 6.2.5 (5)

Należy zatem uwzględnić otwory na elementy złączne w środniku.

Nośność obliczeniowa przy zginaniu

Przy zastosowaniu kształtownika IPE 330: $W_{pl,y} = 153{,}7 \text{ cm}^3$

d_z = 50 mm = odległość od środka otworów w pasie do osi *z-z*

$W_{pl,y,holes} = 4\left(d_{0,f} t_f d_z\right) = 55{,}2 \text{ cm}^3$

Nośność obliczeniowa przy zginaniu plastycznym przekroju netto wynosi:

$$M_{pl,Rd} = \frac{\left(W_{pl,y} - W_{pl,y,holes}\right) f_y}{\gamma_{M0}} = 34{,}967 \text{ kNm}$$

EN 1993-1-1 6.2.5(2)

4.4. Kombinacja *M* + *N* — weryfikacja

Należy sprawdzić następujące kryterium:

$M_{Ed} \le M_{N,Rd}$

EN 1993-1-1 6.2.9.1(1)

Przy: $n = \dfrac{N_{Ed}}{N_{net,Rd}} = 0{,}938$

EN 1993-1-1 6.2.9.1(3)

$a = \min\left\{(A - 2 b t_f)/A; 0{,}5\right\} = 0{,}412$

Otrzymujemy: $M_{N,Rd} = M_{pl,Rd}\left[1 - \left(\dfrac{n-a}{1-a}\right)^2\right] = 6{,}99 \text{ kNm}$

$M_{Ed} = 1{,}71 < M_{N,Rd} = 6{,}99 \text{ kNm}$ OK

5. Rozkład sił wewnętrznych

EN 1993-1-8 2.5

Należy zauważyć, że środnik znajduje się w płaszczyźnie poziomej.

5.1. Siła osiowa

Siła osiowa jest rozdzielona pomiędzy środnik i pasy. Rozkład ten zależy od stosunku przekroju poprzecznego brutto środnika do przekroju pasów. Zaokrąglenia uznawane są za część pasa.

Zatem przy: $A_{\mathrm{w}} = (h - 2t_{\mathrm{f}})t_{\mathrm{w}} = 2302{,}5\ \mathrm{mm}^2$

$A_{\mathrm{f}} = (A - A_{\mathrm{w}})/2 = 3958{,}5\ \mathrm{mm}^2$ (na pas)

Wówczas: $N_{\mathrm{N,w}} = N_{\mathrm{Ed}} A_{\mathrm{w}} / A = 576{,}4\ \mathrm{kN}$

$N_{\mathrm{N,f}} = \left(N_{\mathrm{Ed}} - N_{\mathrm{N,w}}\right)/2 = 495{,}5\ \mathrm{kN}$

5.2. Siła ścinająca

Siła ścinająca jest przenoszona w całości przez pasy.

Tak więc: $V_{\mathrm{V,f}} = V_{\mathrm{Ed}}/2$ (na pas)

5.3. Moment zginający

Moment zginający względem osi słabej jest w całości przenoszony przez pasy:

$M_{\mathrm{M,f}} = 0{,}855\ \mathrm{kNm}$ na każdy pas

6. Siły wewnętrzne w każdej z połączonych części

6.1. Połączenie środników

Nakładka środników (wraz ze śrubami) poddawana jest jedynie działaniu siły osiowej:

$N_{N,w}$ = 576,4 kN

6.2. Połączenie pasów

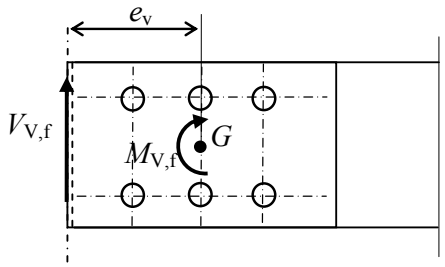
Każda z nakładek pasów (wraz ze śrubami) poddawana jest działaniu:

- siły osiowej $N_{N,f}$ = 495,49 kN,
- siły ścinającej $V_{V,f}$ = 0,85 kN,
- momentu zginającego $M_{M,f}$ = 0,855 kNm.

Moment wywołany mimośrodowością siły ścinającej w stosunku do środka masy połączenia (patrz rysunek A.6):

$$M_{V,f} = V_{V,f}\ e_V$$

Przy: e_V= 140 mm $M_{V,f}$ = 0,119 kNm



Rysunek A.6 Moment wywołany mimośrodowością siły ścinającej

6.3. Podsumowanie sił i momentów wewnętrznych

W środniku: N_w = 576,42 kN

W jednym pasie: N_f = 495,49 kN

V_f = 0,85 kN

M_f = 0,97 kN

7. Weryfikacja połączenia środnika

Połączenie środników jest połączeniem dwuzakładkowym.

Weryfikacji poddany zostanie element środnika i odpowiednio tylko jeden element blachy.

7.1. Szczegółowe rozwiązania projektowe

EN 1993-1-8 Tabela 3.3

Przyjmuje się, że konstrukcja nie jest poddana oddziaływaniom atmosferycznym ani innym wpływom korozyjnym.

Szczegółowe rozwiązania projektowe sprawdzono w tabelach poniżej w odniesieniu do elementu środnika i elementu blachy.

Tabela A.1 Połączenie środników — element środnika — szczegółowe rozwiązania projektowe

Odległość lub rozstaw	Wartość min.	Wartość obliczeniowa	Wartość maks.
e_1	24	47,5	
e_2	24	1)	
p_1	44	70	105
p_2	48	95	105

1) Nie ma zastosowania z powodu bliskości pasa

Tabela A.2 Połączenie środników — element blachy — szczegółowe rozwiązania projektowe

Odległość lub rozstaw	Wartość min.	Wartość obliczeniowa	Wartość maks.
e_1	24	35	
e_2	24	40	
p_1	44	70	98
p_2	48	95	98

7.2. Obliczeniowa siła ścinająca $F_{V,Ed}$ na każdą śrubę

EN 1993-1-8 3.12 (3)

$$F_{V,Ed,w} = \frac{N_w}{6} = 96{,}07 \text{ kN}$$ na każdy element środnika

$$F_{V,Ed,p} = \frac{N_w/2}{6} = 48{,}03 \text{ kN}$$ na każdy element blachy

7.3. Obliczeniowa nośność na poślizg $F_{S,Rd}$

Analizując: Śruby w otworach normalnych $\Rightarrow$ $k_s = 1,0$

Klasa powierzchni ciernych = Klasa A $\Rightarrow$ $\mu = 0,5$

Oraz przy: $A_{s,w} = 192\ \text{mm}^2$ pole przekroju śruby, w której występują naprężenia rozciągające

$F_{p,c} = 0,7 f_{ub} A_{s,w} = 134{,}4\ \text{kN}$ siła naprężenia wstępnego

n liczba powierzchni ciernych

$n_w = 2$ w odniesieniu do elementu środnika

$n_p = 1$ w odniesieniu do elementu blachy

Wówczas:

$$F_{s,Rd,w} = \frac{k_s n_w \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,c} = 107{,}52\ \text{kN}$$

EN 1993-1-8 3.9.1 (1)

$$F_{s,Rd,p} = \frac{k_s n_p \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,c} = 53{,}76\ \text{kN}$$

7.4. Obliczeniowa nośność przy docisku $F_{b,Rd}$ każdej śruby

W tabeli 3.4 normy EN 1993-1-8 podano wzory na obliczeniową nośność przy docisku. W tych wzorach współczynniki α_b i k_1 zależą od orientacji obciążenia, pozycji w porównaniu z końcami elementu oraz rozmieszczenia innych śrub.

EN 1993-1-8 Tabela 3.4

Ogólny wzór na obliczeniową nośność przy docisku jest następujący:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d\, t}{\gamma_{M2}}$$

EN 1993-1-8 Tabela 3.4

Zgodnie z tabelą 3.4. Eurokodu 1993-1-8 współczynniki α_b i k_1 wyznacza się z zależności:

Śruby końcowe

$$\alpha_{b,end} = \min\left\{\frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1{,}0\right\}$$

$$k_{1,end} = \min\left\{1{,}4\frac{p_2}{d_0} - 1{,}7; 2{,}8\frac{e_2}{d_0} - 1{,}7; 2{,}5\right\}$$

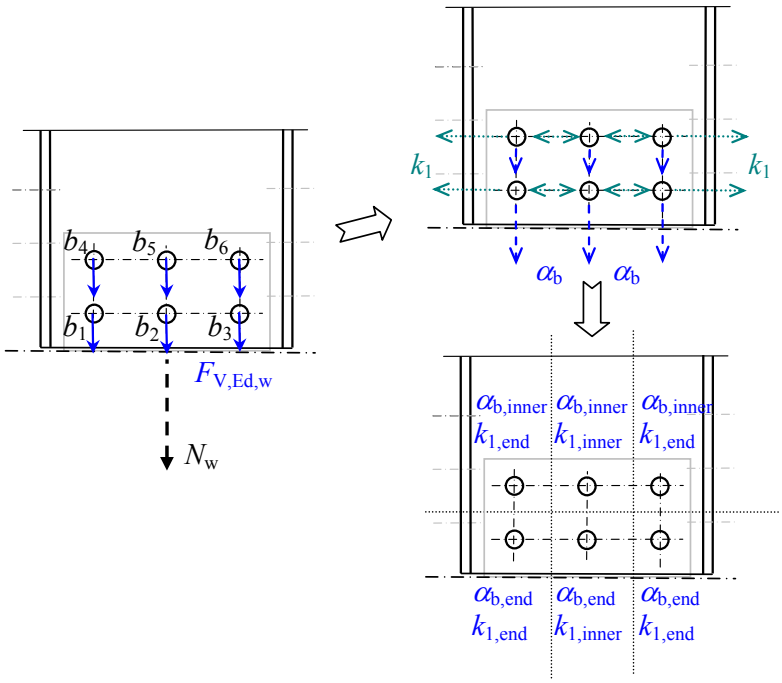
Śruby wewnętrzne

$$\alpha_{b,inner} = \min\left\{\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1{,}0\right\}$$

$$k_{1,inner} = \min\left\{1{,}4\frac{p_2}{d_0} - 1{,}7; 2{,}5\right\}$$

Element środnika

Na rysunku A.7 pokazano sposób postępowania przy wyznaczaniu współczynników α_b i k_1.



Rysunek A.7 Połączenie środników — element środnika — określenie typu śrub

Wyznaczanie współczynników k_1 przeprowadza się prostopadle do kierunku przenoszenia obciążenia. Możliwe są jednak dwa kierunki prostopadłe do wyżej wspomnianego i w przypadku niektórych śrub (b_1, b_4, b_3 i b_6) określenie, czy są one śrubami końcowymi czy wewnętrznymi, może nastręczać trudności.

W takich wypadkach należy wybrać wartość minimalną współczynnika $k_{1,inner}$ oraz $k_{1,end}$. Zauważając, że $\min\{k_{1,inner}; k_{1,end}\} = k_{1,end}$, śruby te uznaje się za śruby końcowe.

Dodatkowo należy pamiętać, że odległość od krawędzi e_2 nie ma zastosowania w przypadku elementu środnika z uwagi na bliskość pasa. Zatem wzory na współczynniki $k_{1,inner}$ oraz $k_{1,end}$ są identyczne.

Jako że siła ścinająca ma tę samą wartość w przypadku każdej śruby i ponadto:

$k_{1,inner} = k_{1,end} = 2{,}50$

uwzględnia się więc tylko jeden rząd śrub, na przykład śruby b_1 i b_4.

Zatem w przypadku śruby b_1:

$\alpha_{b,b1} = \alpha_{b,b1,end} = 0{,}79$

$F_{b,b1,Rd,w} = 109{,}01\,\text{kN}$

Oraz w przypadku śruby b_4:

$\alpha_{b,b4} = \alpha_{b,b4,inner} = 0{,}92$

$F_{b,b4,Rd,w} = 126{,}23\ \text{kN}$

Stąd ostatecznie dla elementu środnika:

$F_{b,Rd,w} = 109{,}01\ \text{kN}$

Element blachy

Inaczej niż w przypadku elementu środnika, należy zauważyć, że w przypadku blachy śruby b_1, b_2, b_3 stają się śrubami wewnętrznymi, a śruby b_4, b_5, b_6 stają się śrubami końcowymi (patrz Rysunek A.8).

Zatem w przypadku śruby b_1:

$\alpha_{b,b1} = \alpha_{b,b1,inner} = 0{,}92$

$F_{b,b1,Rd,p} = 117{,}81\ \text{kN}$

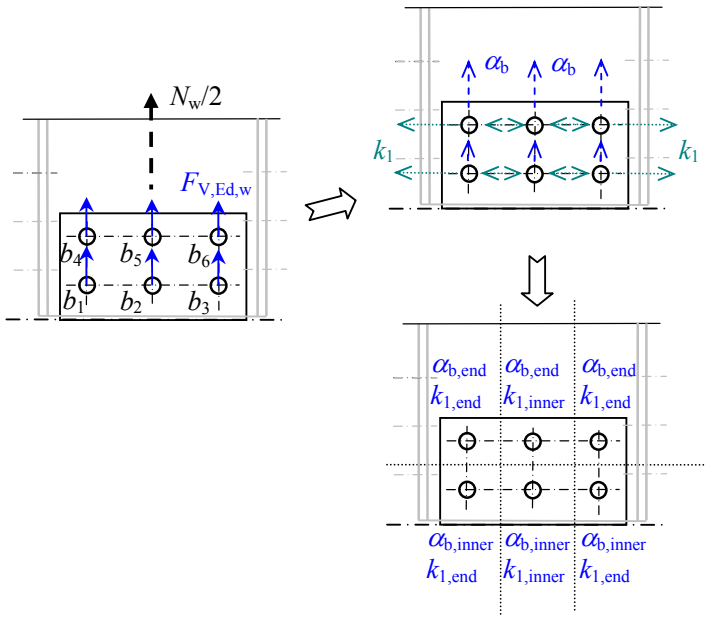
Oraz w przypadku śruby b_4:

$\alpha_{b,b4} = \alpha_{b,b4,end} = 0{,}58$

$F_{b,b4,Rd,p} = 74{,}97\ \text{kN}$

Ostatecznie dla elementu blachy nośność powinna wynosić:

$F_{b,Rd,p} = 74{,}97\ \text{kN}$



Rysunek A.8 Połączenie środników — element blachy — określenie typu śrub

7.5. Sprawdzanie śrub

7.5.1. W odniesieniu do elementu środnika

Kontrola indywidualna

Obliczeniowa nośność przy docisku $F_{\mathrm{V,Ed,w}} = 96{,}07 < F_{\mathrm{b,Rd,w}} = 109{,}01\,\mathrm{kN}$

Obliczeniowa nośność na poślizg $F_{\mathrm{V,Ed,w}} = 96{,}07 < F_{\mathrm{s,Rd,w}} = 107{,}52\,\mathrm{kN}$

EN 1993-1-8 Tabela 3.2

Grupa elementów złącznych

Nośność przy ścinaniu na płaszczyznę ścinania $F_{\mathrm{v,Rd}}$ przyjmuje się jako:

EN 1993-1-8 Tabela 3.4

$$F_{\mathrm{v,Rd}} = \frac{\alpha_{\mathrm{v}} f_{\mathrm{ub}} A}{\gamma_{\mathrm{M2}}}$$

Uwzględniając fakt, że płaszczyzna ścinania nie przechodzi przez gwintowaną część śruby w otworach normalnych:

$\Rightarrow \quad \alpha_{\mathrm{v}} = 0{,}6$

$\Rightarrow \quad A = 254{,}47\ \mathrm{mm}^2$ (przekrój poprzeczny śruby — brutto)

Wówczas: $F_{\mathrm{v,Rd}} = 122{,}15\ \mathrm{kN}$

Jako że $F_{\mathrm{v,Rd}} > F_{\mathrm{b,Rd,w}}$ jedynie w przypadku trzech śrubach, z obliczeń grupy elementów złącznych:

EN 1993-1-8 3.7

$$F_{gr,\mathrm{b,Rd,w}} = n_{\mathrm{bi}} \times \min\left\{F_{\mathrm{b,bi,Rd,w}}\right\} = 6 \times 109{,}01 = 654{,}06\ \mathrm{kN}$$

Wówczas: $\left|N_{\mathrm{w}}\right| = 576{,}42 < F_{gr,\mathrm{b,Rd,w}} = 654{,}06\ \mathrm{kN}$

7.5.2. W odniesieniu do elementu blachy

Kontrola indywidualna

Obliczeniowa nośność przy docisku $F_{\mathrm{V,Ed,p}} = 48{,}03 < F_{\mathrm{b,Rd,p}} = 74{,}97\ \mathrm{kN}$

Obliczeniowa nośność na poślizg $F_{\mathrm{V,Ed,p}} = 48{,}03 < F_{\mathrm{s,Rd,p}} = 53{,}76\ \mathrm{kN}$

EN 1993-1-8 Tabela 3.2

Grupa elementów złącznych

Nośność przy ścinaniu na płaszczyznę ścinania $F_{\mathrm{v,Rd}}$ wynosi:

$F_{\mathrm{v,Rd}} = 122{,}15\ \mathrm{kN}$

Jako że $F_{\mathrm{v,Rd}} > F_{\mathrm{b,Rd,p}}$ dla każdej ze śrub, z obliczeń grupy elementów złącznych:

EN 1993-1-8 3.7

$$F_{\mathrm{gr,b,h,Rd}} = \sum_{1}^{n_{bi}} F_{\mathrm{b,bi,h,Rd}} = 3 \times 117{,}81 + 3 \times 74{,}97 = 578{,}34\ \mathrm{kN}$$

Wówczas: $\left|N_{\mathrm{w}} / 2\right| = 228{,}21 < F_{gr,\mathrm{b,Rd}} = 578{,}34\ \mathrm{kN}$

7.6. Projekt przekroju poprzecznego netto

W przypadku połączenia poddanego rozciąganiu należy sprawdzić obliczeniową nośność przy rozciąganiu przekroju poprzecznego netto przy otworach na śruby:

EN 1993-1-8 Tabela 3.2

$$\sum_{1}^{n_b} F_{V,Ed} \le N_{net,Rd}$$

gdzie n_b to liczba śrub umieszczonych w danym przekroju poprzecznym netto.

7.6.1. Element środnika

Przekrój poprzeczny netto przyjmuje się jako

$$A_{w,net} = A_w - 3d_{0,w}t_w = 1852{,}5 \text{ mm}^2$$

Wytrzymałość obliczeniowa wynosi:

$$N_{w,net,Rd} = \frac{A_{w,net} f_y}{\gamma_{M0}} = 657{,}64 \text{ kN}$$

Wówczas: $$N_{w,net,Rd} = 657{,}64 > \sum_{1}^{3} F_{V,Ed,w} = 3 \times 96{,}07 = 288{,}21 \text{ kN}$$

7.6.2. Element blachy

Przekrój poprzeczny netto przyjmuje się jako

$$A_{p,net} = A_p - 3d_{0,w}t_p = 1470 \text{ mm}^2$$

Wytrzymałość obliczeniowa wynosi:

$$N_{p,net,Rd} = \frac{A_{p,net} f_y}{\gamma_{M0}} = 521{,}85 \text{ kN}$$

Wówczas: $$N_{w,net,Rd} = 521{,}85 > \sum_{1}^{3} F_{V,Ed,w} = 3 \times 48{,}03 = 144{,}10 \text{ kN}$$

7.7. Projektowanie z uwagi na rozerwanie blokowe

Na rysunku A.9 przedstawiono rozerwanie blokowe w przypadku środnika i blachy.

EN 1993-1-8 3.10.2 (1)

7.7.1. Element środnika

Grupa śrub jest poddana obciążeniu koncentrycznemu.

EN 1993-1-8 3.10.2 (2)

Oraz przy: $$A_{nt} = (2p_2 - 2d_0)t_w = 1125 \text{ mm}^2$$

$$A_{nv} = 2(e_1 + p_1 - 1{,}5d_0)t_w = 1312{,}5 \text{ mm}^2$$

Wówczas: $$V_{eff,1,Rd} = 728{,}01 \text{ kN}$$

$$V_{eff,1,Rd} = 728{,}01 > N_w = 576{,}42 \text{ kN}$$

7.7.2. Element blachy

Opisano dwa przykłady rozerwania blokowego. W obu przypadkach powierzchnia ścinania jest jednakowa. Analizuje się więc sytuację, której efektem jest najmniejsza powierzchnia poddana rozciąganiu. Grupa śrub jest poddana obciążeniu koncentrycznemu.

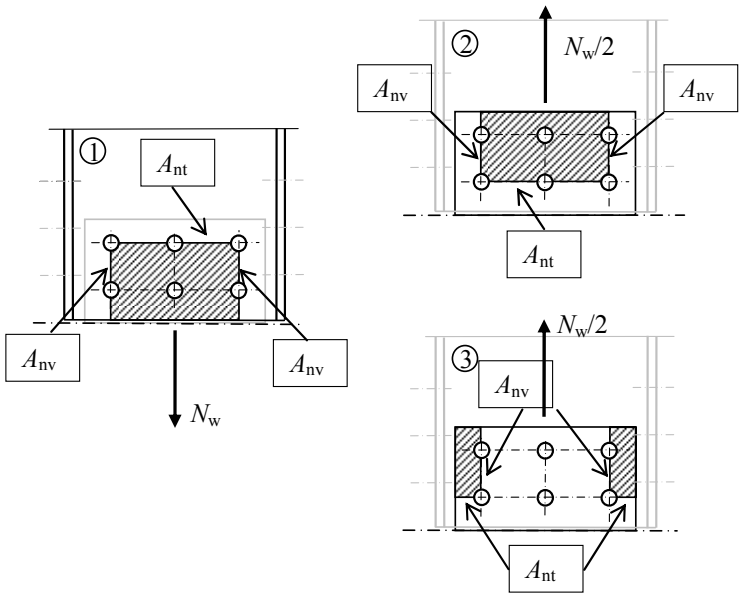
EN 1993-1-8 3.10.2 (2)

Oraz przy: $A_{nt} = (2e_2 - d_0)t_p = 420\ \text{mm}^2$

$A_{nv} = 2(e_1 + p_1 - 1{,}5d_0)t_p = 1050\ \text{mm}^2$

$V_{eff,1,Rd} = 386{,}57\ \text{kN}$

Tak więc: $V_{eff,1,Rd} = 386{,}57 > N_w / 2 = 288{,}21\ \text{kN}$



1 Rozerwanie blokowe w przypadku elementu środnika (obciążenie koncentryczne)
2 Pierwsze rozerwanie blokowe w przypadku elementu blachy (obciążenie koncentryczne)
3 Drugie rozerwanie blokowe w przypadku elementu blachy (obciążenie koncentryczne)

Rysunek A.9 Rozerwanie blokowe w przypadku połączenia środników

8. Sprawdzanie połączenia pasów

Połączenie pasów jest połączeniem jednozakładkowym.

Sprawdzone zostaną element pasa i element blachy.

Zasadniczo przy występowaniu kombinacji obciążeń na każdą śrubę otrzymujemy obliczeniową siłę ścinającą działającą nierównolegle do krawędzi elementów składowych. W takiej sytuacji zgodnie z Eurokodem nośność przy docisku można sprawdzić osobno dla składowych obciążeń śrub równoległych do krańca elementów składowych i normalnych względem krańca tych elementów.

EN 1993-1-8 Tabela 3.4 [3)]

$F_{V,bi,h,Ed} \leq F_{b,bi,h,Rd}$

$F_{V,bi,v,Ed} \leq F_{b,bi,v,Rd}$

W publikacji ECCS P126 (European recommendations for the Design of Simple Joints in Steel Structures — 2009) proponuje się przeprowadzenie dodatkowej kontroli w oparciu o zależność dotyczącą interakcji:

$$\left(\frac{F_{V,bi,h,Ed}}{F_{b,bi,h,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{V,bi,v,Ed}}{F_{b,bi,v,Rd}}\right)^2 \leq 1$$

Składowe obciążenia zostaną obliczone w bazie $\{h, v\}$ znajdującej się w środku ciężkości połączenia i zorientowanej według głównych kierunków pasa (patrz rysunek A.10).

8.1. Szczegółowe rozwiązania projektowe

EN 1993-1-8 Tabela 3.3

Przyjmuje się, że kratownica nie jest poddana oddziaływaniom atmosferycznym ani innym wpływom korozyjnym.

Szczegółowe rozwiązania projektowe należy sprawdzić względem obu kierunków obciążenia. Biorąc pod uwagę ograniczenia określone w tabeli 3.3 normy EN 1993-1-8, następujące wymagania muszą zostać spełnione:

$\min\{e_1; e_2\} \geq 1{,}2\, d_0$

$\min\{p_1; p_2\} \geq 2{,}2\, d_0$

$\max\{p_1; p_2\} \leq \min\{14t; 200\,\text{mm}\}$

Poniższe tabele umożliwiają sprawdzenie szczegółowych rozwiązań projektowych w odniesieniu do każdego elementu składowego.

Tabela A.3 Połączenie pasów — element blachy — szczegółowe rozwiązania projektowe

Odległość lub rozstaw	Wartość min.	Wartość obliczeniowa	Wartość maks.
$\min\{e_1; e_2\}$	28,8	30	
$\min\{p_1; p_2\}$	52,8	70	
$\max\{p_1; p_2\}$		100	161

Tabela A.4 Połączenie pasów — element blachy — szczegółowe rozwiązania projektowe

Odległość lub rozstaw	Wartość min.	Wartość obliczeniowa	Wartość maks.
$\min\{e_1; e_2\}$	28,8	30	
$\min\{p_1; p_2\}$	52,8	70	
$\max\{p_1; p_2\}$		100	196

8.2. Obliczeniowa siła ścinająca FV,Ed na każdą śrubę

W odniesieniu do elementu pasa

Składowe obliczeniowej siły ścinającej oblicza się w bazie $\{h, v\}$ (patrz rysunek A.4). Grupa śrub jest poddana działaniu siły osiowej N_f, siły ścinającej V_f i momentu zginającego M_f (patrz 6.2).

Siła osiowa N_f powoduje powstanie poziomej siły ścinającej:

$$F_{N,bi,h} = \frac{N_f}{6} = -82{,}58 \text{ kN} \qquad \text{na każdą śrubę}$$

Siła ścinająca V_f powoduje powstanie pionowej siły ścinającej:

$$F_{V,bi,v} = \frac{V_f}{6} = 0{,}14 \text{ kN} \qquad \text{na każdą śrubę}$$

Moment M_f jest podzielony pomiędzy śruby według odległości r_i pomiędzy środkiem śrub b_i a środkiem ciężkości grupy śrub

$$F_{M,bi} = \frac{M_f \; r_i}{\sum_1^6 r_i^2}$$

Ta siła ścinająca $F_{M,bi}$ rozłożona w bazie $\{h, v\}$ daje:

$$F_{M,bi,h} = \frac{M_f \; v_i}{\sum_1^6 r_i^2} \text{ składowa pozioma w przypadku śruby } b_i,$$

$$F_{M,bi,v'} = \frac{M_f \; h_i}{\sum_1^6 r_i^2} \text{ składowa pionowa w przypadku śruby } b_i.$$

Przy współrzędnych h_i i v_i środka śruby b_i.

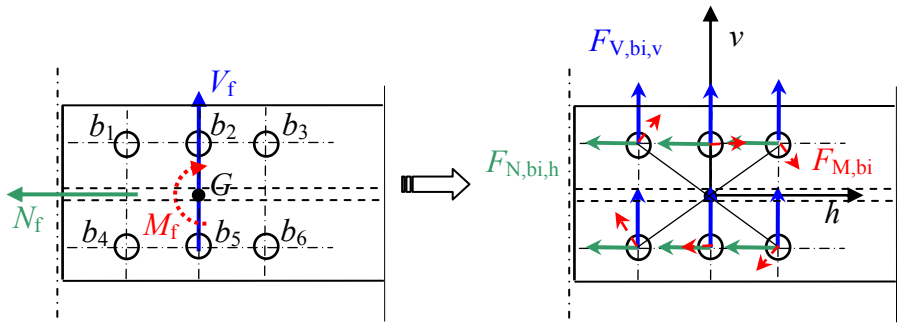
Ostatecznie dla każdej ze śrub:

$F_{V,bi,h,Ed} = F_{N,bi,h} + F_{M,bi,h}$ pozioma obliczeniowa siła ścinająca,

$F_{V,bi,v,Ed} = F_{V,bi,v} + F_{M,bi,v}$ pionowa obliczeniowa siła ścinająca,

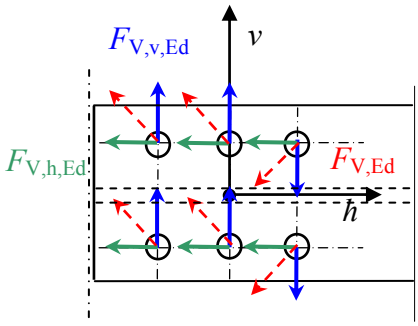
$F_{V,bi,Ed} = \sqrt{F_{V,bi,h,Ed}^2 + F_{V,bi,v,Ed}^2}$ wypadkowa obliczeniowa siła ścinająca.

Na rysunku A.10 pokazano rozkład sił wewnętrznych.



Rysunek A.10 Rozkład sił wewnętrznych w elemencie pasa

Na rysunku A.11 pokazano kierunek działania siły wypadkowej i jej składowych.



Rysunek A.11 Kierunki działania obliczeniowej siły ścinającej

Tabela A.5 zawiera podsumowanie wyznaczonych obliczeniowych sił ścinających.

Można pominąć składową pionową obciążenia. Sprawdzenie obliczeniowej nośności przy docisku ograniczone zostało do kierunku poziomego.

Ponadto, jeśli siła ścinająca V_{Ed} oraz moment M_{Ed} nie zostałyby uwzględnione, jedyną poziomą obliczeniową siłą ścinającą byłaby siła:

$F_{V,bi,h,Ed} = F_{N,bi,h}$ = -82,58 kN

Oznacza to różnicę ± 2%.

Zatem można przyjąć wartość 84,02 kN (= maksymalna otrzymana wartość $F_{V,bi,Ed}$) obliczeniowej siły ścinającej: $F_{V,Ed}$ = 84,02 kN.

Tabela A.5 Połączenie pasów — element pasa — obliczeniowe siły ścinające w kN w bazie $\{h, v\}$

Śruba	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
h_i	-70	0	70	-70	0	70
v_i	50	50	50	-50	-50	-50
r_i	86,02	50	86,02	86,02	50	76,02
$F_{M,bi}$	2,42	1,41	2,42	2,42	1,41	2,42
$F_{M,bi,h}$	1,41	1,41	1,41	-1,41	-1,41	-1,41
$F_{M,bi,v}$	1,97	0	-1,97	1,97	0	-1,97
$F_{N,bi,h}$	-82,58	-82,58	-82,58	-82,58	-82,58	-82,58
$F_{V,bi,v}$	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
$F_{V,bi,Ed}$	81,20	81,17	81,20	84,02	83,99	84,01
$F_{V,bi,h,Ed}$	-81,17	-81,17	-81,77	-83,99	-83,99	-83,99
$F_{V,bi,v,Ed}$	2,11	0,14	-1,83	2,11	0,14	-1,83

W odniesieniu do elementu blachy

Połączenie pasów to połączenie jednozakładkowe, więc wartości obliczeniowych sił ścinających każdej śruby w odniesieniu do elementu blachy są wyprowadzone bezpośrednio z poprzednich wyników.

Można przyjąć wartość 84,02 kN.

8.3. Obliczeniowa nośność na poślizg $F_{S,Rd}$

Analizując: Śruby w otworach normalnych $\Rightarrow$ $k_s = 1,0$

Klasa powierzchni ciernych = Klasa A $\Rightarrow$ $\mu = 0,5$

Oraz przy: $A_{s,f} = 303\ \text{mm}^2$ pole przekroju śruby, w której występują naprężenia rozciągające

$F_{p,c} = 0,7 f_{ub} A_{s,f} = 212,1\ \text{kN}$ siła naprężenia wstępnego

n liczba powierzchni ciernych

Połączenie jednozakładkowe $\Rightarrow$ $n = 1$ w przypadku każdego elementu

Wówczas: $F_{s,Rd,f} = F_{s,Rd,p} = \dfrac{k_s n \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,c} = 84,54\ \text{kN}$ EN 1993-1-8 3.9.1

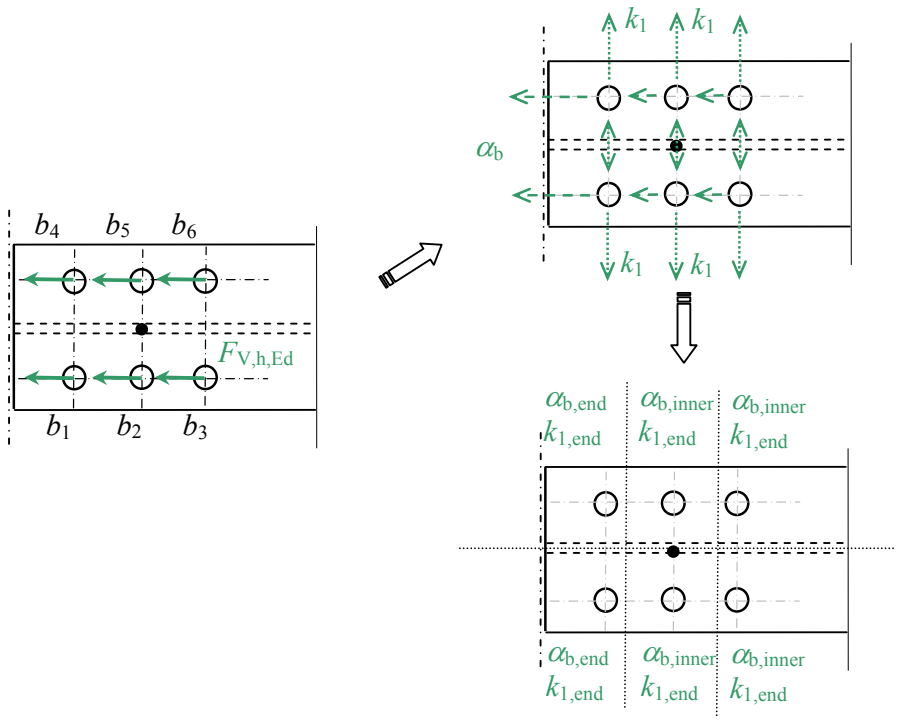
8.4. Obliczeniowa nośność przy docisku $F_{b,Rd}$ każdej śruby

EN 1993-1-8 Tabela 3.4

Wyznaczenie obliczeniowej nośności przy docisku ograniczone zostało do kierunku poziomego (patrz punkt 8.2).

Element pasa

Rysunek A.12 przedstawia sposób wyznaczania współczynników α_b oraz k_1 w odniesieniu do każdej śruby.



Rysunek A.12 Połączenie pasów — element pasa — określenie typu śrub

W przypadku wszystkich śrub: $k_{1,end} = 1{,}80$

W przypadku śrub b_1 i b_4: $\alpha_{b,end} = 0{,}94$

$F_{b,Rd,f} = 174{,}19$ kN

W przypadku pozostałych śrub: $\alpha_{b,inner} = 0{,}72$

$F_{b,Rd,f} = 134{,}19$ kN

Wreszcie w przypadku elementu pasa należy przyjąć wartość minimalną:

$F_{b,Rd,f} = 134{,}19$ kN

Element blachy

W przypadku wszystkich śrub: $k_{1,\text{end}} = 1{,}80$

W przypadku śrub b_3 i b_6: $\alpha_{\text{b,end}} = 0{,}49$

$$F_{\text{b,Rd,p}} = 90{,}32 \text{ kN}$$

W przypadku pozostałych śrub: $\alpha_{\text{b,inner}} = 0{,}72$

$$F_{\text{b,Rd,p}} = 134{,}19 \text{ kN}$$

Wreszcie w przypadku elementu blachy należy przyjąć wartość minimalną:

$$F_{\text{b,Rd,p}} = 90{,}32 \text{ kN}$$

8.5. Weryfikacja śrub

8.5.1. W odniesieniu do elementu pasa

Kontrola indywidualna

Obliczeniowa nośność przy docisku $F_{\text{V,Ed,w}} = 84{,}02 < F_{\text{b,Rd,w}} = 134{,}19 \text{ kN}$ — EN 1993-1-8 Tabela 3.2

Obliczeniowa nośność na poślizg $F_{\text{V,Ed,w}} = 84{,}02 < F_{\text{s,Rd,w}} = 84{,}54 \text{ kN}$

Grupa elementów złącznych

Nośność obliczeniową przy ścinaniu na płaszczyznę ścinania $F_{\text{v,Rd}}$ przyjmuje się jako: — EN 1993-1-8 Tabela 3.4

$$F_{\text{v,Rd}} = \frac{\alpha_{\text{v}} f_{\text{ub}} A}{\gamma_{\text{M2}}}$$

Uwzględniając fakt, że płaszczyzna ścinania nie przechodzi przez gwintowaną część śruby w otworach normalnych:

$\Rightarrow \quad \alpha_{\text{v}} = 0{,}6$

$\Rightarrow \quad A = 380{,}13 \text{ mm}^2$ (przekrój poprzeczny śruby — brutto)

Wówczas: $F_{\text{v,Rd}} = 182{,}46 \text{ kN}$

Jako że w przypadku wszystkich śrub $F_{\text{v,Rd}} > F_{\text{b,Rd,w}}$ nośność obliczeniowa omawianej grupy elementów złącznych jest równa:

$$F_{\text{gr,b,Rd,w}} = \sum_{1}^{n_{\text{bi}}} F_{\text{b,bi,Rd,f}} = 2 \times 174{,}19 + 4 \times 134{,}19 = 885{,}15 \text{ kN}$$ — EN 1993-1-8 3.7

Wówczas: $|N_{\text{f}}| = 495{,}49 < F_{\text{gr,b,Rd,f}} = 885{,}15 \text{ kN}$

8.5.2. W odniesieniu do elementu blachy

Kontrola indywidualna

Obliczeniowa nośność przy docisku $F_{V,Ed,p} = 84{,}02 < F_{b,Rd,p} = 90{,}32$ kN

Obliczeniowa nośność na poślizg $F_{V,Ed,p} = 84{,}02 < F_{s,Rd,p} = 84{,}54$ kN

EN 1993-1-8 Tabela 3.4

Grupa elementów złącznych

Nośność przy ścinaniu na płaszczyznę ścinania $F_{v,Rd}$ jest równa:

$$F_{v,Rd} = 182{,}46 \text{ kN}$$

Jako że w przypadku wszystkich śrub $F_{v,Rd} > F_{b,Rd,w}$ nośność obliczeniowa omawianej grupy elementów złącznych jest równa:

$$F_{gr,b,Rd,p} = \sum_{1}^{n_{bi}} F_{b,bi,Rd,p} = 2 \times 90{,}32 + 4 \times 134{,}19 = 717{,}40 \text{ kN}$$

EN 1993-1-8 3.7

Wówczas: $|N_p| = |N_f| = 495{,}49 < F_{gr,b,Rd,p} = 717{,}40$ kN

8.6. Projekt przekroju poprzecznego netto

W przypadku połączenia poddanego rozciąganiu należy sprawdzić obliczeniową nośność przy rozciąganiu przekroju poprzecznego netto przy otworach na śruby:

$$\sum_{1}^{n_b} F_{V,Ed} \le N_{net,Rd}$$

EN 1993-1-8 Tabela 3.2

gdzie n_b to liczba śrub umieszczonych w danym przekroju poprzecznym netto.

8.6.1. Element pasa

Powierzchnia przekroju netto wynosi:

$$A_{f,net} = A_f - 2d_{0,f}t_f = 1427{,}25 \text{ mm}^2$$

Oraz: $$N_{f,net,Rd} = \frac{A_{f,net} f_y}{\gamma_{M0}} = 506{,}67 \text{ kN}$$

Wówczas: $$N_{f,net,Rd} = 506{,}67 > \sum_{1}^{2} F_{V,Ed,f} = 2 \times 84{,}02 = 168{,}04 \text{ kN}$$

8.6.2. Element blachy

Przekrój poprzeczny netto przyjmuje się jako

$$A_{\mathrm{p,net}} = A_{\mathrm{p}} - 2d_{0,\mathrm{w}}t_{\mathrm{p}} = 1568\ \mathrm{mm}^2$$

Skąd $$N_{\mathrm{p,net,Rd}} = \frac{A_{\mathrm{p,net}} f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}} = 556{,}64\ \mathrm{kN}$$

Wówczas: $$N_{\mathrm{p,net,Rd}} = 556{,}64 > \sum_{1}^{2} F_{\mathrm{V,Ed,p}} = 2 \times 84{,}02 = 168{,}04\ \mathrm{kN}$$

Uwaga: Globalny przekrój poprzeczny belki został zweryfikowany z uwzględnieniem otworów na elementy złączne i przy kombinacji sił wewnętrznych (patrz punkt 4).

Przekrój poprzeczny netto elementu blachy należy także zweryfikować, przyjmując tę kombinację sił wewnętrznych.

Zakładając równomierny rozkład obciążenia w przekroju, można zaproponować co następuje:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \le f_{\mathrm{y}}$$

Gdzie: $$\sigma = \frac{N_{\mathrm{p}}}{A_{\mathrm{p,net}}} \pm \frac{M_{\mathrm{p}}}{I_{\mathrm{p,net}} / v} \quad \text{oraz} \quad \tau = \frac{V_{\mathrm{p}}}{A_{\mathrm{p,net}}}$$

Przy założeniu równomiernego rozkładu naprężeń ścinających prowadzi to do sytuacji zachowawczej.

Przy $A_{\mathrm{p,net}} = 1568\ \mathrm{mm}^2$

$$I_{\mathrm{p,net}} = I_{\mathrm{p,gross}} - I_{\mathrm{p,holes}} = 477{,}87 - 171{,}23 = 306{,}64\ \mathrm{cm}^4$$

Wówczas: $\sigma = 316\ \mathrm{N/mm}^2$ oraz $\tau = 25{,}31\ \mathrm{N/mm}^2$

Wreszcie: $\sigma_{\max} = 341{,}31\ \mathrm{N/mm}^2 \le f_{\mathrm{y}} = 355\ \mathrm{N/mm}^2$

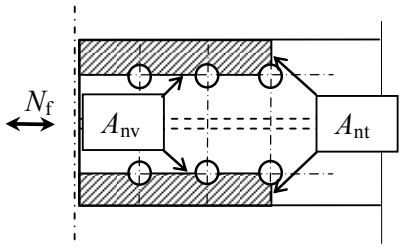
8.7. Projektowanie z uwagi na rozerwanie blokowe

EN 1993-1-8 3.10.2

8.7.1. Element środnika

Grupa śrub jest poddana obciążeniu koncentrycznemu N_f oraz obciążeniu mimośrodowemu V_f, jednak biorąc pod uwagę obecność środnika rozważony zostanie jedynie przypadek, w którym występuje obciążenie koncentryczne.

Rysunek A.13 przedstawia rozerwanie blokowe w przypadku elementu pasa kształtownika.



Rysunek A.13 Połączenie pasów — rozerwanie blokowe w przypadku elementu pasa

Przy: $A_{nt} = 2(e_2 - 0{,}5d_0)t_f = 414\ \text{mm}^2$

$A_{nv} = 2(e_1 + 2p_1 - 2{,}5d_0)t_f = 3392{,}5\ \text{mm}^2$

Wówczas: $V_{eff,1,Rd} = 826{,}24\ \text{kN}$

Oraz: $V_{eff,1,Rd} = 826{,}24 > N_w = 495{,}49\ \text{kN}$

8.7.2. Element blachy

Grupa śrub jest poddana obciążeniu koncentrycznemu N_p oraz obciążeniu mimośrodowemu V_p.

Rysunek A.14 przedstawia rozerwanie blokowe w przypadku elementu blachy.

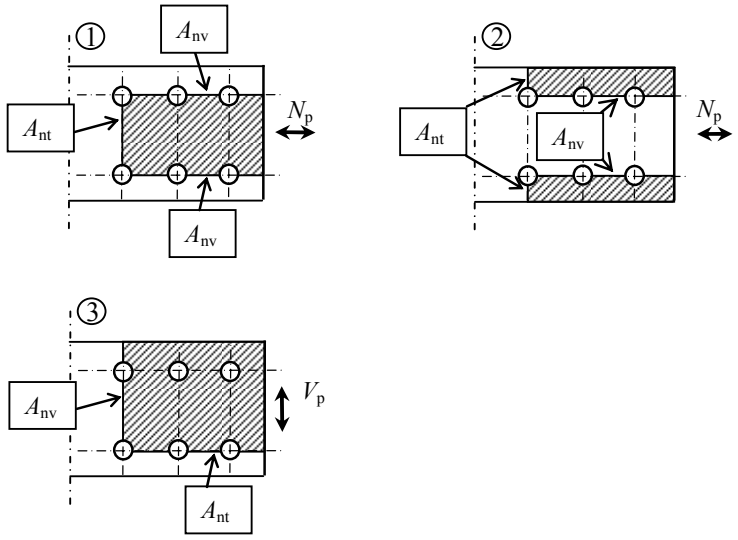
W przypadku występowania obciążenia koncentrycznego uwzględnia się jedynie sytuację, w której powierzchnia rozciągana jest najmniejsza:

Przy: $A_{nt} = \min\{(p_2 - d_0);2(e_2 - 0{,}5d_0)\}t_p = 504\ \text{mm}^2$

$A_{nv} = 2(e_1 + 2p_1 - 2{,}5d_0)t_p = 3220\ \text{mm}^2$

Wówczas: $V_{eff,1,Rd} = 865{,}60\ \text{kN}$

Oraz: $V_{eff,1,Rd} = 865{,}60 > N_f = 495{,}49\ \text{kN}$



1 Pierwsze rozerwanie blokowe z obciążeniem koncentrycznym
2 Drugie rozerwanie blokowe z obciążeniem koncentrycznym
3 Rozerwanie blokowe z obciążeniem mimośrodowym

Rysunek A.14 Połączenie pasów — rozerwanie blokowe w przypadku elementu blachy

W przypadku występowania obciążenia mimośrodowego przy:

$$A_{nt} = (e_1 + 2p_1 - 2{,}5d_0)t_p = 1610 \text{ mm}^2$$

$$A_{nv} = (e2 + p2 - 1{,}5d_0)t_p = 1316 \text{ mm}^2$$

Wówczas: $V_{eff,2,Rd} = 598{,}17 \text{ kN}$

Oraz: $V_{eff,2,Rd} = 598{,}17 > V_p = 0{,}85 \text{ kN}$

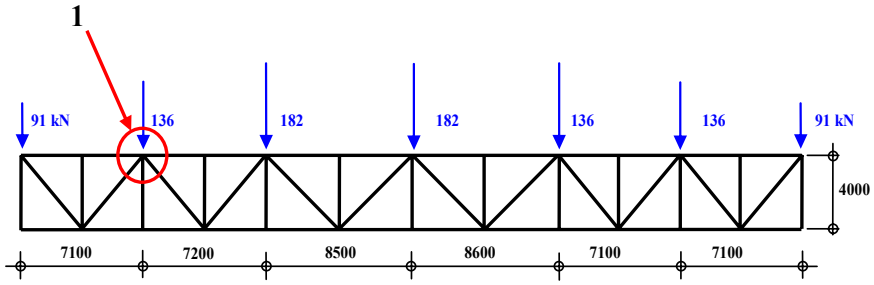
W ten sposób z powodzeniem i z uwzględnieniem dwóch rodzajów obciążeń zweryfikowana została grupa śrub. Powinno zostać spełnione dodatkowe wymaganie wynikające ze wzoru interakcji:

$$\frac{N_p}{\min\left\{V_{eff,1,Rd,block1}; V_{eff,1,Rd,bloc2}\right\}} + \frac{V_p}{V_{eff,2,Rd,block3}} \le 1{,}0$$

Wówczas: $$\frac{495{,}49}{865{,}60} + \frac{0{,}85}{598{,}17} = 0{,}57 \le 1{,}0 \qquad \text{OK}$$

ZAŁĄCZNIK B
Przykład praktyczny — Projekt węzła kratownicy z blachą węzłową

Kratownica zawiera kilka rodzajów połączeń: połączenia stykowe za pomocą nakładek mocowanych śrubami, połączenia typu T i połączenia typu KT. Niniejszy załącznik zawiera projekt wykonawczy węzła typu KT umieszczonego na górnym pasie dźwigara, jak pokazano na rysunku B.1.

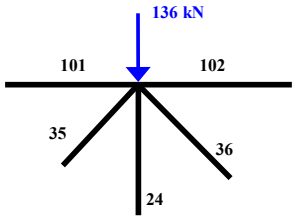


1 Węzeł typu KT

Rysunek B.1 Położenie węzła typu KT

Wartości sił wewnętrznych w elementach kratownicy (patrz Tabela B.1) są wynikiem obciążenia grawitacyjnego. Ten przypadek obciążenia odpowiada kombinacji oddziaływań w stanie granicznym nośności wyznaczonej zgodnie z normą EN 1990.

Tabela B.1 Węzeł typu KT — siły wewnętrzne w elementach kratownicy

Element konstrukcyjny		N (kN)	V (kN)	M (kNm)
	Krzyżulec 35	-609,4	-1,27	0
	Krzyżulec 24	406,9	1,03	0
	Słupek 36	2,6	0	0
	Pas 101	-413,8	1,25	-0,46
	Pas 102	-1084	1,26	-0,09

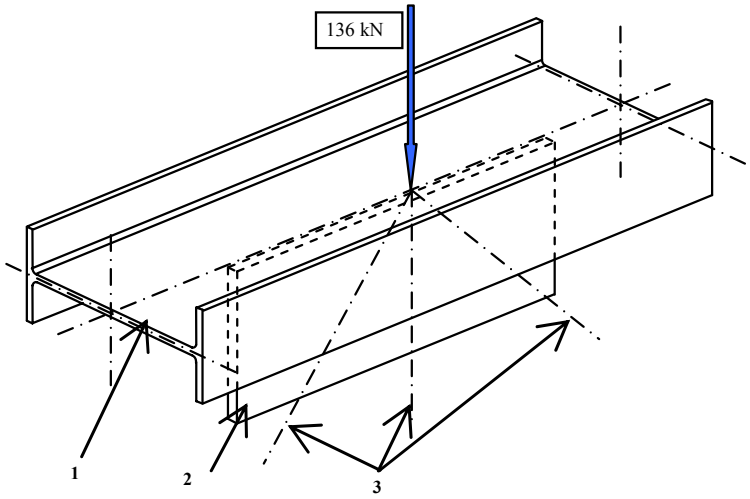
1. Schemat ogólny węzła typu KT

Analizowany węzeł typu KT składa się z następujących połączeń: połączenie spawane blachy węzłowej ze środnikiem pasa dźwigara oraz połączenie śrubowe kątowników z blachą węzłową (patrz rysunek B.2 i rysunek B.3). Oba połączenia należy sprawdzić zgodnie z zasadami opisanymi w normach EN 1993-1-1 i EN 1993-1-8.

W połączeniu spawanym środnika pasa z blachą węzłową blacha jest przyspawana prostopadle do środnika pasa za pomocą dwóch spoin pachwinowych (patrz rysunek B.7).

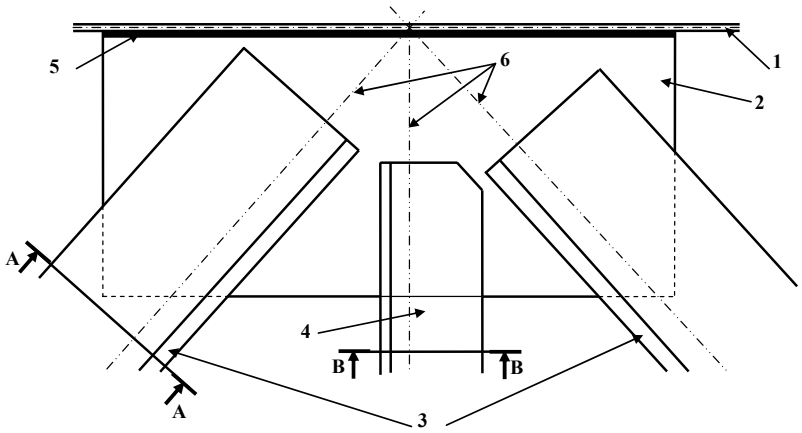
Połączenie śrubowe kątowników z blachą węzłową składa się z dwóch symetrycznych krzyżulców zbudowanych z podwójnych kątowników (patrz rysunek B.4) oraz słupka wykonanego z pojedynczego kątownika (patrz rysunek B.5).

Występują trzy połączenia ścinane, które należy zaprojektować jako połączenia kategorii C.



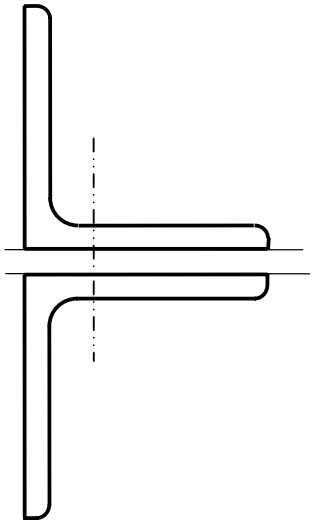
1 Pas dźwigara (IPE 330)
2 Blacha węzłowa
3 Osie elementów usztywniających środnika

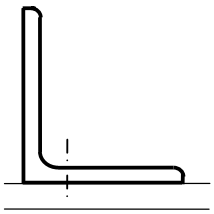
Rysunek B.2 Ogólny schemat węzła typu KT



1 Środnik pasa dźwigara (IPE 330)
2 Blacha węzłowa 580 × 260 × 15
3 Kątowniki L150 × 150 × 15
4 Kątownik L100 × 100 × 10
5 Spoina pachwinowa
6 Osie elementów usztywniających środnika

Rysunek B.3 Węzeł typu KT

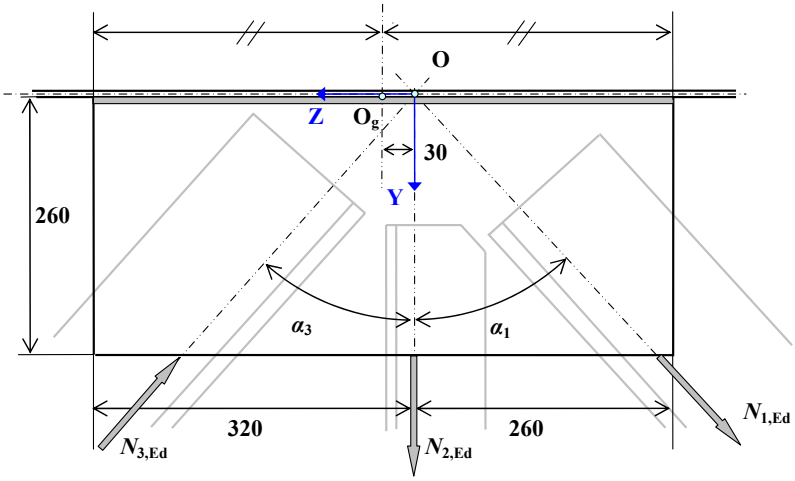




Rysunek B.4 Węzeł KT— przekrój AA **Rysunek B.5 Węzeł KT— przekrój BB**

2. Połączenie spawane blachy węzłowej ze środnikiem pasa dźwigara

Połączenie to ma formę blachy przyspawanej prostopadle do środnika pasa dźwigara, patrz rysunek B.6. Obie spoiny pachwinowe są identyczne. Projekt blachy węzłowej i jej połączenia spawanego z pasem dźwigara uwzględnia siły osiowe we wszystkich trzech połączonych z nim kątownikach.

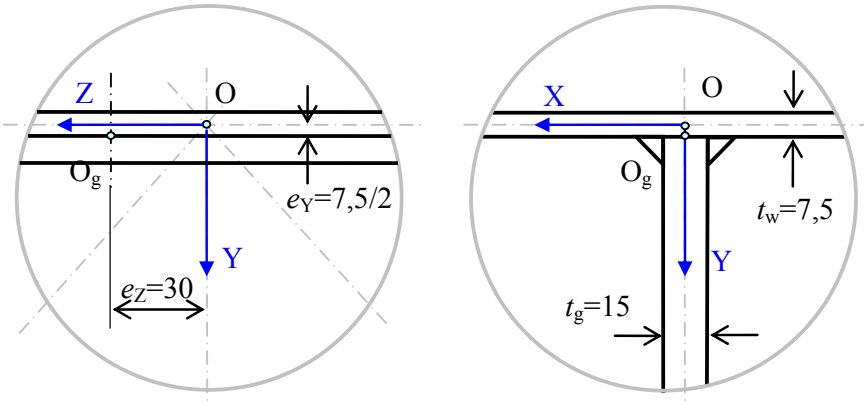


Rysunek B.6 Połączenie spawane między blachą węzłową a środnikiem pasa dźwigara

Osie wzdłużne wszystkich trzech kątowników przecinają się na osi pasa dźwigara w punkcie O na środniku.

Płaszczyzna blachy węzłowej nie jest umieszczona symetrycznie względem normalnej OY do płaszczyzny środnika (patrz rysunek B.6 i rysunek B.7). Należy uwzględnić moment będący wynikiem mimośrodowości e_Z.

Moment wynikający z mimośrodowości $e_Y = t_w/2$ można pominąć.



Rysunek B.7 Połączenie między blachą węzłową a środnikiem pasa dźwigara — szczegóły

Podstawowe założenie jest takie, że blacha węzłowa przenosi siły osiowe działające w jej płaszczyźnie oraz w kierunku osi elementu.

2.1. Dane

Ogólny układ współrzędnych (patrz rysunek B.6 i rysunek B.7)

Płaszczyzna YOZ to płaszczyzna blachy węzłowej.

Płaszczyzna XOZ to płaszczyzna środnika pasa.

Dane geometryczne

Grubość blachy węzłowej t_g = 15 mm

Grubość środnika t_w = 7,5 mm

Kąt pomiędzy blachą węzłową a środnikiem α_a = 90°

Liczba spoin pachwinowych n_a = 2

Znamionowa grubość spoiny a = wartość, która ma zostać wyznaczona

Długość spoin L_w = 560 mm

Dane dotyczące materiału

Gatunek stali: S355

Granica plastyczności: f_y = 355 N/mm^2

Wytrzymałość na rozciąganie: f_u = 510 N/mm^2 — EN 1993-1-1 Tabela 3.1

Uwaga: Wymagane jest, aby określona granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie materiału wypełniającego miały wartości co najmniej równe tym określonym w przypadku materiału podstawowego. — EN 1993-1-8 4.2(2)

Współczynnik częściowy

Nośność spoiny: γ_{M2} = 1,25 (wartość zalecana)

EN 1993-1-8 Tabela 2.1 UWAGA

Siły wewnętrzne w elementach kratownicy (patrz rysunek B.6)

Wszystkie siły osiowe przyłożone są w płaszczyźnie XOZ blachy węzłowej:

Osiowa siła rozciągająca pod kątem α_1 = 42° do normalnej OY:

$N_{1,Ed}$ = 406,9 kN

Osiowa siła rozciągająca na normalnej OY, więc α_2 = 0°:

$N_{2,Ed}$ = 2,6 kN

Osiowa siła rozciągająca po kątem α_3 = -41,3° do normalnej OY:

$N_{3,Ed}$ = -609,4 kN

2.2. Naprężenia w przekroju poprzecznym blachy węzłowej naprzeciw spoin

Przyjęte podejście oparte jest na analizie liniowo-sprężystej, która prowadzi do uzyskania bezpiecznej szacunkowej oceny nośności węzła spawanego.

EN 1993-1-8 2.4(2)

2.2.1. Siły obliczeniowe w blasze węzłowej przy licu środnika pasa

Efekty niewielkiej mimośrodowości e_Y od osi pasa dźwigara zostaną pominięte. Przekrój blachy węzłowej analizuje się pod kątem następujących sił:

$N_{g,Ed}$ siła osiowa przy mimośrodowości e_Z = 30 mm do linii środkowej blachy węzłowej,

$V_{g,Ed}$ siła ścinająca.

Przy: $$N_{g,Ed} = \sum_{i=1}^{3} N_i \cos(\alpha_i)$$

$$V_{g,Ed} = \sum_{i=1}^{3} N_i \sin(\alpha_i)$$

oraz $M_{g,Ed}$ — moment będący wynikiem mimośrodowości — $M_{g,Ed} = e_Z \; N_{g,Ed}$

Wówczas: $N_{g,Ed}$ = -152,83 kN

$V_{g,Ed}$ = 674,47 kN

$M_{g,Ed}$ = 4,585 kNm

Uwaga: Wysoka wartość siły osiowej $N_{g,Ed}$ jest wynikiem działania miejscowego obciążenia skupionego w węźle oraz ciężaru własnego kratownicy.

2.2.2. Naprężenie normalne

Zakładając równomierny rozkład obciążeń w przekroju, naprężenie normalne wynosi:

$$\sigma_{g,max} = \frac{N_{g,Ed}}{A_g} + \frac{M_{g,Ed}}{I_g / v}$$

Gdzie: A_g to powierzchnia przekroju poprzecznego,

I_g to geometryczny moment bezwładności przekroju poprzecznego,

v to położenie włókna końcowego.

Przy: $A_g = t_g \; L_w = 15 \times 580 = 8700 \text{ mm}^2$

$$I_g = \frac{t_g \; L_w^3}{12} = 243{,}89 \; 10^6 \text{ mm}^4$$

$v = 290$ mm

Wówczas: $\sigma_{g,max} = -23{,}02 \text{ N/mm}^2$

2.2.3. Naprężenie ścinające

Średnie naprężenie ścinające wynosi:

$$\tau_g = \frac{V_{g,Ed}}{A_g}$$

Wówczas: $\tau_g = 77{,}53 \text{ N/mm}^2$

Kombinację naprężeń osiowych i ścinających w blasze węzłowej sprawdza się zwykle przy pomocy kryterium Von Misesa.

2.3. Obliczeniowa nośność spoiny pachwinowej

Obliczeniową nośność spoiny pachwinowej należy wyznaczyć przy użyciu metody kierunkowej lub metody uproszczonej. — EN 1993-1-8 4.5.3.1(1)

Metoda kierunkowa opiera się na porównaniu obliczeniowej wytrzymałości na rozciąganie i przyłożonego naprężenia w najbardziej obciążonej części na grubości spoiny. Przyłożone naprężenie, wyznaczone przy pomocy wzoru Von Misesa, uwzględnia wpływ, jaki na wytrzymałość spoiny wywiera nachylenie siły wypadkowej na jednostkę długości względem osi spoiny i płaszczyzny.

Metoda uproszczona jest oparta na obliczeniowej wytrzymałości spoiny na ścinanie porównanej bezpośrednio z naprężeniem ścinającym przyłożonym na grubości spoiny i uzyskanym w wyniku podzielenia wartości siły wypadkowej na jednostkę długości przez wartość grubości spoiny. Metoda uproszczona jest bezpieczniejsza w porównaniu z metodą kierunkową.

W tym wypadku zastosowano metodę kierunkową. — EN 1993-1-8 4.5.3.2

2.3.1. Metoda kierunkowa

Uwaga: Przyjmuje się równomierne rozłożenie naprężenia wzdłuż grubości spoiny. EN 1993-1-8 4.5.3.2(4)

Przy: $\sigma_\perp$ naprężenie normalne względem płaszczyzny grubości spoiny,

$\tau_\perp$ naprężenie ścinające (w płaszczyźnie grubości spoiny) prostopadłe do osi spoiny,

$\tau_{//}$ naprężenie ścinające (w płaszczyźnie grubości spoiny) równoległe do osi spoiny.

Uwaga: Naprężenie normalne $\sigma_{//}$ w spoinie nie musi być poddane analizie. EN 1993-1-8 4.5.3.2(5)

Na grubości spoiny wartość siły na jednostkę długości wynosi:

$$a\ \sigma_\perp = \frac{\sigma_{g,max}\ e_g}{n_a} \sin(\alpha_a / 2) = -122{,}08 \text{ N/mm.mm}$$

$$a\ \tau_\perp = \frac{\sigma_{g,max}\ e_g}{n_a} \cos(\alpha_a / 2) = -122{,}08 \text{ N/mm.mm}$$

$$a\ \tau_{//} = \frac{\tau_g\ e_g}{n_a} = 581{,}44 \text{ N/mm.mm}$$

Nośność obliczeniowa spoiny pachwinowej będzie wystarczająca, jeśli oba z poniższych warunków zostaną spełnione: EN 1993-1-8 4.5.3.2(6)

$$\sigma_w = [\sigma_\perp^2 + 3\ (\tau_\perp^2 + \tau_{//}^2)]^{0,5} \le f_u / (\beta_w\ \gamma_{M2})$$

$$\sigma_\perp \le 0{,}9\, f_u / \gamma_{M2}$$

Gdzie: β_w to współczynnik korelacji spoiny pachwinowej, EN 1993-1-8 Tabela 4.1

$\beta_w = 0{,}8$.

Warunki te można przeformułować w następujący sposób:

$$(a\ \sigma_w) / a \le f_u / (\beta_w\ \gamma_{M2})$$

$$(a\ \tau_\perp) / a \le 0{,}9\, f_u / \gamma_{M2}$$

Z powyższych warunków uzyskuje się minimalną wartość znamionowej grubości spoiny.

$a_{1,min} = a\ \sigma_w / [f_u / (\beta_w\ \gamma_{M2})] = 2{,}03$ mm

$a_{2,min} = a\ \sigma_\perp / (0{,}9\, f_u / \gamma_{M2}) = 0{,}33$ mm

$a_{min} = \max(a_{1,min}\ ;\ a_{2,min}) = 2{,}03$ mm

Następujące wymagania muszą zostać spełnione: EN 1993-1-8

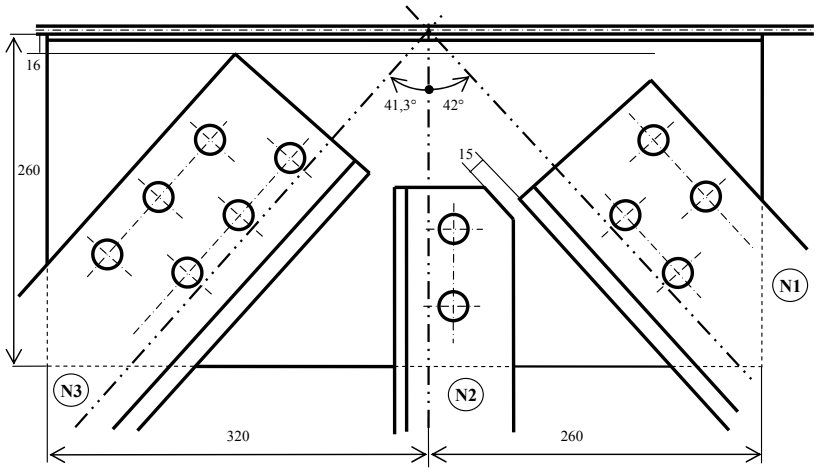
$a \ge 3$ mm 4.5.2(2)

$l_{eff} \ge \max(30 \text{ mm}\ ;\ 6\ a)$ przy $l_{eff} = L_w - 2\ a$ 4.5.2(1)

Wówczas wystarcza znamionowa grubość spoiny wynosząca 4 mm.

3. Połączenie śrubowe kątowników z blachą węzłową

Trzy połączenia ścinane zaprojektowano jako połączenia kategorii C. Połączenia te pokazano na rysunku B.8.



Rysunek B.8 Połączenia śrubowe kątowników z blachą węzłową

Połączenie składa się z dwóch symetrycznych krzyżulców zbudowanych z podwójnych kątowników (N1 i N3) oraz słupka wykonanego z pojedynczego kątownika (N2).

W elementach kratownicy działają następujące siły wewnętrzne:

$N_{1,Ed}$ = 406,9 kN osiowa siła rozciągająca,

$N_{2,Ed}$ = 2,6 kN osiowa siła rozciągająca,

$N_{3,Ed}$ = -609,4 kN osiowa siła ściskająca.

3.1. Dane podstawowe

Dane dotyczące materiałów (za wyjątkiem śrub)

Gatunek stali S355

Granica plastyczności f_y = 355 N/mm^2

Wytrzymałość na rozciąganie f_u = 510 N/mm^2

EN 1993-1-1 Tabela 3.1

Blacha węzłowa

Grubość t_g = 15 mm

Długość L_g = 580 mm

Szerokość H_g = 260 mm

Kątowniki

N1 dwa kątowniki równoramienne L150 × 150 × 15

N2 jeden kątownik równoramienny L100 × 100 × 10

N3 dwa kątowniki równoramienne L150 × 150 × 15

Dane dotyczące połączeń śrubowych

Kategoria połączeń śrubowych	Kategoria C	
Klasa śrub	Klasa 10.9	
Granica plastyczności	f_{yb} = 900 N/mm^2	EN 1993-1-8 Tabela 3.1
Wytrzymałość na rozciąganie	f_{ub} = 1000 N/mm^2	
Nominalna średnica śruby	d = 24 mm	
Średnica otworu	d_0 = 26 mm	

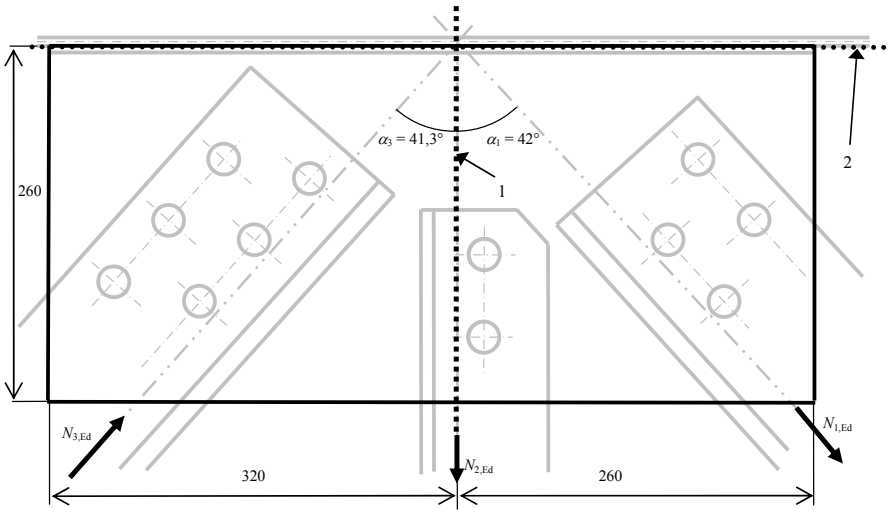
Współczynniki częściowe (zalecane wartości)

Stal konstrukcyjna	γ_{M0} = 1,00	EN 1993-1-1 6.1 UWAGA 2B
Stal konstrukcyjna	γ_{M1} = 1,00	
Stal konstrukcyjna	γ_{M2} = 1,25	EN 1993-1-8 2.2 UWAGA
Śruby	γ_{M2} = 1,25	
Śruby	γ_{M3} = 1,25	

3.2. Analiza globalna przekrojów poprzecznych brutto blachy węzłowej

Przekroje poprzeczne brutto blach węzłowych przeznaczone do sprawdzenia znajdują się na rysunku B.9.

Uwaga: Przekroje poprzeczne brutto kątowników są weryfikowane w dalszej kolejności.



Rysunek B.9 Położenie przekrojów poprzecznych brutto blach węzłowych

Weryfikacja przekroju poprzecznego brutto 1

Przy A_{g1} powierzchnia przekroju poprzecznego 1 $A_{g1} = H_g\, t_g = 3900$ mm^2

Nośność przy ścinaniu

$$V_{g1,Ed} = \max\left(N_{1,Ed}\ \cos\alpha_1\ ; N_{2,Ed}\ \cos\alpha_2\right) = 457{,}82\ \text{kN}$$

$$V_{g1,pl,Rd} = A_{g1} f_y \Big/ \left(\gamma_{M0}\sqrt{3}\right) = 799{,}34\ \text{kN}$$

$$V_{g1,Ed} < V_{g1,pl,Rd} \Rightarrow \quad \text{OK}$$

Nośność ze względu na siłę osiową

$$N_{g1,Ed} = \sum_{i=1}^{3} N_{i,Ed}\ \sin(\alpha_i) = 674{,}47\ \text{kN}$$

$$N_{g1,pl,Rd} = A_{g1} f_y \Big/ \gamma_{M0} = 1384{,}50\ \text{kN}$$

$$N_{g1,Ed} < N_{g1,pl,Rd} \quad \Rightarrow \quad \text{OK}$$

Weryfikacja przekroju poprzecznego brutto 2

Przy A_{g2} powierzchnia przekroju poprzecznego 2 $A_{g2} = L_g\, t_g = 8700\ \text{mm}^2$

Nośność przy ścinaniu

$$V_{g2,Ed} = \sum_{i=1}^{3} N_{i,Ed}\ \sin(\alpha_i) = 674{,}47\ \text{kN}$$

$$V_{g2,pl,Rd} = A_{g2} f_y \Big/ \left(\gamma_{M0}\sqrt{3}\right) = 1783{,}15\ \text{kN}$$

$$V_{g2,Ed} < V_{g2,pl,Rd} \Rightarrow \quad \text{OK}$$

Nośność ze względu na siłę osiową

$$N_{g2,Ed} = \sum_{i=1}^{3} N_{i,Ed}\ \cos(\alpha_i) = 152{,}83\ \text{kN}$$

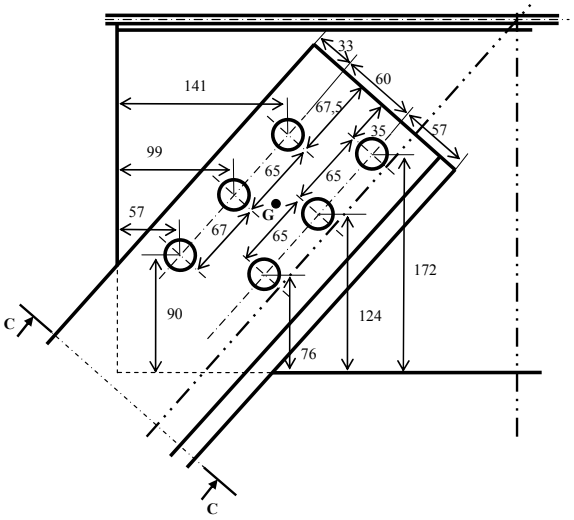
$$N_{g2,pl,Rd} = A_{g2} f_y \Big/ \gamma_{M0} = 3088{,}5\ \text{kN}$$

$$N_{g2,Ed} < N_{g2,pl,Rd} \quad \Rightarrow \quad \text{OK}$$

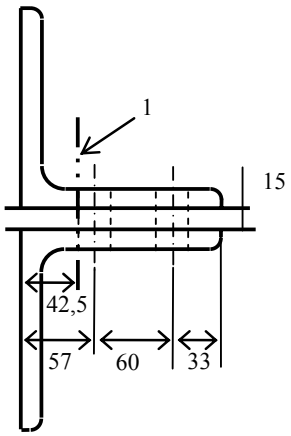
3.3. Połączenie N3 — połączenie śrubowe symetrycznego krzyżulca N3 zbudowanego z podwójnych kątowników z blachą węzłową

Połączenie ścinane poddane ściskaniu zaprojektowano jako połączenie kategorii C.

Wymiary elementów składowych oraz rozmieszczenie otworów pokazano na rysunku B.10 i rysunku B.11.



Rysunek B.10 Połączenie N3 — wymiary (w mm) oraz rozmieszczenie



1 Oś neutralna kątowników

Rysunek B.11 Połączenie N3 — przekrój CC

3.3.1. Połączenie N3 — siły obliczeniowe

Przy: $N_{3,Ed}$ siła ściskania osiowego przy mimośrodowości e_{N3} względem środka ciężkości połączenia,

$M_{3,N,Ed}$ moment zginający powstały w wyniku mimośrodowości $M_{3,N,Ed} = e_{N3}\ N_{3,Ed}$.

W przypadku blachy węzłowej:

$N_{3,g,Ed}$ = 609,4 kN

e_{N3} = 44,5 mm

$M_{3,g,Ed}$ = $e_{N3}\ N_{3,g,Ed}$ = 27,12 kNm

W przypadku każdego kątownika:

$N_{3,a,Ed}$ = 304,7 kN

$M_{3,a,Ed}$ = 13,56 kNm

3.3.2. Połączenie N3 — analiza kątownika

Nośność przekroju poprzecznego brutto

Naprężenie wzdłużne

Zakładając równomierny rozkład obciążenia w przekroju, naprężenie wzdłużne wynosi:

$$\sigma_i = \frac{N_{3,a,Ed}}{A_{3,a}} + \frac{M_{3,a,Ed}}{I_{3,a}/v}$$

Gdzie: $A_{3,a}$ jest polem powierzchni przekroju kątownika

$A_{3,a}$ = 4302 mm^2,

$I_{3,a}$ jest geometrycznym momentem bezwładności powierzchni kątownika

$I_{3,a}$ = 8,981 10^6 mm^4,

v położenie analizowanego włókna końcowego (patrz rysunek B.12)

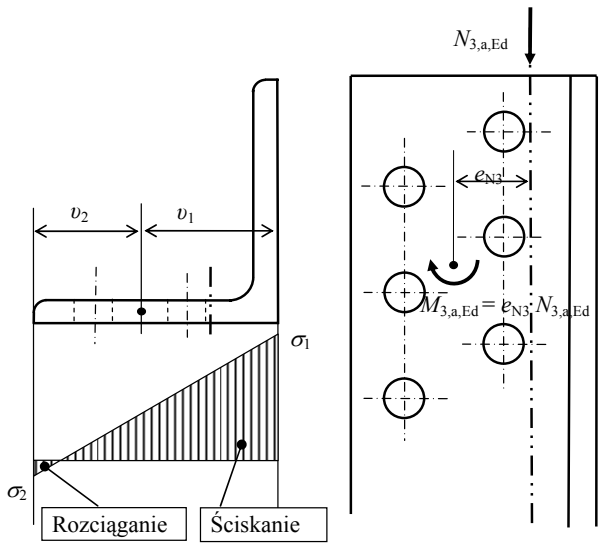
v_1 = 87 mm,

v_2 = 63 mm.

Wówczas naprężenia normalne wynoszą:

σ_1 = 202,18 N/mm^2 (ściskanie)

σ_2 = -24,29 N/mm^2 (rozciąganie)



Rysunek B.12 Naprężenia w kątowniku N3

Klasa przekroju

$h/t = 10 < 15\varepsilon = 12,20$

$(b+h)/2t = 10 > 11,5\varepsilon = 9,36$ — EN 1993-1-1 Tabela 5.2 Arkusz 3 z 3

$\Rightarrow$ klasa 4

$c/t = 7,93 < 10\varepsilon/\alpha = 10\varepsilon/1 = 8,14$ — Tabela 5.2 Arkusz 2 z 3

$\Rightarrow$ klasa 2

$\Rightarrow$ Klasa kątownika = klasa 4

Kombinacja M + N

Warunek, który musi zostać spełniony: $\sigma_{x,Ed} = \dfrac{N_{3,a,Ed}}{A_{3,a,eff}} + \dfrac{M_{3,a,Ed}}{W_{3,a,eff}} \le \dfrac{f_y}{\gamma_{M0}}$ — EN 1993-1-1 6.2.9.3

przy: $A_{3,a,eff}$ powierzchnia efektywna przekroju poprzecznego

$A_{3,a,eff} = A_{3,a,eff,leg1} + A_{3,a,eff,leg2}$

gdzie $A_{3,a,eff,leg1}$ powierzchnia efektywna w odniesieniu do „wolnego” ramienia,

$A_{3,a,eff,leg2}$ powierzchnia efektywna w odniesieniu do „połączonego” ramienia.

Wyznaczenie efektywnej powierzchni przekroju poprzecznego $A_{3,a,eff,leg1}$

$\psi = \sigma_1 / \sigma_1 = 1,0$ — EN 1993-1-5 Tabela 4.2

współczynnik wyboczenia $k_\sigma = 0,43$

$\bar{\lambda}_p = 0,660 \Rightarrow$ $\rho = 1$ bez redukcji — EN 1993-1-5 4.4 (2)

Wyznaczenie efektywnej powierzchni przekroju poprzecznego $A_{3,a,eff,leg2}$

EN 1993-1-5 Tabela 4.2

$$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 = -0{,}120$$

współczynnik wyboczenia $k_\sigma = 2{,}55$

EN 1993-1-5 4.4 (2)

$$\bar{\lambda}_p = 0{,}271 \Rightarrow \qquad \rho = 1 \qquad \text{bez redukcji}$$

Weryfikacja

$$A_{3,a,eff} = A_{3,a} \text{ (bez redukcji)}$$

$$\sigma_{x,Ed} = \max(\sigma_1 ; \sigma_2) = 202{,}18 \le \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 355 \text{ N/mm}^2$$

$\Rightarrow$ warunek spełniony

Nośność przekroju poprzecznego netto

Zgodnie z paragrafem 6.2.5 (5) normy EN 1993-1-1 nie trzeba uwzględniać otworów na elementy złączne w strefie rozciąganej, jeżeli w całkowitej strefie rozciąganej uwzględnione zostanie następujące ograniczenie:

EN 1993-1-1 6.2.5 (5)

$$\frac{A_{t,net}\, 0{,}9 f_u}{\gamma_{M2}} \ge \frac{A_t f_y}{\gamma_{M0}}$$

W tym przypadku otwory znajdują się w strefie rozciągania (patrz rysunek B.12).

Uwzględniając zależność $A_{3,a,eff} = A_{3,a}$, następujący warunek musi zostać spełniony:

$$N_{3,a,Ed} \le N_{3,a,c,Rd} = \frac{A_{3,a} f_y}{\gamma_{M0}}$$

Przy $A_{3,a} = 4302 \text{ mm}^2$:

$$N_{3,a,Ed} = 304{,}7 < N_{3,a,c,Rd} = 1527{,}2 \text{ kN}$$

Nośność na wyboczenie

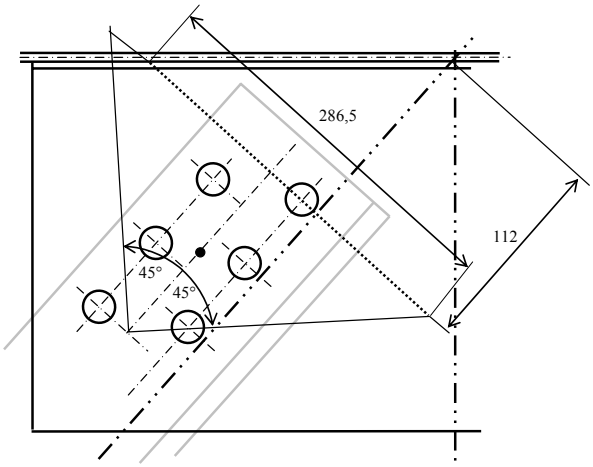
Element ściskany należy sprawdzić pod kątem wyboczenia.

Warunek ten został sprawdzony w punkcie dotyczącym weryfikacji elementów konstrukcyjnych (patrz § 4 niniejszego opracowania).

3.3.3. Połączenie N3 — analiza blachy węzłowej

Nośność przekroju poprzecznego

Do wyznaczenia przekroju poprzecznego brutto blachy węzłowej przyjmuje się rozproszenie siły osiowej $N_{g,Ed}$ w zakresie 45° (patrz Rysunek B.13).



Rysunek B.13 Połączenie N3 — rozproszenie siły osiowej w zakresie 45°

Muszą zostać spełnione następujące warunki:

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{N_{3,g,Ed}}{A_{3,g}} \pm \frac{M_{3,g,Ed}}{I_{3,g}/v} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

przy: $A_{3,g} = 286{,}5 \times t_g = 4297{,}5 \text{ mm}^2$

$I_{3,g} = t_g \times 286{,}5^3/12 = 29395706 \text{ mm}^4$

$v = +325/2 \text{ mm}$

Wówczas: $\sigma_{x,Ed} = 141{,}80 + 149{,}92 = 291{,}72 \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 355 \text{ N/mm}^2$

Nośność na wyboczenie

Blacha węzłowa zaprojektowana jest podobnie do słupa osadzonego o następujących właściwościach:

Powierzchnia $A_{3,g} = 4297{,}5 \text{ mm}^2$

Wysokość h_c = 112 mm (patrz Rysunek B.13)

Moment bezwładności przekroju względem osi $I_{c,zz}$ = 80578 mm^2

Należy spełnić warunek: EN 1993-1-1 6.3.1.1

$$N_{3,g,Ed} \leq N_{3,g,b,Rd} = \frac{\chi\, A_{3,g} f_y}{\gamma_{M1}}$$

Gdzie χ jest współczynnikiem redukcyjnym odpowiedniej krzywej wyboczenia.

Przy długości wyboczeniowej równej $2h_c$ smukłość wyznacza się z zależności:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{4h_c^2 A_c f_y}{\pi^2 E I_c}} = 0{,}677$$

Stosuje się krzywą wyboczeniową c, a imperfekcja wynosi: Tabela 6.1

$$\alpha = 0{,}49$$

$$\Phi = 0{,}5\left[1 + \alpha\left(\bar{\lambda} - 0{,}2) + \bar{\lambda}^2\right)\right] = 0{,}846$$ EN 1993-1-1 6.3.1.2

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0{,}739$$

Wówczas: $N_{3,g,Ed} = 609{,}4 < N_{3,g,b,Rd} = 1127$ kN

3.3.4. Połączenie N3 — weryfikacja śrub w odniesieniu do blachy węzłowej

Obliczeniowa siła ścinająca $F_{V,Ed}$ na każdą śrubę

Ze względu na kierunek siły osiowej $N_{3,Ed}$ obciążenie na każdej śrubie nie jest równoległe do krawędzi blachy węzłowej. Także składowe obliczeniowego obciążenia ścinającego zostaną obliczone w odpowiedniej bazie. EN 1993-1-8 Tabela 3.4 [3)]

Na początku składowe są obliczane w bazie $\{h', v'\}$ umieszczonej w środku ciężkości węzła i zorientowanej zgodnie z głównymi kierunkami elementów złącznych, które są zarazem głównymi kierunkami kątowników (patrz Rysunek B.14).

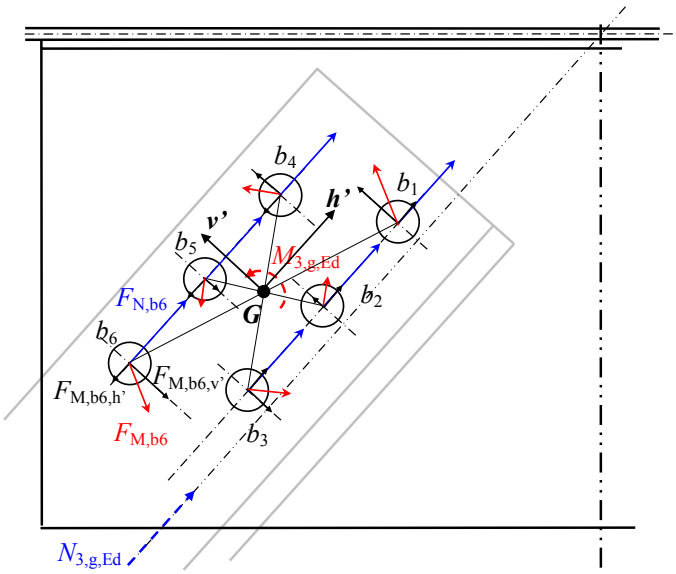
Następnie dokonywana jest zmiana bazy z początkowej $\{h', v'\}$ na bazę $\{h, v\}$ (patrz Rysunek B.15).

W bazie $\{h', v'\}$ siła normalna $N_{3,g,Ed}$ powoduje poziome obciążenie ścinające każdej śruby b_i:

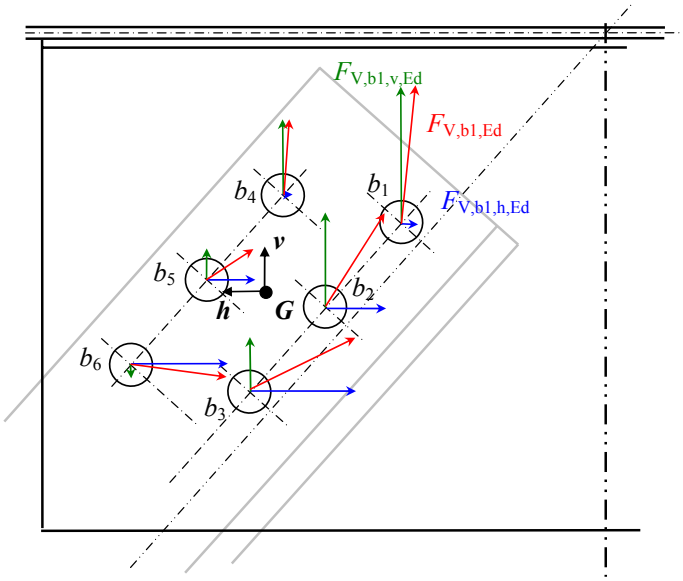
$$F_{N,bi,h'} = \frac{N_{3,g,Ed}}{5} = 101{,}57 \text{ kN}$$

Moment wynikający z mimośrodowości jest podzielony według odległości r_i' pomiędzy środkiem śrub b_i a środkiem ciężkości połączenia:

$$F_{M,bi} = \frac{M_{1,a,Ed}\ r_i'}{\sum_1^5 r_i'^2}$$



Rysunek B.14 Połączenie N3 — element blachy węzłowej — położenia



Rysunek B.15 Połączenie N3 — element blachy węzłowej — obciążenia

To obciążenie ścinające $F_{\mathrm{M,bi}}$ oblicza się w bazie $\{h', v'\}$:

$$F_{\mathrm{M,bi,h'}} = \frac{M_{\mathrm{1,a,Ed}}\ v_{\mathrm{i}}'}{\sum_{1}^{5} r_{\mathrm{i}}'^{\,2}} \quad \text{składowa pozioma,}$$

$$F_{\mathrm{M,bi,v'}} = \frac{M_{\mathrm{1,a,Ed}}\ h_{\mathrm{i}}'}{\sum_{1}^{5} r_{\mathrm{i}}'^{\,2}} \quad \text{składowa pionowa.}$$

Przy współrzędnych h_{i}' i v_{i}' środka śruby b_{i}.

Otrzymujemy zatem (patrz Tabela B.2):

$F_{\mathrm{V,bi,h',Ed}} = F_{\mathrm{N,bi,h'}} + F_{\mathrm{M,bi,h'}}$ pozioma siła ścinająca,

$F_{\mathrm{V,bi,v',Ed}} = F_{\mathrm{M,bi,v'}}$ poprzeczna siła ścinająca,

$F_{\mathrm{V,bi,Ed}} = \sqrt{F^2_{\mathrm{V,bi,h',Ed}} + F^2_{\mathrm{V,bi,v',Ed}}}$ wypadkowa siła ścinająca.

Tabela B.2 Połączenie N3 — element blachy węzłowej — obliczeniowe siły ścinające w kN w bazie $\{h', v'\}$

Śruba	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
h'_{i}	81,25	16,25	-48,75	48,75	-16,25	-81,25
v'_{i}	-30	-30	-30	30	30	30
r'_{i}	86,61	34,12	57,24	57,24	34,12	86,61
$F_{\mathrm{M,bi}}$	-98,34	-38,74	-64,99	-64,99	-38,74	-98,34
$F_{\mathrm{M,bi,h'}}$	34,06	34,06	34,06	-34,06	-34,06	-34,06
$F_{\mathrm{M,bi,v'}}$	92,25	18,45	-55,35	55,35	-18,45	-92,25
$F_{\mathrm{N,bi}}$	101,57	101,57	101,57	101,57	101,57	101,57
$F_{\mathrm{V,bi,Ed}}$	164,03	136,88	146,49	87,30	69,98	114,31
$F_{\mathrm{V,bi,h',Ed}}$	135,63	135,63	135,63	67,50	67,50	67,50
$F_{\mathrm{V,bi,v',Ed}}$	92,25	18,45	-55,35	55,35	-18,45	-92,25

Zmianę bazy wykonuje się przy:

$$F_{\mathrm{V,bi,h,Ed}} = -F_{\mathrm{V,bi,h',Ed}} \sin(\alpha_3) + F_{\mathrm{V,bi,v',Ed}} \cos(\alpha_3)$$

$$F_{\mathrm{V,bi,v,Ed}} = F_{\mathrm{V,bi,h',Ed}} \cos(\alpha_3) + F_{\mathrm{V,bi,v',Ed}} \sin(\alpha_3)$$

Gdzie $\alpha_3 = 41{,}3°$ (patrz Rysunek B.6).

Wyniki podano w Tabeli B.3

Tabela B.3 Połączenie N3 — element blachy węzłowej — obliczeniowe obciążenia ścinające w kN w układzie odniesienia $\{h, v\}$

Śruba	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
$F_{V,bi,Ed}$	164,03	136,88	146,49	87,30	69,98	114,31
$F_{V,bi,h,Ed}$	-20,21	-75,65	-131,10	-2,97	-58,41	-113,86
$F_{V,bi,v,Ed}$	162,78	114,07	65,36	87,25	38,54	-10,17

Szczegółowe rozwiązania projektowe

Konstrukcja nie jest poddana oddziaływaniom atmosferycznym ani innym wpływom korozyjnym.

Konieczne jest zweryfikowanie szczegółowych rozwiązań projektowych w dwóch różnych kierunkach składowych obciążenia. Biorąc pod uwagę ograniczenia określone w tabeli 3.3 normy EN 1993-1-8, należy dokonać następujących sprawdzeń:

EN 1993-1-8 3.5 (1) oraz Tabela 3.3

$$\min\{e_1; e_2\} \geq 1{,}2\, d_0$$

$$\min\{p_1; p_2\} \geq 2{,}2\, d_0 \text{ lub } \min\{p_1; p_2\} \geq 1{,}2\, d_0, \text{ jeśli } L \geq 2{,}4\, d_0$$

$$\max\{p_1; p_2\} \leq \min\{14\, t; 200\,\text{mm}\}$$

EN 1993-1-8 Tabela 3.3 [5)]

W przypadku parametrów e_1 i e_2 należy stosować minimalne odległości od końca i od krawędzi zgodnie z kierunkami *Gh* i *Gv*. Z kolei w przypadku parametrów p_1 i p_2 należy uwzględnić rozstaw zgodnie z kierunkami *Gh'* i *Gv'*.

Szczegółowe rozwiązania projektowe zweryfikowano w tabeli poniżej.

Tabela B.4 Połączenie N3 — element blachy węzłowej — szczegółowe rozwiązania projektowe

Odległość lub rozstaw	Wartość minimalna	Wartość obliczeniowa	Wartość maksymalna
$\min\{e_1; e_2\}$	31,2	57	
$\min\{p_1; p_2\}$	31,2	60	
$\max\{p_1; p_2\}$		65	200

Obliczeniowa nośność przy docisku $F_{b,Rd}$ każdej śruby

W tabeli 3.4 normy EN 1993-1-8 podano wzory do wyznaczania obliczeniowej nośności przy docisku. Wzory te uwzględniają dwa współczynniki α_b i k_1.

EN 1993-1-8 Tabela 3.4

W przypadku każdej śruby wartość tych współczynników zależy od zorientowania jej obciążeń, jej położenia względem końców blachy węzłowej oraz względem innych śrub.

Uwzględniono więc kolejno obciążenie poziome (obciążenia w kierunku *Gh*) oraz obciążenie pionowe (obciążenia w kierunku *Gv*).

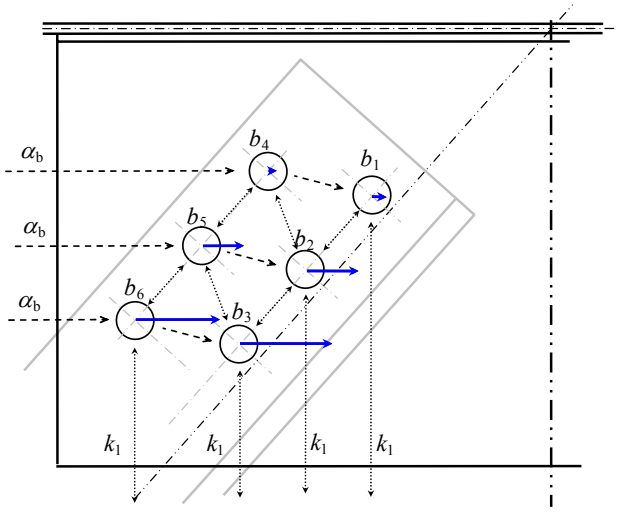
Obciążenie poziome

Obciążenie poziome otrzymane na podstawie wyników z tabeli 3 pokazano na rysunku B.16.

Na tym rysunku widać sposób postępowania przy wyznaczaniu wartości współczynników α_b i k_1 każdej ze śrub. W odniesieniu do każdej śruby można zatem określić:

odległości od końca i od krawędzi (e_1 i e_2) oraz rozstaw (p_1, p_2 i L), które należy uwzględnić;

typ — końcowa lub wewnętrzna bądź końcowa i wewnętrzna.



Rysunek B.16 Połączenie N3 — element blachy węzłowej — obciążenie poziome

Ogólny wzór na obliczeniową nośność przy docisku jest następujący:

EN 1993-1-8 Tabela 3.4

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d\, t}{\gamma_{M2}}$$

Zgodnie z tabelą 3.4. Eurokodu 1993-1-8 współczynniki α_b i k_1 wyznacza się z zależności:

Śruby końcowe

$$\alpha_{b,end} = \min\left\{\frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0\right\}$$

$$k_{1,end} = \min\left\{1,4\frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,8\frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right\}$$

Śruby wewnętrzne

$$\alpha_{b,inner} = \min\left\{\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0\right\}$$

$$k_{1,inner} = \min\left\{1,4\frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right\}$$

Tabela B.6 podaje wartość składowej poziomej obliczeniowych nośności przy docisku $F_{b,bi,h,Rd}$.

Tabela B.5 Połączenie N3 — element blachy węzłowej — składowa pozioma obliczeniowych nośności przy docisku w kN

Śruba	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
e_1						
e_2	172	124	76			90
p_1 [1)]	68,24	68,24	68,24	68,24	68,24	68,24
p_2	65	65 [2)]	65 [2)]	65 [2)]	65 [2)]	65
α_b	$\alpha_{b,inner}$ 0,62	$\alpha_{b,inner}$ 0,62	$\alpha_{b,inner}$ 0,62	$\alpha_{b,inner}$ 0,62	$\alpha_{b,inner}$ 0,62	$\alpha_{b,inner}$ 0,62
k_1	$k_{1,min}$ [3)] 1,80	$k_{1,min}$ [3)] 1,80	$k_{1,min}$ [3)] 1,80	$k_{1,inner}$ 1,80	$k_{1,inner}$ 1,80	$k_{1,min}$ [3)] 1,80
$F_{b,bi,h,Rd}$	165,19	165,19	165,19	165,19	165,19	165,19

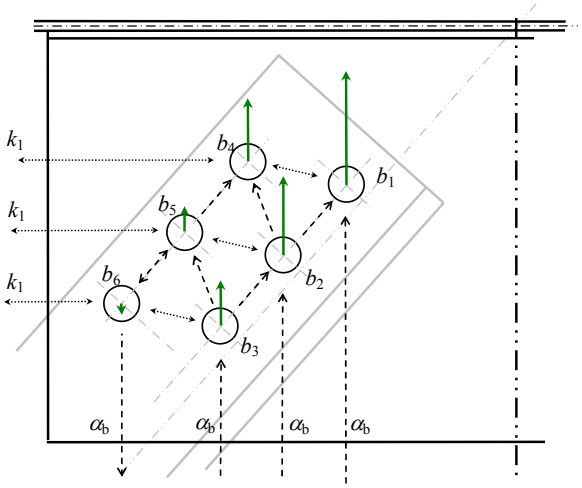
[1)] zachowano odległość L

[2)] $\min\{65; L\}$

[3)] $k_{1,min} = \min\{k_{1,inner}; k_{1,end}\}$

Obciążenie pionowe

Obciążenie pionowe uzyskane na podstawie wyników z tabeli 3 pokazano na rysunku B.5.



Rysunek B.17 Połączenie N3 — element blachy węzłowej — obciążenie pionowe

Tabela B.6 podaje wartość składowej pionowej obliczeniowych nośności przy docisku $F_{b,bi,h,Rd}$.

Tabela B.6 Połączenie N3 — element blachy węzłowej — składowa pionowa obliczeniowych nośności przy docisku w kN

Śruba	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
e_1						90
e_2				141	99	57
p_1	65	65 [1)]	65 [1)]	65 [1)]	65 [1)]	
p_2 [2)]	68,24	68,24	68,24	68,24	68,24	68,24
α_b	$\alpha_{b,inner}$ 0,58	$\alpha_{b,inner}$ 0,58	$\alpha_{b,inner}$ 0,58	$\alpha_{b,inner}$ 0,58	$\alpha_{b,inner}$ 0,58	$\alpha_{b,end}$ 1,00
k_1	$k_{1,inner}$ 1,97	$k_{1,inner}$ 1,97	$k_{1,inner}$ 1,97	$k_{1,min}$ [3)] 1,97	$k_{1,min}$ [3)] 1,97	$k_{1,min}$ [3)] 1,97
$F_{b,bi,v,Rd}$	169,16	169,16	169,16	169,16	169,16	289,98

[1)] $\min\{65; L\}$

[2)] zachowano odległość L

[3)] $k_{1,min} = \min\{k_{1,inner}; k_{1,end}\}$

Obliczeniowa nośność na poślizg $F_{s,Rd}$

EN 1993-1-8 3.9

Przy: $A_s = 353\ \text{mm}^2$ pole przekroju śruby, w której występują naprężenia rozciągające,

$F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s = 247,1$ kN siła naprężenia wstępnego,

EN 1993-1-8 3.9.1 (2)

$n = 2$ liczba powierzchni ciernych w odniesieniu do blachy węzłowej.

Natomiast analizując:

EN 1993-1-8 Tabela 3.6 Tabela 3.7

Śruby w otworach normalnych $\Rightarrow$ $k_s = 1,0$

Klasa powierzchni ciernych = Klasa A $\Rightarrow$ $\mu = 0,5$

EN 1993-1-8 3.9.1 (1)

Wówczas: $$F_{S,Rd} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C} = 197,68\ \text{kN}$$

Sprawdzenie śrub — kontrola indywidualna

Należy spełnić następujące warunki:

W odniesieniu do obliczeniowej nośności na poślizg

EN 1993-1-8 Tabela 3.2

$F_{V,bi,Ed} \le F_{S,Rd}$

W odniesieniu do obliczeniowej nośności przy docisku

EN 1993-1-8 Tabela 3.2 oraz Tabela 3.4 [3)]

$F_{V,bi,h,Ed} \le F_{b,bi,h,Rd}$

$F_{V,bi,v,Ed} \le F_{b,bi,v,Rd}$

Uwaga: Proponowana jest dodatkowa kontrola w oparciu o wzór interakcji:

$$\left(\frac{F_{\mathrm{V,bi,h,Ed}}}{F_{\mathrm{b,bi,h,Rd}}}\right)^2 + \left(\frac{F_{\mathrm{V,bi,v,Ed}}}{F_{\mathrm{b,bi,v,Rd}}}\right)^2 \leq 1$$

Każda śruba musi zostać poddana weryfikacji. Najwyższe wartości nośności nie zawsze odpowiadają najbardziej obciążonym śrubom.

Tabela B.7 Połączenie N3 — element blachy węzłowej — sprawdzenie śruby b_1

Wartości obliczeniowe		Wartości nośności	
$\lvert F_{\mathrm{V,b1,Ed}} \rvert$	164,03	197,68	$F_{\mathrm{S,Rd}}$
$\lvert F_{\mathrm{V,b1,h,Ed}} \rvert$	20,21	165,19	$F_{\mathrm{b,b1,h,Rd}}$
$\lvert F_{\mathrm{V,b1,v,Ed}} \rvert$	162,78	169,16	$F_{\mathrm{b,b1,v,Rd}}$
$\left(\frac{F_{\mathrm{V,b1,h,Ed}}}{F_{\mathrm{b,b1,h,Rd}}}\right)^2 + \left(\frac{F_{\mathrm{V,b1,v,Ed}}}{F_{\mathrm{b,b1,v,Rd}}}\right)^2$	0,94	1	

Sprawdzanie śrub — grupa elementów złącznych

Na podstawie Eurokodu można przyjąć następującą wartość obliczeniowej nośności grupy elementów złącznych: EN 1993-1-8 3.7

$F_{\mathrm{gr,b,Rd}} = \sum_{1}^{n_{bi}} F_{\mathrm{b,bi,Rd}}$, jeżeli w przypadku każdej śruby b_{i} prawdziwa jest zależność $F_{\mathrm{v,Rd}} \geq F_{\mathrm{b,bi,Rd}}$

w innym wypadku $F_{\mathrm{gr,b,Rd}} = n_{\mathrm{bi}} \times \min\{F_{\mathrm{b,bi,Rd}}\}$.

Gdzie nośność przy ścinaniu na płaszczyznę ścinania $F_{v,Rd}$ przyjmuje się jako:

$$F_{\mathrm{v,Rd}} = \frac{\alpha_{\mathrm{v}} f_{\mathrm{ub}} A}{\gamma_{\mathrm{M2}}}$$

Uwzględniając fakt, że płaszczyzna ścinania przechodzi przez gwintowaną część śruby w otworach normalnych:

α_{v} = 0,5

A = A_{s}= 353 mm^2 (pole, w którym występują naprężenia rozciągające).

Wówczas: $F_{\mathrm{v,Rd}}$ = 141,12 kN

Na koniec w przypadku nośności obliczeniowej otrzymujemy:

$F_{\mathrm{gr,b,h,Rd}}$ = 991,17 kN dla składowych poziomych,

$F_{\mathrm{gr,b,v,Rd}}$ = 1014,94 kN dla składowych pionowych.

Sprawdzamy także, że:

$N_{3,g,Ed} \sin(\alpha_3) = 402,21 < F_{\mathrm{gr,b,h,Rd}} = 991{,}17$ kN

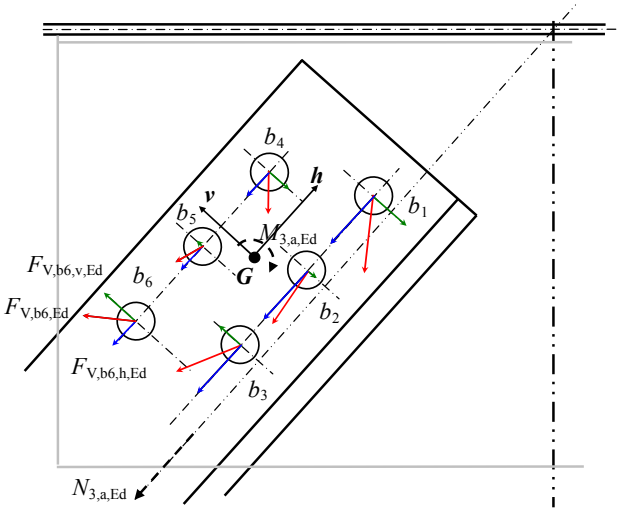
$N_{3,g,Ed} \cos(\alpha_3) = 457,82 < F_{\mathrm{gr,b,h,Rd}} = 1014{,}94$ kN

3.3.5. Połączenie N3 — weryfikacja śrub w odniesieniu do kątownika

Wyznaczanie obliczeniowego obciążenia ścinającego $F_{V,Ed}$ każdej śruby

W Tabeli B.8 podano wyniki dotyczące obliczeniowego obciążenia ścinającego $F_{V,bi,Ed}$ oraz jego składowych $F_{V,bi,h,Ed}$ i $F_{V,bi,v,Ed}$ (patrz Rysunek B.18).

Wyniki te zostały uzyskane na podstawie wyników otrzymanych w przypadku blachy węzłowej w bazie $\{h', v'\}$.



Rysunek B.18 Połączenie N3 — element kątownika — obciążenie

Tabela B.8 Połączenie N3 — element kątownika — obliczeniowe obciążenia ścinające w kN

Śruba	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
$F_{V,bi,Ed}$	82,01	68,44	73,24	43,65	34,99	57,16
$F_{V,bi,h,Ed}$	-67,81	-67,81	-67,81	-33,75	-33,75	-33,75
$F_{V,bi,v,Ed}$	-46,13	-9,23	27,68	-27,68	9,23	46,13

Szczegółowe rozwiązania projektowe

Szczegółowe rozwiązania projektowe zweryfikowano w tabeli poniżej.

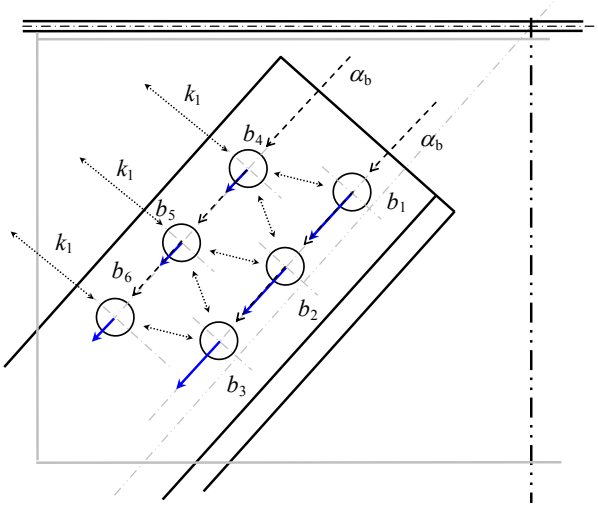
Tabela B.9 Połączenie N3 — element kątownika — szczegółowe rozwiązania projektowe

Odległość lub rozstaw	Wartość minimalna	Wartość obliczeniowa	Wartość maksymalna
$\min\{e_1; e_2\}$	31,2	33	
$\min\{p_1; p_2\}$	31,2	60	
$\max\{p_1; p_2\}$		65	200

Wyznaczanie obliczeniowej nośności przy docisku $F_{b,Rd}$ każdej śruby

Obciążenie poziome

Obciążenie poziome otrzymane na podstawie wyników z Tabeli B.8 pokazano na rysunku B.19.



Rysunek B.19 Połączenie N3 — element kątownika — obciążenia poziome

Tabela B.10 podaje wartość składowej poziomej obliczeniowych nośności przy docisku $F_{b,bi,h,Rd}$.

Tabela B.10 Połączenie N3 — element kątownika — składowa pozioma obliczeniowych nośności przy docisku w kN

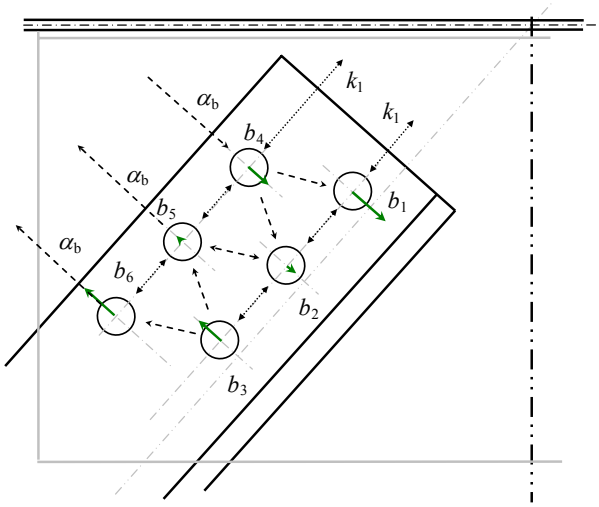
Śruba	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
e_1						
e_2				33	33	33
p_1	65	65	65	65	65	65
p_2 [1)]	68,24	68,24	68,24	68,24	68,24	68,24
α_b	$\alpha_{b,inner}$ 0,58	$\alpha_{b,inner}$ 0,58	$\alpha_{b,inner}$ 0,58	$\alpha_{b,inner}$ 0,58	$\alpha_{b,inner}$ 0,58	$\alpha_{b,inner}$ 0,58
k_1	$k_{1,inner}$ 1,97	$k_{1,inner}$ 1,97	$k_{1,inner}$ 1,97	$k_{1,min}$ [2)] 1,85	$k_{1,min}$ [2)] 1,85	$k_{1,min}$ [2)] 1,85
$F_{b,bi,h,Rd}$	169,16	169,16	169,16	158,84	158,84	158,84

[1)] zachowano odległość L

[2)] $k_{1,min} = \min\{k_{1,inner}; k_{1,end}\}$

Obciążenie pionowe

Obciążenie pionowe uzyskane na podstawie wyników z Tabela B.8 pokazano na rysunku B.20.



Rysunek B.20 Połączenie N3 — element kątownika — obciążenie pionowe

Tabela B.11 podaje wartość składowej pionowej obliczeniowych nośności przy docisku $F_{b,bi,h,Rd}$.

Tabela B.11 Połączenie N3 — element kątownika — składowa pionowa obliczeniowych nośności przy docisku w kN

Śruba	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
e_1					33	33
e_2	35			67,5		
p_1 [1)]	68,24	68,24	68,24	68,24	68,24	68,24
p_2	65	65	65	65	65	65
α_b	$\alpha_{b,inner}$ 0,62	$\alpha_{b,inner}$ 0,62	$\alpha_{b,inner}$ 0,62	$\alpha_{b,inner}$ 0,62	$\alpha_{b,end}$ 0,42	$\alpha_{b,end}$ 0,42
k_1	$k_{1,min}$ [2)] 1,80	$k_{1,inner}$ 1,80	$k_{1,inner}$ 1,80	$k_{1,min}$ [2)] 1,80	$k_{1,inner}$ 1,80	$k_{1,inner}$ 1,80
$F_{b,bi,v,Rd}$	165,19	165,19	165,19	165,19	111,85	111,85

[1)] zachowano odległość L

[2)] $k_{1,min} = \min\{k_{1,inner}; k_{1,end}\}$

Wyznaczanie obliczeniowej nośności na poślizg $F_{s,Rd}$

EN 1993-1-8 3.9

W przypadku elementu kątownika liczba powierzchni ciernych wynosi 1.

EN 1993-1-8 3.9.1 (2)

Zatem przy $n = 1$ otrzymujemy:

$$F_{S,Rd} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C} = 98{,}84 \text{ kN}$$

Sprawdzenie śrub — kontrola indywidualna

Każda śruba musi zostać poddana weryfikacji.

Tabela B.12 Połączenie N3 — element blachy węzłowej — sprawdzenie śruby b_1

Wartości obliczeniowe		Wartości nośności	
$\lvert F_{V,b1,Ed} \rvert$	82,01	98,84	$F_{S,Rd}$
$\lvert F_{V,b1,h,Ed} \rvert$	67,81	169,16	$F_{b,b1,h,Rd}$
$\lvert F_{V,b1,v,Ed} \rvert$	46,13	165,19	$F_{b,b1,v,Rd}$
$\left(\frac{F_{V,b1,h,Ed}}{F_{b,b1,h,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{V,b1,v,Ed}}{F_{b,b1,v,Rd}}\right)^2$	0,24	1	

Sprawdzanie śrub — grupa elementów złącznych

W przypadku kątownika można uwzględnić tylko obciążenie poziome. Wówczas:

$$F_{gr,b,h,Rd} = 991{,}17 \text{ kN}$$

Sprawdzamy także, że:

$$N_{3,a,Ed} = 304{,}70 < F_{gr,b,h,Rd} = 953{,}03 \text{ kN}$$

3.3.6. Połączenie N3 — projekt przekroju poprzecznego netto

W przypadku połączenia poddanego rozciąganiu należy sprawdzić obliczeniową nośność przy rozciąganiu przekroju poprzecznego netto przy otworach na śruby.

EN 1993-1-8 3.4.1 (1) c)

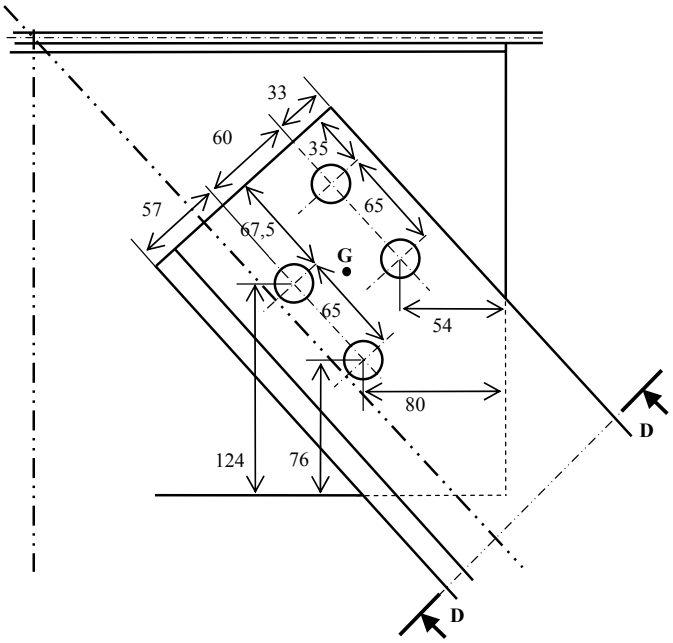
3.3.7. Połączenie N3 — projekt rozerwania blokowego

Z uwagi na fakt, że połączenie to poddane jest ściskaniu, nie jest konieczne wykonywanie projektu pod kątem rozerwania blokowego.

3.4. Połączenie N1 — połączenie śrubowe symetrycznego krzyżulca N1 zbudowanego z podwójnych kątowników z blachą węzłową

Mamy połączenie ścinane poddawane rozciąganiu, które należy zaprojektować jako połączenie kategorii C.

Wymiary elementów składowych połączenia i rozmieszczenie otworów pokazano na rysunku B.21. Przekrój DD jest identyczny jak przekrój CC połączenia N3 (patrz Rysunek B.11).



Rysunek B.21 Połączenie N1 — wymiary (w mm) oraz rozmieszczenie

3.4.1. Połączenie N1 — siły obliczeniowe

Przy: $N_{1,Ed}$ normalna siła rozciągająca przy mimośrodowości e_{N1} względem środka ciężkości połączenia,

$M_{1,N,Ed}$ moment powstały w wyniku mimośrodowości $M_{1,N,Ed} = e_{N1}\, N_{1,Ed}$.

W przypadku blachy węzłowej mamy:

$N_{1,g,Ed}$ = 406,9 kN

e_{N1} = 44,5 mm

$M_{1,g,Ed}$ = $e_{N1}\, N_{1,g,Ed}$ = 18,11 kNm

A w przypadku każdego kątownika:

$N_{1,a,Ed}$ = 203,45 kN

$M_{1,a,Ed}$ = 9,05 kNm

3.4.2. Połączenie N1 — analiza kątownika

Nośność przekroju poprzecznego brutto

Naprężenie wzdłużne

Zakładając równomierny rozkład obciążenia w przekroju, naprężenie wzdłużne wynosi:

$$\sigma_{\mathrm{i}} = \frac{N_{1,\mathrm{a,Ed}}}{A_{1,\mathrm{a}}} + \frac{M_{1,\mathrm{a,Ed}}}{I_{1,\mathrm{a}} / v}$$

Gdzie: $A_{1,\mathrm{a}}$ powierzchnia przekroju poprzecznego kątownika,

$I_{1,\mathrm{a}}$ geometryczny moment bezwładności przekroju poprzecznego kątownika,

v położenie analizowanego włókna końcowego.

Przy: $A_{1,\mathrm{a}} = 4302\ \mathrm{mm}^2$

$I_{1,\mathrm{a}} = 8{,}981\ 10^6\ \mathrm{mm}^4$

$v_1 = 87$ mm oraz $v_2 = 63$ mm (patrz Rysunek B.22)

Otrzymujemy (przy dodatnim ściskaniu):

$\sigma_1 = -134{,}99\ \mathrm{N/mm}^2$

$\sigma_2 = 16{,}22\ \mathrm{N/mm}^2$

Klasa przekroju

$h/t = 10 < 15\varepsilon = 12{,}20$

$(b+h)/2t = 10 > 11{,}5\varepsilon = 9{,}36$

$\Rightarrow$ klasa 4

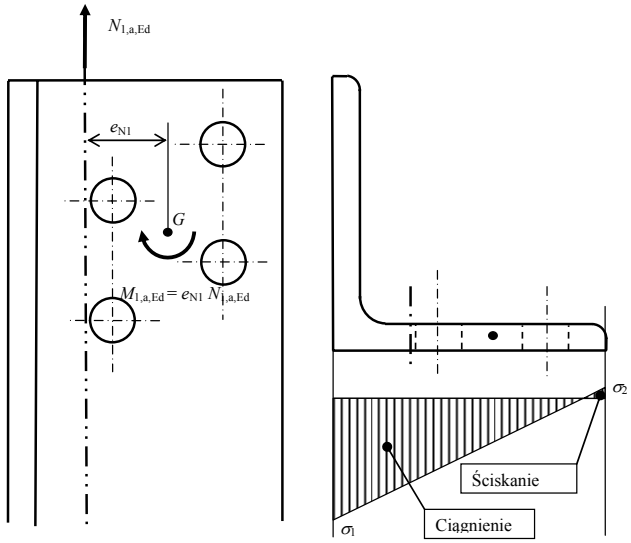
EN 1993-1-1
Tabela 5.2
Arkusz 3 z 3

$c/t = 7{,}93 < 10\varepsilon/\alpha = 10\varepsilon/1 = 8{,}14$

$\Rightarrow$ klasa 2

Tabela 5.2
Arkusz 2 z 3

$\Rightarrow$ Klasa kątownika = klasa 4



Rysunek B.22 Naprężenia w kątowniku N1

Kombinacja M + N

Warunek, który musi zostać spełniony: $\sigma_{x,Ed} = \dfrac{N_{1,a,Ed}}{A_{1,a,eff}} + \dfrac{M_{1,a,Ed}}{W_{1,a,eff}} \le \dfrac{f_y}{\gamma_{M0}}$

EN 1993-1-1 6.2.9.3

przy: $A_{1,a,eff}$ powierzchnia efektywna przekroju poprzecznego

$A_{1,a,eff} = A_{1,a,eff,leg1} + A_{1,a,eff,leg2}$

gdzie $A_{1,a,eff,leg1}$ powierzchnia efektywna w odniesieniu do „wolnego” ramienia,

$A_{1,a,eff,leg2}$ powierzchnia efektywna w odniesieniu do „połączonego” ramienia.

Wyznaczenie efektywnej powierzchni przekroju poprzecznego $A_{3,a,eff,leg1}$

bez redukcji ze względu na fakt, że „wolne” ramię poddane jest działaniu siły rozciągającej

Wyznaczenie efektywnej powierzchni przekroju poprzecznego $A_{3,a,eff,leg2}$

EN 1993-1-5 Tabela 4.2

$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 = -0{,}120$

współczynnik wyboczenia $k_\sigma = 2{,}55$

EN 1993-1-5 4.4 (2)

$\bar{\lambda}_p = 0{,}271 \Rightarrow \qquad \rho = 1 \qquad$ bez redukcji

Weryfikacja

$A_{1,a,eff} = A_{1,a}$ (bez redukcji)

$$\sigma_{x,Ed} = \max(\sigma_1 ; \sigma_2) = 134{,}99 \le \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 355$$

$\Rightarrow$ warunek spełniony

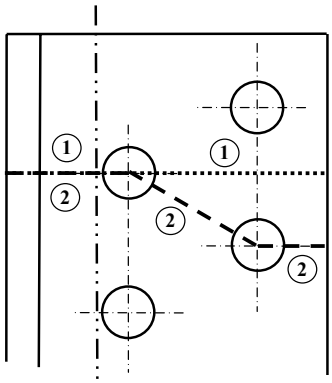
Nośność przekroju poprzecznego netto

Należy spełnić warunek:

$$N_{1,\mathrm{a,Ed}} \le N_{1,\mathrm{a,net,Rd}} = \frac{A_{1,\mathrm{a,net}} f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}}$$

EN 1993-1-1 6.2.3. (1) oraz (4)

Analizowane przekroje poprzeczne netto pokazano na rysunku B.23.



Rysunek B.23 Przekroje poprzeczne netto kątownika N1

Przy: $A_{1,\mathrm{a,net}} = \min(A_{1,a,net1}; A_{1,a,net2}) = \min(3912;3588) = 3588\ \mathrm{mm}^2$

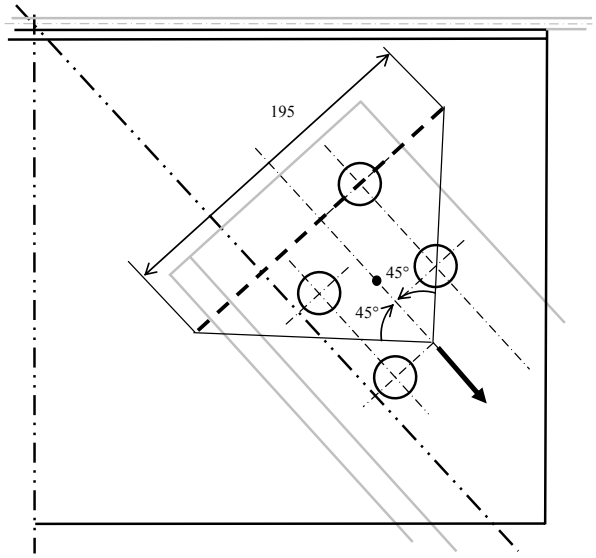
spełniony zostaje warunek:

$$N_{1,\mathrm{a,Ed}} = 203{,}45 < N_{1,\mathrm{a,net,Rd}} = 1317{,}52\ \mathrm{kN}$$

3.4.3. Analiza blachy węzłowej

Nośność przekroju poprzecznego

Do wyznaczenia przekroju poprzecznego brutto blachy węzłowej przyjmuje się rozproszenie siły wewnętrznej $N_{\mathrm{g,Ed}}$ w zakresie 45° (patrz Rysunek B.24).



Rysunek B.24 Połączenie N1 — rozproszenie siły wewnętrznej w zakresie 45°

Muszą zostać spełnione następujące warunki:

$$\sigma_{\mathrm{x,Ed}} = \frac{N_{1,\mathrm{g,Ed}}}{A_{1,\mathrm{g}}} \pm \frac{M_{1,\mathrm{g,Ed}}}{I_{1,\mathrm{g}}/v} \le \frac{f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}}$$

przy: $A_{1,\mathrm{g}} = 195 \times t_{\mathrm{g}} = 2925\ \mathrm{mm}^2$

$I_{3,\mathrm{g}} = t_g \times 195^3/12 = 9268594\ \mathrm{mm}^4$

$v = +195/2\ \mathrm{mm}$

Otrzymujemy: $\sigma_{\mathrm{x,Ed}} = 139{,}11 + 190{,}51 = 329{,}62 \le \frac{f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}} = 355\ \mathrm{N/mm}^2$

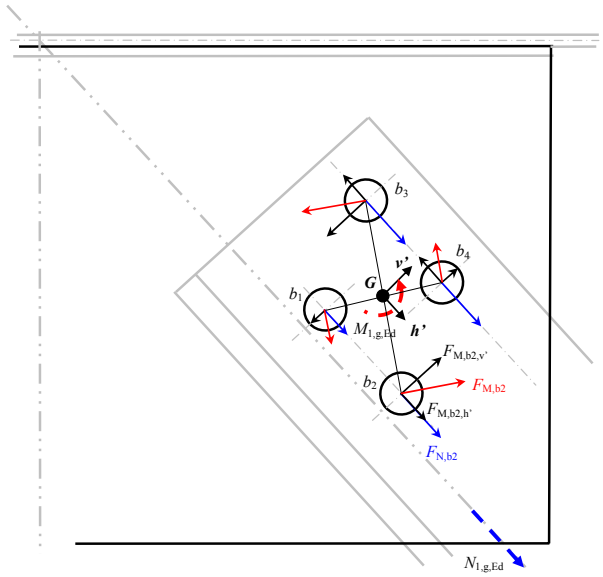
3.4.4. Połączenie N1 — Weryfikacja śrub w odniesieniu do blachy węzłowej

Wyznaczanie obliczeniowego obciążenia ścinającego $F_{V,Ed}$ każdej śruby

Ze względu na kierunek siły normalnej $N_{1,\mathrm{Ed}}$ obciążenie na każdej śrubie nie jest równoległe do krawędzi blachy węzłowej. W rezultacie przeprowadzona zostanie analiza składowych obliczeniowego obciążenia ścinającego równoległych i normalnych względem końca elementu konstrukcyjnego.

EN 1993-1-8 Tabela 3.4 [3)]

Obliczenia składowych dokonuje się w ten sam sposób, co w przypadku połączenia N3 (patrz 3.3.4). Obliczone zostają składowe w bazie $\{h', v'\}$ (patrz Rysunek B.25), a następnie w bazie $\{h, v\}$ (patrz Rysunek B.26).

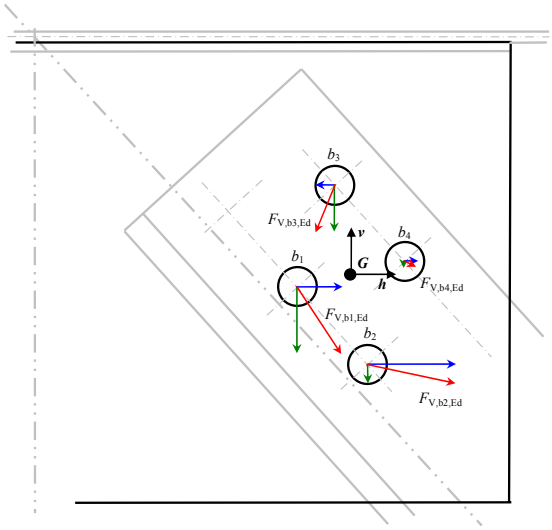


Rysunek B.25 Połączenie N1 — element blachy węzłowej — położenia

Tabela B.13 zawiera obliczenia i wyniki dotyczące obliczeniowego obciążenia ścinającego $F_{\mathrm{V,bi,Ed}}$ oraz jego dwóch składowych $F_{\mathrm{V,bi,h',Ed}}$ i $F_{\mathrm{V,bi,v',Ed}}$ w przypadku każdej ze śrub b_{i} w układzie odniesienia $\{h', v'\}$.

Tabela B.13 Połączenie N1 — element blachy węzłowej — obliczeniowe obciążenia ścinające w kN w układzie odniesienia $\{h', v'\}$.

Śruba	b_1	b_2	b_3	b_4
h_i'	-16,25	48,75	-48,75	16,25
v_i'	-30	-30	30	30
r_i'	34,12	57,24	57,24	34,12
$F_{M,bi}$	69,56	116,70	116,70	69,56
$F_{M,bi,h'}$	61,16	61,16	-61,16	-61,16
$F_{M,bi,v'}$	-33,13	99,39	-99,39	33,13
$F_{N,bi}$	101,73	101,73	101,73	101,73
$F_{V,bi,Ed}$	166,22	190,82	107,35	52,37
$F_{V,bi,h',Ed}$	162,89	162,89	40,56	40,56
$F_{V,bi,v',Ed}$	-33,13	99,39	-99,39	33,13



Rysunek B.26 Połączenie N1 — element blachy węzłowej — obciążenia

Zmianę bazy wykonuje się przy:

$$F_{V,bi,h,Ed} = F_{V,bi,h',Ed}\cos(\alpha_3) + F_{V,bi,v',Ed}\sin(\alpha_3)$$

$$F_{V,bi,v,Ed} = -F_{V,bi,h',Ed}\sin(\alpha_1) + F_{V,bi,v',Ed}\cos(\alpha_1)$$

Gdzie $\alpha_1 = 42°$ (patrz Rysunek B.6).

Tabela B.14 Połączenie N1 — element blachy węzłowej — obliczeniowe obciążenia ścinające w kN w układzie odniesienia $\{h, v\}$.

Śruba	b_1	b_2	b_3	b_4
$F_{V,bi,Ed}$	166,22	190,82	107,35	52,37
$F_{V,bi,h,Ed}$	84,37	182,86	-46,72	51,76
$F_{V,bi,v,Ed}$	-143,22	-54,54	-96,65	-7,97

Szczegółowe rozwiązania projektowe

Szczegółowe rozwiązania projektowe zweryfikowano w tabeli poniżej.

W przypadku parametrów e_1 i e_2 należy stosować minimalne odległości od końca i od krawędzi zgodnie z odpowiednim kierunkiem (*Gh* lub *Gv*). W przypadku parametrów p_1 i p_2 uwzględniony zostaje rozstaw zgodnie z głównym kierunkiem węzła (*Gh'* lub *Gv'*).

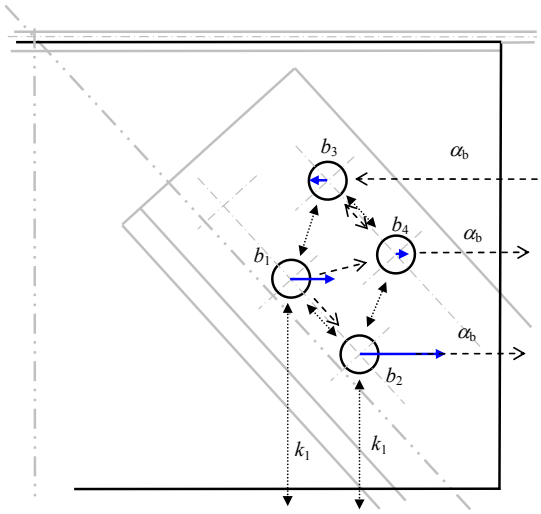
Tabela B.15 Połączenie N1 — element blachy węzłowej — szczegółowe rozwiązania projektowe

Odległość lub rozstaw	Wartość minimalna	Wartość obliczeniowa	Wartość maksymalna
$\min\{e_1; e_2\}$	31,2	54	
$\min\{p_1; p_2\}$	31,2	60	
$\max\{p_1; p_2\}$		65	200

Wyznaczanie obliczeniowej nośności przy docisku $F_{b,Rd}$ każdej śruby

Obciążenie poziome

Obciążenie poziome otrzymane na podstawie wyników z Tabeli B.14 pokazano na rysunku B.27.



Rysunek B.27 Połączenie N1 — element blachy węzłowej — obciążenie poziome

Tabela B.16 podaje wartość składowej poziomej obliczeniowych nośności przy docisku $F_{b,bi,h,Rd}$.

Tabela B.16 Połączenie N1 — element blachy węzłowej — składowa pozioma obliczeniowych nośności przy docisku w kN

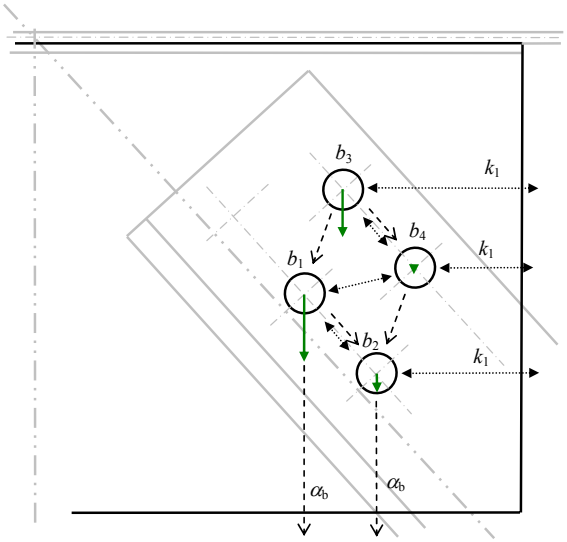
Śruba	b_1	b_2	b_3	b_4
e_1		80		54
e_2	124	76		
p_1	65 [1)]		65	
p_2	65 [1)]	65 [1)]	65 [1)]	65 [1)]
α_b	$\alpha_{b,inner}$	$\alpha_{b,end}$	$\alpha_{b,inner}$	$\alpha_{b,end}$
	0,58	1,00	0,58	0,69
k_1	$k_{1,min}$ [3)]	$k_{1,min}$ [3)]	$k_{1,inner}$	$k_{1,inner}$
	1,80	1,80	1,80	1,80
$F_{b,bi,h,Rd}$	154,22	264,38	154,22	183,04

[1)] $\min\{65; L\}$

[2)] $k_{1,min} = \min\{k_{1,inner}; k_{1,end}\}$

Obciążenie pionowe

Obciążenie pionowe uzyskane na podstawie wyników z Tabeli B.14 pokazano na rysunku B.28.



Rysunek B.28 Połączenie N1 — element blachy węzłowej — obciążenie pionowe

Tabela B.17 podaje wartość składowej pionowej obliczeniowych nośności przy docisku $F_{b,bi,h,Rd}$.

Tabela B.17 Połączenie N1 — element blachy węzłowej — składowa pionowa obliczeniowych nośności przy docisku w kN

Śruba	b_1	b_2	b_3	b_4
e_1	124	76		
e_2		80	98	54
p_1			65 [1)]	65 [1)]
p_2	65 [1)]	65	65	65 [1)]
α_b	$\alpha_{b,end}$	$\alpha_{b,end}$	$\alpha_{b,inner}$	$\alpha_{b,inner}$
	1,00	0,97	0,58	0,58
k_1	$k_{1,inner}$	$k_{1,min}$ [2)]	$k_{1,min}$ [2)]	$k_{1,min}$ [2)]
	1,80	1,80	1,80	1,80
$F_{b,bi,v,Rd}$	264,38	257,60	154,22	154,22

[1)] $\min\{65; L\}$

[2)] $k_{1,min} = \min\{k_{1,inner}; k_{1,end}\}$

Wyznaczanie obliczeniowej nośności na poślizg $F_{s,Rd}$

EN 1993-1-8 3.9

EN 1993-1-8 3.9.1 (1)

Przy liczbie powierzchni ciernych w odniesieniu do blachy węzłowej $n = 2$ otrzymujemy:

$$F_{S,Rd} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C} = 197{,}68 \text{ kN}$$

Sprawdzenie śrub — kontrola indywidualna

Każda śruba musi zostać poddana weryfikacji.

W Tabeli B.18 i Tabeli B.19 podsumowano jedynie weryfikację śrub b_1 oraz b_2.

Tabela B.18 Połączenie N1 — element blachy węzłowej — sprawdzenie śruby b_1

Wartości obliczeniowe		Wartości nośności	
$\lvert F_{V,b1,Ed} \rvert$	166,22	197,68	$F_{S,Rd}$
$\lvert F_{V,b1,h,Ed} \rvert$	84,37	154,22	$F_{b,b1,h,Rd}$
$\lvert F_{V,b1,v,Ed} \rvert$	143,22	264,38	$F_{b,b1,v,Rd}$
$\left(\frac{F_{V,b1,h,Ed}}{F_{b,b1,h,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{V,b1,v,Ed}}{F_{b,b1,v,Rd}}\right)^2$	0,59	1	

Tabela B.19 Połączenie N1 — element blachy węzłowej — sprawdzenie śruby b_2

Wartości obliczeniowe		Wartości nośności	
$\lvert F_{V,b1,Ed} \rvert$	190,82	197,68	$F_{S,Rd}$
$\lvert F_{V,b1,h,Ed} \rvert$	182,86	264,38	$F_{b,b1,h,Rd}$
$\lvert F_{V,b1,v,Ed} \rvert$	54,54	257,60	$F_{b,b1,v,Rd}$
$\left(\frac{F_{V,b1,h,Ed}}{F_{b,b1,h,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{V,b1,v,Ed}}{F_{b,b1,v,Rd}}\right)^2$	0,52	1	

Sprawdzanie śrub — grupa elementów złącznych

Uwzględniając fakt, że płaszczyzna ścinania przechodzi przez gwintowaną część śruby w otworach normalnych:

α_v = 0,5

A = A_s= 353 mm^2 (pole, w którym występują naprężenia rozciągające).

Otrzymujemy:

$F_{v,Rd}$ = 141,12 kN

Oraz w przypadku nośności obliczeniowej:

$F_{gr,b,h,Rd}$ = 616,90 kN dla składowych poziomych,

$F_{gr,b,v,Rd}$ = 616,90 kN dla składowych pionowych.

Sprawdzamy także, że:

$$N_{1,g,Ed} \sin(\alpha_1) = 272,27 < F_{gr,b,h,Rd} = 616,90 \text{ kN}$$

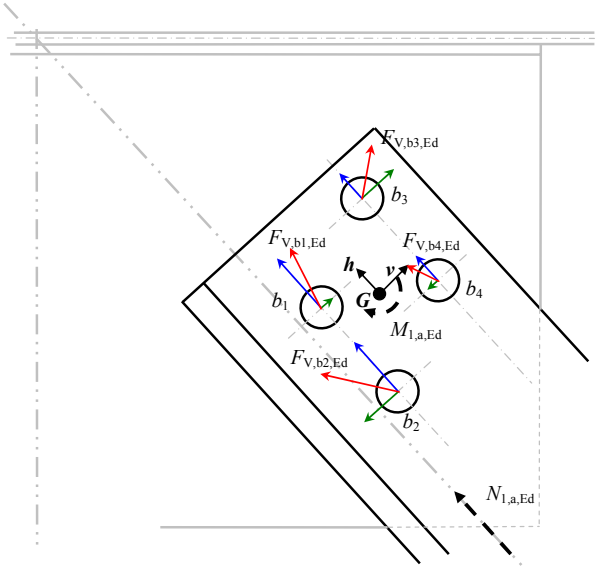
$$N_{1,g,Ed} \cos(\alpha_1) = 302,39 < F_{gr,b,h,Rd} = 616,90 \text{ kN}$$

3.4.5. Połączenie N1 — weryfikacja śrub w odniesieniu do kątownika

Wyznaczanie obliczeniowego obciążenia ścinającego $F_{V,Ed}$ każdej śruby

W Tabeli B.20 podano wyniki dotyczące obliczeniowego obciążenia ścinającego $F_{V,bi,Ed}$ oraz jego składowych $F_{V,bi,h,Ed}$ i $F_{V,bi,v,Ed}$ (patrz Rysunek B.29).

Wyniki te zostały uzyskane na podstawie wyników otrzymanych w przypadku blachy węzłowej w bazie $\{h', v'\}$.



Rysunek B.29 Połączenie N1 — element kątownika — obciążenie

Tabela B.20 Połączenie N1 — element kątownika — obliczeniowe obciążenia ścinające w kN

Śruba	b_1	b_2	b_3	b_4
$F_{V,bi,Ed}$	83,11	95,41	53,67	26,19
$F_{V,bi,h,Ed}$	81,44	81,44	20,28	20,28
$F_{V,bi,v,Ed}$	16,57	-49,70	49,70	-16,57

Szczegółowe rozwiązania projektowe

Szczegółowe rozwiązania projektowe zweryfikowano w tabeli poniżej.

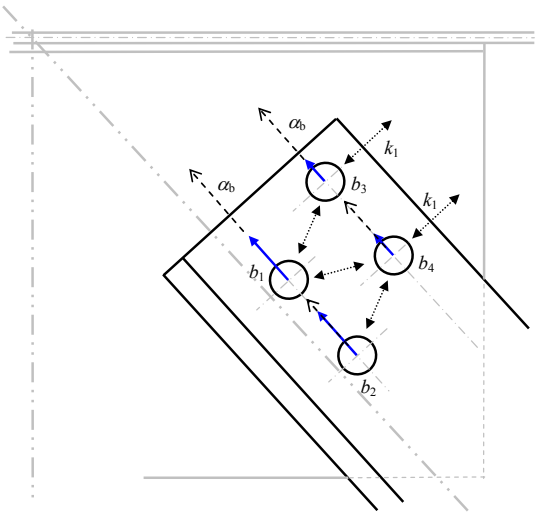
Tabela B.21 Połączenie N1 — element kątownika — obciążenie poziome — szczegółowe rozwiązania projektowe

Odległość lub rozstaw	Wartość minimalna	Wartość obliczeniowa	Wartość maksymalna
$\min\{e_1; e_2\}$	31,2	33	
$\min\{p_1; p_2\}$	57,2	60	200
$\max\{p_1; p_2\}$		65	200

Wyznaczanie obliczeniowej nośności przy docisku $F_{b,Rd}$ każdej śruby

Obciążenie poziome

Obciążenie poziome otrzymane na podstawie wyników z Tabeli B.20 pokazano na rysunku B.30.



Rysunek B.30 Połączenie N1 — element kątownika — obciążenia poziome

Tabela B.22 podaje wartość składowej poziomej obliczeniowych nośności przy docisku $F_{b,bi,h,Rd}$.

Tabela B.22 Połączenie N1 — element kątownika — składowa pozioma obliczeniowych nośności przy docisku w kN

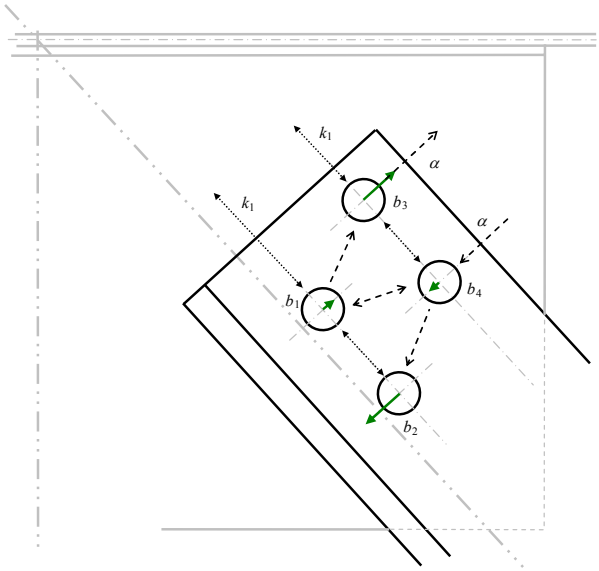
Śruba	b_1	b_2	b_3	b_4
e_1	67,5		35	
e_2			33	33
p_1		65		65
p_2 [1)]	68,24	68,24	68,24	68,24
α_b	$\alpha_{b,end}$	$\alpha_{b,inner}$	$\alpha_{b,end}$	$\alpha_{b,inner}$
	0,87	0,58	0,45	0,58
k_1	$k_{1,inner}$	$k_{1,inner}$	$k_{1,min}$ [2)]	$k_{1,min}$ [2)]
	1,97	1,97	1,85	1,85
$F_{b,bi,h,Rd}$	250,95	169,16	122,18	158,84

[1)] zachowano odległość L

[2)] $k_{1,min} = \min\{k_{1,inner}; k_{1,end}\}$

Obciążenie pionowe

Obciążenie pionowe uzyskane na podstawie wyników z tabeli 20 pokazano na rysunku B.31.



Rysunek B.31 Połączenie N1 — element kątownika — obciążenie pionowe

Tabela B.23 podaje wartość składowej pionowej obliczeniowych nośności przy docisku $F_{b,bi,h,Rd}$.

Tabela B.23 Połączenie N1 — element kątownika — składowa pionowa obliczeniowych nośności przy docisku w kN

Śruba	b_1	b_2	b_3	b_4
e_1			33	
e_2	67,5		35	
p_1 [1)]	68,24	68,24		68,24
p_2	65	65	65	65
α_b	$\alpha_{b,inner}$ 0,62	$\alpha_{b,inner}$ 0,62	$\alpha_{b,end}$ 0,42	$\alpha_{b,inner}$ 0,62
k_1	$k_{1,min}$ [2)] 1,80	$k_{1,inner}$ 1,80	$k_{1,min}$ [2)] 1,80	$k_{1,inner}$ 1,80
$F_{b,bi,h,Rd}$	165,19	165,19	111,85	165,19

[1)] zachowano odległość L

[2)] $k_{1,min} = \min\{k_{1,inner}; k_{1,end}\}$

Wyznaczanie obliczeniowej nośności na poślizg $F_{s,Rd}$

EN 1993-1-8 3.9

W przypadku elementu kątownika liczba powierzchni ciernych wynosi 1.

EN 1993-1-8 3.9.1 (2)

Zatem przy $n = 1$ otrzymujemy:

$$F_{S,Rd} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C} = 98{,}84 \text{ kN}$$

Sprawdzenie śrub — kontrola indywidualna

Każda ze śrub musi zostać poddana weryfikacji. W Tabeli B.24 podsumowano jedynie kontrole śruby b_2.

Tabela B.24 Połączenie N1 — element blachy węzłowej — sprawdzenie śruby b_2

Wartości obliczeniowe		Wartości nośności	
$\lvert F_{V,b1,Ed} \rvert$	95,41	98,84	$F_{S,Rd}$
$\lvert F_{V,b1,h,Ed} \rvert$	81,44	169,16	$F_{b,b1,h,Rd}$
$\lvert F_{V,b1,v,Ed} \rvert$	49,70	165,19	$F_{b,b1,v,Rd}$
$\left(\frac{F_{V,b1,h,Ed}}{F_{b,b1,h,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{V,b1,v,Ed}}{F_{b,b1,v,Rd}}\right)^2$	0,32	1	

Sprawdzanie śrub — grupa elementów złącznych

W przypadku kątownika można uwzględnić tylko obciążenie poziome:

$F_{gr,b,h,Rd} = 488{,}73$ kN

Sprawdzamy także, że:

$N_{1,a,Ed} = 203{,}45 < F_{gr,b,h,Rd} = 488{,}73$ kN

3.4.6. Połączenie N1 — projekt przekroju poprzecznego netto

Element blachy węzłowej

W przypadku połączenia rozciąganego należy poddać weryfikacji projekt przekrojów poprzecznych netto.

EN 1993-1-8 3.4.1 (1) c) oraz Tabela 3.2

Należy zweryfikować przekrój poprzeczny netto oznaczony jako 1 na rysunku B.32. Przekrój ten musi spełnić następujący warunek:

$$n_b \frac{N_{1,g,Ed}}{n_{bt}} \le \frac{A_{net1} f_y}{\gamma_{M0}}$$

Gdzie $n_b = 2$ liczba śrub w odniesieniu do przekroju poprzecznego,

$n_{bt} = 4$ całkowita liczba śrub w połączeniu.

Przy $A_{net1} = 2194$ mm^2

Spełniony zostaje warunek: $n_b \frac{N_{1,g,Ed}}{n_{bt}} = 203{,}4 < \frac{A_{net1} f_y}{\gamma_{M0}} = 778$ kN

Element kątownika

Przekrój poprzeczny netto został już zweryfikowany (patrz 3.4.2).

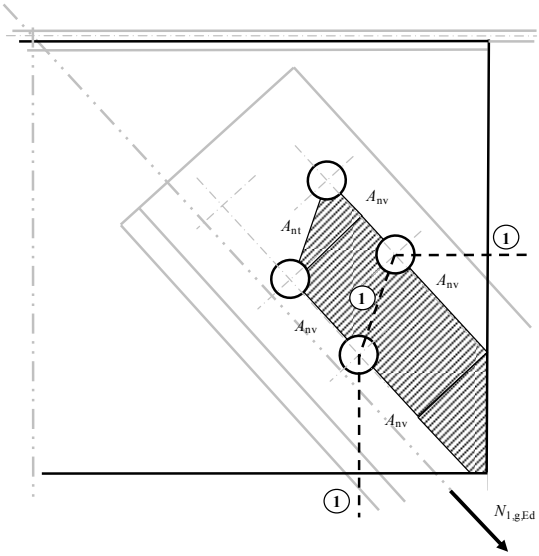
Dodatkowo weryfikacji dokonano przy zastosowaniu parametru N_{Ed} w miejsce $n_b F_{V,Ed}$.

3.4.7. Połączenie N1 — projekt rozerwania blokowego

EN 1993-1-8 3.10.2

Element blachy węzłowej

Rysunek B.32 przedstawia rozerwanie blokowe w przypadku blachy węzłowej.



Rysunek B.32 Połączenie N1 — rozerwanie blokowe w przypadku blachy węzłowej

Omawiana grupa śrub poddana jest obciążeniu mimośrodowemu i wymagane jest spełnienie warunku:

EN 1993-1-8 3.10.2 (3)

$$N_{1,g,Ed} \le V_{eff,2,Rd}$$

Gdzie $$V_{eff,2,Rd} = \frac{0,5 f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{f_y A_{nv}}{\gamma_{M0}}$$

Przy $A_{nt} = 633,6\ \text{mm}^2$

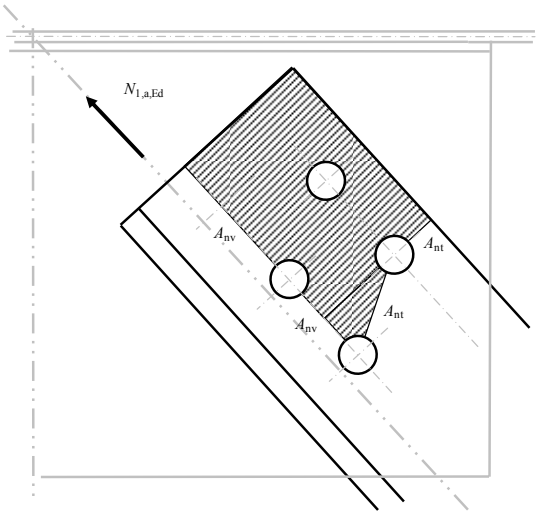
$A_{nv} = 3533,1\ \text{mm}^2$

Spełniony zostaje warunek:

$$N_{1,g,Ed} = 406,9 \le V_{eff,2,Rd} = 853,4\ \text{kN}$$

Element kątownika

Rysunek B.33 przedstawia rozerwanie blokowe w przypadku blachy węzłowej.



Rysunek B.33 Połączenie N1 — rozerwanie blokowe w przypadku kątownika

Omawiana grupa śrub poddana jest obciążeniu mimośrodowemu i wymagane jest spełnienie warunku:

EN 1993-1-8 3.10.2 (3)

$$N_{1,a,Ed} \leq V_{eff,2,Rd}$$

Przy $A_{nt} = 933{,}6\ \text{mm}^2$

$A_{nv} = 1402{,}5\ \text{mm}^2$

Spełniony zostaje warunek:

$$N_{1,g,Ed} = 203{,}45 \leq V_{eff,2,Rd} = 407{,}91\ \text{kN}$$

3.5. Połączenie N2 — połączenie śrubowe słupka N2 wykonanego z pojedynczego kątownika z blachą węzłową

Mamy połączenie ścinane poddawane rozciąganiu, które należy zaprojektować jako połączenie kategorii C.

Ze względu na to, że obciążenie jest niewielkie, nie wykonuje się sprawdzenia tego połączenia. W innym wypadku stosuje się tę samą procedurę, dodając poniższy punkt.

Mamy do czynienia z pojedynczym kątownikiem poddawanym rozciąganiu przez pojedynczy rząd śrub na jednym ramieniu. Podczas sprawdzania przekroju poprzecznego netto tego kątownika nośność obliczeniową należy wyznaczyć w następujący sposób:

EN 1993-1-8 3.10.3 (2) oraz Tabela 3.8

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}}$$

Przy $\beta_2 = 0{,}4$ ($p_1 = 65 = 2{,}5 d_0$)

3.6. Wpływ mimośrodowości oraz innych parametrów

Przeanalizowane zostaną tylko śruby w odniesieniu do blachy węzłowej.

3.6.1. Połączenie N3 — moment wywołany mimośrodowością

Wpływ mimośrodowości zależy od położenia śrub w stosunku do osi neutralnej, a także w stosunku do siebie.

Niech moment wywołany mimośrodowością wynosi 0. W tym przypadku niezależnie od analizowanej śruby otrzymujemy w bazie $\{h, v\}$:

$\left|F_{\mathrm{V,b,Ed}}\right| = 101{,}57\ \mathrm{kN}$ (wartość bez momentu wywołanego mimośrodowością),

$\left|F_{\mathrm{V,b,h,Ed}}\right| = 67{,}03\ \mathrm{kN}$ (wartość bez momentu wywołanego mimośrodowością),

$\left|F_{\mathrm{V,b,v,Ed}}\right| = 76{,}30\ \mathrm{kN}$ (wartość bez momentu wywołanego mimośrodowością).

Wartości do porównania z wynikami otrzymanymi w przypadku śruby b_1:

$\left|F_{\mathrm{V,b,Ed}}\right| = 164{,}03\ \mathrm{kN}$ (wartość z momentem wywołanym mimośrodowością),

$\left|F_{\mathrm{V,b,h,Ed}}\right| = 20{,}21\ \mathrm{kN}$ (wartość z momentem wywołanym mimośrodowością),

$\left|F_{\mathrm{V,b,v,Ed}}\right| = 162{,}78\ \mathrm{kN}$ (wartość z momentem wywołanym mimośrodowością).

3.6.2. Połączenie N3 — wpływ liczby śrub i rozstawu p_1

Należy zmniejszyć liczbę śrub z 6 do 5 przez usunięcie śruby oznaczonej symbolem b_6 (patrz Rysunek B.14). Tego typu zmiana wpływa na zmianę położenia środka ciężkości grupy śrub. Nawet jeśli moment wywołany mimośrodowością zostanie zmniejszony, obliczeniowe obciążenia ścinające na śrubę ulegną zwiększeniu. Natomiast dwie śruby (b_1 i b_3) ponownie nie spełniają warunków dotyczących obliczeniowych nośności przy docisku (patrz tabele poniżej).

Tabela B.25 Połączenie N3 — element blachy węzłowej — śruba b_1 — zmniejszenie całkowitej liczby śrub

Wartości obliczeniowe			Wartości nośności	
Całkowita liczba śrub	6	5		
$\lvert F_{V,b1,Ed} \rvert$	164,03	189,76	197,68	$F_{S,Rd}$
$\lvert F_{V,b1,h,Ed} \rvert$	20,21	28,43	165,19	$F_{b,b1,h,Rd}$
$\lvert F_{V,b1,v,Ed} \rvert$	162,78	**187,62**	**169,16**	$F_{b,b1,v,Rd}$

Tabela B.26 Połączenie N3 — element blachy węzłowej — śruba b_3 — zmniejszenie całkowitej liczby śrub

Wartości obliczeniowe			Wartości nośności	
Całkowita liczba śrub	6	5		
$\lvert F_{V,b1,Ed} \rvert$	146,49	189,76	197,68	$F_{S,Rd}$
$\lvert F_{V,b1,h,Ed} \rvert$	131,10	**182,40**	**165,19**	$F_{b,b1,h,Rd}$
$\lvert F_{V,b1,v,Ed} \rvert$	65,36	52,36	169,16	$F_{b,b1,v,Rd}$

Na tym etapie należy zwiększyć wartość rozstawu p_1 z 65 do 75 mm. Wówczas wszystkie śruby spełniają kryteria. Dla przykładu przedstawiono wyniki uzyskane w przypadku śruby b_1.

Tabela B.27 Połączenie N3 — element blachy węzłowej — śruba b_1 — zwiększenie rozstawu p_1 do 75 mm

Wartości obliczeniowe		Wartości nośności	
$\lvert F_{V,b1,Ed} \rvert$	180,06	197,68	$F_{S,Rd}$
$\lvert F_{V,b1,h,Ed} \rvert$	28,74	225,70	$F_{b,b1,h,Rd}$
$\lvert F_{V,b1,v,Ed} \rvert$	177,75	220,50	$F_{b,b1,v,Rd}$

3.6.3. Połączenie N1 — wpływ liczby śrub

Należy zmniejszyć liczbę śrub z 4 do 3 przez usunięcie śruby oznaczonej symbolem b_3 (patrz Rysunek B.25). Moment wywołany mimośrodowością zmniejsza się, podczas gdy obliczeniowe obciążenia ścinające na śrubę ulegają zwiększeniu. Natomiast dwie śruby (b_1 i b_2) ponownie nie spełniają warunków dotyczących obliczeniowych nośności przy docisku (patrz tabele poniżej).

Tabela B.28 Połączenie N1 — element blachy węzłowej — śruba b_1 — zmniejszenie całkowitej liczby śrub

Wartości obliczeniowe			Wartości nośności	
Całkowita liczba śrub	4	3		
$\lvert F_{V,b1,Ed} \rvert$	166,22	**222,19**	**197,68**	$F_{S,Rd}$
$\lvert F_{V,b1,h,Ed} \rvert$	84,37	57,25	154,22	$F_{b,b1,h,Rd}$
$\lvert F_{V,b1,v,Ed} \rvert$	143,22	214,69	264,38	$F_{b,b1,v,Rd}$

Tabela B.29 Połączenie N1 — element blachy węzłowej — śruba b_2 — zmniejszenie całkowitej liczby śrub

Wartości obliczeniowe			Wartości nośności	
Całkowita liczba śrub	4	3		
$\lvert F_{V,b1,Ed} \rvert$	190,82	**222,19**	**197,68**	$F_{S,Rd}$
$\lvert F_{V,b1,h,Ed} \rvert$	182,86	207,52	264,38	$F_{b,b1,h,Rd}$
$\lvert F_{V,b1,v,Ed} \rvert$	54,54	79,38	257,60	$F_{b,b1,v,Rd}$

Aby spełnić kryteria, konieczne jest zwiększenie wartości rozstawu p_1 z 65 do co najmniej 101 mm. Dla przykładu przedstawiono wyniki uzyskane w przypadku śruby b_1.

Tabela B.30 Połączenie N3 — element blachy węzłowej — śruba b_1 — zwiększenie rozstawu p_1 do 101 mm

Wartości obliczeniowe		Wartości nośności	
$\lvert F_{V,b1,Ed} \rvert$	197,33	197,68	$F_{S,Rd}$