



POLITECHNIKA POZNAŃSKA

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

INSTYTUT KONSTRUKCJI BUDOWLANYCH

Zakład Budownictwa

PIOTR PIEKIELNY

ŁUKASZ SZCZECIŃSKI

**Opracowanie i implementacja algorytmu
projektowania połączenia doczołowego belki
do belki oraz belki do słupa**

PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

Promotor:

dr inż. Krzysztof Szajek

Poznań, 2017

Spis treści

Autorstwo poszczególnych części pracy	4
Piotr Piekini:.....	4
Łukasz Szczeciński:	4
Streszczenie	5
Abstract.....	5
Podstawowe oznaczenia	6
Duże litery łacińskie:.....	6
Małe litery łacińskie:.....	7
Litery greckie:	7
1. Wprowadzenie.....	8
1.1. Wstęp.....	8
1.2. Połączenia doczołowe	8
1.3. Cel i zakres pracy	9
2. Opracowanie algorytmów	10
2.1. Ogólny algorytm pracy programu	10
2.2. Nośność obliczeniowa panelu środknika słupa w warunkach ścinania	11
2.3. Nośność obliczeniowa przy zginaniu i rozciąganiu	12
2.3.1 Wyznaczanie efektywnej obliczeniowa nośność śrub szeregu r przy rozciąganiu	13
2.3.2 Wyznaczanie efektywnej obliczeniowa nośność środknika słupa przy rozciąganiu	14
2.3.3 Wyznaczanie efektywnej obliczeniowa nośność pasa słupa i blachy czołowej przy zginaniu	15
2.3.4 Wyznaczanie efektywnej obliczeniowa nośność środknika belki przy rozciąganiu	15
2.3.5 Wyznaczanie efektywnej długości zastępczego króćca teowego.....	16
2.3.6 Wyznaczanie efektywnej obliczeniowa nośność środknika słupa przy ściskaniu	17
2.3.7 Wyznaczanie efektywnej obliczeniowa nośność pasa i środknika belki przy ściskaniu	17
2.4. Nośność obliczeniowa przy ścinaniu	17
2.4.1 Wyznaczanie efektywnej obliczeniowa nośność śrub szeregu r przy ścinaniu... ..	18
2.4.2 Wyznaczanie efektywnej obliczeniowej nośności śruby na ścinanie.....	19
2.4.3 Wyznaczanie efektywnej obliczeniowej nośności śruby na docisk	19
2.5. Nośność obliczeniowa spoin łączących belkę i blachę czołową.....	20
2.5.1 Sprawdzenie długości i obliczenie powierzchni spoin.....	21
2.5.2 Obliczenie momentu bezwładności układu spoin	21

2.5.3 Obliczenie naprężeń w czterech punktach	21
2.5.4 Sprawdzenie warunków nośności.....	23
3. Narzędzia wspomagające projektowanie połączeń doczołowych	24
3.1. Środowisko programowania.....	24
3.2. Dodatkowe moduły do wymiarowania w programie Soldis PROJEKTANT.....	24
3.3. Warunki projektowanego połączenia	24
3.4. Instrukcja instalacji modułów	24
3.5. Obsługa programu	25
4. Przykładowe obliczenia	29
5. Podsumowanie.....	31
Spis literatury	32
Spis norm	32
Spis stron internetowych.....	32
Spis rysunków.....	32
Spis grafów	33
Spis tablic.....	33
Spis załączników.....	33

Autorstwo poszczególnych części pracy

Piotr Piekini:

- streszczenie pracy,
- opracowanie i implementacja algorytmów z podrozdziałów 2.1 Ogólny algorytm pracy programu, 2.4 Nośność obliczeniowa przy ścinaniu, 2.5 Nośność obliczeniowa spoin łączących belkę i blachę czołową,
- stworzenie paneli okna dialogowego odpowiedzialnych za ustalanie parametrów połączenia i rysowanie połączenia (panel 1 i 2 na rysunku 3.5),
- podrozdział 3.4 Instrukcja instalacji modułów,
- podsumowanie.

Łukasz Szczeciński:

- wprowadzenie,
- opracowanie i implementacja algorytmów z podrozdziałów 2.2 Nośność obliczeniowa panelu środka słupa w warunkach ścinania, 2.3 Nośność obliczeniowa przy zginaniu i rozciąganiu,
- stworzenie paneli okna dialogowego odpowiedzialnych za wyświetlanie błędów i warunków nośności połączenia (panel 3 i 4 na rysunku 3.5),
- podrozdział 3.5 Obsługa programu,
- rozdział 4 porównujący wyniki przykładowego połączenia z wynikami w literaturze.

Streszczenie

Połączenie doczołowe jest bardzo popularne wśród projektantów konstrukcji. Niestety projektowanie tego typu połączeń zgodnie z Europejskimi Normami jest bardzo czasochłonne, a wybór programów umożliwiających takie obliczenia mocno ograniczony. W niniejszej pracy przedstawione są algorytmy obliczeniowe, umożliwiające automatyzację tego procesu. Następnie opisana jest implementacja algorytmów w języku programowania Python oraz sposób użycia już gotowej aplikacji. Wynikiem pracy są dwa moduły współpracujące z programem Soldis PROJEKTANT, umożliwiające obliczenie wytrzymałości połączenia doczołowego belki do belki oraz belki do słupa.

Abstract

Rigid beam to beam and beam to column connections are very often used by construction designers. Unfortunately designing this type of connections according to the Eurocodes is very time-consuming and the choice of software allowing to calculate it is limited. The thesis presents the algorithms, that allow to automate this process. Next, there is described the implementation of algorithms in Python programming language, followed by installation and user's manual. The results of the thesis are two modules placed in Soldis PROJEKTANT software. They allow user to calculate a resistance of rigid beam to beam or beam to column connection.

Podstawowe oznaczenia

Duże litery łacińskie:

A_{vc}	- pole przekroju czynnego słupa przy ścinaniu
A_v	- pole przekroju czynnego spoin przy ścinaniu
I_w	- moment bezwładności układu spoin
$F_{bb,Rd}$	- obliczeniowa nośność blachy czołowej na docisk
$F_{bc,Rd}$	- obliczeniowa nośność pasa słupa na docisk
$F_{c,fb,Rd}$	- obliczeniowa nośność pasa i środника belki przy ściskaniu
$F_{c,wc,Rd}$	- obliczeniowa nośność środnika słupa przy ściskaniu
$F_{t,ep,Rd}$	- obliczeniowa nośność blachy czołowej przy zginaniu
$F_{t,fc,Rd}$	- obliczeniowa nośność pasa słupa przy zginaniu
$F_{tr,Rd}$	- efektywna obliczeniowa nośność śrub szeregu r przy rozciąganiu
$F_{t,wb,Rd}$	- obliczeniowa nośność środnika belki przy rozciąganiu
$F_{t,wc,Rd}$	- obliczeniowa nośność środnika słupa przy rozciąganiu
$F_{v,Rd}$	- obliczeniowa nośność śrub na ścinanie
$N_{j,Ed}$	- obliczeniowa siła podłużna w elemencie
$N_{j,Rd}$	- obliczeniowa nośność węzła na siłę rozciągającą
$N_{pl,Rd}$	- obliczeniowa nośność plastyczna przekroju belki
$M_{j,Ed}$	- obliczeniowy moment zginający w elemencie
$M_{j,Rd}$	- obliczeniowa nośność węzła na moment zginający
$V_{j,Ed}$	- obliczeniowa siła ścinająca w elemencie
$V_{wp,Ed}$	- obliczeniowa siła poprzeczna w panelu środnika
$V_{wp,Rd}$	- obliczeniowa nośność panelu środnika słupa
W_{pl}	- wskaźnik plastyczny
W_w	- wskaźnik sprężystości układu spoin

Male litery łacińskie:

b_f	- szerokość pasów dwuteownika
f_u	- wytrzymałość na rozciąganie
f_y	- granica plastyczności
h	- wysokość dwuteownika
h_r	- odległość od śrub szeregu r do środka ściskania
$l_{eff,cp}$	- długość efektywna mechanizmu kołowego
$l_{eff,nc}$	- długość efektywna mechanizmu niekołowego
t_f	- grubość pasów dwuteownika
t_p	- grubość blachy czołowej
t_w	- grubość środnika dwuteownika
t_{wb}	- grubość środnika belki
t_{wc}	- grubość środnika słupa
z	- ramię sił
a_w	- wymiar poprzeczny spoin
l_w	- długość ściegu spoiny

Litery greckie:

σ_{\perp}	- naprężenie normalne prostopadłe
τ_{\perp}	- naprężenia styczne prostopadłe
$\tau_{ }$	- naprężenia styczne równoległe
γ_{M0}	- współczynnik częściowy stosowany przy sprawdzeniu nośności przekroju poprzecznego
γ_{M1}	- współczynnik częściowy stosowany przy sprawdzeniu stateczności elementu
γ_{M2}	- współczynnik częściowy stosowany przy sprawdzeniu nośności przekroju na rozerwanie

1. Wprowadzenie

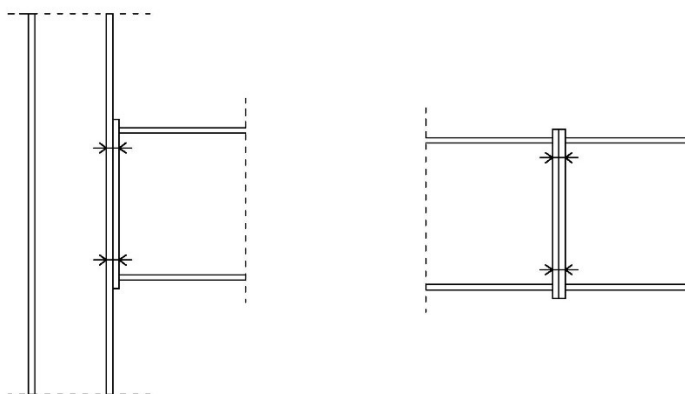
1.1. Wstęp

Bardzo duża część nowo powstających budynków wielkogabarytowych, a w szczególności hal, posiada główną konstrukcję nośną wykonaną ze stali. Rozwiązanie takie cieszy się dużą popularnością z kilku względów: stosunkowo niski ciężar własny konstrukcji, jednorodność struktury oraz szybkość realizacji takich obiektów. Dużym ułatwieniem przy montażu jest wykonywanie połączeń za pomocą śrub, umożliwia to uniezależnienie realizacji od warunków pogodowych a także nadaje połączeniu dużą pewność nośności zgodnej z zaprojektowaną. Jednak gdy w polskim budownictwie zaczęto stosować Europejskie Normy, projektowanie tego typu rozwiązań stało się bardzo czasochłonne. Projektanci zaczęli częściej sięgać po programy obliczeniowe. Niestety wiele z nich jest mocno okrojona, bądź bardzo skomplikowana i nieintuicyjna.

Okoliczności te sprawiły, że tematem naszej pracy jest stworzenie narzędzia do projektowania połączenia doczołowego belki do belki oraz belki do słupa. Stworzona aplikacja, użyta w programie Soldis PROJEKTANT ma cechować intuicyjność i prostotę użytkowania, ale również możliwie jak największą rzetelność obliczeń.

1.2. Połączenia doczołowe

Połączenia doczołowe to takie, w których oś śruby jest usytuowana równolegle do kierunku działania głównej składowej obciążenia.



Rys. 1.1. Połączenia doczołowe

Norma [N1] wyróżnia połączenia doczołowe kategorii D (niesprężane) oraz kategorii E (sprężane). Niniejsza praca pokazuje obliczenia połączeń niesprężanych. Obliczenia nośności połączeń doczołowych przy zginaniu polegają na zsumowaniu nośności poszczególnych rzędów śrub. Wyznaczenie nośności danego rzędu śrub opiera się natomiast na znalezieniu min. z nośności części podstawowych węzła a następnie wymnożeniu przez odległość śrub do środka ściskania.

1.3. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest stworzenie reguł wymiarowania połączeń doczołowych belki do belki oraz belki do słupa w programie Soldis PROJEKTANT.

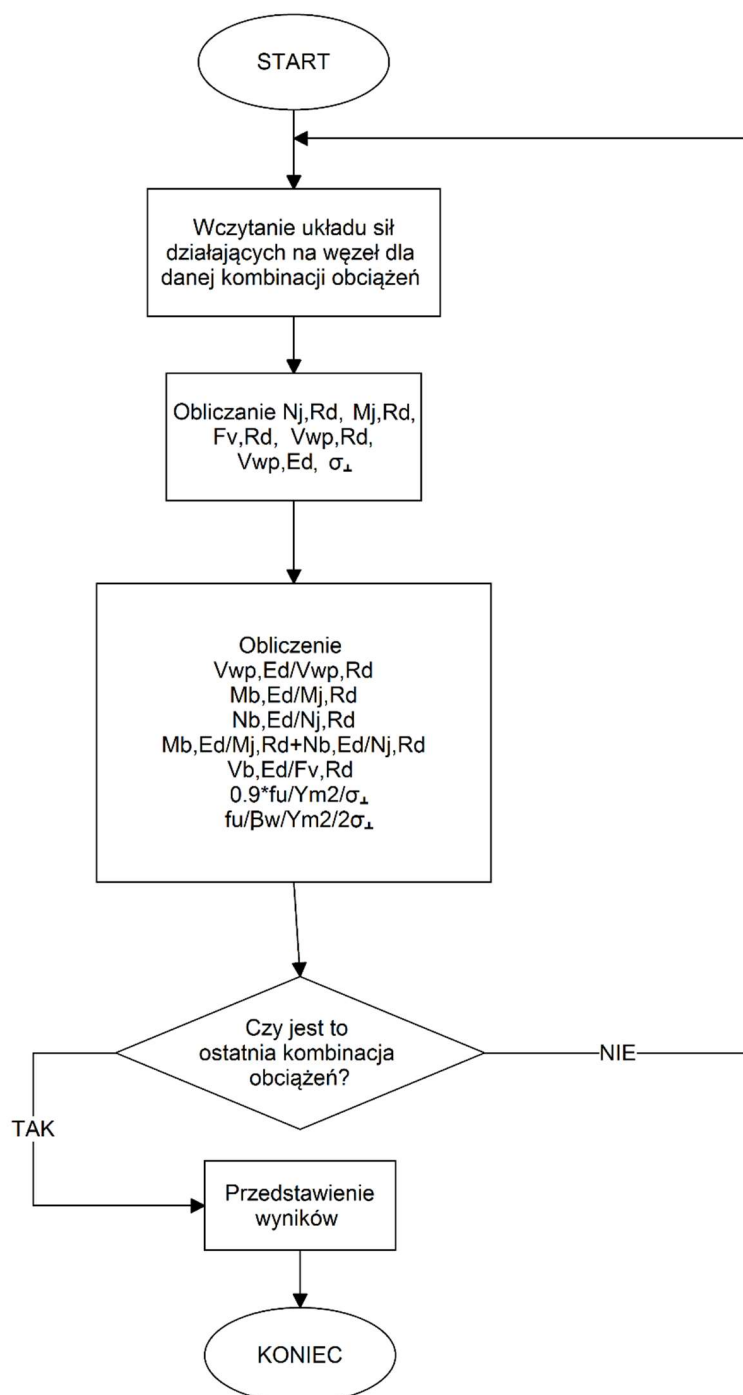
W zakresie pracy znajduje się:

- algorytmizacja procedury projektowania bazującej na aktualnej normie do projektowania konstrukcji stalowych PN-EN 1993-1-8: „Projektowanie konstrukcji stalowych: Projektowanie węzłów”
- implementacja modułów w języku programowania Python
- stworzenie aplikacji umożliwiającej używanie modułów w programie Soldis PROJEKTANT

2. Opracowanie algorytmów

2.1. Ogólny algorytm pracy programu

Pierwszy algorytm przedstawia ogólny schemat działania programu. Dla wszystkich wybranych przez użytkownika kombinacji obciążeń sprawdzane są warunki normowe, a na końcu przedstawione zostają wyniki dla najmniej korzystnych kombinacji.



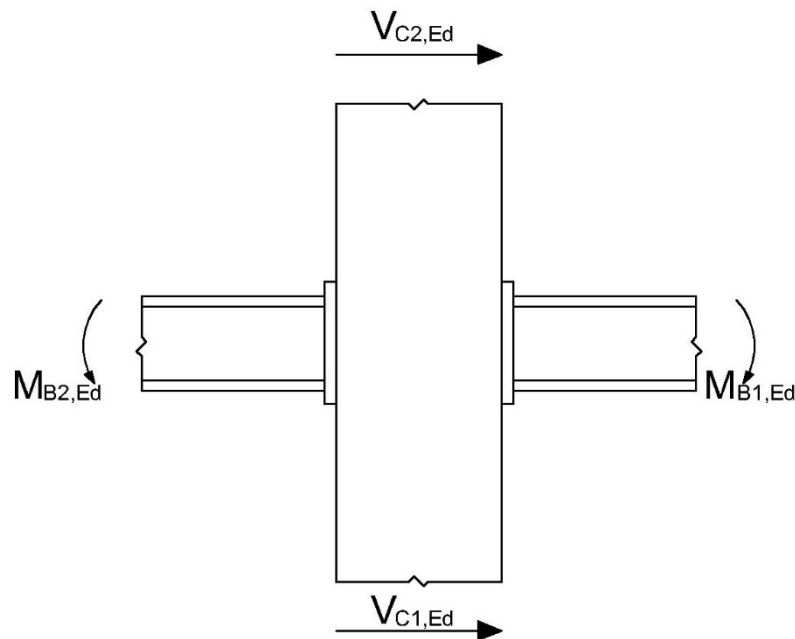
Graf. 2.1. Ogólny algorytm pracy programu

2.2. Nośność obliczeniowa panelu środknika słupa w warunkach ścinania

Siłę poprzeczną $V_{wp,Ed}$ w panelu środknika wyznacza się wg wzoru:

$$V_{wp,Ed} = \frac{(M_{b1,Ed} - M_{b2,Ed})}{z} - \frac{(V_{c1,Ed} - V_{c2,Ed})}{2} \quad (2.1)$$

z - ramię dźwigni, jeśli jest tylko jeden szereg śrub rozciąganych jest równe odległości od środka ściskania do szeregu śrub rozciąganych, jeśli jest więcej to jest to odległość między środkiem ściskania a osią środkową dwóch najbardziej odległych szeregów śrub rozciąganych.



Rys. 2.1. Zwroty sił i momentów uważane za dodatnie

W przypadku nieuźebrowanych węzłów jednostronnych nośność obliczeniowa panelu środknika określona jest wzorem:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{y,wc} \cdot A_{vc}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} \quad (2.2)$$

A_{vc} - pole przekroju czynnego przy ścinaniu słupa

2.3. Nośność obliczeniowa przy zginaniu i rozciąganiu

Jeśli siła podłużna w belce N_{Ed} nie przekracza 5% obliczeniowej nośności plastycznej $N_{pl,Rd}$ przekroju elementu, wg normy można pominąć interakcje z siłą podłużną, wtedy warunek nośności węzła przy zginaniu przybiera postać:

$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.3)$$

W przeciwnym wypadku należy uwzględnić interakcję z siłą podłużną, należy wtedy stosować warunek:

$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} + \frac{N_{j,Ed}}{N_{j,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.4)$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.5)$$

A - pole przekroju poprzecznego belki

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r F_{tr,Rd} \quad (2.6)$$

$$N_{j,Rd} = \sum_r F_{tr,Rd} \quad (2.7)$$

r - numer szeregu śrub

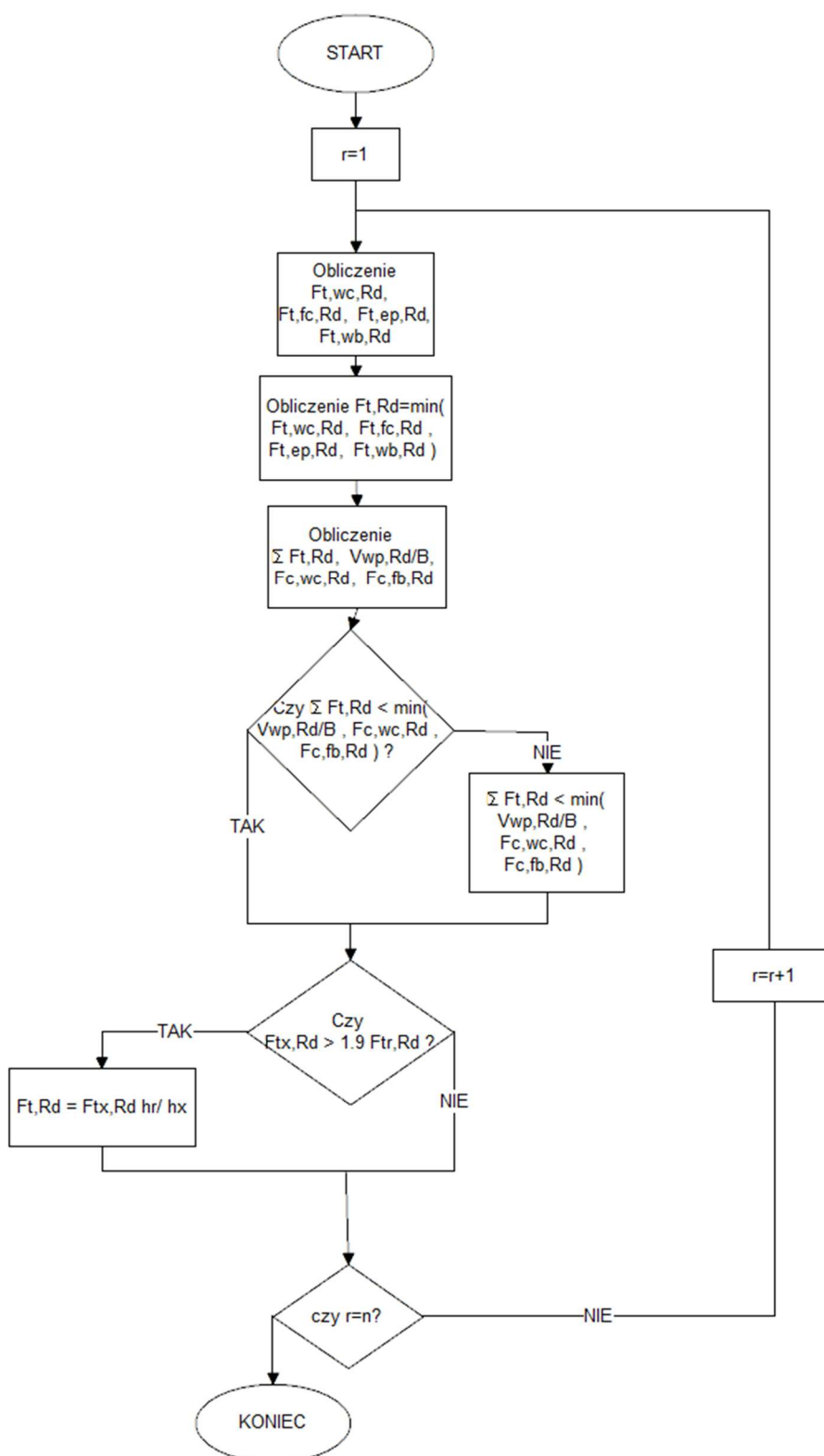
h_r - odległość od śrub szeregu r do środka ściskania

$F_{tr,Rd}$ - efektywna obliczeniowa nośność śrub szeregu r przy rozciąganiu, wyznacza się wg 2.3.1

W stworzonym programie z uwagi na to, że obliczenia wykonywane są automatycznie przedstawione są oba warunki bez względu na wielkość siły podłużnej.

W przypadku węzła śrubowego o więcej niż jednym szeregu śrub rozciąganych, szeregi śrub numeruje się, począwszy od najbardziej oddalonego od środka ściskania. Środek ściskania został przyjęty w osi pasa ściskanego dołączanej belki.

2.3.1 Wyznaczanie efektywnej obliczeniowej nośności śrub szeregu r przy rozciąganiu



Graf. 2.2. Wyznaczanie efektywnej obliczeniowej nośności śrub przy rozciąganiu

n - liczba szeregów śrub

Efektywna obliczeniowa nośność przy rozciąganiu szeregu śrub wyznaczana jest jako minimum spośród nośności obliczeniowych:

- $F_{t,wc,Rd}$ - środnika słupa przy rozciąganiu, wyznacza się wg 2.3.2
- $F_{t,fc,Rd}$ - pasa słupa przy zginaniu, wyznacza się wg 2.3.3
- $F_{t,ep,Rd}$ - blachy czołowej przy zginaniu, wyznacza się wg 2.3.3
- $F_{t,wb,Rd}$ - środnika belki przy rozciąganiu, wyznacza się wg 2.3.4

Kolejnym warunkiem jest sumaryczna nośność szeregów śrub od 1 do r $\sum F_{t,Rd}$, która nie może przekroczyć $\min \left[\frac{V_{wp,Rd}}{\beta}; F_{c,wc,Rd}; F_{c,fb,Rd} \right]$

$V_{wp,Rd}$ - obliczeniowa nośność panelu środnika słupa, wyznacza się wg 2.2

β - parametr przeniesienia

$F_{c,wc,Rd}$ - obliczeniowa nośność środnika słupa przy ściskaniu, wyznacza się wg 2.3.6

$F_{c,fb,Rd}$ - obliczeniowa nośność pasa i środnika belki przy ściskaniu, wyznacza się wg 2.3.7

Następny warunek mówi o nośności grup śrub. Należy obliczyć: $F_{t,wc,Rd}$, $F_{t,fc,Rd}$, $F_{t,ep,Rd}$, $F_{t,wb,Rd}$ dla grupy śrub szeregów od 1 do r i jeśli przekracza ona sumę nośności poszczególnych rzędów, należy zredukować wartość $F_{t,Rd}$.

Ostatni warunek w normie mówi o tym, że gdy nośność któregoś z wcześniejszych szeregów śrub jest większa niż 1,9 bieżącego szeregu, należy zredukować nośność tak, aby spełniony był warunek:

$$F_{tr,Rd} \leq \frac{F_{tx,Rd} h_r}{h_x} \quad (2.8)$$

h_x - odległość szeregu śrub x do środka ściskania

x - numer najbardziej oddalonego od środka ściskania szeregu śrub, który ma obliczeniową nośność przy rozciąganiu większą niż 1,9 $F_{t,Rd}$.

Przy obliczaniu połączenia belki do belki pomijamy $F_{t,wc,Rd}$, $F_{t,fc,Rd}$, $V_{wp,Rd}$, $F_{c,wc,Rd}$, resztę obliczeń przeprowadzamy analogicznie.

2.3.2 Wyznaczanie efektywnej obliczeniowej nośności środnika słupa przy rozciąganiu

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \quad (2.9)$$

ω - współczynnik redukcyjny uwzględniający interakcje ze ścinaniem w panelu środnika słupa

$b_{eff,t,wc}$ - długość efektywna zastępczego króćca teowego

Dla węzła jednostronnego:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (b_{eff,c,wc} \frac{t_{wc}}{A_{vc}})^2}} \quad (2.10)$$

2.3.3 Wyznaczanie efektywnej obliczeniowa nośność pasa słupa i blachy czołowej przy zginaniu

$$F_{T,Rd} = \min(F_{T1,Rd}, F_{T2,Rd}, F_{T3,Rd}) \quad (2.11)$$

$F_{T1,Rd}$ - obliczeniowa nośność na całkowite uplastycznienie pólki

$F_{T2,Rd}$ - obliczeniowa nośność na zniszczenie śrub wraz z uplastycznieniem pólki

$F_{T3,Rd}$ - obliczeniowa nośność na zniszczenie śrub

$$F_{T1,Rd} = \min\left(\frac{4M_{pl,1,Rd}}{m}, \frac{(8n-2e_w)M_{pl,1,Rd}}{2mn-e_w(m+n)}\right) \quad (2.12)$$

$$F_{T2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m+n} \quad (2.13)$$

$$F_{T3,Rd} = \sum F_{t,Rd} \quad (2.14)$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \sum l_{eff,1} t_f^2 f_y / \gamma_{M0} \quad (2.15)$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 \sum l_{eff,2} t_f^2 f_y / \gamma_{M0} \quad (2.16)$$

$$n = \min(e_{min}, 1,25m) \quad (2.17)$$

e_w - średnica podkładki lub obrysu łba śruby lub nakrętki podzielona przez 4

$\sum F_{t,Rd}$ - sumaryczna nośność na rozciąganie wszystkich śrub w króćcu

$l_{eff,nc}$ - długość efektywna zastępczego króćca teowego, wyznacza się wg 2.3.5

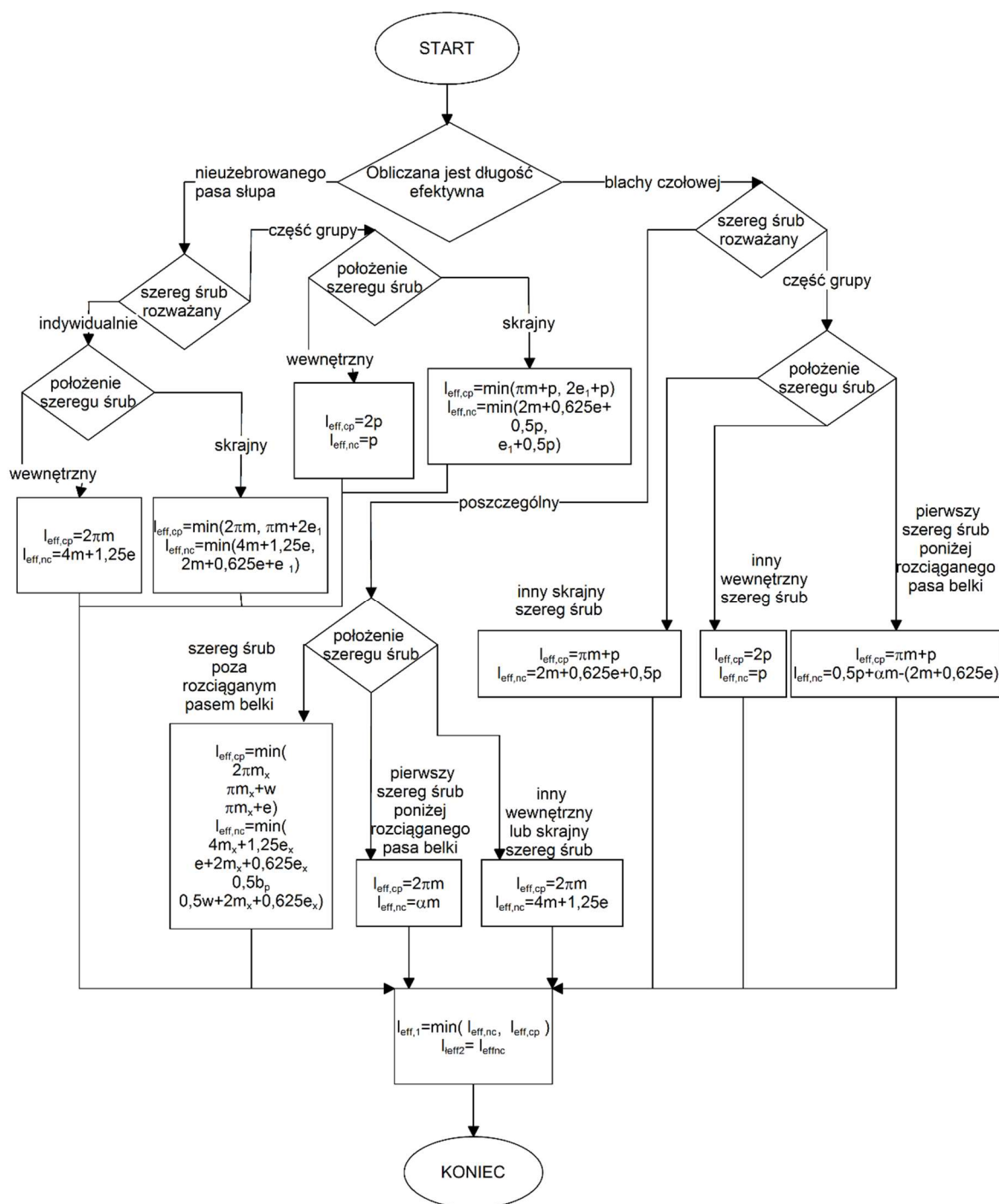
$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (2.18)$$

2.3.4 Wyznaczanie efektywnej obliczeniowa nośność środника belki przy rozciąganiu

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} t_{wb} f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} \quad (2.19)$$

$b_{eff,t,wb}$ - długość efektywna zastępczego króćca teowego, wyznacza się wg 2.3.5

2.3.5 Wyznaczanie efektywnej długości zastępczego króćca teowego



Graf. 2.3. Wyznaczanie efektywnej długości króćca teowego

- m - odległość między osią śruby, a początkiem spoiny lub zaokrągleniem środka
- e - odległość między osią śruby, a końcem elementu
- w - rozstaw śrub
- b_p - szerokość blachy
- p - odległość między szeregami wewnętrznymi śrub

2.3.6 Wyznaczanie efektywnej obliczeniowa nośność środka słupa przy ściskaniu

$$F_{c,wc,Rd} = \min\left(\frac{\omega k_{wc} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}}; \frac{\omega k_{wc} \rho b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M1}}\right) \quad (2.20)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \left(\frac{b_{eff,c,wc} t_{wc}}{A_{vc}}\right)^2}} \quad (2.21)$$

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_p + 5(t_{fc} + s) + s_p \quad (2.22)$$

$$s_p = \min(t_p + c; 2t_p) \quad (2.23)$$

c - długość wystającego poza pas odcinka blachy czołowej, jeśli nie wystaje c=0

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc}(h_c - 2(t_{fc} r_c)) f_{y,wc}}{E t_{wc}^2}} \quad (2.24)$$

$$\rho = 1,0 \quad \text{gdy } \bar{\lambda}_p \leq 0,72 \quad (2.25)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p^{-0,2}}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{gdy } \bar{\lambda}_p > 0,72 \quad (2.26)$$

$$k_{wc} = 1,0 \quad (2.27)$$

2.3.7 Wyznaczanie efektywnej obliczeniowa nośność pasa i środka belki przy ściskaniu

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{h - t_{fb}} \quad (2.28)$$

h - wysokość dołączanej belki
 t_{fb} - grubość pasa dołączanej belki
 M_{c,Rd} - nośność przekroju belki na zginanie

dla przekrojów klasy 1:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.29)$$

2.4. Nośność obliczeniowa przy ścinaniu

$$\frac{V_{j,Ed}}{V_{j,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.30)$$

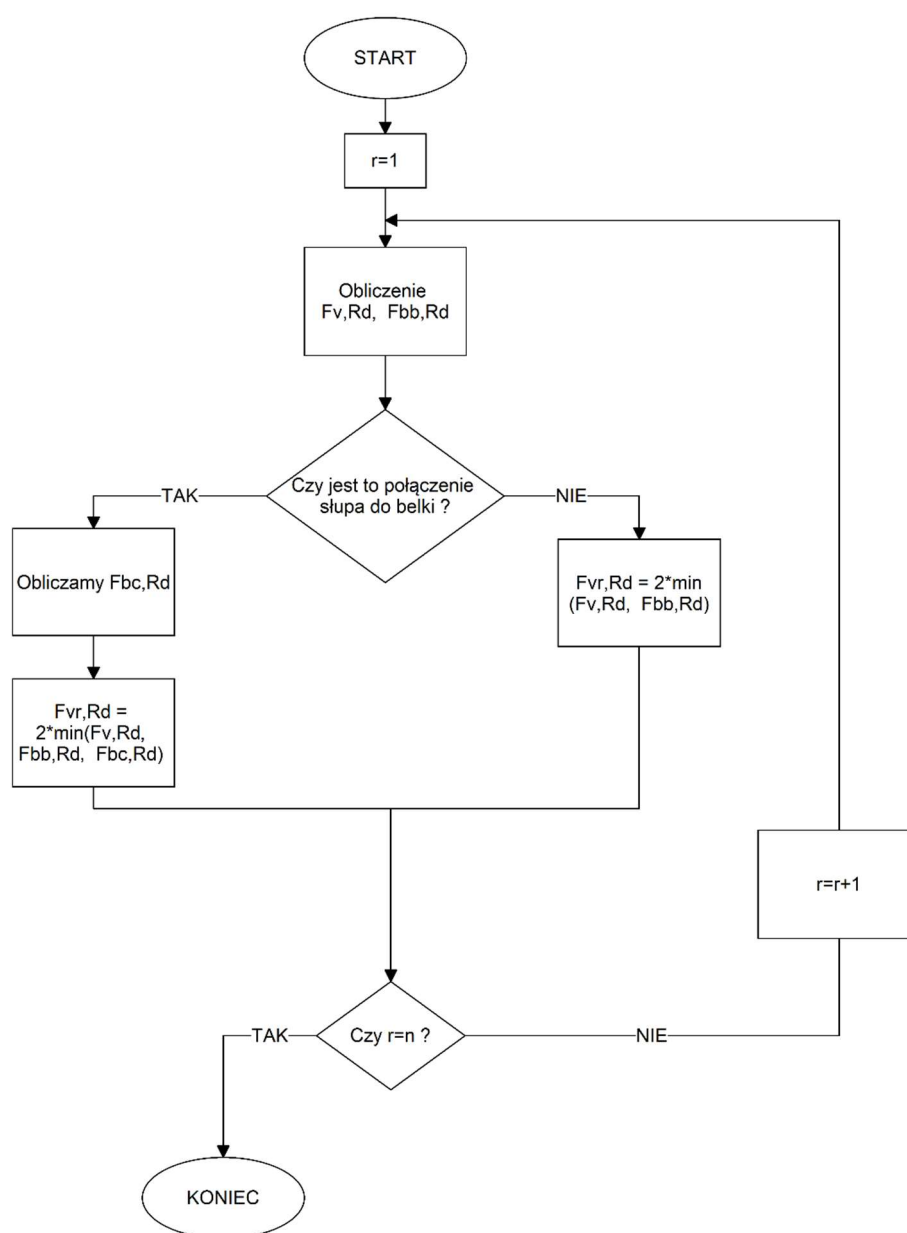
V_{j,Rd} - obliczeniowa nośność węzła przy ścinaniu

$$V_{j,Rd} = \sum_r F_{vr,Rd} + \frac{0,4}{1,4} \sum_p F_{vp,Rd} \quad (2.31)$$

- $F_{vr,Rd}$ - efektywna obliczeniowa nośność śrub szeregu r przy ścinaniu, wyznacza się wg 2.3.1
 r - szeregi śrub które nie są przeznaczone do przeniesienia rozciągania
 $F_{vp,Rd}$ - efektywna obliczeniowa nośność śrub szeregu p przy ścinaniu, wyznacza się wg 2.3.1
 p - szeregi śrub które nie są przeznaczone do przeniesienia rozciągania

Przyjmujemy, że śruby przenosząc 0,4/1,4 nośności na ścinanie, wykazują pełną nośność obliczeniową na rozciąganie.

2.4.1 Wyznaczanie efektywnej obliczeniowej nośności śrub szeregu r przy ścinaniu



Graf. 2.4. Wyznaczanie efektywnej obliczeniowej nośności śrub przy ścinaniu

Efektywna obliczeniowa nośność przy ścinaniu szeregu śrub wyznaczana jest jako minimum spośród nośności obliczeniowych:

- $F_{v,Rd}$ - śruby na ścinanie, wyznacza się wg 2.4.2
- $F_{bb,Rd}$ - blachy czołowej na docisk, wyznacza się wg 2.4.3
- $F_{bc,Rd}$ - pasa słupa na docisk, wyznacza się wg 2.4.3

Przy obliczaniu połączenia belki do belki pomijamy $F_{bc,Rd}$, resztę obliczeń przeprowadzamy analogicznie.

2.4.2 Wyznaczanie efektywnej obliczeniowej nośności śruby na ścinanie

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (2.32)$$

Gdy śruba ścinana jest przez część gwintowaną:

- A jest polem przekroju czynnego śruby
- $\alpha_v = 0,6$ dla klas 4.6, 5.6, 8.8
- $\alpha_v = 0,5$ dla klas 4.8, 5.8, 6.8, 10.9

Gdy śruba ścinana jest przez część niegwintowaną:

- A jest polem przekroju trzpienia śruby
- $\alpha_v = 0,6$

2.4.3 Wyznaczanie efektywnej obliczeniowej nośności śruby na docisk

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} \quad (2.33)$$

$$\alpha_b = \min(\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0) \quad (2.34)$$

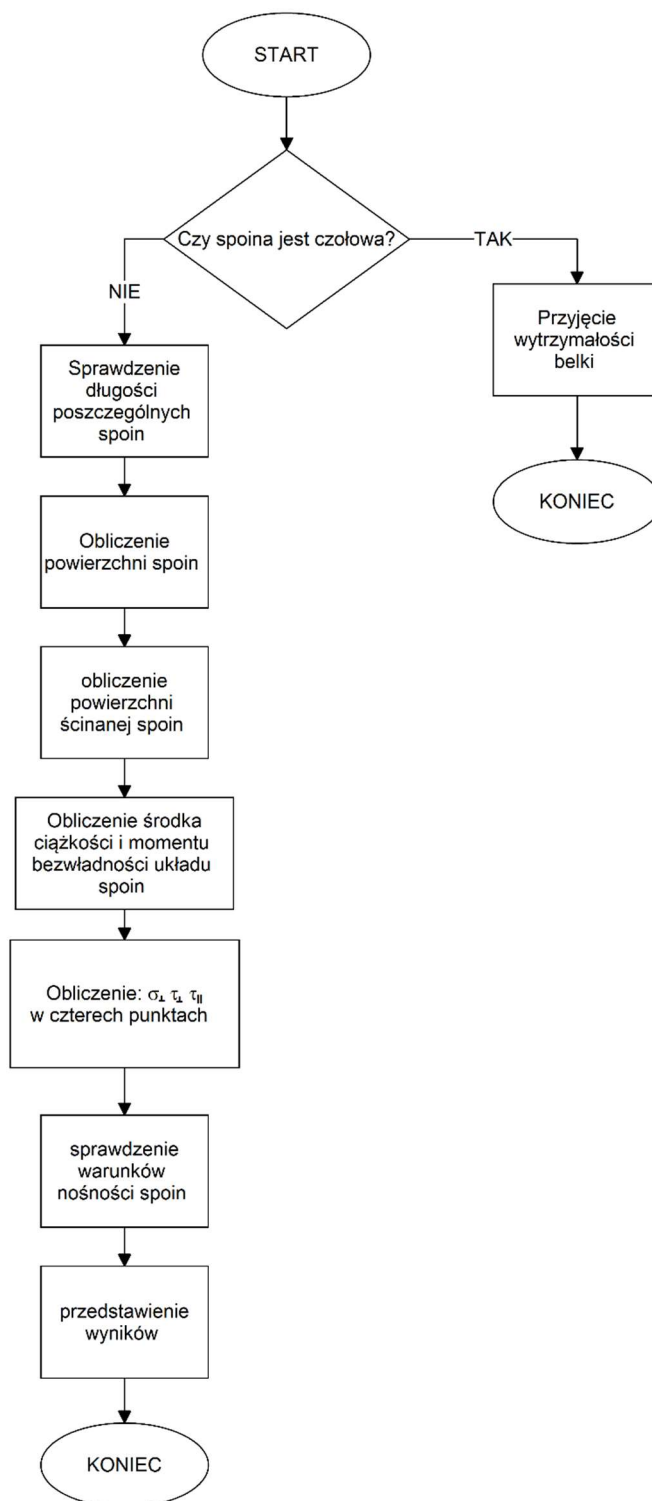
- dla śrub skrajnych w kierunku obciążenia: $\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0}$

- dla śrub pośrednich w kierunku obciążenia: $\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$

- dla śrub skrajnych w kierunku prostopadłym do obciążenia:

$$k_1 = \min(2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5)$$

2.5. Nośność obliczeniowa spoin łączących belkę i blachę czołową



Graf. 2.5. Sprawdzenie warunków nośności spoin

Obliczenia wykonywane są wyłącznie dla spoin pachwinowych. Dla spoin czołowych przyjęta zostaje wytrzymałość belki.

2.5.1 Sprawdzenie długości i obliczenie powierzchni spoin

Każdy ścieg spoiny powinien spełniać następujący warunek:

$$l_w > \max(6a_w, 30mm) \quad (2.35)$$

l_w - długość ściegu spoiny

Następnie obliczana jest całkowita powierzchnia spoin. W przypadku dwuteowników równoległościennych IPE można to przedstawić wzorem:

$$A_w = a_w(2(h - 2t_f - 2r) + 2b_f + 2(b_f - t_w - 2r)) \quad (2.36)$$

A_w - powierzchnia całkowita spoin
 r - promień zaokrąglenia dwuteownika

W dalszej kolejności obliczana jest powierzchnia spoin przenoszących naprężenia ścinające:

$$A_v = 2 \times a_w(h - 2t_f - 2r) \quad (2.37)$$

A_v - pole przekroju czynnego spoin przy ścinaniu
 r - promień zaokrąglenia dwuteownika

2.5.2 Obliczenie momentu bezwładności układu spoin

$$I_w = 2 \left(\frac{b_f \times a_w^3}{12} + b_f \times a_w \times \left(\frac{h}{2} + \frac{a_w}{2} \right)^2 \right) + 2 \frac{a_w \times (h - 2t_f - 2r)^3}{12} \\ + 2 \left(\frac{(b_f - t_w - 2r) \times a_w^3}{12} + (b_f - t_w - 2r) \times a_w \times \left(\frac{h}{2} - t_f - \frac{a_w}{2} \right)^2 \right)$$

I_w - moment bezwładności układu spoin
 r - promień zaokrąglenia dwuteownika

2.5.3 Obliczenie naprężeń w czterech punktach

Naprężenia styczne i normalne w każdym punkcie są takie same. Obliczane są według wzorów:

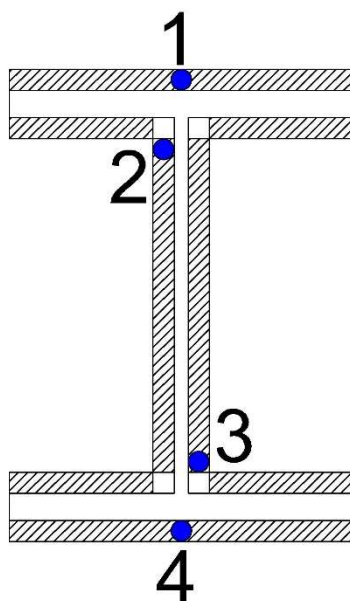
$$\sigma_N = \frac{N}{A_w} \quad (2.38)$$

σ_N - naprężenia normalne
 A_w - powierzchnia całkowita spoin

$$\sigma_{||} = \frac{V}{A_v} \quad (2.38)$$

$\sigma_{||}$ - naprężenia styczne
 A_v - pole przekroju czynnego spoin przy ścinaniu

W dalszej kolejności, dla czterech punktów przedstawionych na poniższym rysunku, wykonywane są następujące obliczenia.



Rys. 2.2. Punkty w których sprawdzane są naprężenia

$$W_w = \frac{I_w}{z_i} \quad (2.39)$$

W_w - wskaźnik sprężystości układu spoin
 I_w - moment bezwładności układu spoin
 z_i - odległość punktu od środka ciężkości układu spoin

$$\sigma_M = \frac{M}{W_w} \quad (2.40)$$

σ_M - naprężenia zginające
 W_w - wskaźnik sprężystości układu spoin

$$\sigma = \sigma_M + \sigma_N \quad (2.41)$$

σ	- maksymalne naprężenia normalne
σ_M	- naprężenia zginające
σ_N	- naprężenia normalne

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} \quad (2.42)$$

σ_{\perp}	- naprężenia normalne prostopadłe
τ_{\perp}	- naprężenia styczne prostopadłe
σ	- maksymalne naprężenia normalne

Z uzyskanych wyników obliczeń wybiera się maksymalne naprężenia.

2.5.4 Sprawdzenie warunków nośności

Po wszystkich obliczeniach sprawdzane są dwa warunki:

$$|\sigma_{\perp}| \leq 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \quad (2.43)$$

$$\sqrt{[\sigma_{\perp}]^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \times \gamma_{M2}} \quad (2.44)$$

Jeśli obydwa warunki zostaną spełnione, to znaczy, że spoiny wytrzymają obciążenia.

3. Narzędzia wspomagające projektowanie połączeń doczołowych

3.1. Środowisko programowania

Aplikacja do wymiarowania doczołowych połączeń belki do belki oraz belki do słupa została napisana w języku programowania Python. Działają one jako dodatkowe reguły wymiarowania elementów prętowych i węzłowych programu Soldis PROJEKTANT.

3.1.1 Język Python

Python jest interpretowanym, interaktywnym językiem programowania stworzonym przez Guido van Rossuma w 1990 roku. Posiada w pełni dynamiczny system typów i automatyczne zarządzanie pamięcią, jest zatem podobny do takich języków, jak Tcl, Perl, Scheme czy Ruby. Python rozwijany jest jako projekt Open Source, zarządzany przez niedochodową Python Software Foundation. [S1]

3.1.2 Soldis PROJEKTANT

Soldis PROJEKTANT to łatwe i intuicyjne narzędzie do tworzenia i analizy konstrukcji budowlanych, które jest powszechnie używane przez biura projektowe oraz studentów ze wszystkich liczących się uczelni technicznych w Polsce. Program składa się z szeregu modułów zespolonych w ramach jednego środowiska obliczeniowego. Każdy moduł odpowiada za fragment funkcjonalności programu. [S2]

3.2. Dodatkowe moduły do wymiarowania w programie Soldis PROJEKTANT

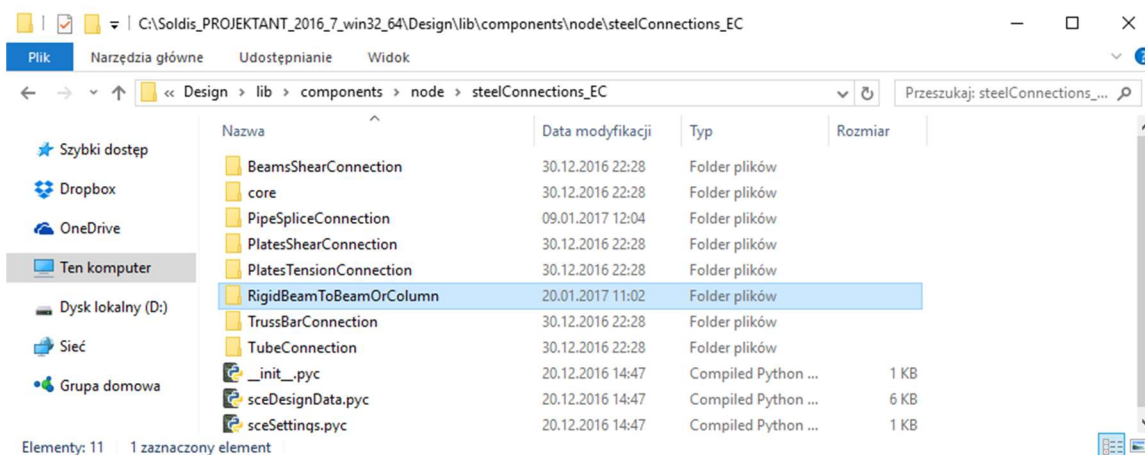
Program Soldis PROJEKTANT umożliwia dodawanie własnych reguł wymiarowania. Celem niniejszej pracy jest stworzenie dwóch reguł: połączenia doczołowego belki do belki oraz połączenia doczołowego belki do słupa. Reguły pobierają z programu charakterystyki łączonych przekrojów oraz siły występujące w połączeniu, pozostałe parametry potrzebne do obliczeń użytkownik wprowadza do okna dialogowego. Moduły tworzone i testowane były wersji 8.6.7 programu Soldis PROJEKTANT. W przypadku korzystania ze starszych wersji reguły mogą nie funkcjonować prawidłowo.

3.3. Warunki projektowanego połączenia

Stworzone moduły mają na celu obliczenie nośności połączenia doczołowego kategorii D przy użyciu blachy czołowej i łączników śrubowych dla dwóch elementów łączących się w jednym węźle, wykonanych z dwuteowników walcowanych ułożonych w sposób wykorzystujący większe momenty bezwładności. Reguła połączenia belki do belki wykonuje obliczenia dla równolegle ustawionych belek, wykonanych z jednakowych profili. Połączenie belki do słupa wykonuje obliczenia dla prostopadle ustawionych profili, gdzie słup ustawiony jest pasem równolegle do blachy węzłowej.

3.4. Instrukcja instalacji modułów

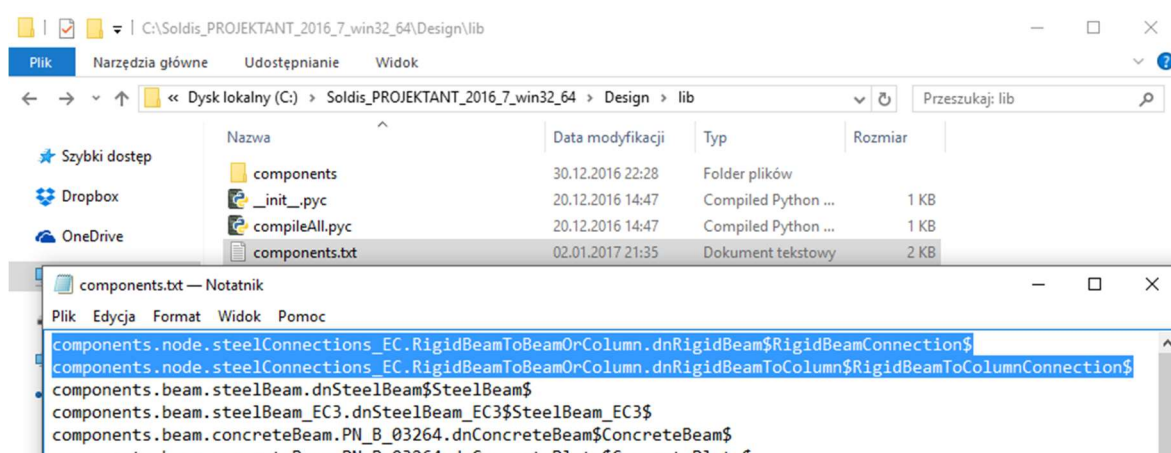
Instalacja polega na skopiowaniu do katalogu *Design\lib\components\node*, znajdującego się w katalogu głównym programu Soldis PROJEKTANT, folderu *RigidBeamToBeamOrColumn*



Rys. 3.1. Lokalizacja katalogu z modułami

Następnie w pliku *components.txt* znajdującym się w katalogu *Design/lib* należy dopisać:

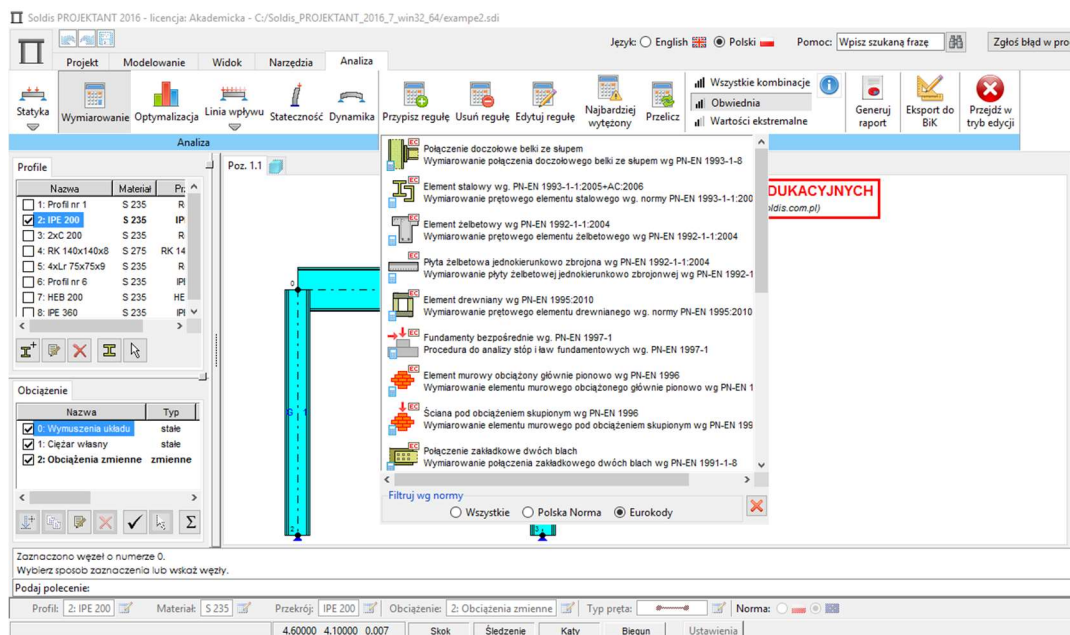
- *components.node.steelConnections_EC.RigidBeamToBeamOrColumn.dnRigidBeam\$RigidBeamConnection\$*
- *components.node.steelConnections_EC.RigidBeamToBeamOrColumn.dnRigidBeamToColumn\$RigidBeamToColumnConnection\$*



Rys. 3.2. Instalacja reguł wymiarowania

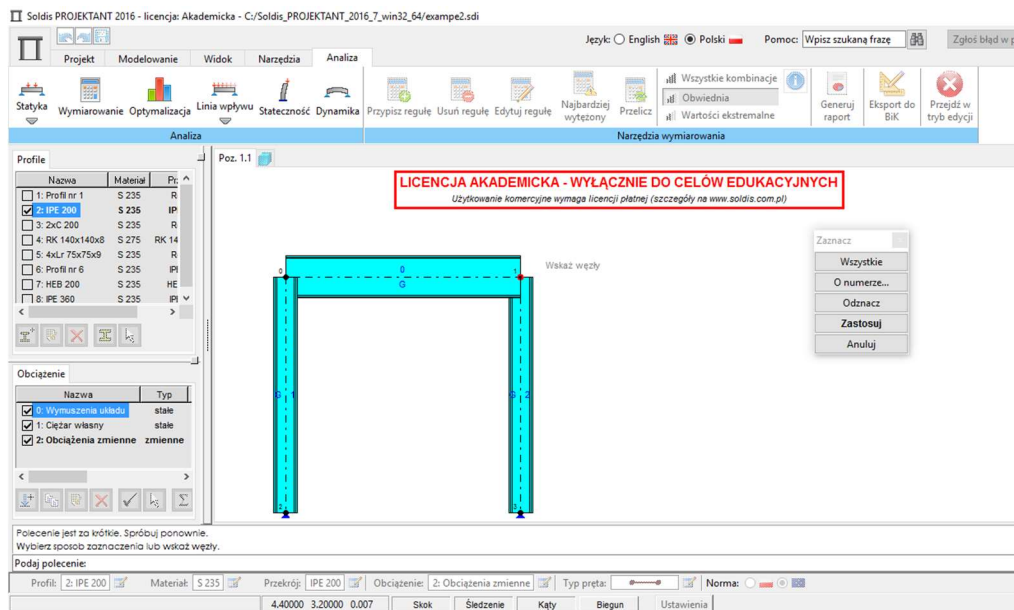
3.5. Obsługa programu

Aby wykonać obliczenia wytrzymałości połączenia doczołowego należy uruchomić program Soldis PROJEKTANT, następnie zaprojektować w nim statycznie niezmienny układ prętów, przypisać siły działające na model oraz wybrać kombinacje obciążeń. Kolejnym krokiem jest wybranie *Wymiarowania* w zakładce *Analiza*. Następnie należy kliknąć *Przypisz regułę* i wybrać odpowiedni moduł z otwartej listy.



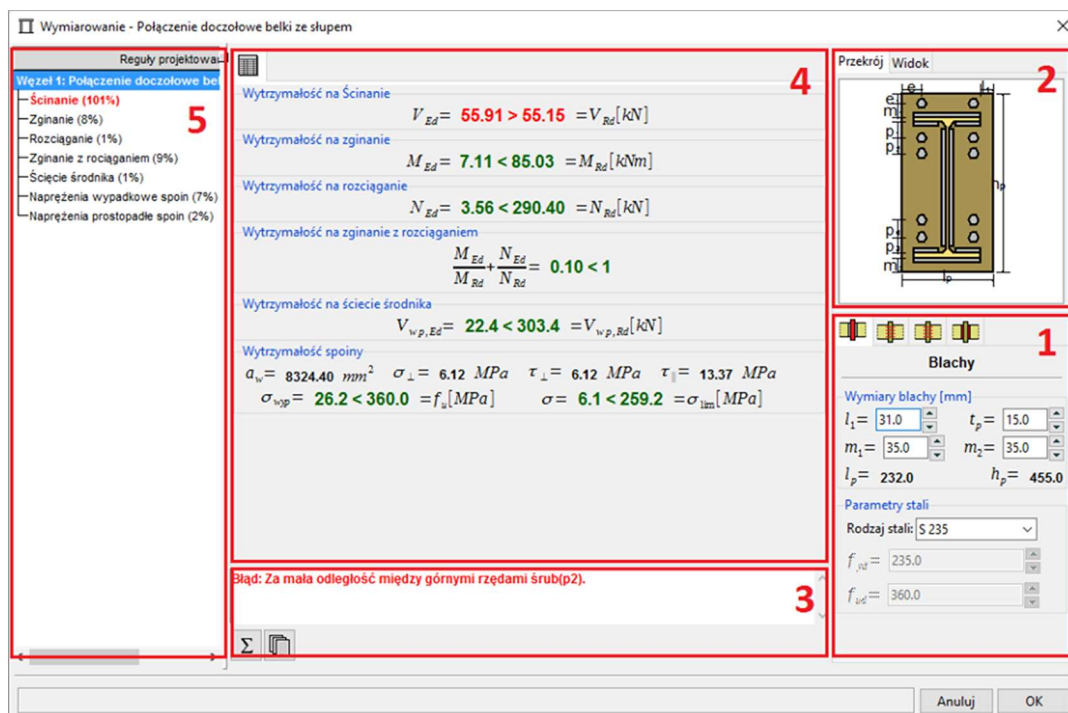
Rys. 3.3. Wybór reguły wymiarowania

Wybrać odpowiedni węzeł i potwierdzić przyciskiem *Zastosuj*.



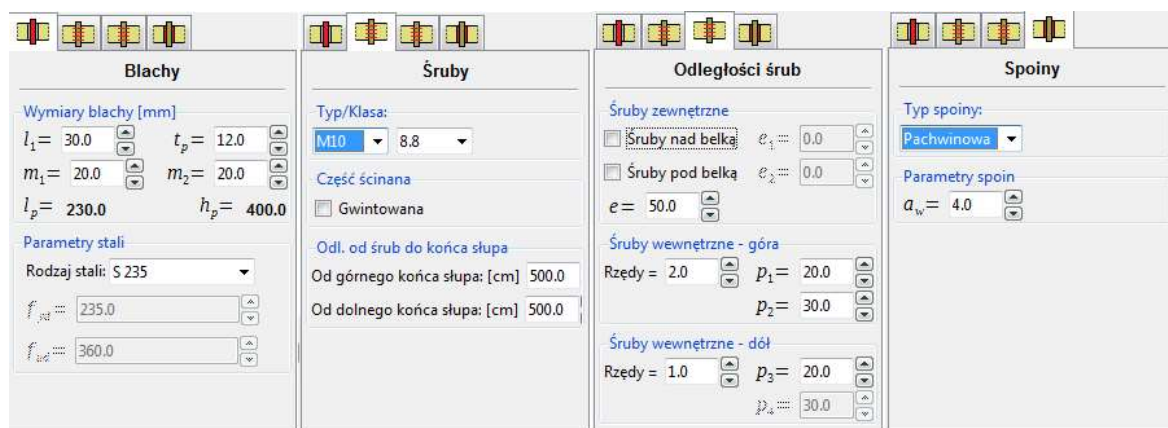
Rys. 3.4. Wybór węzła

Po wykonaniu prawidłowo powyższych czynności ukazuje się okno dialogowe modułu obliczania połączenia.



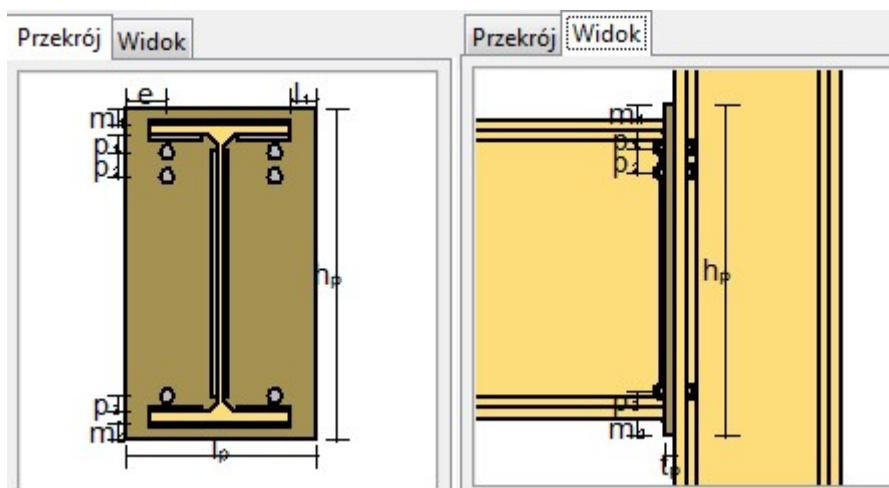
Rys. 3.5. Okno dialogowe

Okno składa się z pięciu paneli. Pierwszy posiada cztery zakładki, w których ustalamy parametry połączenia. Pierwsza zakładka dotyczy blachy węzłowej. Należy w niej wpisać wymiary i parametry stali blachy węzłowej. W drugiej trzeba podać typ i klasę śrub, zaznaczyć czy przekrój ścinany jest przez gwintowaną część śruby oraz dla połączenia belki do słupa określić odległość skrajnych rzędów śrub do końców słupa. Kolejna zakładka umożliwia ustawienie ilości i położenia śrub, a ostatnia wybór spoiny łączącej belkę z blachą węzłową.



Rys. 3.6. Zakładki pierwszego panelu

Drugi panel składa się z dwóch zakładek pokazujących projektowany węzeł. Pierwsza ukazuje go w przekroju, druga natomiast w widoku. Na obrazkach widzimy dynamicznie zmieniający się obraz połączenia z opisanymi wielkościami, które definiujemy w pierwszym panelu.

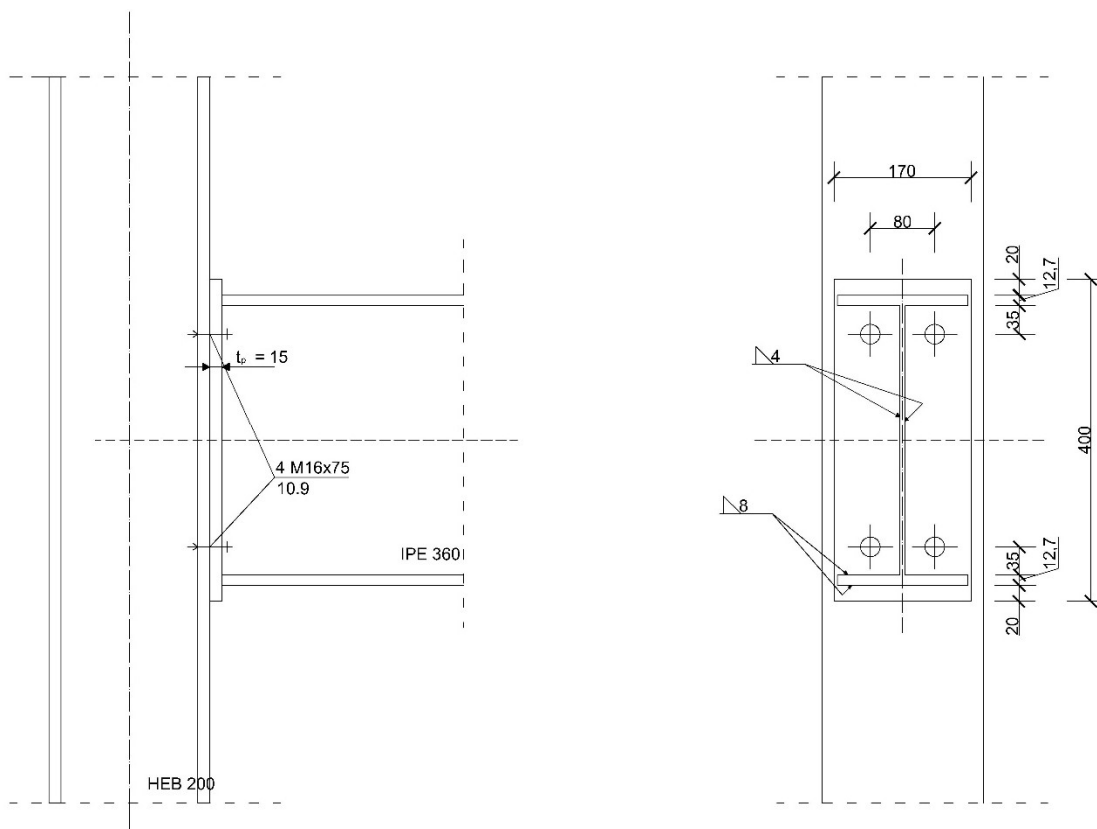


Rys. 3.7. Zakładki drugiego panelu

Trzeci panel odpowiedzialny jest za wyświetlanie błędów projektowych. Czwarty przedstawia warunki nośności, te które są spełnione przez połączenie wyświetlane są na zielono, natomiast niespełnione na czerwono. Ostatni panel wypisuje procentowe wyłączenie warunków nośności połączenia.

4. Przykładowe obliczenia

Dla sprawdzenia poprawności obliczeń porównano poszczególne wyniki z przykładem 8.6 zawartym w [2]. W programie wyświetlane są tylko końcowe wyniki, dlatego na potrzeby porównania użyto okna błędów programu Soldis PROJEKTANT oraz komendy *print* w kodzie programu umożliwiającej wyświetlenie potrzebnych do porównania wyników.



Rys. 4.1. Parametry połączenia

Jako pierwszą w książce obliczono nośność środnika słupa poddanego ścinaniu, wg literatury wynosi ona 303442 N, program podaje dokładnie 303442 N czyli w przybliżeniu do pełnych jednostek dokładnie tyle samo. Kolejne obliczenia dotyczą nośności środnika słupa przy ściskaniu, książka podaje nośność równą 355108 N, program 352981 N, różnica ta spowodowana jest dużymi zaokrągleniami poszczególnych obliczeń. Następnie obliczono nośność pasa i środnika belki przy ściskaniu, tutaj nośność wg książki wynosi 690181 N, natomiast wg programu 686001, niewielka różnica wynika z błędu dokładności przy obliczaniu wskaźnika plastycznego. Kolejne obliczenia nośności pasa słupa przy zginaniu, tutaj nośności poszczególnych mechanizmów zniszczenia wynoszą w literaturze: $F_{T,1,Rd} = \min(332285; 453796)$ N, $F_{T,2,Rd} = 217662$ N, $F_{T,3,Rd} = 232000$ N, w programie: $F_{T,1,Rd} = \min(332223; 435346)$ N, $F_{T,2,Rd} = 214365$ N, $F_{T,3,Rd} = 226080$ N różnice wynikają głównie z przyjęcia innej średnicy podkładki, w książce $d_w = 30$ mm, w programie $d_w = 26.75$ mm. Kolejne obliczenia dotyczą nośności środnika słupa przy rozciąganiu, nośności wynoszą odpowiednio 204728 N w książce oraz 245952 N w programie, różnica wynika z faktu przyjęcia przez autora książki $\omega = 0.73$ z poprzednich obliczeń, program

oblicza natomiast dla zmienionej długości efektywnej nowe $\omega = 0.87$. Ostatnie obliczenia dotyczą nośności blachy czołowej przy zginaniu i średnika belki przy rozciąganiu, do tych obliczeń należy odczytać α z mało dokładnego wykresu normy, autor książki odczytuje $\alpha = 6.6$ program $\alpha = 5.91$, ze względu na tę różnicę różnią się także dalsze wyniki obliczeń, wynoszą one odpowiednio wg literatury $F_{T,1,Rd} = 332357 \text{ N}$, $F_{T,2,Rd} = 206448 \text{ N}$, $F_{T,3,Rd} = 232000 \text{ N}$, $F_{t,wb,Rd} = 372240 \text{ N}$ wg programu: $F_{T,1,Rd} = \min(312770; 370288) \text{ N}$, $F_{T,2,Rd} = 195104 \text{ N}$, $F_{T,3,Rd} = 226080 \text{ N}$, $F_{t,wb,Rd} = 350019 \text{ N}$. Dla drugiego rzędu śrub, ze względu na małe ramie sił, w książce nie wykonano obliczeń.

Jak widać różnice w wynikach nie są duże, jedyna znaczna wynika z pomyłki w obliczeniach autora książki. Dla lepszego zobrazowania przedstawiono wyniki jeszcze raz w tabeli.

Tablica 4.1. Porównanie wyników

	Wartość z książki [N]	Wartość z programu [N]	Różnica procentowa
$V_{wp,Rd}$	303442	303442	0%
$F_{c,wc,Rd}$	355108	352981	1%
$F_{c,fb,Rd}$	690181	686001	1%
$F_{t,fc,Rd, model1}$	332285	332223	0%
$F_{t,fc,Rd, model2}$	217662	214365	2%
$F_{t,fc,Rd, model3}$	232000	226080	3%
$F_{t,wc,Rd}$	204728	245952	20%
$F_{t,ep,Rd, model1}$	332357	312770	6%
$F_{t,ep,Rd, model2}$	206448	195104	5%
$F_{t,ep,Rd, model3}$	232000	226080	3%
$F_{t,wb,Rd}$	372240	350019	6%

5. Podsumowanie

Wynikiem niniejszej pracy są dwa programy wspomagające projektowanie węzłów konstrukcji stalowych. Reguły współpracują z programem Soldis PROJEKTANT, dzięki czemu dają duże możliwości szybkiego projektowania węzłów doczołowych. Jak widać z załączonego przykładu obliczenia wykonywane są prawidłowo. Programy należałoby jeszcze wyposażyć w generowanie pełnego raportu z obliczeń, umożliwiającego użytkownikowi weryfikację poszczególnych obliczeń, jednak już w takiej postaci mogą okazać się bardzo przydatne przy projektowaniu.

Spis literatury

- [1] Bródka J. Kozłowski A., Projektowanie i obliczanie połączeń i węzłów konstrukcji stalowych, TOM I, wydanie 2, polskie wydawnictwo techniczne 2013
- [2] Bródka J. Kozłowski A., Projektowanie i obliczanie połączeń i węzłów konstrukcji stalowych, TOM II, wydanie 2, polskie wydawnictwo techniczne 2015
- [3] Szajek K., Tworzenie reguł wymiarowania w programie Soldis PROJEKTANT, dostępne on-line: www.soldis.com.pl 16.01.2017r.

Spis norm

- [N1] PN-EN 1991-1-8 (2006), Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 1-8: Projektowanie węzłów.

Spis stron internetowych

- [S1] https://pl.wikibooks.org/wiki/Zanurkuj_w_Pythonie, stan na dzień 02.01.2017
- [S2] <http://www.soldis.com.pl/pl/soldis-projektant>, stan na dzień 02.01.2017

Spis rysunków

- Rys. 1.1. Połączenia doczołowe
- Rys. 2.1. Zwroty sił i momentów uważane za dodatnie
- Rys. 2.2. Punkty w których sprawdzane są naprężenia
- Rys. 3.1. Lokalizacja katalogu z modułami
- Rys. 3.2. Instalacja reguł wymiarowania
- Rys. 3.3. Wybór reguły wymiarowania
- Rys. 3.4. Wybór węzła
- Rys. 3.5. Okno dialogowe
- Rys. 3.6. Zakładki pierwszego panelu
- Rys. 3.7. Zakładki drugiego panelu
- Rys. 4.1. Parametry połączenia

Spis grafów

- Graf. 2.1. Ogólny algorytm pracy programu
- Graf. 2.2. Wyznaczanie efektywnej obliczeniowej nośności śrub przy rozciąganiu
- Graf. 2.3. Wyznaczanie efektywnej długości króćca teowego
- Graf. 2.4. Wyznaczanie efektywnej obliczeniowej nośności śrub przy ścinaniu
- Graf. 2.5. Sprawdzenie warunków nośności spoin

Spis tablic

- Tablica 4.1. Porównanie wyników

Spis załączników

- [Z1] Płyta DVD z plikami instalacyjnymi i kopią elektroniczną pracy.