



Politechnika
Wrocławska

Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

(Zał. 5a do procedury Pr 08)



SPECJALNOŚĆ: KONSTRUKCJE BUDOWLANE

**MAGISTERSKA
PRACA DYPLOMOWA**

**Studium projektowania belek stalowych
z otworami w środkach**

Autor: inż. Filip Łukasik

Opiekun: dr inż. Krzysztof Marcinczak

Recenzent: dr hab. inż. Dariusz Czepiżak, prof. uczelni

Rok akademicki: 2025/2026

Spis treści

CZEŚĆ STUDIALNA.....	5
1. Streszczenie	5
2. Wstęp.....	7
2.1 Motywacja podjęcia tematyki badawczej	7
2.2 Przedmiot, cel i zakres opracowania	7
2.2.1 Przedmiot opracowania	7
2.2.2 Cele pracy.....	7
2.2.3 Zakres opracowania.....	7
2.3 Oznaczenia przyjęte w pracy.....	8
3. Przegląd literatury i stan wiedzy	11
3.1 Ewolucja i zastosowanie belek z otworami w środnikach	11
3.2 Typowe kształty otworów w środnikach belek	12
3.2.1 Otwory okrągłe.....	12
3.2.2 Otwory prostokątne	13
3.2.3 Otwory wieloboczne	14
3.2.4 Otwory sinusoidalne.....	15
3.2.5 Otwory o niestandardowych kształtach.....	17
3.3 Zachowanie statyczne belek i modele zniszczenia	17
3.4 Konstruowanie wzmocnień otworów w środnikach	21
3.4.1 Nakładki poziome	22
3.4.2 Żebra pionowe.....	23
3.4.3 Pierścienie usztywniające.....	24
3.5 Zasady i ograniczenia geometryczne dotyczące otworów w środnikach.....	25
4. Wymiarowanie i analiza wg EN 1993-1-13 [1]	29
4.1 Wymagane sprawdzenia	29
4.2 Sztywność belek z otworami i analiza globalna.....	29
4.3 Nośność na ścinanie w obrębie otworu	30
4.4 Nośność teowników w przypadku zginania Vierendeela	32
4.5 Wyboczenie środnika dla szerokiego rozstawu otworów	32
4.6 Sprawdzenia przewidziane dla otworów w wąskim rozstawie	33
4.7 Zwichrzenie	35
4.8 Dodatkowe ugięcia od otworów.....	35
4.9 Wnioski z przeglądu literatury	36
CZEŚĆ PROJEKTOWO BADAWCZA	37
5. Projekt i własne badania wytrzymałościowe belek z otworami okrągłymi	37
5.1 Cel, zakres i program badań laboratoryjnych.....	37
5.2 Stanowisko badawcze	38
5.3 Geometria badanych elementów	39
5.4 Aparatura pomiarowa	42
5.5 Przebieg i rejestracja badań.....	47
6. Podejście analityczne	48
6.1 Analiza nośności z wykorzystaniem dostępnych źródeł literaturowych.....	48
6.1.1 Dane do obliczeń	48

6.1.2	Belka M101	51
6.1.3	Belka M102	53
6.1.4	Belka M103	56
6.1.5	Belka M104	58
6.1.6	Sprawdzenie nośności na zginanie Vierendeela metodą alternatywną	60
6.1.7	Alternatywne sprawdzenie stateczności słupka międzyotworowego.....	62
7.	Modelowanie numeryczne MES	66
7.1	Parametry modelu	67
7.2	Właściwości materiałowe.....	67
7.3	Warunki brzegowe.....	69
7.4	Siatka elementów skończonych	70
7.5	Analiza numeryczna	71
7.6	Obciążenie	72
7.7	Imperfekcje geometryczne	73
7.8	Rezultaty.....	74
8.	Porównanie wyników	74
8.1	Zestawienie nośności.....	74
8.2	Krzywe obciążenie-ugięcie	75
8.2.1	Rozstaw szeroki.....	75
8.2.2	Rozstaw wąski.....	76
8.3	Mechanizmy zniszczenia.....	76
8.3.1	Zniszczenie belki M101	76
8.3.2	Zniszczenie belki M104	82
8.3.3	Zniszczenie belki M102	85
8.3.4	Zniszczenie belki M103	89
8.4	Porównanie naprężeń	98
8.4.1	Naprężenia w belce M101	98
8.4.2	Naprężenia w belce M102.....	100
8.4.3	Wzmocnienie rozstawu szerokiego	102
8.4.4	Wzmocnienie rozstawu wąskiego	103
9.	Podsumowanie i wnioski.....	105

CZEŚĆ STUDIALNA

1. Streszczenie

Przedmiotem niniejszej pracy dyplomowej jest studium projektowania belek stalowych z dużymi otworami w środnikach. Praca składa się z części studialnej oraz projektowo-badawczej.

W części studialnej przedstawiono przegląd literatury oraz aktualny stan wiedzy w zakresie belek otworowanych. Omówiono ewolucję i zastosowanie tych elementów, typowe kształty otworów oraz charakterystyczne dla nich lokalne mechanizmy zniszczenia, w tym mechanizm Vierendeela oraz wyboczenie słupka międzyotworowego. Zebrano zasady konstruowania wzmocnień (nakładki poziome i pionowe, pierścienie usztywniające) oraz ograniczenia geometryczne oraz zestaw procedur wymiarowania według najnowszej generacji przepisów Eurokod – normy EN 1993-1-13:2024 oraz EN 1993-1-14:2024.

W części projektowo – badawczej przeprowadzono badania doświadczalne czterech belek stalowych z profilu IPE300, z otworami kołowymi. Elementy podzielono na dwie pary wariantowe – o rozstawie szerokim i wąskim, przy czym w każdej parze badano belkę bez wzmocnień oraz ze wzmocnieniami otworów w postaci tulei z rur stalowych. Belki obciążano w schemacie trzypunktowego zginania, rejestrując siłę, ugięcie, odkształcenia punktowe oraz pole odkształceń metodą DIC. Uzyskane wyniki porównano z obliczeniami analitycznymi wykonanymi zgodnie z EN 1993-1-13 oraz analizą numeryczną metodą elementów skończonych (GMNIA) przeprowadzoną w programie Dlubal RFEM 6.

Przeprowadzone analizy pozwoliły potwierdzić, że nośność belek z otworami, zależy w głównej mierze od lokalnych mechanizmów zniszczenia. Dla belek o rozstawie szerokim mechanizmem miarodajnym było zginanie Vierendeela, natomiast dla rozstawu wąskiego – mechanizmy związane ze słupkiem międzyotworowym. Wykazano, że wzmocnienie pierścieniowe skutecznie redukuje koncentrację naprężeń przy krawędzi otworu i zwiększa nośność na zginanie Vierendeela, sprowadzając zachowanie belki osłabionej do zbliżonego elementu pełnościennego. Uzyskano dobrą zgodność wyników doświadczalnych, analitycznych i numerycznych zarówno w zakresie nośności jak i postaci zniszczenia co potwierdza słuszność procedur normowych zawartych w EN 1993-1-13 do projektowania tego typu elementów.

Słowa kluczowe: belki stalowe, otwory w środnikach, belki ażurowe, mechanizm Vierendeela, wyboczenie słupka międzyotworowego, wzmocnienie pierścieniowe, EN 1993-1-13, MES, GMNIA, DIC.

Streszczenie w języku angielskim:

Abstract:

The subject of this thesis is a study of the design of steel beams with large web openings. The thesis comprises a state-of-the-art review and a design-and-experimental part.

The review part presents a survey of the literature and the current state of knowledge concerning beams with web openings. The evolution and application of these members are discussed, together with typical opening shapes and the local failure mechanisms characteristic of them, including the Vierendeel mechanism and web-post buckling. The detailing rules for reinforcement (horizontal and vertical stiffener plates, ring stiffeners) are compiled, along with the geometric limitations and the set of design procedures according to the latest generation of Eurocode provisions — standards EN 1993-1-13:2024 and EN 1993-1-14:2024.

In the design-and-experimental part, experimental tests were carried out on four steel beams fabricated from IPE300 sections with circular web openings. The members were divided into two variant pairs — with wide and narrow spacing — whereby in each pair an unreinforced beam and a beam with openings reinforced by steel-tube sleeves were tested. The beams were loaded in a three-point bending configuration, with force, deflection, discrete (point) strains, and the full-field strain distribution recorded using the Digital Image Correlation (DIC) method. The obtained results were compared with analytical calculations performed in accordance with EN 1993-1-13 and with a numerical finite element analysis (GMNIA) carried out in the Dlubal RFEM 6 software.

The analyses performed confirmed that the resistance of beams with web openings is governed primarily by local failure mechanisms. For the beams with wide spacing, the governing mechanism was Vierendeel bending, whereas for the narrow spacing the governing mechanisms were those associated with the web post. It was demonstrated that ring reinforcement effectively reduces the stress concentration at the opening edge and increases the Vierendeel bending resistance, bringing the behaviour of the weakened beam close to that of a solid-web member. Good agreement was obtained between the experimental, analytical, and numerical results, with respect to both resistance and failure mode, which confirms the validity of the standard procedures given in EN 1993-1-13 for the design of members of this type.

Keywords: steel beams, web openings, castellated and cellular beams, Vierendeel mechanism, web-post buckling, ring reinforcement, EN 1993-1-13, FEM, GMNIA, DIC.

2. Wstęp

2.1 Motywacja podjęcia tematyki badawczej

Belki stalowe z otworami w środnikach, w tym belki ażurowe, znajdują coraz szersze zastosowanie w konstrukcjach budowlanych. Wykonanie otworów w środniku pozwala zmniejszyć ciężar elementu przy zwiększeniu jego wysokości w belkach ażurowych, a także umożliwia prowadzenie instalacji w obrębie wysokości konstrukcyjnej stropu.

Obecność otworów zaburza jednak przepływ naprężeń w środniku. W sąsiedztwie otworów powstają koncentracje naprężeń a teowniki nad i pod otworem przenoszą lokalne zginanie wtórne (mechanizm Vierendeela). Dodatkowo pojawiają się inne lokalne mechanizmy zniszczenia takie jak na przykład wyboczenie lub ścinanie słupka międzyotworowego. Mechanizmy te mają charakter lokalny i nie są ujmowane klasycznym sprawdzeniem nośności przekroju, dlatego wymagają odrębnych procedur projektowych.

Zasady projektowania takich belek zostały zebrane w ramach najnowszej generacji przepisów Eurokod (EN 1993-1-13) a ocena ich nośności wymaga często zaawansowanej analizy numerycznej.

Praktycznym sposobem przywrócenia lub zwiększenia nośności środnika osłabionego otworem jest wzmocnienie go, za pomocą różnych sposobów dostępnych zarówno w literaturze jak i w przepisach normowych. Wpływ takiego wzmocnienia na sztywność, rozkład naprężeń oraz mechanizm zniszczenia belki nie jest jednak w pełni rozpoznany i zasługuje na odrębną analizę.

Powyższe przesłanki stanowią motywację do podjęcia tematyki, którą jest doświadczalne i numeryczne rozpoznanie zachowania belek stalowych z dużymi otworami w środnikach, ocena wpływu rozstawu otworów oraz ich wzmocnienia, a także sprawdzenie przydatności normowych procedur projektowych.

2.2 Przedmiot, cel i zakres opracowania

2.2.1 Przedmiot opracowania

Przedmiotem opracowania niniejszej studialno-projektowej pracy dyplomowej jest studium projektowania belek stalowych z otworami w środnikach.

2.2.2 Cele pracy

Celem pracy jest zapoznanie się z problemami projektowania otworów w środnikach belek stalowych wraz ze sposobami wzmocniania otworów.

2.2.3 Zakres opracowania

Zakres opracowania obejmuje część studialną oraz część projektową. Część studialna obejmuje:

- Przegląd literatury,
- Przedstawienie zasad projektowania otworów w środnikach belek stalowych,
- Przedstawienie zasad konstruowania wzmocnień otworów i stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych.

Część projektowa (uzupełnienie części studialnej):

- Projekt i analiza statyczno-wytrzymałościowa belek z różnymi wariantami otworów i wzmocnień.
- Budowa i kalibracja modelu numerycznego MES,

2.3 Oznaczenia przyjęte w pracy

W pracy przyjęto oznaczenia zgodne z normą EN 1993-1-13:2024 oraz pozostałymi normami z grupy Eurokod. Podstawowe symbole i skróty zestawiono poniżej.

Wielkie litery łacińskie

A – pole przekroju poprzecznego profilu

A_v – pole przekroju czynne przy ścinaniu

A_T – pole przekroju teownika (nad lub pod otworem)

$A_{T,s}$ – pole przekroju teownika wzmocnionego

A_s – efektywne pole przekroju usztywnienia (wzmocnienia)

C_1, C_2 – współczynniki we wzorze na sprężysty moment krytyczny

E – moduł sprężystości podłużnej (moduł Younga)

G – moduł sprężystości poprzecznej (Kirchhoffa)

I_a – moment bezwładności przekroju pełnego

I_{eff} – efektywny (zredukowany) moment bezwładności belki z otworami

I_{tT}, I_{bT} – momenty bezwładności teownika górnego i dolnego

I_z – moment bezwładności względem osi mniejszej bezwładności

I_w – wycinkowy moment bezwładności

I_t – moment bezwładności przy swobodnym skręcaniu

L – rozpiętość (długość) belki

M_{Ed} – obliczeniowy moment zginający

$M_{o,Rd}, M_{o,pl,Rd}$ – nośność na zginanie w miejscu otworu (globalne)

$M_{T,pl,Rd}, M_{T,Rd}$ – nośność plastyczna teownika na zginanie

$M_{NV,T,Rd}$ – nośność teownika na zginanie zredukowana o interakcję $N-V$

$M_{add,Ed}$ – dodatkowy moment zginający w przekroju długiego otworu

$M_{wp,Ed}, M_{wp,Rd}$ – moment zginający słupek międzyotworowy i jego nośność

M_{cr} – sprężysty moment krytyczny przy zwichrzeniu

$M_{b,Rd}$ – nośność na zwichrzenie

M_{Rk} – charakterystyczna nośność na zginanie

$M_{\varphi,Ed}, M_{\varphi,R}$ – moment Vierendeela i nośność w przekroju nachylonym pod kątem φ

N_{Ed} – obliczeniowa siła osiowa

N_t, N_b – siła osiowa w teowniku górnym i dolnym

$N_{T,Ed}, N_{m,Ed}$ – siła osiowa w teowniku od globalnego zginania

$N_{T,pl,Rd}$ – nośność plastyczna teownika na ściskanie

$N_{b,Rd}$ – nośność teownika ściskanego na wyboczenie

$N_{w,Ed}, N_{w,Rd}$ – siła ściskająca środnik i nośność środnika na wyboczenie

$N_{wp,Ed}, N_{wp,Rd}$ – siła ściskająca słupek międzyotworowy i jego nośność na wyboczenie
 $N_{ep,Rd}$ – nośność wyboczeniowa pola końcowego
 $N_{\varphi,Ed}, N_{\varphi,Rd}$ – siła osiowa i nośność w przekroju nachylonym pod kątem φ
 P – siła skupiona przyłożona w środku rozpiętości
 P_{Rd} – nośność obliczeniowa elementu wyrażona siłą skupioną
 R – promień otworu (w metodzie przekrojów promieniowych)
 V_{Ed} – obliczeniowa siła poprzeczna (ścinająca)
 $V_{pl,Rd}$ – plastyczna nośność na ścinanie przekroju pełnego
 $V_{o,pl,Rd}$ – plastyczna nośność na ścinanie w miejscu otworu
 $V_{t,Ed}, V_{b,Ed}$ – siła poprzeczna teownika górnego i dolnego
 $V_{Vier,Rd}$ – nośność na ścinanie ze względu na zginanie Vierendeela
 $V_{wp,Ed}, V_{wp,Rd}$ – pozioma siła ścinająca słupek międzyotworowy i jego nośność
 W_{pl} – plastyczny wskaźnik wytrzymałości na zginanie teownika

Małe litery łacińskie

a_0 – długość otworu
 a_{eff} – efektywna długość otworu (klasyfikacja przekroju, ugięcia)
 a_{eq} – zastępcza długość ekwiwalentnego otworu prostokątnego (sprawdzenie Vierendeela)
 a_v – długość zakotwienia wzmocnienia poziomego
 b – szerokość półki profilu
 b_0 – szerokość otworu (heksagonalny, sinusoidalny)
 b_s – parametr geometryczny otworu sinusoidalnego
 b_w – efektywna szerokość środka przy wyboczeniu,
 d_0 – średnica otworu kołowego
 d_T – głębokość (wysokość użytkowa) teownika
 d_{wp}, s_{wp} – parametry słupka międzyotworowego w metodzie alternatywnej
 e_0 – mimośród otworu względem osi środka; amplituda imperfekcji
 f_y – granica plastyczności stali
 f_u – wytrzymałość stali na rozciąganie
 $f_{y,red}$ – zredukowana granica plastyczności (wpływ ścinania)
 h – wysokość przekroju (całej belki)
 h_0 – wysokość otworu
 h_c – wysokość w osi teowników
 h_{eff} – efektywna odległość między środkami ciężkości teowników
 h_{eq} – zastępcza wysokość otworu
 h_T – wysokość teownika
 h_w – wysokość środka
 h_{st}, t_{st} – wysokość i grubość pierścienia usztywniającego
 k, k_w – współczynniki długości efektywnej we wzorze na M_{cr}
 k_0 – współczynnik ugięć
 l_0 – długość między stężeniami (długość wyboczeniowa przy zwichrzeniu)
 n_0 – liczba otworów

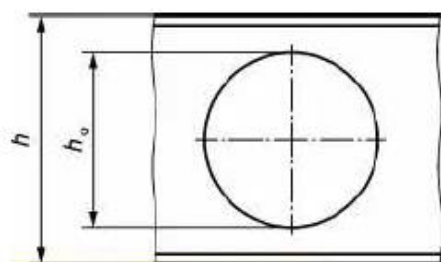
r – promień zaokrąglenia profilu walcowanego
 r_0 – promień wyokrąglenia naroża otworu prostokątnego
 s – rozstaw osiowy otworów
 s_0 – odstęp krawędź–krawędź sąsiednich otworów
 s_e – szerokość strefy podporowej (poła końcowego)
 t_f – grubość półki
 t_w – grubość środnika
 t_s – grubość żebra (usztynienia, wzmocnienia)
 w_b – ugięcie belki bez otworów
 w_{add} – dodatkowe ugięcie wywołane otworami
 x_0 – odległość otworu od najbliższej podpory
 z_t, z_b – położenie środka ciężkości teownika górnego i dolnego
 z_g – współrzędna punktu przyłożenia obciążenia

Litery greckie

α – parametr imperfekcji krzywej wyboczeniowej; stosunek s/h_0
 α_{cr} – mnożnik krytyczny obciążenia (analiza stateczności)
 γ_{M0}, γ_{M1} – częściowe współczynniki bezpieczeństwa
 δ – ugięcie
 ε – współczynnik zależny od granicy plastyczności,
 $\varepsilon_y, \varepsilon_{sh}, \varepsilon_u$ – odkształcenia charakterystyczne stali (model materiałowy)
 λ – smukłość względna
 λ_w – smukłość względna środnika przy wyboczeniu
 λ_{wp} – smukłość względna słupka międzyotworowego
 λ_{LT} – smukłość względna przy zwichrzeniu
 λ_1 – smukłość porównawcza,
 μ – stosunek masy pierścienia do masy wyciętego materiału
 ν – współczynnik Poissona
 ρ – gęstość stali; współczynnik redukcji nośności od ścinania
 σ_{Ed} – naprężenie obliczeniowe
 $\sigma_{w,cr}$ – sprężyste naprężenie krytyczne słupka (z analizy LBA)
 φ – kąt nachylenia płaszczyzny przekroju (metoda promieniowa Vierendeela)
 χ, χ_{wp}, χ_w – współczynniki redukcyjne wyboczenia
 Φ – współczynnik pomocniczy do wyznaczenia χ
 ξ, ψ, κ – współczynniki pomocnicze w metodzie alternatywnej słupka

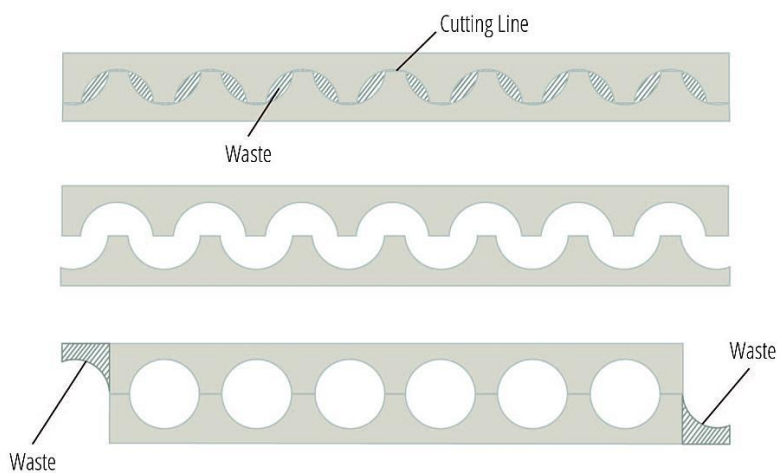
Skróty

MES – metoda elementów skończonych
GMNIA – geometrycznie i materiałowo nieliniowa analiza z imperfekcjami
LBA – liniowa analiza stateczności (analiza bifurkacyjna)
LSA – liniowa analiza statyczna
DIC – cyfrowa korelacja obrazu (Digital Image Correlation)
LVDT – indukcyjny czujnik przemieszczeń (Linear Variable Differential Transformer)



Rysunek 3.3 Kształt otworu okrągłego wg EN 1993-1-13:2024

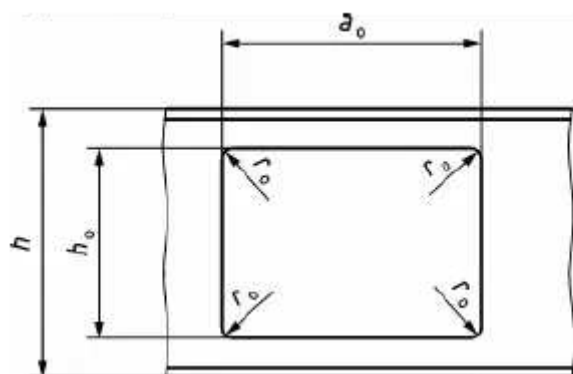
Zgodnie z normą EN 1993-1-13 maksymalna wysokość otworu okrągłego h_o powinna wynosić co najwyżej $0,8 h$ całej belki, co generalnie znajduje potwierdzenie w dostępnych źródłach literaturowych.



Rysunek 3.4 Schemat wytwarzania belki z otworami okrągłymi (ang. cellular beam)

3.2.2 Otwory prostokątne

Ten kształt stosowany jest najczęściej tam, gdzie prostokątny gabaryt wpisuje się w kształt kanału przeprowadzanej instalacji. Za podstawową wadę tego rozwiązania uznaje się dużą koncentrację naprężeń w ostrych narożach otworów stanowiących karby geometryczne.



Rysunek 3.5 Kształt otworu prostokątnego wg EN 1993-1-13:2024

9. Podsumowanie i wnioski

Przedmiotem niniejszej pracy było stadium projektowania belek stalowych z dużymi otworami w środnikach. Wyniki doświadczalne porównano z obliczeniami analitycznymi wg. EN 1993-1-13:2024 oraz analizą numeryczną metodą elementów skończonych z uwzględnieniem modeli materiałowych z normy EN 1993-1-14:2024, w programie Dlubal RFEM 6. Jako element odniesienia rozpatrzono pełny przekrój IPE300 bez otworów.

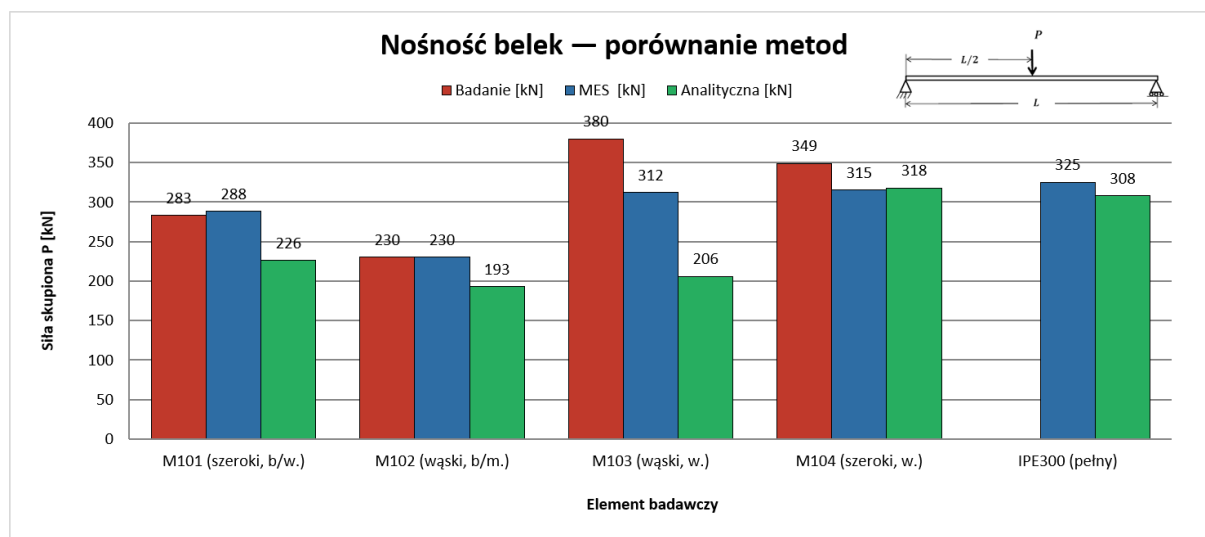
Zestawienie nośności wyrażonych dopuszczalną siłą skupioną P , możliwą do przyłożenia w środku rozpiętości belki swobodnie podpartej, dla wszystkich pięciu rozpatrywanych elementów przedstawiono na rysunku 9.1 zamykającym niniejszy rozdział. Na podstawie przeprowadzonych analiz sformułowano wnioski przedstawione poniżej.

1. O nośności belek z dużymi otworami w środnikach decydują przede wszystkim lokalne mechanizmy zniszczenia, a nie klasyczne sprawdzenie nośności przekroju pełnego. Potwierdziły to wszystkie trzy zastosowane metody – analityczna numeryczna i doświadczalna.
2. Mechanizm miarodajny jest ściśle powiązany z rozstawem otworów, zgodnie z normową klasyfikacją na otwory szeroko i wąsko rozstawione. Dla rozstawu szerokiego (M101, M104) o nośności decydowało zginanie Vierendeela, natomiast dla rozstawu wąskiego (M102, M103) – mechanizmy związane ze słupkiem międzyotworowym (wyboczenie oraz ścinanie poziome).
3. Mechanizmy te zostały potwierdzone pomiarowo. Przeciwnie znaki naprężeń w narożach otworu (tensometr T9 ściskany, T10 rozciągany) jednoznacznie wskazują na działanie ramy Vierendeela, natomiast uplastycznienie tensometrów naklejonych na słupkach (T3, T11) przy wąskim rozstawie otworów potwierdza, że pole międzyotworowe decyduje o zniszczeniu słupka. Pomiar deformacji (owalizacja o około 10 mm w belce M101) wykazały zgodność z postaciami zniszczenia uzyskanymi w analizie MES.
4. Deformacje środnika zostały zaobserwowane również w belce M101 z rozstawem szerokim. Charakter deformacji był wyboczeniowy (około 2-3 mm) w sąsiedztwie żebra środkowego. Świadczy to, że szeroki rozstaw nie eliminuje całkowicie niestateczności środnika, choć ma ona tam znaczenie drugorzędne wobec mechanizmu Vierendeela.
5. Wzmocnienie pierścieniowe jest szczególnie skuteczne dla belek o rozstawie szerokim, gdzie decyduje zginanie Vierendeela. Obliczeniowa nośność wzrosła z 226 kN do 318 kN tj. o około 40% a nośność doświadczalna z ok. 280 kN, do ok. 350 kN tj. o około 20%. Pierścień spowodował, że wokół otworu zakres naprężeń był sprężysty dla tensometru rozciąganego, a uplastycznienie tensometru rozciąganego przesunęło się o około 60 kN. Belka M104 zachowywała się w sposób zbliżony do elementu pełnościenne.

6. Stwierdzono paradoksalne zjawisko: w ujęciu samego sprawdzenia ścinania poziomego słupka, belka wzmocniona M103 (206 kN), wykazuje nośność niższą niż belka niewzmocniona M102 (222 kN). Przyczyną jest geometria – pierścień przesunął środek ciężkości teownika w stronę otworu, zmniejszając efektywną odległość między teownikami h_{eff} . Mniejsze ramię zwiększa wartość siły obliczeniowej $V_{wp,Ed}$, natomiast nośność słupka $V_{wp,Rd}$ zależy wyłącznie od jego geometrii, której wzmocnienie nie zmienia.
Paradoks ten jest jedynie pozorny i wynika z porównania mechanizmu, który w rzeczywistości nie jest miarodajny, bo o nośności belki niewzmocnionej M102 decyduje wyboczenie słupka międzyotworowego.
7. Skuteczność wzmocnienia pierścieniowego jest uzależniona od mechanizmu miarodajnego, jest ono efektywne dla mechanizmu Vierendeela, a mniej dla postaci zniszczenia związanych z deformacjami słupka międzyotworowego, gdzie nośność analityczna po wzmocnieniu wzrosła jedynie o około 7%, ponieważ pierścień usztywnia krawędź otworu i teownik, a nie zmienia geometrii samego słupka. Gdy odnieść nośność belki niewzmocnionej o wąskim rozstawie do rzeczywistego miarodajnego mechanizmu jakim jest wyboczenie słupka, skuteczność okazuje się znaczna – na podstawie doświadczenia nośność wzrasta z około 230 kN do około 380 kN. Pozornie niska wartość wynika wyłącznie z metodyki obliczeń.
8. Analiza GMNIA wiarygodnie odwzorowała zarówno postacie zniszczenia jak i poziom nośności i deformacji granicznej pozostając po stronie bezpiecznej. W zakresie eksploatacyjnym jednak, model był sztywniejszy od rzeczywistej belki, zaniżając ugięcia o średnio 18 do 25%.
9. Procedury zawarte w normie EN 1993-1-13:2024 prawidłowo wskazały mechanizm miarodajny dla każdej z rozpatrywanych belek oraz dały oszacowania nośności po stronie bezpiecznej. Potwierdza to przydatność normy do projektowania belek z dużymi otworami w środkach i znacząco ułatwia proces projektowy dzięki ujednoliceniu i skonsolidowaniu rozproszonych dotąd wytycznych.
10. Część procedur ma charakter półempiryczny i opiera się na koncepcji otworu prostokątnego co prowadzi do konserwatywnych wyników obliczeń. Alternatywna metoda sprawdzania stateczności słupka wymaga sprężystego naprężenia krytycznego z analizy wyboczeniowej LBA. Powoduje to sprzężenie obliczeń analitycznych z numerycznymi.
11. Nie dysponowano zmierzonymi właściwościami materiałowymi dlatego przyjęto wartości projektowane do obliczeń analitycznych, a do analiz MES oraz analizy doświadczalnej użyto parametrów zdefiniowanych w normie EN1993-1-14:2024. Rzeczywiste parametry takie jak moduł Younga czy granica plastyczności różnią się w zależności od partii produkcyjnej walcowanych elementów. Wpływ naprężeń walcowniczych jak i odchyłki materiałowe mogły wpłynąć na rozbieżności między wynikami badań a obliczeniami.
12. Model numeryczny był sztywniejszy od rzeczywistego co wynika z niemodelowanej podatności podpór i układu obciążającego. Dokładniejsze odwzorowanie warunków podparcia i wprowadzenia obciążenia poprawiłoby zgodność w zakresie ugięć.

13. Spoiny łączące pierścień ze środkiem zamodelowano jako sztywne połączenie, a naprężenia własne od spawania i cięcia pominięto. Ich uwzględnienie mogłoby wpłynąć na lokalną stateczność wzmocnionego otworu.

Podsumowując uzyskano dobrą zgodność wyników doświadczalnych, analitycznych i numerycznych zarówno w zakresie nośności jak i postaci zniszczenia co potwierdza słuszność procedur projektowych zawartych w EN 1993-1-13. Wykazano, że wzmocnienie pierścieniowe jest najskuteczniejsze dla belek, w których dominuje mechanizm Vierendeela, ale i w przypadku wąskiego rozstawu eliminuje wyboczenie słupka międzyotworowego.



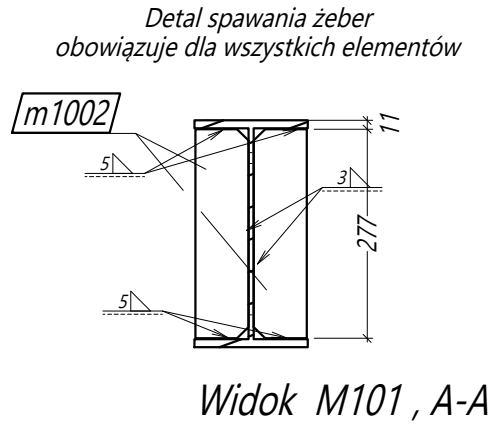
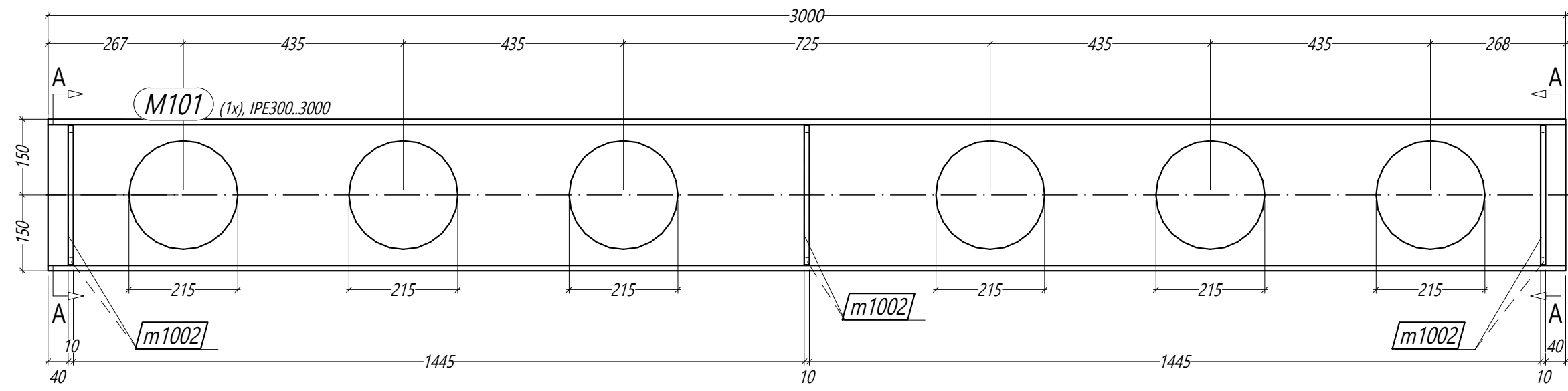
Rysunek 9.1 Zestawienie nośności belek M101-M104 w porównaniu do belki pełnej IPE300

10. Bibliografia

- [1] K. Niemirski i M. Cwyl, „Belki z okrągłymi otworami,” *Builder*, 2018.
- [2] K. Niemirski i M. Cwyl, „Belki z okrągłymi otworami cz. 2,,” *Builder*, 2019.
- [3] S. G. Morkhade i L. M. Gupta, „ANALYSIS OF STEEL I-BEAMS WITH RECTANGULAR WEB OPENINGS: EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT INVESTIGATION,” *ENGINEERING STRUCTURES AND TECHNOLOGIES*, 2015.
- [4] „EN 1993-1-13: Beams with large web openings”.
- [5] J. L. Abbas, „Behaviour of Steel I Beams with Web Openings,” *Civil Engineering Journal*, 2023.
- [6] X. Zhaoyu, T. Genshu, Z. Lei, L. Bingzhe, H. Yilin i R. Tao, Behaviour and design of steel beams with unstiffened and stiffened, 2025.
- [7] Access Steel, „SN019a - Informacje uzupełniające: Zasady projektowania otworów”.
- [8] P. L. N.C. Hagen, „Shear capacity of steel plate girders with large web openings, Part II:,” *Journal of Constructional Steel Research*, 2009.
- [9] R. M. Lawson i S. J. Hicks, Design of composite beams with large web openings, SCI, 2011.
- [10] H. W. Al-Thabhawee i A. Mohammed, „Experimental study for strengthening octagonal castellated steel beams,” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 584 012063, 2019.
- [11] PN-EN 1993-1-1-2024 Reguly ogolne i reguly dla budynkow.
- [12] K. Chung, C. Liu i A. Ko, „Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: an empirical design method using a generalised moment-shear interaction curve,” *Journal of Constructional Steel Research*, Luty 2003.
- [13] E. Doebelin, Measurement Systems – Application and Design, New York: McGraw-Hill, 2004..
- [14] G. Sławiński i T. Niezgoda, Pomiary tensometryczne w mechanice konstrukcji, Warszawa: WAT, 2012.
- [15] M. Sutton, J. Orteu i H. Schreier, Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, New York: Springer, 2009.
- [16] J. Bródka i M. Broniewicz, Projektowanie konstrukcji stalowych według Eurokodów, Polskie Wydawnictwo Techniczne, 2013.
- [17] *PN-EN 1993-1-5 Blachownice*.
- [18] *EN 1993-1-14: Design assisted by finite element analysis*.
- [19] Dlubal Software, „How can I generate imperfections on surfaces in RFEM 6 on the basis of the governing buckling mode?,” *Knowledge Base*, 2024.
- [20] D. Marcinczak, „METODA DIC,” *BUILDER*, 2019.
- [21] S. Mohammad i C. Murude, „Investigation on Failure Mechanisms of Symmetric,” 2020.
- [22] Dlubal Software, „Methods for Stability Analysis According to EC3 in RFEM 6,” *Knowledge Base*, 2024.

Załączniki:

[1] Rysunek warsztatowy belek stalowych M101-M104

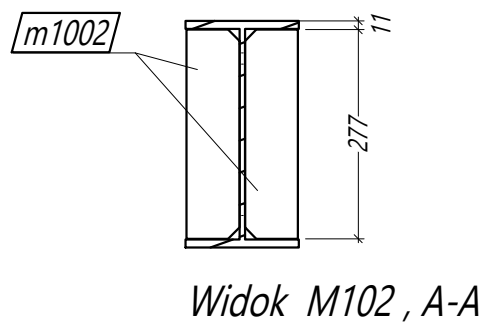
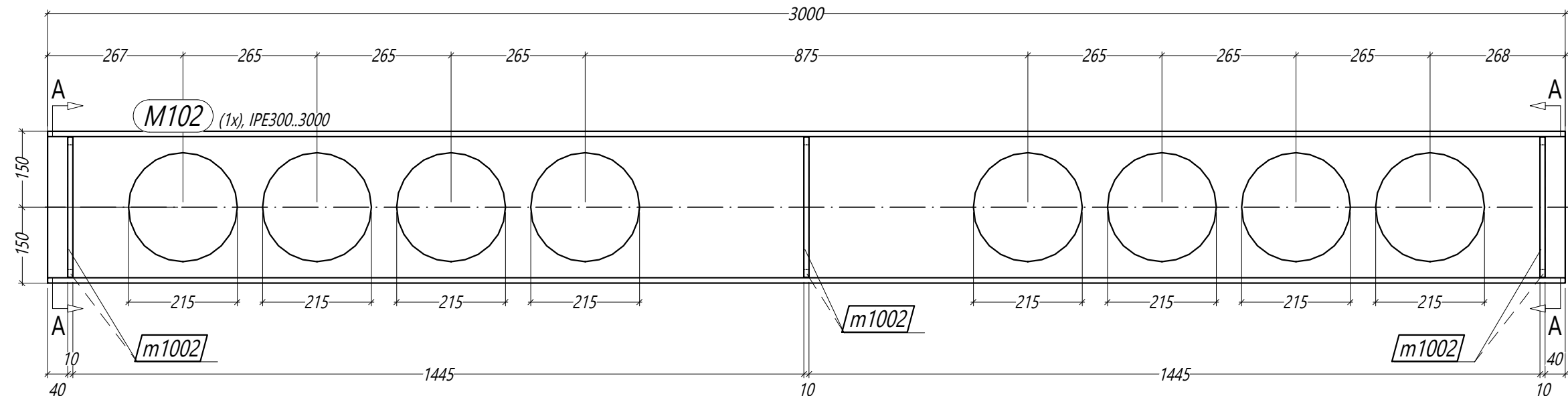
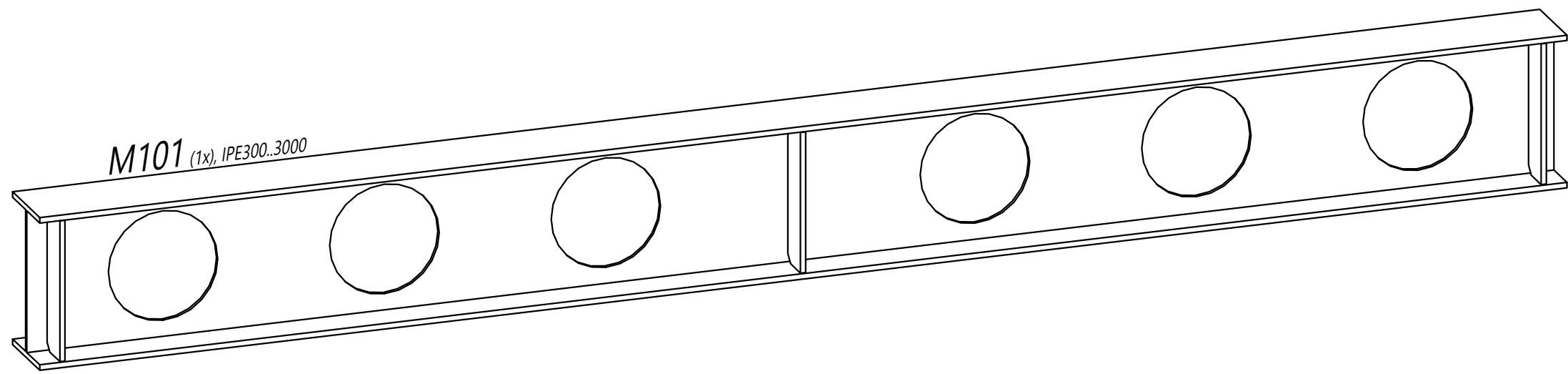
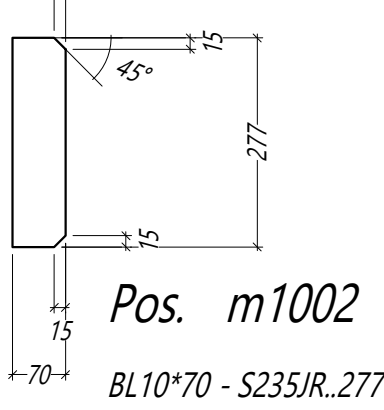


****Zest. dla jednego el. wysyłkowego- Poz. M101 Suma 1 x Wykonać**

Nr.	Tnr	Poz.	Nazwa	Sztuk	Profil	Materiał	Długość	Waga	Ozn.
1	1	M101	Beam	1	IPE300	S235JR	3000	126.6	
2	1	m1002	RP	6	BL10*70	S235JR	277	9.1	

Waga całkowita (kg) 135.7

Gabaryty (W x S x D): 300 x 150 x 3000 (mm)

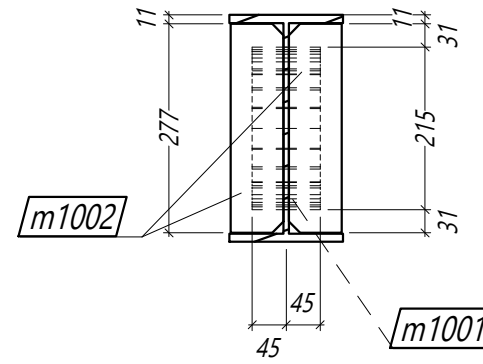
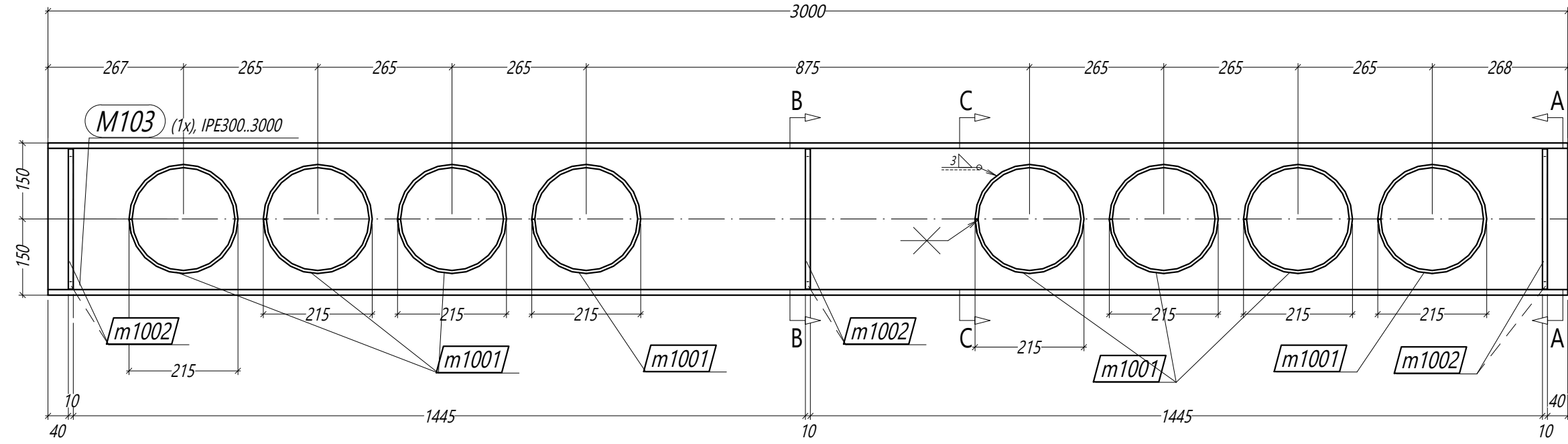
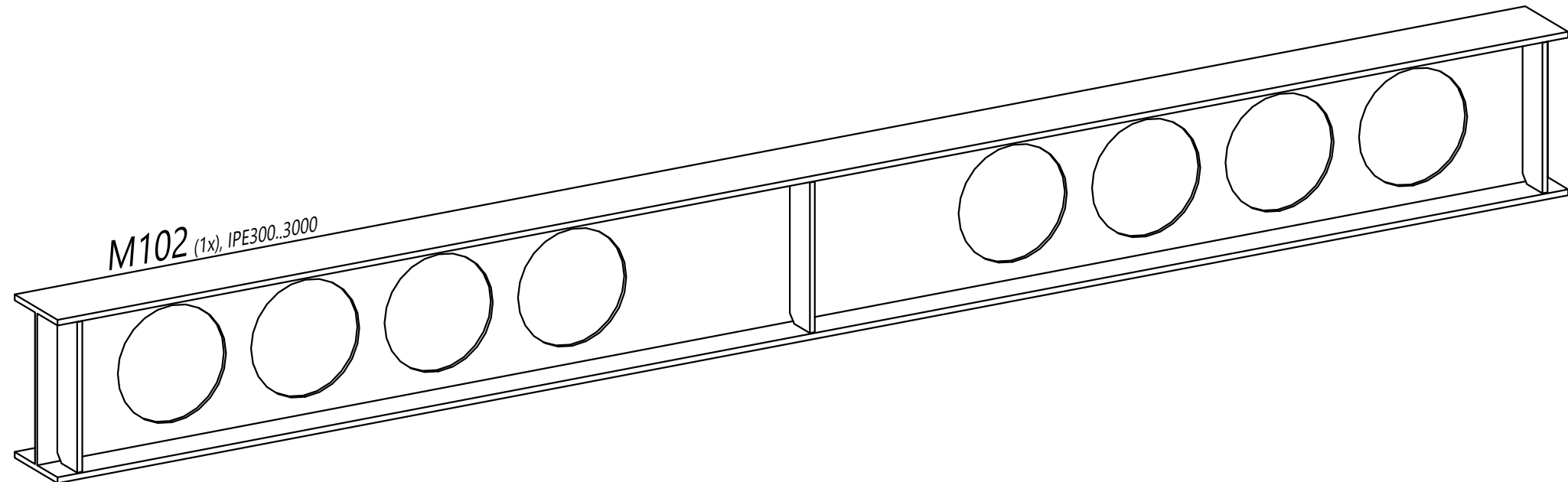
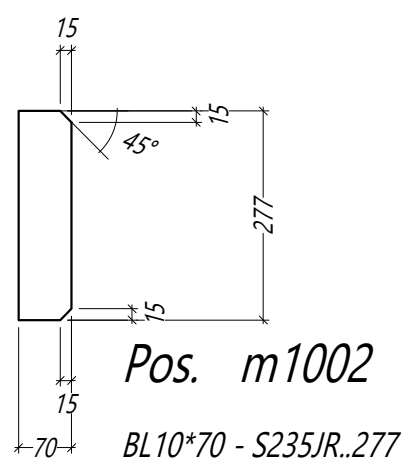


****Zest. dla jednego el. wysyłkowego- Poz. M102 Suma 1 x Wykonać**

Nr.	Tnr	Poz.	Nazwa	Sztuk	Profil	Materiał	Długość	Waga	Ozn.
1	1	M102	Beam	1	IPE300	S235JR	3000	126.6	
2	1	m1002	RP	6	BL10*70	S235JR	277	9.1	

Waga całkowita (kg) 135.7

Gabaryty (W x S x D): 300 x 150 x 3000 (mm)

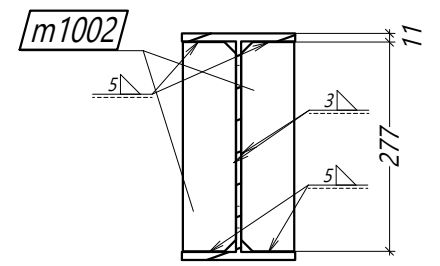
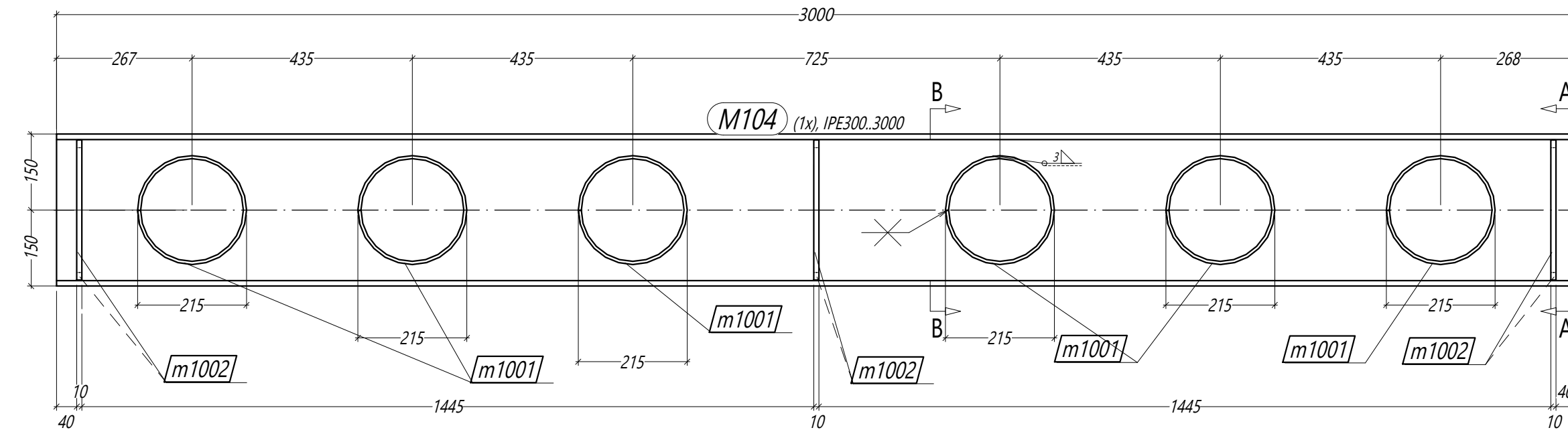
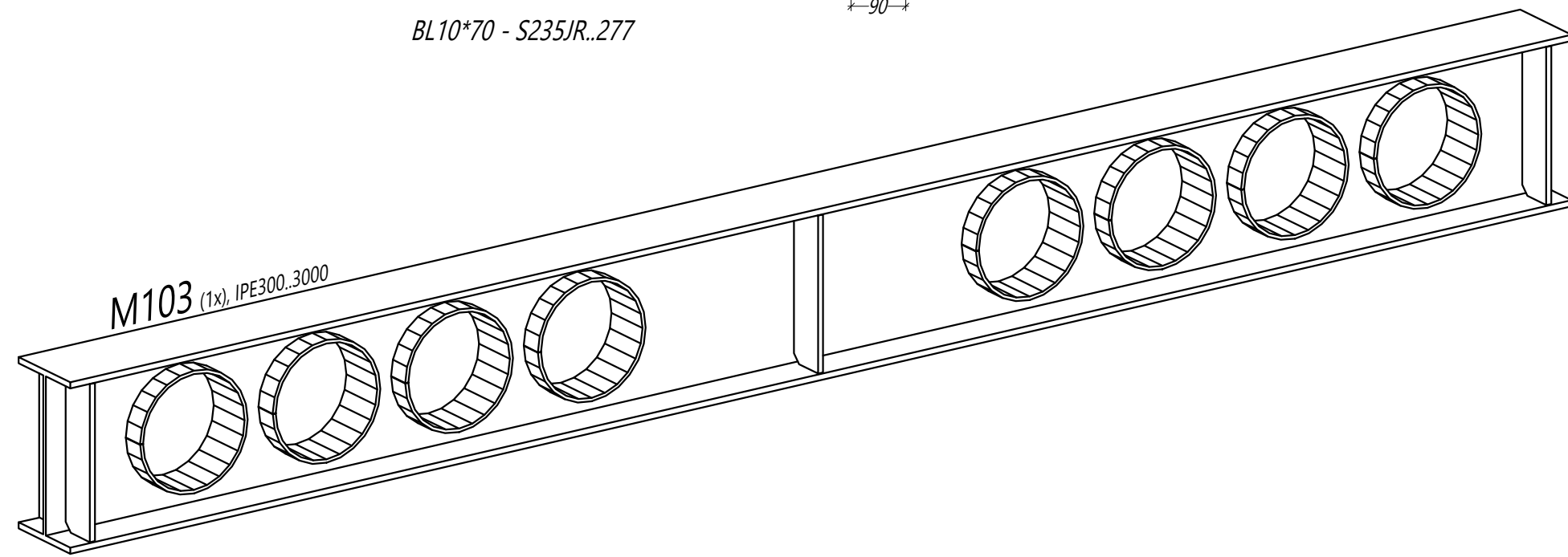
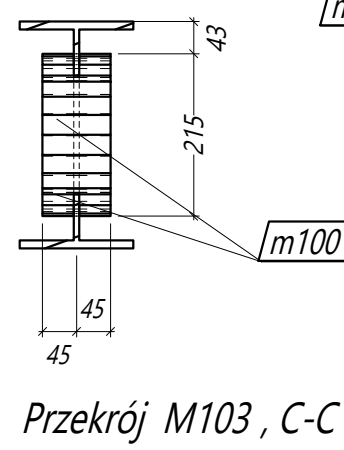
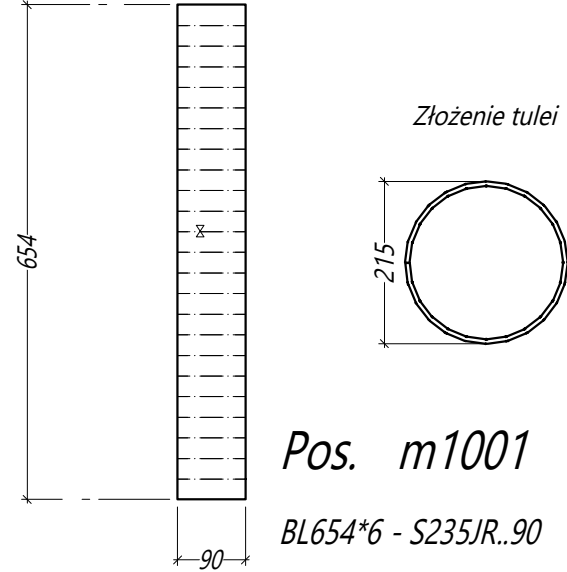
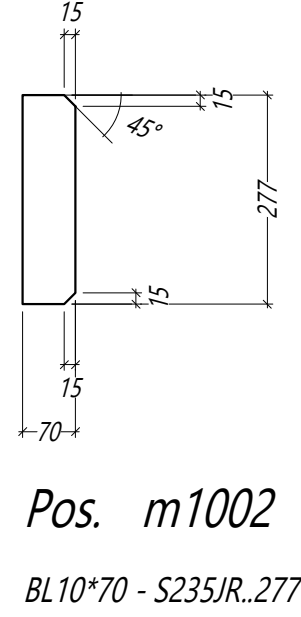


****Zest. dla jednego el. wysyłkowego- Poz. M103 Suma 1 x Wykonać**

Nr.	Tnr	Poz.	Nazwa	Sztuk	Profil	Materiał	Długość	Waga	Ozn.
1	1	M103	Beam	1	IPE300	S235JR	3000	126.6	
2	1	m1001	Beam	8	BL654*6	S235JR	90	22.2	
3	1	m1002	RP	6	BL10*70	S235JR	277	9.1	

Waga całkowita (kg) 157.9

Gabaryty (W x S x D): 300 x 150 x 3000 (mm)

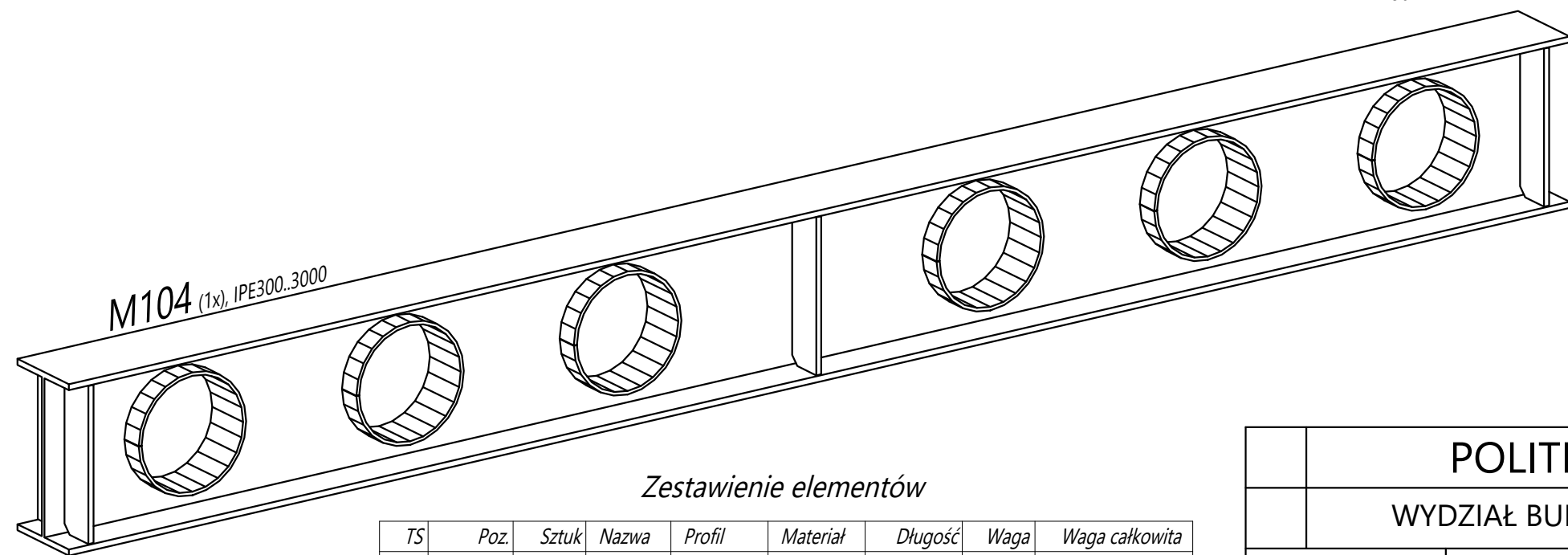
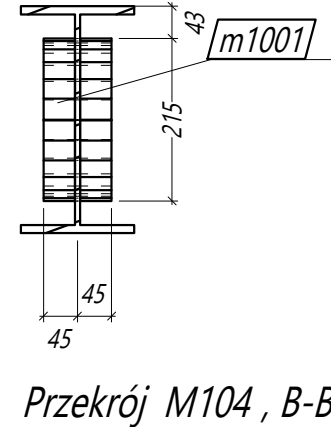
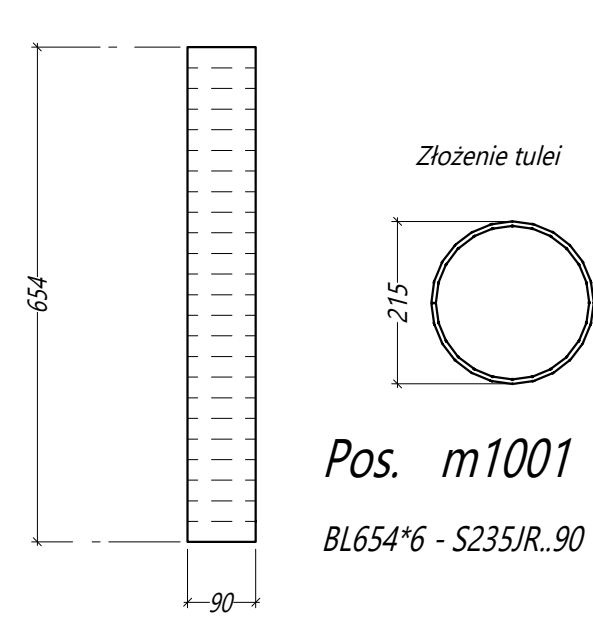
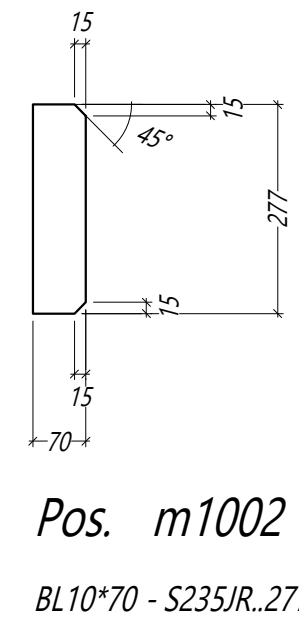


****Zest. dla jednego el. wysyłkowego- Poz. M104 Suma 1 x Wykonać**

Nr.	Tnr	Poz.	Nazwa	Sztuk	Profil	Materiał	Długość	Waga	Ozn.
1	1	M104	Beam	1	IPE300	S235JR	3000	126.6	
2	1	m1001	Beam	6	BL654*6	S235JR	90	16.6	
3	1	m1002	RP	6	BL10*70	S235JR	277	9.1	

Waga całkowita (kg) 152.3

Gabaryty (W x S x D): 300 x 150 x 3000 (mm)



Zestawienie elementów

TS	Poz.	Sztuk	Nazwa	Profil	Materiał	Długość	Waga	Waga całkowita
1	M101	1	Beam	IPE300	S235JR	3000	126.6	126.6
1	M102	1	Beam	IPE300	S235JR	3000	126.6	126.6
1	M103	1	Beam	IPE300	S235JR	3000	126.6	126.6
1	M104	1	Beam	IPE300	S235JR	3000	126.6	126.6
1	m1001	14	Beam	BL654*6	S235JR	90	2.8	39.2
1	m1002	24	RP	BL10*70	S235JR	277	1.5	36.0
								581.6

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA			
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA LĄDOWEGO I WODNEGO			
PROJEKT:	STUDIUM PROJEKTOWANIA BELEK STALOWYCH Z OTWORAMI W ŚRODKACH		
NAZWA RYS.:	RYSUNEK WARSZTATOWY BELEK OTWOROWANYCH		
RYSOWAŁ:	inż. Filip Łukasik (265110)	PODPIS:	SKALA NR RYS.
SPRAWDZAŁ:	dr inż. Krzysztof Marcincał	PODPIS:	1:10
SPRAWDZAŁ:		PODPIS:	
DATA I WERSJA:	02.12.2025 wersja rysunku v1.0		