

Wytrzymałość materiałów

Zastosowanie MES do rozwiązywania układów prętowych

Studia I stopnia stacjonarne
Laboratorium



Cel ćwiczenia

W ramach ćwiczenia:

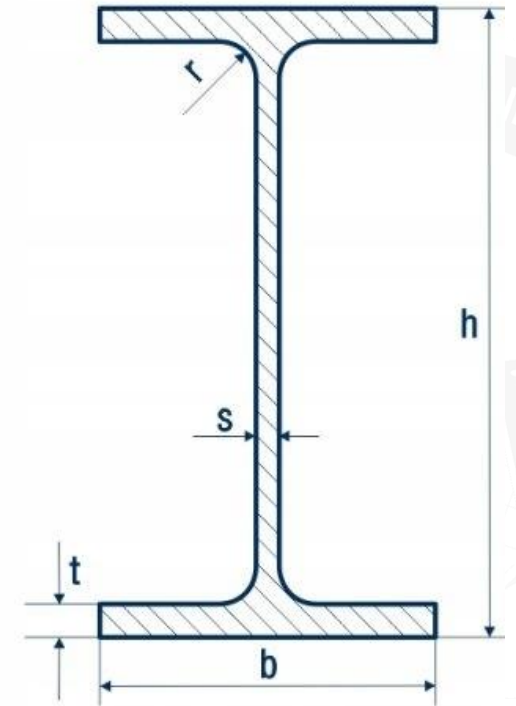
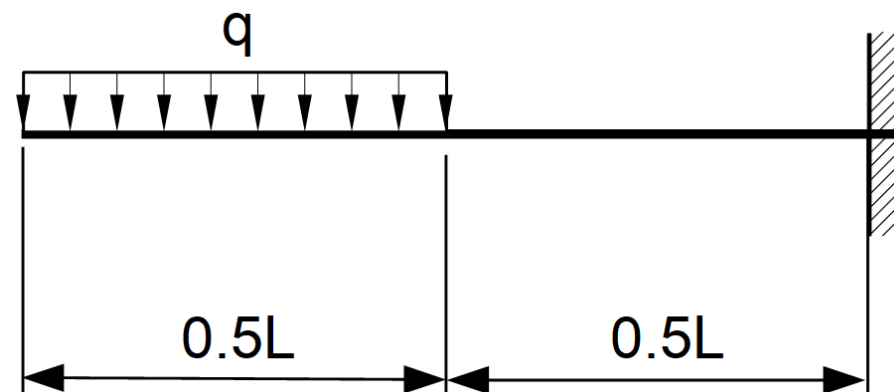
- zapoznasz się z modelowaniem liniowosprężystego układu belkowego z wykorzystaniem jednowymiarowych elementów skończonych,
- dokonasz analitycznego sprawdzenia poprawności wyników wyznaczonych przemieszczeń i naprężeń,
- Do wykonania zadania wykorzystasz program **Ansys Workbench**, który możesz pobrać ze strony internetowej: <https://mesco.com.pl/strefa-akademicka/darmowy-ansys-student/>





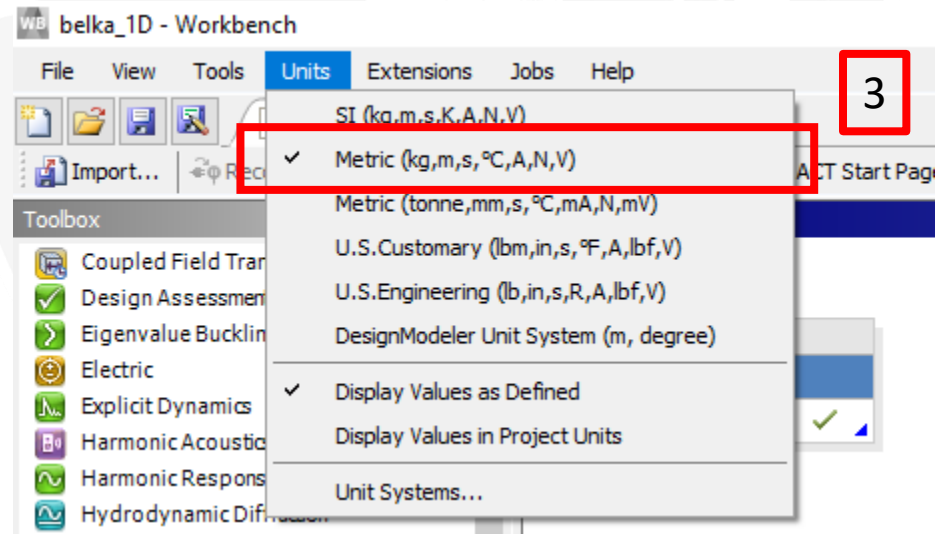
Parametry układu

- Materiał: stal **S235J**, $E=210$ GPa, $\nu=0.3$, $R_e=235$ MPa, $R_m=410$ MPa
- Przekrój: dwuteownik **IPE80**
- Wymiary: $h=80$ mm, $b=46$ mm, $t=5.2$ mm, $s=3.8$ mm, $r=5$ mm
- Długość: $L=2$ m
- Obciążenie ciągłe: $q=100$ N/m



Jednostki

1. Uruchom program **Ansys Workbench**.
2. Utwórz nowy projekt i zapisz go: **File, Save As**. Wybierz lokalizację i wpisz nazwę projektu.
3. Ustaw jednostki wielkości fizycznych.

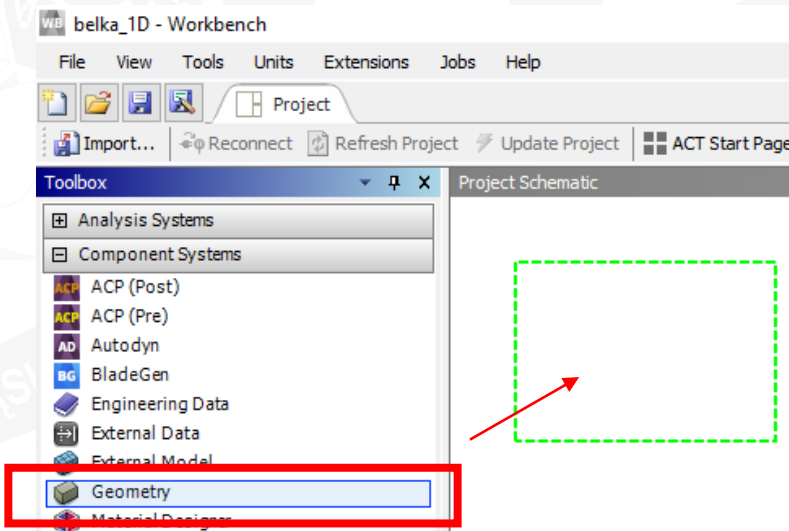




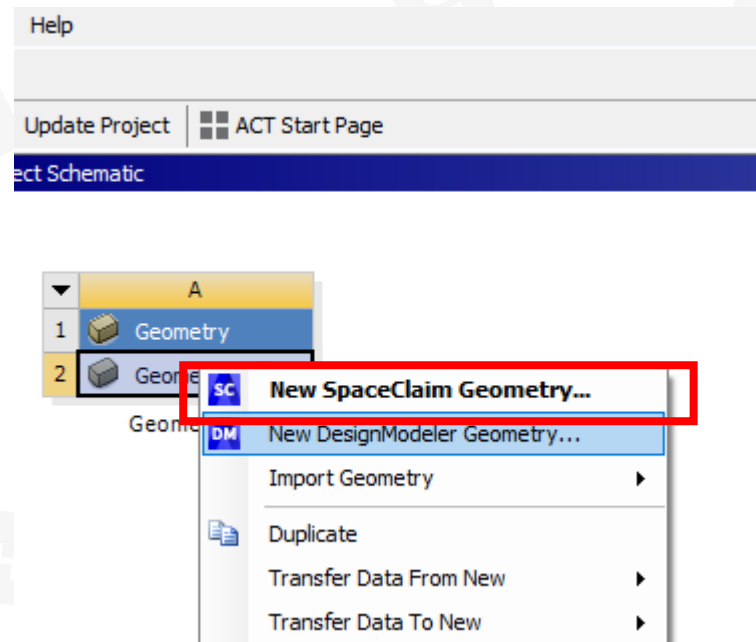
Geometria układu

1. Wybierz **Geometry**, przeciągnij i upuść na obszar roboczy – zielony prostokąt.
2. Kliknij prawym przyciskiem myszy (PPM) na pole **A2** i wybierz **New Space Claim Geometry**.
3. Poczekaj na uruchomienie programu **Space Claim**

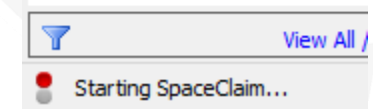
1



2

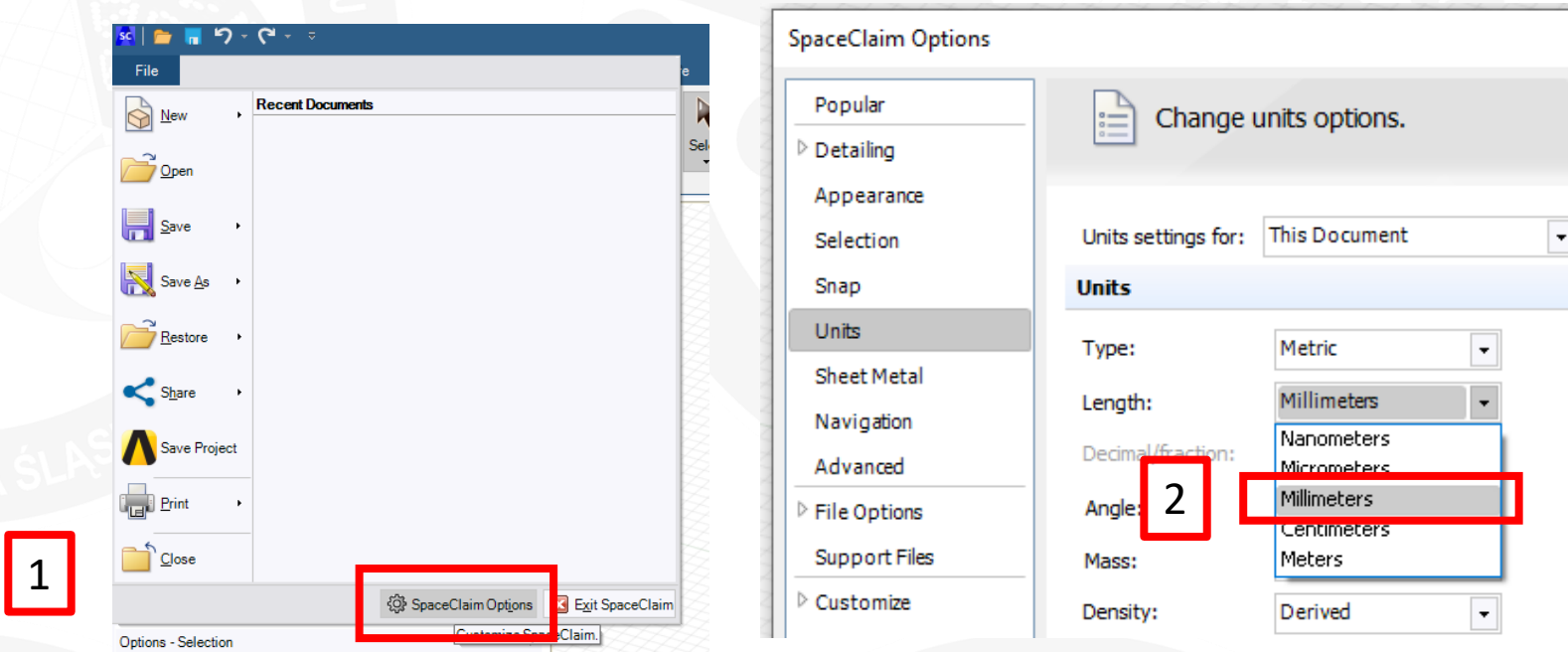


3



Jednostki w Space Claim

1. W menu programu SpaceClaim wybierz **File, SpaceClaim Options**
2. Wybierz **Units** a następnie wskaż jednostkę długości stosowaną w SpaceClaim.



W każdym z programów wchodzącym w skład środowiska **Workbench** można stosować inny układ jednostek. Należy jednak wtedy pamiętać o przeliczeniu wartości podczas wprowadzania danych.



Manipulowanie widokiem modelu

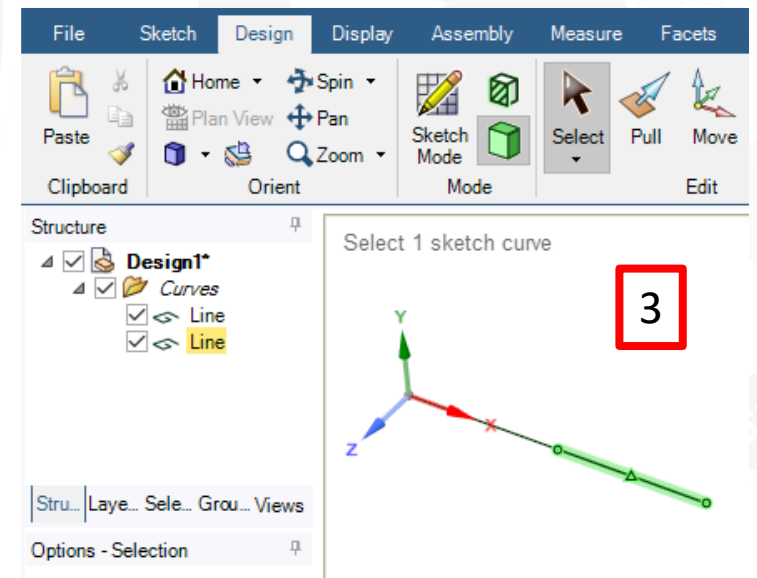
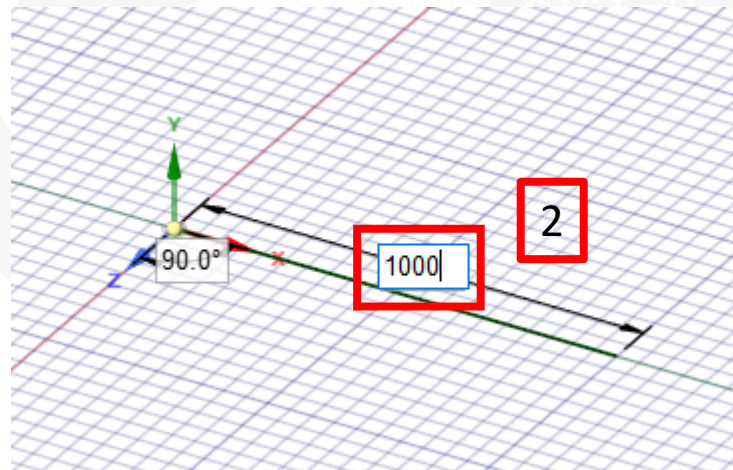
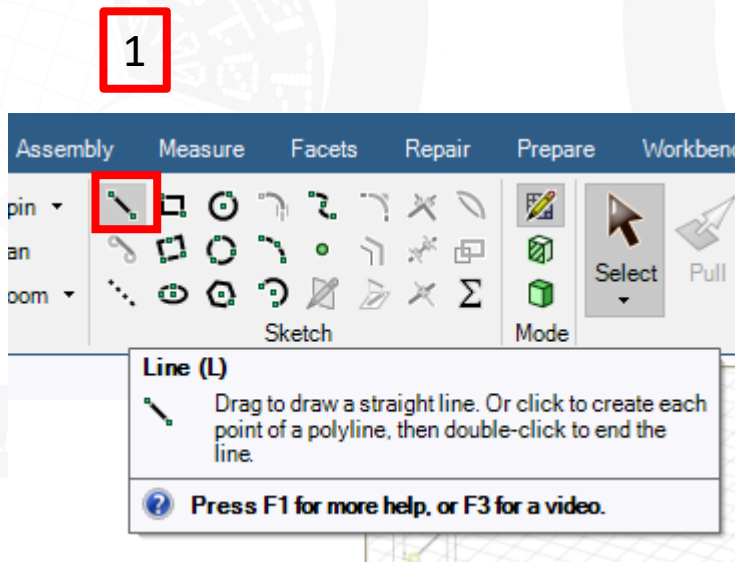
Zanim przejdziesz do modelowania geometrii zapoznaj się ze sposobem manipulowania widokiem modelu:

- Przesuwanie modelu: **ŚPM** (środkowy przycisk myszy) + klawisz **Ctrl** + **ruch myszy**,
- Obracanie: **ŚPM** + **ruch myszy**,
- Powiększanie lub pomniejszanie: **obrót rolki myszy**; lub **ŚPM** + klawisz **Shift** + **ruch myszy**
- Wyśrodkowanie modelu z dopasowaniem wielkości: klawisz **Z**,
- Jeśli chcesz ustawić widok zgodny z wybraną płaszczyzną układu współrzędnych możesz posłużyć się symbolami osi widocznymi w lewym dolnym rogu przestrzeni roboczej **(1)**.
- Możesz również szybko powrócić do standardowych widoków korzystając z przycisków **Orient** paska **Sketch** **(2)**.



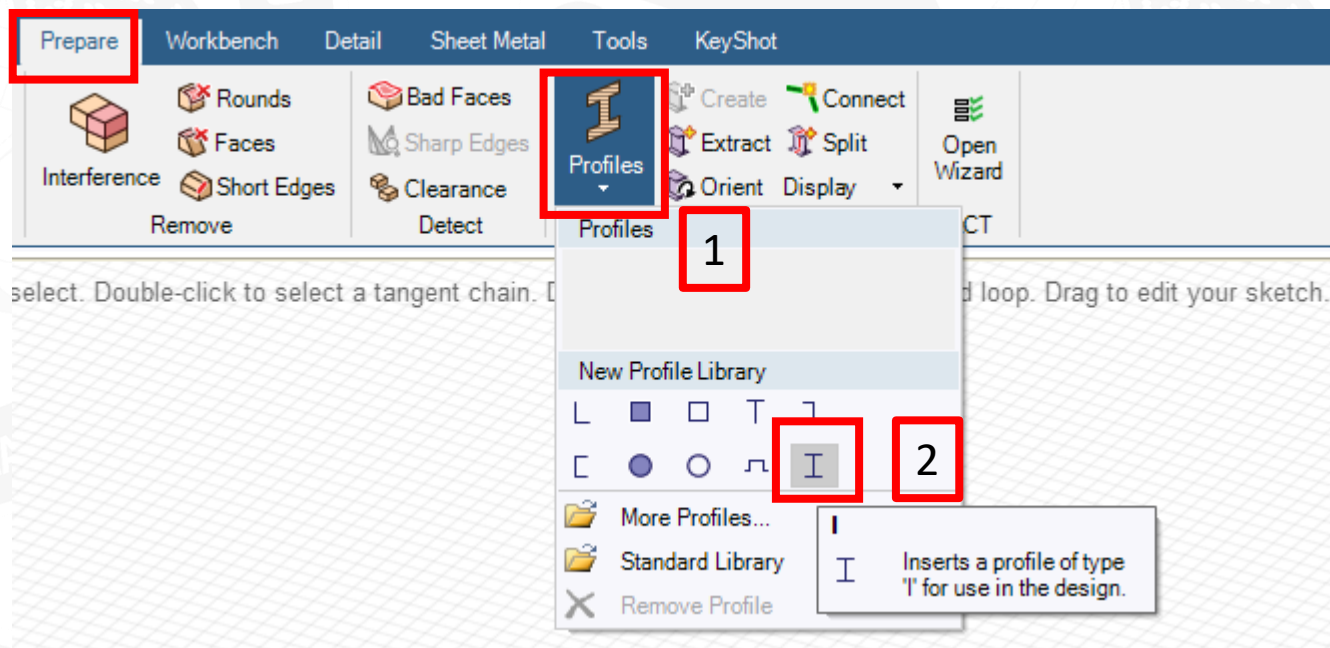
Zdefiniuj oś belki

1. Wybierz narzędzie **Line**
2. Lewym przyciskiem myszy (**LPM**) rozpocznij rysowanie odcinka prostej w początku układu współrzędnych. W polu tekstowym wpisz długość odcinka: **1000 mm** i naciśnij klawisz enter.
3. Kontynuuj rysowanie definiując kolejny odcinek o tej samej długości. Operację zakończ klawiszem **Escape**. W efekcie uzyskasz dwie linie odpowiadające dwóm połowom belki. Poćwicz manipulowanie widokiem modelu (por. poprzedni slajd).



Zdefiniuj przekrój belki (1)

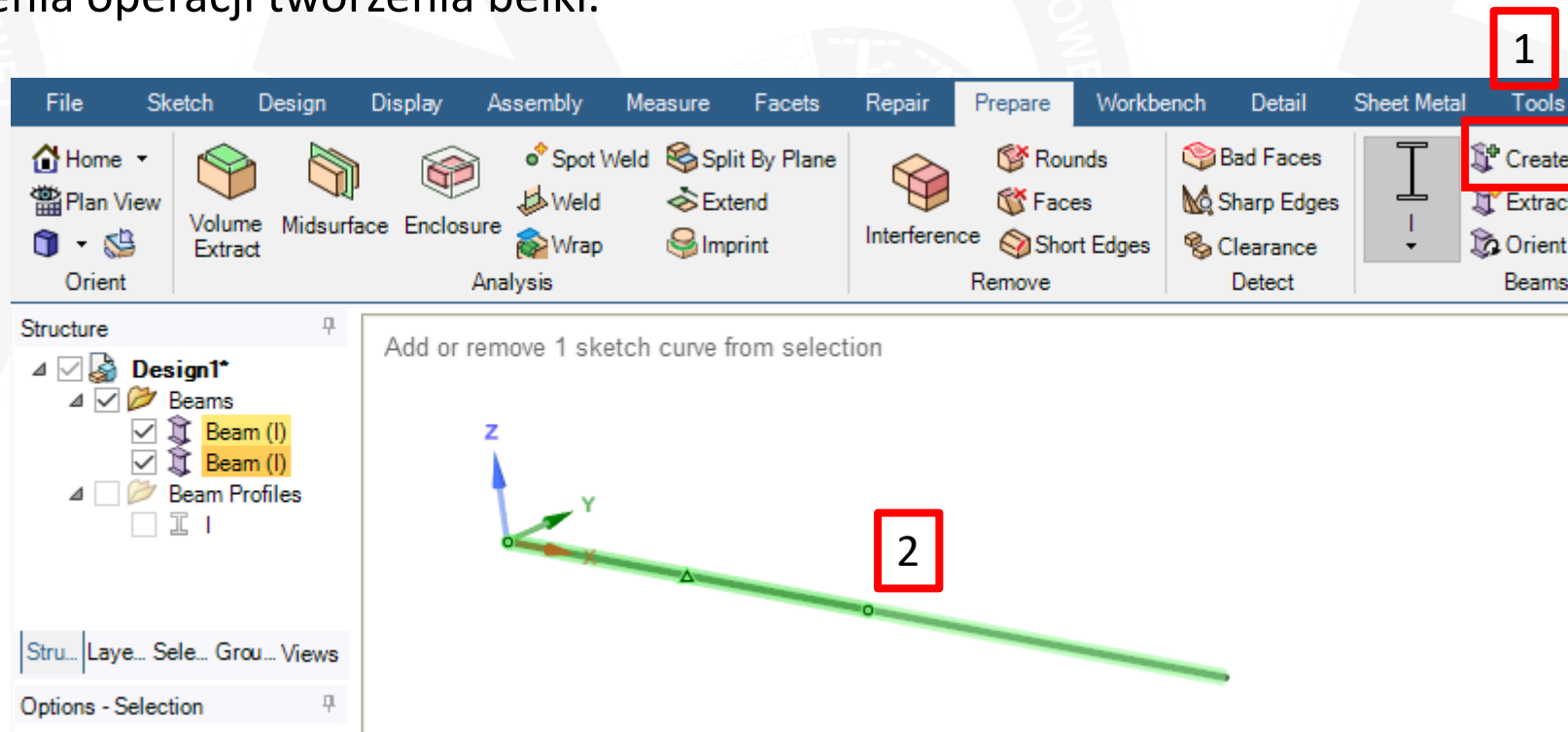
1. Wybierz **Prepare, Profiles**
2. Wskaż przekrój dwuteowy, który będzie można edytować.



Można również wybrać przekrój z biblioteki przekrojów znormalizowanych: **Standard Library**

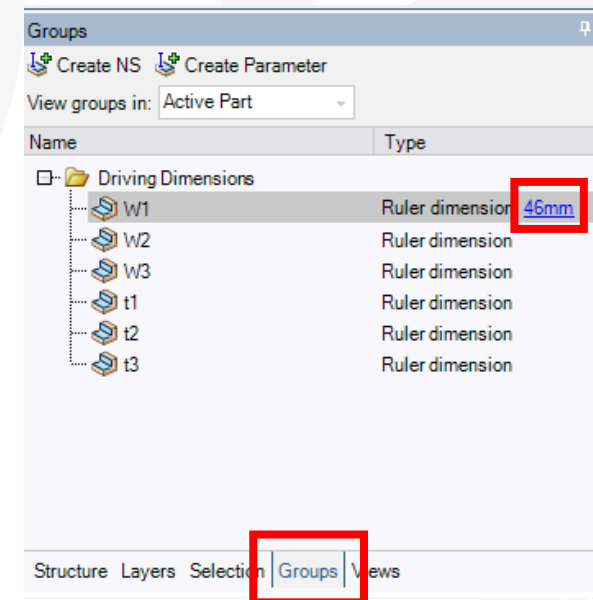
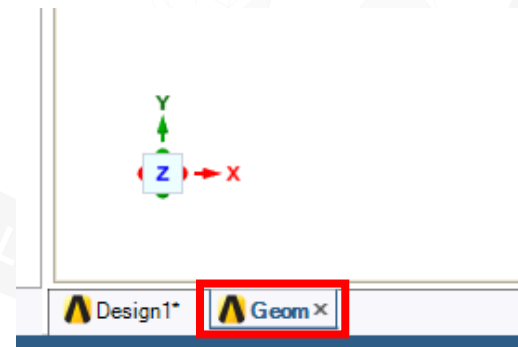
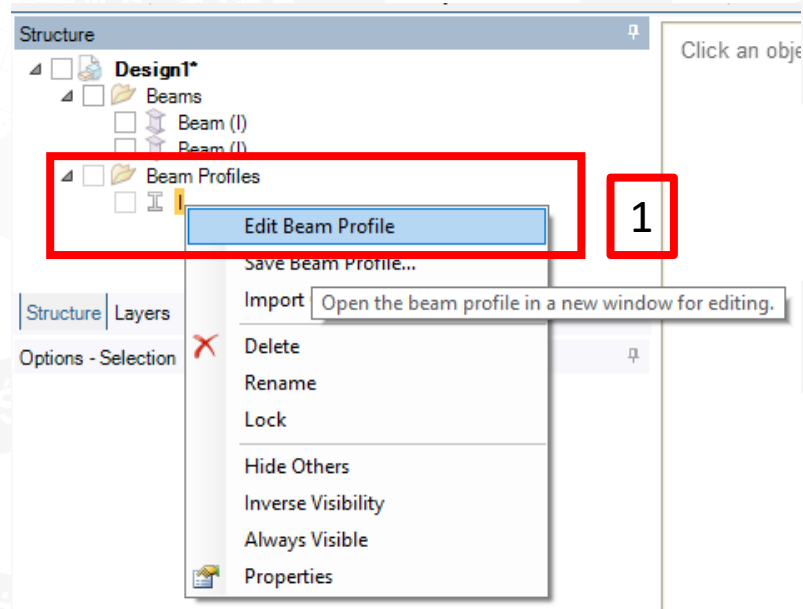
Zdefiniuj przekrój belki (2)

1. Wybierz **Create**
2. Wskaż dwa odcinki belki za pomocą **Ctrl+LPM**. Naciśnij dwukrotnie klawisz **Escape** w celu zakończenia operacji tworzenia belki.



Zdefiniuj przekrój belki (3)

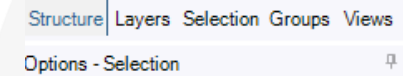
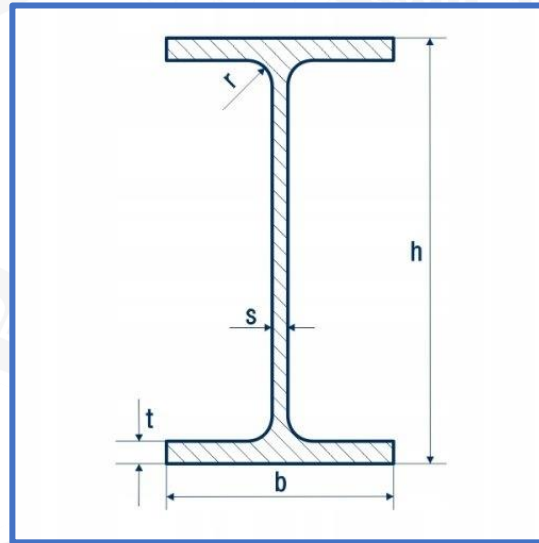
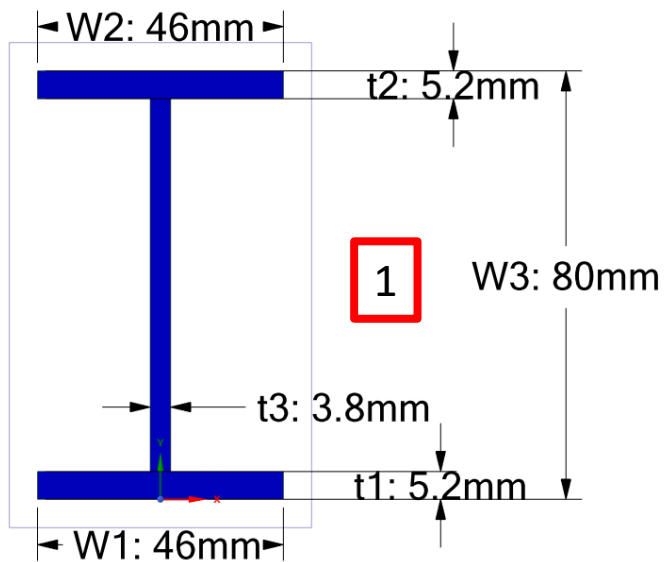
1. W drzewie projektu rozwiń **Beam Profiles**. Wskaż PPM zdefiniowany przekrój i wybierz **Edit Beam Profile**.
2. Uaktywnij panel **Geom**.
3. W panelu **Groups** wprowadź wymiary geometryczne przekroju (por. następny slajd).





Zdefiniuj przekrój belki (3)

1. Po wprowadzeniu wymiarów przekroju widok panelu **Geom** powinien wyglądać jak na rysunku poniżej, po lewej stronie. Zwróć uwagę na uproszczenie – brak zaokrągleń pomiędzy środnikiem i półkami.
2. W oknie **Properties** możesz odczytać wartość głównego centralnego momentu bezwładności przekroju względem głównej centralnej osi poziomej. Jest on oznaczony symbolem **I_{xx}**. Możesz wykorzystasz tę wartość do analitycznego sprawdzenia obliczonych wartości przemieszczeń i naprężeń.



2

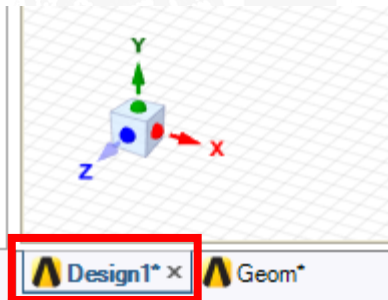
Properties	
▼ Beam Section	
Properties Modif	False
Area	742.88mm ²
Centroid X	0
Centroid Y	40mm
I _{xx}	777010.07mm ⁴
I _{xy}	0
I _{yy}	84676.12mm ⁴
Shear Center X	0
Shear Center Y	40mm
Torsional Const.	5655.31mm ⁴
Warping Consta.	117781560.45mm ⁶



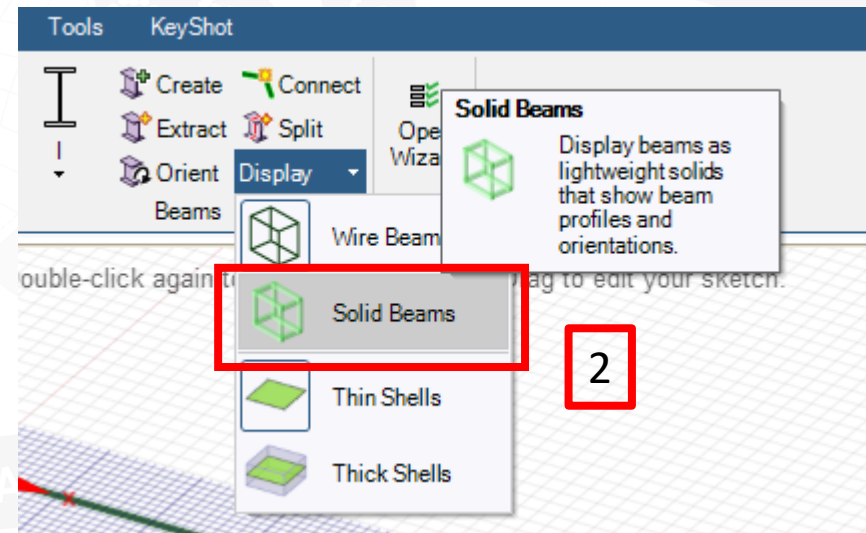
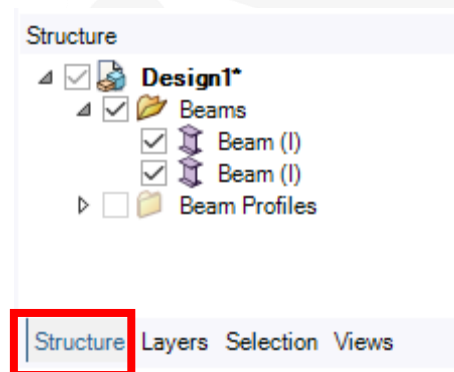


Ustaw widok przekroju

1. Wróć do paneli **Design** oraz **Structure**.
2. Wybierz **Prepare, Display, Solid Beams**



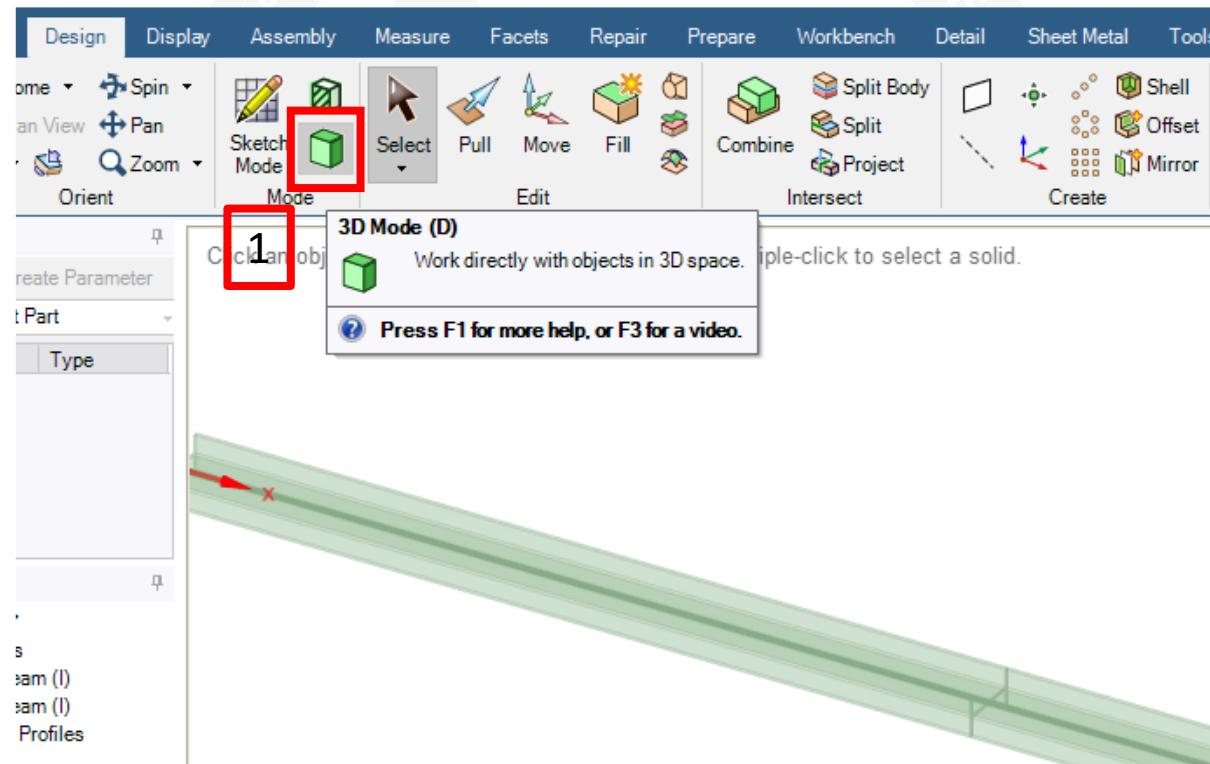
1





Ustaw widok modelu 3D

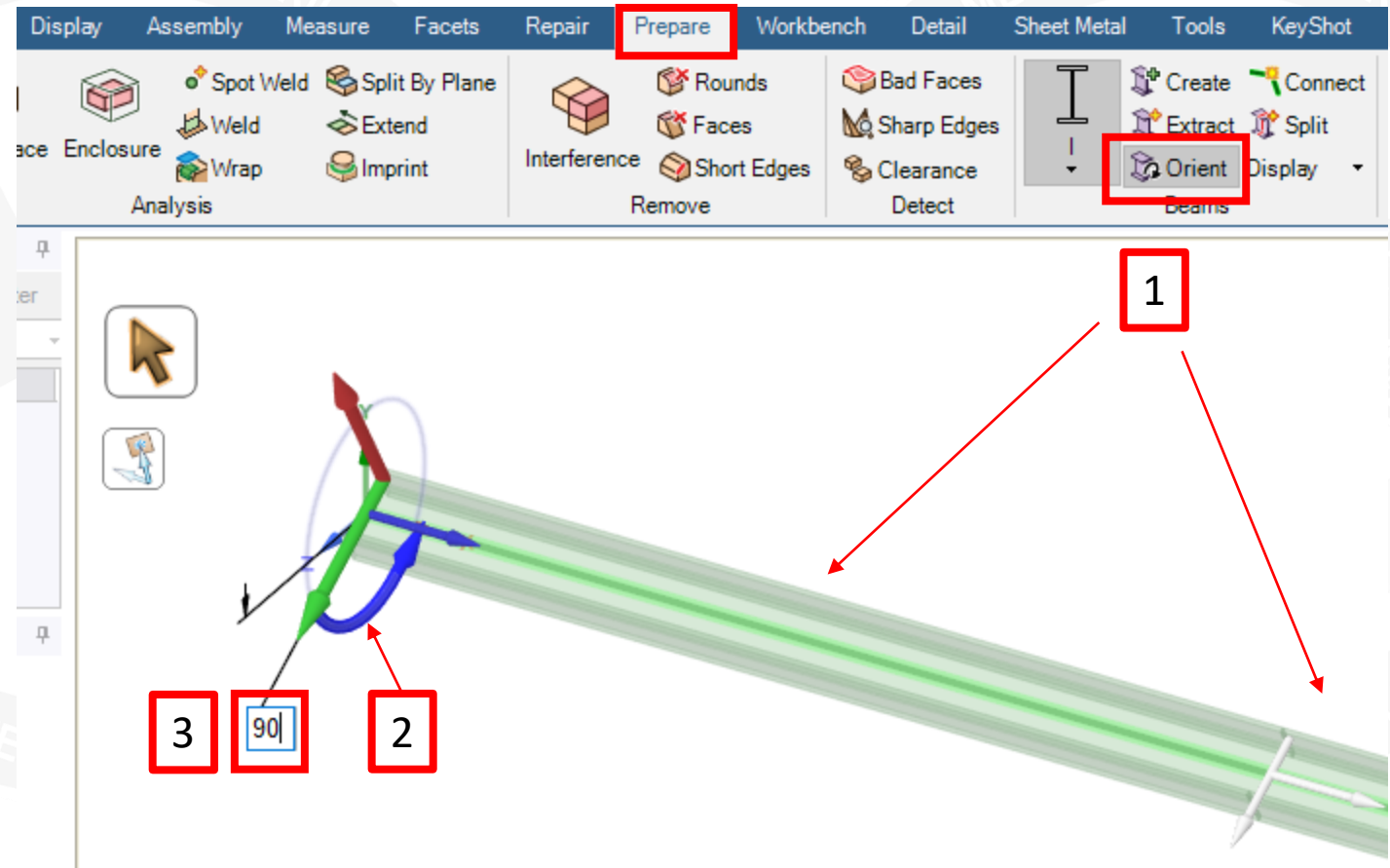
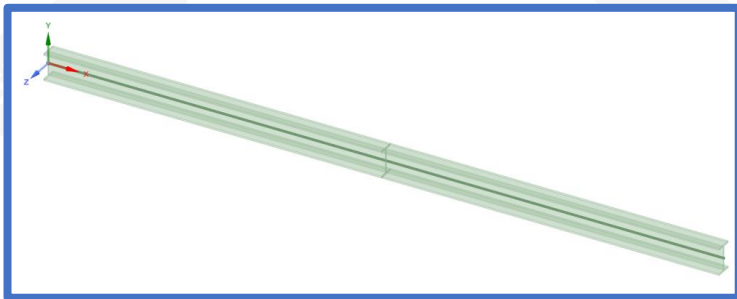
1. Wybierz **Design** oraz **3D Mode**.





Dostosuj orientację przekroju

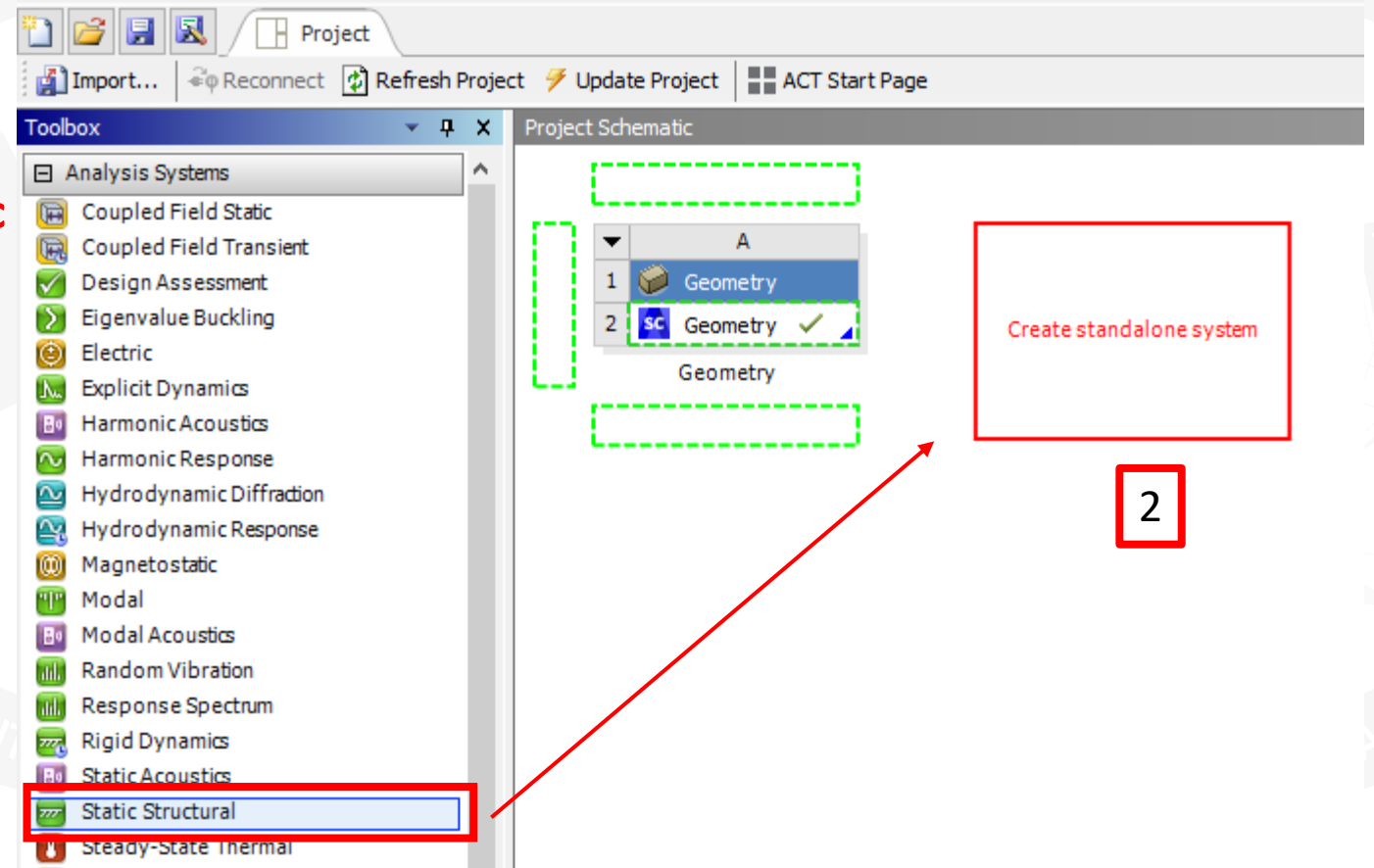
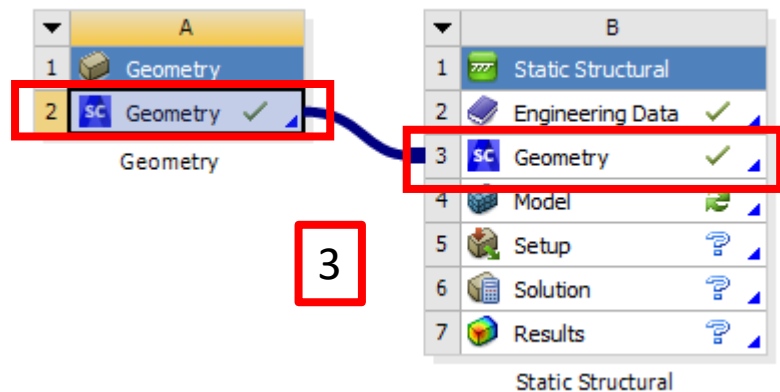
1. Wybierz **Prepare, Orient**. Wybierz obydwa odcinki belki (**Ctrl+LPM**).
2. Za pomocą **LPM** wskaż strzałkę odpowiadającą za obrót przekroju.
3. W okienku tekstowym wpisz wartość kąta w stopniach: **90** i naciśnij **Enter**. Zakończ operację klawiszem **Escape**.
4. Zapisz projekt: **File, Save Project**





Utwórz blok analizy i przypisz geometrię

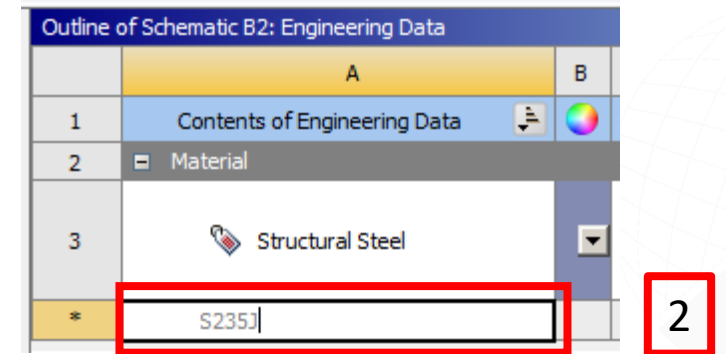
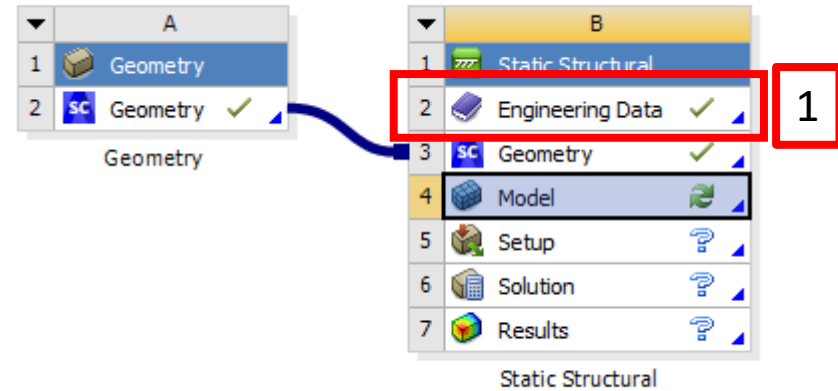
1. Wróć do okna programu **Workbench**.
2. Za pomocą **LPM** wybierz blok **Static Structural**, przeciągnij i upuść w obszarze roboczym (czerwony prostokąt).
3. Za pomocą LPM przeciągnij komórkę **A2** na **B3** i upuść.



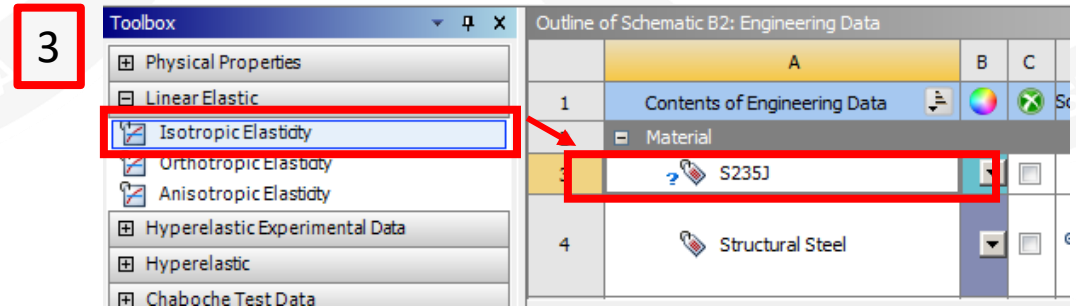


Zdefiniuj materiał

1. Kliknij dwukrotnie na komórce **B2**.
2. W polu **Click here to add new material** wpisz nazwę materiału: **S235J**.
3. Przeciągnij zbiór własności **Isotropic Elasticity** i upuść na utworzonym materiale o nazwie **S235J**.
4. Wprowadź wartości modułu Younga i liczby Poissona. Jednostki wynikają z ustawień pokazanych na slajdzie 4.



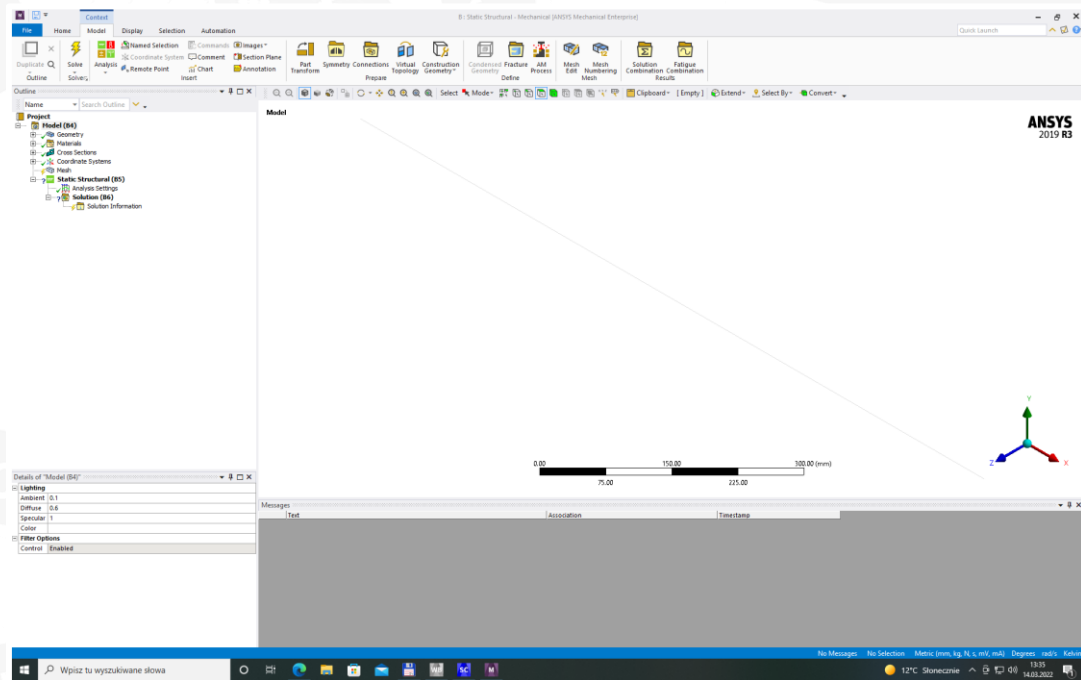
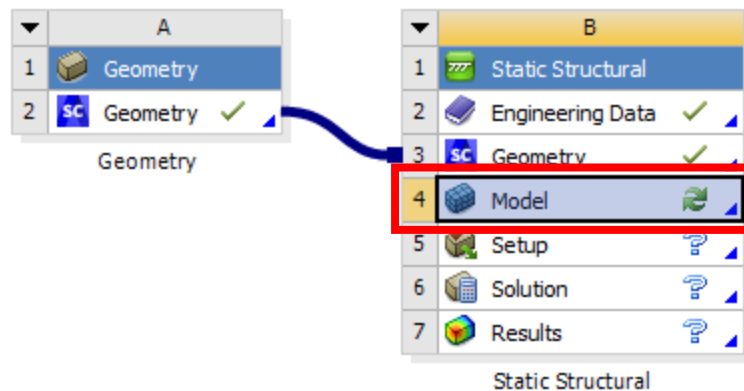
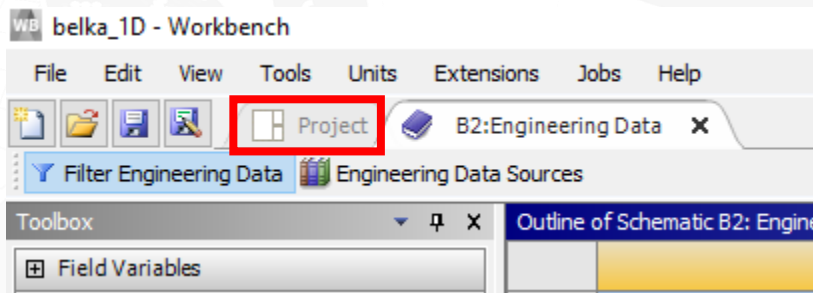
Properties of Outline Row 4: S235J				
	A	B	C	E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's		
5	Young's Modulus	2.1E+11	Pa	
6	Poisson's Ratio	0.3		
7	Bulk Modulus	1.75E+11	Pa	
8	Shear Modulus	8.0769E+10	Pa	





Uruchom program Mechanical

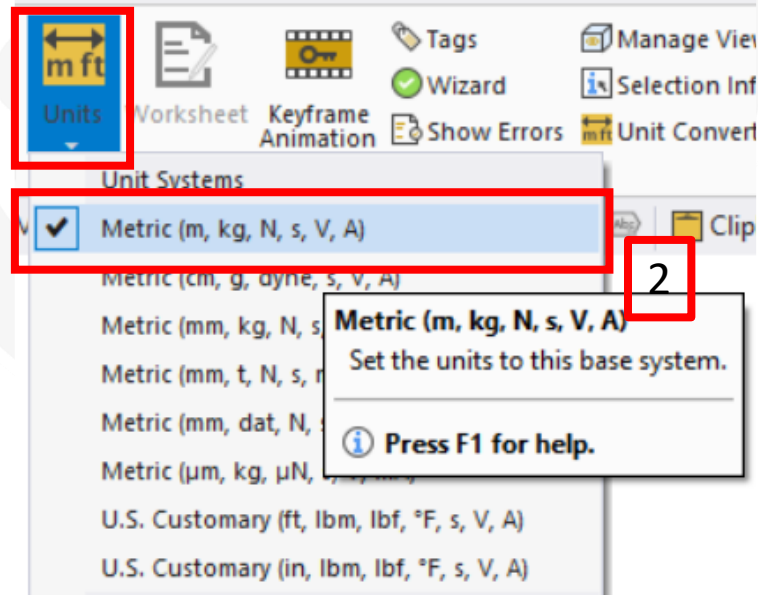
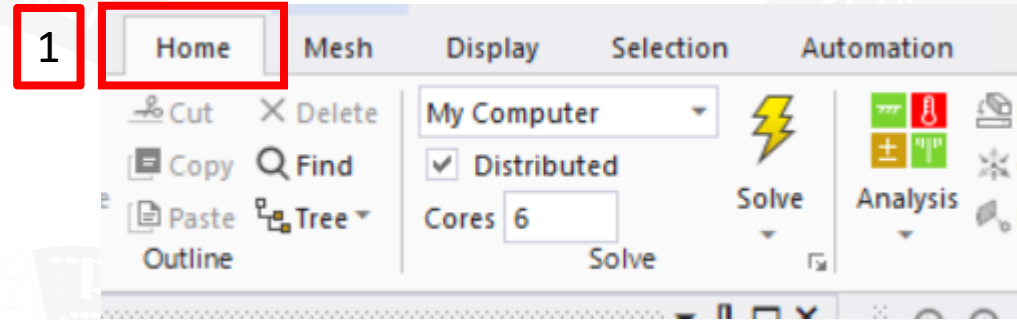
1. Wróć do panelu **Project** i kliknij **LPM** dwukrotnie na komórce **B4**.
2. Zaczekaj na uruchomienie programu **Mechanical**.





Wybierz układ jednostek

1. Wybierz pasek narzędzi **Home**.
2. Wybierz **Units** a następnie wskaż odpowiedni układ jednostek.



Przypisz materiał do modelowanej belki

1. W drzewie projektu wybierz obydwie obiekty belki **Geom\Beam (I)**.
2. W panelu **Details** of rozwiń listę materiałów **Assignment**.
3. Wybierz zdefiniowany materiał **S235J**.

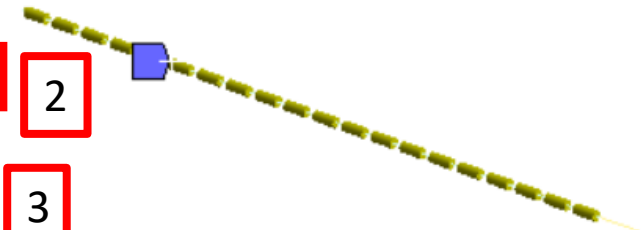
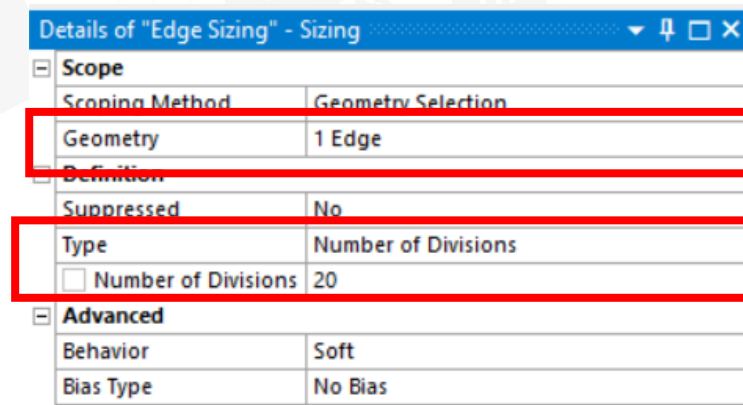
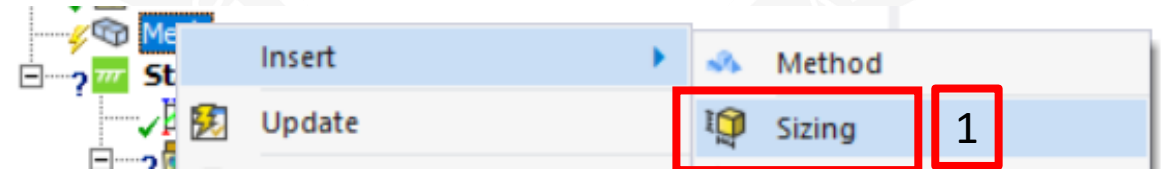
The screenshot displays the software interface for assigning a material to a beam model. It consists of three main panels:

- Project Tree (Top Left):** Shows a hierarchical view of the model. Two instances of **Geom\Beam (I)** are highlighted with a red box and labeled with a red '1'.
- Details of "Multiple Selection" (Bottom Left):** A table showing properties for the selected beam objects. The **Assignment** property is expanded, showing a dropdown menu with **Structural Steel** selected. This area is highlighted with a red box and labeled with a red '2'.
- Engineering Data Materials (Right):** A search window for materials. The list includes **Water Liquid**, **Structural Steel**, and **Air**. The **S235J** material is highlighted with a red box and labeled with a red '3'.

Details of "Multiple Selection"	
Graphics Properties	
Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Model Type	Beam
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Cross Section	I
Offset Mode	Refresh on Update
Offset Type	Centroid
Treatment	None
Material	
<input checked="" type="checkbox"/> Assignment	Structural Steel

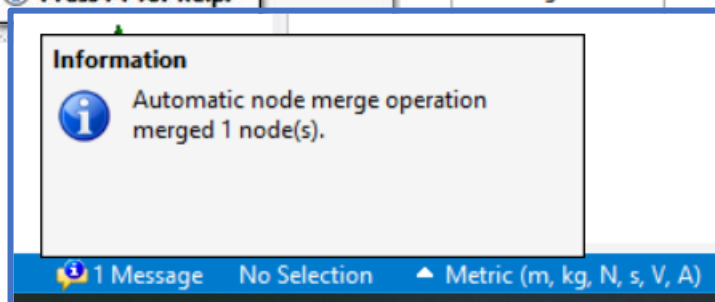
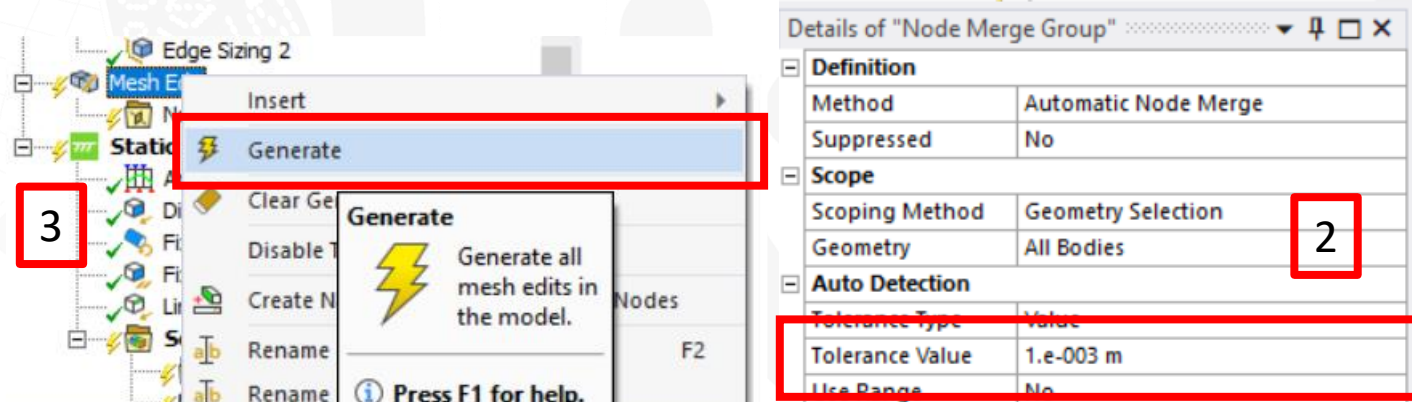
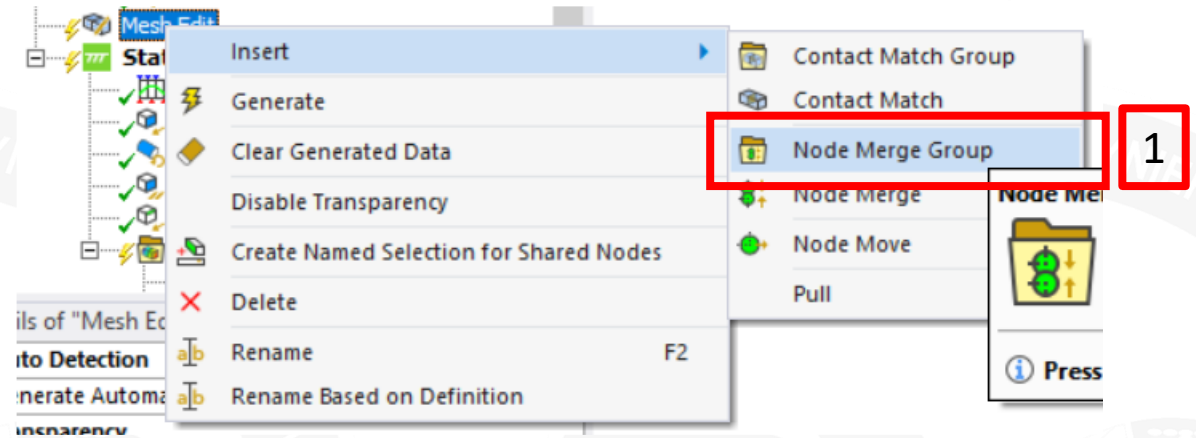
Wprowadź rozmiar siatki i wygeneruj ją

1. W drzewie projektu wybierz **PPM: Mesh, Insert, Sizing**.
2. W pole **Geometry** wybierz odcinek, na którym będzie zadane obciążenie ciągłe. Potwierdź **Apply**.
3. Wybierz **Number of Divisions** oraz wpisz **20**.
4. Stosując tę metodę zdefiniuj drugi obiekt **Sizing** i podziel drugi odcinków belki na **10** elementów.
5. Wygeneruj siatkę elementów skończonych: **PPM, Mesh, Generate Mesh**



Połącz odcinki belki

1. W drzewie projektu wybierz **PPM: Mesh, Insert, Node Merge Group**.
2. W właściwościach obiektu **Node Merge Group** wpisz tolerancję połączenia węzłów.
3. Wybierz **PPM: Mesh Edit, Generate**.



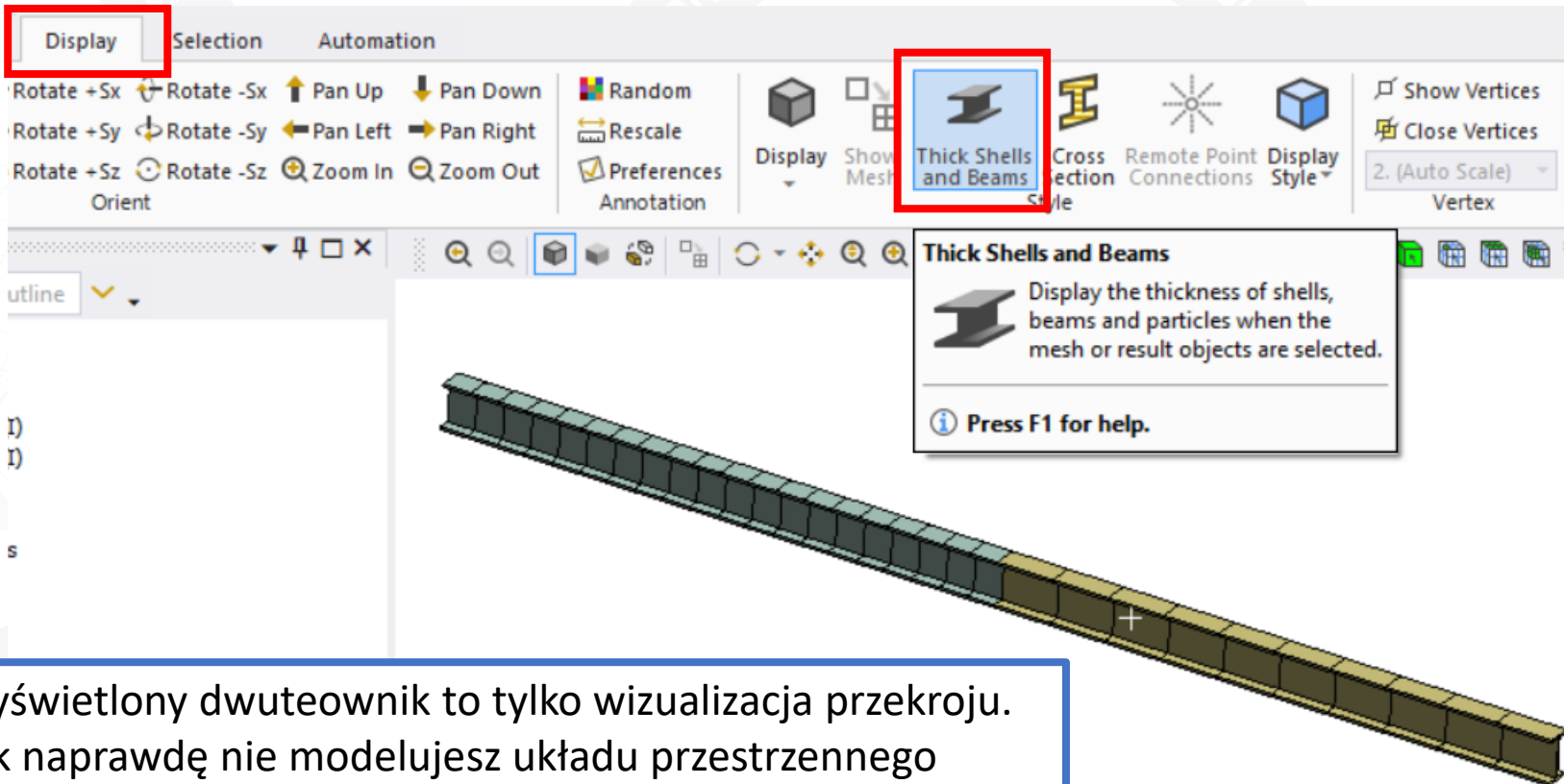
Innym sposobem na połączenie obiektów może być opcja **Share Topology -> Share** ustawiana w opcjach geometrii programie **SpaceClaim**. Powoduje ona utworzenie spójnej siatki elementów skończonych na stykających się elementach. W tym konkretnym przypadku powoduje ona jednak zastąpienie dwóch odcinków jednym, co uniemożliwia np. przypisanie im różnych materiałów, co czasem może być wymagane.





Wyświetl siatkę elementów wraz z przekrojem

Wybierz zakładkę **Display** oraz **Cross Section**.



Pokazany sposób ustalania rozmiaru siatki pozwala na jej zagęszczenie w miejscach gdzie jest to potrzebne. W tym przypadku siatka została zagęszczona w miejscu, gdzie zadane jest obciążenie ciągłe, w celu jego lepszego odwzorowania. W ogólnym przypadku obciążenie nie musi być stałe. Może być opisane bardziej skomplikowaną funkcją.

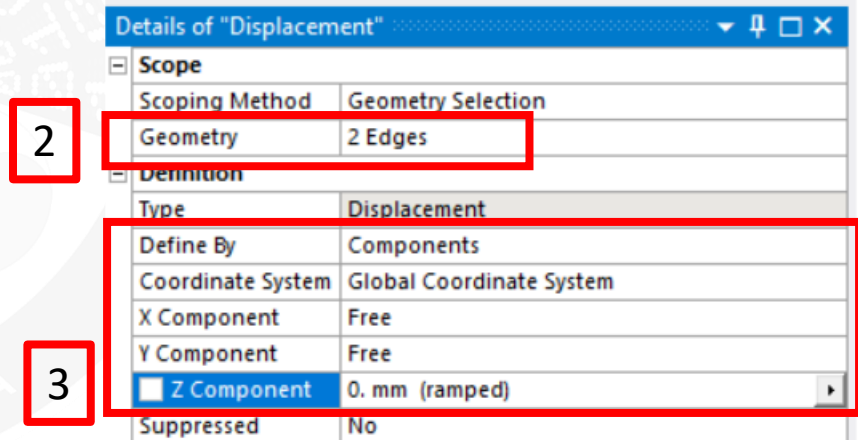
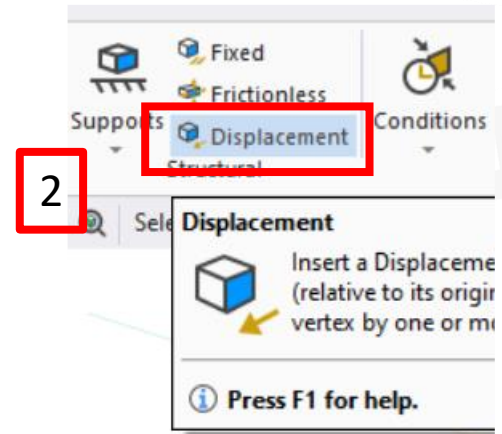
Wyświetlony dwuteownik to tylko wizualizacja przekroju. Tak naprawdę nie modelujesz układu przestrzennego (bryły), lecz wykorzystujesz elementy jednowymiarowe z nadanym przekrojem jako parametr.



Zdefiniuj podparcie belki (1)

1. Wskaż w drzewie obiekt **Static Structural**.
2. Wybierz **Environment, Displacement**.
3. W polu **Geometry** wybierz wszystkie odcinki belki.
4. Wybierz **Define By Components** oraz wpisz **Z Component: 0mm**.

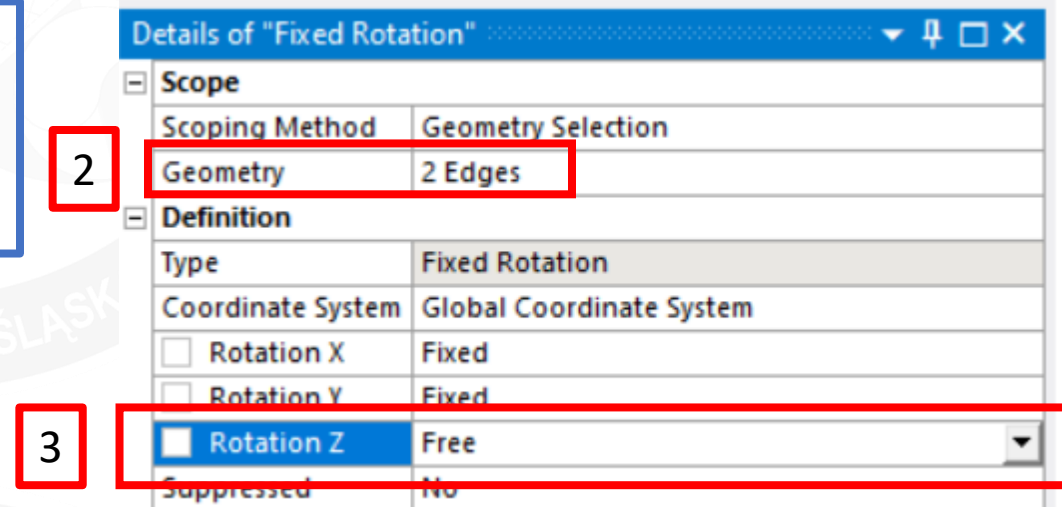
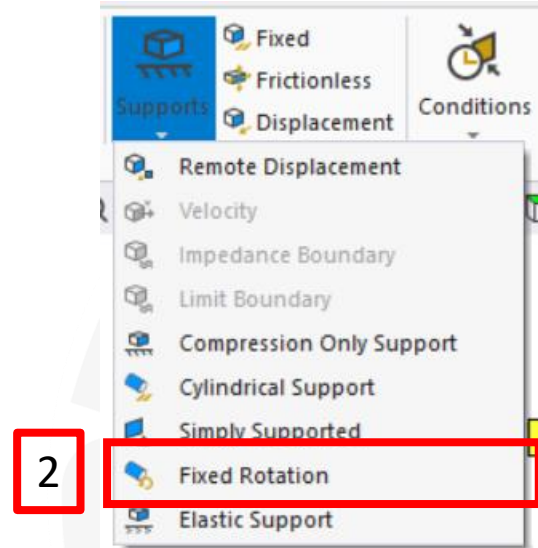
Taki krok wykonasz w przypadku każdej analizy belki obciążonej na płaszczyźnie. W programach MES modeluje się układy przestrzenne, a więc w tym przypadku należy odebrać punktom belki możliwość przemieszczania się w kierunku prostopadłym do rysunku. Tutaj takim kierunkiem jest oś **Z**.



Zdefiniuj podparcie belki (2)

1. Wskaż w drzewie obiekt **Static Structural**.
2. Wybierz **Environment, Supports, Fixed Rotation**.
3. W polu **Geometry** wybierz wszystkie odcinki belki.
4. Wybierz **Rotation Z, Free**.

Ten krok z kolei uniemożliwi obrót belki wokół osi **X** oraz **Y**, natomiast umożliwi obrót przekroju belki wokół osi **Z**. Właśnie w taki sposób zachowa się belka równoległa do osi **X**, obciążona w płaszczyźnie **XY**.

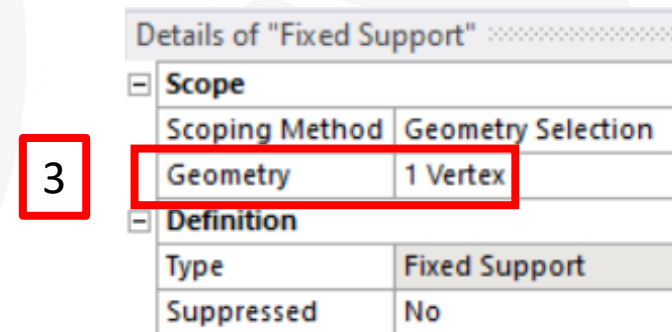
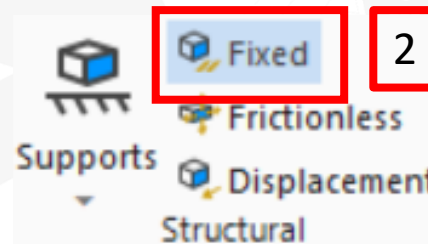
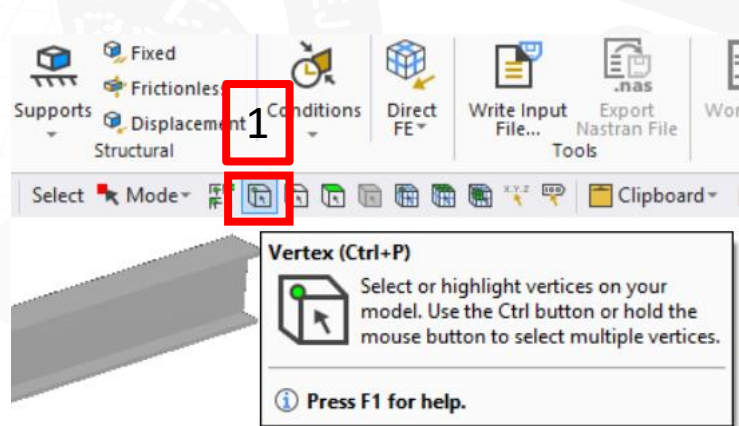


Zdefiniuj podparcie belki (3)

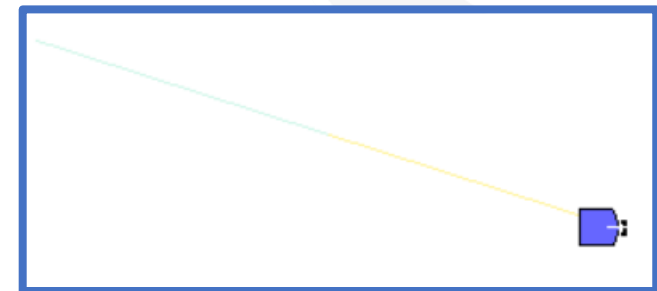
1. Wybierz filtr wyboru geometrii **Vertex**.
2. Wybierz **Fixed** (sztywne utwierdzenie).
3. W polu **Geometria** wybierz prawy kraniec belki.

Nawigacja – przydatne przy wyborze geometrii:

- **Środkowy przycisk myszy (ŚPM)** – obrót modelu
- **Rolka, Shift+ŚPM** – powiększenie
- **Ctrl+ŚP** – przesuwanie
- **Z** - wyśrodkowanie



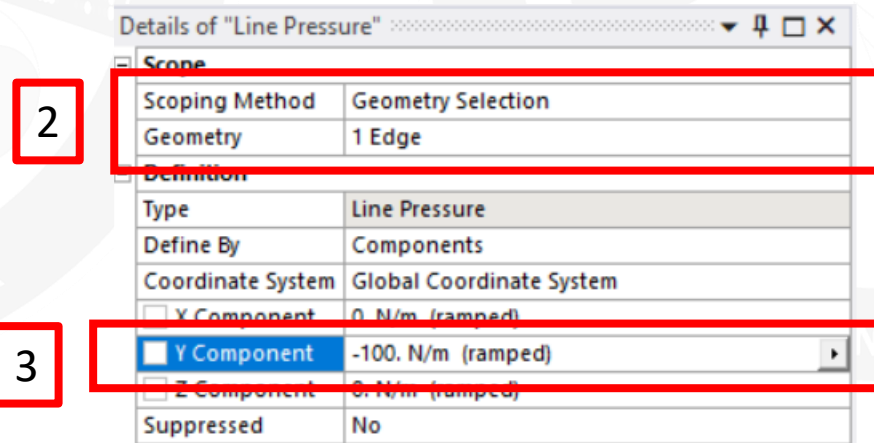
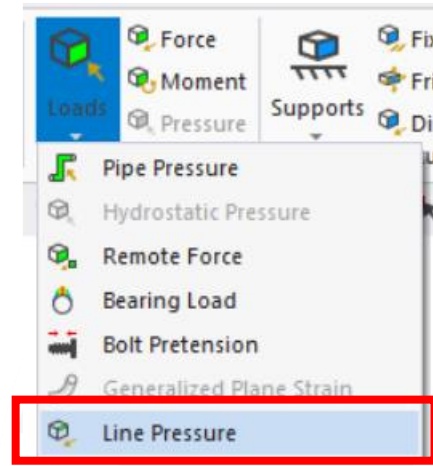
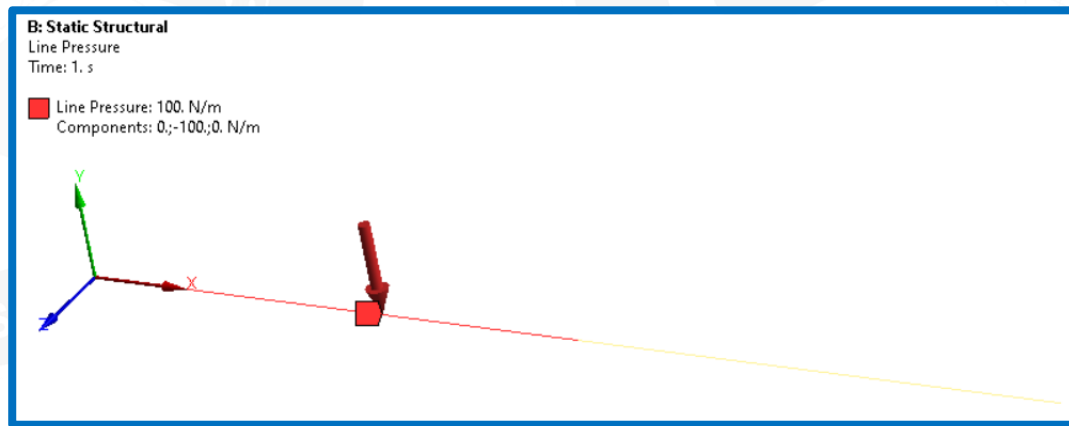
- Czy jest inny sposób na zadanie sztywnego utwierdzenia? Zastanów się! Podpowiedź znajdziesz na dwóch poprzednich slajdach.
- Zastanów się również jak można zdefiniować podporę przegubową stałą i przesuwną. Przyda Ci się to podczas rozwiązywania innych zadań.





Zdefiniuj obciążenie belki

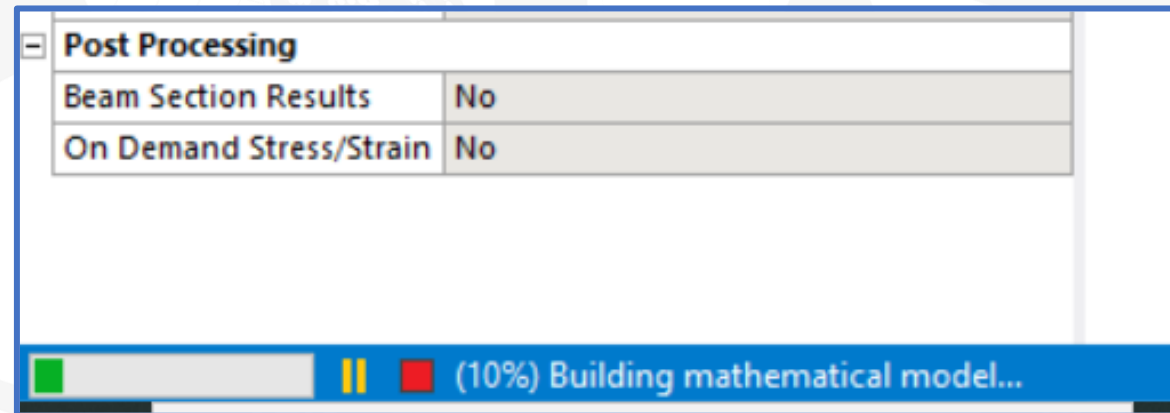
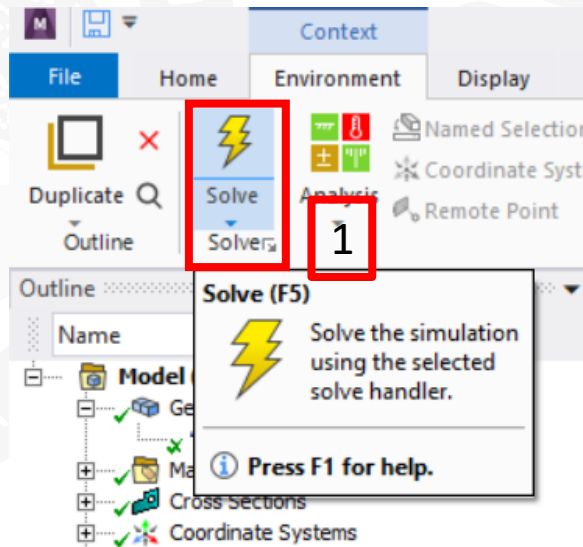
1. Wybierz **Force, Line Pressure**.
2. W polu **Geometry** wskaż odcinek, na którym jest zadane obciążenie
3. Wybierz **Define By Components** oraz wpisz wartość składowej **Y** obciążenia.





Uruchom analizę

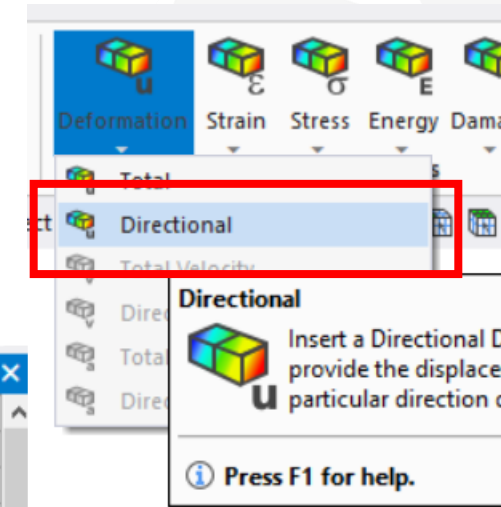
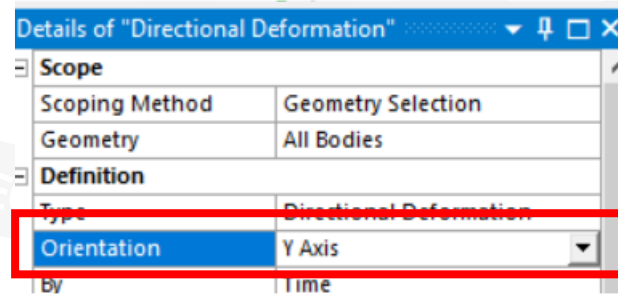
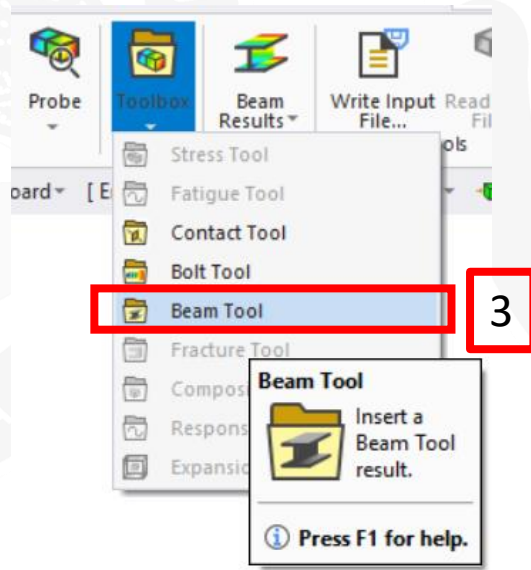
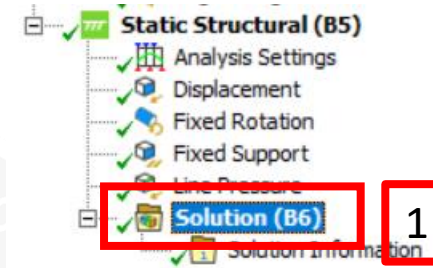
1. Wybierz **Solve**. Poczekaj...





Dodaj wyniki analizy

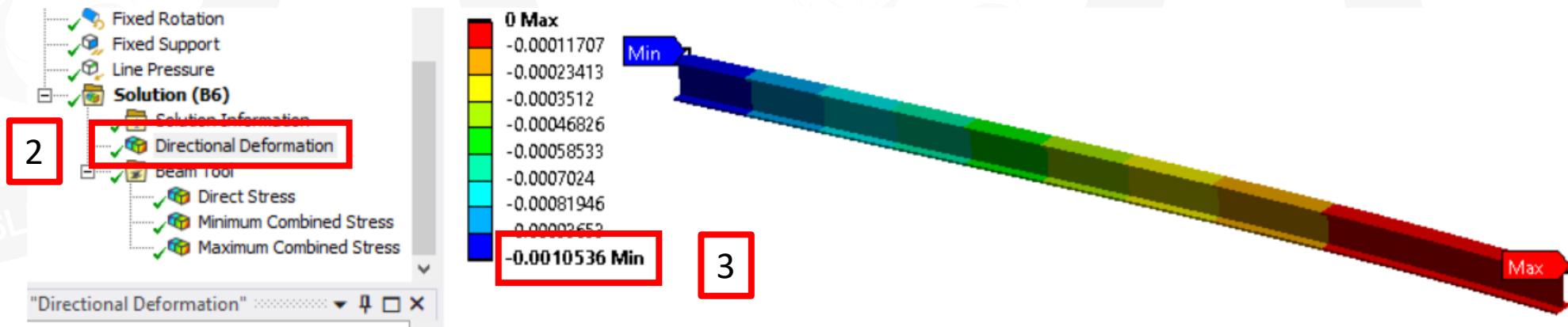
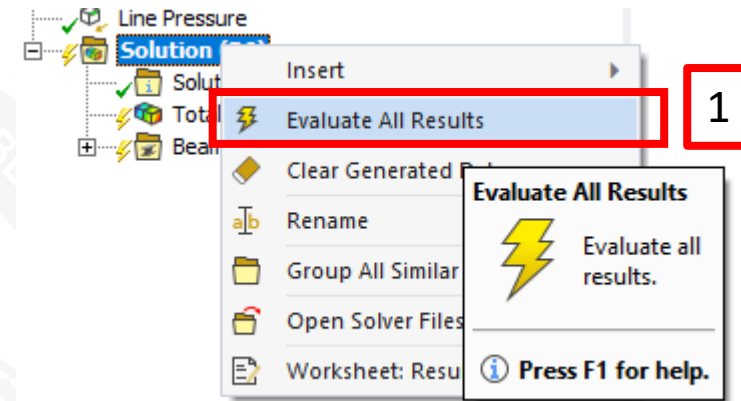
1. Wybierz obiekt **Solution** w drzewie.
2. Wybierz **Deformation, Directional**. Wybierz składową przemieszczeń **Y**.
3. Wybierz **Toolbox, Beam Tool**





Oblicz i wyświetl wyniki

1. Wybierz PPM obiekt **Solution** w drzewie. Wybierz **Evaluate All Results**
2. Wyświetl ugiętą belkę – **Directional Deformation**.
3. Zwróć uwagę na maksymalną (co do modułu) wartość przemieszczenia: **0.0010536 m = 1.0536 mm**. Znak minus oznacza, że przemieszczenie belki ma zwrot przeciwny do osi **Y** (w dół).

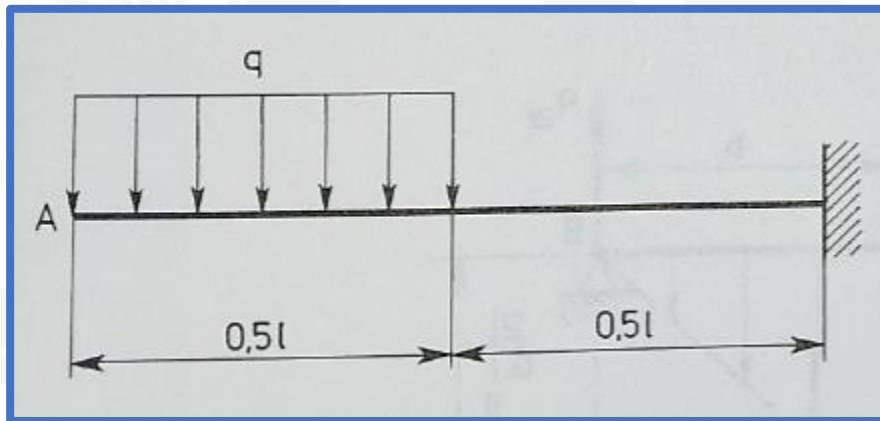




Sprawdź wynik przemieszczeń maksymalnych (1)

Rozwiązanie analityczne przemieszczeń liniowych i kątowych swobodnego końca belki podano w zbiorze zadań

M. Banasiak, K. Grossman, M. Trombski: Zbiór zadań z wytrzymałości materiałów, PWN, Warszawa 1998.



$$f_A = + \frac{41}{384} \cdot \frac{ql^4}{EJ_y}, \quad \theta_A = - \frac{7}{48} \cdot \frac{ql^3}{EJ_y},$$





Sprawdź wynik przemieszczeń maksymalnych (2)

- Wybierz obiekt **Automation, Scripting** (1)
- Wpisz krótki skrypt **Pythona** (2) i uruchom go (3). Sprawdź wartość przemieszczenia. Wynik przemieszczeń MES wyniósł **1.0536 mm**.

The screenshot shows the Mechanical Scripting environment. The 'Automation' tab is selected in the ribbon, and the 'Scripting' button is highlighted with a red box labeled '1'. A new script editor window is open, containing a Python script with the following code:

```
1 E=2.1e5·#·MPa
2 L=2000·#·mm
3 q=0.1·#·N/mm
4 I=777010.07·#·mm^4
5 fA=41.0/384.0·*·(q*L**4)/(E*I)·#·mm
6 print 'fA=', fA, '[mm]'
```

The script is highlighted with a red box labeled '2'. The 'Run' button (a green play icon) in the toolbar is highlighted with a red box labeled '3'. Below the script editor, the 'Shell' window shows the output of the script execution:

```
fA= 1.04695176408 [mm]
>>> |
```

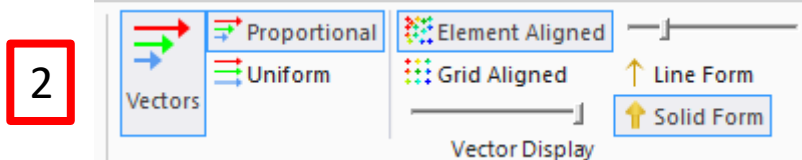
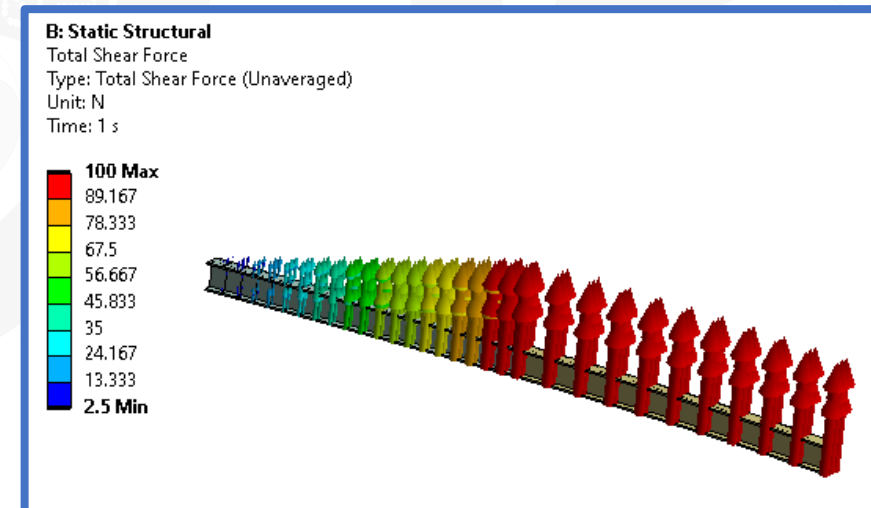
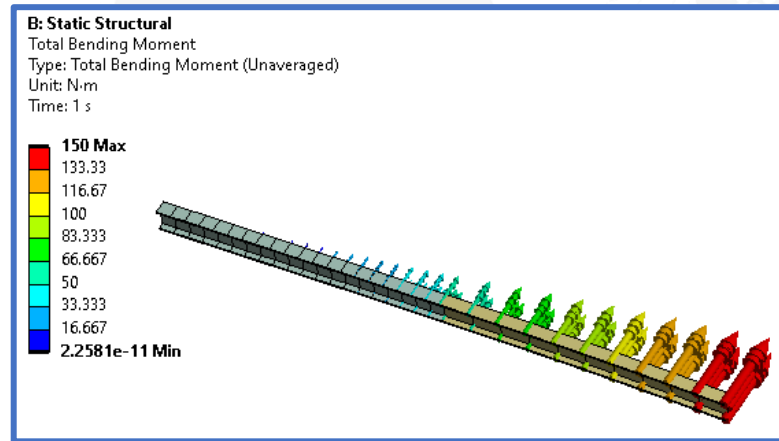
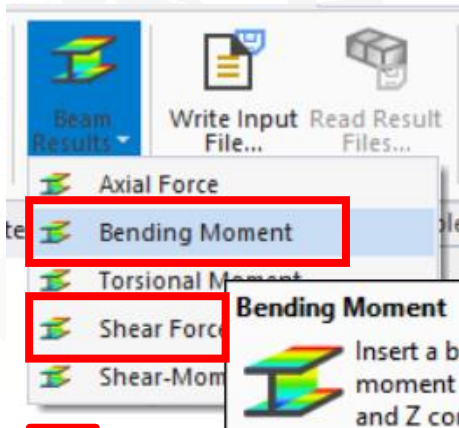
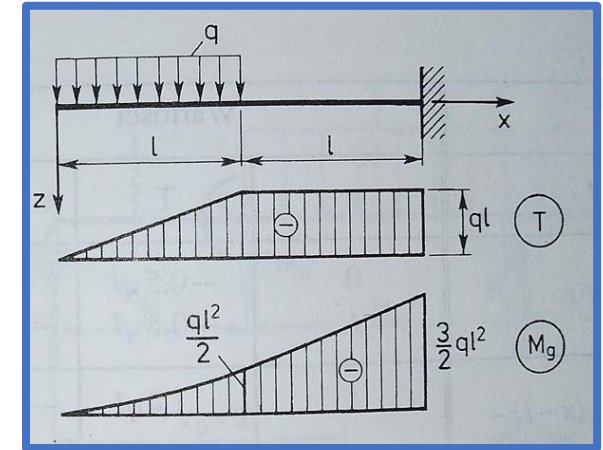
The output is highlighted with a red box labeled '4'.

- Wartość momentu bezwładności przekroju **I** podana jest na slajdzie 12.
- Jaką różnicę względną przemieszczenia uzyskano? Możesz ją obliczyć w powłoce Pythona.
- Czy różnica jest akceptowalna? Z czego może ona wynikać? Jak można uzyskać dokładniejszy wynik?



Wyświetl wykresy sił wewnętrznych

1. Wybierz obiekty **Results, Beam Results, Bending Moment** oraz **Shear Force**
2. Uaktualnij wyniki. Wyświetl wykresy sił wewnętrznych: **Total Bending Moment, Total Shear Force**. Wypróbuj działanie przycisków kontroli wizualizacji pola wektorowego.

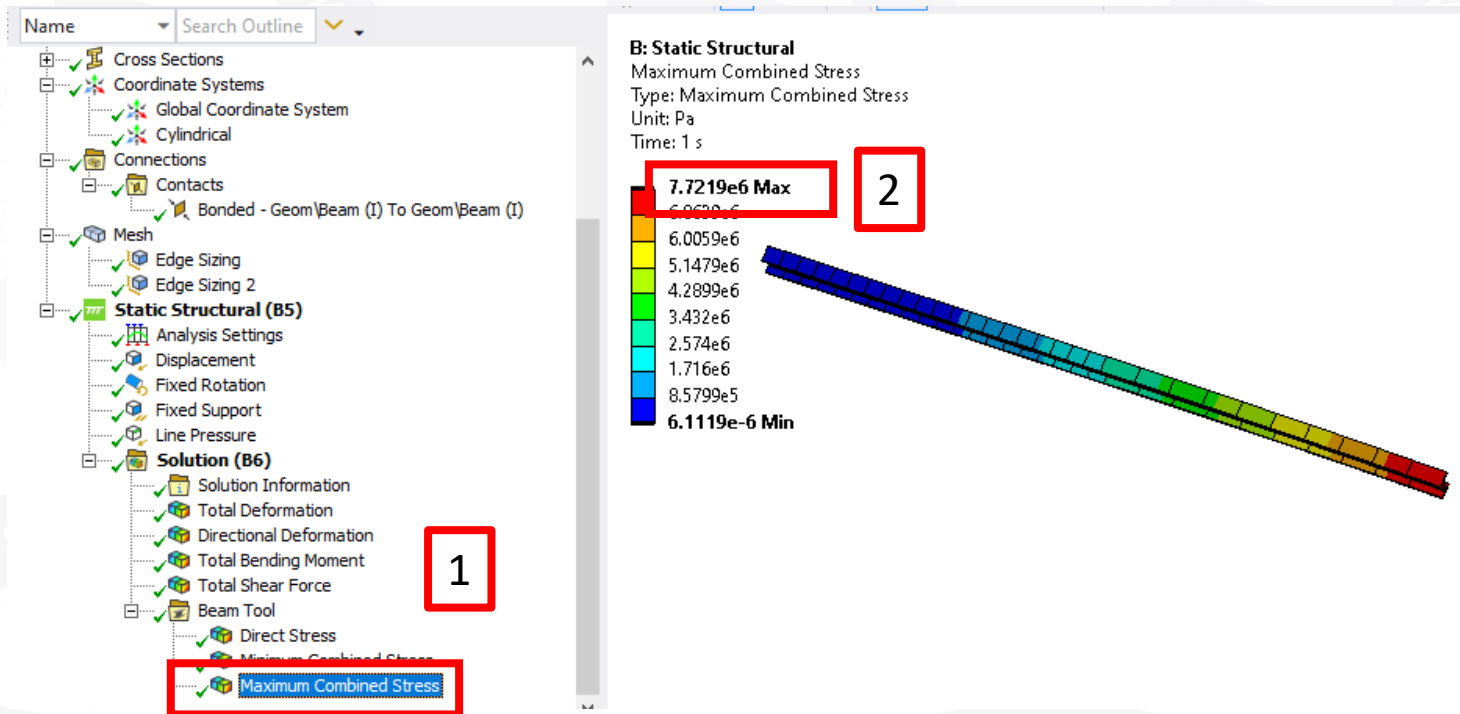




Wyświetl wyniki naprężeń

1. Wybierz obiekt **Maximum Combined Stress** w drzewie.
2. Zwróć uwagę na maksymalną wartość naprężeń: ok. **7.72 MPa**. Jest ona niższa od granicy plastyczności materiału **$R_e=235$ MPa**

- Sprawdź wartość naprężeń wykonując obliczenia analityczne.
- Co by było w przypadku gdyby wartość naprężeń przekroczyła R_e ?
- Czy można by było zastosować aktualny model materiału?



```

Mechanical Scripting
Editor
New Script 1 : Description
1 E=2.1e5 # MPa
2 L=2000.0 # mm
3 q=0.1 # N/mm
4 I=777010.07 # mm^4
5 fA=41.0/384.0 * (q*L**4)/(E*I) # mm
6 print 'fA=', fA, '[mm]'
7
8 Mgmax=150e3 # Nmm
9 h=80 # mm
10 W=I/(h/2.0)
11 Sigma=Mgmax/W
12 print 'Sigma_max=', Sigma, 'MPa'

New Script 1 +

Shell
Script Executed
fA= 1.04695176408 [mm]
Sigma_max= 7.72190764529 MPa
>>>

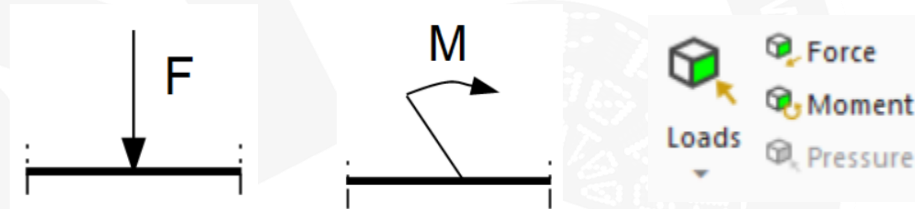
```



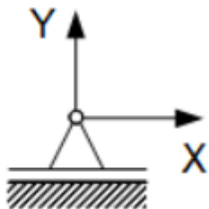


Może się przydać

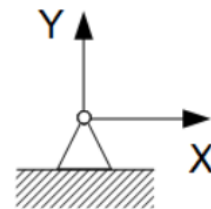
- Prowadzący zajęcia może zadać inne zadanie, które będzie zawierać inne dane, inne obciążenie, itd.
- W przypadku sił skupionych wykorzystasz obciążenie typu **Force**, a w przypadku momentu skupionego – **Moment**. Musisz zastanowić się nad wartościami i znakami składowych definiowanych wektorów.



- W przypadku podpór przegubowych stałych i przesuwnych pamiętaj o wprowadzeniu wartości **0** w miejscach odpowiadających odpowiednim składowym zadanych przemieszczeń **Displacement**:



Definition	
Type	Displacement
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	Free
<input checked="" type="checkbox"/> Y Component	0. m (ramped)
<input type="checkbox"/> Z Component	0. m (ramped)



Definition	
Type	Displacement
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input checked="" type="checkbox"/> X Component	0. m (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	0. m (ramped)
<input type="checkbox"/> Z Component	0. m (ramped)





Podsumowanie

Wykonując ćwiczenie nauczyłeś/aś się jak:

- Wykonać analizę układu belkowego z wykorzystaniem elementów 1D.
- Definiować zbiory wyników.
- Sprawdzić poprawność wyników analizy.





KONIEC

