

## 1. Opis programu

LTBeam jest oprogramowaniem służącym do wyznaczania momentu krytycznego zwichrzenia zginanych elementów konstrukcyjnych. Jest również bardzo przydatnym narzędziem przy wyznaczaniu nośności elementów zginanych. Program został opracowany przez CTICM (Centre Technique Industriel de la Construction Métallique - France) w ramach europejskiego projektu badawczego częściowo finansowanego przez Europejską Wspólnotę Węgla i Stali (ECSC Project N° 7210-PR183 : "Lateral torsional buckling of steel and composite beams" - 1999-2002)

LTBeam oblicza sprężysty moment krytyczny zwichrzenia  $M_{cr}$  i dostarcza wiele użytecznych informacji na temat postaci zwichrzonego elementu w przypadku zróżnicowanych obciążeń i warunków podparcia.

Program można zastosować w przypadku jedno i wieloprzęsłowych belek zginanych względem silniejszej osi bezwładności dla bi i monosymetrycznych przekrojów poprzecznych. Uwzględnia również wpływ zarówno punktowych jak i ciągłych poprzecznych stężeń punktowych (sztywnych i podatnych). Tak jak obciążenia, stężenia poprzeczne mogą być przyłożone w dowolnej odległości powyżej jak i poniżej środka ścinania przekroju poprzecznego.

LTBeam został zaprojektowany do radzenia sobie z belkami stalowymi. Może być również stosowany w przypadku innych materiałów pod warunkiem wprowadzenia odpowiednich danych materiałowych.

### Minimalne wymagania sprzętowe

LTBeam został opracowany dla środowiska pracującego w systemie Windows i został przetestowany na platformach: Windows 9x, NT, 200 i XP.

W przypadku użytkowników systemów Windows Vista i 7, autorzy programu zalecają instalację programu poza katalogiem `ProgramFiles`.

- 14 MB wolnej przestrzeni dyskowej,
- 16 bitową paletę kolorów,
- częstotliwość taktowania procesora minimum 500 MHz.

### Instalacja

W celu zainstalowania oprogramowania należy rozpakować pobrane archiwum i uruchomić plik `setup.exe`, po uprzednim odinstalowaniu wcześniejszych wersji programu.

### Wersja językowa

Standardowym językiem oprogramowania jest angielski, ale można również zmienić ustawienia tak, by komunikował się z użytkownikiem w języku francuskim.

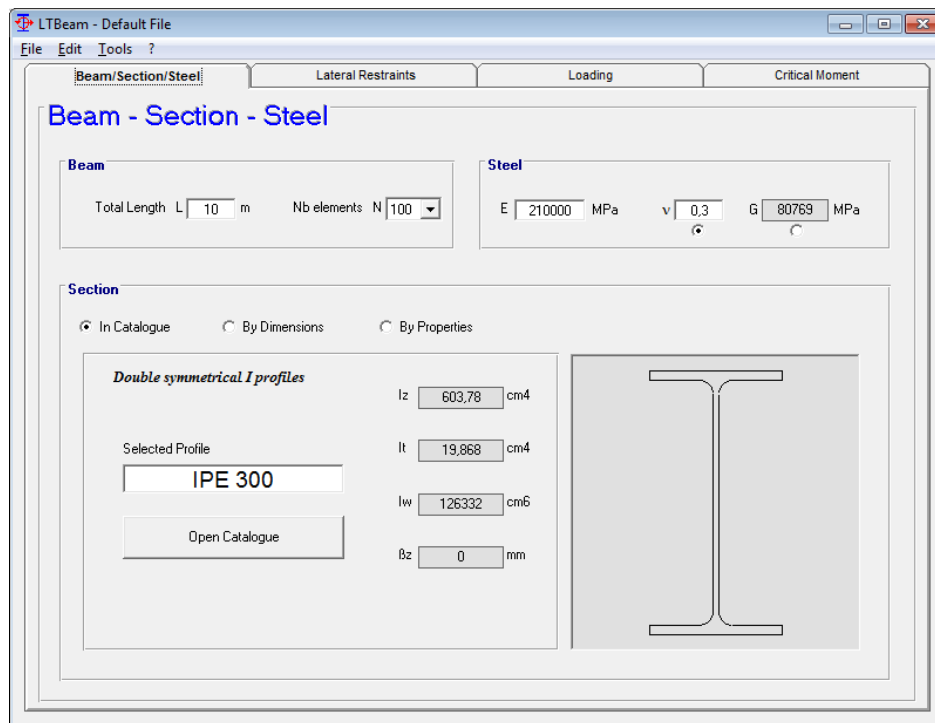
## 2. Obsługa programu

LTBeam ma bardzo intuicyjną budowę, a poszczególne etapy definiowania elementu autorzy programu podzielili na 4 zakładki:

1. Beam/Section/Steel — definiowanie podstawowych informacji na temat elementu,
2. Lateral Restraints — definiowanie brzegowych i pośrednich warunków podparcia,

3. Loading — definiowanie obciążeń,
4. Critical Moment — wyznaczenie momentu krytycznego.

## 2.1. Definiowanie długości, przekroju i materiału elementu



W tej zakładce wprowadza się informacje związane z belką.

**Beam** — należy wprowadzić rozpiętość belki wraz z podziałem na ilość elementów skończonych. Dla prostych przypadków ilość elementów skończonych nie wpływa znacząco na otrzymane rozwiązanie, jednak dla przykładów bardziej złożonych zaleca się zagęścić ten podział.

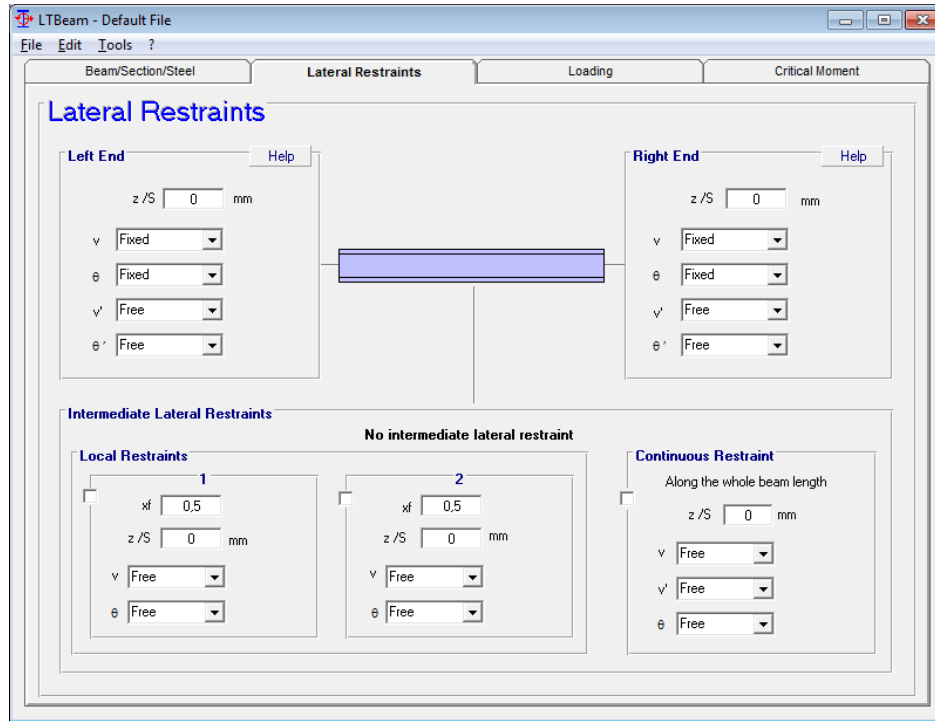
**Steel** — okno służy do wprowadzenia wartości modułu sprężystości podłużnej  $E$  i współczynnika Poissona  $\nu$  lub modułu sprężystości poprzecznej  $G$ .

**Section** — okno definiowania charakterystyk przekrojowych. Można to zrobić na 3 sposoby:

- wybierając przekrój z katalogu,
- wpisując wymiary dla przekrojów bi- lub monosymetrycznych,
- „ręcznie” wpisując charakterystyki przekroju.

UWAGA! Decydując się na pierwsze dwie metody należy sprawdzić wartości charakterystyk wyznaczonych przez program LTBeam z wartościami podawanymi w katalogach producentów lub z tymi podanymi w tablicach do projektowania konstrukcji metalowych. Różnice mogą się pojawić w znacznym przypadku momentu bezwładności czystego skręcania  $I_t$  oraz wycinkowego momentu bezwładności  $I_w$ .

## 2.2. Stężenia poprzeczne



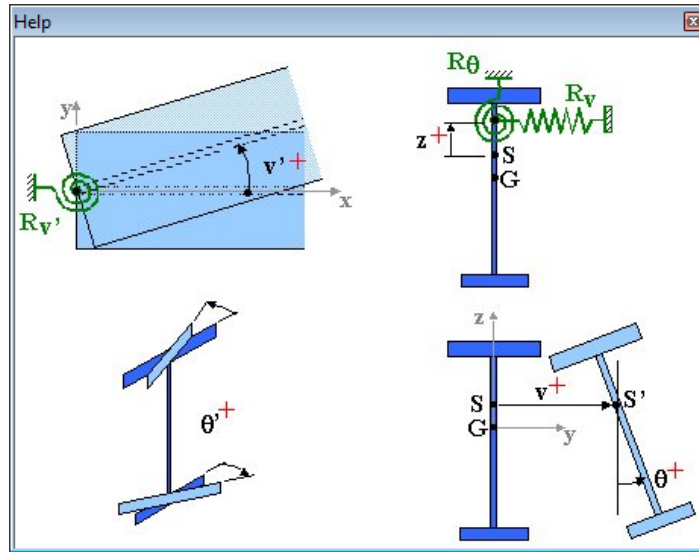
Okno podzielono na 3 charakterystyczne części, które odpowiadają warunkom podparcia belki z lewej i prawej strony oraz warunkom pośrednim.

**Left (Right) End** — pole służące do definiowania następujących warunków podparcia:

- $z/S$  — współrzędnej  $z$  miejsca zamocowania porzeczej więzi translacyjnej  $R_v$  i przeciwskrętnej więzi rotacyjnej  $R_\theta$  względem osi środków ścinania przekroju.
- $v$  — oznacza zablokowanie (Fixed), zwolnienie (Free) lub sprężyste zamocowanie (Spring) przemieszczeń w kierunku  $z$  płaszczyzny zginania.
- $\theta$  — oznacza zablokowanie (Fixed), zwolnienie (Free) lub sprężyste zamocowanie (Spring) skręcenia belki względem osi środków ścinania.
- $v'$  — pochodna po przemieszczeniach  $z$  płaszczyzny oznacza zablokowanie (Fixed), zwolnienie (Free) lub sprężyste zamocowanie (Spring) obrotu belki w płaszczyźnie mniejszej sztywności.
- $\theta'$  — pochodna po kącie skręcenia, czyli ograniczenie deplanacji przekroju poprzez jej zablokowanie (Fixed), zwolnienie (Free) lub sprężyste zamocowanie (Spring).

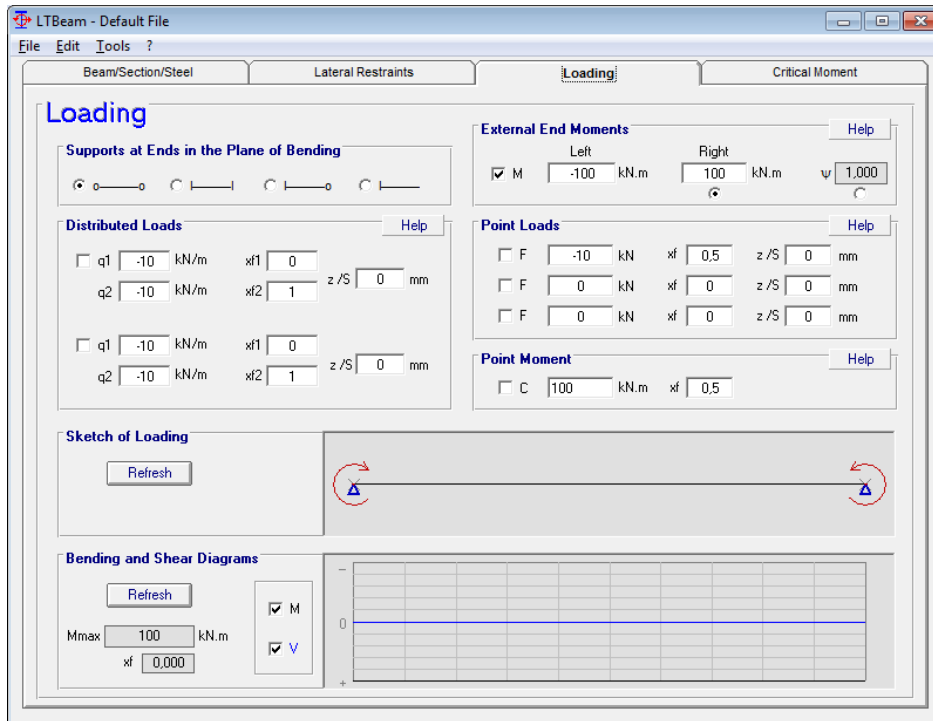
**Intermediate Lateral Restraints** — definiowanie stężeń pośrednich na długości belki. Okno programu umożliwia wprowadzenie dwóch punktowych i/lub ciągłego stężenia wzdłuż całego elementu.

- oznaczenia jak w przypadku warunków na końcach.
- $x_f$  — oznacza względną współrzędną przyłożenia punktowego stężenia na długości belki ( $x_f \cdot \ell$ ).



W przypadku niejasności zawsze można kliknąć w przycisk Help. Otworzy się dodatkowe okno, w którym wszystkie oznaczenia zostały wyjaśnione w formie graficznej.

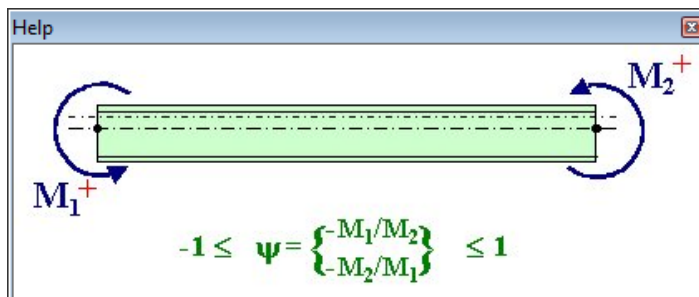
### 2.3. Obciążenia



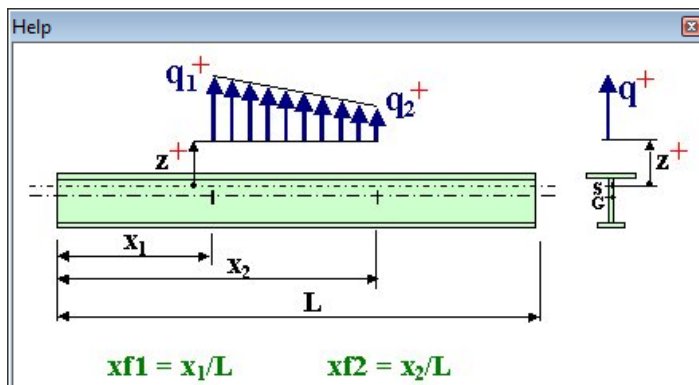
Okno definiowania obciążeń zostało podzielone na obszary:

**Supports at Ends in the Plane of Bending** — definicja warunków podparcia w płaszczyźnie zginania. Warunki te mają wpływ na rozkład sił wewnętrznych i podobny efekt można uzyskać odpowiednio dobierając obciążenie zewnętrzne. Dostępne są 4 rodzaje podparcia: przegubowo-przegubowe, sztywno-sztywne, sztywno-przegubowe i wspornik.

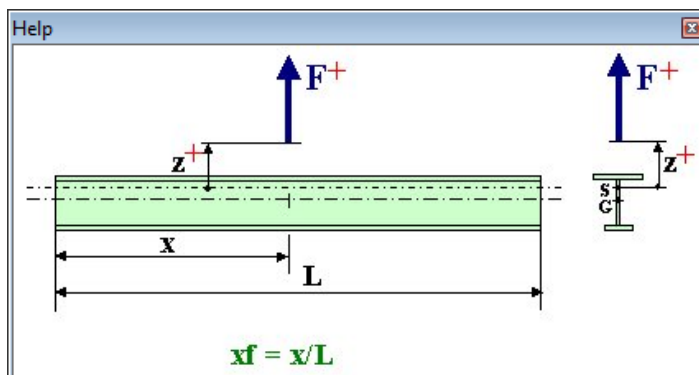
**External End Moments** — definiowanie obciążeń zewnętrznych w postaci skupionych momentów. Otrzymuje się w ten sposób liniowy wykres momentów zginających. Możliwy poprzez definicję konkretnych wartości na końcach lub wyrażając stosunek obu wartości poprzez współczynnik  $\psi$ .



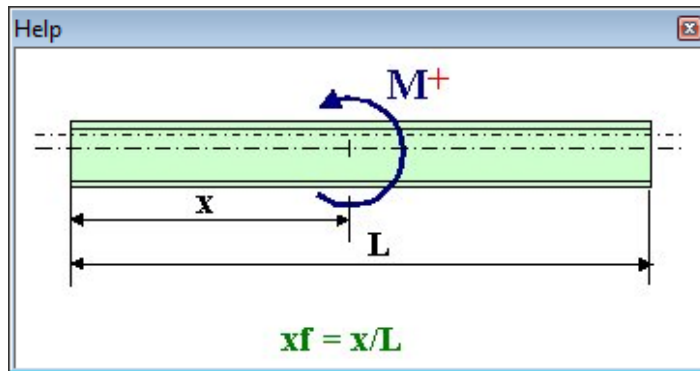
**Distributed Loads** — definicja oddziaływań w postaci rozłożonego obciążenia ciągłego. Symbole  $q_1$ ,  $q_2$  oznaczają wartość początkową i końcową obciążenia, które może mieć postać trapezu. Oznaczenia  $x_{f1}$ ,  $x_{f2}$  stanowią odpowiednio współrzędną początku i końca przyłożonego obciążenia w stosunku do rozpiętości belki. Natomiast  $z/S$  to rzędna obciążenia, przyjmując za początek układu współrzędną środka ścinania. Poniższy rysunek wyjaśnia omówione oznaczenia oraz informuje o konwencji przyjętego oznakowania.



**Point Loads** — umożliwia wprowadzenie obciążenia w postaci do trzech sił skupionych. Oznaczenia i konwencja znaków jak w poprzednim punkcie.



**Point Moment** — definiowanie obciążenia w postaci skupionego momentu. Oznaczenia i konwencja znakowania została wyjaśniona poniżej.

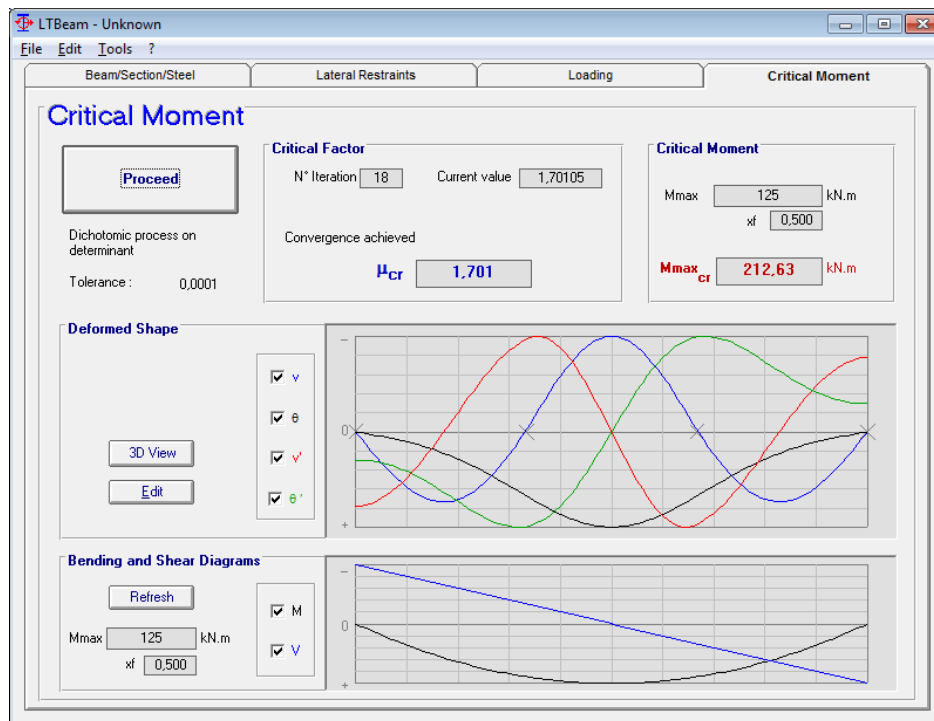


**Sketch of Loading** — okno służące do wyświetlania schematów zdefiniowanej belki. Jest graficzną reprezentacją wprowadzonych danych.

**Bending and Shear Diagrams** — okno, które wyświetla wykresy sił przekrojowych: momentów zginających i sił tnących.

## 2.4. Moment krytyczny

Zakładka służąca jedynie do wyznaczania wartości momentu krytycznego dla uprzednio zdefiniowanych warunków brzegowych i obciążenia.

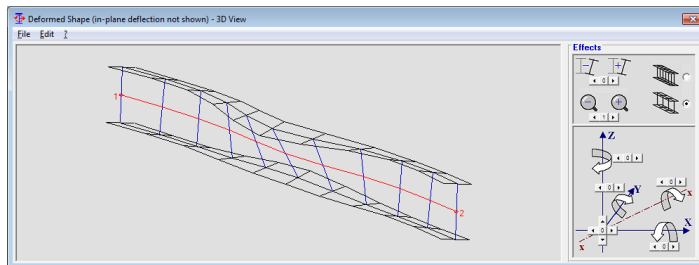


Po kliknięciu w **Proceed** w pozostałych oknach pojawiają się interesujące dla nas informacje.

**Critical Factor** — podaje wartość współczynnika krytycznego  $\mu_{cr}$  przy którym dochodzi do zbieżności. Podany jest również numer iteracji, który był niezbędny do uzyskania zbieżności.

**Critical Moment** — podaje wartość momentu krytycznego przy zwichrzeniu sprężystym  $M_{max,cr}$  dla zadanych wcześniej warunków podparcia, obciążenia, rozkładu momentów i stężeń bocznych.

**Deformed Shape** — kreśli wykresy przemieszczeń względem osi środków ścinania belki z płaszczyzny zginania  $v$ , kąta skręcenia przekroju względem osi środków ścinania  $\theta$ , kąta obrotu belki  $v'$  z płaszczyzny zginania oraz deplanacji przekroju  $\theta'$ . Ponadto klikając na **3D View** otrzymujemy schemat graficznej interpretacji postaci zwłóknienia analizowanego elementu.

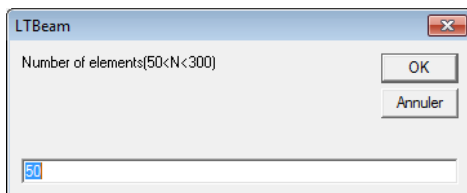


**Bending and Shear Diagrams** — wykresy momentów zginających i sił tnących w analizowanej belce.

### 3. Zaawansowane funkcje programu

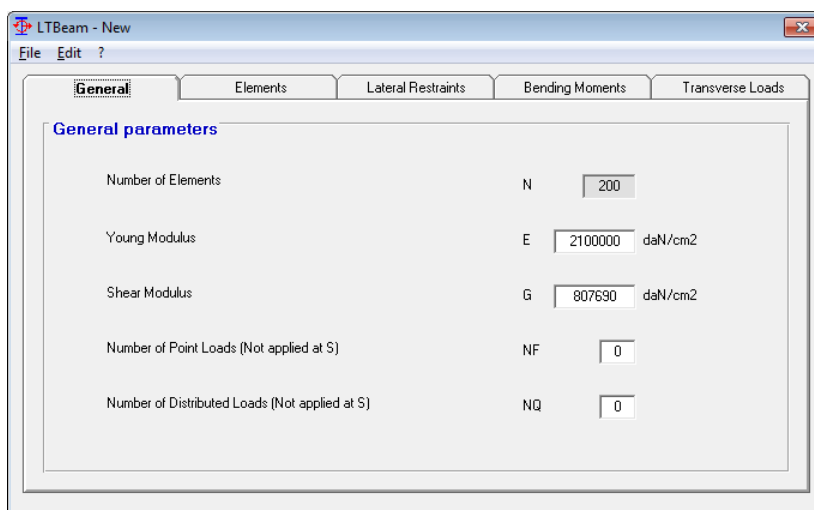
#### 3.1. File Input Mode

Klikając kolejno w *Tools* → *File Input Mode* przechodzimy do okna programu, które pozwala analizować tekstowy plik wejściowy programu. W celu utworzenia należy kliknąć na *File* → *New*. Otworzy się okno, w którym trzeba będzie zdefiniować ilość elementów skończonych.



Następnie, jak poprzednio, pojawia się okno, gdzie przechodząc przez kolejne zakładki zdefiniować można poszczególne wartości związane z belką.

**General** — informacje ogólne związane z belką taki jak moduł Younga, moduł Kirchhoffa, liczba sił skupionych i rozłożonego obciążenia ciągłego przyłożonych poza środkiem ścinania.



**Elements** — definiowanie wymiarów poszczególnych elementów skończonych (ES) i ich charakterystyk przekrojowych  $I_z$ ,  $I_T$ ,  $I_\omega$  oraz sztywności ciągłych stężeń (poprzecznych i ze względu na obrót) każdego ES.

N#	L (cm)	Iz (cm4)	It (cm4)	Iw (cm6)	Bz (cm)	K $\theta$ (daN.cm/rad)	Kv (daN.cm)	Kgy (daN.cm3/rad)
1	10	603.78	19.87	126332	0	-1	-1	-1
2	10	603.78	19.87	126332	0	-1	-1	-1
3	10	603.78	19.87	126332	0	-1	-1	-1
4	10	603.78	19.87	126332	0	-1	-1	-1
5	10	603.78	19.87	126332	0	-1	-1	-1
6	10	603.78	19.87	126332	0	-1	-1	-1
7	10	603.78	19.87	126332	0	-1	-1	-1
8	10	603.78	19.87	126332	0	-1	-1	-1
9	10	603.78	19.87	126332	0	-1	-1	-1
10	10	603.78	19.87	126332	0	-1	-1	-1
11	10	603.78	19.87	126332	0	-1	-1	-1
12	10	603.78	19.87	126332	0	-1	-1	-1
13	10	603.78	19.87	126332	0	-1	-1	-1
14	10	603.78	19.87	126332	0	-1	-1	-1

**Lateral Restraints** — definicja punktowych stężeń. Dane przemieszczenie można zablokować wpisując odpowiednio dużą sztywność lub podając konkretną wartość wprowadzić więź podatną.

N#	Rv (daN/cm)	Rt (daN.cm/rad)	Rv' (daN.cm)	Rt' (daN.cm/rad/cm)	z (cm)
1	1E+30	1E+30	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0

**Bending Moments** — definiowanie wartości momentów zginających dla każdego ES w belce. W celu wprowadzenia bardziej złożonego rozkładu momentów, należy wprowadzić odpowiednie wartości dla każdego ES.



N <sup>o</sup>	M1 (daN.cm)	M2 (daN.cm)
1	5	49495,1
2	49504,9	97995,2
3	98004,8	145495,3
4	145504,7	191995,4
5	192004,6	237495,5
6	237504,5	281995,6
7	282004,4	325495,7
8	325504,3	367995,8
9	368004,2	409495,9
10	409504,1	449996
11	450004	489496,1
12	489503,9	527996,2
13	528003,8	565496,3
14	565503,7	601996,4

**Transverse Loads** — definiowanie informacji związanych z obciążeniem poprzecznym przyłożonym do belki.

- Point Loads... — w postaci tabelarycznej należy podać wartość obciążenia siłą skupioną, miejsce przyłożenia siły na długości belki i współrzędną przyłożenia obciążenia na wysokości belki względem osi środków ścinania.
- Distributed Loads... — definiowanie informacji związanych z obciążeniem rozłożonym. Pola  $q_1$  i  $q_2$  oznaczają odpowiednio wartość początkową i końcową obciążenia, a  $x_1$  i  $x_2$  współrzędną początkową i końcową obciążenia. Pole  $z$  informuje program o współrzędnej przyłożenia obciążenia.

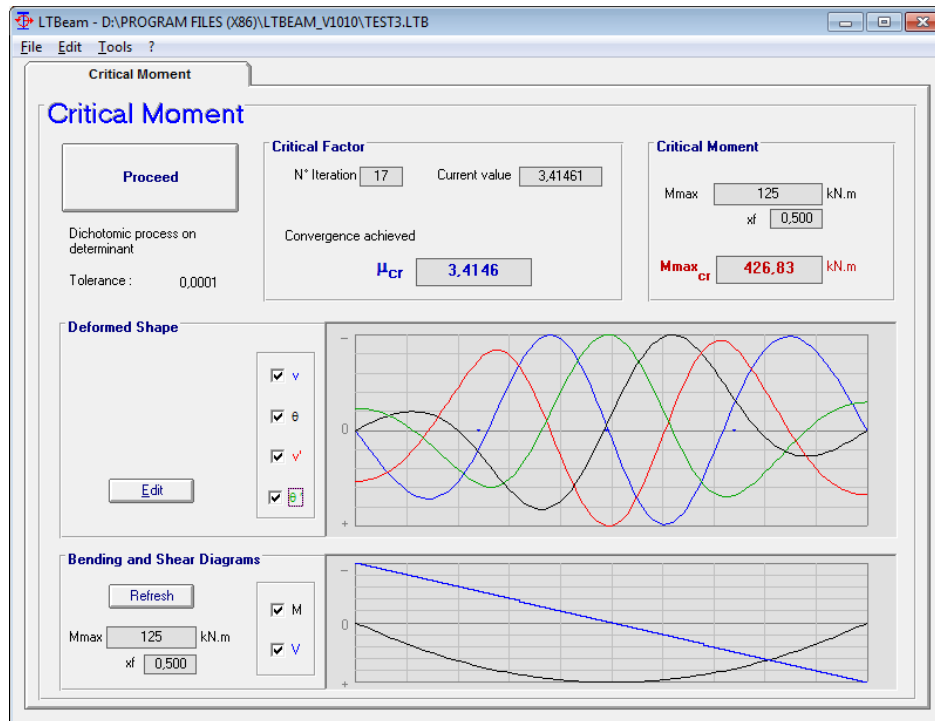
N <sup>o</sup>	F (daN)	x (cm)	z (cm)
1	-10000	500	10

N <sup>o</sup>	q1 (daN/cm)	x1 (cm)	q2 (daN/cm)	x2 (cm)	z (cm)
1	0	0	-100	300	10
2	-100	300	-100	600	10

UWAGA! Definiowane wartości nie mają wpływu na wykresy sił przekrojowych. Obecność obciążenia ciągłego i punktowego należy również uwzględnić w zakładce **Bending Moments**.

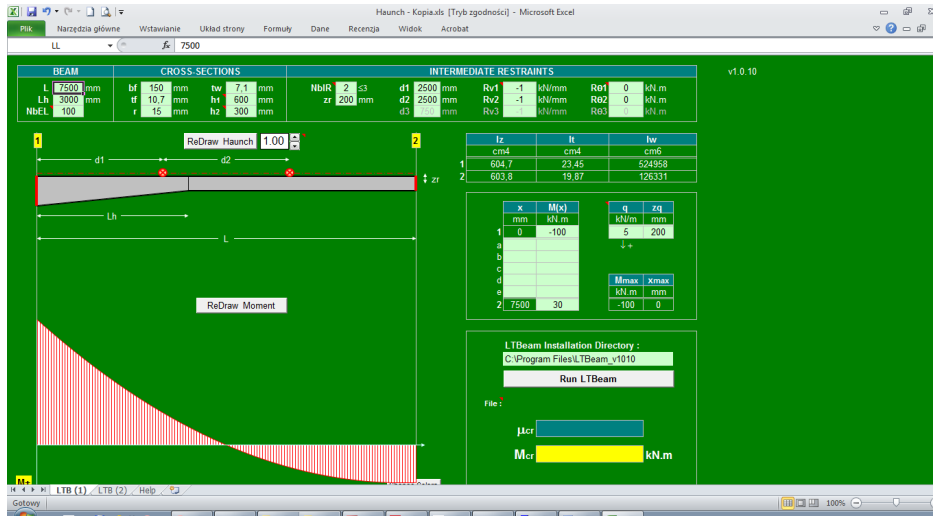
W celu otrzymania wartości momentu krytycznego zdefiniowanej belki należy wprowadzone informacje zapisać do pliku tekstowego. Zamknąć okno edycji pliku, a następnie wczytać dany plik w oknie *Input File Mode*. Wystarczy kliknąć w **Proceed** i odczytać wartość mnożnika krytycznego  $\mu_{cr}$  oraz momentu krytycznego  $M_{cr}$ .



### 3.2. Haunch Beams

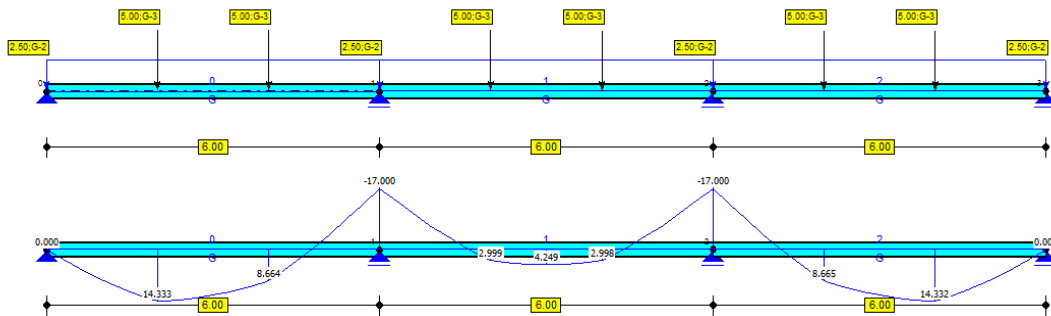
Ciekawym dodatkiem do programu jest napisany w środowisku Visual Basic arkusz kalkulacyjny, który umożliwia wyznaczenie momentu krytycznego zwichrzenia belek dwuteowych o zbieżnym przekroju poprzecznym. Aby z tego skorzystać należy otworzyć plik `Haunch.xls` znajdujący się w katalogu, w którym program został zainstalowany. Ograniczenia zastosowane w arkuszu kalkulacyjnym:

- analizować można jedynie bisymetryczne przekroje dwuteowe,
- twórcy arkusza przewidzieli możliwość zastosowania trzech stężeń rotacyjnych lub translacyjnych,
- bardziej złożony rozkład momentów zginających sprowadza się do zdefiniowania konkretnych wartości w odpowiedniej tabeli,
- analiza belki w arkuszu sprowadza się do przygotowania wejściowego pliku tekstowego (input file). Plik ten zawiera informacje, które należało wprowadzić **File Input Mode**. Definiuje dla każdego ES odpowiednie charakterystyki przekrojowe.

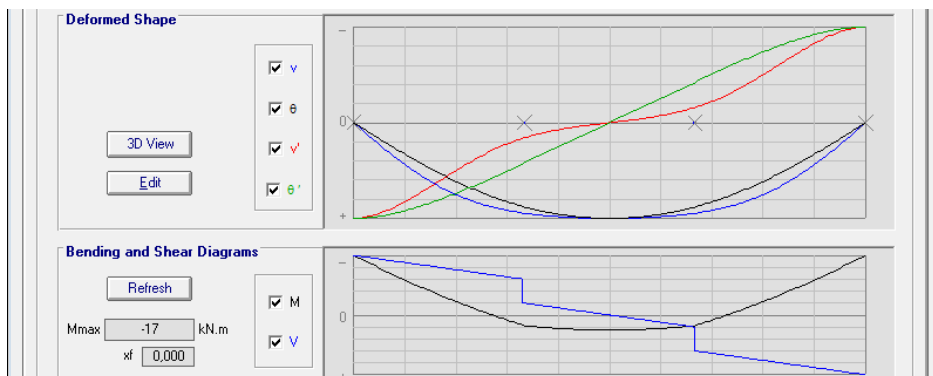


#### 4. Przykład

Sprawdzić nośność trzyprzęsłowej belki wykonanej z dwuteownika IPE 270. Schemat belki i wykres momentów zginających przedstawiają poniższe rysunki. Ponadto każde przęsło w miejscu przyłożenia siły skupionej jest stabilizowane w kierunku bocznym. Zarówno obciążenia jak i stężenia znajdują się na poziomie pasa górnego.



Moment krytyczny przy zwiczeniu sprężystym wyznaczony przy pomocy programu LTBeam  $M_{cr} = 147,18$  kNm wyznaczony dla przęsła środkowego.



Plastyczny wskaźnik wytrzymałości przekroju  $W_{pl,y} = 484 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$ ,  
 sprężysty wskaźnik wytrzymałości przekroju  $W_y = 429 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$ ,  
 granica plastyczności dla stali S235  $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$ .

Smukłość względna

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{429 \cdot 10^3 \cdot 235}{147,18 \cdot 10^6}} = 0,828,$$

stosunek  $h/b = 270/135 = 2 \rightarrow$  krzywa zwichrzenia  $a$ , zatem parametr imperfekcji  $\alpha_{LT} = 0,21$ .  
 Następnie

$$\Phi = 0,5 \cdot \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \cdot \left[ 1 + 0,21 (0,828 - 0,2) + 0,828^2 \right] = 0,909,$$

współczynnik zwichrzenia

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,909 + \sqrt{0,909^2 - 0,828^2}} = 0,779 \leq \begin{cases} 1,0 \\ \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} = \frac{1}{0,828^2} = 1,46 \end{cases}$$

Nośności na zwichrzenie elementu

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{pl,y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,779 \cdot 484 \cdot 10^3 \cdot \frac{235}{1,0} = 88,6 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 88,6 \text{ kNm}.$$

Warunek nośności elementu ze względu na zwichrzenie

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{17,0}{88,6} = 0,19.$$