



# Nelineární analýza ohýbaného nosníku pomocí ATENA Engineering 2D

Petr Bílý

kancelář B731

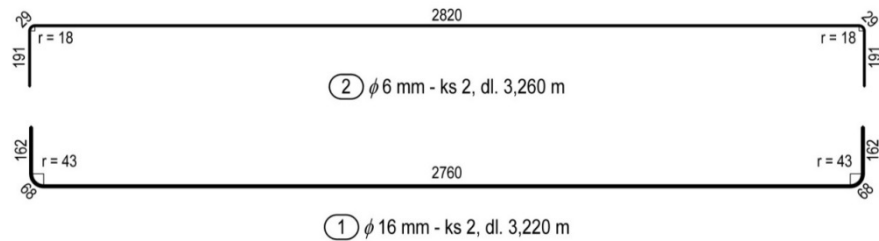
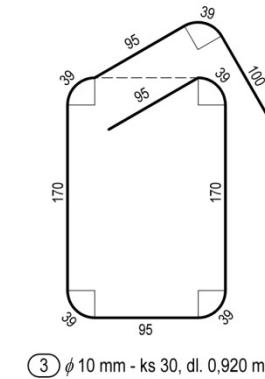
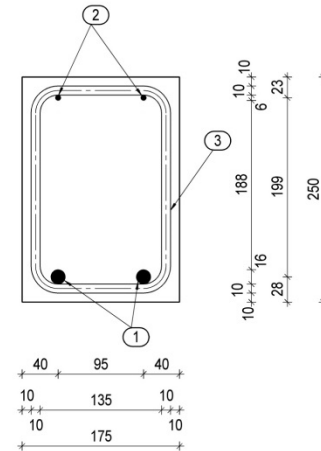
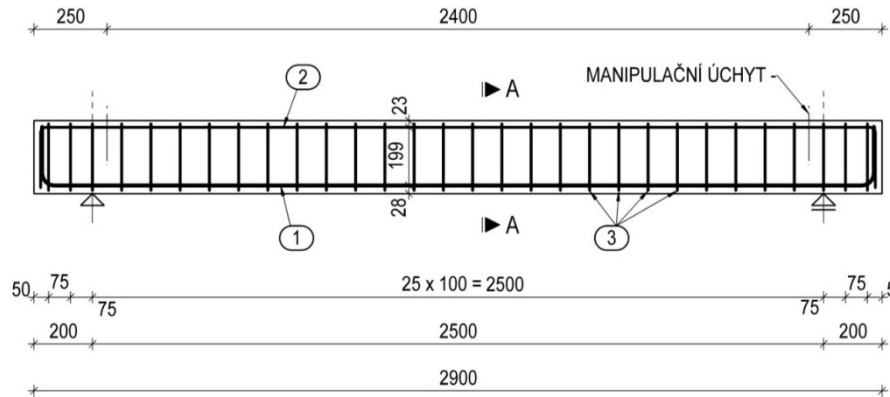
e-mail: [petr.bily@fsv.cvut.cz](mailto:petr.bily@fsv.cvut.cz)

web: [people.fsv.cvut.cz/www/bilypet1](http://people.fsv.cvut.cz/www/bilypet1)

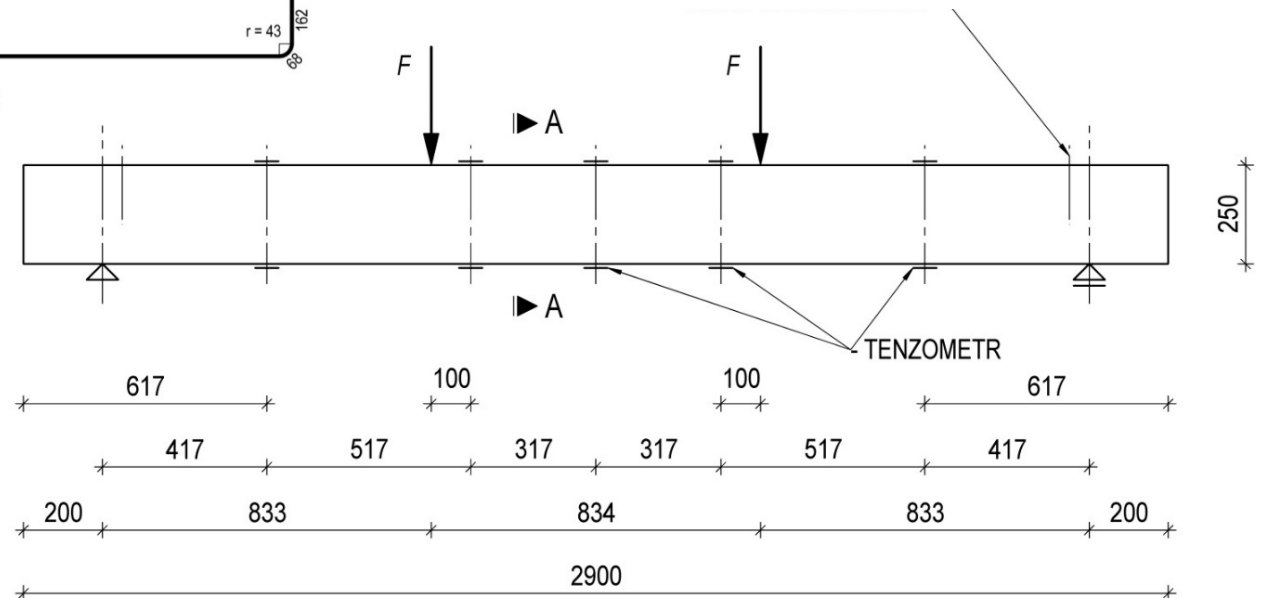
# ATENA Engineering 2D

- <http://www.cervenka.cz/cz/ke-stazeni/>
- Program obsahuje i manuály, vč. teoretického
- Bez klíče možno spustit v DEMO verzi – omezený počet prvků (300 vč. prvků výztuže)

# Příklad: Popis konstrukce



Autor experimentu: doc. Ing. Roman Šafář, Ph.D.



# Odhad výsledků

- Vždy musím být schopen předem **odhadnout, co mi vyjde**
- Program je pouze **nástrojem** pro stanovení **přesných číselných hodnot**
- *Odhad:*

Tvar průhybu



$$M_{Rm} = A_s * f_{ym} * z = 400 * 550 * 200 = 44 \text{ kNm}$$

$$F_{Rm} = M_{Rm} / r = 44 / 0,833 = 52,8 \text{ kN}$$

*(Přesný ruční výpočet se započtením tlačené výztuže:  $M_{Rm} = 46 \text{ kNm}$ ,  $F_{Rm} = 55,3 \text{ kN}$ )*

# Zadání konstrukce

## *Preprocessing*

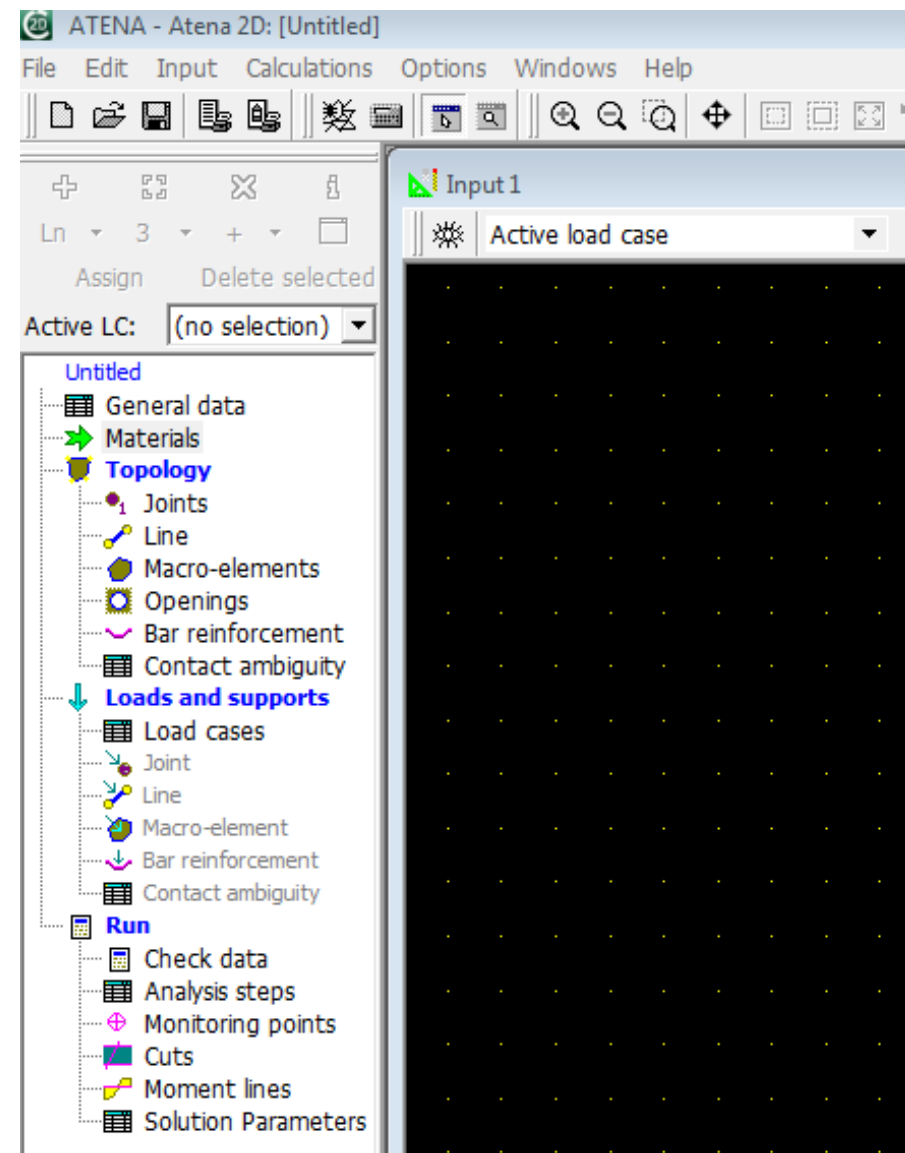
- Materiály
- Geometrie
- Zatížení
- Parametry výpočtu

## *Processing*

- Výpočet

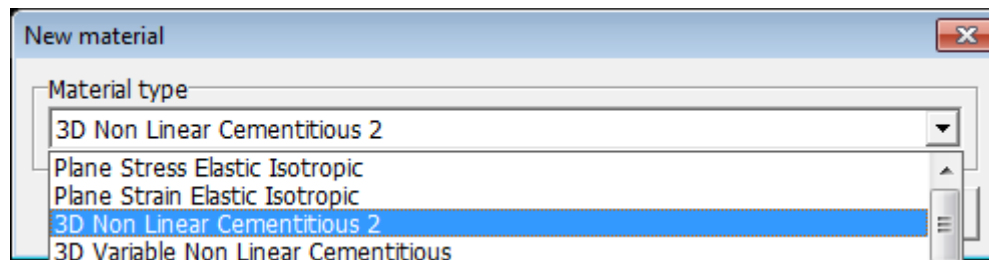
## *Postprocessing*

- Analýza výsledků



# Materiály

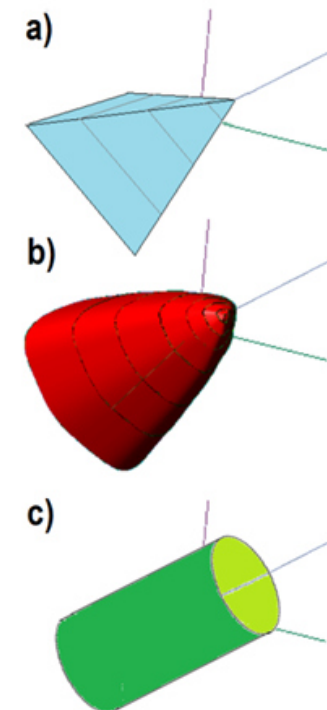
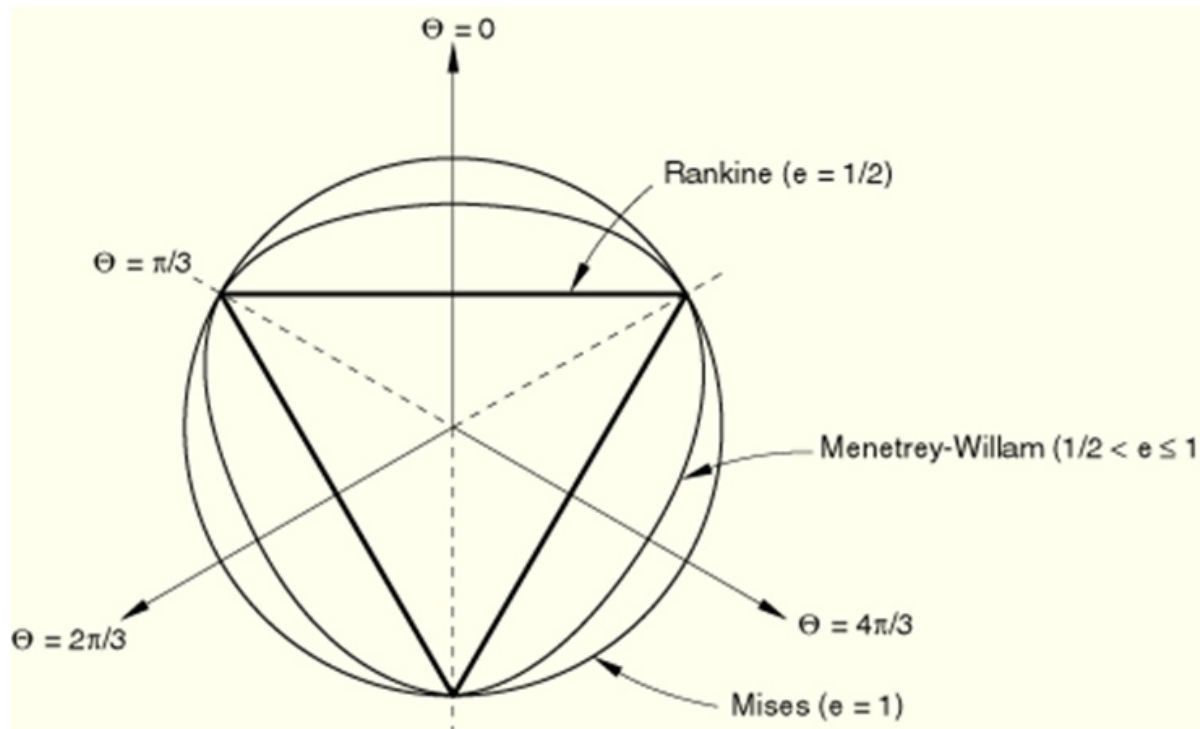
- Pokud modelují skutečné chování konstrukce, používat **parametry materiálů ze zkoušek**
- Nejsou-li k dispozici – **střední hodnoty** pevnosti, modulu pružnosti ( $f_{cm}$ ,  $E_{cm}$ ) pro danou třídu betonu
- Beton – materiál 3D NonLinCementitious 2
- Ocel – Elastic Isotropic nebo Bilinear Von Mises
- Výztuž – Reinforcement, Smearred Reinforcement



# 3D NonLinearCementitious 2

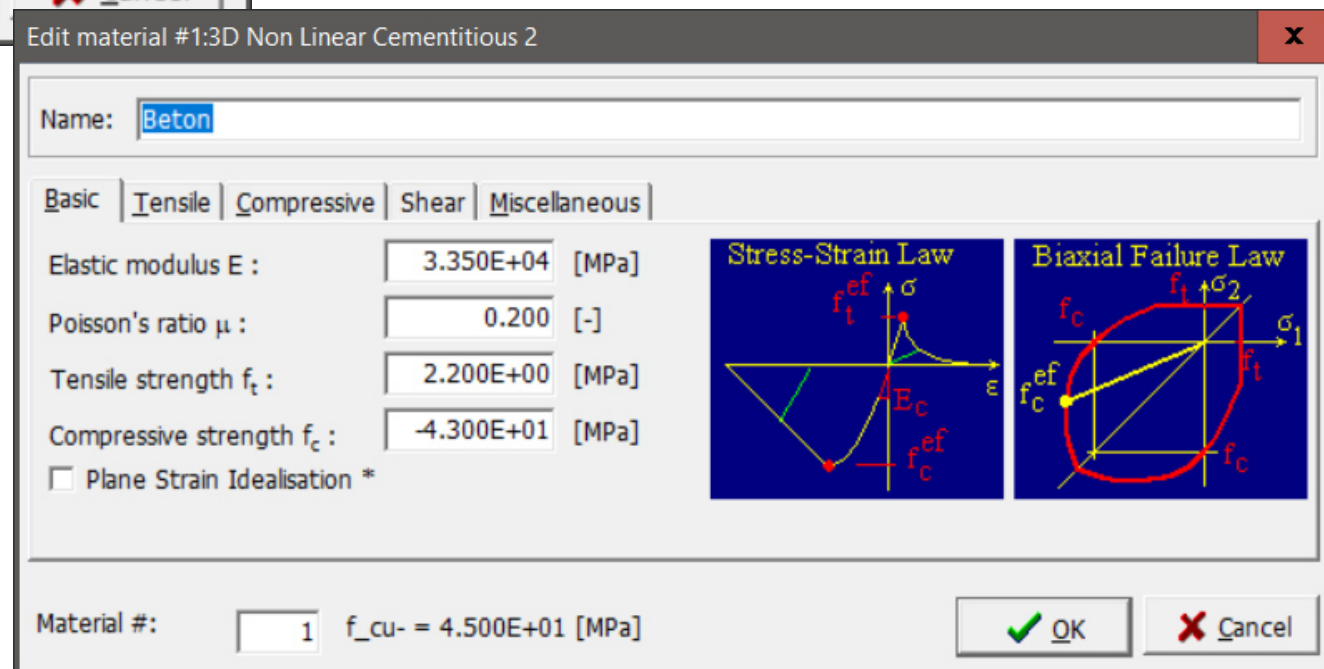
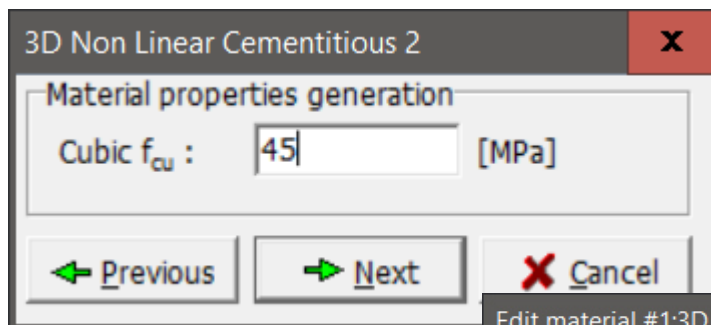
- Tah – Rankine  $f(\sigma) = \sigma_{\max}(\sigma) - f_t \leq 0$
- Tlak – Menétrey-Willam

$$f(\xi, \rho, \theta) = \left[ \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\rho}{f_c} \right]^2 + m \left[ \frac{\rho}{\sqrt{6} f_c} r(\theta, e) + \frac{\xi}{\sqrt{3} f_c} \right] - c \leq 0$$



# 3D NonLinearCementitious 2

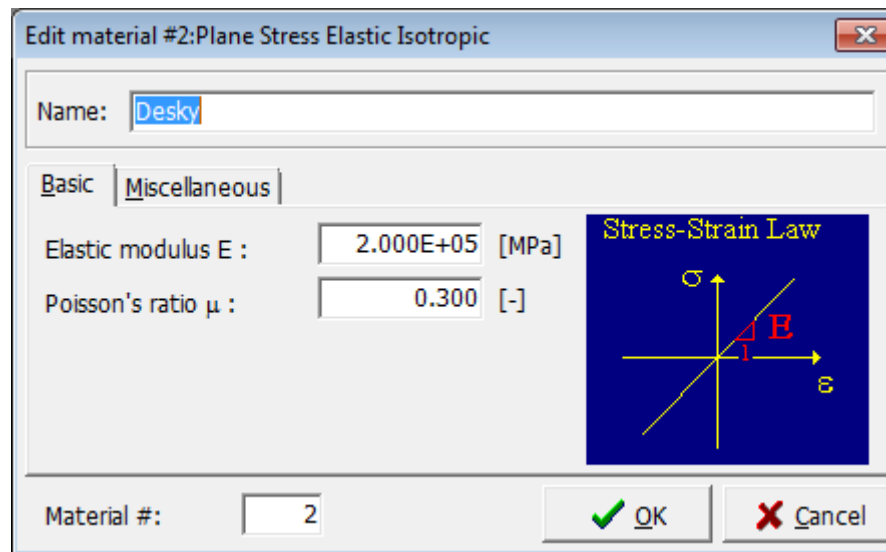
- Vygenerované parametry dle pevnosti betonu (nebo upravit dle výsledků zkoušek)





# Elastic Isotropic Material

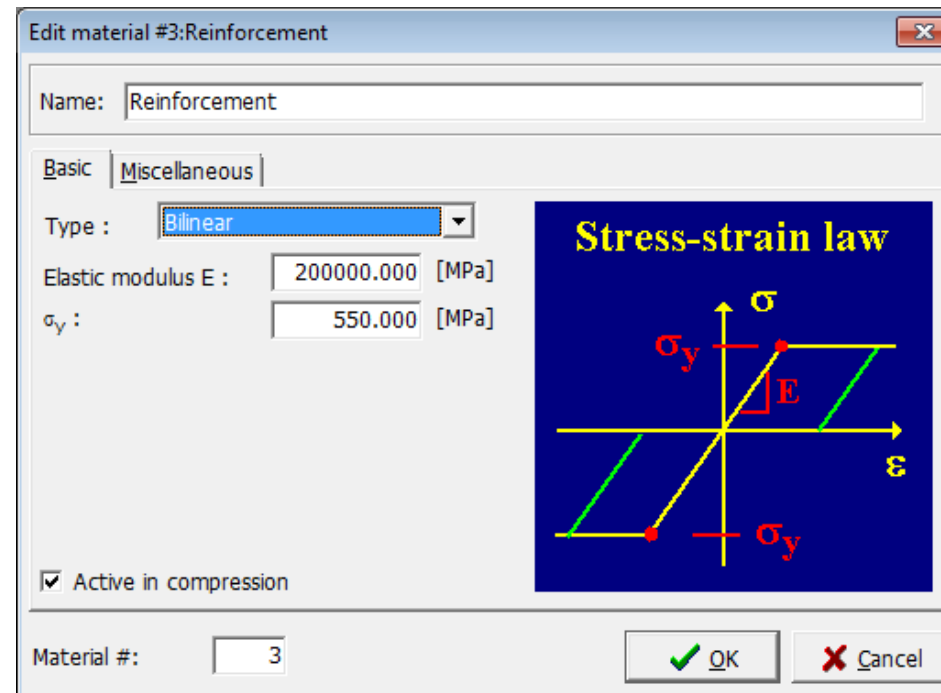
- Ideálně pružný materiál – např. pomocné ocelové prvky (viz dále)



- Nosné ocelové prvky (svařence, kotvy apod.) – používat Bilinear Steel von Mises Material

# Reinforcement Material

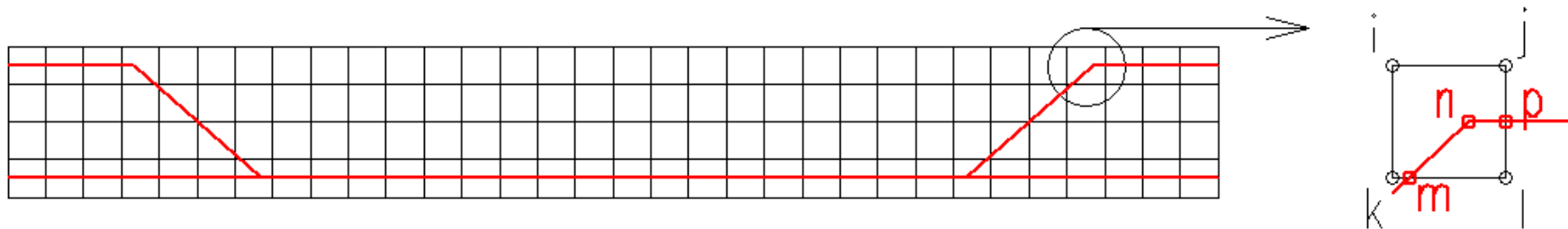
- Ideální pružnoplastický materiál – Bilinear
- Možnost uživatelského zadání přesnějšího chování výztuže – Multilinear



# Propojení výztuže a betonu

- Plná kompatibilita přetvoření výztuže a betonu
- Posunutí prvků výztuže jsou počítána z posunutí prvků základního materiálu pomocí lineární interpolace:

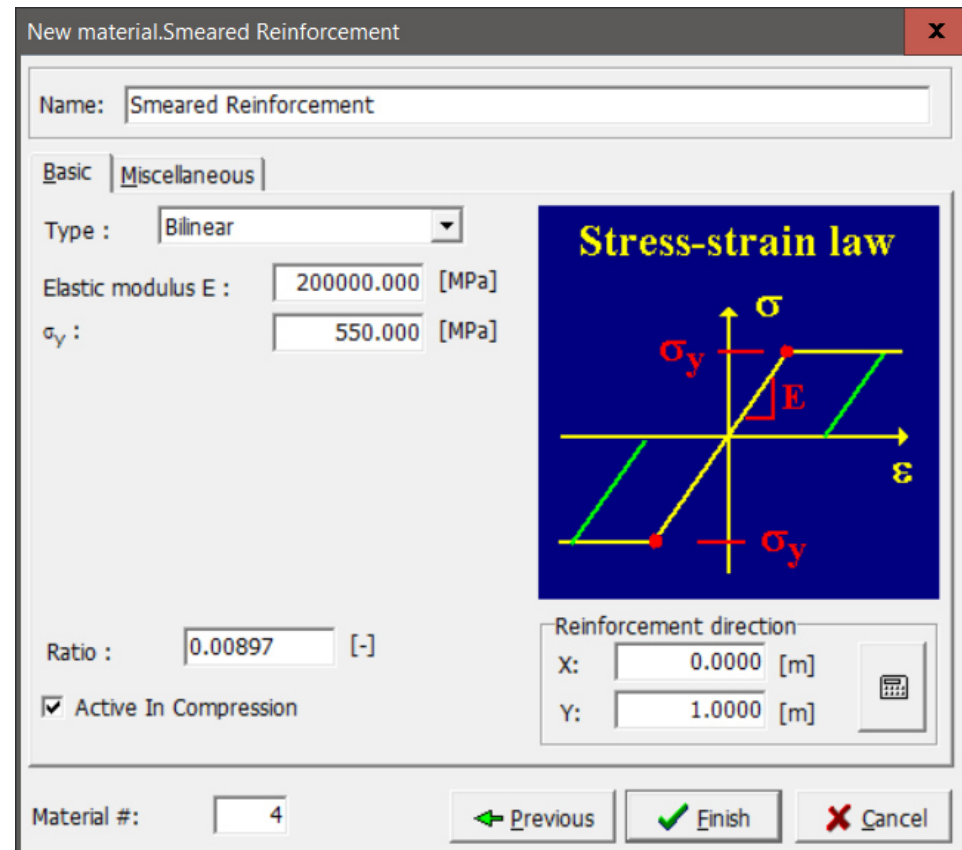
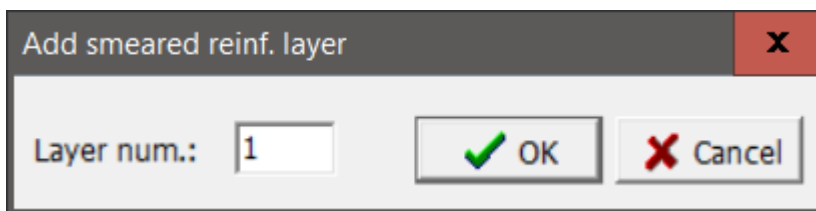
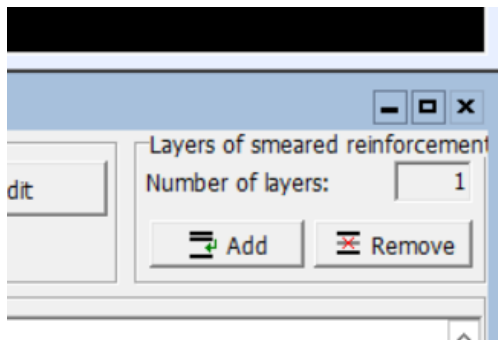
$$u(r, s, t) = \sum_{i=1}^n h_i(r, s, t) \cdot U_i$$



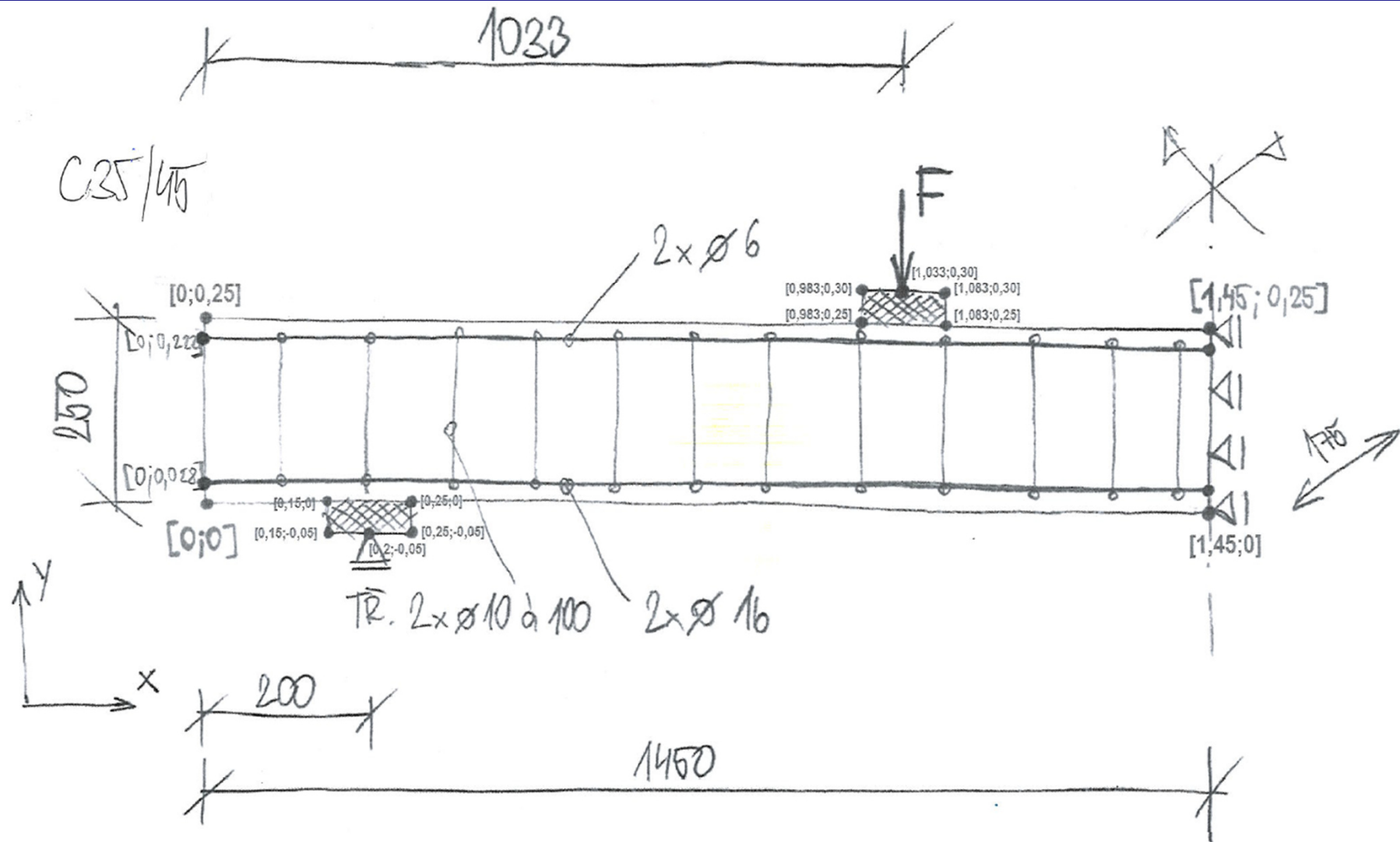
( $u(r, s, t)$  je hledaný vektor posunutí uzlu výztuže,  $h_i(r, s, t)$  je interpolační funkce a  $U_i$  je matice uzlových posunutí základního materiálu)

# Smearred Reinforcement Material

- Rozetřená (smearred) výztuž – zadává se směr a stupeň vyztužení
- Nutno předdefinovat v General Data

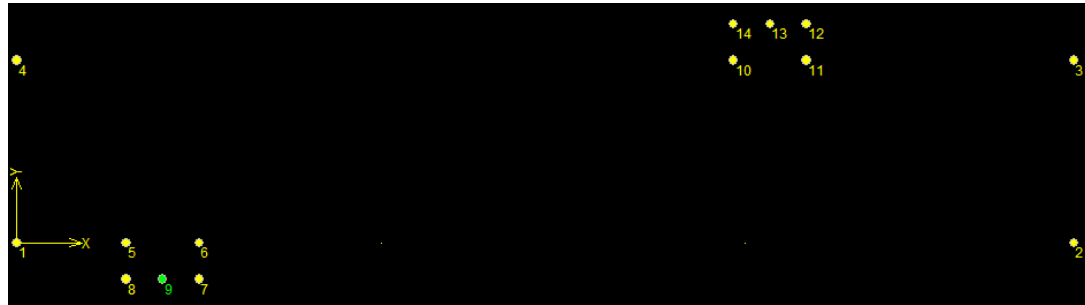


# Geometrie

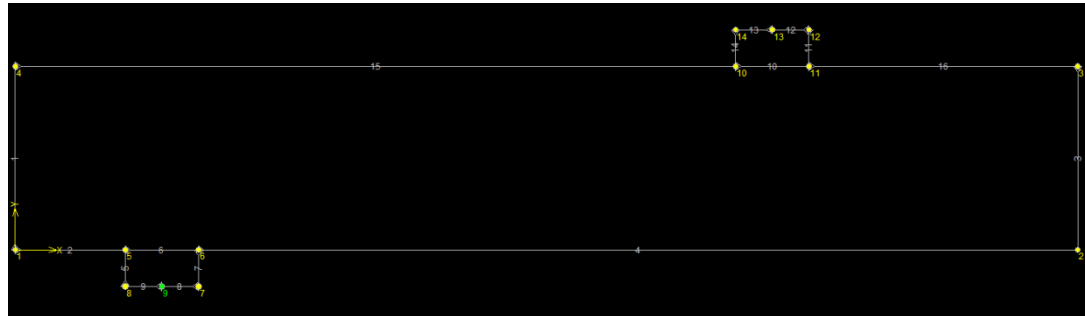


# Geometrie

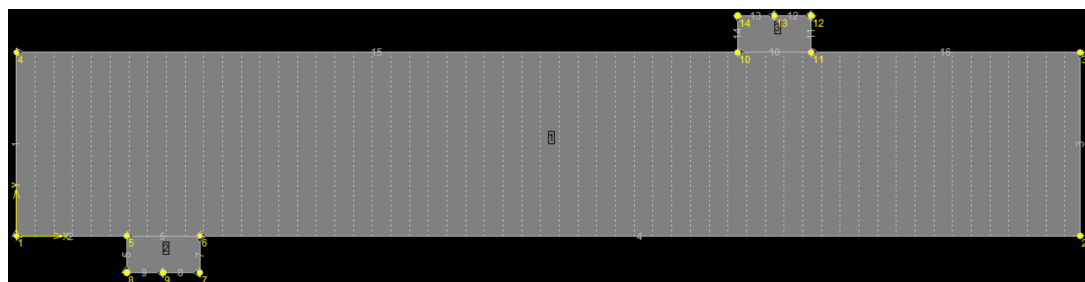
- Styčníky



- Linie

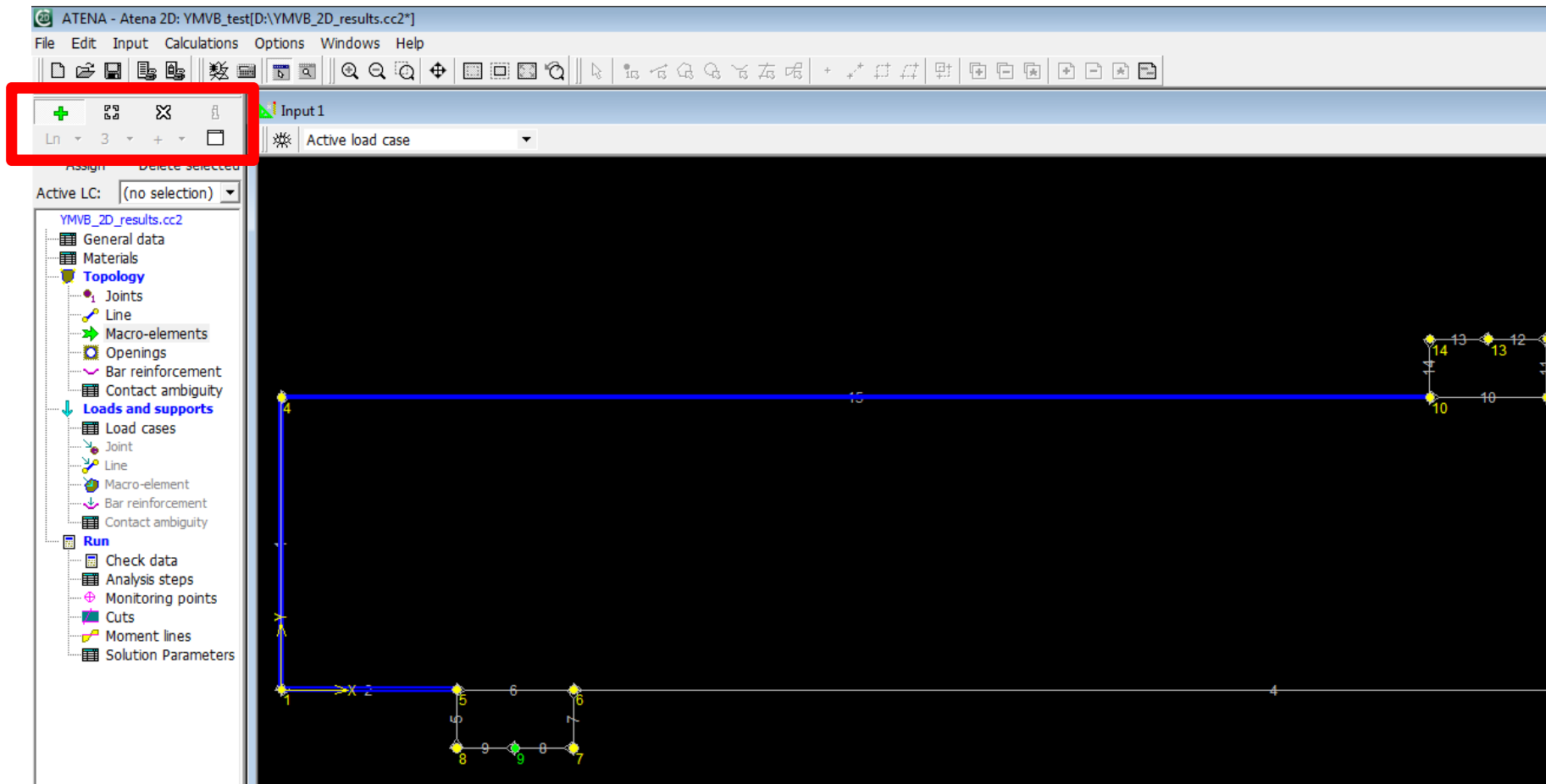


- Makroprvky



# Geometrie

- Ruční zadávání



# Geometrie

- Makroprvky – zadat materiál, šířku konstrukce (2D idealizace), základní velikost prvku MKP, rozetřenou výztuž

Macro-element # 1.

Topology  
Boundary list: 1-4,6,10,15-16

FE mesh  
Mesh type: Quadrilaterals  
Element size: 0.0500 [m]  
 Smooth element shapes

Properties  
Material: Beton  
Thickness: 0.1750 [m]  
Quadrilateral elements: CCisoQuad  
 Geometrically nonlinear

Macro-element # : 1

Layers of smeared reinforcement

Layer	Material of reinf. layer
> 1	Smeared Reinforcement

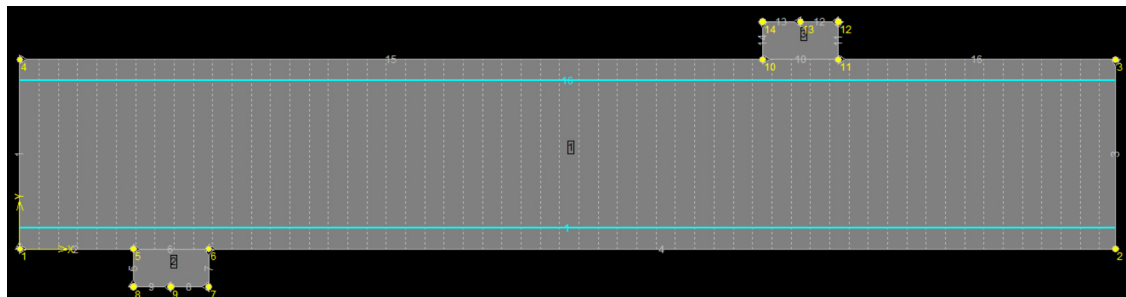
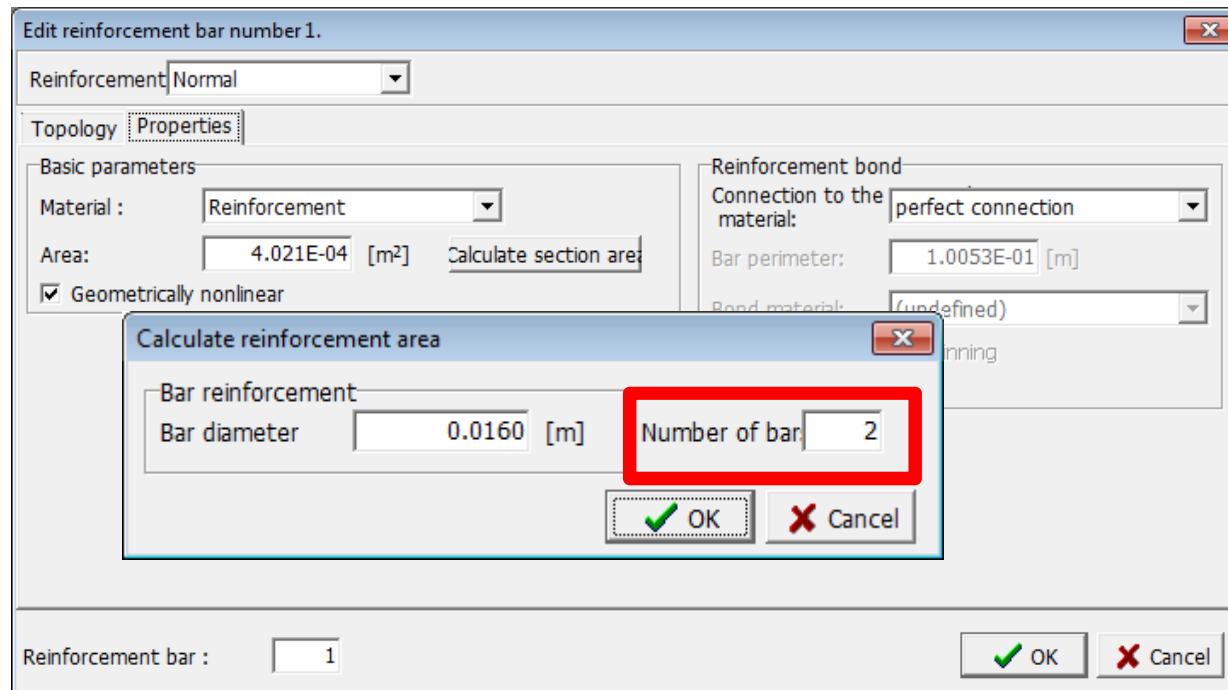
No. of smeared reinf. layers should be entered within general data.

OK Cancel



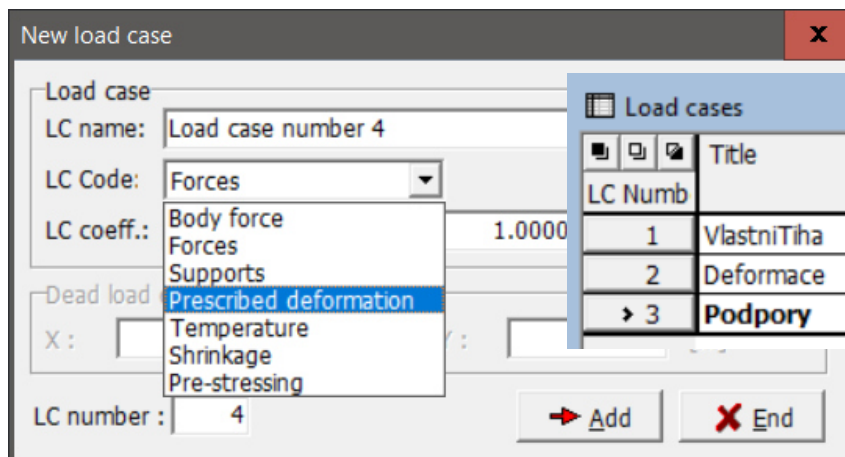
# Výztuž

- Zadání opět bodově, počet prutů na šířku kce

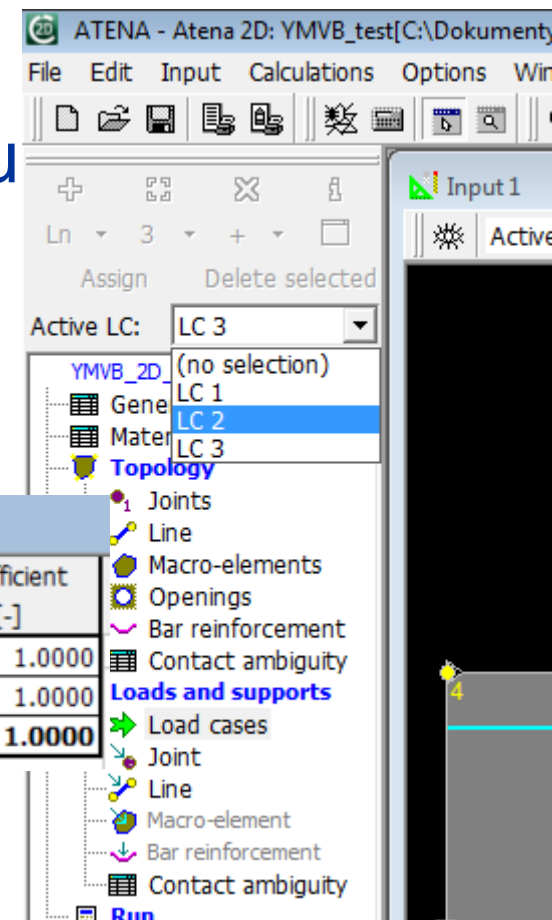


# Zatížení

- Různé typy do různých zatěžovacích stavů => nadefinovat různé ZS pro vl. tíhu, zatížení, podpory
- Vybrat patřičný ZS, zadat
- Body Force – vlastní tíha na celou kci dle objem. hm. materiálů
- Zatěžování deformací

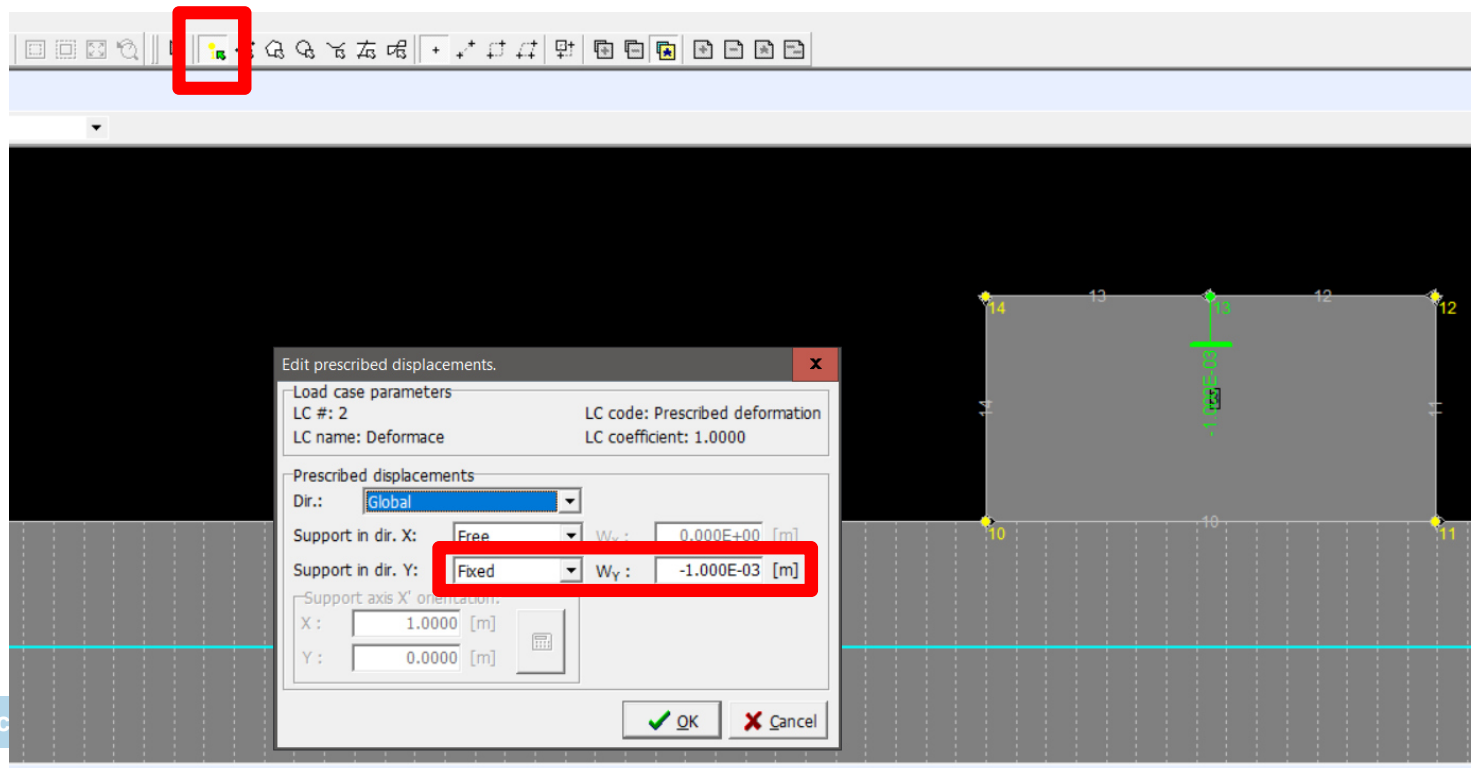


LC Numb	Title	Code	Coefficient [-]
1	VlastniTiha	Body force	1.0000
2	Deformace	Prescribed deformation	1.0000
> 3	Podpory	Supports	1.0000



# Zatížení

- Bodové zatížení a podpory přes roznášecí desky
- Zatížení směřující dolů znaménko „-“
- Zadávat „jednotková“ zatížení, ne celkové požadované hodnoty (viz dále)



# Výpočtové kroky

- Menu Run => Analysis Steps
- Simuluje proces vnášení zatížení do kce
- Podpory ve **všech** krocích
- Vlastní tíha pouze v **prvním** kroku
- Zatížení silou (deformací) – příklad: Chci aplikovat X kN (mm) => kvůli stabilitě výpočtu zadám zatížení 1 kN (mm) a aplikuji ho v Y krocích
- Kroky nemusejí být stejně velké

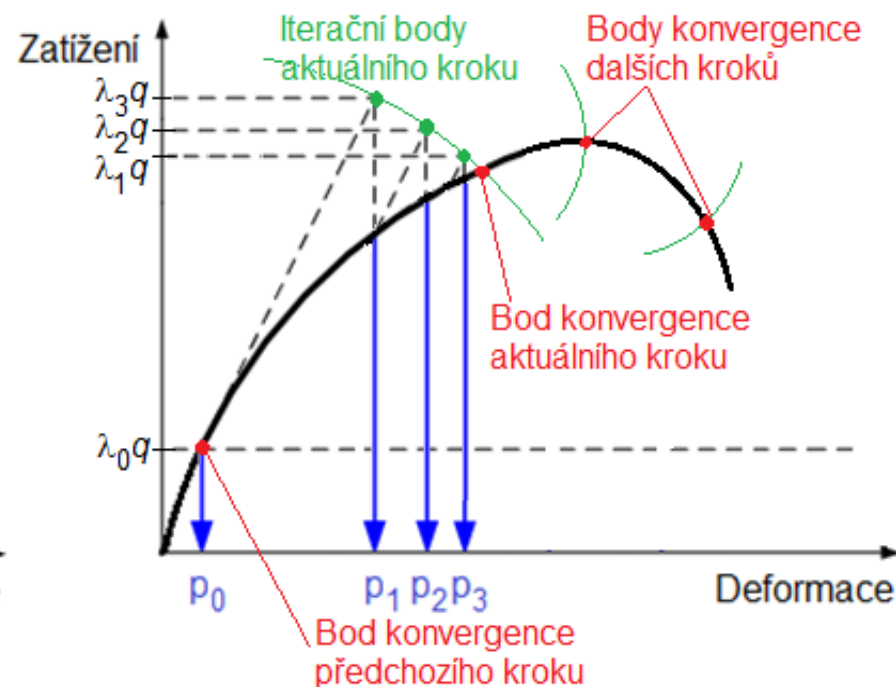
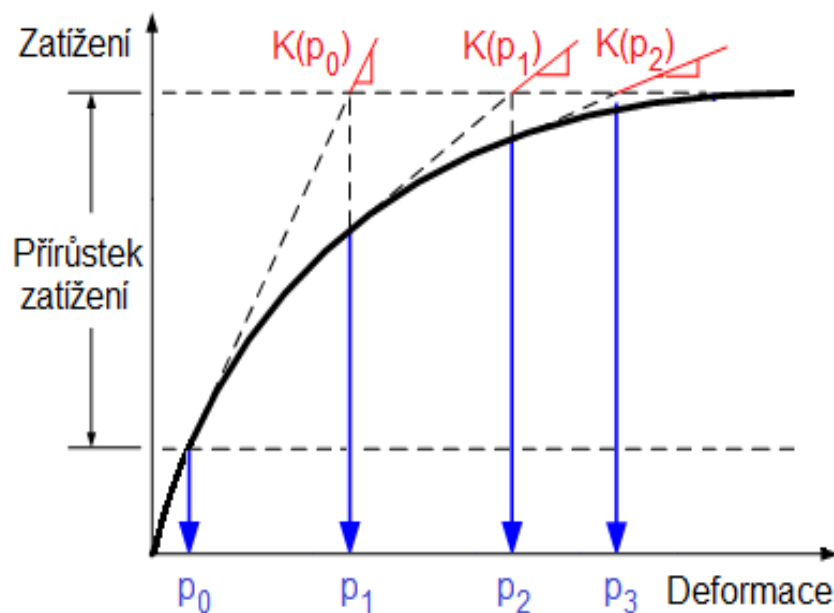
# Výpočtové kroky

Analysis steps

Number	Seznam zatěžovacích stavů	Coefficient [-]	Parameters analysis
1	1,3	1.0000	Standart Newton-Raphson
2	2-3	1.0000	Standart Newton-Raphson
3	2-3	1.0000	Standart Newton-Raphson
4	2-3	1.0000	Standart Newton-Raphson
5	2-3	1.0000	Standart Newton-Raphson
6	2-3	1.0000	Standart Newton-Raphson
7	2-3	1.0000	Standart Newton-Raphson
8	2-3	1.0000	Standart Newton-Raphson
9	2-3	1.0000	Standart Newton-Raphson
10	2-3	1.0000	Standart Newton-Raphson
11	2-3	1.0000	Standart Newton-Raphson
12	2-3	1.0000	Standart Newton-Raphson
13	2-3	1.0000	Standart Newton-Raphson
14	2-3	1.0000	Standart Newton-Raphson
15	2-3	1.0000	Standart Newton-Raphson
16	2-3	1.0000	Standart Newton-Raphson
17	2-3	5.0000	Standart Newton-Raphson
18	2-3	5.0000	Standart Newton-Raphson
19	2-3	5.0000	Standart Newton-Raphson
20	2-3	5.0000	Standart Newton-Raphson
21	2-3	5.0000	Standart Newton-Raphson
22	2-3	5.0000	Standart Newton-Raphson
23	2-3	5.0000	Standart Newton-Raphson
24	2-3	5.0000	Standart Newton-Raphson
25	2-3	5.0000	Standart Newton-Raphson
▶ 26	2-3	<b>5.0000</b>	<b>Standart Newton-Raphson</b>

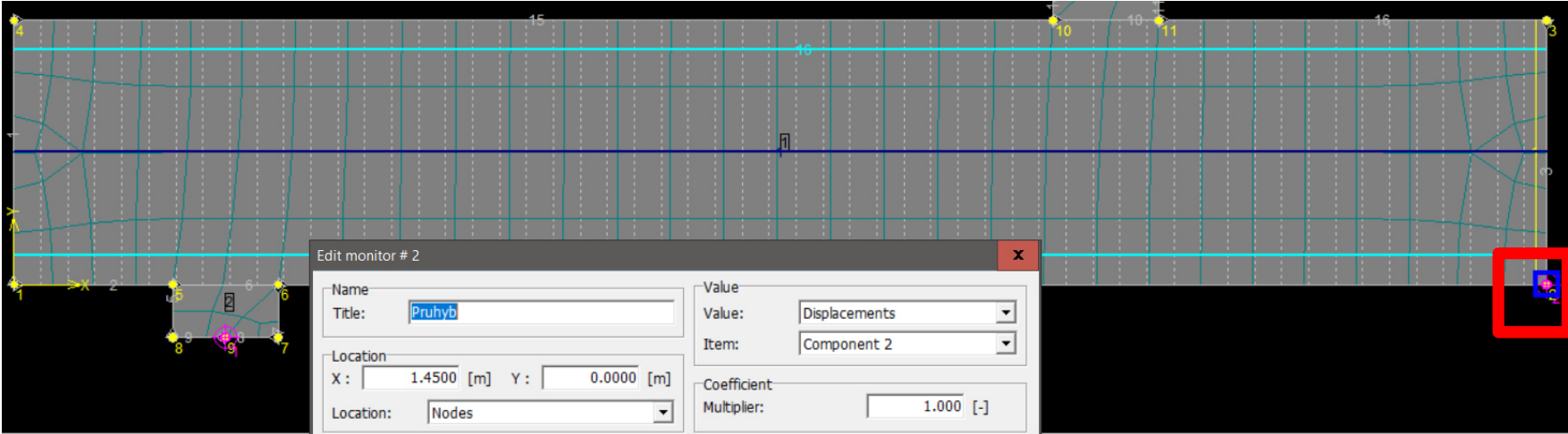
# Výpočtové metody

- Newton-Raphson – řešení je řízeno předem daným přírůstkem zatížení (síly, posunu). Obvykle efektivnější, rychlejší.
- Metoda obloukové délky – velikost přírůstku zatížení závisí na průběhu iterace, automaticky se upravuje. Využití při analýze mezní únosnosti konstrukce při zatěžování silou (okolí vrcholu a klesající větve diagramu).



# Monitory

- Sledují určitou veličinu v určitém místě konstrukce – analogie tensometrů při zatěžovací zkoušce
- Umožňují vykreslit např. pracovní diagram F-y
- Component 1 = směr x, 2 = y, 3 = z

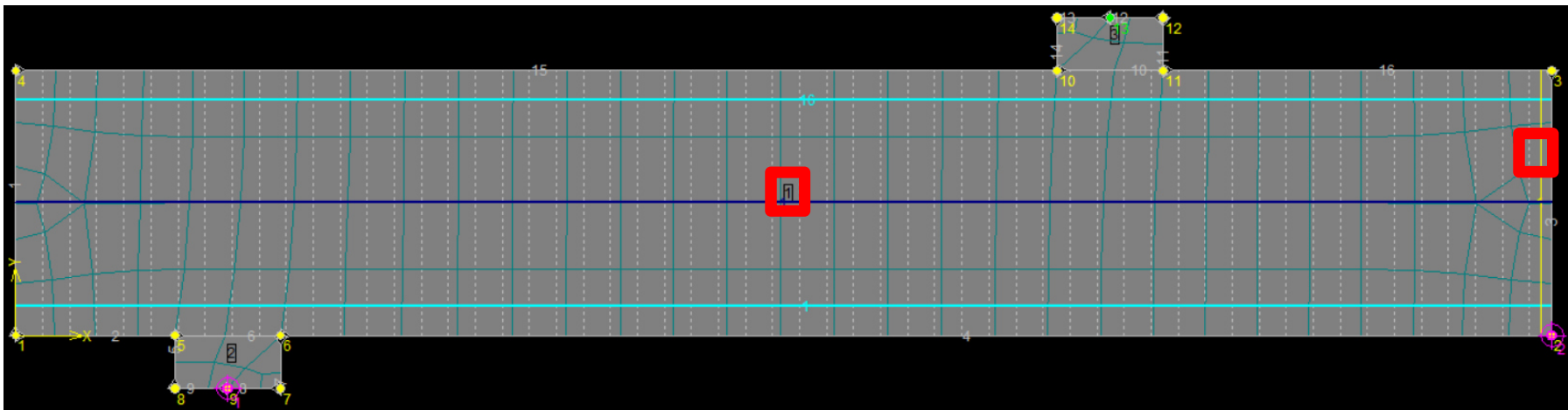


Monitoring points

Number	Title monitoru	Location			Coefficient [-]	Monitored value	
		X [m]	Y [m]	Position		Value	Item
1	Sila	0.2000	-0.0500	Nodes	1.0000	Reactions (Reactions)	Component 2 (Dof(2))
2	Pruhyb	1.4500	0.0000	Nodes	1.0000	Displacements (Displacements)	Component 2 (x(2))

# Řezy, momentové linie

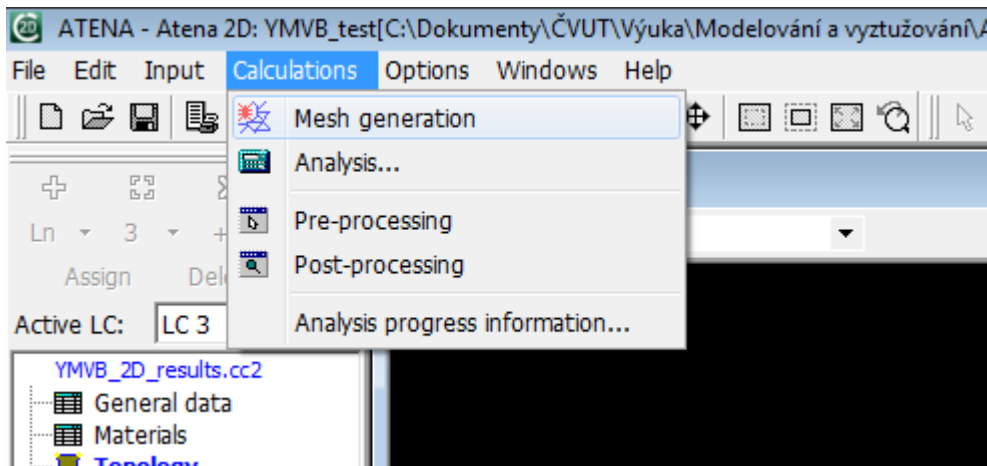
- Řezy – umožní v postprocesoru vykreslit průběh veličin (napětí, přetvoření...) v určitém řezu konstrukce
- Momentové linie – umožní v daném řezu integrovat napětí a získat hodnoty vnitřních sil





# Sít' MKP

- Generování přes menu Calculations



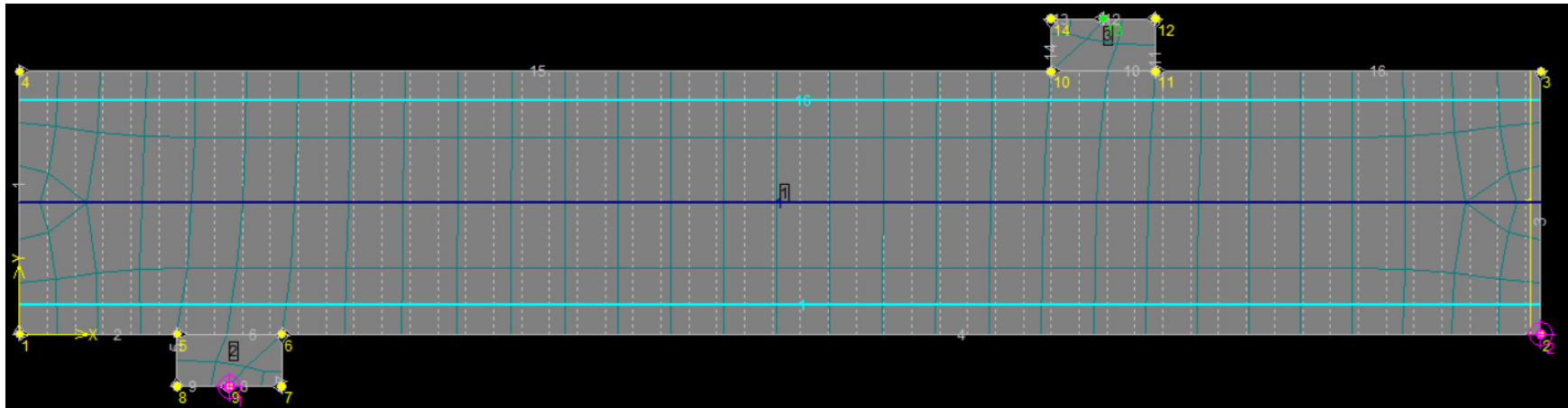
- Základní parametry se volí v makroprvcích (viz dříve)
- Pro pravoúhlou geometrii jsou obvykle čtyřhranné prvky efektivnější než trojúhelníkové

# Velikost prvků MKP

- Volba vyžaduje jistý cit, odhad, zkušenosti, optimalizaci...
- Moc prvků – zdlouhavý výpočet, problémy s pamětí, singularity
- Málo prvků – nepřesné (až zcela nesmyslné) výsledky, problémy s konvergencí výpočtu
- **Ohýbané prvky – alespoň 4, lépe alespoň 6-8 prvků na výšku nosníku** (plynulost změny tuhosti při porušení)

# Hustota sítě MKP v různých směrech

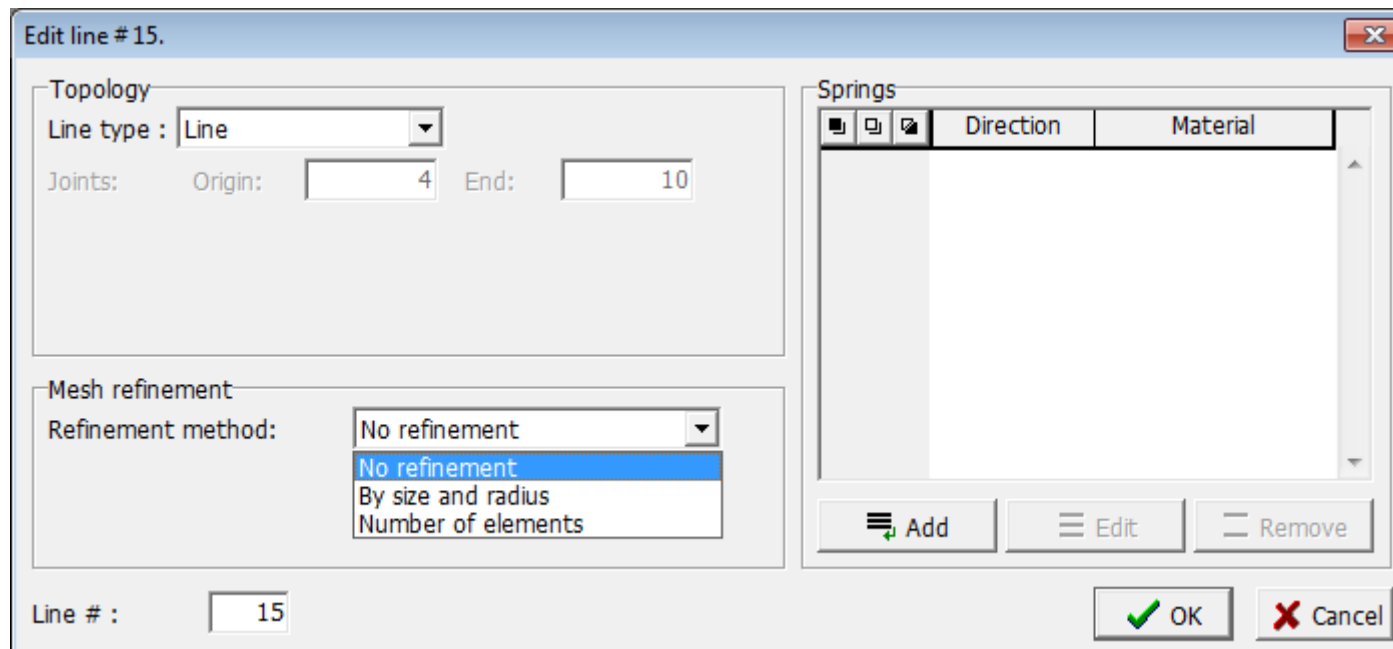
- Defaultní nastavení: Síť má stejnou hustotu ve všech směrech (dle základní velikosti prvků daného makroprvku)



- To může být někdy neefektivní – příliš mnoho prvků = zbytečně dlouhý výpočet => lze upravit (zahustit síť v D-oblastech a „ve směru změn“)

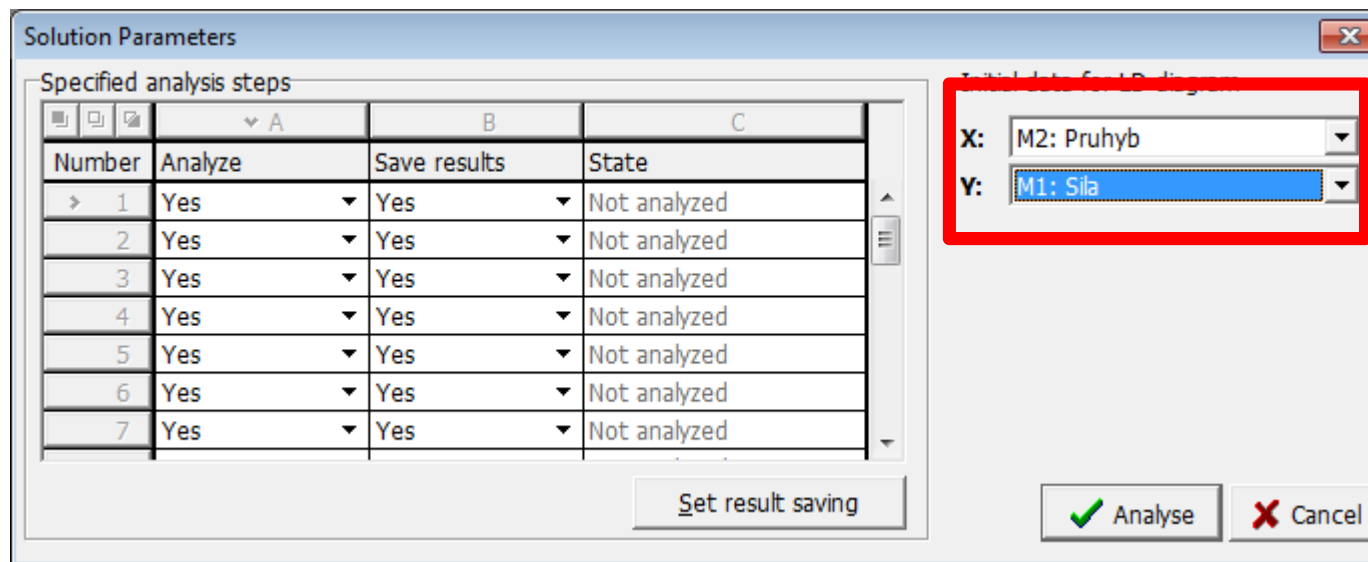
# Hustota sítě MKP v různých směrech

- Topology – Joint/Line – Mesh Refinement



# Výpočet

- Před spuštěním **ULOŽIT!!!** – výpočet často padá
- Calculations – Analysis
- Vybrat, co se má zobrazovat na diagramu během výpočtu – lze využít monitory a kontrolovat průběh zatěžování



# Výpočet

Calculating YMVB\_test [D:\YMVB\_2D\_model\_new.cc2] ...

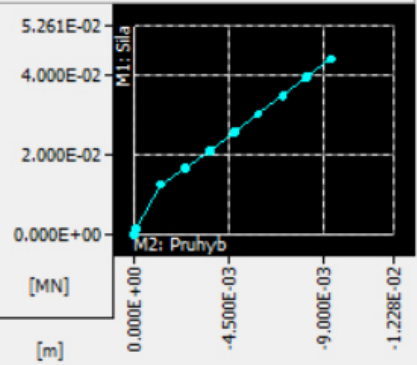
Load step no. 10    Stiffness Matrix Triangulation    Pause

Iteration no. 3    Stop

Sol. params.:    Standart Newton-Raphson    Show

Store data after each analysis steps

X: M2: Pruhyb    (no graphics)    5.0E+01    (no selection)



Force [MN]	Displacement [m]
0.000E+00	0.000E+00
~1.000E-02	~0.000E+00
~2.000E-02	~0.000E+00
~3.000E-02	~0.000E+00
~4.000E-02	~0.000E+00
~5.000E-02	~0.000E+00

X: <-9.346E-03, 0.000E+00> [m]  
Y: <0.000E+00, 4.424E-02> [MN]

Description	Magnitude
1 M1: Sila	4.890E-02
2 M2: Pruhyb	-1.051E-02

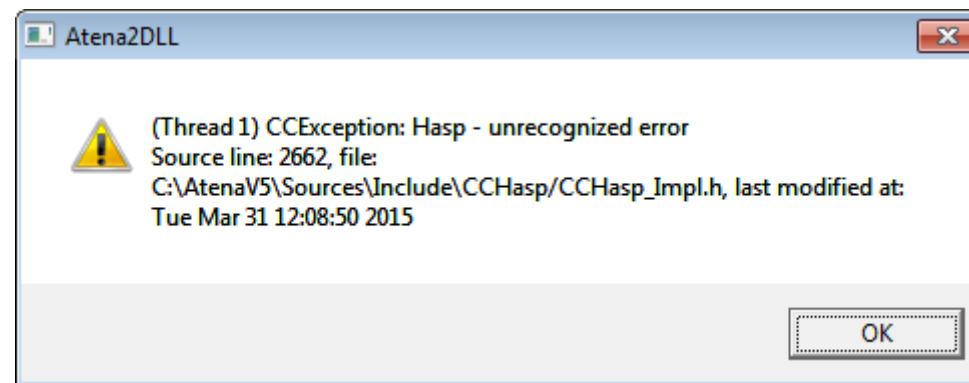
ATENA Version 5.4.1.15046    (c) Cervenka Consulting 1999-2017  
License Demo

Job: Step 10(10), Log start: 31.01.2018 13:54:54

Iter	Eta	Disp.Err	Resid.Err	Res.Abs.E	Energy E. (N
Iter	Eta	Unbal.	Energy Ratio:	Current	Required (L
1	1	0.11!	0.1!	0.11!	0.011! (N

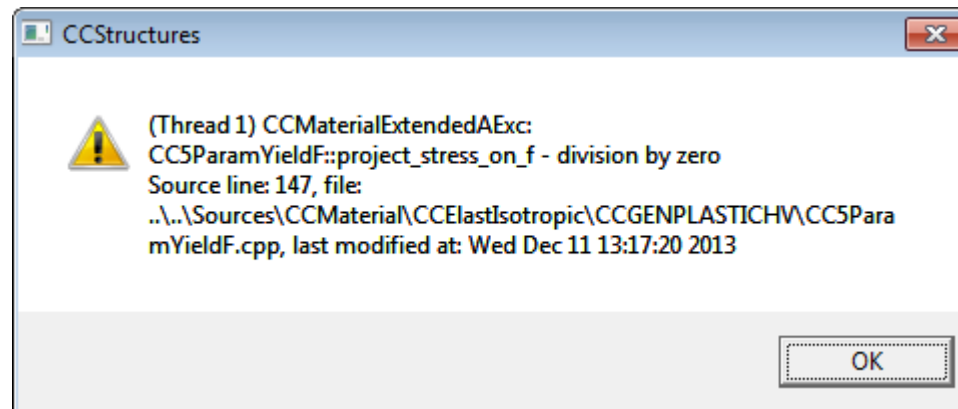
# Hlášky

- Mezi manuály je „Troubleshooting manuál“ – obsahuje popis spousty hlášek, cenné rady pro ladění modelu
- HASP = klíč s licencí pro ATENU. Bez něj poběží pouze demoverze.



# Hlášky

- Tato hláška je normální po dosažení mezní únosnosti („pád konstrukce“), v průběhu výpočtu znamená většinou chybu v zadání (např. špatně podepřená konstrukce, chyba v jednotce při zadávání zatížení, špatně přiřazený materiál apod.)





# Postprocessing

- Možnost zobrazit výsledky v jednotlivých zatěžovacích krocích
- Vykreslení grafů monitorů (např. F-y diagram)
- Vykreslení veličin v řezech
- Vykreslení vnitřních sil v momentových liniích

# Kontrola konvergence výpočtu

ATENA - Atena 2D: Test[D:\test.cc2\*] - [Results 1]

File Edit Calculations Options Windows Help

Mesh generation  
Analysis...  
Pre-processing  
Post-processing  
Analysis progress information...

Cracks Bar re  
Springs  
Scalars Vec

Scalars

Analysis information

Analysis step  
Analysis step 26

Input Output Message Error

Job: ATENA, Log start: 3.4.2018 15:37:04

ATENA Version 5.4.1.15046 (c) Cervenka Consulting 1999-2017  
License Demo

Job: Step 26(26), Log start: 3.4.2018 15:37:04

Iter	Eta	Disp.Err	Resid.Err	Res.Abs.E	Energy E. (NR)
1	1	0.076!	0.78!	0.99!	0.059! (NR)
2	1	0.0017	0.01	0.051	0.000001 (NR)
3	1	3.5e-05	0.00025	0.00031	8.6e-09 (NR)

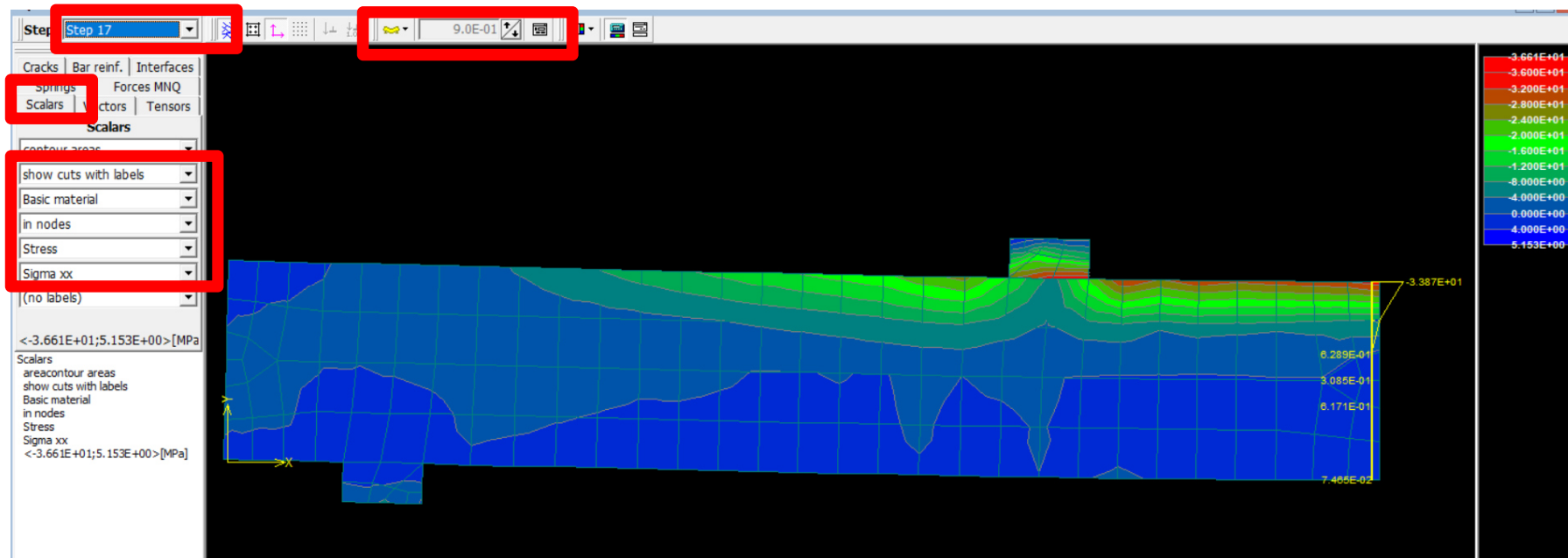
Warning: Attempt to constrain node 185 dof: 2 that has been already fixed by load case: 2, BC: 1, LHS BC id: 472; new constraint coming from load case: 3, BC: 2, LHS BC id: 464 will be ignored.

Step: 26(26) completed. Elapsed CPU (sec) - step this: 0.167, all: 4.323

Job: ATENA, Log end: 3.4.2018 15:37:04

# Zobrazení výsledků

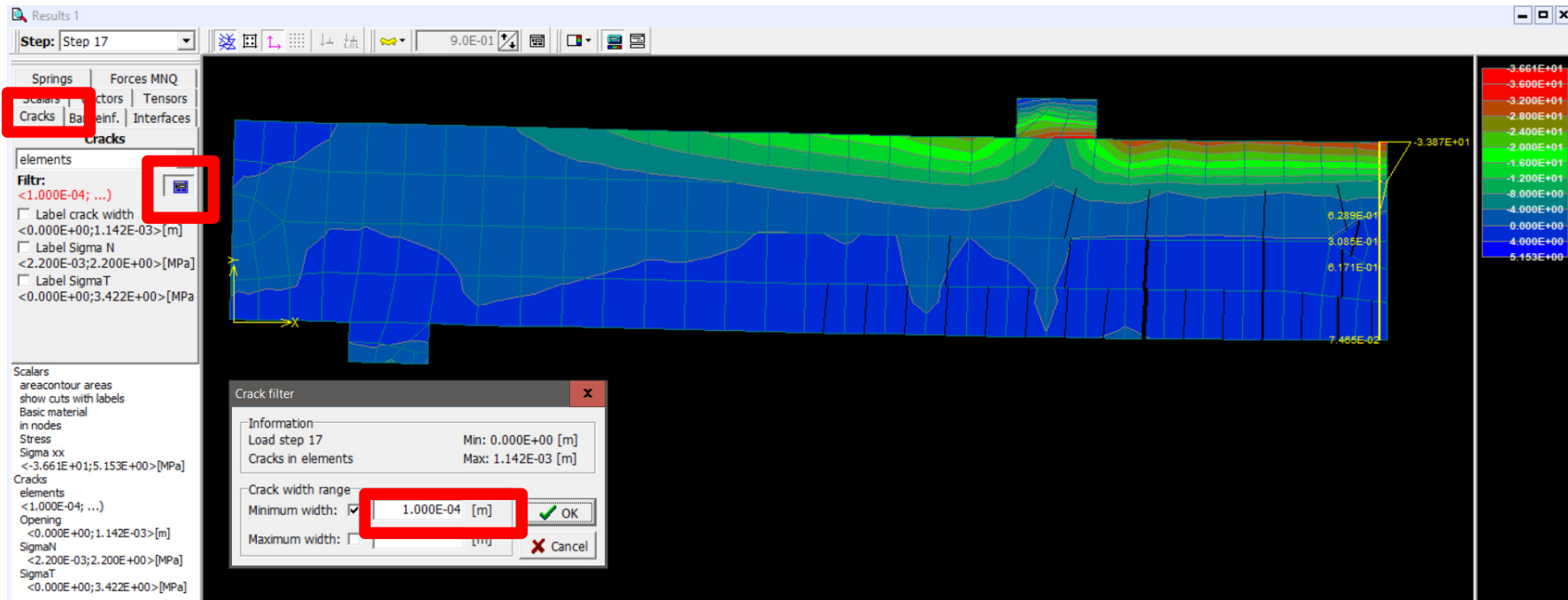
- Vybrat zatěžovací krok => volba Scalars
- Zvolit požadovanou veličinu a způsob zobrazení
- Zapnout/vypnout zobrazení výsledků v řezech
- Zvolit deformovaný/nedeformovaný tvar kce



- Tvar deformace je rozumný => **OK**

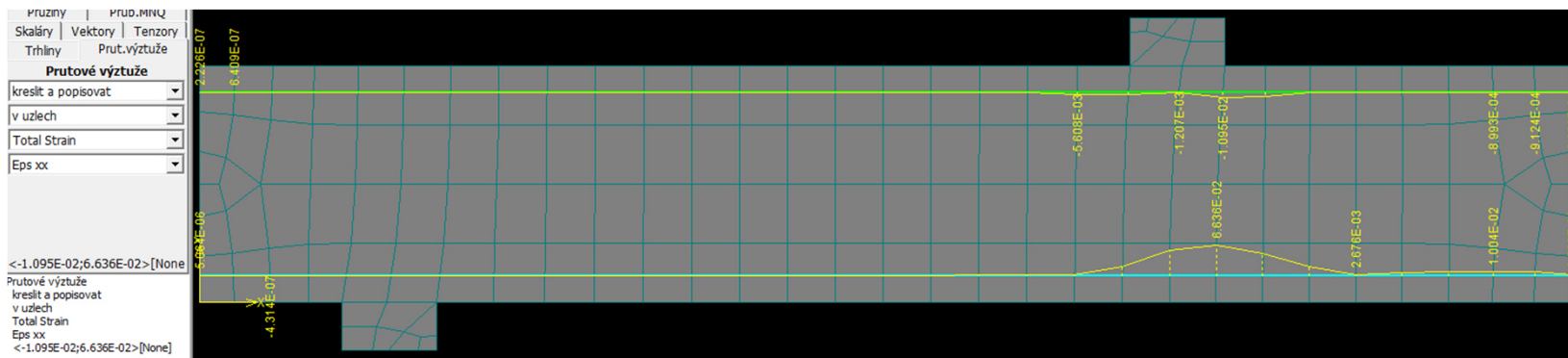
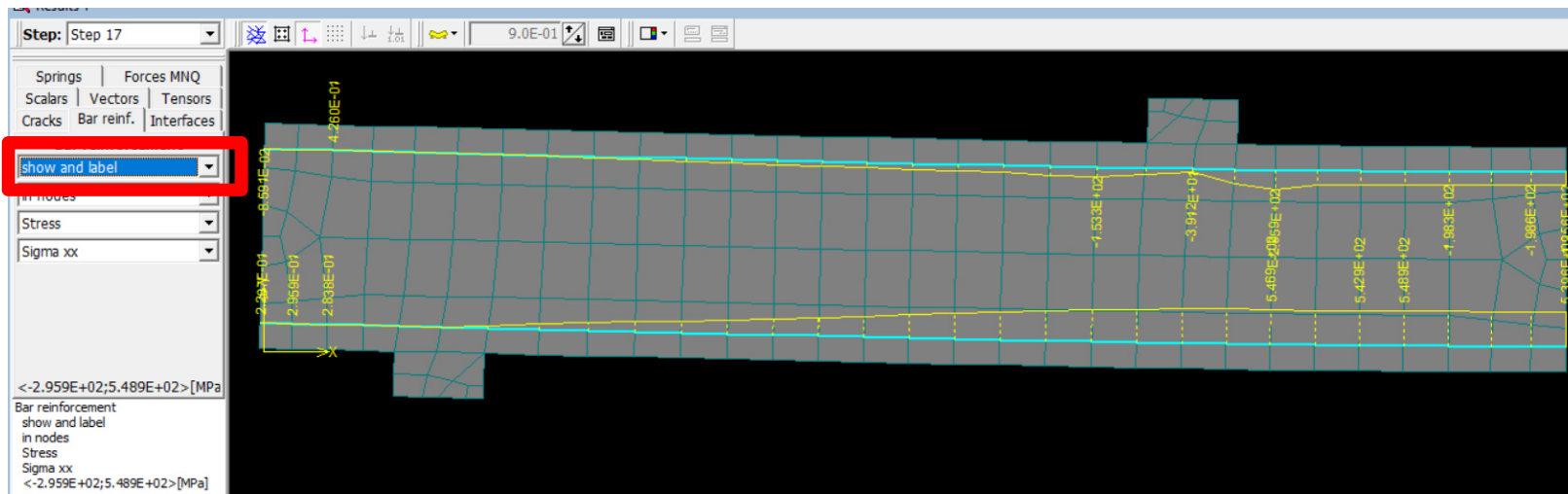
# Zobrazení trhlin

- Volba Cracks
- Vhodné je omezit šířku zobrazovaných trhlin (trhliny  $< 0,1$  mm nemají praktický smysl)



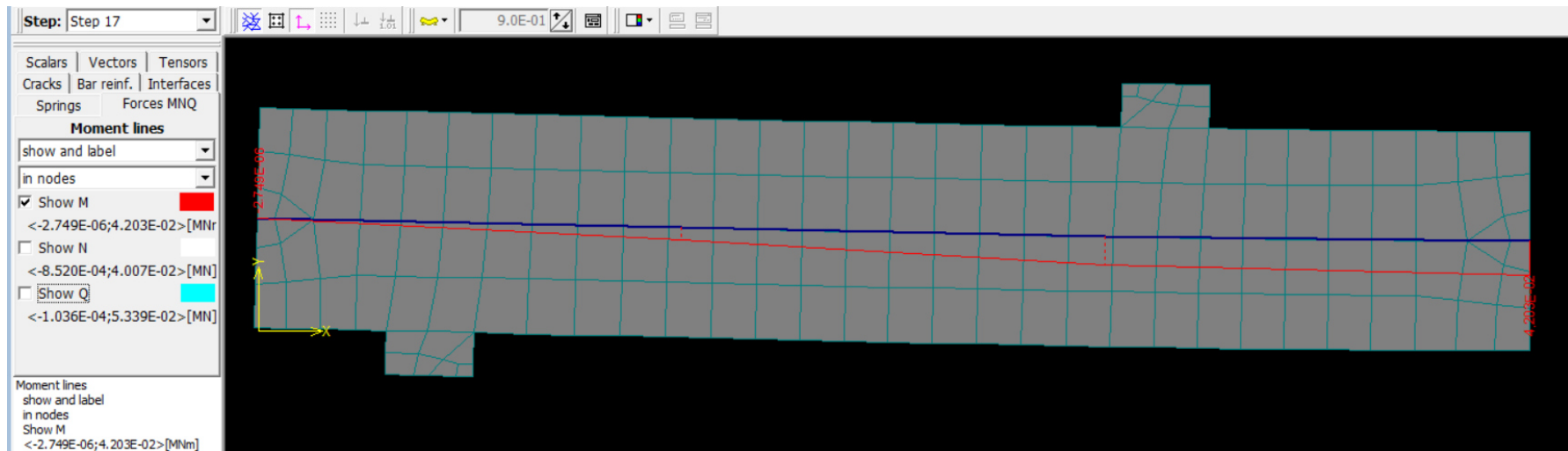
# Napětí a přetvoření ve výztuži

- Volba Bar reinforcement
- Show and label



# Vnitřní síly

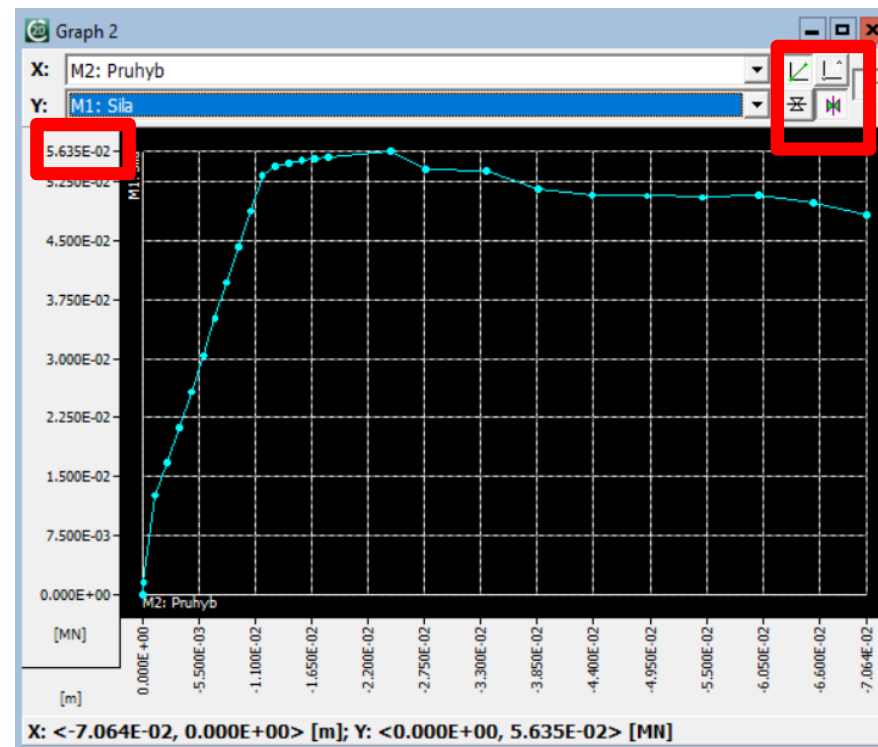
- Volba Forces MNQ
- Show and label
- Vybrat veličinu



- $M_{\max} = 42 \text{ kNm}$  – odpovídá odhadu  $\Rightarrow$  **OK**

# Grafy

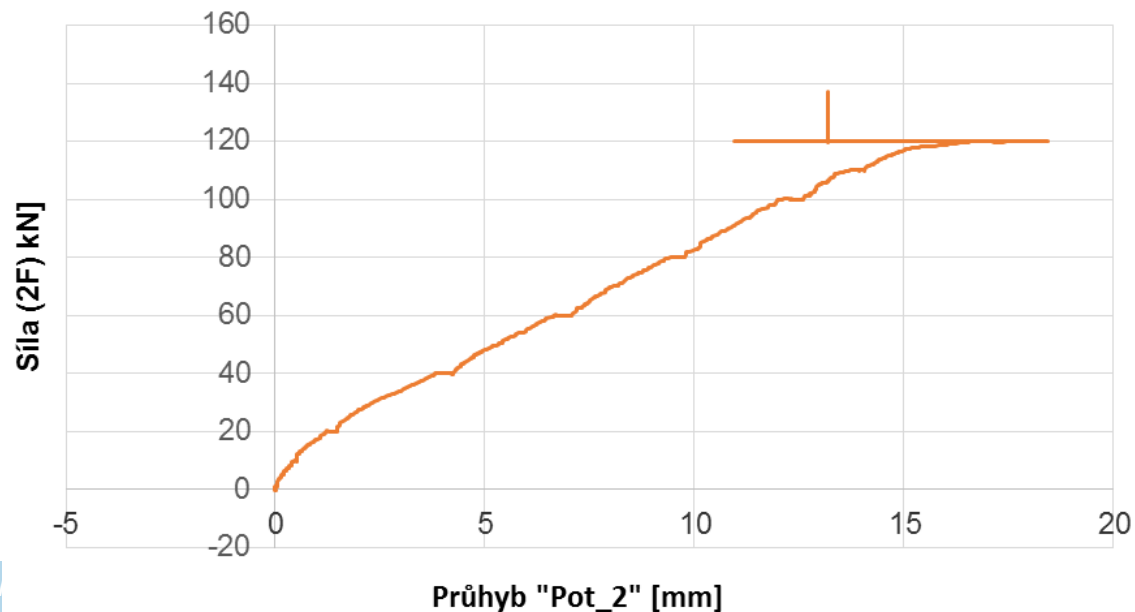
- Menu Windows – New – Graph
- Zvolit veličiny, možno obrátit osy
- Max. přenesená síla 56,3 kN => **OK**



# Porovnání s výsledky zkoušky

- Max. síla odpovídá ( $56 \times 2 \approx 120$  kN)
- Lineární chování do průhybu cca 15 mm – odpovídá
- Průhyb naměřený metrem před destrukcí cca 30 mm – odpovídá
- Rozdíly – skutečné vs. průměrné materiálové vlastnosti

Trámec 1\_4: Síla (2F) v závislosti na průhybu





# Úkol

- Schéma kce (zadání s Vašimi hodnotami)
- Odhadnout  $F_{Rm}$  pro zadaný nosník
- Stáhnout a nainstalovat Atenu
- Provést analýzu pro nosník dle Vaše zadání
- Vytisknout a přinést graf Síla-Průhyb
- Porovnat odhadnutou a spočtenou  $F_{Rm}$

