

# VYZTUŽOVÁNÍ PORUCHOVÝCH OBLASTÍ ŽELEZOBETONOVÉ KONSTRUKCE: NÁVRH VÝZTUŽE ZÁKLADOVÉ DESKY



Projekt: Vyztužování poruchových oblastí železobetonové konstrukce

Dílčí část: Návrh výztuže základové desky

Vypracovali: Ing. Jan Kos, CSc.

Ing. Alena Horská

ČVUT v Praze, Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí

Thákurova 7, 166 29 Praha 6 - Dejvice

Podpora: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy České republiky

Karmelitská 529/5, 118 12 Praha 1

Datum: 2017



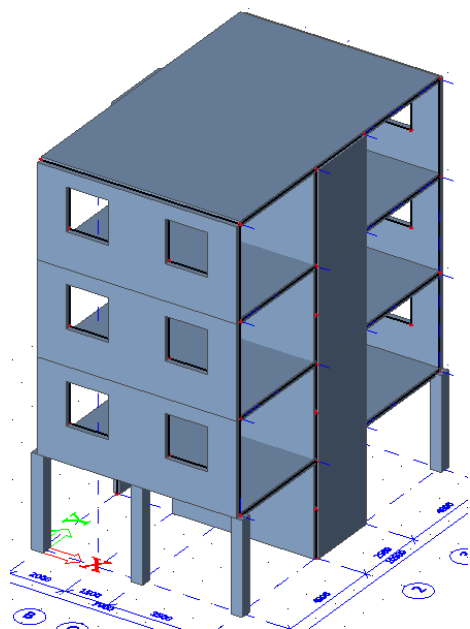
## Obsah

Obsah .....	- 1 -
1 Zadání úlohy .....	- 2 -
2 Návrh výztuže základové desky .....	- 2 -
2.1 Stanovení zatížení konstrukce horní stavby .....	- 3 -
2.2 Tvorba výpočetního modelu horní stavby .....	- 4 -
2.3 Výpočet reakcí horní stavby .....	- 4 -
2.4 Geometrie základové desky, materiálové charakteristiky, krycí vrstva .....	- 7 -
2.5 Tvorba výpočetního modelu základové desky v GEO5 .....	- 9 -
2.6 Vnitřní síly, deformace a kontaktní napětí základové desky .....	- 9 -
2.7 Rozdělení konstrukce na vyšetřované pruhy .....	- 25 -
2.8 Stanovení dimenzačních vnitřních sil na základové desce .....	- 26 -
2.9 Návrh výztuže základové desky na ohyb, posouzení MSÚ na ohyb .....	- 29 -
2.10 Ověření konstrukčních zásad .....	- 33 -
2.11 Návrh výztuže základové desky na protlačení, posouzení MSÚ na protlačení .....	- 34 -
2.12 Posouzení MSP na deformace .....	- 38 -
Příloha I Tvorba výpočetního modelu v softwaru GEO5 .....	- 39 -
Reference .....	- 69 -

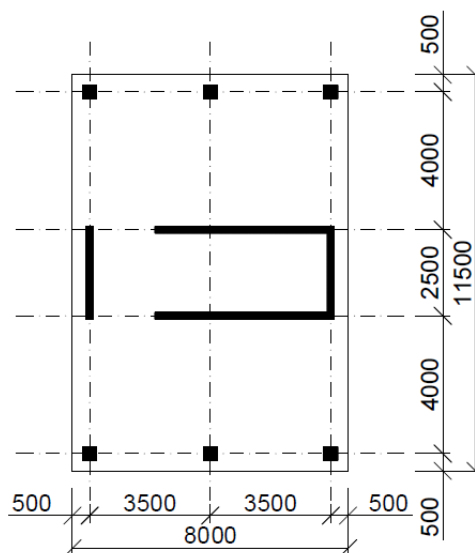


## 1 Zadání úlohy

Navrhněte výztuž základové desky pod čtyřpodlažní nepodsklepenou budovou. Návrh konstrukcí horní stavby není předmětem této úlohy.



Obr. 1 Model konstrukce horní stavby [2]



Obr. 2 Tvar základové desky

## 2 Návrh výztuže základové desky

Principiálně je návrh výztuže základové desky velmi podobný návrhu stropní desky. Na rozdíl od stropní desky, kde je jednoznačně definováno zatížení konstrukce a podpory, u základových desek je role zatížení a podpor méně rozlišitelná. K definování zatížení a podpor lze přistupovat dvěma způsoby:

- Zatížením je zemní tlak (kontaktní napětí od zeminy) a směřuje svisle vzhůru. Podporami jsou pak reakce od svislých nosných konstrukcí horní stavby, které jsou do desky uloženy.
- Zatížením jsou reakce od horní konstrukce. Podloží základové desky má potom funkci celoplošné podpory, jejíž tuhost je určena právě vlastnostmi podloží.

Oba přístupy platí zároveň a nevylučují se. Z obou pohledů je zřejmé, že zatížení a reakce (ať už k nim přistupujeme jakkoliv) jsou síly vstupující do konstrukce, které musí být v rovnováze a v konstrukci vyvozují vnitřní síly, na něž se dimenzuje vyztužení.



Dalším rozdílem v návrhu stropní a základové desky je postup při ověření protlačení, kdy vlivem zemního tlaku u základové desky můžeme redukovat posouvající sílu, která působí ve prospěch protlačení. Liší se také úhel tlakové diagonály, který ovlivňuje délku kontrolovaného obvodu.

Postup návrhu výztuže základové desky se obecně provádí v těchto krocích:

- 1) Stanovení zatížení konstrukce horní stavby
- 2) Tvorba výpočetního modelu horní stavby
  - idealizace konstrukce horní stavby
  - aplikace zatížení
  - definování podpor konstrukce
- 3) Výpočet reakcí horní stavby
- 4) Definování geometrie základové desky, stanovení materiálových charakteristik, stanovení krycí vrstvy
- 5) Tvorba výpočetního modelu základové desky
  - idealizace konstrukce základové desky
  - aplikace reakcí horní stavby na desku
  - definování podloží základové desky
- 6) Výpočet vnitřních sil, deformací a kontaktních napětí
- 7) Rozdělení konstrukce na vyšetřované pruhy
- 8) Stanovení dimenzačních vnitřních sil na základové desce
- 9) Návrh výztuže základové desky na ohyb, posouzení MSÚ na ohyb
- 10) Ověření konstrukčních zásad
- 11) Návrh výztuže základové desky na protlačení, posouzení MSÚ na protlačení
- 12) Posouzení MSP (sednutí základu)

## 2.1 Stanovení zatížení konstrukce horní stavby

Stropní deska běžného podlaží je kromě vlastní tíhy zatížena ostatním stálým zatížením velikosti  $2,0 \text{ kN/m}^2$  a užitným zatížením velikosti  $2,5 \text{ kN/m}^2$ . Zatížení střechy i schodiště je pro jednoduchost uvažováno stejné, jako zatížení běžných podlaží. Sněhová oblast II, větrná oblast II, kategorie terénu II.

Stropní deska má tloušťku 200 mm. Stěny mají tloušťku 200 mm. Sloupy jsou čtvercového průřezu  $400 \times 400$  mm. Konstrukční výška podlaží je 3250 mm.

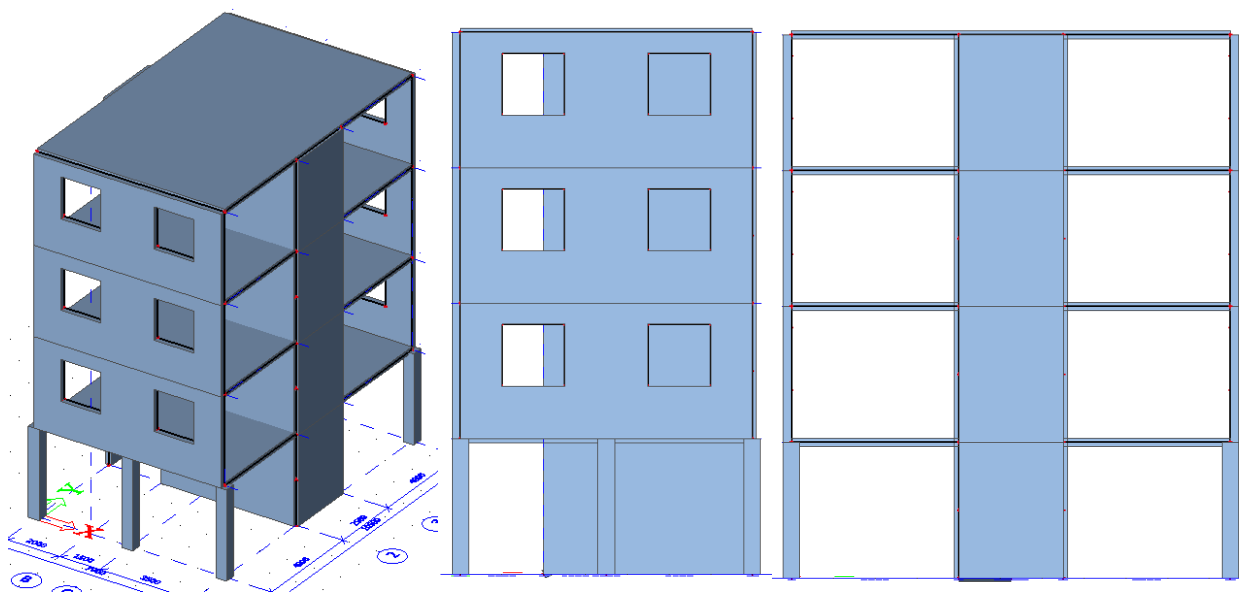
Jelikož předmětem úlohy je návrh vyztužení základové desky, není zde postup stanovení zatížení konstrukce horní stavby dále popisován.



## 2.2 Tvorba výpočetního modelu horní stavby

Výpočetní model horní stavby byl vytvořen v softwaru Scia Engineer. Podpory konstrukce byly ve výpočetním modelu definovány jako vetknutí.

Jelikož předmětem úlohy je návrh vyztužení základové desky, není zde postup tvorby výpočetního modelu horní stavby dále popisován.

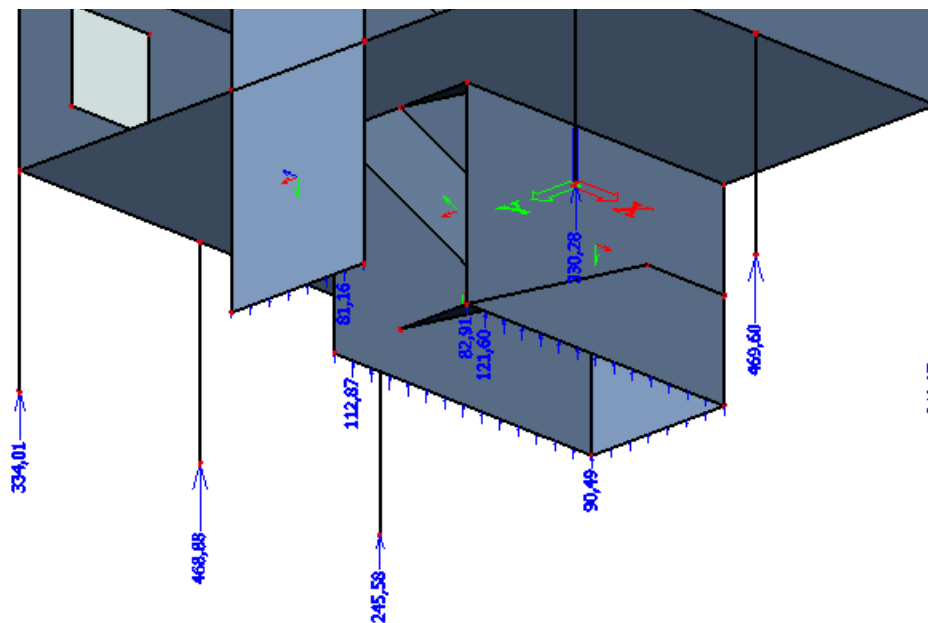


Obr. 3 Model konstrukce horní stavby [2]

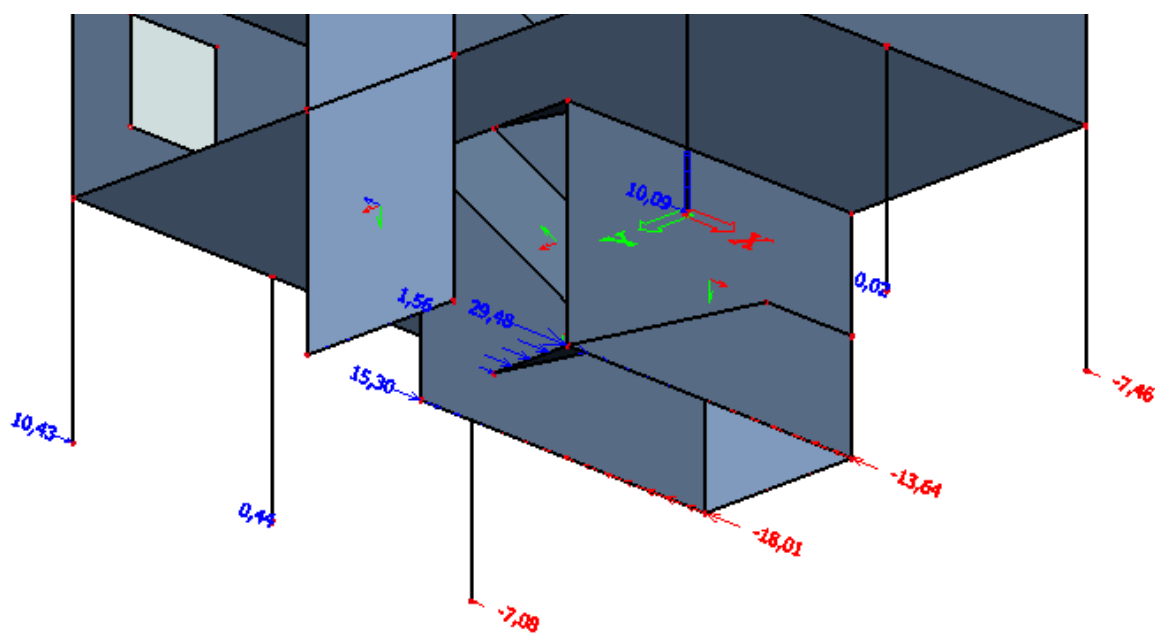
## 2.3 Výpočet reakcí horní stavby

Reakce horní stavby byly vypočítány softwarem Scia Engineer na modelu z předchozí kapitoly. Hodnoty reakcí odpovídají návrhové kombinaci zatížení 6.10 dle ČSN EN 1990 [1].

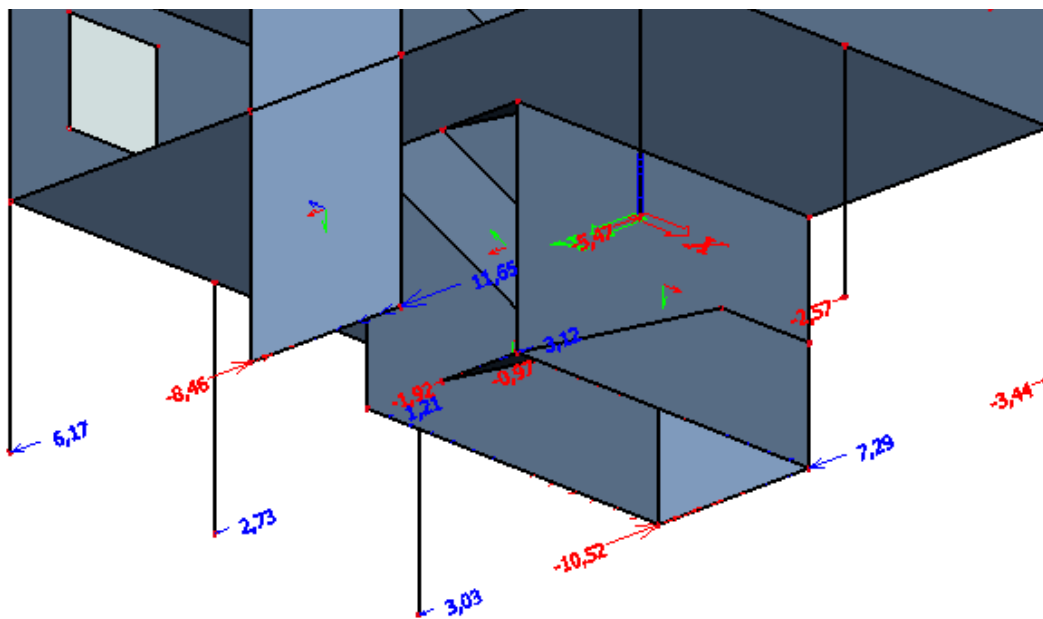
Reakce horní stavby byly následně použity jako zatížení základové desky.



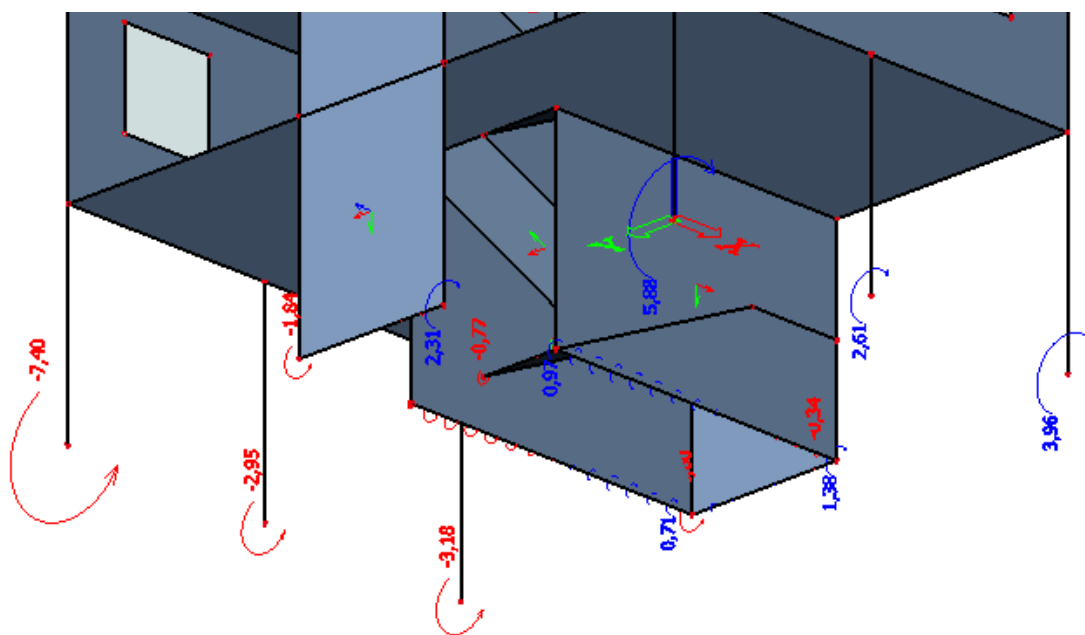
Obr. 4 Normálová síla  $N$  [kN] [2]



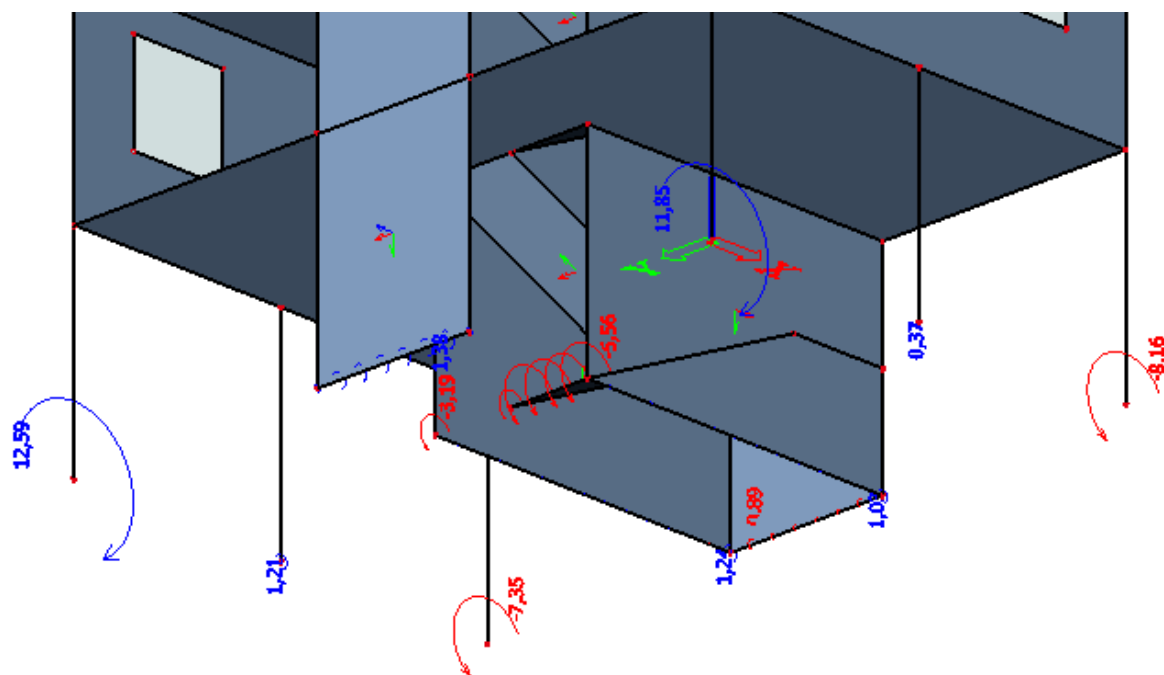
Obr. 5 Posouvající síla  $V_x$  [kN] [2]



Obr. 6 Posouvající síla  $V_y$  [kN] [2]



Obr. 7 Ohybový moment  $M_x$  [kN] [2]



Obr. 8 Ohybový moment  $M_y$  [kN] [2]

## 2.4 Geometrie základové desky, materiálové charakteristiky, krycí vrstva

Tloušťka základové desky byla zvolena 400 mm s ohledem na deformaci a protlačení. Beton základové desky je třídy C20/25, betonářská výztuž B500B. Pevnostní charakteristiky jsou:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{20}{1,5} = 13,3 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 2,2 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 434,8 \text{ MPa}$$



Velikost krycí vrstvy je stanovena následujícím postupem (pro stupeň vlivu prostředí XC2 a požadavek na trvanlivost 50 let, předpokládaný profil výztuže 10 mm):

1. V následující tabulce najdeme základní hodnotu  $c_{min,dur}$  v řádku S4 pro zadanou třídu prostředí XC2:  $c_{min,dur} = 25$  mm. (Vždy začínáme na konstrukční třídě S4)

Požadavek $c_{min,dur}$ [mm]							
K-ční třída	Stupeň prostředí						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Doporučená třída konstrukce je S4 pro návrhovou životnost 50 let.

Obr. 9 Tabulka pro stanovení krycí vrstvy [3]

2. V druhé tabulce projdeme postupně všechna kritéria, a to ve sloupci s příslušným stupněm vlivu prostředí. Na základě kritérií snižujeme/zvyšujeme konstrukční třídu a zároveň s ní hodnotu  $c_{min,dur}$ .
  - Požadujeme návrhovou životnost 50 let – konstrukční třída se nemění,  $c_{min,dur} = 25$  mm
  - Pevnostní třída C20/25 není vyšší než C35/45 – konstrukční třída se nemění,  $c_{min,dur} = 25$  mm
  - Jedná se o deskovou konstrukci – snižuje se konstrukční třída z S4 na S3,  $c_{min,dur} = 20$  mm
  - U monolitické desky není zajištěna zvláštní kontrola kvality výroby betonu – konstrukční třída se nemění,  $c_{min,dur} = 20$  mm

Kritérium	Třída konstrukce						
	Stupeň vlivu prostředí podle tabulky 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1	XD2 / XS1	XD3 / XS2 / XS3
návrhová životnost 100 let	zvětšit třídu o 2	zvětšit třídu o 2	zvětšit třídu o 2	zvětšit třídu o 2	zvětšit třídu o 2	zvětšit třídu o 2	zvětšit třídu o 2
pevnostní třída <sup>1) 2)</sup>	≥ C30/37 zmenšit třídu o 1	≥ C30/37 zmenšit třídu o 1	≥ C35/45 zmenšit třídu o 1	≥ C40/50 zmenšit třídu o 1	≥ C40/50 zmenšit třídu o 1	≥ C40/50 zmenšit třídu o 1	≥ C45/55 zmenšit třídu o 1
deskové konstrukce (poloha výztuže není ovlivněna výrobním postupem)	zmenšit třídu o 1	zmenšit třídu o 1	zmenšit třídu o 1	zmenšit třídu o 1	zmenšit třídu o 1	Zmenšit třídu o 1	zmenšit třídu o 1
zajištěna zvláštní kontrola kvality výroby betonu	zmenšit třídu o 1	zmenšit třídu o 1	zmenšit třídu o 1	zmenšit třídu o 1	zmenšit třídu o 1	Zmenšit třídu o 1	zmenšit třídu o 1

Obr. 10 Tabulka pro stanovení krycí vrstvy [3]



3. Stanovíme  $c_{min}$ :

$$c_{min} = \max(c_{min,b}; c_{min,dur}; 10 \text{ mm})$$

$$c_{min} = \max[10; 20; 10 \text{ mm}] = 20 \text{ mm}$$

kde  $c_{min,b}$  je profil výztuže.

4. Stanovíme  $c_{nom}$ :

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

$$c_{nom} = 20 + 10 = 30 \text{ mm}$$

kde  $\Delta c_{dev}$  je pro monolitickou konstrukci 10 mm.

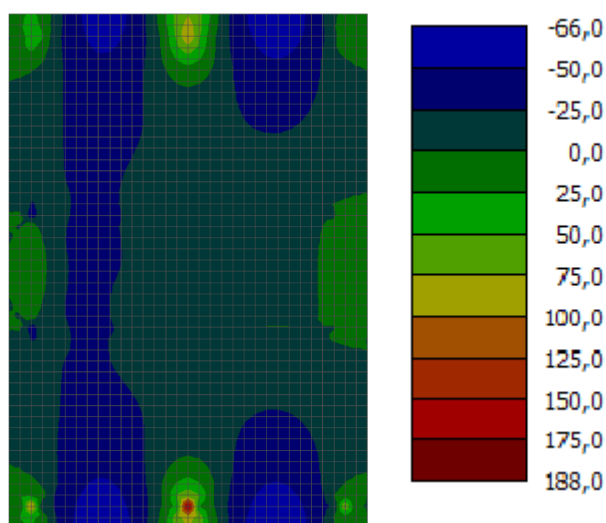
5. Navržená krycí vrstva je tedy 30 mm.

## 2.5 Tvorba výpočetního modelu základové desky v GEO5

Výpočet vnitřních sil na základové desce byl proveden v programu GEO5. Podrobný popis ovládání programu je na příkladu zadané základové desky uveden v Příloze I.

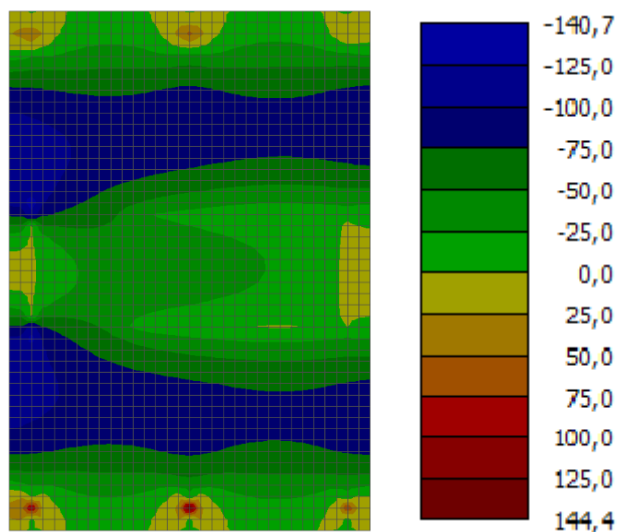
## 2.6 Vnitřní síly, deformace a kontaktní napětí základové desky

Pro dimenzování ohybové výztuže byly vykresleny vnitřní síly pomocí izoploch.

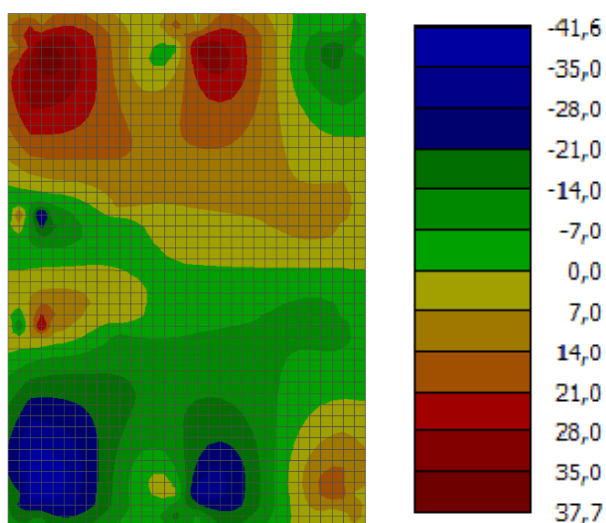


Obr. 11 Ohybový moment  $m_x$  [kNm/m]





Obr. 12 Ohybový moment  $m_y$  [kNm/m]

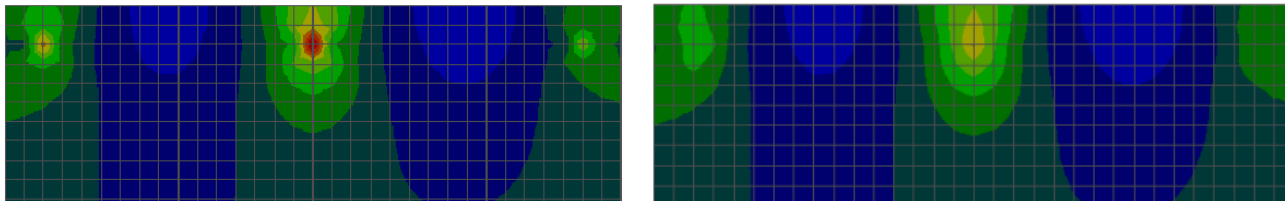


Obr. 13 Ohybový moment  $m_{xy}$  [kNm/m]

Za povšimnutí stojí vliv formy zatížení aplikovaného na základovou desku. Pro srovnání bylo nejprve v obou řadách sloupů aplikováno zatížení jako osamělá síla, následně bylo v horní řadě sloupů změněno na plošné zatížení působící na ploše 400 x 400 mm, což odpovídá reálnému působení síly ve sloupu. (Výsledky momentů na obrázcích výše tedy odpovídají modelu, kde v horní řadě sloupů je plošné zatížení na ploše 400x400 mm a v dolní řadě sloupů jsou modelovány osamělé síly.)

V případě, že zatížení je aplikováno jako osamělá síla koncentrovaná do jednoho bodu, vzniká na desce v tomto místě extrém ohybového momentu o vysoké hodnotě (např. v případě středního sloupu  $m_x = 188$

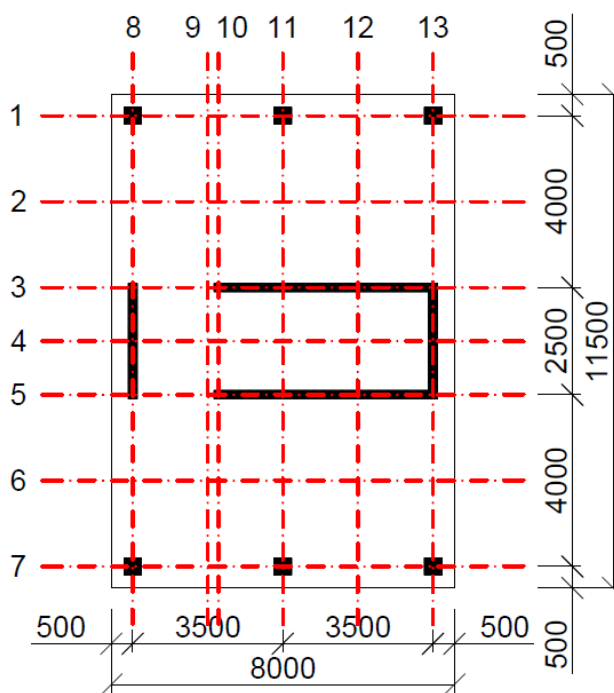
kN; obrázek vlevo). V případě, kdy zatížení bylo rozloženo do plochy o velikosti sloupu, extrém ohybového momentu se výrazně snížil (v případě středního sloupu  $m_x = 103$  kN; obrázek vpravo).



Obr. 14 Srovnání výsledků ohybového momentu  $m_x$  pro zatížení jakožto osamělé břemeno (vlevo) a plošné zatížení na ploše sloupu (vpravo)

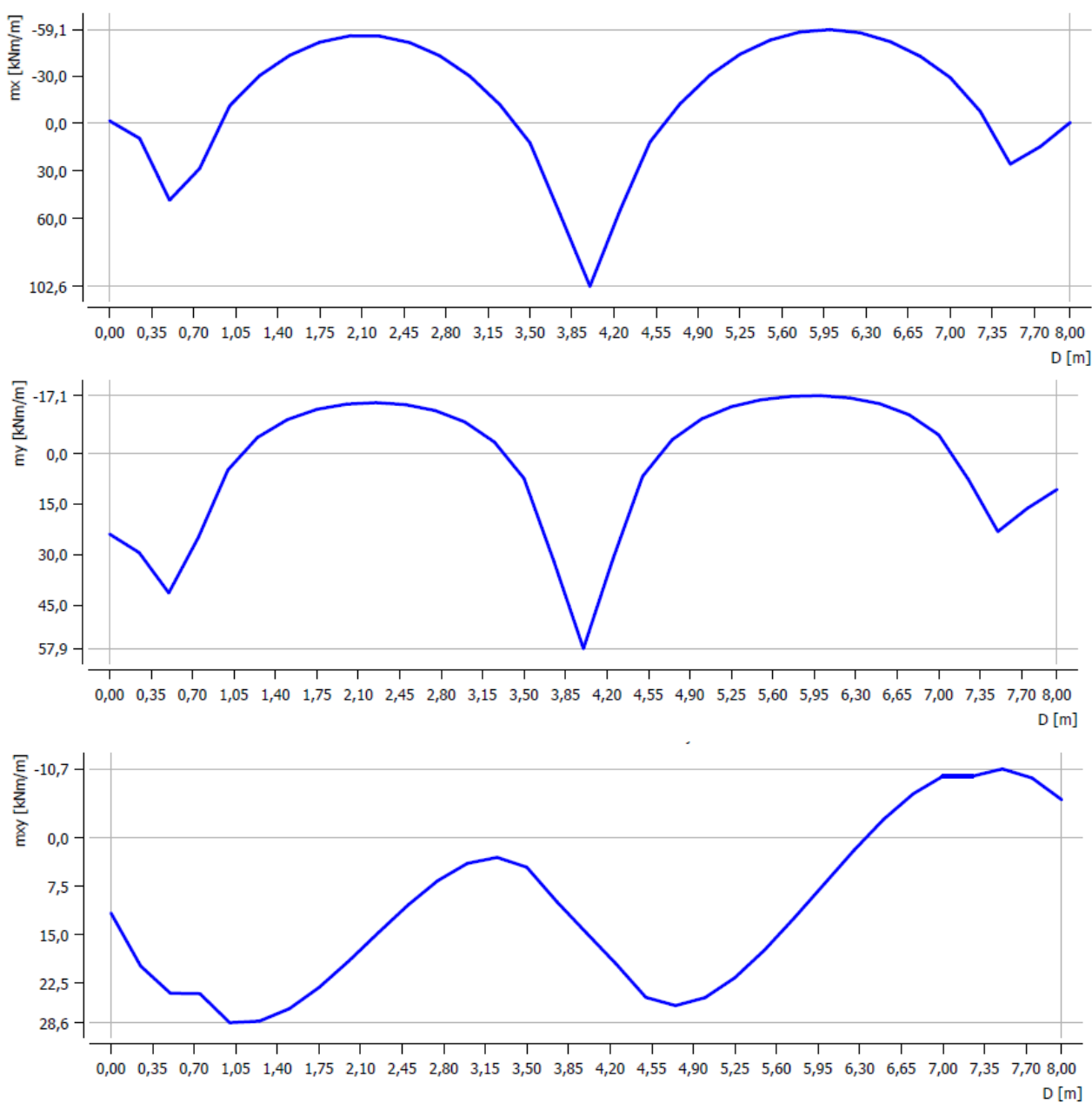
Model, kde je zatížení aplikováno na ploše sloupu, více odpovídá skutečnosti a dává tak reálnější výsledky. Proto návrh ohybové výztuže bude proveden na vnitřní síly odpovídající tomuto modelu.

Vnitřní síly byly pro přehlednost také vykresleny v řezech v místech sloupů a polovin rozpětí mezi sloupy.



Obr. 15 Místa řezů konstrukcí, kde byly vykresleny vnitřní síly

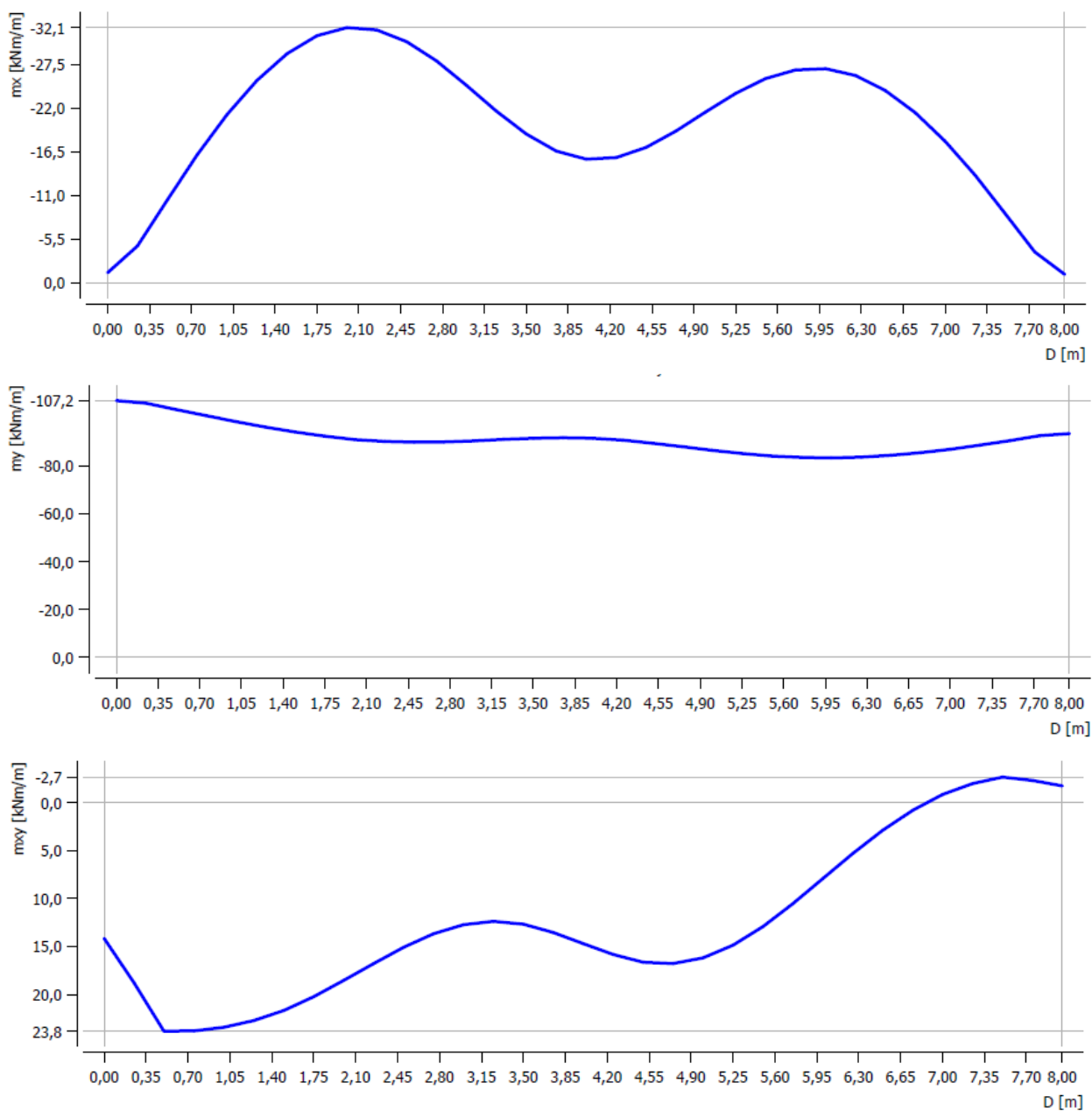
## Řez 1



Obr. 16  $m_x$ ,  $m_y$  a  $m_{xy}$  v řezu konstrukcí

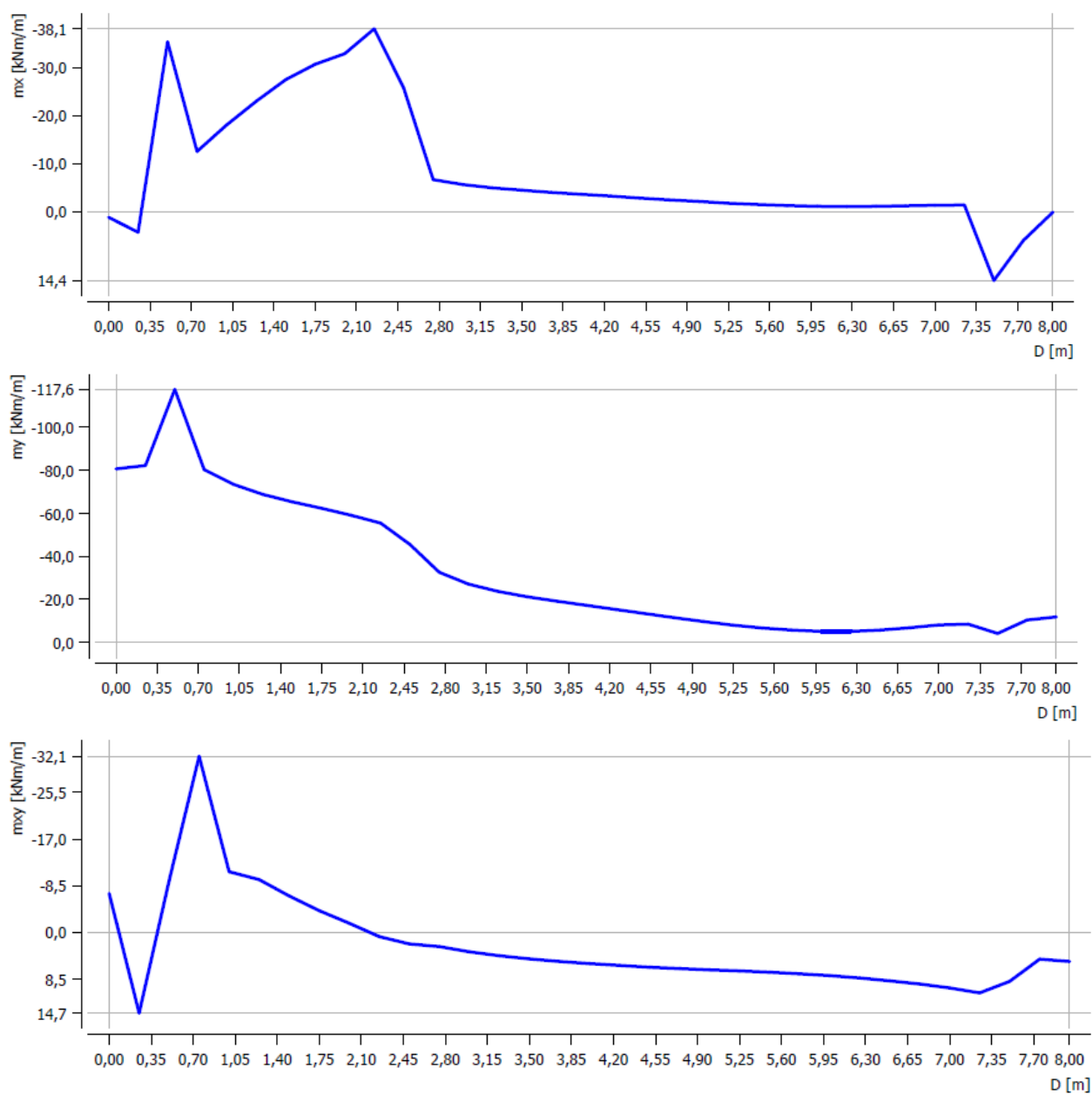


## Řez 2



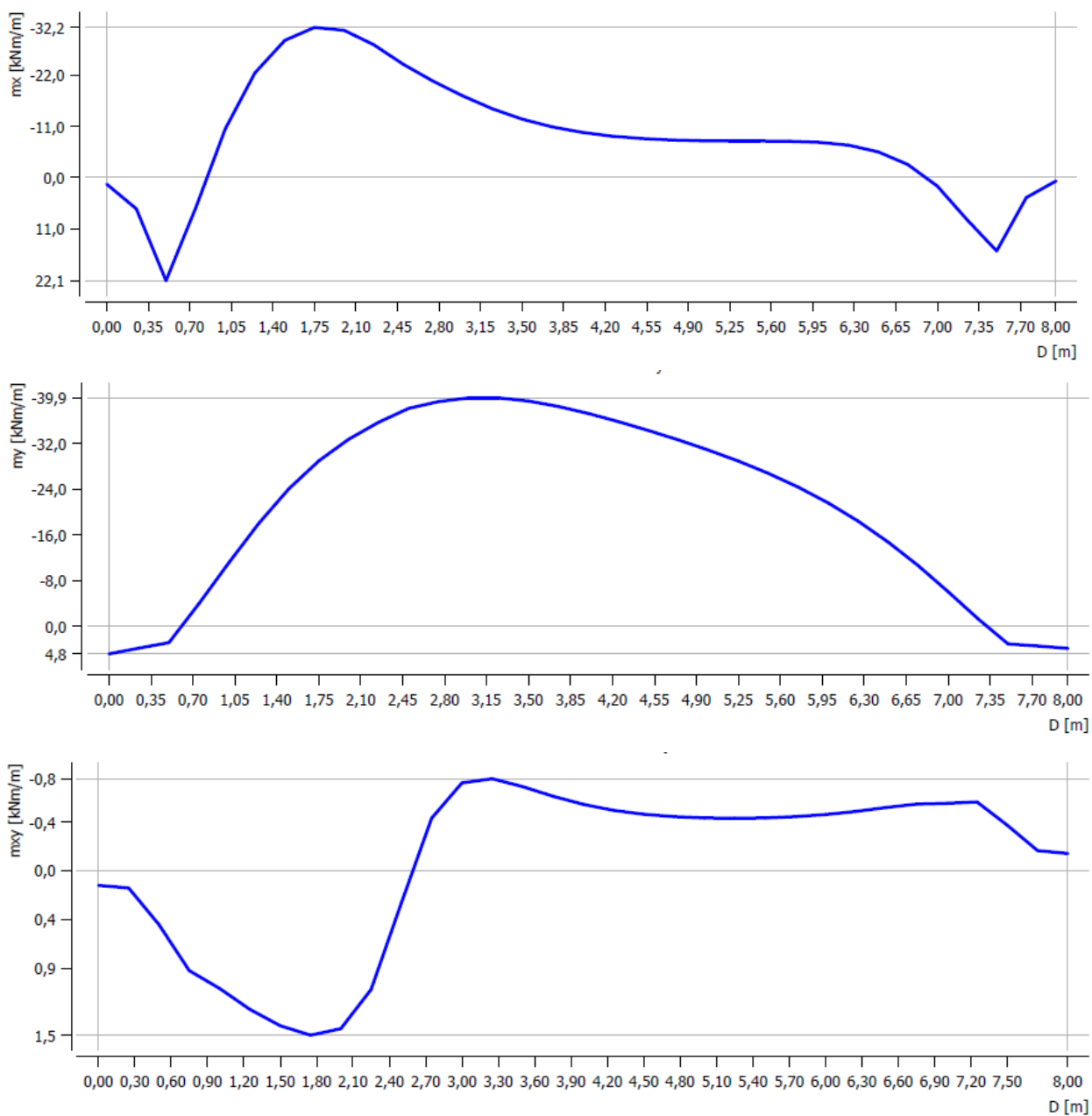
Obr. 17  $m_x$ ,  $m_y$  a  $m_{xy}$  v řezu konstrukcí

### Řez 3



Obr. 18  $m_x$ ,  $m_y$  a  $m_{xy}$  v řezu konstrukcí

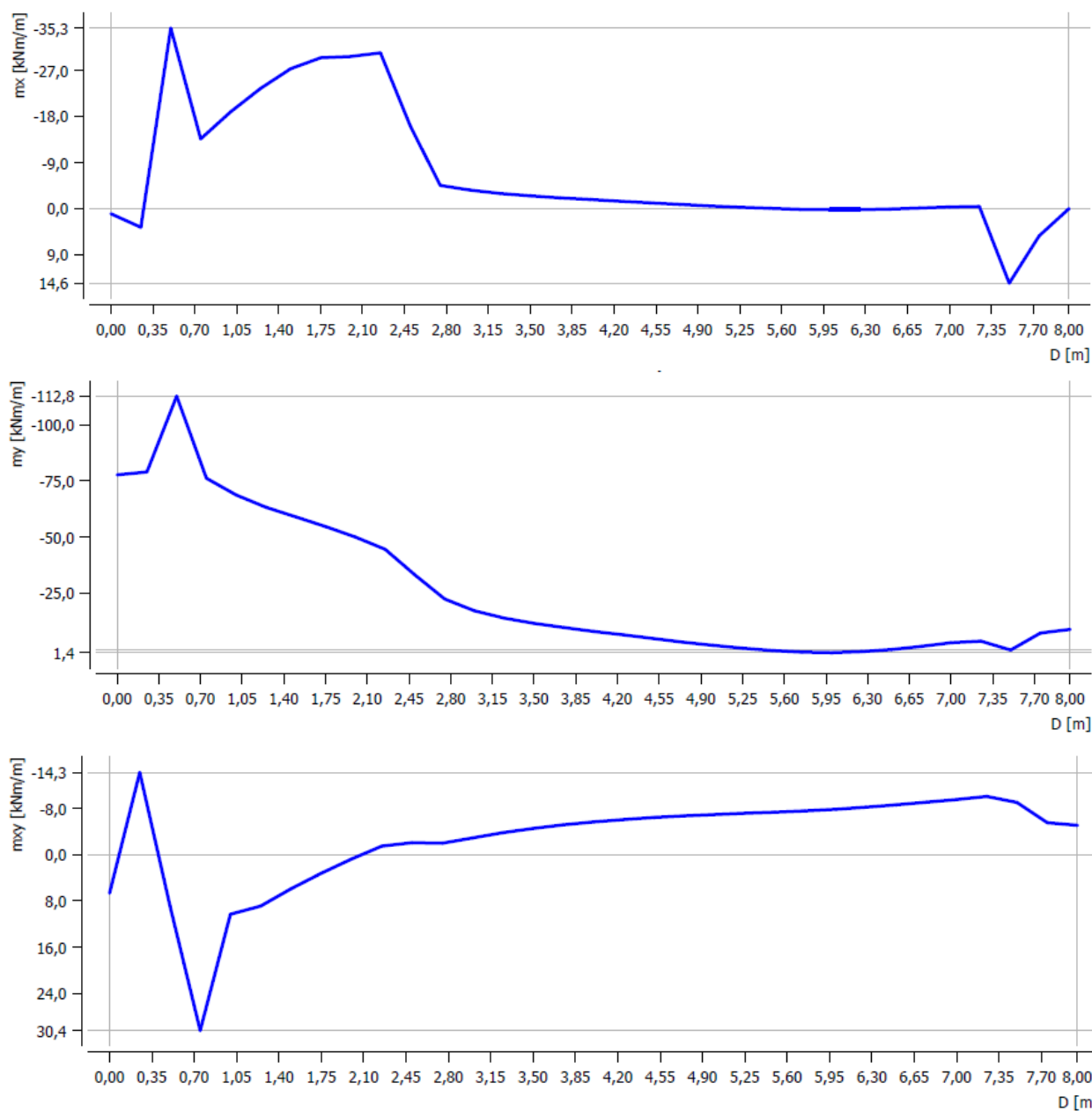
## Řez 4



Obr. 19  $m_x$ ,  $m_y$  a  $m_{xy}$  v řezu konstrukcí

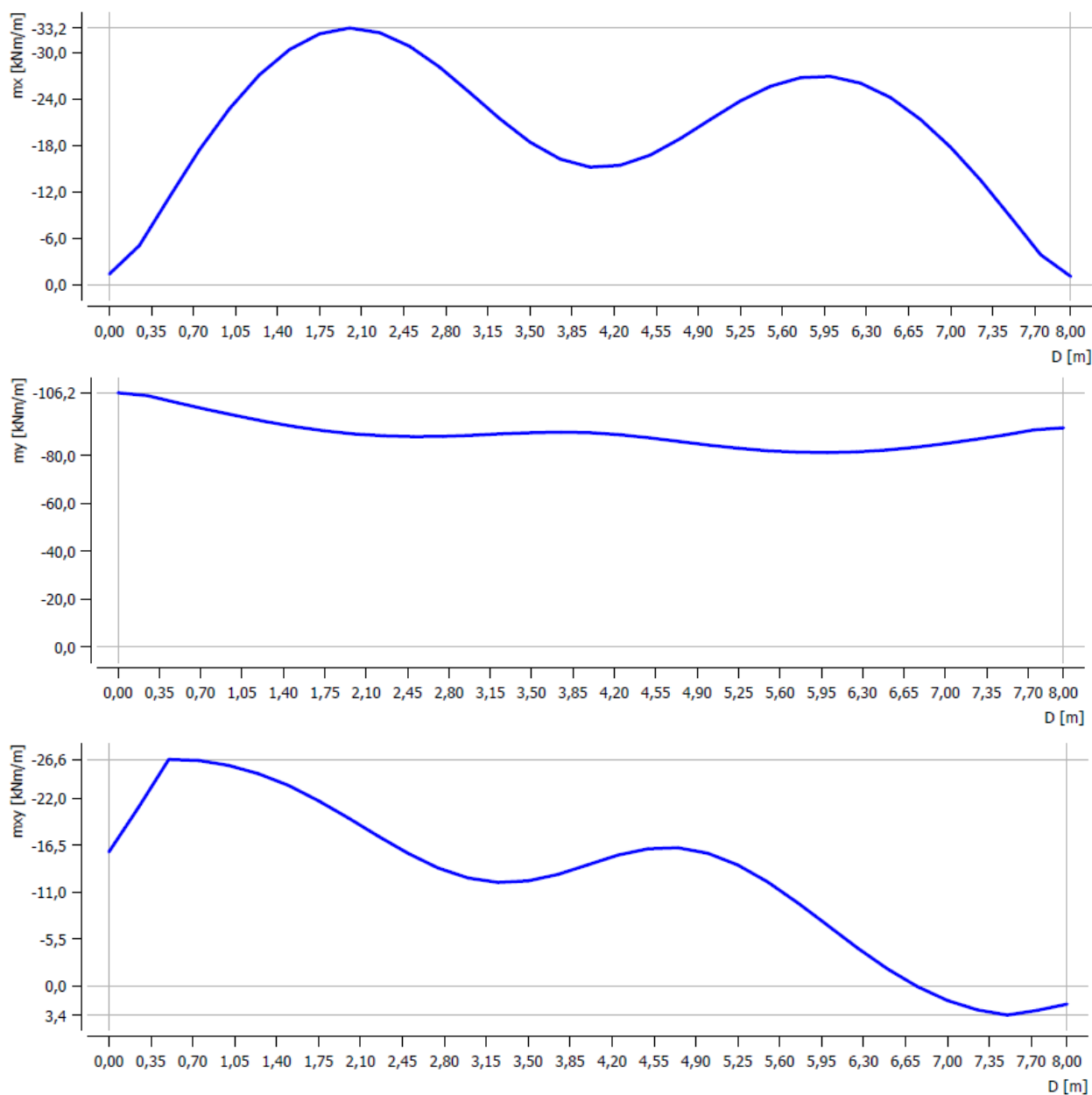


## Řez 5



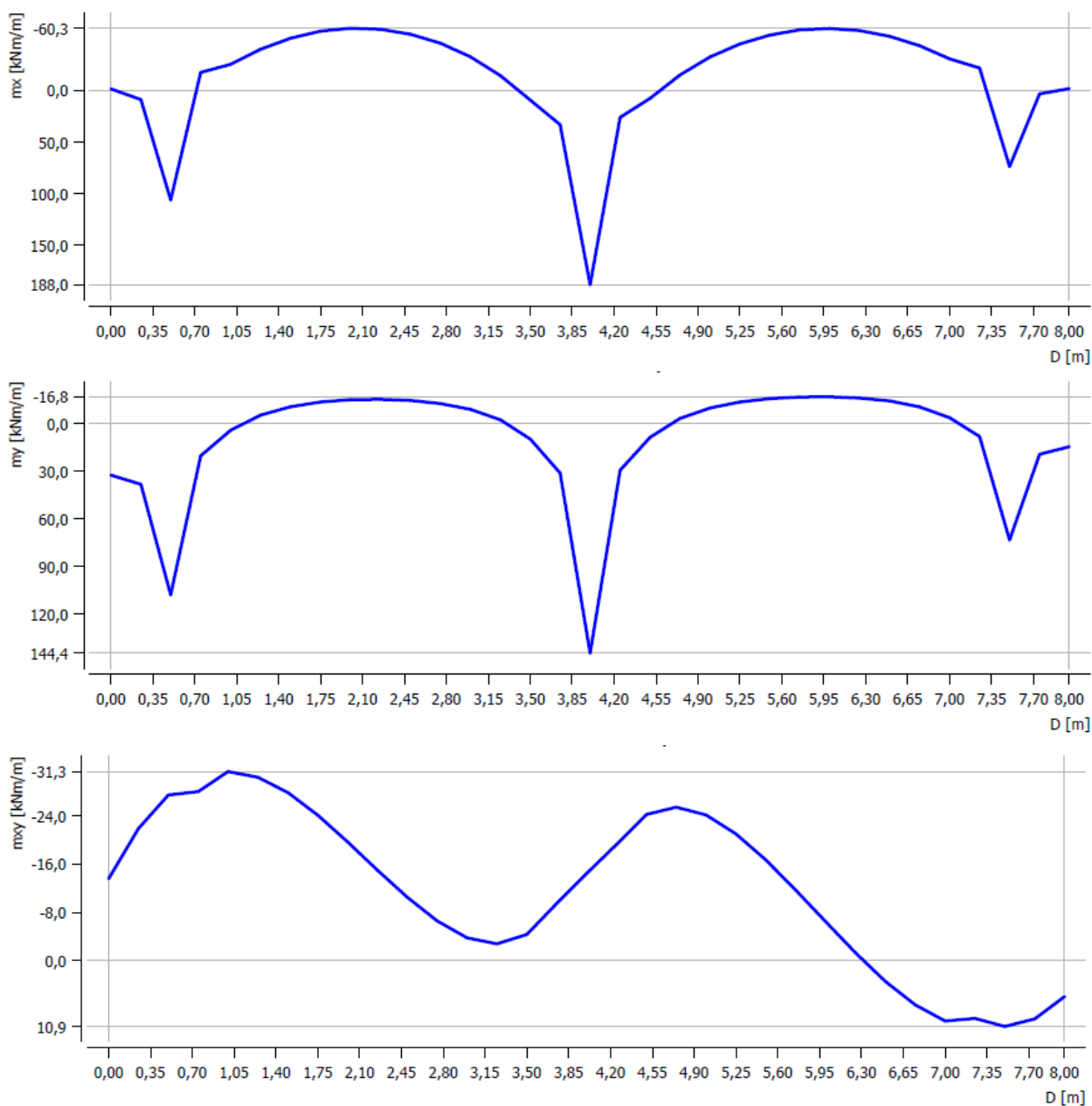
Obr. 20  $m_x$ ,  $m_y$  a  $m_{xy}$  v řezu konstrukcí

## Řez 6



Obr. 21  $m_x$ ,  $m_y$  a  $m_{xy}$  v řezu konstrukcí

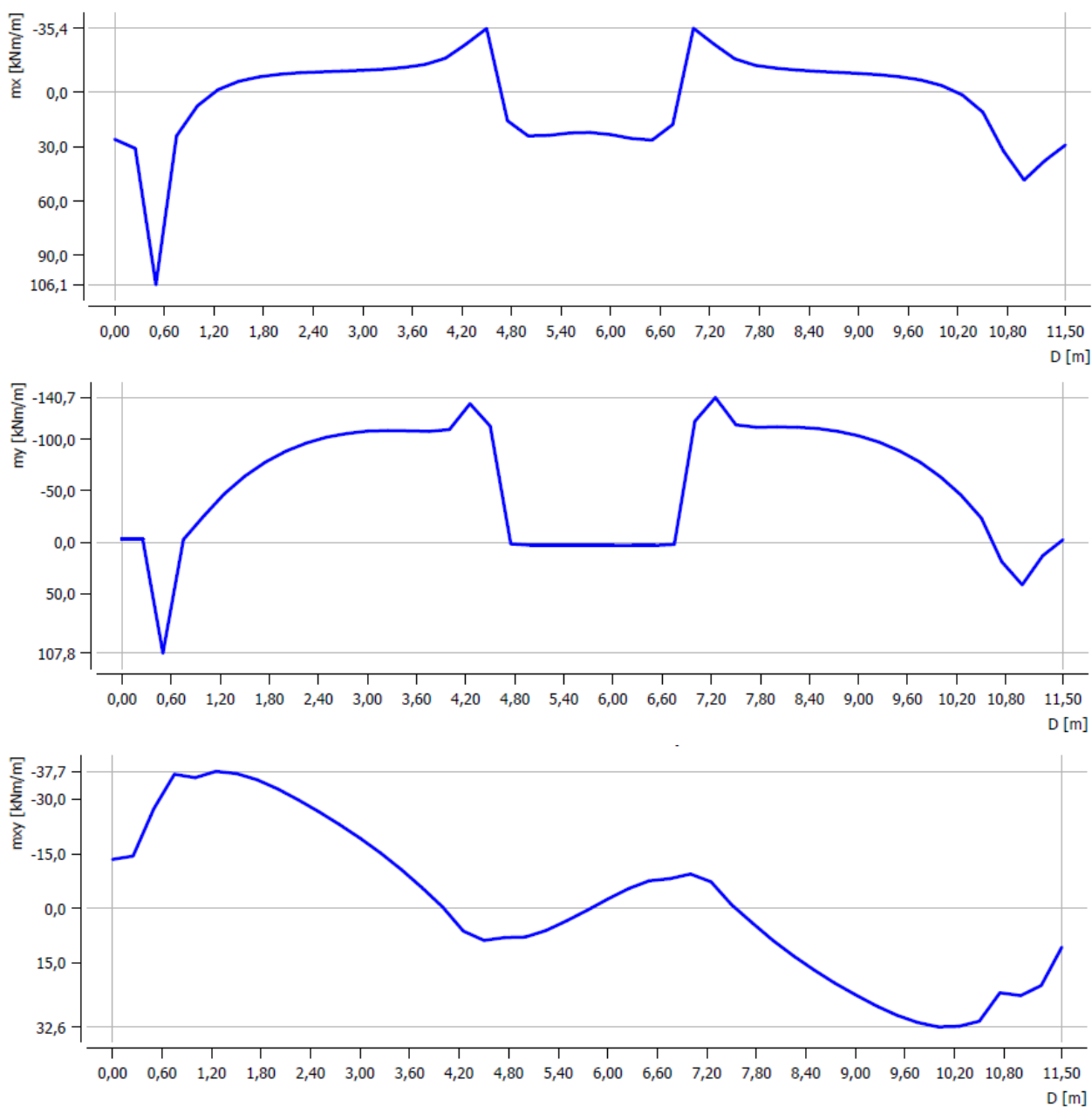
## Řez 7



Obr. 22  $m_x$ ,  $m_y$  a  $m_{xy}$  v řezu konstrukcí

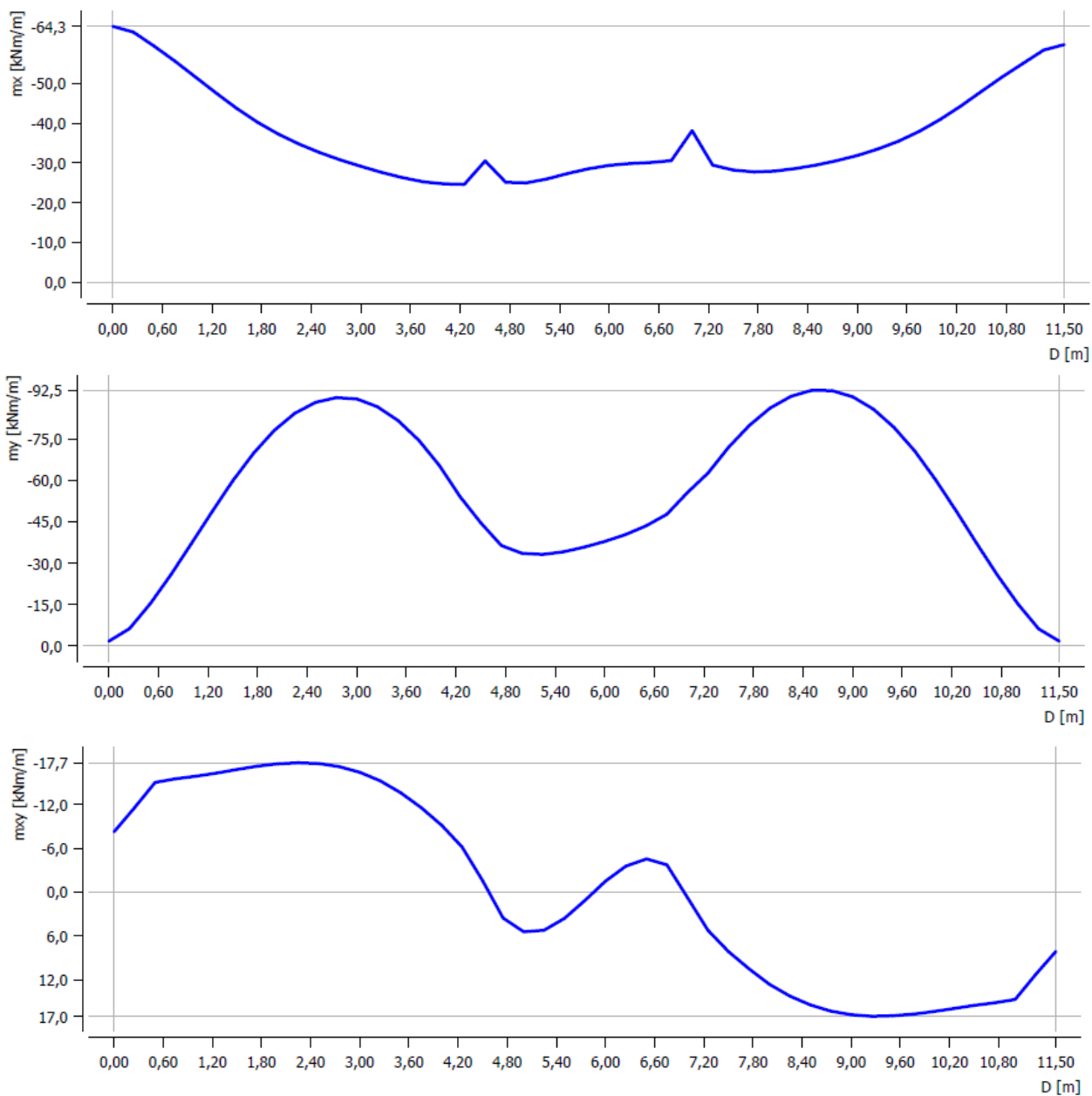


## Řez 8



Obr. 23  $m_x$ ,  $m_y$  a  $m_{xy}$  v řezu konstrukcí

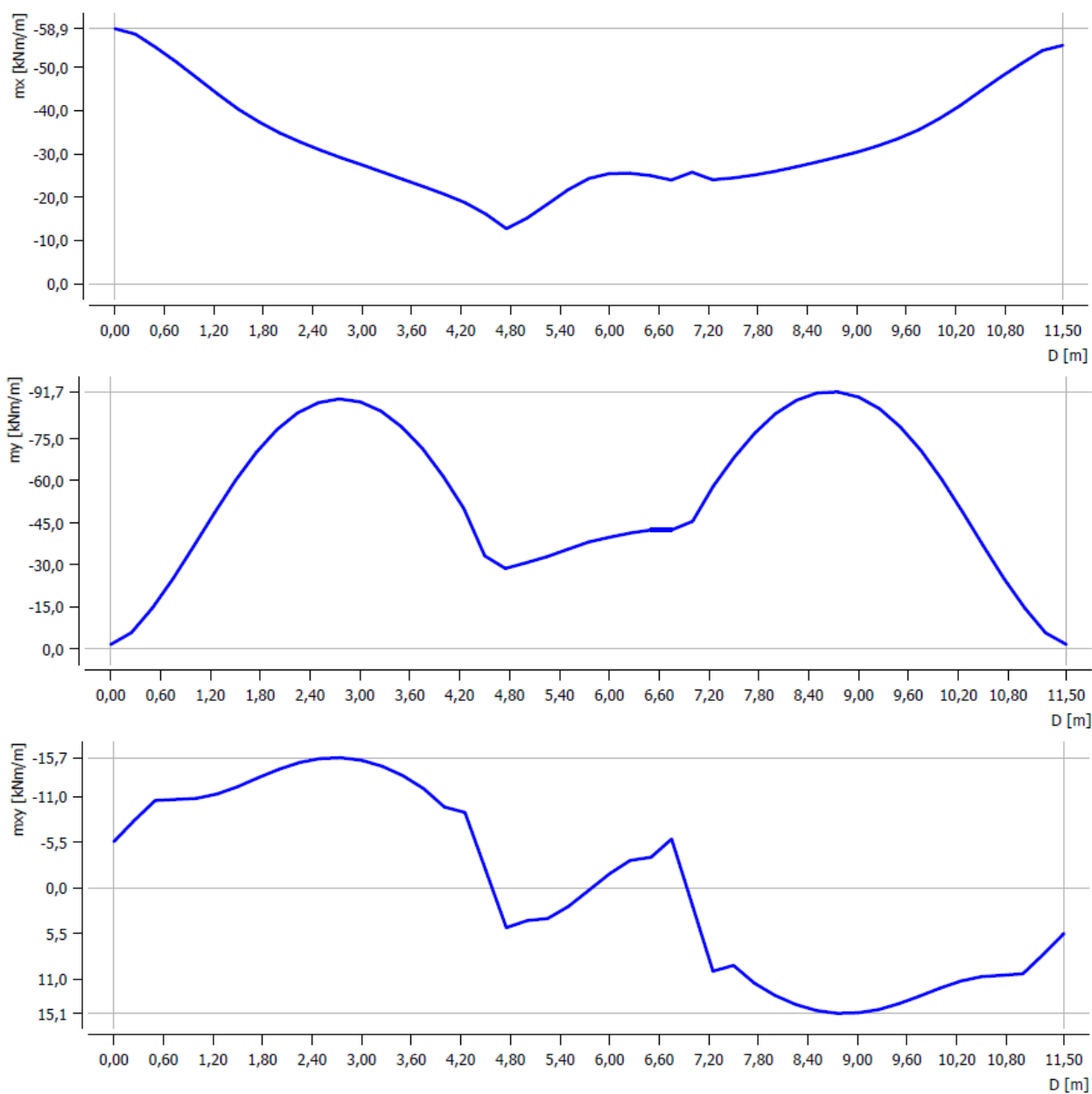
## Řez 9



Obr. 24  $m_x$ ,  $m_y$  a  $m_{xy}$  v řezu konstrukcí



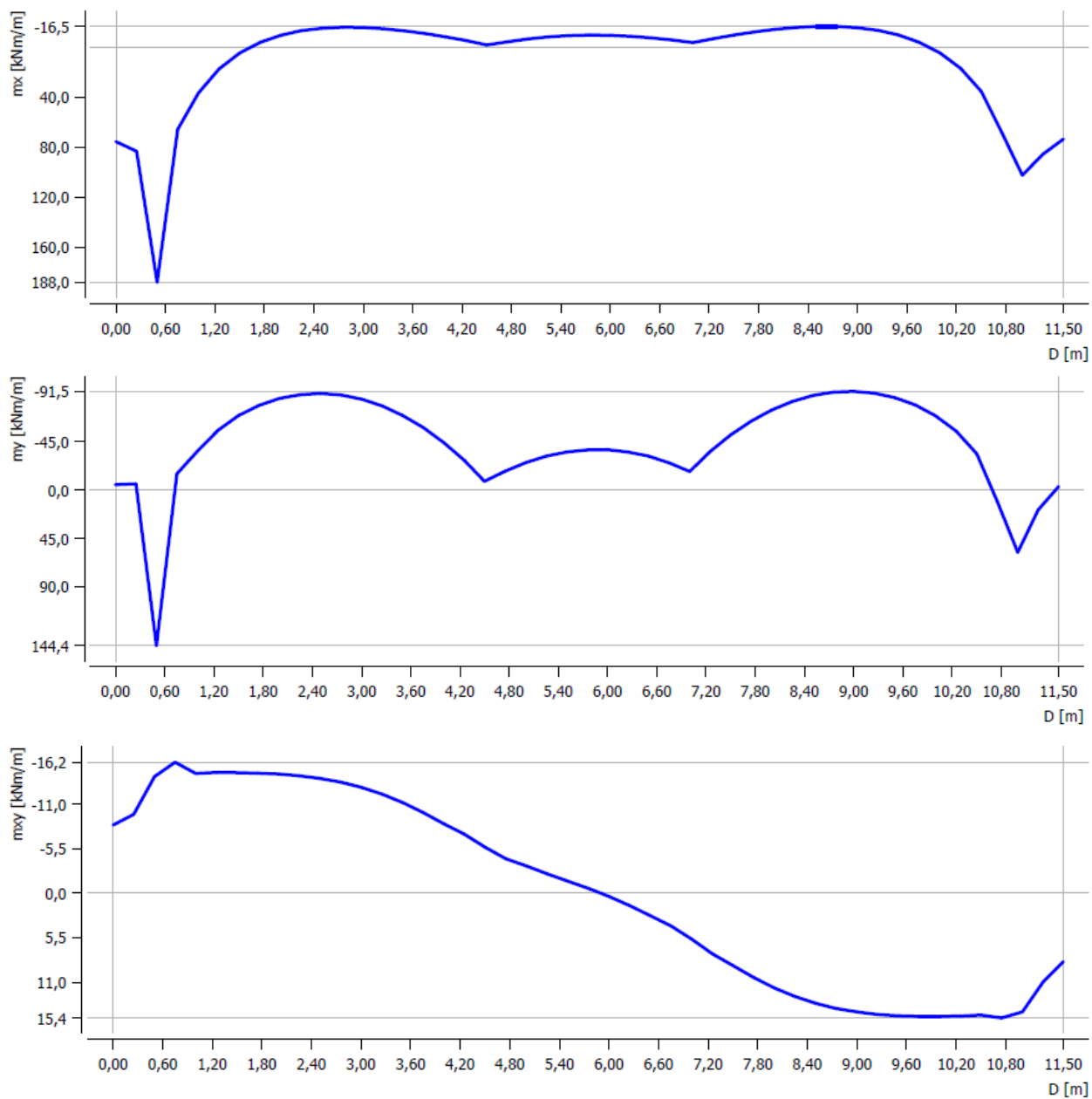
## Řez 10



Obr. 25  $m_x$ ,  $m_y$  a  $m_{xy}$  v řezu konstrukcí

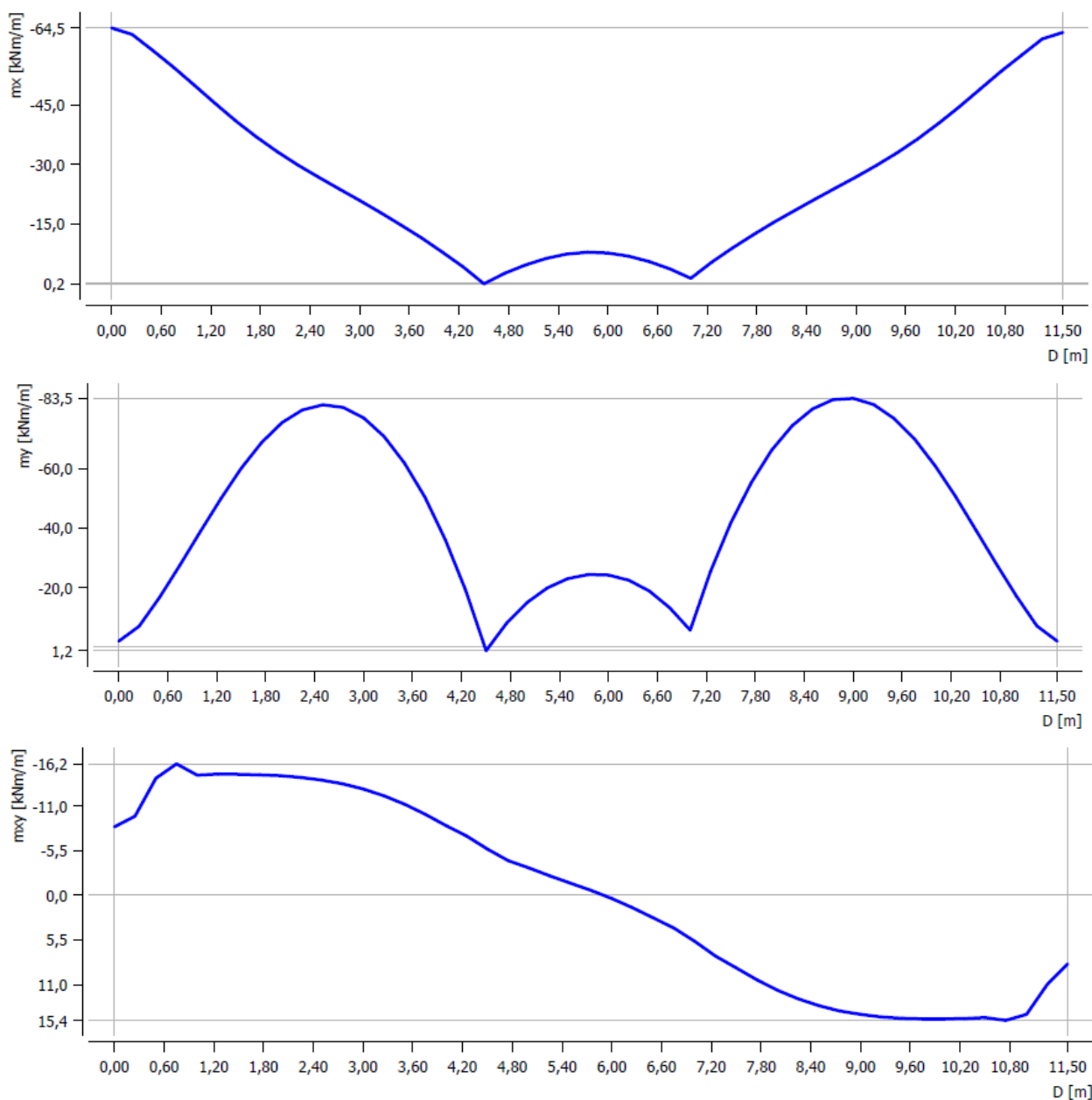


## Řez 11



Obr. 26  $m_x$ ,  $m_y$  a  $m_{xy}$  v řezu konstrukcí

## Řez 12

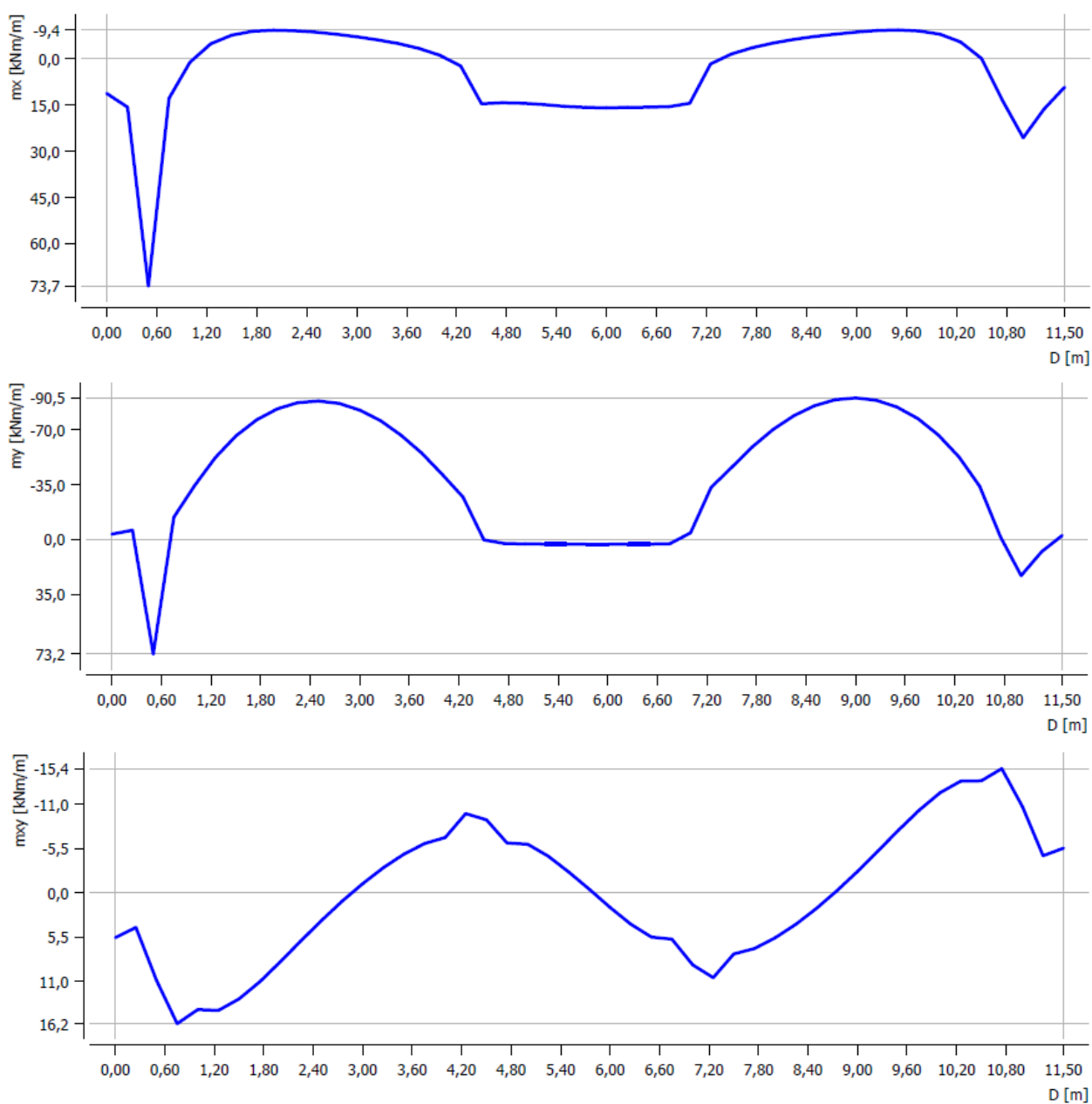


Obr. 27  $m_x$ ,  $m_y$  a  $m_{xy}$  v řezu konstrukcí





## Řez 13



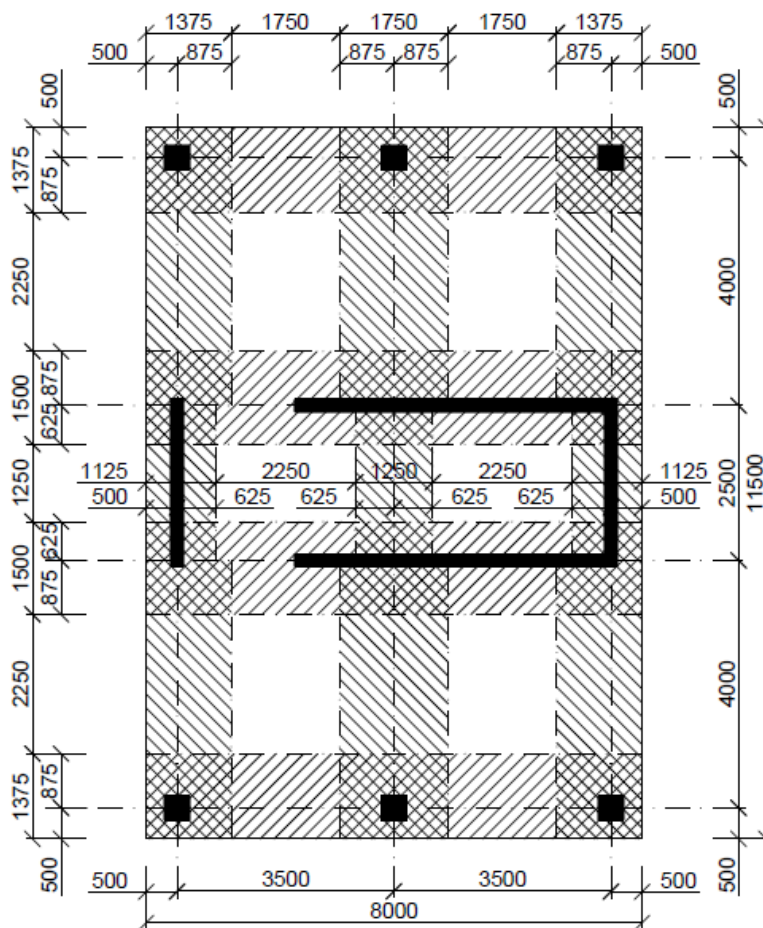
Obr. 28  $m_x$ ,  $m_y$  a  $m_{xy}$  v řezu konstrukcí

## 2.7 Rozdělení konstrukce na vyšetřované pruhy

Desková konstrukce je pro účel vyztužení ohybovou výztuží rozdělena na sloupové a středové pruhy, a to stejným postupem, jako u zjednodušených metod analýzy lokálně podepřených desek (např. metoda náhradních rámců, metoda součtového momentu). V rámci sloupového/středového pruhu je pak výztuž navržena rovnoměrně na hodnotu maximálního dimenzačního momentu.

Pro sloupové pruhy platí, že jejich šířka je v rámci jednoho pole desky rovna jedné čtvrtině kratšího z rozponů. Středové pruhy pak vyplňují zbytek plochy desky. Dělení na sloupové a středové pruhy se provádí pro oba dva směry pnutí desky.

$$b_{sloup} = \frac{1}{4} \min(l_x; l_y)$$



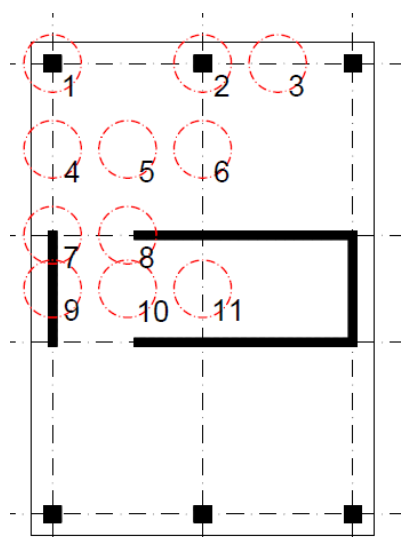
Obr. 29 Rozdělení základové desky do sloupových a středových pruhů

## 2.8 Stanovení dimenzačních vnitřních sil na základové desce

Návrh ohybové výztuže v základové desce se obecně provádí stejným způsobem jako u stropních desek.

Ohybová výztuž obousměrně pnutých desek musí obecně vykrýt účinky jak ohybového, tak krouticího momentu. Oba tyto účinky jsou vyjádřeny tzv. dimenzačním momentem. Běžně využívaný software pro analýzu desek umožňuje na konstrukci vykreslit přímo dimenzační momenty. V tomto výukovém materiálu je však z důvodu objasnění podstaty problému dimenzační moment určen ručním výpočtem z hodnot ohybového a krouticího momentu.

Pro zjednodušení bude výztuž v konstrukci rozložena symetricky; pro návrh výztuže budou proto použity hodnoty z nejzatíženějšího kvadrantu desky a výztuž navržená na tyto vnitřní síly pak bude použita i v ostatních kvadrantech desky (např. výztuž z oblasti 1 bude použita pod všemi rohovými sloupy, apod.). Výjimku tvoří oblast u jádra budovy, kde výztuž dimenzovaná na vnitřní síly oblasti 8 bude použita pod celou délkou stěny jádra a výztuž dimenzovaná na vnitřní síly v oblasti 11 bude použita v celém prostoru mezi stěnami jádra.



Obr. 30 Rozhodující oblasti na desce pro návrh výztuže

(Pozorný čtenář si všimne, že momentové extrémy mají vyšší hodnoty ve spodní řadě sloupů než v horní, přesto však ve schématu výše jsou jako rozhodující oblasti označena místa pod horní řadou sloupů. Důvodem pro to je odlišnost v zadání zatížení do výpočetního modelu. Pro srovnání bylo v horní řadě sloupů zatížení zadáno jako plošné na ploše sloupu a v dolní řadě sloupů bylo zatížení zadáno osamělým břemenem – toto se projevuje na výsledcích rozdílů v hodnotách momentových špiček v oblasti sloupů. Jak již bylo uvedeno dříve, zatížení definované jako plošné více odpovídá skutečnému chování konstrukce, proto pro dimenzování výztuže v oblasti sloupů budou použity výsledky obdržené na horní řadě sloupů.)

Pro účel návrhu ohybové výztuže jsou v rozhodujících místech konstrukce vypsány vnitřní síly v následující tabulce.

Oblast	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$m_x$ [kNm/m]	47	103	-59	-11	-32	-17	-36	-38	22	-32	-16
$m_y$ [kNm/m]	41	58	-17	-101	-89	-95	-118	-59	3	-29	-40
$m_{xy}$ [kNm/m]	24	10	-11	24	17	14	17	1	1	2	-1

Obr. 31 Ohybové a kroučící momenty na desce v rozhodujících oblastech

Kladné ohybové momenty v tabulce výše odpovídají tahu na spodní straně a tlaku na horní straně desky, což je patrné z představy o deformaci desky. Oblasti desky pod sloupy mají tendenci se vybořit směrem do zeminy - tato deformace vyvozuje tahy na spodní straně desky (např. oblast 2). Naopak oblasti desky v polích mezi sloupy mají tendenci se vlivem zemního tlaku vytlačit nahoru - tato deformace vyvozuje tahy na horní straně desky (např. oblast 5).

Dimenzační momenty zohledňují efekt kroučícího momentu a vypočítají se dle následujících vztahů uvedených v ČSN P ENV 1992-1-1:

$$m_{x,D+} = m_x + |m_{xy}|$$

$$m_{y,D+} = m_y + |m_{xy}|$$

$$m_{x,D-} = -m_x + |m_{xy}|$$

$$m_{y,D-} = -m_y + |m_{xy}|$$

Výše uvedený způsob stanovení dimenzačních momentů je jedním z několika možných metod, jejichž výsledky se mohou drobně lišit. Proto je možné, že ručním výpočtem vychází mírně jiné hodnoty, než uvádí např. software Scia Engineer v modulu Beton, který využívá Baumannovu teorii.

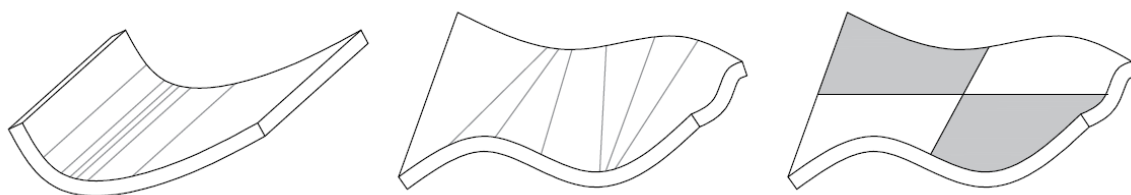
Označení „+“ v indexu dimenzačního momentu znamená, že výztuž navržená na tento moment bude umístěna ke stejnému povrchu, k jakému přísluší podle polarity ohybového momentu. Naopak označení „-“ v indexu dimenzačního momentu znamená, že výztuž navržená na tento moment bude umístěna k opačnému povrchu, než k jakému přísluší podle polarity ohybového momentu.

Na základě vztahů výše byly stanoveny dimenzační momenty, které jsou shrnuty v následující tabulce:

Oblast	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$m_{x,D+}$ [kNm/m]	71	113	-48	13	-15	-3	-19	-37	23	-30	-15
$m_{y,D+}$ [kNm/m]	65	68	-6	-77	-72	-81	-101	-58	4	-27	-39
$m_{x,D-}$ [kNm/m]	-23	-93	70	35	49	31	53	39	-21	34	17
$m_{y,D-}$ [kNm/m]	-17	-48	28	125	106	109	135	60	-2	31	41

Obr. 32 Dimenzační momenty na desce v rozhodujících oblastech

Pro pochopení rozdílu mezi ohybovými a dimenzačními momenty je nutné si uvědomit, co jejich hodnoty fyzicky reprezentují. Představme si desku namáhanou pouze ohybovým momentem v jednom směru na obrázku níže (vlevo). Tento způsob namáhání způsobuje to, že celá spodní strana prvku je tažená. Nyní si představme, že deska je namáhaná kroucením – dva diagonálně protilehlé rohy desky jsou ohýbány dolů a opačné dva rohy jsou ohýbány nahoru. Tímto namáháním docílíme, že dva diagonálně protilehlé kvadranty desky jsou tahově namáhány při horním povrchu (bílá pole na obrázku vpravo) a dva diagonálně protilehlé kvadranty jsou tahově namáhány při dolním povrchu (šedá pole na obrázku vpravo).



Obr. 33 Namáhání desky ohybem (vlevo) a kroucením (uprostřed); tažené/tlačené kvadranty krouceného prvku (vpravo)

Reálně je deska namáhána oběma efekty – ohybovým i kroucivým – zároveň. Z výše uvedeného obrázku je zřetelné, že v šedých kvadrantech desky u spodního povrchu je tahové napětí od ohybu navýšeno o tahové napětí od kroucení. Naopak v bílých kvadrantech je u spodního povrchu tahové napětí od ohybu zmenšováno napětím od kroucení, které v bílých kvadrantech působí opačným efektem než ohyb.

V určitých případech může dojít k tomu, že kroucivý moment převyší hodnotu ohybového momentu. Pokud v tomto případě působí kroucivý moment proti působení ohybového momentu, ve výsledku nastane stav, kdy efekt kroucení „přebíjí“ efekt ohybu a výztuž je následně potřeba umístit k opačnému povrchu, než indikuje samotný ohybový moment.

Výsledky výpočtu dimenzačních momentů je potřeba správně interpretovat. Znaménka hodnot dimenzačních momentů již nemají souvislost s polohou výztuže (o poloze výztuže hovoří znaménko v indexu označí dimenzačního momentu), ale značí tahové/tlačené namáhání. Pokud u dimenzačních momentů vyjdou záporné hodnoty, znamená to, že v daném směru a při daném povrchu není potřeba průřez vyztužovat, protože je tlačeno. Výztuž navrhujeme pouze na kladné hodnoty dimenzačních momentů.

Kladné hodnoty dimenzačních momentů na zadané desce jsou v následující tabulce vyznačeny světle šedě. Zároveň jsou tmavě šedě označeny oblasti, ve kterých bude výztuž umístěna ke spodnímu povrchu. Všimněme si, že v oblasti 4 efekt kroutícího momentu „přebil“ efekt ohybového momentu – přestože ve směru  $x$  působí ohybový moment tak, že sám o sobě tahy ve spodních vláknech nezpůsobuje (a tudíž nevyžaduje u tohoto povrchu vyztužení), kroutící moment v této oblasti působí opačným směrem a má vyšší hodnotu než ohybový moment, a proto je potřeba výztuž ke spodním vláknům přesto umístit.

Oblast	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$m_{x,D+}$ [kNm/m]	71	113	-48	13	-15	-3	-19	-37	23	-30	-15
$m_{y,D+}$ [kNm/m]	65	68	-6	-77	-72	-81	-101	-58	4	-27	-39
$m_{x,D-}$ [kNm/m]	-23	-93	70	35	49	31	53	39	-21	34	17
$m_{y,D-}$ [kNm/m]	-17	-48	28	125	106	109	135	60	-2	31	41

Obr. 34 Výběr hodnot dimenzačních momentů, které jsou relevantní pro návrh výztuže

## 2.9 Návrh výztuže základové desky na ohyb, posouzení MSÚ na ohyb

Návrh ohybové výztuže se provádí na dimenzační momenty z kapitoly výše. Akademický přístup, kdy výztuž je v každém bodu konstrukce navržena zvlášť, je sice výpočetně korektní, nicméně z hlediska provádění na stavbě je nepraktický. Jednoduše se totiž stane, že pro každou oblast na desce vyjde jiný profil výztuže s jinou roztečí a s rostoucím počtem profilů a různých roztečí se pak konstrukce stává nepřehlednou. Je proto vhodné používat minimum profilů výztuže a rozteče volit tak, aby rozteč v jedné části desky byla násobkem rozteče v části jiné. K návrhu výztuže proto v této modelové úloze přistoupíme z pohledu zvyklostí v reálné praxi.

Postup bude následující:

1. Určení základního rastru výztuže – Každá železobetonová konstrukce musí být vyztužena alespoň konstrukční výztuží všude ve své ploše. Proto v prvním kroku stanovíme toto minimální vyztužení a výztuž umístíme do celé desky.
2. Určení oblastí, kde postačuje základní rastr výztuže – V oblastech, kde konstrukční výztuž stačí na přenesení dimenzačních momentů, nebude přidána další výztuž.
3. Návrh příložek – V oblastech, kde konstrukční výztuž nevykryvá celý dimenzační moment, je potřeba navrhnout příložky, které přenesou zbylou část dimenzčního momentu. Příložky budou s ohledem na jednoduchost provádění umístovány ideálně v celočíselném násobku základního rastru.

Jelikož zatížení desky od reakcí ve sloupech bylo modelováno jako plošné zatížení rozprostřené na průřezové ploše sloupu, nevznikají na desce extrémní momentové špičky, jaké by vznikly v případě zadání zatížení osamělou silou. Z tohoto důvodu není potřeba redukovat nadpodporové momenty.



## 1. Určení základního rastru výztuže

Základní rastr výztuže vyplývá z konstrukčních zásad pro výztuž v deskách. Musí být splněna tato kritéria na minimální plochu výztuže:

$$A_{s,min,1} = 0,0013 * b * d = 0,0013 * 1000 * 358 = 465 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,min,2} = 0,26 \frac{f_{ctm} b d}{f_{yk}} = 0,26 \frac{2,2 * 1000 * 358}{500} = 410 \text{ mm}^2$$

Dále musí být splněna kritéria pro minimální a maximální rozteč výztuže:

$$s_{min} = \max(1,2\varnothing; D_{max} + 5 \text{ mm}; 20 \text{ mm}) = \max(1,2 * 12; 16 + 5; 20) = \max(14; 21; 20) = 21 \text{ mm}$$

$$s_{max} = \min(2h; 250 \text{ mm}) = \min(2 * 400; 250) = \min(800; 250) = 250 \text{ mm}$$

S ohledem na výše uvedená kritéria je pro základní rastr zvolena výztuž  $\varnothing 12 \text{ mm}$  s roztečí  $200 \text{ mm}$  ( $A_s = 566 \text{ mm}^2/\text{m}$ ) v obou směrech.

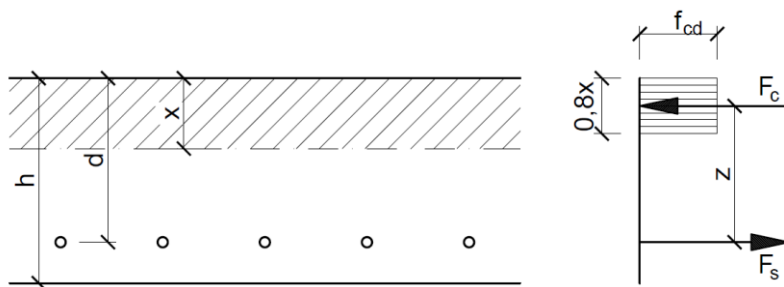
Dále je v tomto okamžiku nutné stanovit si pořadí vrstev výztuže. S ohledem na vysoké hodnoty dimenzačních momentů ve směru y bude výztuž v tomto směru umístěna vně (blíže ke krajům desky). Od tohoto okamžiku budeme rozlišovat účinnou výšku průřezu ve směru x a y:

$$d_x = h - c - \varnothing_y - \frac{\varnothing_x}{2} = 400 - 30 - 12 - 6 = 352 \text{ mm}$$

$$d_y = h - c - \frac{\varnothing_y}{2} = 400 - 30 - 6 = 364 \text{ mm}$$

## 2. Určení oblastí, kde postačuje základní rastr výztuže

Nyní je nutné stanovit únosnost průřezu vyztuženého základním rastrem výztuže. Vzhledem k odlišným účinným výškám průřezu v každém směru bude únosnost stanovena pro každý směr zvlášť.



Obr. 35 Řez deskou a odpovídající průběh napětí po výšce na mezi únosnosti



### Směr x:

Výška tlačené oblasti vyplývá z vodorovné podmínky rovnováhy vnitřních sil v průřezu:

$$F_c = F_s \rightarrow 0,8x f_{cd} = A_s f_{yd}$$

$$x = \frac{A_s f_{yd}}{0,8 f_{cd}} = \frac{566 \cdot 10^{-3} \cdot 435}{0,8 \cdot 13,333} = 23 \text{ mm}$$

Rameno vnitřních sil pak z geometrie průřezu:

$$z = d_x - 0,4x = 352 - 0,4 \cdot 23 = 343 \text{ mm}$$

Únosnost v průřezu:

$$m_{Rd,x} = A_s f_{yd} z = 566 \cdot 435 \cdot 343 \cdot 10^{-6} = 84 \text{ kNm/m}$$

### Směr y:

$$x = \frac{A_s f_{yd}}{0,8 f_{cd}} = \frac{566 \cdot 10^{-3} \cdot 435}{0,8 \cdot 13,333} = 23 \text{ mm}$$

$$z = d_y - 0,4x = 364 - 0,4 \cdot 23 = 355 \text{ mm}$$

$$m_{Rd,y} = A_s f_{yd} z = 566 \cdot 435 \cdot 355 \cdot 10^{-6} = 87 \text{ kNm/m}$$

Základní rastr výztuže bude umístěn při spodním i horním povrchu desky. Tato výztuž tedy vykrývá jak horní, tak dolní dimenzační momenty. Oblasti, ve kterých je dimenzační moment menší než moment únosnosti základního rastru výztuže (a tudíž není potřeba v těchto oblastech dimenzovat příložky), jsou vypsány v následující tabulce zeleně. Ostatní (černé) hodnoty v tabulce odpovídají místům, kde je potřeba přidat příložky.

Oblast	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$m_{x,D+}$ [kNm/m]	71	113	-48	13	-15	-3	-19	-37	23	-30	-15
$m_{y,D+}$ [kNm/m]	65	68	-6	-77	-72	-81	-101	-58	4	-27	-39
$m_{x,D-}$ [kNm/m]	-23	-93	70	35	49	31	53	39	-21	34	17
$m_{y,D-}$ [kNm/m]	-17	-48	28	125	106	109	135	60	-2	31	41

Obr. 36 Výpis oblastí desky, kde z hlediska únosnosti postačuje základní rastr výztuže





### 3. Návrh příložek

Příložky budou navrženy na hodnotu dimenzačního momentu, která je snižená o moment přednesený výztuží základního rastru. (Např. pro pozitivní moment v oblasti 2 je hodnota momentu pro návrh příložek  $113 - 84 = 29 \text{ kNm/m}$ ). Snižené hodnoty dimenzačních momentů pro návrh příložek jsou uvedeny v následující tabulce oranžově:

Oblast	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$m_{x,D+}$ [kNm/m]	71	29	-48	13	-15	-3	-19	-37	23	-30	-15
$m_{y,D+}$ [kNm/m]	65	68	-6	-77	-72	-81	-101	-58	4	-27	-39
$m_{x,D-}$ [kNm/m]	-23	-93	70	35	49	31	53	39	-21	34	17
$m_{y,D-}$ [kNm/m]	-17	-48	28	38	19	22	48	60	-2	31	41

Obr. 37 Výpis dimenzačních momentů pro návrh příložek

#### Příložky v oblasti 2

Příložky v oblasti 2 jsou potřeba navrhnout u spodního povrchu desky ve směru x na hodnotu dimenzačního momentu  $m_{Ed} = 29 \text{ kNm/m}$ .

$$m_{Ed} \leq m_{Rd} = A_s f_{yd} z \rightarrow A_s \geq \frac{m_{Ed}}{f_{yd} z} = \frac{29}{435 \cdot 0,95 \cdot 352} \cdot 10^6 = 199 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{Ø12 mm po 400 mm } (A_s = 282 \text{ mm}^2/\text{m})$$

Rameno vnitřních sil bylo ve fázi návrhu odhadnuto jako  $z = 0,95d$ .

Všimněme si, že skutečně navržená výztuž poměrně značně převyšuje požadovanou plochu. Profil příložek však byl zvolen stejný jako u základní sítě a rozteč byla navržena poloviční. Toto výrazně zjednodušuje pokládku výztuže (prut příložky bude vložen do poloviny každé druhé rozteče) a takovéto řešení je vhodné i na úkor ne zcela naplněného využití výztuže.

Posouzení probíhá principiálně stejně jako posouzení průřezu s výztuží základního rastru.

$$x = \frac{A_s f_{yd}}{0,8 f_{cd}} = \frac{(282 + 566) \cdot 10^{-3} \cdot 435}{0,8 \cdot 13,333} = 35 \text{ mm}$$

$$z = d - 0,4x = 352 - 0,4 \cdot 35 = 338 \text{ mm}$$

$$m_{Rd} = A_s f_{yd} z = (282 + 566) \cdot 435 \cdot 338 \cdot 10^{-6} = 125 \text{ kNm/m}$$

$$m_{Ed} = 113 \text{ kNm/m} < m_{Rd} = 125 \text{ kNm/m} \dots \text{ Vyhovuje.}$$



## Příložky v oblastech 4, 5 a 6

Jelikož výztuž včetně příložek v oblasti 2 ve směru x ( $\emptyset 12$  mm po 200 mm +  $\emptyset 12$  mm po 400 mm) vykrývá moment 125 kNm/m, je bez nutnosti provádění posudku jasné, že tyto příložky vyhoví i v oblastech 4, 5 a 6 ve směru y, kde jsou dimenzační momenty nižší nebo rovny této hodnotě únosnosti.

## Příložky v oblasti 7

Návrh a posouzení příložek v oblasti 7 bude proveden stejně jako v oblasti 2.

$$m_{Ed} \leq m_{Rd} = A_s f_{yd} z \rightarrow A_s \geq \frac{m_{Ed}}{f_{yd} z} = \frac{48}{435 * 0,95 * 364} * 10^6 = 319 \text{ mm}^2 \rightarrow \emptyset 12 \text{ mm po } 200 \text{ mm } (A_s = 566 \text{ mm}^2/\text{m})$$

$$x = \frac{A_s f_{yd}}{0,8 f_{cd}} = \frac{(566 + 566) * 10^{-3} * 435}{0,8 * 13,333} = 46 \text{ mm}$$

$$z = d - 0,4x = 364 - 0,4 * 46 = 346 \text{ mm}$$

$$m_{Rd} = A_s f_{yd} z = (566 + 566) * 435 * 346 * 10^{-6} = 170 \text{ kNm/m}$$

$$m_{Ed} = 135 \text{ kNm/m} < m_{Rd} = 170 \text{ kNm/m} \dots \text{ Vyhovuje.}$$

## 2.10 Ověření konstrukčních zásad

Dodržení konstrukčních zásad na minimální plochu vyztužení a maximální rozteč prutů výztuže je zaručeno způsobem návrhu výztuže, protože návrh základního rastru výztuže vycházel z těchto zásad. Proto je nyní potřeba ověřit už pouze minimální rozteč a maximální plochu výztuže.

Minimální rozteč mezi pruty výztuže je při zahrnutí základního rastru a příložek 100 mm.

$$s_{min} = 21 \text{ mm} > s = 100 \text{ mm} \dots \text{ Vyhovuje.}$$

Plocha výztuže v nejvyztuženějším místě (oblast 7, horní vlákna, směr y) je součtem plochy výztuže základního rastru a příložek:

$$A_s = 566 + 566 = 1132 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,max} = 0,04 * b * h = 0,04 * 1000 * 400 = 16000 \text{ mm}^2 > A_s = 1132 \text{ mm}^2 \dots \text{ Vyhovuje.}$$

Konstrukční zásady jsou splněny.



## 2.11 Návrh výztuže základové desky na protlačení, posouzení MSÚ na protlačení

V tomto vzorovém příkladu je uvedeno posouzení základové desky na protlačení v místě sloupu s nejvyšší hodnotou normálové síly v jeho patě. Tato síla je z pohledu návrhu sloupu značena jako  $N_{Ed}$ , z pohledu návrhu desky na protlačení je však značena  $V_{Ed}$ .

$$N_{Ed} = V_{Ed} = 469,6 \text{ kN}$$

Velikost ohybových momentů v místě napojení sloupu na základovou desku je zanedbatelná.

Postup posouzení základové desky na protlačení je velmi podobný jako u stropní desky, avšak ne zcela shodný. Základním rozdílem je úhel tlakové diagonály  $\theta$ , který se má dle [1] uvažovat v případě základových konstrukcí proměnný v intervalu  $26,6^\circ - 63,4^\circ$ .

### 1. Ověření únosnosti tlakové diagonály

Ověření únosnosti tlakové diagonály se provádí v kontrolovaném obvodu  $u_0$  v líci sloupu. Pro sloup rozměru 400x400 mm má kontrolovaný obvod délku:

$$u_0 = 4 * 400 = 1600 \text{ mm}$$

V tomto kontrolovaném obvodu je od posouvající síly vyvozeno smykové napětí:

$$v_{Ed,0} = \frac{\beta V_{Ed}}{u_0 d} = \frac{1,4 * 469,6}{1,6 * 0,358} = 1148 \text{ kPa}$$

kde  $\beta$  je součinitel zohledňující půdorysnou pozici sloupu. Součinitel do výpočtu zavádí vliv případných ohybových momentů, které jsou vneseny do spoje sloup-deska vlivem excentricit (v případě nulových ohybových momentů  $\beta = 1$ ). Zjednodušené určení  $\beta$  lze provádět pro desky, jejichž sousední pole mají rozpony s rozdílem maximálně 25%. Potom  $\beta = 1,15$  pro vnitřní sloup;  $\beta = 1,4$  pro sloup u okraje desky,  $\beta = 1,5$  pro sloup v rohu desky. Zadaná deska však toto kritérium nesplňuje, proto je dle normy nutné určit  $\beta$  přesným výpočtem. Jelikož však velikosti ohybových momentů jsou v případě zadané desky zanedbatelné ( $M_x = 2,61 \text{ kN}$ ;  $M_y = 0,37 \text{ kN}$ ); přesným výpočtem by hodnota  $\beta$  vyšla velmi blízká jedné. Z tohoto důvodu se i v tomto případě můžeme konzervativně držet zjednodušené hodnoty  $\beta = 1,4$ , aniž bychom narušili bezpečnost posudku.

$V_{Ed}$  je posouvající síla působící v prospěch protlačení

$d$  je účinná výška průřezu (průměrná pro oba směry vyztužení); pro desku tloušťky 400 mm s krycí vrstvou 30 mm a profilem výztuže 12 mm (ve dvou vrstvách):  $d = 400 - 30 - 12 = 358 \text{ mm}$

Únosnost v protlačení v kontrolovaném obvodu  $u_0$ :

$$v_{Rd,max} = 0,4v_{fd} = 0,4 * 0,552 * 13333 = 2944 \text{ kPa}$$



kde  $v$  je součinitel vyjadřující vliv přídavných namáhání  $v = 0,6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) = 0,6 \left(1 - \frac{20}{250}\right) = 0,552$ ; ( $f_{ck}$  dosazovat v MPa)

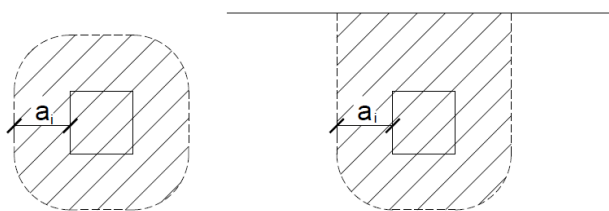
Posouzení:  $v_{Rd,max} = 2944 \text{ kPa} > v_{Ed,0} = 1148 \text{ kPa} \dots$  Vyhovuje.

(V případě, že by tato podmínka nebyla splněna, je nutno přistoupit k jednomu z následujících opatření: úprava geometrie sloupu; použití skryté hlavice; lokální zvýšení tloušťky základové desky)

## 2. Kontrola únosnosti desky nevyztužené na protlačení

Ověření únosnosti nevyztužené desky na protlačení se provádí v kontrolovaném obvodu  $u_1$ . Pro základové desky má tento obvod proměnnou délku. Vzdálenost kontrolovaného obvodu od líce sloupu  $a_i$  se pohybuje v intervalu  $d/2 = 0,18 \text{ m}$  až  $2d = 0,72 \text{ m}$  (odpovídá sklonu smykové trhliny v intervalu  $26,6^\circ$  až  $63,4^\circ$ ) a celý tento interval je potřeba vyšetřit z hlediska protlačení. Délka kontrolovaného obvodu bude proto stanovena v závislosti na vzdálenosti od líce sloupu  $a_i$ , která bude narůstat v krocích po  $0,01 \text{ m}$  (tato jemnost kroku je pro účely návrhu dostačující).

Vzhledem k pozici sloupu je nutné zohlednit, že od určité hodnoty  $a_i$  se mění tvar kontrolovaného obvodu:



Obr. 38 Tvar kontrolovaného obvodu v ploše desky a u okraje desky

Délka kontrolovaného obvodu pro sloupy v blízkosti okraje desky:

$$u_1 = 2h + b + \pi a_i + 2k$$

kde  $k$  je vzdálenost líce sloupu od okraje desky a  $b, h$  jsou rozměry průřezu sloupu.

Délka kontrolovaného obvodu daleko od okraje desky (vnitřní sloup):

$$u_1 = 2h + 2b + 2\pi a_i$$

Oba vztahy platí za předpokladu, že se v blízkosti sloupu nenachází žádné otvory v desce. Hranice mezi klasifikací sloupu jakožto blízkého okraji desky nebo vzdáleného od okraje desky se odvíjí od minima délky kontrolovaného obvodu (tj. pro určité  $a_i$  uvažujeme menší z výše uvedených hodnot  $u_1$ ).



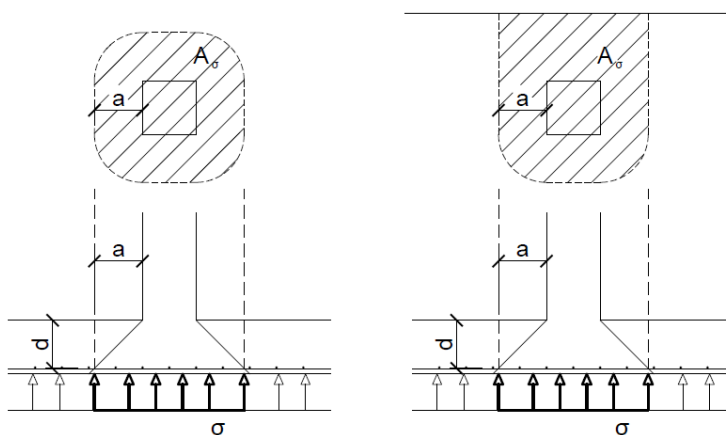
V tomto kontrolovaném obvodu je od posouvající síly vyvozeno smykové napětí:

$$v_{Ed,1} = \frac{\beta V_{Ed,red}}{u_1 d}$$

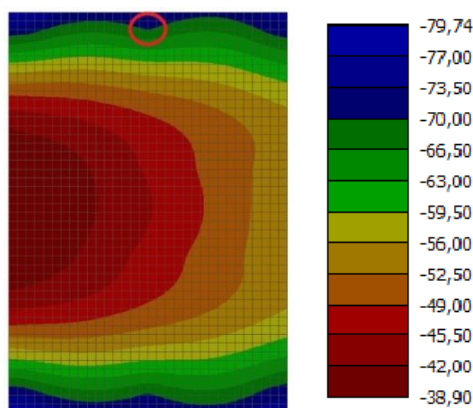
kde  $V_{Ed,red}$  je síla působící v prospěch protlačení po redukcii; redukce síly je možná pouze u základových konstrukcích, kde protlačení vzdoruje tlak zeminy.

$$V_{Ed,red} = V_{Ed} - \Delta V_{Ed} = V_{Ed} - \sigma_z * A_\sigma$$

kde  $\Delta V_{Ed}$  je síla, která je způsobená tlakem zeminy  $\sigma_z$  na ploše  $A_\sigma$ , která je vymezená kontrolovaným obvodem. Tlak zeminy na ploše pod sloupem je určen z výpočetního modelu zjednodušeně rovnoměrný  $\sigma_z = 70$  kPa



Obr. 39 Redukce posouvající síly na protlačení



Obr. 40 Kontaktní napětí v základové spáře v místě řešeného sloupu [kPa]



Únosnost v protlačení průřezu bez výztuže v kontrolovaném obvodu  $u_1$ :

$$v_{Rd,c} = \frac{2d}{a_i} * C_{Rd,c} k * \sqrt[3]{100\rho_l f_{ck}}$$

kde  $C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2; k = 1 + \sqrt{\frac{200}{358}} = 1,75$$

$\rho_l$  je stupeň vyztužení ohybovou výztuží;  $\rho_l = \frac{2 * 566 + 282}{400 * 1000} = 0,0035$

$f_{ck}$  nutno dosazovat v MPa aby výsledné  $v_{Rd,c}$  bylo v MPa

Aby deska vyhověla na protlačení bez výztuže na protlačení, musí být pro všechna  $a_i$  z intervalu  $\langle 0,5d; 2d \rangle$  únosnost  $v_{Rd,c}$  vyšší než smykové napětí vyvozené zatížením  $v_{Ed}$ , tj. rozdíl únosnosti a napětí od zatížení musí být kladný. Následující tabulka obsahuje vypočítané hodnoty tohoto rozdílu pro všechny prověřované hodnoty  $a_i$ :

$a_i$ [m]	$u_{1,vn}$ [m]	$u_{1,kr}$ [m]	$u_1$ [m]	$v_{Ed,red}$ [kPa]	$v_{Rd,c}$ [kPa]	$v_{Rd,c} - v_{Ed,red}$ [kPa]	$a_i$ [m]	$u_{1,vn}$ [m]	$u_{1,kr}$ [m]	$u_1$ [m]	$v_{Ed,red}$ [kPa]	$v_{Rd,c}$ [kPa]	$v_{Rd,c} - v_{Ed,red}$ [kPa]
0.18	2.73	2.77	2.73	617	1486	869	0.45	4.43	3.61	3.61	393	595	201
0.19	2.79	2.80	2.79	601	1408	808	0.46	4.49	3.65	3.65	387	582	195
0.2	2.86	2.83	2.83	591	1338	747	0.47	4.55	3.68	3.68	380	569	189
0.21	2.92	2.86	2.86	581	1274	693	0.48	4.62	3.71	3.71	373	557	184
0.22	2.98	2.89	2.89	572	1216	644	0.49	4.68	3.74	3.74	367	546	179
0.23	3.05	2.92	2.92	563	1163	600	0.5	4.74	3.77	3.77	360	535	175
0.24	3.11	2.95	2.95	554	1115	560	0.51	4.80	3.80	3.80	354	525	171
0.25	3.17	2.99	2.99	546	1070	524	0.52	4.87	3.83	3.83	348	515	167
0.26	3.23	3.02	3.02	537	1029	492	0.53	4.93	3.87	3.87	341	505	164
0.27	3.30	3.05	3.05	529	991	462	0.54	4.99	3.90	3.90	335	495	160
0.28	3.36	3.08	3.08	520	956	435	0.55	5.06	3.93	3.93	329	486	158
0.29	3.42	3.11	3.11	512	923	411	0.56	5.12	3.96	3.96	323	478	155
0.3	3.48	3.14	3.14	504	892	388	0.57	5.18	3.99	3.99	317	469	153
0.31	3.55	3.17	3.17	496	863	367	0.58	5.24	4.02	4.02	311	461	151
0.32	3.61	3.21	3.21	488	836	348	0.59	5.31	4.05	4.05	305	454	149
0.33	3.67	3.24	3.24	480	811	331	0.6	5.37	4.08	4.08	299	446	147
0.34	3.74	3.27	3.27	473	787	314	0.61	5.43	4.12	4.12	293	439	146
0.35	3.80	3.30	3.30	465	764	300	0.62	5.50	4.15	4.15	287	432	145
0.36	3.86	3.33	3.33	457	743	286	0.63	5.56	4.18	4.18	281	425	143
0.37	3.92	3.36	3.36	450	723	273	0.64	5.62	4.21	4.21	276	418	143
0.38	3.99	3.39	3.39	443	704	262	0.65	5.68	4.24	4.24	270	412	142
0.39	4.05	3.43	3.43	435	686	251	0.66	5.75	4.27	4.27	264	405	141
0.4	4.11	3.46	3.46	428	669	241	0.67	5.81	4.30	4.30	259	399	141
0.41	4.18	3.49	3.49	421	653	232	0.68	5.87	4.34	4.34	253	393	140
0.42	4.24	3.52	3.52	414	637	223	0.69	5.94	4.37	4.37	247	388	140
0.43	4.30	3.55	3.55	407	622	215	0.7	6.00	4.40	4.40	242	382	140
0.44	4.36	3.58	3.58	400	608	208	0.71	6.06	4.43	4.43	237	377	140
0.45	4.43	3.61	3.61	393	595	201	0.72	6.12	4.46	4.46	231	372	140

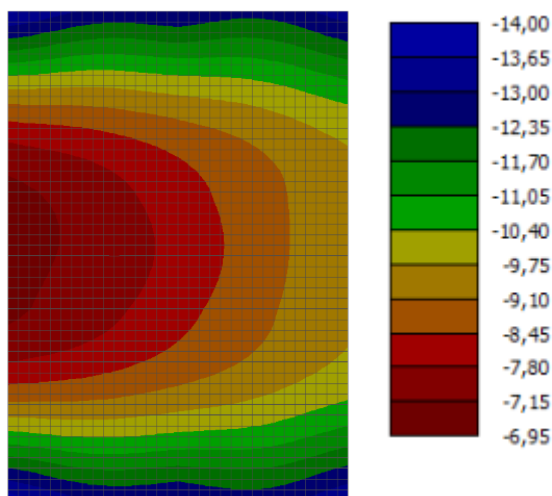


Obr. 41 Tabulka výsledků posouzení protlačení ve všech kontrolovaných obvodech ve vzdálenosti  $a_i$  z intervalu  $\langle 0,5d; 2d \rangle$

Všechny hodnoty rozdílu  $v_{Rd,c} - v_{Ed,red}$  jsou kladné, deska tedy vyhovuje na protlačení bez použití výztuže na protlačení ve všech kontrolovaných obvodech.

## 2.12 Posouzení MSP na deformace

Posouzení mezního stavu použitelnosti na deformace je provedeno z hlediska sednutí základu. Posuzuje se celkové průměrné sednutí a poměrné sednutí. Deformace základové desky je vykreslena na obrázku:



Obr. 42 Sednutí základové desky [mm]

Celkové průměrné sednutí je  $s = (14,00 + 6,95)/2 = 10,48 \text{ mm}$

Limitní sednutí pro železobetonový skelet je  $s_{lim} = 60 \text{ mm}$

$s_{lim} = 60 \text{ mm} > s = 10,48 \text{ mm}$  ... Vyhovuje.

Poměrné sednutí je  $\Delta s/L = (14,00 - 6,95)/(11500/2) = 0,0012$

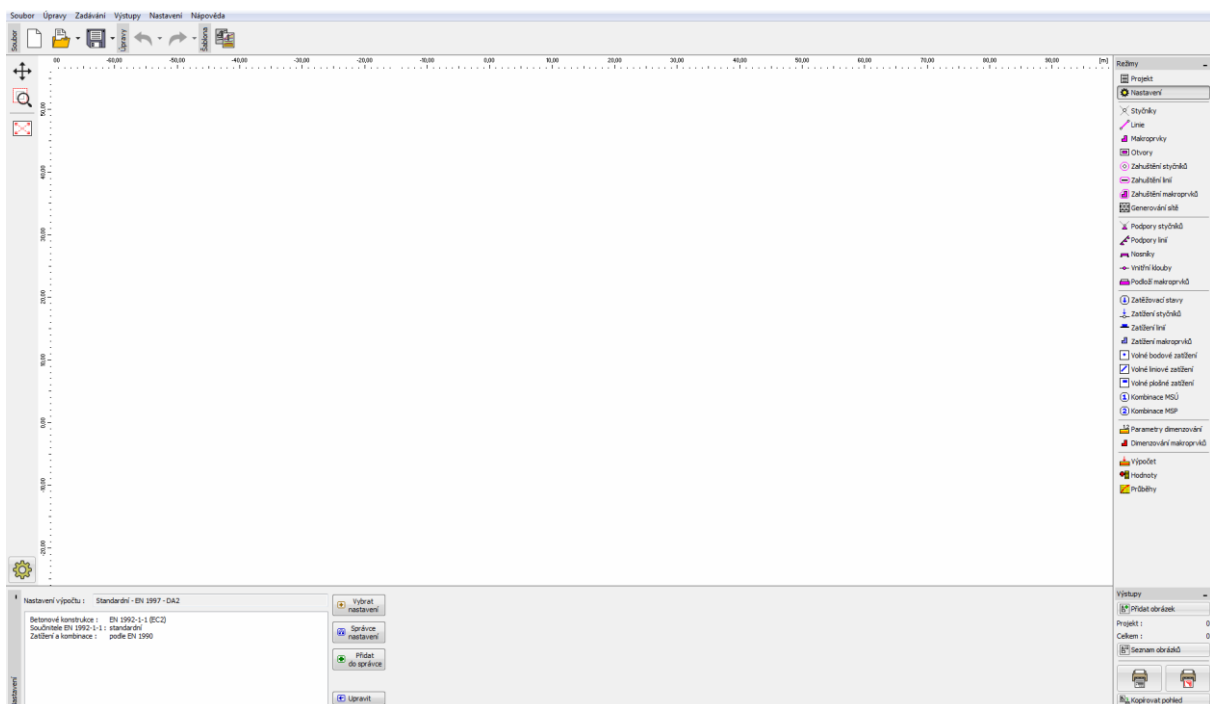
Limitní poměrné sednutí pro železobetonový skelet je  $\Delta s/L = 0,0015$

$\Delta s/L_{lim} = 0,0015 > \Delta s/L = 0,0012$  ... Vyhovuje.

## Příloha I Tvorba výpočetního modelu v softwaru GEO5

Tato kapitola se zabývá programem Deska ze souboru geotechnických programů GEO5 firmy FINE, s.r.o. Program lze použít pro řešení stropních i základových desek metodou konečných prvků. Základové desky spočívají na Winkler-Pasternakově modelu podloží. Řešit lze i desku, jejíž část spočívá na zemině a druhá tvoří stropní konstrukci podsklepené části budovy, případně i více vzájemně oddělených základových desek.

Při návrhu základové desky je vhodné sledovat jednotlivé položky menu, které je umístěno na pravé straně okna programu. Je-li použit display s menším rozlišením, např. u notebooku, nemusí být menu na pravé straně zobrazeno celé. Skryté části lze zobrazit pomocí symbolu šipky na spodním konci menu, ale přehlednější je obvykle alternativní menu, které se ukrývá pod tlačítkem „Zadávání“ v horní liště okna programu. Pod první položkou menu – Projekt – se skrývá okno, ve kterém lze zadat údaje pro katalogizaci projektu. Před zahájením jakékoliv práce s programem je v tomto okně vhodné zkontrolovat, že jsou nastaveny metrické jednotky. Druhá položka menu – „Nastavení“ – je u všech programů souboru GEO5 velmi důležitá. Nastavují se zde normy a metody výpočtů, které mají být použity. V programu GEO5 Deska však mnoho možností nastavení není - pouze normy pro výpočet zatížení a dimenzování betonových konstrukcí. Zpravidla použijeme Eurokódy.



Obr. 1 Ukázka okna programu GEO5 Deska pro volbu nastavení programu (verze 2017)





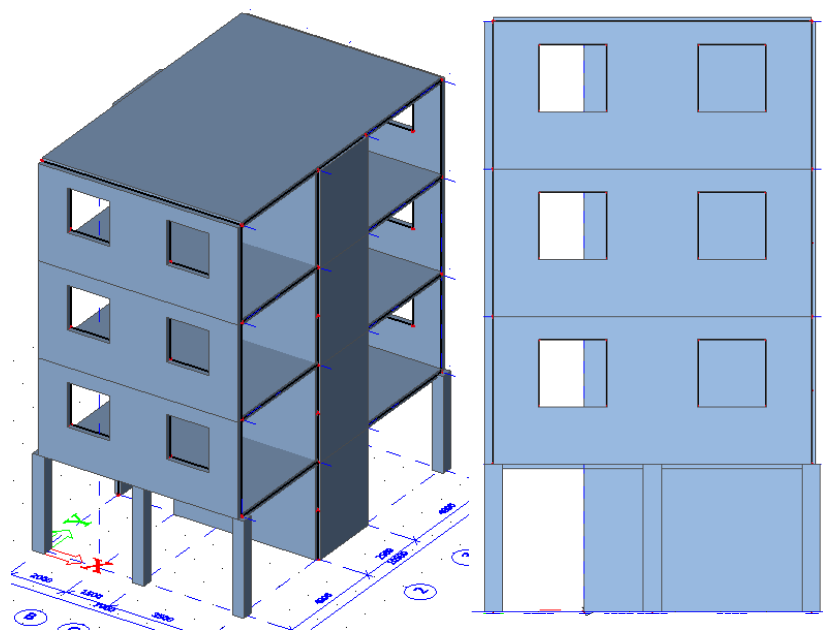
Návrh a výpočet desky jsou rozděleny do několika základních částí:

- 1) Zadání desky: styčníky, linie, makroprvky a generování sítě konečných prvků.
- 2) Definice podpor a podloží desky.
- 3) Definice zatížení základové desky v jednotlivých zatěžovacích stavech a jejich kombinace.
- 4) Chceme-li podklady pro dimenzování desky, je třeba zadat např. směry a krytí výztuže.
- 5) Výsledky: sednutí, vnitřní síly a kontaktní napětí pro jednotlivé zatěžovací stavy a jejich kombinace, případně podklady pro dimenzování, např. minimální průřezové plochy výztuže v jednotlivých směrech při horním a spodním povrchu desky.

Po otevření příslušného okna odpovídajícího libovolné položce menu je zpravidla nutné zahájit práci tlačítkem „Přidat“ vpravo dole pod zobrazovací plochou okna. Po zadání parametrů nově vytvořeného prvku, např. styčníku, linie apod., je tento vykreslen zvýrazněný na zobrazovací ploše. Ve výpisu položek vlevo dole pod zobrazovací plochou ještě není uveden. V této fázi je možné jeho budoucí polohu zkontrolovat a případně ji hned opravit přepsáním příslušných vstupních hodnot. Teprve po potvrzení tlačítkem „Přidej“ v lokálním okně prvku je prvek uložen a objeví se v soupisu položek. Lokální okno zůstává otevřené pro zadávání dalších prvků, dokud ho neukončíme tlačítkem „Storno“. Již vytvořené položky, označené kurzorem a levým tlačítkem myši, lze dodatečně editovat - tlačítko „Upravit“. Vybranou položku lze také „Odstranit“. K jednotlivým položkám hlavního menu je možno se kdykoliv vrátit a vkládat nové prvky, upravovat je, nebo odstraňovat. Konstrukci lze průběžně upravovat na základě zhodnocení výsledků provedených výpočtů. Lze např. změnit tloušťku celé desky nebo ji lokálně zesílit nově definovanými makroprvky v místě koncentrovaného zatížení nebo větších deformací, také lze dodatečně zvětšit půdorysné rozměry desky, případně přidat „Podpory“ (piloty), upravit vlastnosti podloží podle velikosti kontaktních napětí. Po úpravě geometrie konstrukce je třeba znovu vygenerovat síť konečných prvků.

### Vzorový příklad

Pro ilustraci návrhu základové desky byla zvolena budova na následujícím obrázku:



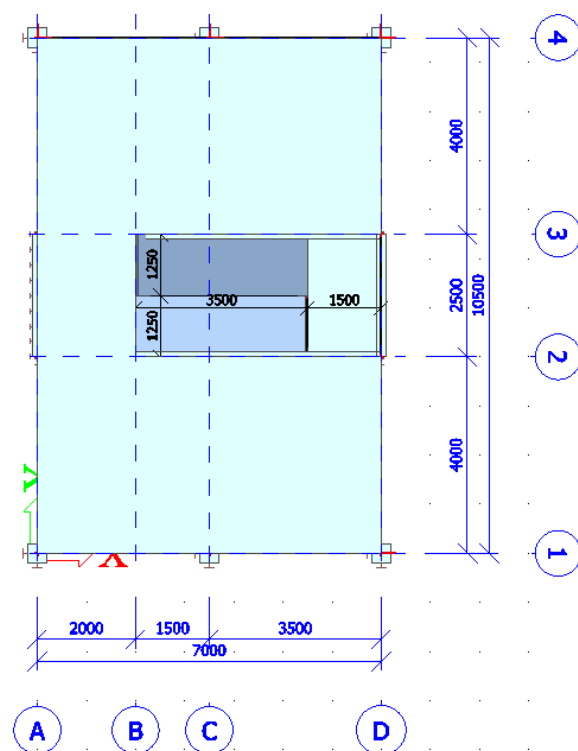
*Obr. 2 Pohledy na budovu*

#### Popis konstrukce:

Stropní deska a stěny jsou z betonu třídy C25/30, sloupy z betonu C35/45. Použita je výztuž B500B. Uvažována je třída agresivity prostředí XC1 (zjednodušeně stejná pro všechny prvky).

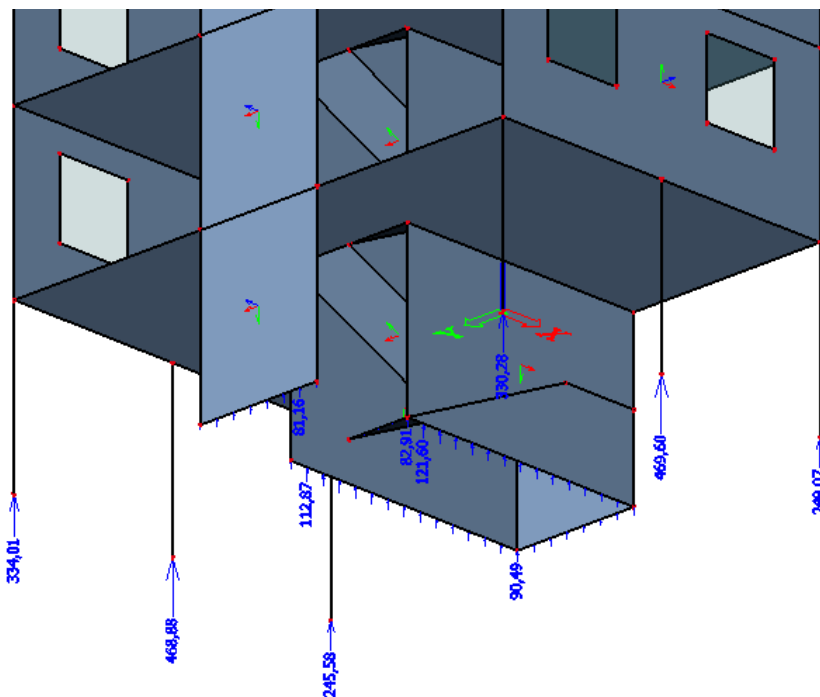
Stropní deska běžného podlaží je kromě vlastní tíhy zatížena ostatním stálým zatížením velikosti 2,0 kN/m<sup>2</sup> a užitným zatížením velikosti 2,5 kN/m<sup>2</sup>. Zatížení střechy i schodiště je pro jednoduchost uvažováno stejné, jako zatížení běžných podlaží. Sněhová oblast II, větrná oblast II, kategorie terénu II.

Stropní desky mají tloušťku 200 mm. Stěny mají tloušťku 200 mm. Sloupy jsou čtvercového průřezu 400x400 mm. Konstruktivní výška podlaží je 3250 mm.

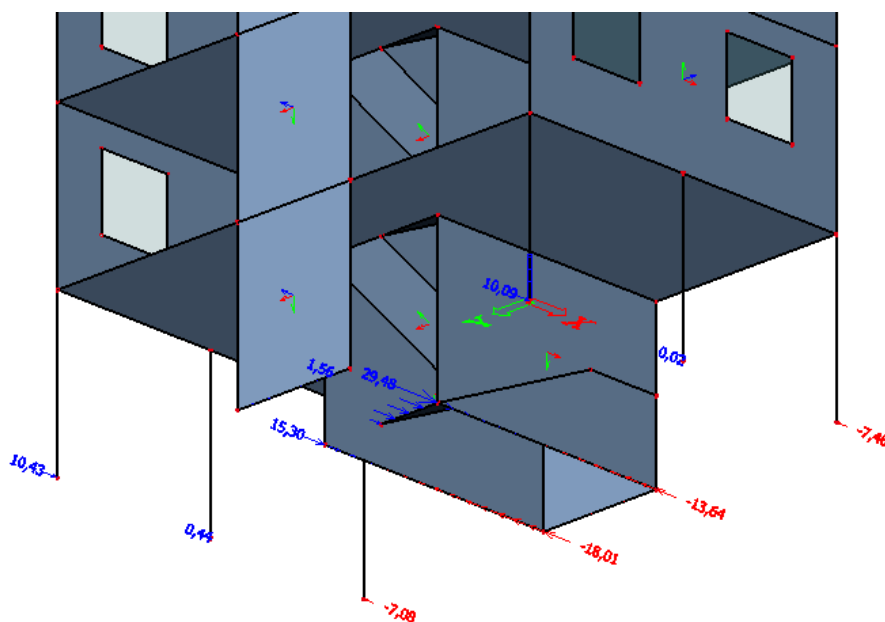


Obr. 3 Půdorys budovy

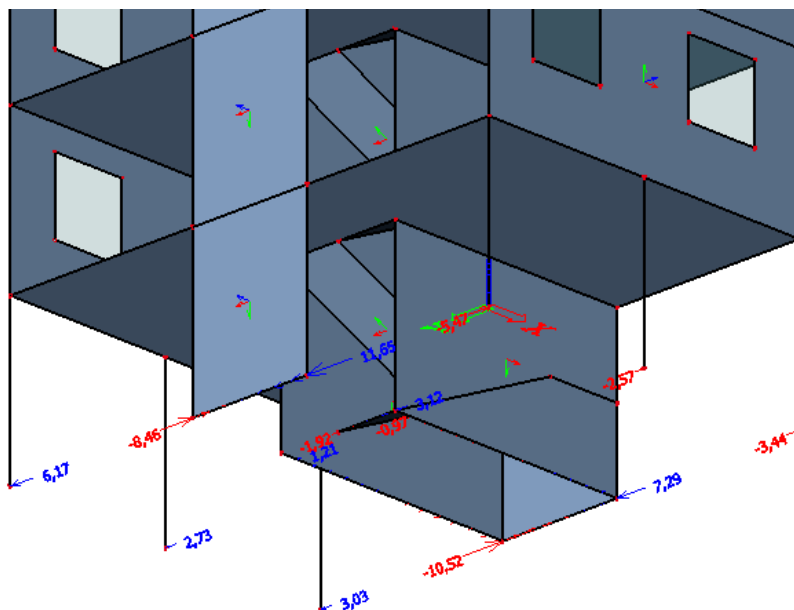
Na následujících obrázcích 4-8 jsou znázorněny vypočtené návrhové síly a momenty v patách sloupů a stěn budovy, tj. zatížení řešené základové desky. Uvedené obrázky mají formu axonometrického spodního pohledu na budovu, pozice pozorovatele leží vlevo od půdorysu budovy na obr. 3.



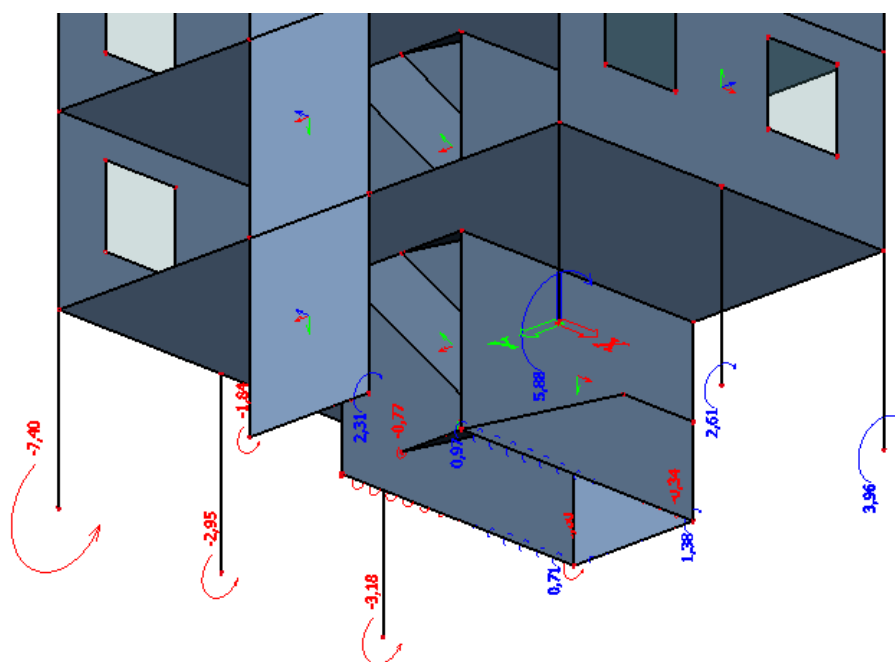
Obr. 4 Návrhové síly v patách sloupů a stěn [kN, kN/m] (axonometrický spodní pohled na budovu)



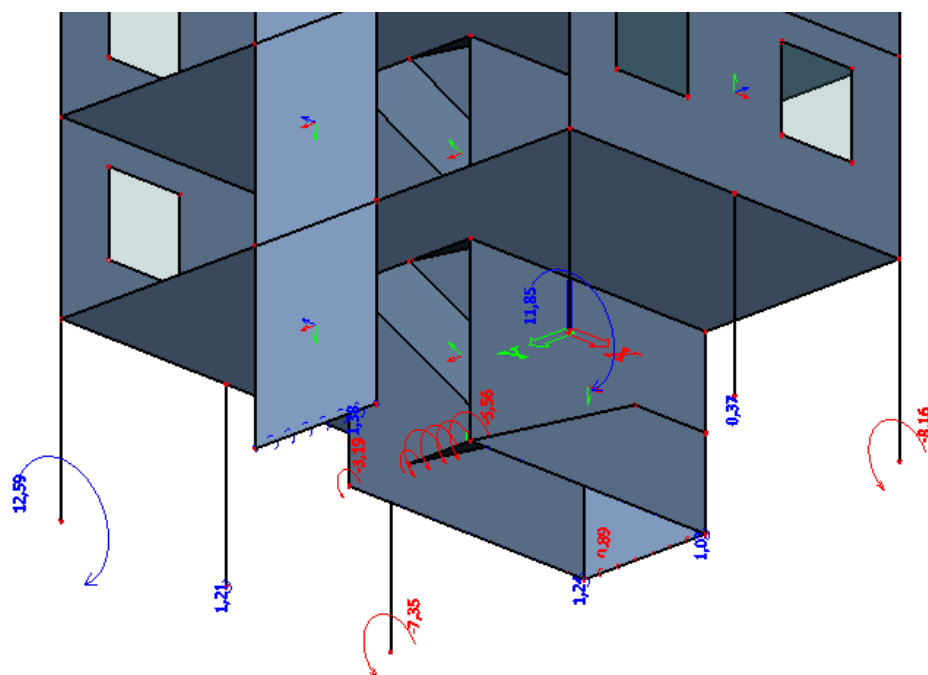
Obr. 5 Návrhové síly  $N_x$  v patách sloupů a stěn [kN, kN/m]



Obr. 6 Návrhové síly  $N_y$  v patách sloupů a stěn [kN, kN/m]



Obr. 7 Návrhové momenty  $M_x$  v patách sloupů a stěn [kNm, kNm/m]

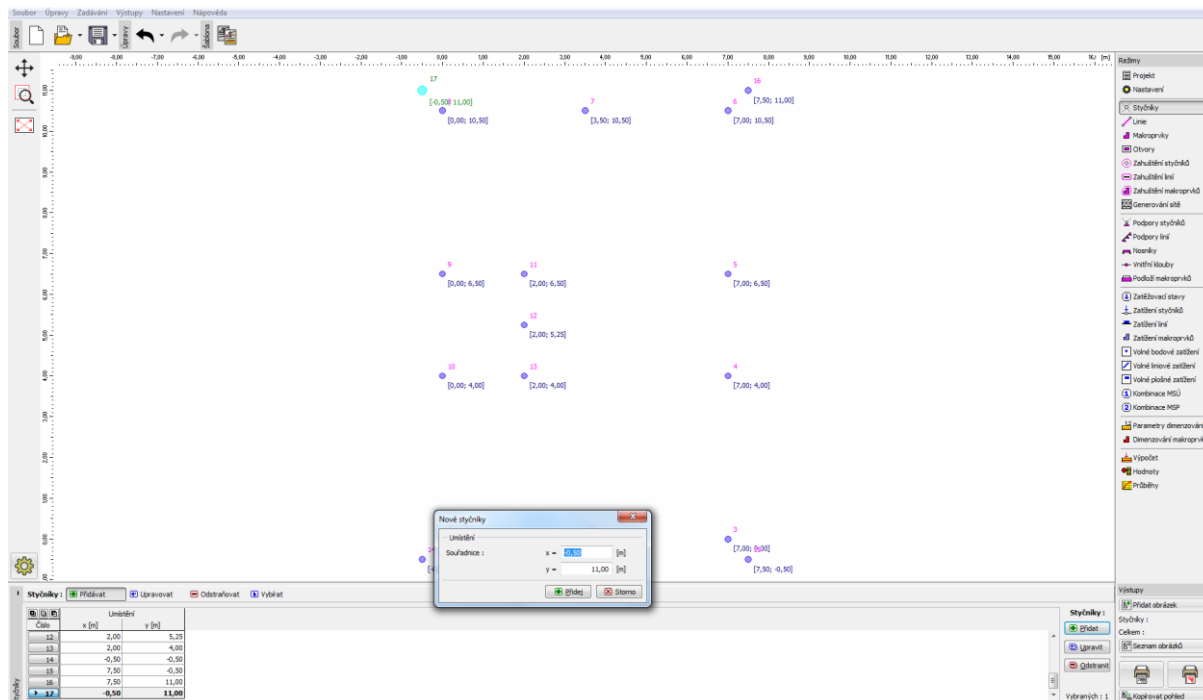


Obr. 8 Návrhové momenty  $M_y$  v patách sloupů a stěn [kNm, kNm/m]

## Zadání desky

Postup je obvyklý jako v každé metodě konečných prvků:

Nejprve je třeba definovat klíčové body konstrukce – **styčníky**:



Obr. 9 Zadávání styčníků: Styčník definovaný v dílčím okně je zvýrazněn tyrkysovou barvou. Již byl vložen – má pořadové číslo a je v seznamu. Program čeká na nové zadání. Styčníky byly vloženy do klíčových bodů podporované konstrukce a čtyři navíc do rohů základové desky přesahující půdorys horní stavby o 0,5 m ve všech směrech.

Zadávání se zahajuje tlačítkem „Přidat“ v pravém dolním rohu pod zobrazovací plochou. Zadávat lze i graficky – tlačítkem „Přidávat“ vlevo pod zobrazovací plochou, ale u styčníků je vhodnější první způsob. Jednotlivé styčníky se definují souřadnicemi x (ve vodorovném směru, hodnoty rostou vpravo) a y (ve svislém směru, rostou vzhůru). Při zadávání (číslování) styčníků je vhodné dodržet určitý systém, např. proti, nebo po směru hodinových ručiček. Je to výhodné zejména při pozdějším zadávání zatížení jednotlivých styčníků, případně linií mezi nimi. Styčníky však lze vybírat i v grafickém módu – kurzorem s levým tlačítkem myši.

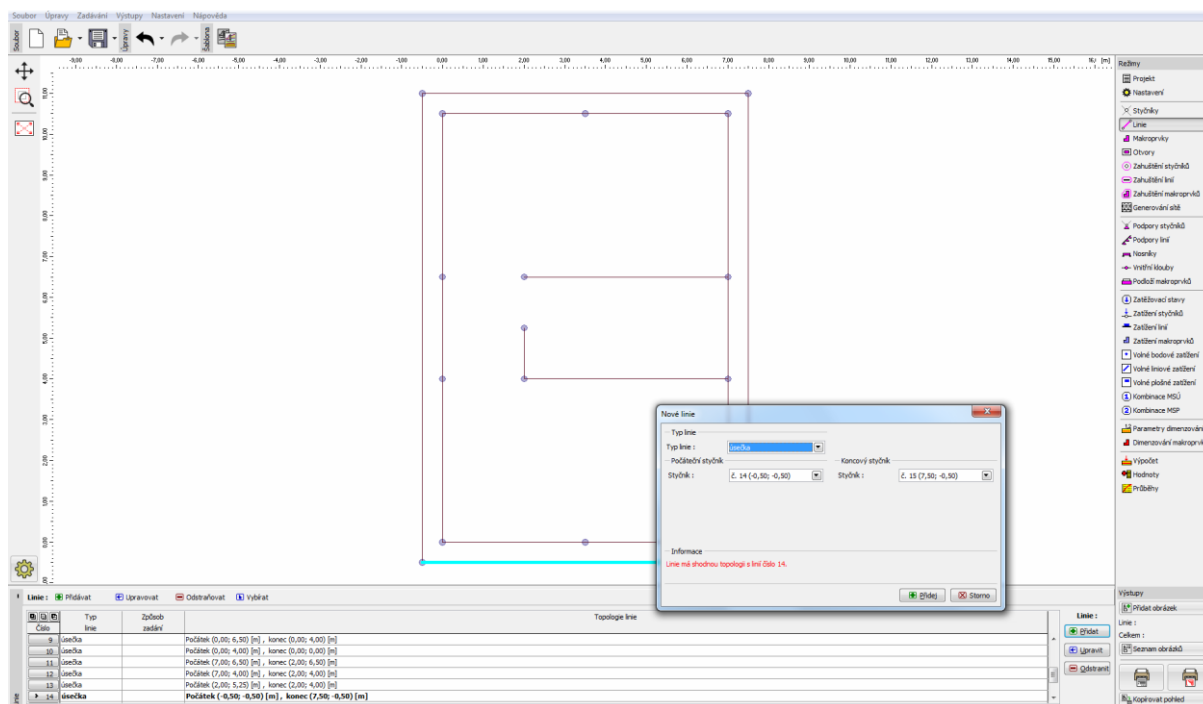
Styčníky definují úseky a lomy obrysových linií desky, jejích částí (makroprvků), otvorů apod. Styčníky budou také v místech všech sloupů. Nejjednodušší je modelovat sloupy jednotlivými styčníky, zejména při jejich velkém množství, ale je to i nejméně přesné (nerealisticky velké ohybové momenty pod bodovým zatížením desky). Nejpřesnější je modelovat každý sloup čtyřmi styčníky, liniemi a makroprvkem mezi nimi.



V případě velkého množství sloupů to však je příliš pracné. Jistým kompromisem mezi oběma extrémů je sloup modelovaný jedním styčným, ale zatížený na ploše odpovídající jeho průřezu viz „Volné plošné zatížení“ dále. Má-li sloup charakter stěny, nebo se skutečně jedná o stěnu, lze použít dva styčnický a linii mezi nimi, nebo čtyři styčnický, linie a makroprvek mezi nimi. Alternativně lze modelovat většinu sloupů jako body nebo úsečky a pouze několik vybraných styčnicků modelovat přesněji pro ověření míry redukce ohybových momentů pod bodovým (liniovým) zatížením.

Z hlediska typického tvaru zobrazovací plochy programu GEO Deska je vhodné vkládat půdorys objektu tak, aby delší strana byla vodorovná. Pro usnadnění přenosu údajů (zejména zatížení) ze vzorového příkladu je volena pozice jako na obr. 3, tedy delší rozměr svisle. Styčnický Velmi užitečné tlačítko „čtyři červené šipky do rohů obdélníku“ u levého horního rohu zobrazovací plochy maximalizuje/zmenšuje obrázek tak, aby se právě celý vešel na zobrazovací plochu.

Dále se definují spojnice styčnicků **linie**:

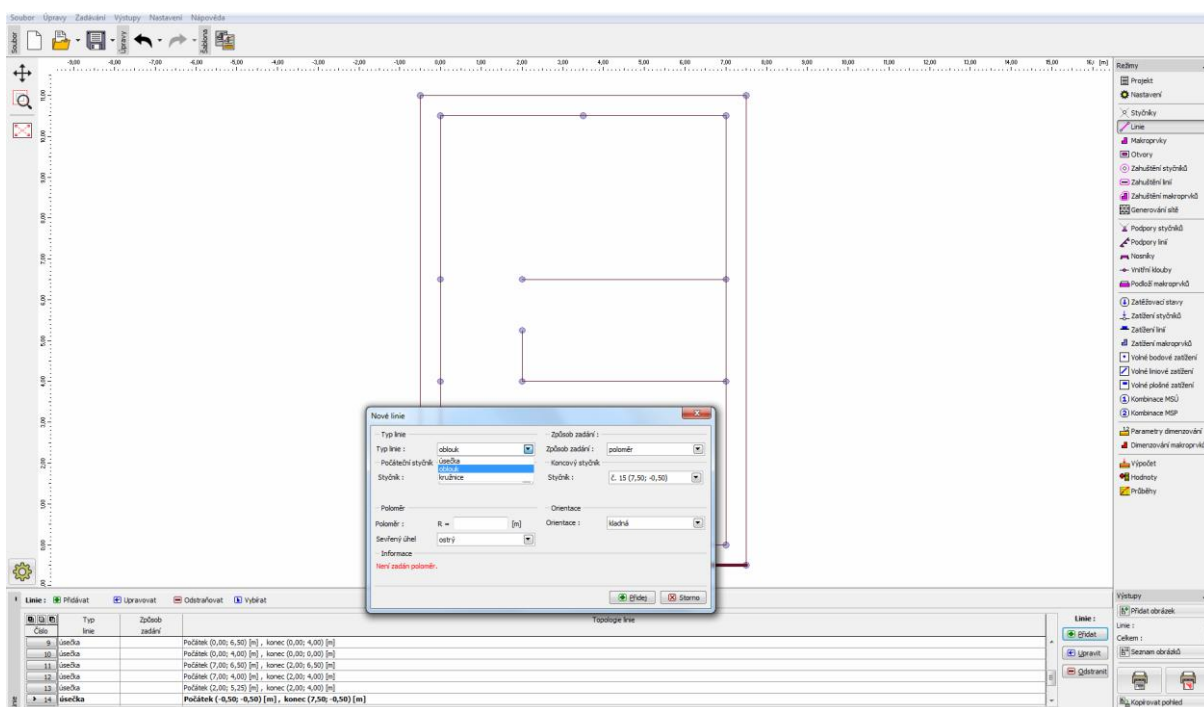


Obr. 10 Zadávání linií: Linie definovaná v dílčím okně je zvýrazněna tyrkysovou barvou. Již byla vložena – má pořadové číslo a je v seznamu. Program čeká na nové zadání, červeně varování před opětovným uložením již vložené linie. Vnitřní obdélník je obrys horní stavby (některé jeho linie, např. mezi sloupy, mohly být vypuštěny, ale současně mohou být připraveny k vyztužení desky „Nosníky“ viz dále. Vnější obdélník je obrys základové desky.

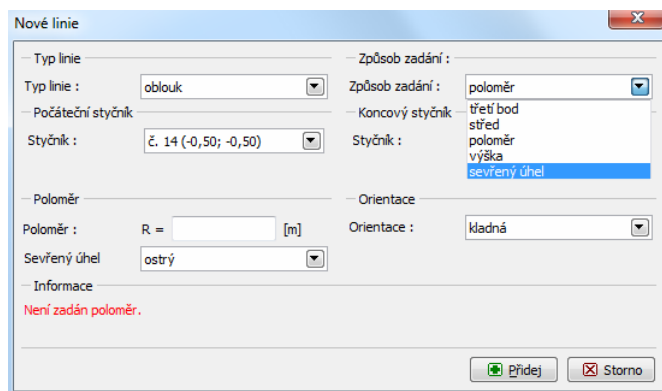
Zadávání se zahajuje tlačítky „Přidat“ nebo „Přidávat“ pod zobrazovací plochou, obdobně jako styčnický. Zde již může být grafická forma zadávání výhodná: Kurzor na výchozí bod, levé tlačítko myši stisknout a uvolnit -



kurzor na koncový bod, levé tlačítko myši stisknout a uvolnit. Linie může být úsečka (obr. 10), neměla by propojovat více než dva sousední styčníky, kruhový oblouk (obr. 11, 12), nebo kružnice (obr. 13). Definice obloukové linie má velké množství variant (obr. 12). Výhodou kružnice je, že ji lze kromě tří styčnicků zadat i souřadnicemi středu, který nemusí být totožný se styčnickem, a poloměrem. Při zadávání zatížení bude počátkem každé linie výchozí zadaný styčník. Proto je vhodné při zadávání výchozích a koncových styčnicků zvolit systém, např. od nižšího čísla styčnicku k vyššímu.

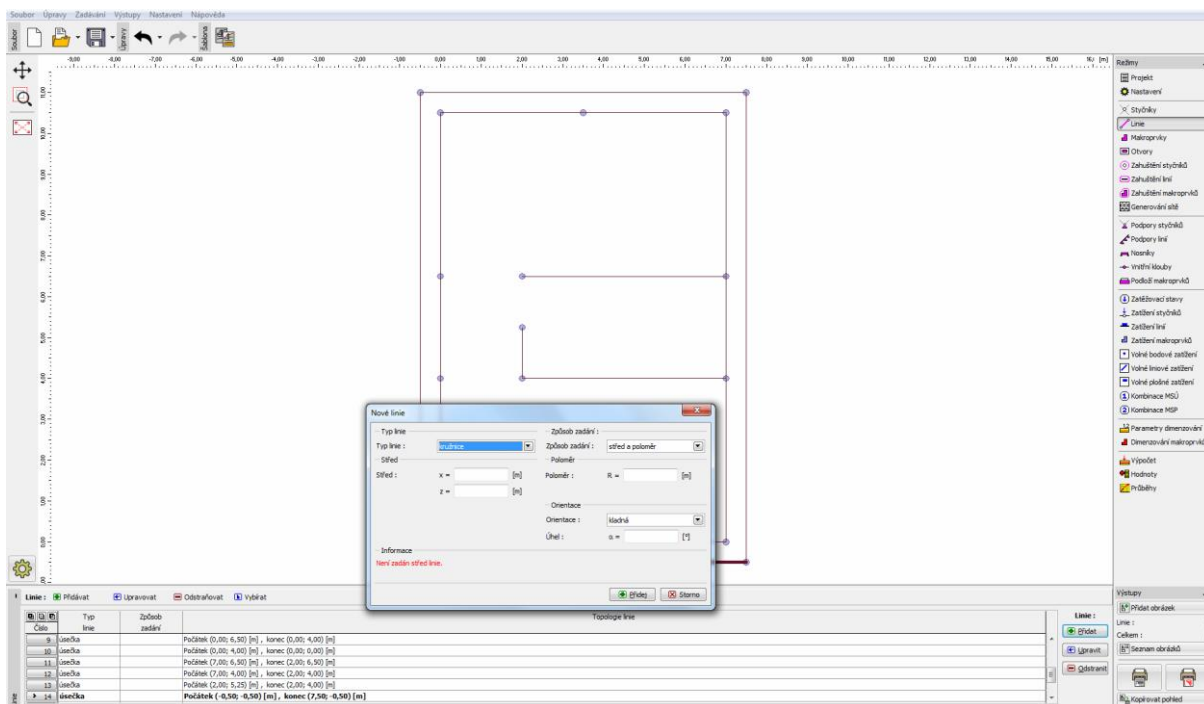


Obr. 11 Zadávání linie – výběr kruhového oblouku



Obr. 12 Zadávání linie – varianty zadání kruhového oblouku (detail okna)

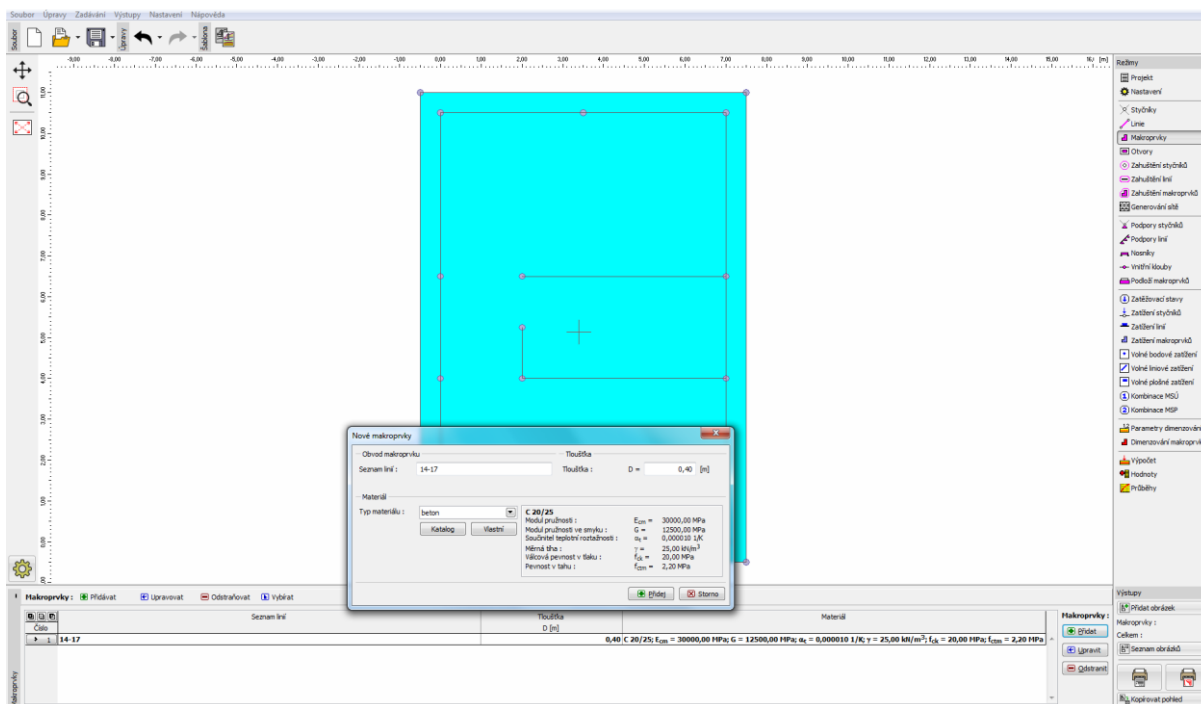




Obr. 13 Zadávání linie – výběr kružnice (střed a poloměr)



Nakonec je třeba definovat jeden, nebo více **makroprvků**:



Obr. 14 Zadávání makroprvku. Ve vzorovém příkladu byl zadán jediný makroprvek – celá základová deska

**Makroprvek** je část desky, která má konstantní tloušťku a mechanické charakteristiky a v případě základové desky i charakteristiky podloží. Má-li nějaká část desky charakteristiky odlišné, musí být definována jako samostatný makroprvek. Pokud se mění vlastnosti plynule, např. mocnosti vrstev základové půdy, musí být nahrazeny stupňovitou změnou pod dílčími částmi desky (makroprvky). Jednotlivé makroprvky nemusí být součástí jedné desky. Mohou být vzájemně odděleny, např. základ tvořený patkami a pásy, případně lze poněkud zjednodušeně modelovat i desky (makroprvky) v rozdílné hloubce.



Každý makroprvek je definován množinou linií tvořících uzavřenou vnější hranici. Leží-li menší makroprvek uvnitř většího, je nejprve nutné definovat větší makroprvek a až poté (z něj oddělit) menší vnitřní makroprvek. Hranice je zadávána výčtem jednotlivých na sebe navazujících linií oddělených čárkami bez mezer za nimi (1,2,3,6...), případně s pomlčkou, tvoří-li nepřerušenu řadu (1-3,6...). Makroprvek může být definován i uvnitř kružnice zadané středem a poloměrem. Při definici makroprvku je současně nutné zadat jeho tloušťku a materiál (vybraný z katalogu, nebo vlastní), jinak ho nelze uložit. Zde je vhodné upozornit, že program řeší průhyb lineárně pružné desky, jejíž tuhost není snížena v důsledku oslabení průřezu tahovými trhlinami, dotvarováním apod. Při návrhu tloušťky desky (makroprvků) máme v principu dvě základní možnosti:

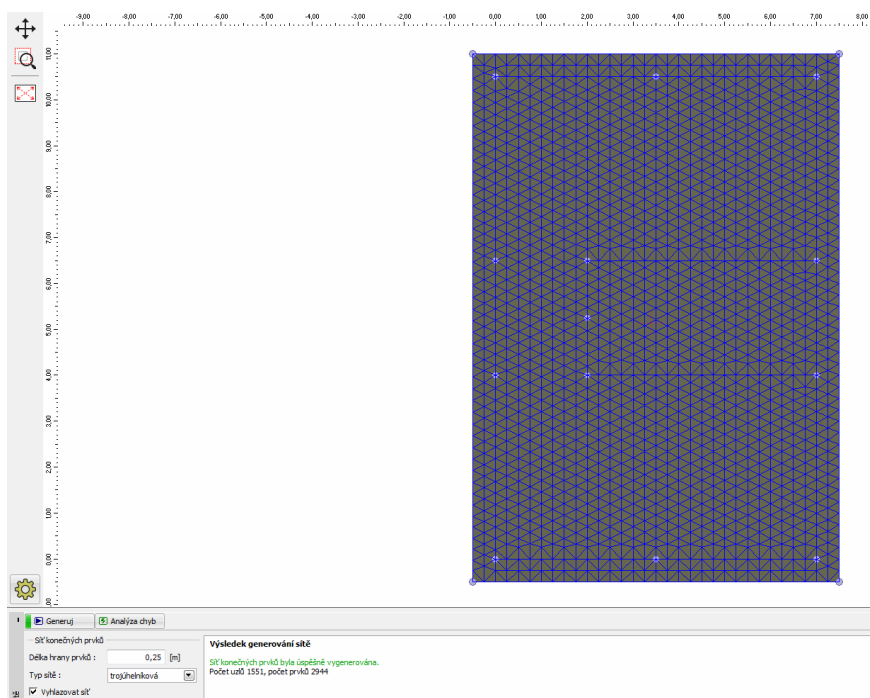
1) Určit tloušťku desky, případně i její zesílení pod sloupy empiricky. Jako vodítko lze využít např. minimální tloušťku určenou na základě v předstihu provedeného posouzení protlačení. Očekávané snížení ohybové tuhosti je možné modelovat snížením „katalogového“ modulu pružnosti betonu na hodnotu „vlastní“ (adekvátně je nutné snížit i smykový modul). Po výpočtu vnitřních sil v desce je možné/nezbytné tloušťky a deformační charakteristiky makroprvků upravit, případně desku zesílit nosníky nebo podepřít pilotami (viz dále).

2) Několikerým opakováním výpočtů nalézt optimální tloušťku desky z „katalogového“ materiálu z hlediska přípustných deformací, zejména jejich rozdílů. (Nové výpočty po změně tloušťky desky, kdy není nutné znovu generovat síť konečných prvků, jsou relativně rychlé.) Pokud by tloušťka desky příliš narůstala, je možné desku zesílit nosníky nebo podepřít pilotami jako v předchozí variantě. Uvedeným způsobem optimalizovanou (konstantní) tloušťku desky lze během dimenzování průřezů zvětšit o mocnost vrstvy porušené tahovými trhlinami, aby byla ohybová tuhost zachována. Skutečná deska bude mít zvětšenou tloušťku, nejméně v polích, nejvíce pod sloupy a nosnými stěnami.

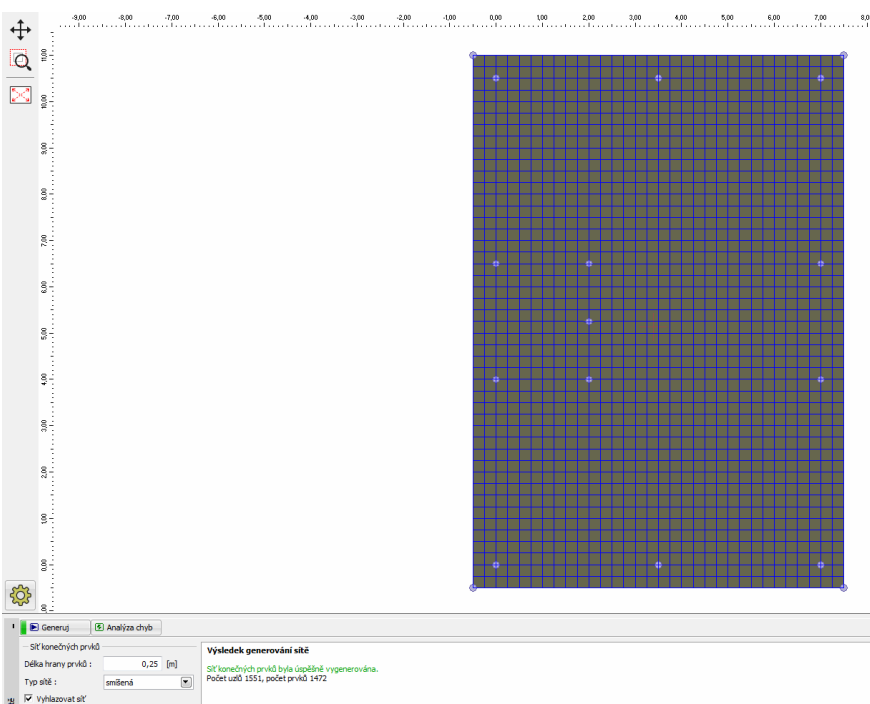
**Otvory** v rovině desky, např. pro schodišťové nebo výtahové šachty, se zadávají obdobně jako makroprvky – styčníky, linie mezi nimi a uzavřený obvod tvořený množinou linií. Lze zadat i kruhový otvor definovaný jedinou kružnicí. Jak bude uvedeno dále, lze obvod otvoru (šachty) vytužit stěnami šachty, které mohou být podepřeny dnem šachty.

Zadání desky končí **Generování sítě** konečných prvků: Vlevo dole pod zobrazovací plochou je třeba zadat globální délku hran prvků a typ sítě: trojúhelníková (obr. 15), nebo smíšená (kombinace čtyřúhelníků a trojúhelníků – obr. 16). Generování sítě se zahájí tlačítkem „Generuj“. Po úspěšném vygenerování sítě je tato zobrazena a program současně vypíše množství uzlů a konečných prvků. Před konečným generováním sítě konečných prvků je možno zadat její „Zahuštění“ v okolí styčnic a linií (dosah a velikost prvků) a v jednotlivých makroprvcích. To je výhodné zejména u plošně rozsáhlých desek. Většími konečnými prvky v oblastech, kde nedochází k rychlé změně vnitřních sil a deformací, se šetří množství konečných prvků, paměť počítače a strojový čas. U menších desek je vhodné dostatečně zjemnit celou globální síť, výpočty jsou poměrně rychlé.





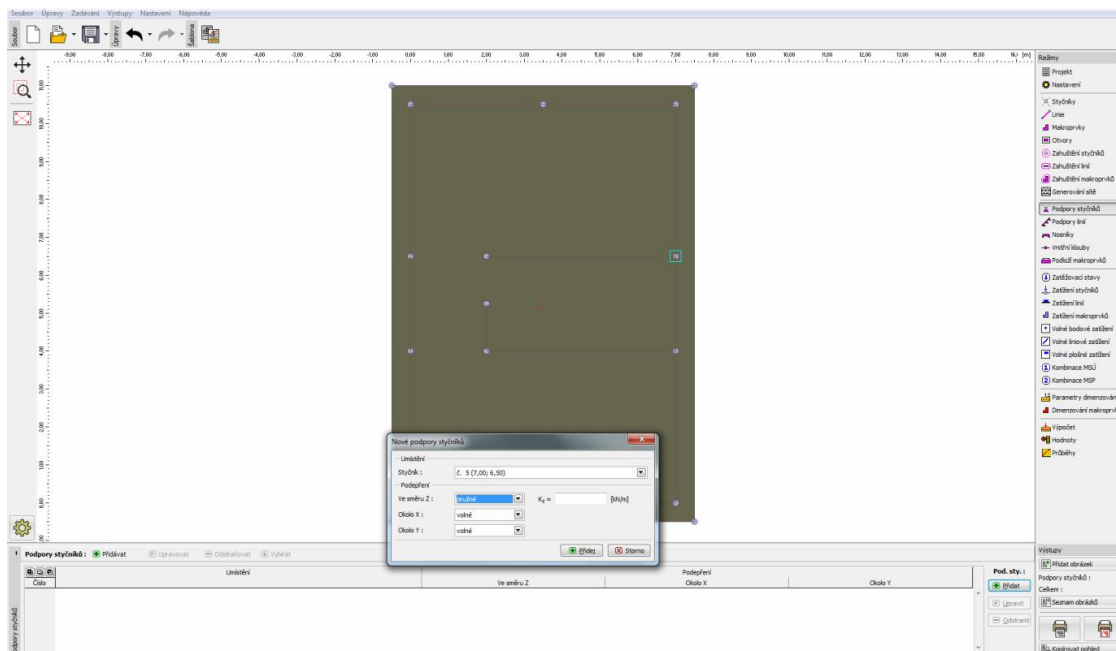
Obr. 15 Trojúhelníková síť konečných prvků – délka hrany 0,25 m (výřez okna)



Obr. 16 Smíšená síť konečných prvků – délka hrany 0,25 m (použitá ve vzorovém příkladu)

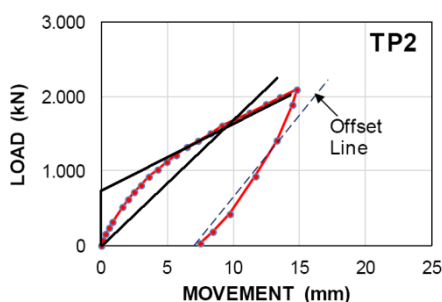


Po úspěšném vygenerování sítě konečných prvků se zadávají podpory, výztuhy a u základových desek podloží:



Obr. 17 Zadávání podpory styčníku (ukázka – v řešeném příkladu nebyly použity)

**Podpory styčníků** mohou tvořit sloupy konstrukce (pokud je program použit např. pro řešení stropních desek) nebo piloty u základových desek. Implicitně v žádném styčníku podpora není, podepření ve svislém směru i proti rotaci kolem vodorovné (x) nebo svislé (y) osy je „volné“. Ve vybraném styčníku, který lze definovat pořadovým číslem (nelze zadat přímo, musí být vybráno ze seznamu všech styčníků) nebo ho lze vybrat graficky (kurzor a levé tlačítko myši – výhodnější), lze zadat podepření jako pevné nebo pružné. Pevné podepření zabrání jakékoliv deformaci (rotaci) a je spíše teoretické, u základových desek nepoužitelné.

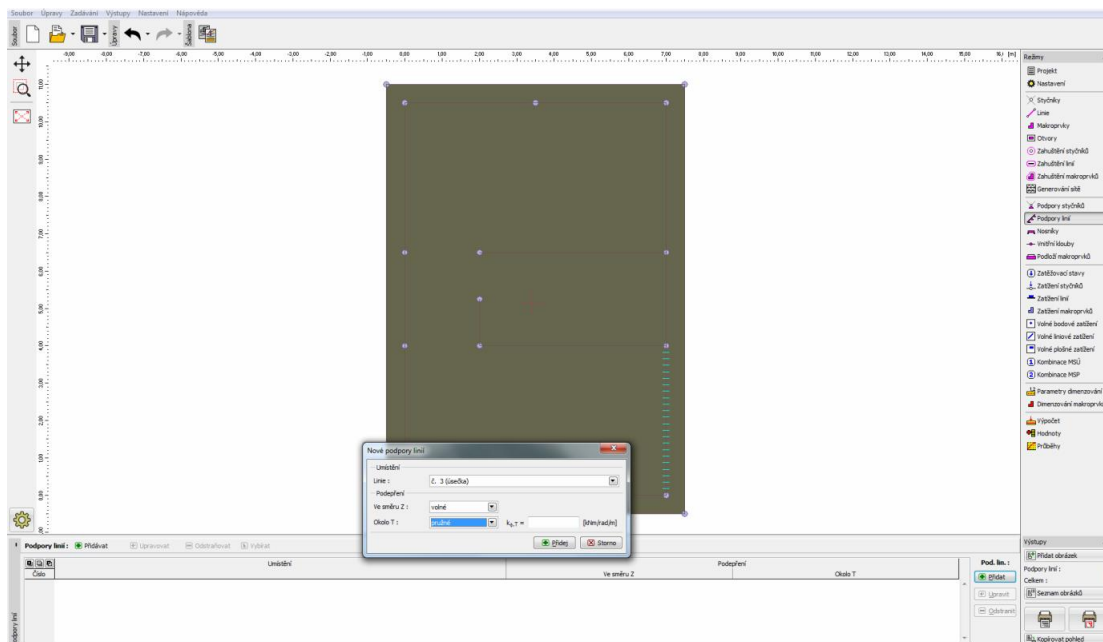


Obr. 18 Zatěžovací křivka piloty a její lineární náhrada sečnou nebo tečnou



Lineárně pružné podepření lze využít pro modelování pilotového základu: Nelineární zatěžovací křivku lze vypočítat např. v programu GEO Pilota a lze ji modelovat dvojím způsobem (obr. 18): Jednodušší je lineární náhrada sečnou – sedne-li např. pilota 10 mm při zatížení 1680 kN, je průměrná tuhost  $1680/10 = 168 \text{ kN/mm}$ . Do programu musíme dosadit tuhost 168.000 kN/m! Se vzdalováním vypočteného sednutí pilotou podepřené desky od předpokladu (10 mm) se bude výstižnost takto určené tuhosti podpory zhoršovat. Tuhost podpory je možné (vhodné) postupně upravovat. Druhý, přesnější způsob nahrazuje zatěžovací křivku piloty tečnou v bodě očekávaného sednutí, nebo s ní rovnoběžnou blízkou sečnou. Průsečík této přímky s osou zatížení ( $s = 0 \text{ mm}$ ) určuje reakci, kterou bude nutné zadat jako zatížení styčnicku (např. +730 kN na obr. 18). K tomu se zadá tuhost podpory:  $(1680 - 730)/10 = 95 \text{ kN/mm} = 95.000 \text{ kN/m}$ . Výhodou tohoto pracnějšího řešení je lepší vystižení reakce piloty v širším intervalu sednutí, na obr. 18 např. 6-15 mm. Obdobně lze vypočítat a zadat tuhost hlavy piloty (sloupu) proti rotaci, je-li do desky vetknutá. I když není základová deska podepřena, lze tuhostí fiktivní svíslé podpory modelovat pokles zatížení v patě sloupu při „popuštění podpory“ - důsledek redistribuce zatížení tuhou stavební konstrukcí. Ve vzorovém příkladu nebyla tato možnost využita.

Poznámka na závěr: Zejména u desek malého půdorysu nemusí být průřez velkopřůměrové piloty nebo piloty s rozšířenou hlavou zanedbatelný – nahraditelný bodem. V tom případě je možné pilotu (alespoň jednu pro porovnání výsledků) nahradit kruhovým makroprvkem. Jeho podloží (viz dále) je možné charakterizovat parametrem C1, který získáme dělením tuhosti piloty jako „bodové“ podpory plochou makroprvku [MN/m<sup>3</sup>]. Druhý parametr: C2 = 0. Případnou počáteční reakci piloty (při nulovém sednutí) nahradíme rovnoměrným napětím na ploše makroprvku (s kladným znaménkem!) viz Zatížení dále.



Obr. 19 Zadávání podpory linie (ukázka – v řešeném příkladu nebyly použity)



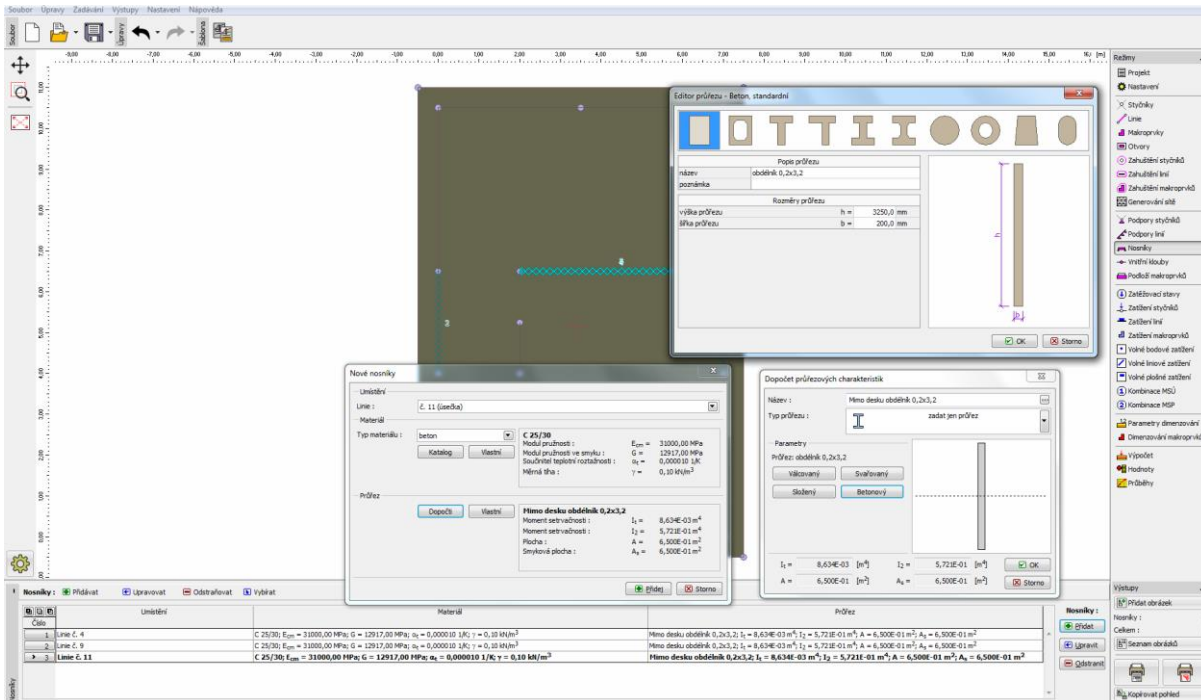
**Podpory linií** mají obdobný význam jako podpory styčnicků. Může jít o podepření linie řadou pilot, pokud nechceme modelovat v počáteční fázi návrhu každou pilotu zvlášť. Mohlo by jít také o podepření podzemní stěnou, např. konstrukční, tj. spodní částí železobetonové pažicí stěny ponechané jako trvalá suterénní stěna. Podpory linií lze využít i při modelování např. výtahové šachty: Otvor v desce bude lemován stěnami, které budou podepřeny dnem výtahové šachty. Tuhost dna šachty (plošného základu) lze např. vypočítat v programu GEO Patky jako poměr rozdílu zatížení a vypočtených sednutí. Tuhost dna šachty [kN/m] se poté vydělí jejím obvodem a získanou tuhost [kN/m/m] lze použít pro podpory linií hranice otvoru. Tuhost podpor linie proti rotaci kolem ní nebo její tečny [kNm/rad/m] může být důsledkem ohybové tuhosti (suterénní) stěny vetknuté do (základové) desky. Ve vzorovém příkladu nebyla tato možnost využita.

**Nosníky** lze vyztužit desku proti ohybu ve směru linie. Mohou to být trámy nebo průvlaky pod stropními deskami nebo žebra, případně stěny spojené s deskou. Nosníky lemují i výše zmíněnou výtahovou šachtu (otvor v desce). Např. železobetonová obvodová stěna suterénu vetknutá do základové desky omezuje rotaci okraje desky (podpory linií) a tím i jeho sednutí. Současně omezuje průhyb desky ve směru připojené stěny (nosníku).

Obvyklým, již dříve popsaným způsobem vybereme linii, kde chceme přidat nosník. Zvolíme materiál a jeho charakteristiky z katalogu, nebo vlastní. Zadáme průřezové charakteristiky nosníku, nebo je necháme vypočítat. V tom případě se otevře nové okno „Dopočet průřezových charakteristik“, kde vybereme materiál nosníku a program nabídne ve 3. okně „Editor průřezu“ typické průřezy. Vybereme vhodný průřez a zadáme jeho rozměry – upozornění: jako jedině v celém programu se zadávají v milimetrech. Po potvrzení tlačítkem „OK“ se vrátíme do druhého okna. Programem vypočtené průřezové charakteristiky potvrdíme opět tlačítkem „OK“. V prvním okně je případně možno průřezové charakteristiky upravit (jako „Vlastní“). Zadání nosníku dokončíme tlačítkem „Přidej“.

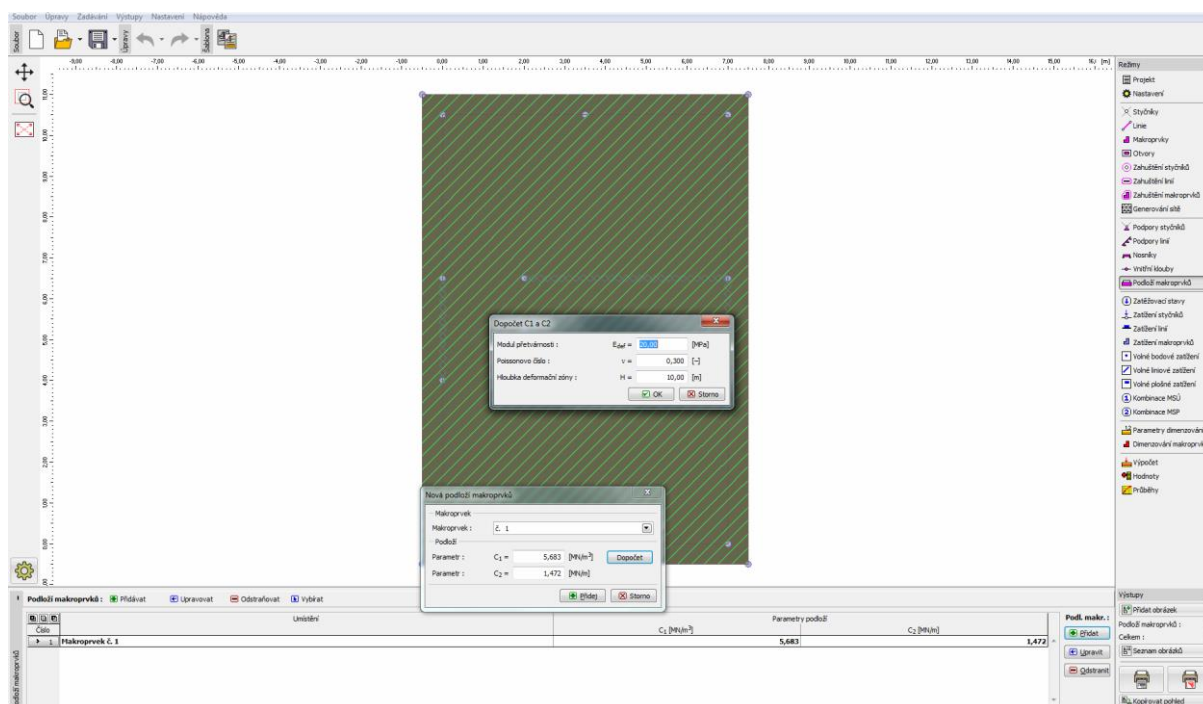






Obr. 20 Zadávání nosníku – zobrazena všechna tři postupně otvíraná okna

**Vnitřní klouby** je možno vložit na linie oddělující dva sousední makroprvky. Tyto klouby umožňují volnou nebo odporovou (pružnou) rotaci, nikoli však vzájemný posun. Dilataci je možné modelovat pouze vzájemným oddělením sousedících makroprvků. Minimální šířka spáry mezi makroprvky je třeba vyzkoušet. Příliš úzká mezera může zabránit úspěšnému generování sítě konečných prvků.

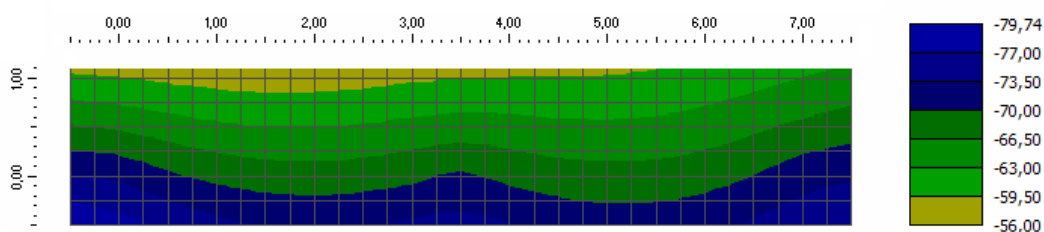


Obr. 21 Zadávání Winkler-Pasternakova podloží makroprvku - dopočet C1, C2 programem

Winkler-Pasternakovo **Podloží makroprvků** musí mít konstantní charakteristiky pod celým makroprvkem. V případě proměnných charakteristik je nutné základovou desku rozdělit na více makroprvků a plynulou změnu nahradit stupňovitou. Charakteristiky C1 [MN/m<sup>3</sup>], modul reakce podloží, a C2 [MN/m] pro smykový roznos lze zadat přímo, nebo provést „Dopočet“ programem. Pro dopočet se otevře nové okno (obr. 21), kde se zadají tři charakteristiky lineárně pružné vrstvy: modul přetvárnosti, Poissonovo číslo a mocnost. Po stisknutí tlačítka „OK“ jsou vypočteny charakteristiky podloží C1 a C2. (Upozornění: Při každém novém otevření okna pro dopočet jsou přiřazeny stejné implicitní parametry pružné vrstvy - obr. 18. Poslední zadané hodnoty je tedy dobré si poznamenat pro případnou následnou úpravu.) Je-li v podloží makroprvku jediná relativně tenká výrazně stlačitelná vrstva, je zadání parametrů pro dopočet relativně jednoduché – parametry dané vrstvy. (Ve vzorovém příkladu byly uvažovány a zadány parametry vrstvy tuhého písčitého jílu F4 CS:  $E_{def} = 5,0$  MPa,  $\nu = 0,35$ , mocnost pod základovou spárou  $H = 2,0$  m. Programem vypočtené hodnoty  $C_1 = 4,06$  MN/m<sup>3</sup> a  $C_2 = 1,05$  MN/m byly vynásobeny váženým součinitelem zatížení 1,4 odpovídajícím návrhovému zatížení v zadání vzorového příkladu, jak bude rozvedeno později v části o Zatěžovacích stavech:  $C_1 = 5,68$  MN/m<sup>3</sup>,  $C_2 = 1,47$  MN/m – viz obr. 21. Jednodušší je 1,4× zvětšit  $E_{def}$  a výpočet C1, C2.) Při velké mocnosti stlačitelné vrstvy nebo při výskytu několika obdobně stlačitelných vrstev je situace obtížnější. K náhradě podloží jedinou ekvivalentní stlačitelnou vrstvou je vhodné použít program nebo tabulkový kalkulátor pro výpočet sednutí plošného základu. Podíl kontaktního napětí a vypočteného sednutí odpovídá parametru C1. Současně lze stanovit mocnost aktivní zóny, kde přitížení překračuje hodnotu strukturální pevnosti zeminy (mocnost náhradní pružné vrstvy má být menší), a vážený průměr



edometrických modulů (z něj lze odvodit Poissonovo číslo a modul přetvárnosti náhradní pružné vrstvy). V nelineárně pružné zemině se strukturní pevností bude tuhost podloží pod jednotlivými místy základové desky rozdílná – nejmenší pod sloupy a nosnými stěnami s koncentrovaným zatížením, největší pod málo zatíženou deskou v poli uprostřed mezi nimi. Bezpečnější, konzervativní způsob se zaměřuje na výpočet charakteristik podloží pod koncentrovaným zatížením a jeho následné použití pod celým makroprvkem, tj. i pod málo zatíženými částmi desky. (Je-li sednutí celkově malé, měkčí podloží ho příliš nezmění.) Po prvním výpočtu (odhadu) charakteristik podloží a výpočtu kontaktních napětí a sednutí desky v okolí sloupů lze vypočítat sednutí „ekvivalentní základové patky“ na skutečném (vrstevnatém) podloží a následně zpřesnit charakteristiky podloží desky. Půdorysné rozměry „ekvivalentní základové patky“ lze určit podle oblasti s vyššími hodnotami kontaktních napětí pod deskou (obr. 22). Kontaktní napětí ve vzdálenějších oblastech je třeba zohlednit jako přitížení povrchu. Lze použít i jiné programy, které počítají stlačení (vrstevnatého) podloží od přitížení povrchu (např. pod násypy apod.). Postup lze i několikrát opakovat. Poznámka: Při výpočtu sedání se v souladu s dosavadní československou praxí obvykle používají průměrné deformační charakteristiky základové půdy. Eurokód 7-1 však požaduje použití hodnot charakteristických, tj. obezřetný, spíše nižší odhad. V případě komplikovanějších základových poměrů však je vhodné zvážit i možnou kombinaci tužšího (než obvykle) a poddajnějšího podloží pod částmi základové spáry, která může způsobit větší rozdíly sedání a namáhání základu. V tom případě je vhodné provést parametrickou studii.



Obr. 22 Kontaktní napětí pod spodní řadou sloupů vzorového příkladu

## Zatížení

V následující části menu se nejprve definují jednotlivé zatěžovací stavy a poté se pro každý zatěžovací stav definují jednotlivá zatížení. Tato část bývá časově nejnáročnější.

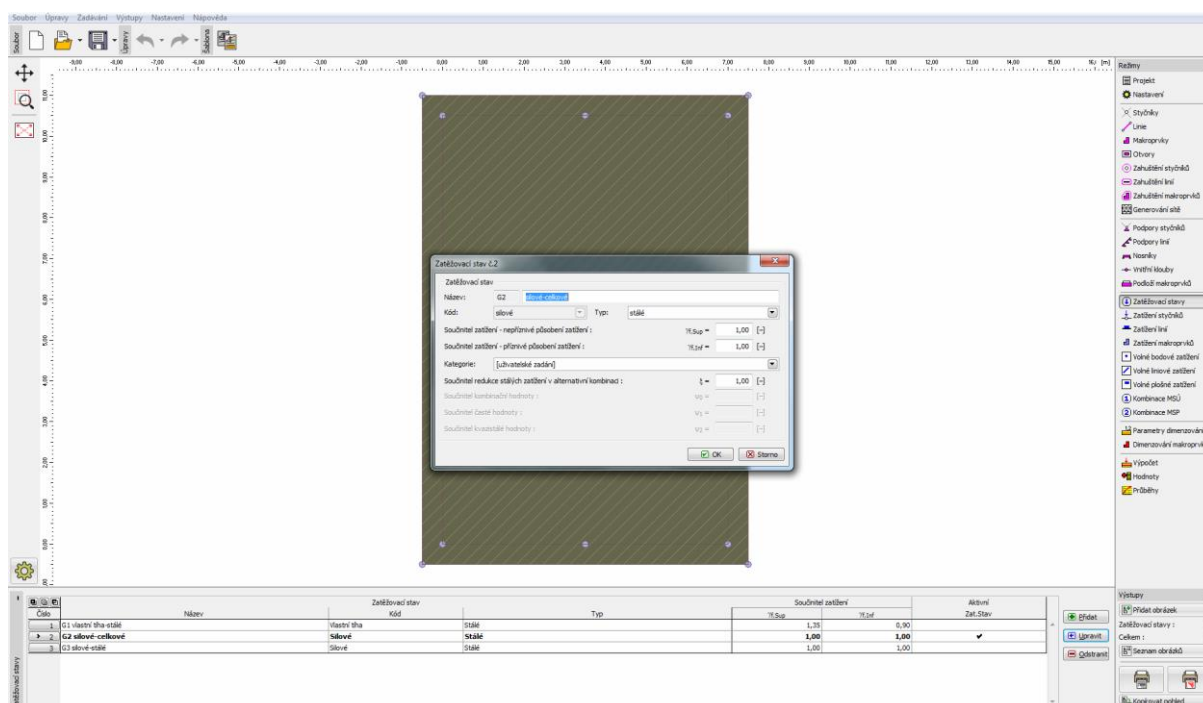
Po otevření okna „Zatěžovací stavy“ a stisknutí tlačítka „Přidat“ se definují jednotlivé zatěžovací stavy:

**První zatěžovací stav** je vlastní tíha makroprvků (základové) desky a všech součástí, které jsme případně přidali a definovali rozměry a materiálem, tj. „Nosníků“. Do tohoto zatěžovacího stavu se již žádná další zatížení nepřidávají. Tíhu vypočte program automaticky. Podle norem zvolených v části „Nastavení“ vybere automaticky dílčí součinitel stálého zatížení pro mezní stav únosnosti i další součinitele. Součinitele lze ještě upravit volbou „uživatelské zadání“. Poznámka: Pokud již máme do zatížení ze stavební konstrukce



započteny např. (suterénní) stěny nad základovou deskou a musíme je znovu definovat jako výztuhy desky – „nosníky“, objevila by se při zadání „katalogového“ materiálu jejich tíha v zatížení dvakrát. To lze vyřešit úpravou „vlastního“ materiálu „nosníků“, kde všechny parametry ponecháme „katalogové“, pouze objemovou tíhu „vynulujeme“. Ve skutečnosti program čistou nulu neakceptuje, ale 0,1 kN/m<sup>3</sup> již vyhovuje.

**V dalších zatěžovacích stavech** lze při jejich vkládání definovat, zda jde o zatížení stálé, nebo proměnné, zda jde o zatížení silami, předepsanými deformacemi, nebo teplotou. V nabídce „Kategorie“ je uloženo mnoho typů standardních zatížení, ze kterých lze vybírat. Program vybere automaticky dílčí součinitele stálého zatížení pro mezní stav únosnosti i další součinitele v souladu s normami zvolenými v části „Nastavení“. Kategorie „uživatelské zadání“ umožňuje vlastní definici všech součinitelů. Toho lze využít v případě, je-li např. k dispozici pouze celkové návrhové zatížení základu stavební konstrukcí (vzorový příklad).



Obr. 23 Zadávání „uživatelského“ zatěžovacího stavu

Volbou „uživatelského“ dílčího součinitele zatížení 1,00 dosáhneme toho, že charakteristické i návrhové zatížení se budou rovnat. Současně však musíme zvětšit tuhost podloží (parametry C1, C2) zhruba 1,4× (obr. 21). Součinitel cca 1,4 je vážený průměr dílčích součinitelů pro stálá (1,35) a proměnná (1,50) návrhová zatížení. Program automaticky vyřeší základovou desku pro charakteristické i návrhové zatížení a jejich kombinace, ale v tomto případě budou obě sady výsledků stejné. Sednutí bude odpovídat charakteristickému zatížení (MSP): celkové návrhové zatížení je sice zhruba 1,4× větší, ale stejným poměrem byla zvětšena i tuhost lineárně pružného modelu podloží. Vnitřní síly od návrhového zatížení (MSU) budou vypočteny při



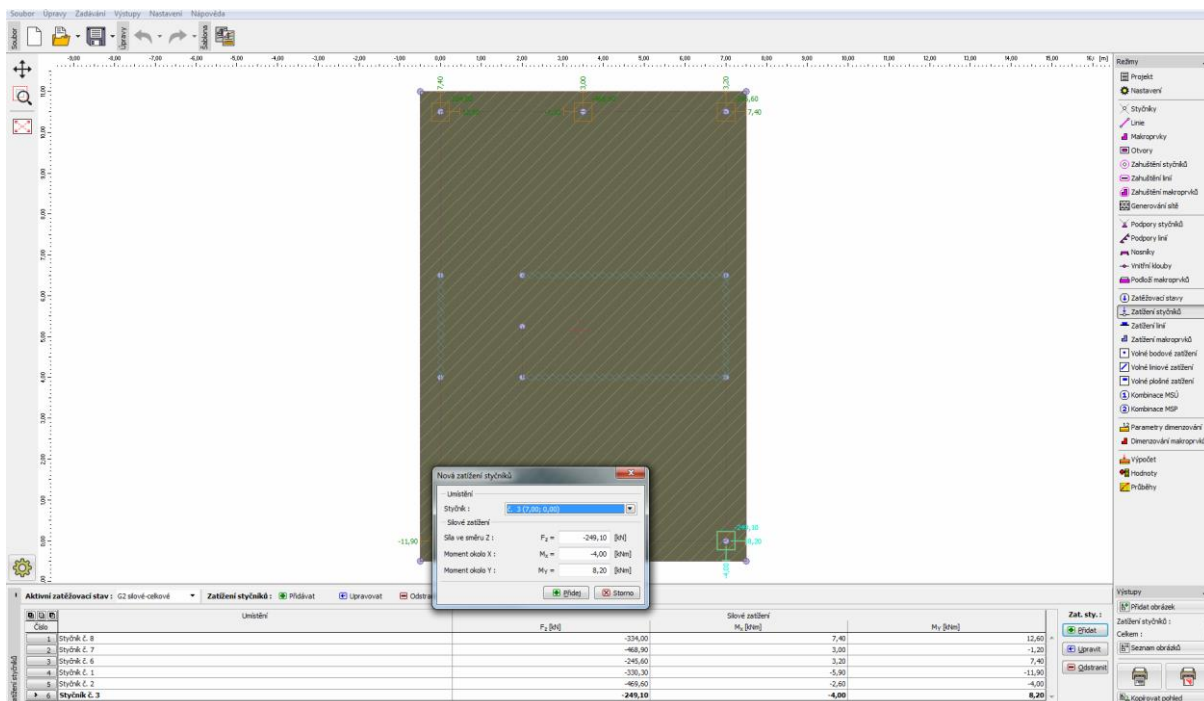
deformacích odpovídajících MSP. To je výstižnější, protože při krátkodobém nárůstu extrémního zatížení bude přírůstek sednutí velmi malý (zejména v jemnozrnných zeminách). Naopak při standardním výpočtu budou sednutí desky při MSU zhruba 1,4× větší než při MSP. Tuhost podloží je samozřejmě možné zvýšit poněkud méně, než by odpovídalo poměru návrhové/charakteristické zatížení a tím modelovat poněkud větší sednutí při MSU.

V okně „Mezní stavy“ musíme vždy předem vybrat zatěžovací stav, pro který budeme zadávat jednotlivá zatížení. Tomu je třeba věnovat patřičnou pozornost; zatížení v různých zatěžovacích stavech mohou být násobena rozdílnými součiniteli. Proměnná zatížení mohou být zařazena (rozdělena) do více zatěžovacích stavů. Jejich aktivaci/deaktivaci definují „Kombinace MSP“ a „Kombinace MSU“. U základových desek to může být např. proměnný vztlak podzemní vody.

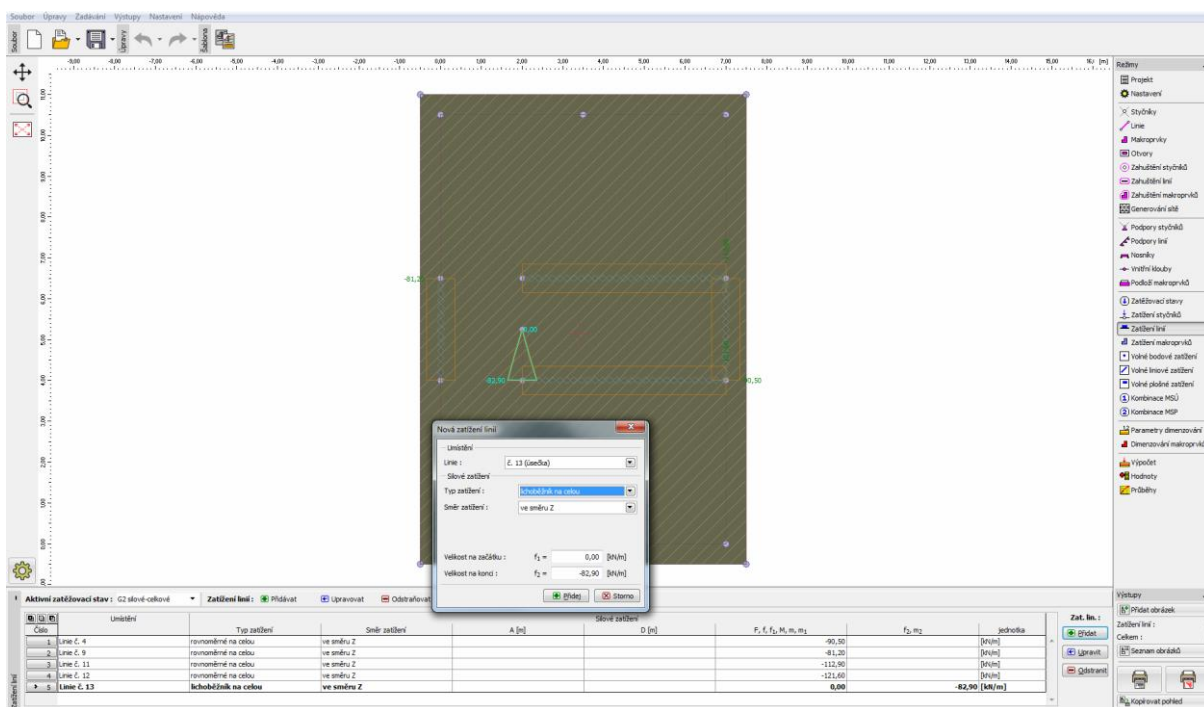
Jednotlivá zatížení, která lze definovat v rámci každého „silového“ zatěžovacího stavu s výjimkou prvního (vlastní tíha desky a připojených nosníků) jsou:

**Zatížení styčnicků:** Sestává ze svislé síly a momentů kolem osy  $x$  (vodorovné) a  $y$ . Příslušný styčnick lze vybrat ze seznamu (nelze přímo zadat jeho číslo) nebo graficky, kurzorem a levým tlačítkem myši. Svislá síla orientovaná dolů (většina zatížení) musí být zadána zápornou hodnotou! Při zadání kladné hodnoty budete programem upozorněni a požádáni o potvrzení síly směřující vzhůru. Kladný moment kolem osy  $x$  ( $M_x$ ) posouvá výslednici tlaku (excentricita) směrem dolů. Kladný moment  $M_y$  posouvá výslednici tlaku vpravo. Jinak řečeno, při pohledu ve směru rostoucích hodnot dané osy kladný moment kolem ní otáčí ve směru hodinových ručiček.





Obr. 24 Zadávání zatížení styčníku



Obr. 25 Zadávání zatížení linie – lichoběžník (ve skutečnosti trojúhelník) na celou délku

**Zatížení linií:** Je tvořeno svislou a momentovými složkami. Na rozdíl od zatížení styčniců je nutné každou složku zatížení linie zadat zvlášť (v novém okně). Znaménková konvence je jako u zatížení styčniců. Každá složka zatížení může být zadána jako osamělá (síla, moment) v určité pozici na linii, konstantní hodnotou na celou, nebo část délky linie a jako lineárně proměnná (trojúhelník, lichoběžník) na celou, nebo část linie. Pozice (počátku) zatížení se určuje od styčnicku, který byl zadán jako první při vkládání linie. V případě kružnic je již při vkládání definován počátek a směr. Program již při definování zatížení, před jeho vložením, vykresluje náhled. V této fázi je možné opravit vzdálenosti a hodnoty, pokud zjistíme, že jsme polohu počátku měření délek určili chybně. Obecně je ale vhodné držet při vkládání linií jistý systém pořadí styčniců, např. od nižšího čísla k vyššímu, aby uvedené opravy zatížení nebyly příliš časté. Jednotlivá dílčí zatížení linie v určitém zatěžovacím stavu se sčítají.

**Zatížení makroprvků:** Celoplošné zatížení makroprvků může být konstantní, nebo lineárně proměnné, definované třemi body roviny. Nejčastěji půjde o zatížení horního povrchu desky (např. konstrukční vrstvy podlahy, krycí vrstva zeminy, proměnné zatížení podlah apod.) které působí směrem dolů. To vyžaduje dosazení záporných hodnot. U základových desek se může přidat vztlak podzemní vody – kladná hodnota. Pokud je základová deska na dně hlubšího výkopu, může být použit kladný vztlak také k modelování prekonsolidačního napětí. Program počítá stlačení podloží od plného zatížení konstrukcí. V reálné zemině se předpokládá, že stlačení s obvyklými deformačními charakteristikami vyvolá prakticky pouze přírůstek napětí nad hodnotu původního geostatického napětí. Část původního geostatického napětí lze zadat jako vztlak na základovou spáru. Zde však je nutno dodržet dvě podmínky:

- 1) V nejméně zatížených částech základové desky nesmí po odečtení původního geostatického napětí docházet k nadzdvihování – v tom případě je nutné „vztlak“ snížit.
- 2) Pokud jsou parametry C1 a C2 modelu podloží odvozeny (kontrolovány) pomocí výpočtu sedání „základové patky“, nesmí být při výpočtu sednutí patky zohledněna hloubka výkopu. Je tedy nutné zabránit situaci, kdy bude příznivý účinek odlehčení podloží výkopem zahrnut dvakrát – při odvození C1 a C2 a znovu jako „vztlak“.

Další tři typy zatížení „Volné bodové, liniové a plošné“ není nutné podrobněji rozebírat. Jsou to obdoby zatížení styčniců, linií a makroprvků s tím rozdílem, že jejich působiště se zadávají souřadnicemi bodů libovolně v ploše desky. Výhodné může být užití „Volného plošného zatížení“ pro modelování sloupu. Pokud modelujeme sloup jako bod (styčnic), budou vnitřní síly kolem „Zatížení styčnicku“ nerealisticky velké. Modelovat skutečný sloup by bylo poměrně náročné, např.: čtyři styčnick, čtyři linie, makroprvek, zatížení makroprvku. Jednodušší je zadat sloup jako bod (styčnic) a „Volné plošné zatížení“. K definici průřezové plochy sloupu stačí zadat souřadnice rohových bodů. Další výhodou „Volných zatížení“ je, že mohou modelovat pohyblivé zatížení. Definujeme několik zatěžovacích stavů, jejichž obsahem bude pouze „Volné zatížení“ v různých pozicích. Postupným začleňováním do kombinací se základním zatížením můžeme studovat vliv pohyblivého zatížení.



**Kombinace MSÚ/MSP** Na konci zadávání zatížení desky se definují kombinace, tj. množiny mezních stavů, které mají být řešeny současně. (Program kromě toho řeší i každý jednotlivý mezní stav samostatně.) Do kombinace je možné zahrnout i pouze část zatížení daného mezního stavu. Alespoň jedna zadaná kombinace je podmínkou výpočtu úlohy.

Část menu, která se týká **Dimenzování**, bude přeskočena. S využitím popisu vkládání předchozích údajů není její použití obtížné. Případnou aktivaci modulu Dimenzování však doporučuji až po dokončení výpočtů a úprav rozměrů vlastní desky - prodlužuje dobu výpočtu.

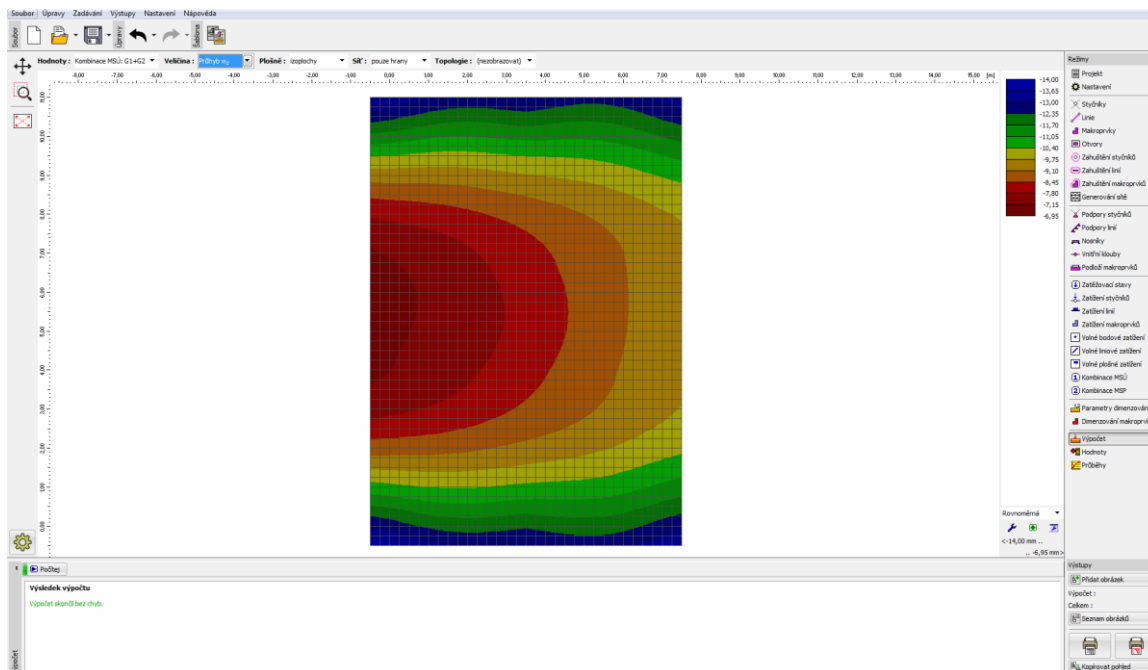
### Výpočet

Výpočet úlohy je nutné zahájit tlačítkem „Počítej“ pod levým spodním rohem zobrazovací plochy okna, nespustí se automaticky po otevření okna. Po ukončení výpočtů všech jednotlivých zatěžovacích stavů a jejich kombinací se zobrazí první výsledek - „Průhyb  $w_z$ “ pro první mezní stav (zpravidla vlastní tíha desky a přidaných nosníků). Nás zpravidla budou primárně zajímat výsledky zadaných „Kombinací“. Vyhledáme je v seznamu (Hodnoty:) vlevo na liště těsně nad zobrazovací plochou, např. Kombinace MSÚ vlevo od modře podkreslené plochy na obr. 26. Ze seznamu (Veličina:) na téže liště vybereme požadované výsledky: průhyby (modře podkresleno na obr. 26), natočení, ohybové momenty, posouvající síly, kontaktní napětí. Další seznamy na této liště umožňují modifikovat zobrazení veličin a sítě konečných prvků – je možno vyzkoušet, ale implicitní nastavení se zdá být optimální.

V pravém spodním rohu okna, viz např. na obr. 26, je možno „Přidat obrázek“ do seznamu. V „Seznamu obrázků“ lze upravovat nebo z něho vymazat. Obrázky se dají vytisknout samostatně, nebo budou přidány k závěrečnému dokumentu.

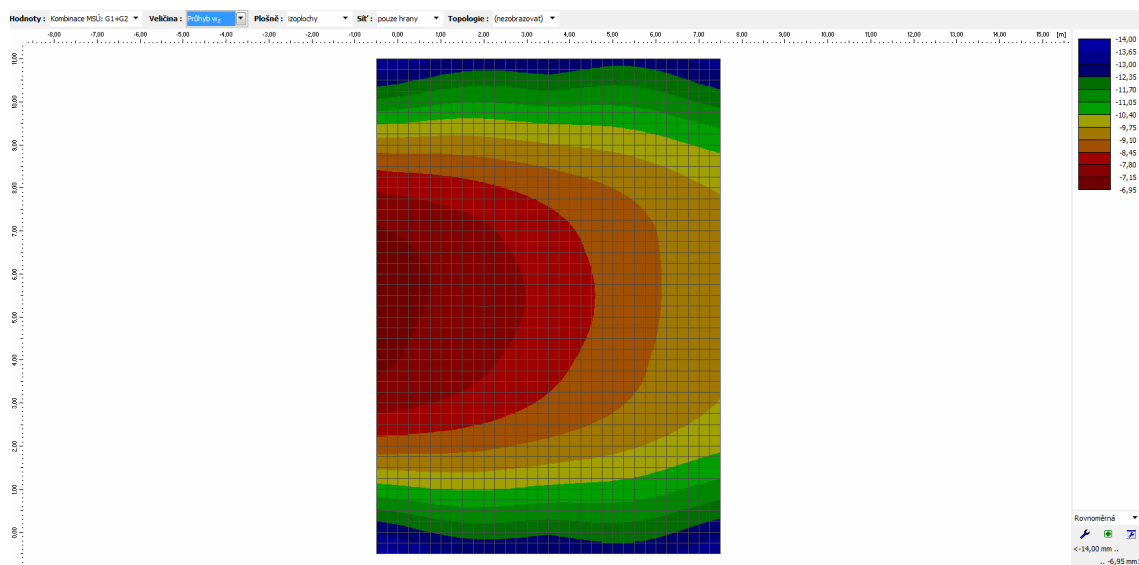






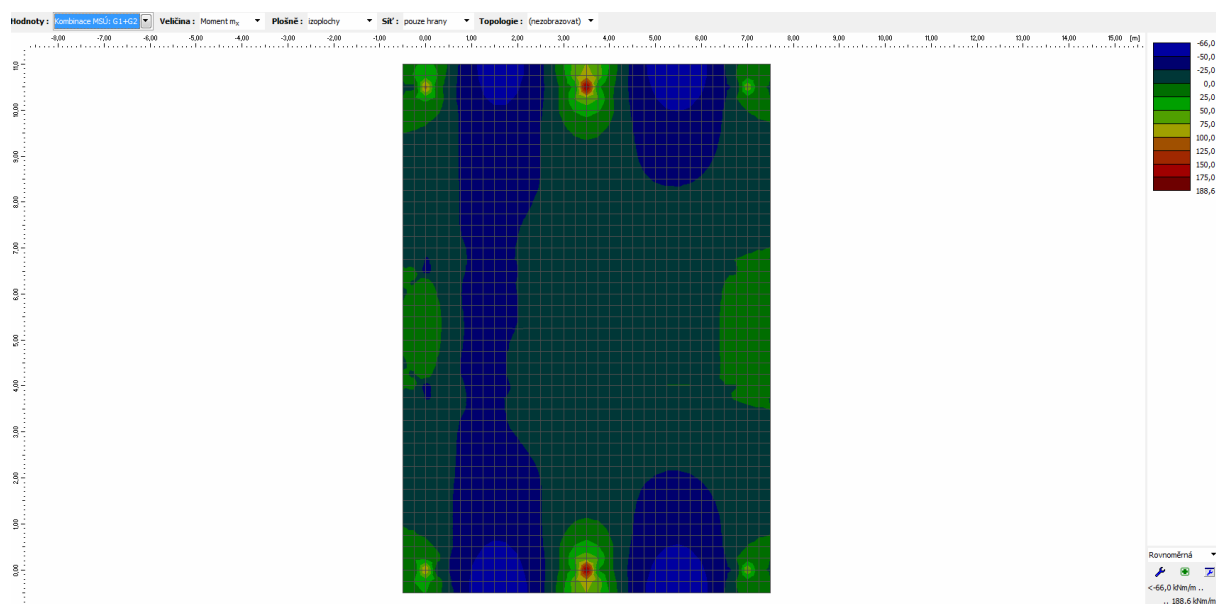
Obr. 26 Průhyb (sednutí) desky ve svislém směru – modré oblasti jsou extrémní (záporné)

Pro zvýraznění výsledků budou okraje oken na dalších obrázcích oříznuty, srovnajte obrázky 26 a 27. V pravém horním rohu výsledkového okna je měřítko, v pravém dolním potom rozpětí zobrazených hodnot (obr. 26, 27 a dále).

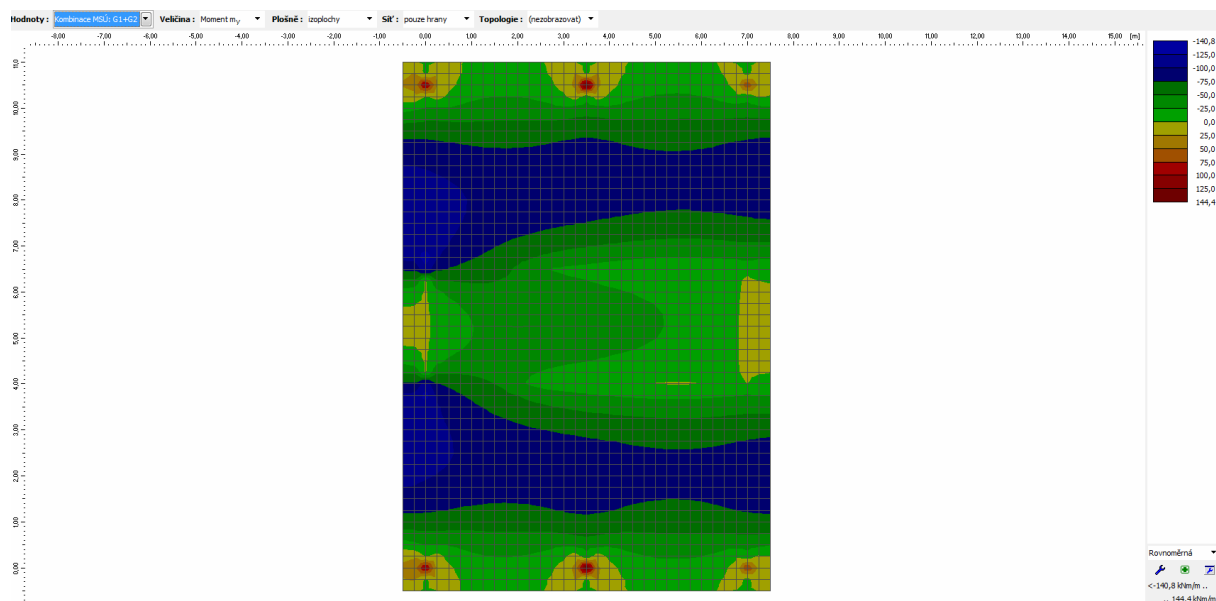


Obr. 27 Průhyb (sednutí) desky ve svislém směru – modré oblasti jsou extrémní (záporné)



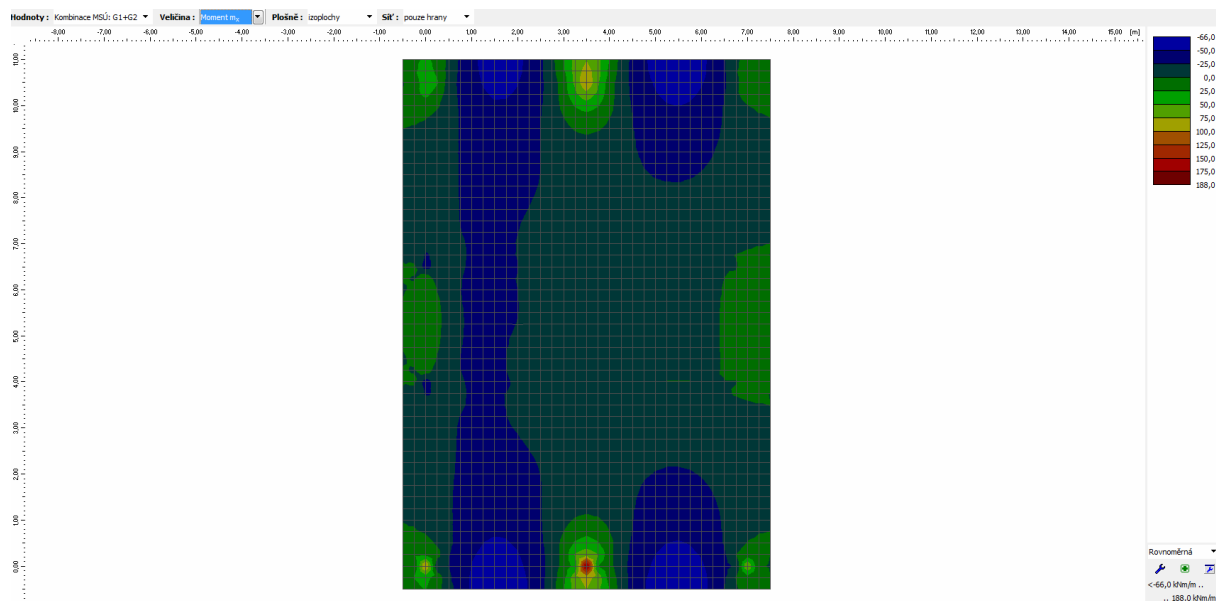


Obr. 28 Ohybové momenty  $M_x$  - otáčí kolem svislé osy  $Y$ !

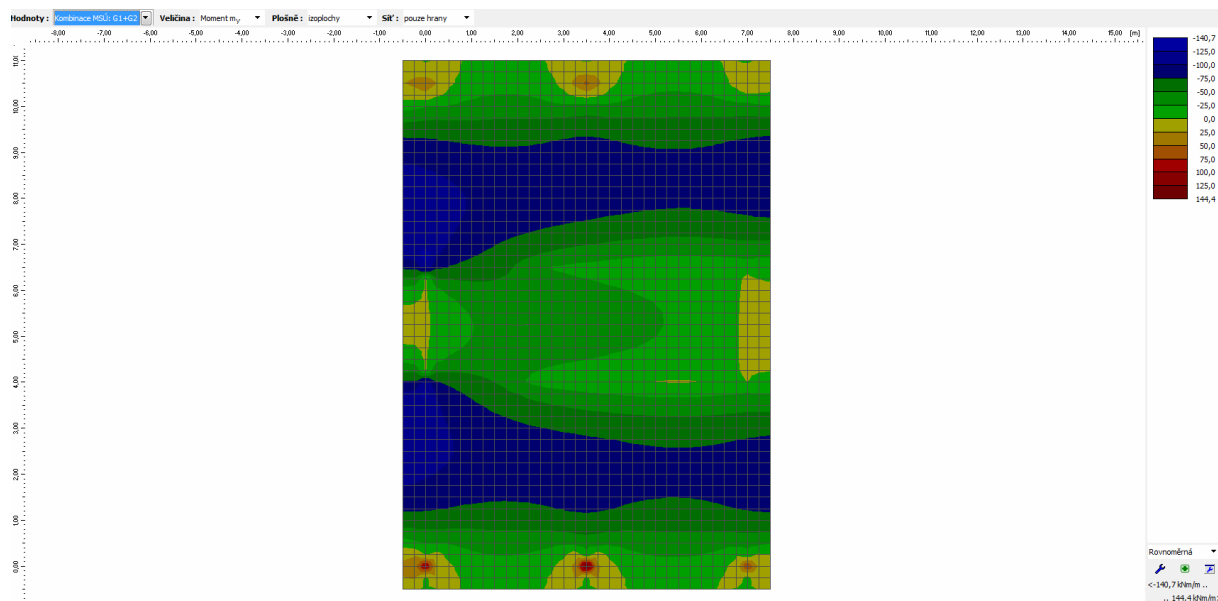


Obr. 29 Ohybové momenty  $M_y$  - otáčí kolem vodorovné osy  $X$ !

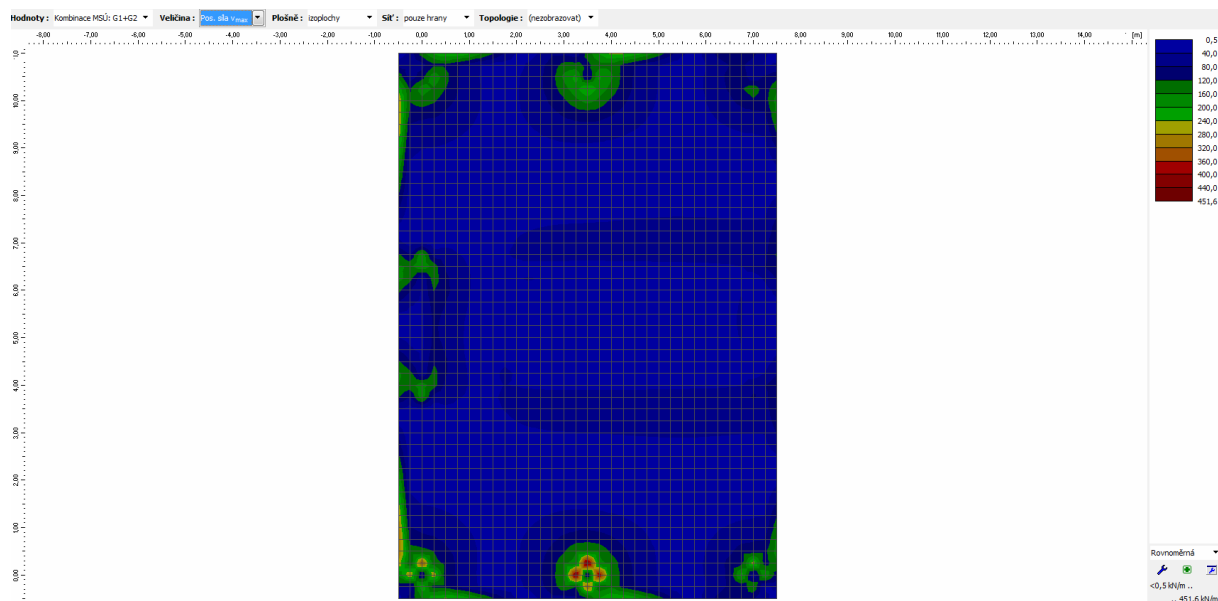




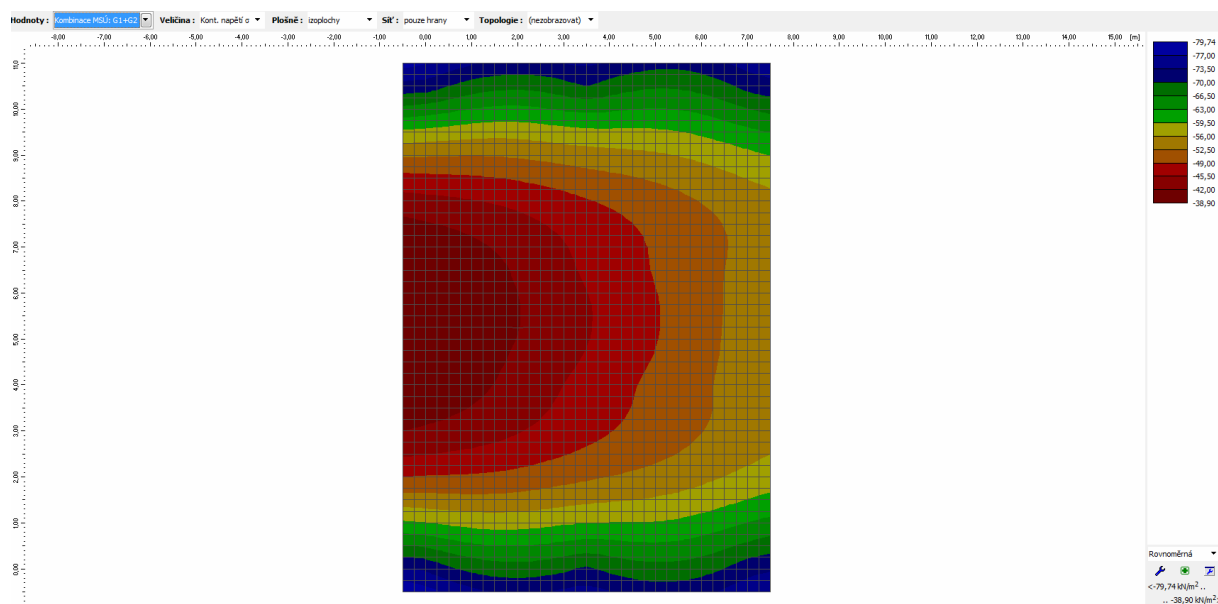
Obr. 30 Ohybové momenty  $M_x$  - srovnání výsledků pro bodová zatížení ze sloupů spodní řady a zatížení napětími na průřezích sloupů horní řady



Obr. 31 Ohybové momenty  $M_y$  - srovnání výsledků pro bodová zatížení ze sloupů spodní řady a zatížení napětími na průřezích sloupů horní řady



Obr. 32 Posouvající síly  $V_{max}$  - srovnání výsledků pro bodová zatížení ze sloupů spodní řady a zatížení napětími na průřezech sloupů horní řady.

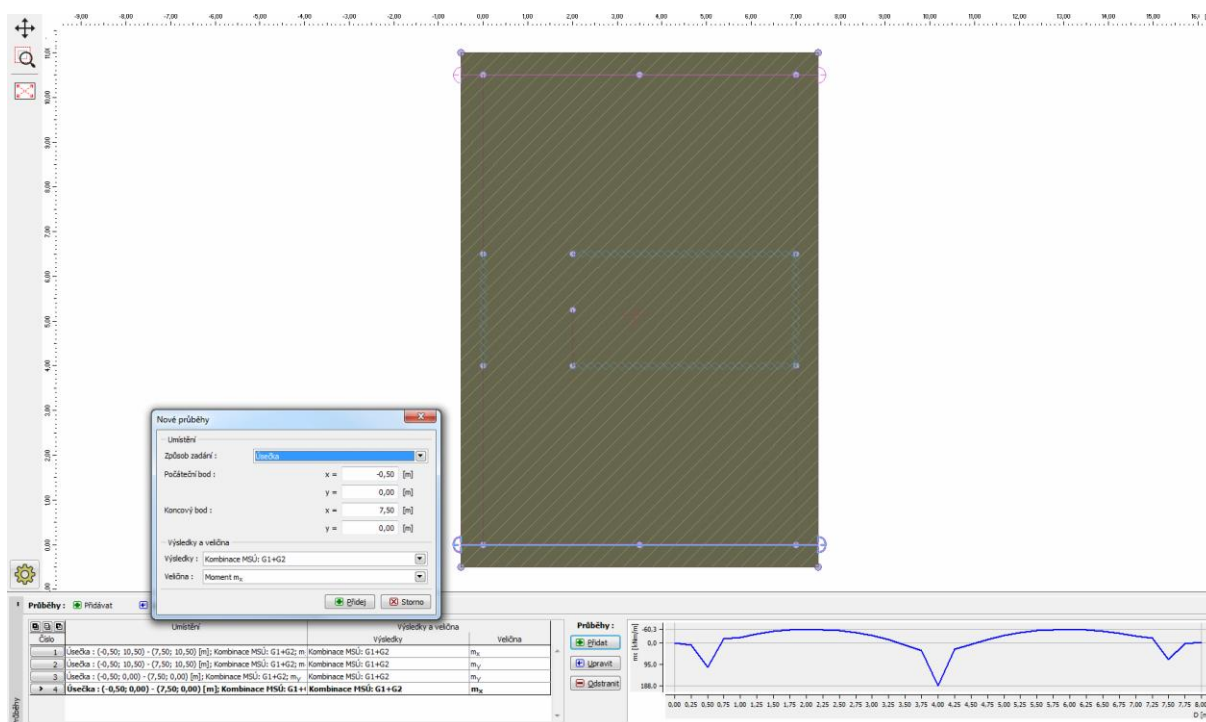


Obr. 33 Kontaktní napětí pod deskou – modré oblasti jsou extrémní (záporné). Program nekontroluje MSU, je nutno posoudit zvlášť



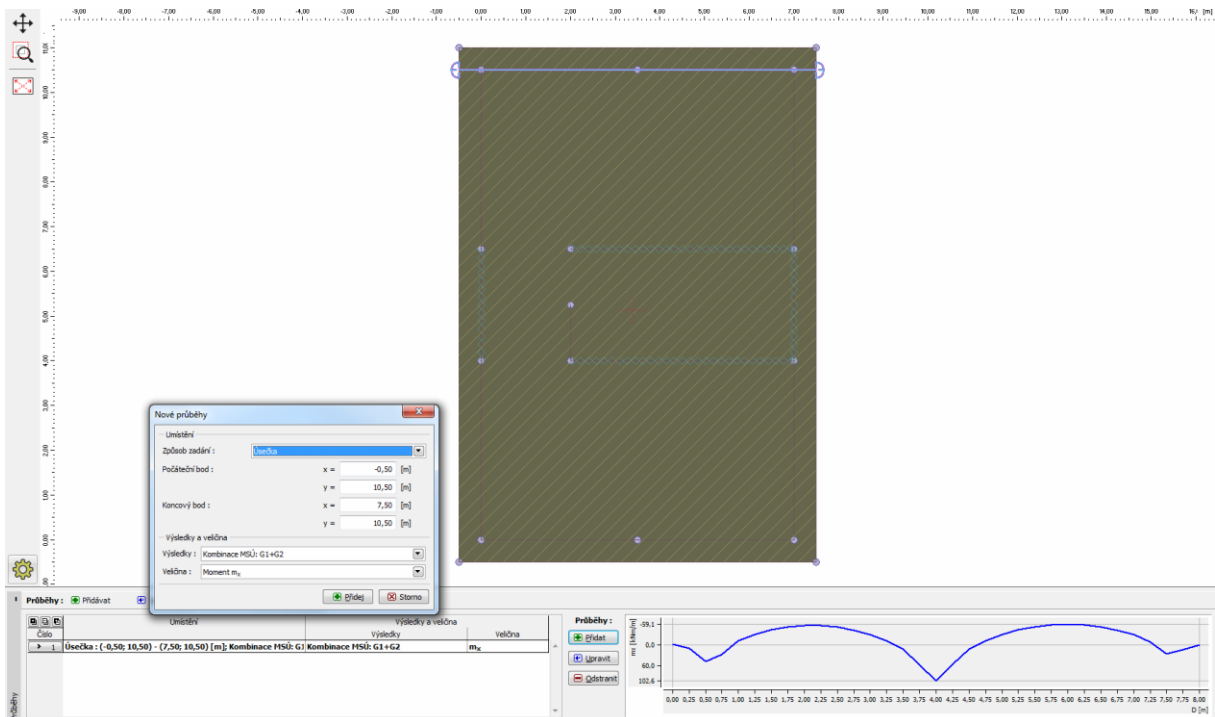
Předposlední položka menu („Hodnoty“) umožňuje zobrazit všechny vypočtené hodnoty v libovolném bodě půdorysu zadaném souřadnicemi nebo v libovolném „styčnicku“. Při zadání styčnicku se zobrazí i reakce v podpoře (pilotě). Při zadání bodu se stejnými souřadnicemi jako styčník s podporou se však reakce v podpoře nezobrazuje!

Poslední položka menu („Průběhy“) umožňuje zobrazit vybrané hodnoty v řezu podél libovolné úsečky zadané souřadnicemi krajních bodů nebo na libovolné „linii“.



Obr. 34 Průběh ohybových momentů  $M_x$  v řezu zadaném úsečkou procházející osami bodově zatěžujících sloupů spodní řady. Jednotlivá zadání se ukládají v seznamu (vlevo dole) a lze mezi nimi rychle přepínat.





Obr. 35 Průběh ohybových momentů  $M_x$  v řezu zadaném úsečkou procházející osami plošně zatěžujících sloupů horní řady

## Reference

- [1] ČSN EN 1992-1-1. Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
- [2] Bílý, P. Návrh stropní desky v programu SCIA Engineer. Výukový manuál pro předmět 133YBKC. Dostupný z [www: http://people.fsv.cvut.cz/~stefarad/vyuka/133YBKC.html](http://people.fsv.cvut.cz/~stefarad/vyuka/133YBKC.html)
- [3] [http://www.fce.vutbr.cz/BZK/zvolanek.l/vyuka\\_bzk/BL01\\_Kryti.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/BZK/zvolanek.l/vyuka_bzk/BL01_Kryti.pdf)
- [4] Procházka, J.; Štemberk, P. Design Procedures for Reinforced Concrete Structures; Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2012.
- [5] Procházka, J.; Šmejkal, J. Betonové základové a opěrné konstrukce; Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2017.

