



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STAVEBNÍ**  
**ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

## **ZESÍLENÍ ŽB RÁMOVÉ KONSTRUKCE**

STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**TOMÁŠ JELÍNEK**

**VEDOUcí PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. PETR ŠIMŮNEK, Ph.D.**

BRNO 2014



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

**Studijní program** B3607 Stavební inženýrství  
**Typ studijního programu** Bakalářský studijní program s prezenční formou studia  
**Studijní obor** 3608R001 Pozemní stavby  
**Pracoviště** Ústav betonových a zděných konstrukcí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Student** Tomáš Jelínek

**Název** Zesílení ŽB rámové konstrukce

**Vedoucí bakalářské práce** Ing. Petr Šimůnek, Ph.D.

**Datum zadání bakalářské práce** 30. 11. 2013

**Datum odevzdání bakalářské práce** 30. 5. 2014

V Brně dne 30. 11. 2013

.....  
prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **Podklady a literatura**

Technické předpisy:

ČSN EN 1990: Zásady navrhování konstrukcí. 2004

ČSN EN 1991-1 až 4: Zatížení stavebních konstrukcí. 2004-2007

ČSN EN 1992-1-1: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby. 2006

Další potřebná literatura po dohodě s vedoucím bakalářské práce

## **Zásady pro vypracování**

Jedná se o monolitický železobetonový prostorový skelet budovy občanského vybavení. Proved'te statické posouzení stávajícího sloupu. Proved'te statické řešení zesílení ŽB sloupu konstrukce v rozsahu určeném vedoucím práce. Vypracujte výkres způsobu zesílení dimenzované části konstrukce.

Požadované výstupy:

Textová část

Přílohy textové části:

P1) Použité podklady

P2) Statický výpočet

P3) Výkresová dokumentace

Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy VŠKP (1x), Popisný soubor závěrečné práce (1x).

Bakalářská práce bude odevzdána v listinné a elektronické formě dle směrnic a na CD (1x).

## **Předepsané přílohy**

.....  
Ing. Petr Šimůnek, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá zesilováním železobetonového sloupu v rámové konstrukci za použití ocelové bandáže, která je tvořena podélnými úhelníky a příčnými pásy. Práce je rozdělena do tří částí. V první části je vybrán nejvhodnější návrhový přístup. Druhá část se věnuje popisu jednotlivých kroků návrhu a posouzení. Uvažuje se s přímým přenosem části zatížení do úhelníků. Dále se předpokládá, že pásy svírají beton, čímž zvětšují jeho deformační charakteristiky. K vyřešení jednoho z nastalých problémů byl použit program ATENA 3D. Ve třetí části je navržený postup aplikován na konkrétní sloup.

## **Klíčová slova**

ATENA 3D, ocelová bandáž, pásy, sevřený beton, úhelníky, zesilování, ŽB sloup

## **Abstract**

This thesis reviews a strengthening of reinforced concrete column in frame structure. The column is strengthened with angles and battens. This work is divided into three parts. In the first part there is chosen an appropriate theoretical model. In the second part there is described every step of the design and the assessment which is based on two assumptions. Angles are expected to carry a part of load directly. Concrete is confined with battens. Therefore we can expect better deformation characteristics. There was also used a program ATENA 3D to elucidate one of the problems. The third part consists of designing and assessment of a particular column.

## **Keywords**

angles, ATENA 3D, battens, confined concrete, RC column, steel jacket, strengthening

...

## **Bibliografická citace VŠKP**

Tomáš Jelínek *Zesílení ŽB rámové konstrukce*. Brno, 2014. 63 s., 39 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce Ing. Petr Šimůnek, Ph.D.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 29.5.2014

.....  
podpis autora  
Tomáš Jelínek

**Poděkování:**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Petru Šimůnkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a především čas, který mi věnoval.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Václavu Sadílkovi, Ph.D. za ochotu a zpřístupnění programu ATENA 3D.

V neposlední řadě bych rád poděkoval rodině za její podporu.

# OBSAH

1	Úvod .....	8
2	Zesilování železobetonových sloupů ocelovou bandáží.....	9
2.1	Ocelová bandáž .....	9
2.2	Návrhové přístupy převzaté z literatury.....	10
2.3	Působení úhelníků .....	12
2.4	Úprava bandáže v oblasti hlavy a paty sloupu .....	15
2.5	Působení příčných pásků.....	17
2.6	Sevření betonu .....	18
3	Zvolený návrhový přístup .....	27
3.1	Výpočtové předpoklady.....	27
3.2	Působení prvků ocelové bandáže.....	28
3.3	Postup provádění a konstrukční zásady .....	28
3.4	Výpočet charakteristik sevřeného betonu .....	29
3.5	Pracovní diagram sevřeného betonu .....	31
3.6	Přechod z jednoosého do „trojosého“ stavu napjatosti (ATENA 3D).....	33
3.7	Přetvoření sloupu ve chvíli zesilování.....	40
3.8	Sestavení interakčního diagramu .....	45
4	Závěr .....	58
	Seznam zdrojů .....	59
	Seznam symbolů.....	61
	Seznam příloh.....	63
P1	Použité podklady .....	64
P2	Statický výpočet.....	67
P2.1	Posouzení stávajícího sloupu ve směru „y“ .....	67
P2.2	Posouzení stávajícího sloupu ve směru „z“ .....	73
P2.3	Návrh ocelové bandáže .....	79
P2.4	Posouzení zesíleného sloupu ve směru „y“ .....	80
P2.5	Posouzení zesíleného sloupu ve směru „z“ .....	87
P2.6	Posouzení zesíleného sloupu na dvousé namáhání ohybem.....	93

# 1 ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je představit problematiku zesilování železobetonových sloupů ocelovou bandáží. Dalším cílem práce je statické posouzení stávajícího sloupu, návrh jeho zesílení a posouzení takto zesílené konstrukce.

Práce je rozdělena do tří základních částí. První dvě části jsou teoretické, ve třetí části je teorie aplikována na konkrétním příkladu.

První část se zabývá představením a zhodnocením některých návrhových přístupů zesilování ocelovou bandáží. Je zde popsáno působení jednotlivých částí bandáže a její vliv na stávající sloup. Pozornost je věnována zvláště problematice sevření betonu.

Ve druhé části práce je popsán zvolený návrhový přístup. Vedle stručného popisu působení ocelové bandáže je i zde hodně prostoru věnováno problematice sevření betonu. K vysvětlení některých nejasností je použit program ATENA 3D. Dále je ve druhé části popsán postup výpočtu poměrného přetvoření sloupu ve chvíli zesilování a výpočet jednotlivých bodů interakčního diagramu zesíleného sloupu.

Přílohy tvoří třetí část této práce. Jedná se o statický posudek stávajícího sloupu, návrh zesílení ocelovou bandáží a posouzení zesíleného sloupu. Součástí je rovněž výkresová dokumentace.

## 2 ZESILOVÁNÍ ŽELEZOBETONOVÝCH SLOUPŮ OCELOVOU BANDÁŽÍ

Zesilování jakýchkoliv konstrukcí nebo prvků je obecně náročná činnost. Musíme přistupovat ke každému případu individuálně a zohledňovat konkrétní podmínky, v nichž se konstrukce nebo prvek nachází. Toto platí i pro železobetonové rámové konstrukce.

Důvody k zesilování tlačných prvků železobetonových konstrukcí jsou zejména dva. Buď je tlačný prvek plně využit a nachází se třeba i na pokraji zhroucení, nebo prvek vyhovuje, ale nebyl by schopen odolávat nově navrhovanému přetížení.

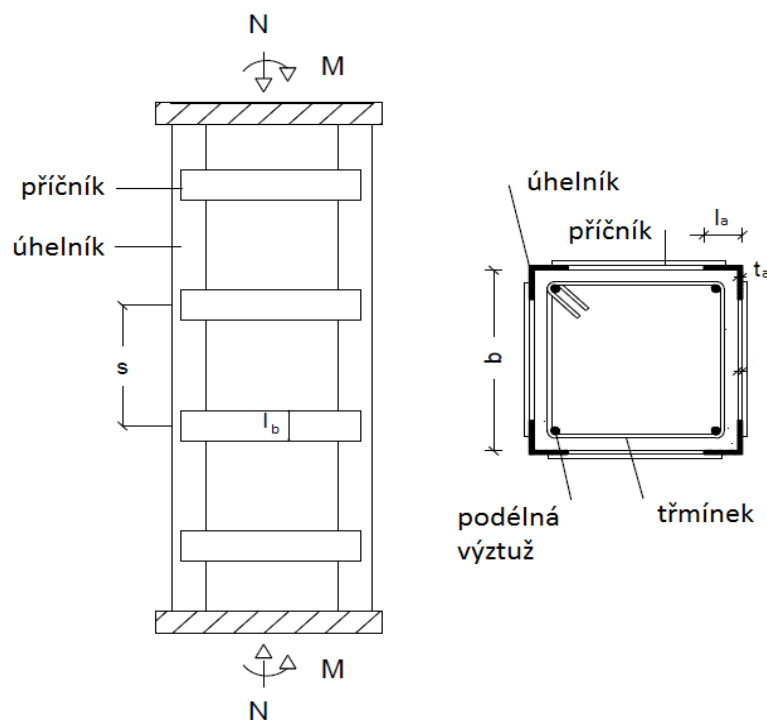
Je-li nutné k zesílení tlačného prvku přistoupit, můžeme zvolit některou z následujících technologií:

- železobetonovou bandáž;
- ocelovou bandáž;
- ovinutí kompozitními tkaninami.

Dále se bude práce zabývat již jen použitím ocelové bandáže. Její výhodou oproti železobetonové bandáži je okamžitá únosnost, oproti kompozitním tkaninám je to příznivější cena.

### 2.1 Ocelová bandáž

Ocelová bandáž sestává z ocelových podélných L-úhleníků a ocelových příčných pásků (příčnicků).



Obr. 1: Ocelová bandáž železobetonového sloupu [17]

Obecně se ocelová bandáž provádí tak, že se do rohů sloupu umístí do maltového lože podélné úhelníky a poté se k nim přivaří příčné pásky (mezitím se provádí aktivace pásků). Následovat může úprava bandáže v oblasti hlavy a paty sloupu. Na závěr se provádí konečná povrchová úprava, aby byla bandáž mj. z estetických důvodů zakryta.

## 2.2 Návrhové přístupy převzaté z literatury

Problémem zesilování železobetonových konstrukcí pomocí ocelové bandáže se zabývá hned několik autorů. Jejich návrhové přístupy, výpočtové vztahy a výsledky se od sebe poměrně dost liší, přesto lze najít některé společné body, jejichž zobecněním lze získat vztah charakterizující problematiku zesilování:

$$N_{zesílený} = N_{stávající} + N_{příčné namáhání} + N_{úhelníky}$$

kde  $N_{zesílený}$  značí únosnost v tlaku zesílené konstrukce,  $N_{stávající}$  únosnost stávající (nezesílené) konstrukce,  $N_{příčné namáhání}$  zvýšení únosnosti vlivem vneseného příčného zatížení (v ideálním případě by způsobovalo vznik trojosé napjatosti) a  $N_{úhelníky}$  představuje únosnost úhelníků.

Nyní se pokusím stručně představit některé návrhové přístupy. Jako první se nabízí přístup prof. Vaňka. Ve své publikaci [1] bohužel předkládá pouze vztah pro výpočet zesílení zděného pilíře, domnívám se ale, že po náležitých úpravách by jej bylo možné s jistými obtížemi použít i u konstrukcí železobetonových:

$$N \cong \gamma_u \psi \varphi k_d \left[ \left( \gamma_k R + \delta \frac{2,5\mu}{1 + 2,5\mu} \frac{R_{aq}}{100} \right) A_k + R_a A_a \right]$$

kde  $\gamma_u \psi \varphi k_d$  jsou součinitele zohledňující podmínky působení, excentricitu zatížení nebo vzpěr,  $\gamma_k$  zohledňuje poškození pilíře,  $R$  je výpočtové namáhání zdiva,  $\delta$  je součinitel týkající se opět excentricity zatížení,  $\mu$  značí procento vyztužení příčnými pásky,  $R_{aq}$  je výpočtové namáhání těchto pásků,  $R_a$  výpočtové namáhání tuhé výztuže,  $A_k$  průřezová plocha zesilovaného zdiva a  $A_a$  plocha podélných úhelníků.

Stejný návrhový přístup přijal i prof. Witzany, který ve svých skriptech [2] uvádí velmi podobný vztah, rovněž pouze pro zesilování zděných konstrukcí:

$$N \cong \Phi_{i,m} \left[ \left( \gamma_z f_{d,z} + \delta \frac{2,5\mu}{1 + 2,5\mu} \frac{f_{yd,t,pr}}{100} \right) A_z + \chi f_{yd,t} A_a \right]$$

kde  $\Phi_{i,m}$  je součinitel zohledňující štíhlost prvku a excentricitu zatížení,  $\gamma_z$  je součinitel postihující stupeň poškození zdiva,  $f_{d,z}$  je návrhová hodnota pevnosti zesilovaného zdiva,  $\delta$  součinitel týkající se opět excentricity zatížení,  $\mu$  značí objemové procento vyztužení příčnými pásky,  $f_{yd,t,pr}$  je návrhová hodnota pevnosti na mezi kluzu příčné výztuže,  $A_z$  je průřezová plocha zesilovaného zdiva,  $\chi$  značí součinitel vzpěrnosti dílčích podélných prvků (mezi pásky),  $f_{yd,t}$  je návrhová hodnota pevnosti na mezi kluzu podélné výztuže a  $A_a$  je průřezová plocha podélných úhelníků.

Podmínkou použití obou vztahů je předpoklad, že zesilovaný sloup (pilíř) je po zesílení schopen přenášet příslušný díl zatížení a že je zajištěn přenos zbývajících zatížení do zesilující

konstrukce, tj. do úhelníků [2]. Úhelníky jsou zde uvažovány tak, že přímo přenáší vnesené normálové síly, neuvažuje se tedy tření vznikající mezi ocelí a betonem.

Dále je třeba upozornit, že v obou případech se jedná pouze o orientační výpočet únosnosti převážně v dostředném tlaku. Pokud bych chtěl pro zesilovanou konstrukci namáhanou kombinací normálové síly a ohybového momentu vytvořit interakční diagram, výše uvedené vztahy by mi nestačily.

Odlisný přístup zvolil např. P. A. Calderón a kol. [3], při svém návrhu vychází z Eurokódu 4 – Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí:

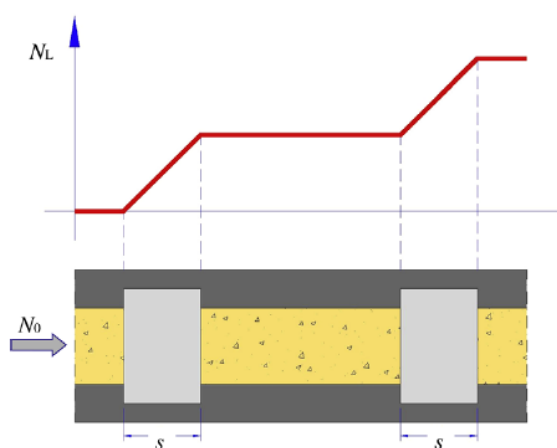
$$P = 0,85A_c f_c + A_s f_{ys} + A_L f_{yL}$$

kde  $A_c$  značí plochu průřezu železobetonového sloupu,  $f_c$  pevnost betonu v tlaku,  $A_s$  je plocha betonářské výztuže,  $f_{ys}$  je pevnosti betonářské výztuže na mezi kluzu,  $A_L$  je plocha podélných úhelníků a  $f_{yL}$  pevnost úhelníků na mezi kluzu.

Ze vztahu je patrné, že vůbec neuvažuje vliv sevření betonu, navíc se obecně u spřažených konstrukcí předpokládá plné spolupůsobení oceli a betonu, čehož bez použití spřahovacích prostředků nelze dosáhnout. Calderón si je toho vědom a výše uvedený vztah používá pouze jako odrazový bod pro svůj návrh. Na základě zatěžovacích zkoušek (viz kapitola 2.3) a matematických simulací definuje návrhový přístup, který zohledňuje výše uvedené námítky. V navržené rovnici již započítává vnesené příčné namáhání a rovněž postihuje působení úhelníků:

$$P = 0,85A_c f_c + A_s f_{ys} + K A_c f_l + N_L$$

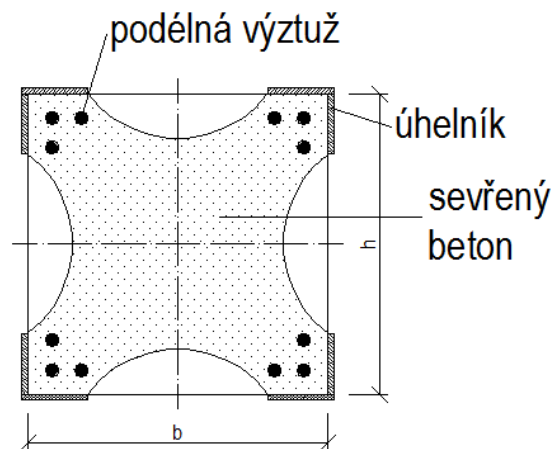
kde  $K$  je součinitel zohledňující zvýšení pevnosti betonu v tlaku vlivem příčného namáhání  $f_l$ ,  $f_l$  se určuje zvlášť pro dva předpokládané způsoby porušení bandáže – buď ztráta únosnosti úhelníků, nebo příčníků,  $N_L$  značí únosnost úhelníků vznikající na základě tření mezi betonem a ocelí, tato únosnost narůstá v místech příčníků.



Obr. 2: Nárůst únosnosti úhelníků vlivem tření [3]

Ale i tento vztah poskytuje pouze hodnotu únosnosti v dostředném tlaku. Je třeba se proto porozhlédnout po jiném návrhovém přístupu, který nabízí využití v obecnějších případech, tedy který lze použít při sestavování interakčního diagramu.

Jako řešení se nabízí návrhový přístup R. Montuoriho a V. Pilusa [4,5], který počítá s přímým přenosem normálových sil (tlakových nebo tahových) do úhelníků, jejichž chování pak v příčném řezu železobetonovým sloupem uvažuje jako obdobu chování podélné výztuže (za splnění určitých podmínek). Vliv příčného namáhání je zahrnut v přijatém modelu sevřeného betonu [6], který definoval J. B. Mander (podrobněji se tímto modelem budu zabývat v kapitole 2.6). Montuori a Piluso tedy používají železobetonový průřez s několika vrstvami výztuže a jasně definovanými vlastnostmi sevřeného betonu.

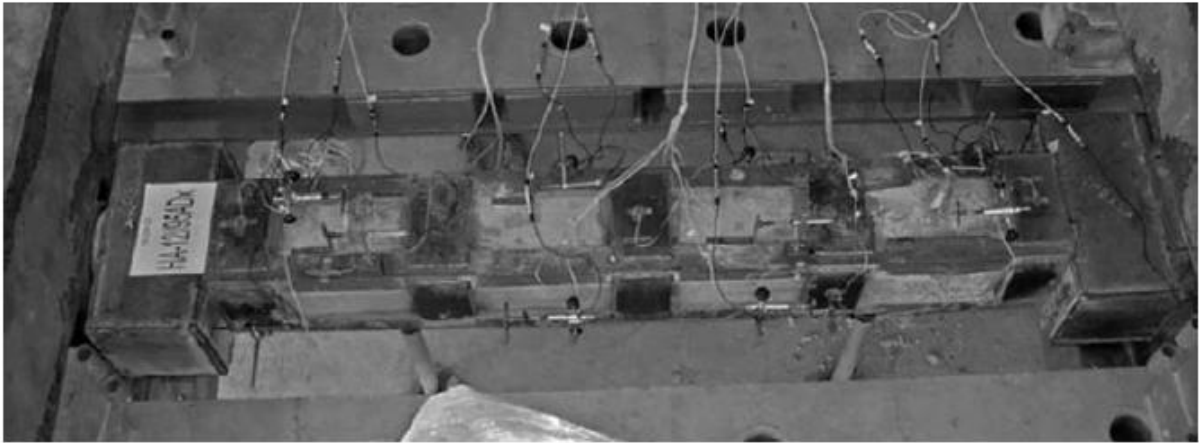


Obr. 3: Železobetonový průřez sevřený ocelovou bandáží

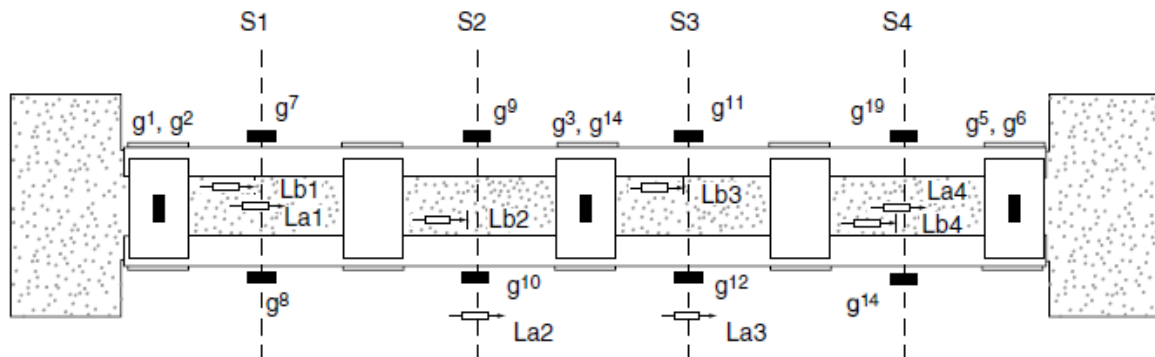
Zhodnotím-li výše uvedené návrhové přístupy, mohu konstatovat, že všechny uvažují vliv příčného namáhání na celkovou únosnost zesilovaného prvku, i když rozdílným způsobem. Liší se ale v uvažovaném přenosu zatížení do podélných úhelníků. Některé počítají s přímým vnesením normálového napětí do ocelového profilu, avšak jiné operují s přenosem vertikálního zatížení na základě tření mezi ocelí a betonem. Proto bude vhodné se nyní blíže zaměřit na působení úhelníků.

### 2.3 Působení úhelníků

Podrobně se touto problematikou zabýval tým španělských inženýrů (E. Giménez, J. M. Adam, P. A. Calderón a další). Ti provedli několik sérií zatěžovacích zkoušek [7,8], při nichž zkoumali způsob přenosu zatížení mezi železobetonovou konstrukcí a ocelovou bandáží, nejvíce se zaměřili na tření vznikající mezi ocelí a betonem. Na rozdíl od dřívějších studií, které se tématu věnovaly, zatěžoval tým železobetonové sloupy v životní velikosti a ve stejné kvalitě odpovídající běžně budovaným konstrukcím ve Španělsku v 70. letech (hladká výztuž a beton o nízkých pevnostech, tj. velmi podobné jako v tehdejší Československu).

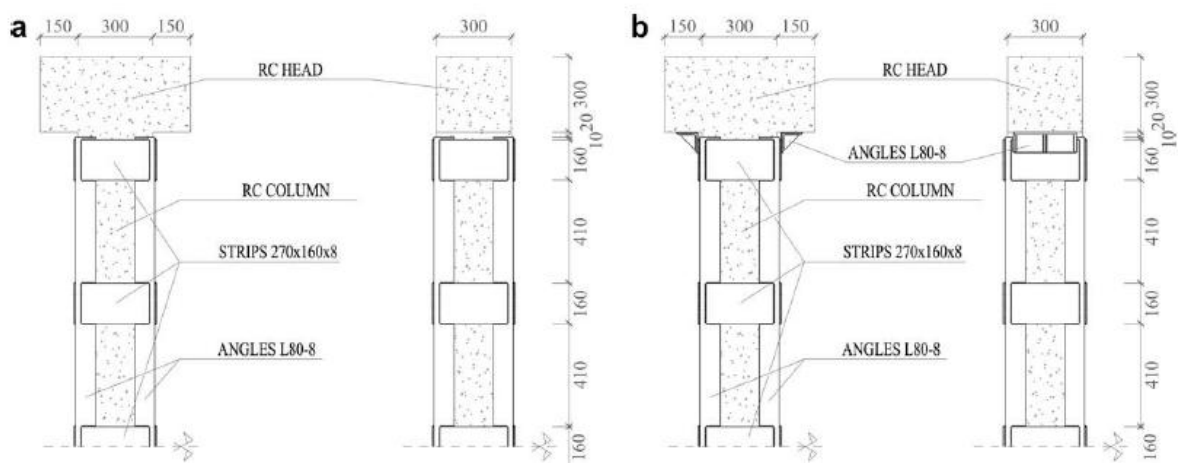


Obr. 4 Zkušební těleso [7]



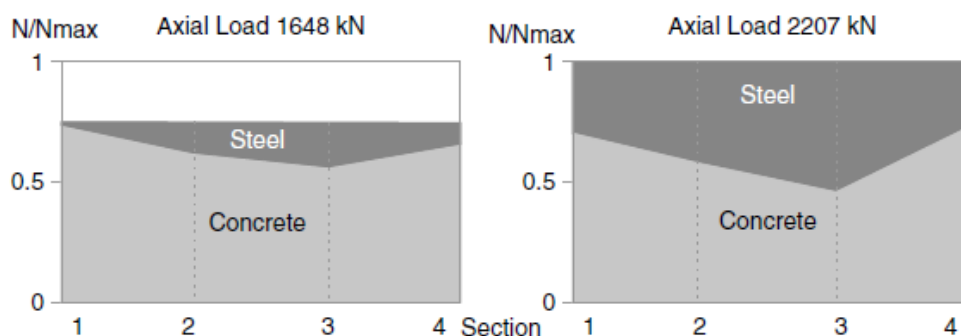
Obr. 5: Schéma zkušebního tělesa [7]

Testovaná tělesa [7] byla rozdělena do dvou základních skupin na sloupy bez zvláštní úpravy na koncích (typ A, uvažováno tření) a na sloupy s roznášecí „hlavicí“ vytvořenou z úhelníků (typ B, uvažován přímý přenos zatížení i tření). Dále byly tyto skupiny rozděleny dle pojiva mezi povrchem betonu a ocelovou bandáží do dalších dvou: s nesmršťující se cementovou maltou a materiálem na bázi epoxidu.



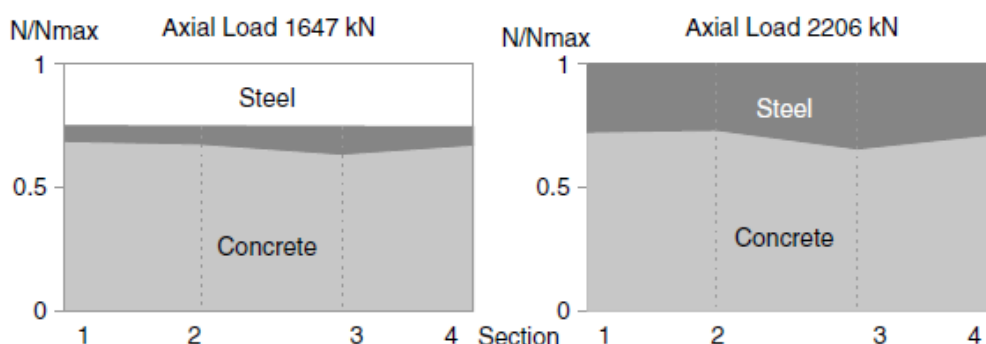
Obr. 6: Zkušební sloupy (a) bez úpravy na koncích, (b) s úpravou v oblasti hlavy a paty [8]

Z výsledků vyplývá, že v případě typu A (těleso bez úpravy na koncích) dochází právě na koncích sloupu k velkým prokluzům mezi betonem a ocelí, nedá se tedy počítat s jejich spolupůsobením. Ve střední části sloupu k usmýknutí naopak nedochází a vlivem tření se na přenosu zatížení mnohem více podílí podélné úhelníky.



Obr. 7: Podíl betonu a ocelových úhelníků na přenosu zatížení po výšce sloupu [7]

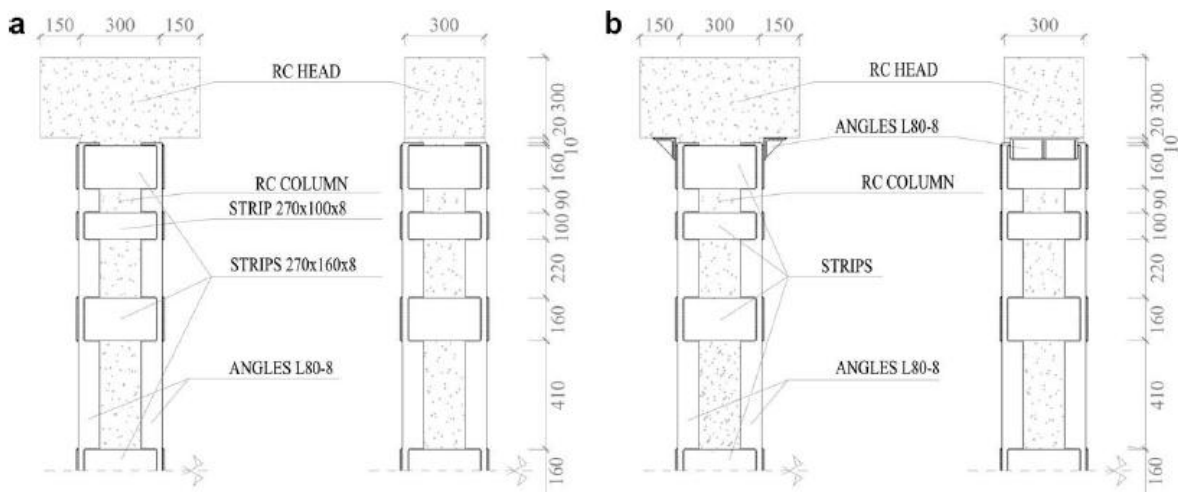
U těles typu B (úprava konců bandáže) nedocházelo k tak velkým prokluzům jako u typu A. To je dáno tím, že roznášecí „hlavice“ z úhelníků zajišťuje přímý přenos svislého zatížení do ocelových profilů, vliv smykového napětí se tak stává méně důležitým. Železobetonový sloup a ocelová bandáž se na přenosu zatížení podílí po výšce sloupu rovnoměrněji.



Obr. 8: Podíl betonu a ocelových úhelníků na přenosu zatížení po výšce sloupu [7]

Na použití spojovacího materiálu mezi ocelí a betonem podle výsledků příliš nezáleží. Mezi výsledky zkušebních těles s cementovou a epoxidovou maltou nebyly výraznější rozdíly.

V následujícím testování [8] stejný tým pokračoval s upravenými zkušebními tělesy (opět typy A a B). Aby byl postížen problém usmýknutí mezi ocelí a betonem na koncích sloupů (zejména typ A), byly v oblasti hlavy a paty všech zkušebních těles přidány navíc příčné pásky. Dále byla u všech těles používána už jen cementová nesmršťující se malta.



Obr. 9: Zkušební sloupy (a) bez úpravy na koncích, (b) s úpravou v oblasti hlavy a paty [8]

Výsledky se ale z hlediska poměru přenosu zatížení mezi ocelí a betonem nijak zásadně nezměnily. V případě zkušebních těles typu A (bez úpravy konců) se zmenšila hodnota prokluzu mezi ocelí a betonem na okrajích, což podle očekávání vedlo ke zvýšení celkové únosnosti bandážovaného sloupu. V případě zkušebních těles typu B (s úpravou konců) došlo k minimalizaci prokluzů, bandážovaný sloup se tak teoreticky přiblížil k chování spřažené ocelobetonové konstrukce (jeho celková únosnost se samozřejmě také zvýšila).

P. A. Calderón se zbytkem týmu mj. na základě těchto výsledků vytvořil návrhový přístup, o němž jsem se již zmínil v předchozí kapitole. Únosnost je limitována způsobem porušení bandáže (vybočení úhelníků nebo přetržení příčniců), použití se ale omezuje na zesilované sloupy odpovídající zkušebním tělesům typu A, tedy bez úpravy bandáže v oblasti hlavy a paty sloupu. V tomto návrhovém přístupu se tak vůbec neuvažuje s přímým přenosem části zatížení do ocelových úhelníků, příspěvek úhelníků k celkové únosnosti zesilovaného sloupu závisí na vzniku tření mezi ocelí a betonem.

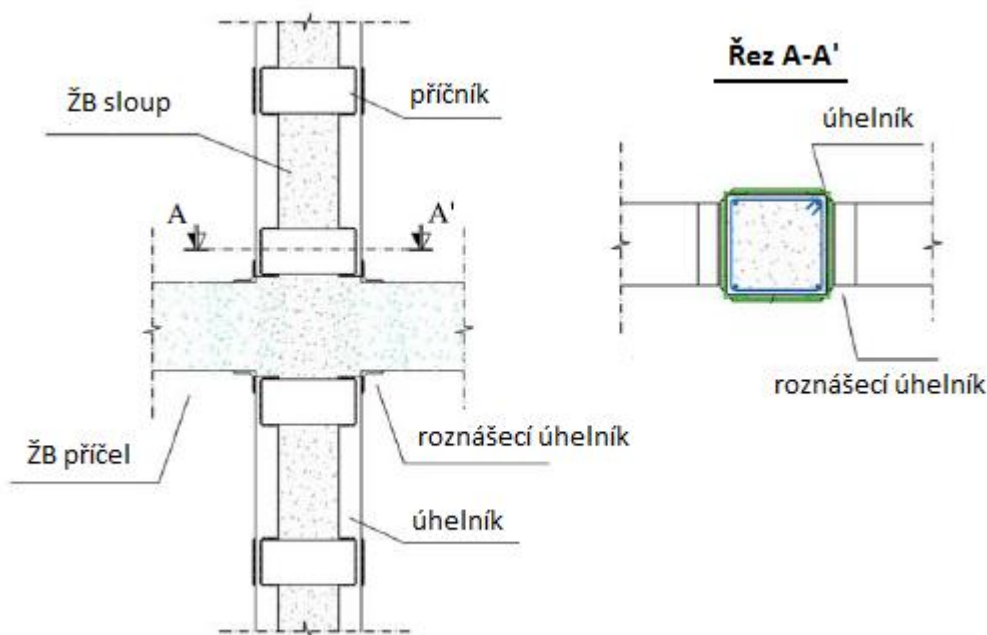
Osobně považuji za vhodnější uvažovat s variantou, která spíše odpovídá zkušebním tělesům typu B, tedy s úpravou bandáže v oblasti hlavy a paty sloupu. V takové případě se počítá s přímým přenosem části vertikálního zatížení do ocelového profilu. S přenosem zatížení způsobeným třením, jež je zde méně významné, se počítat může, ale nemusí. Pokud jej vynechám, dopustím se chyby na stranu bezpečnou.

Dalším důvodem, proč se přiklonit k tomuto předpokladu působení úhelníků je skutečnost, že dochází k menším nebo dokonce téměř žádným prokluzům mezi ocelí a betonem. Konstrukce se tedy ve střední části i na obou koncích chová velmi podobně. Proto se také více hodí k použití ve výše zmíněném návrhové přístupu R. Montuoriho a V. Pilusa. Aby bylo možné s takovým působením úhelníků uvažovat, je nutné vyřešit úpravu bandáže v oblasti hlavy a paty sloupu.

## 2.4 Úprava bandáže v oblasti hlavy a paty sloupu

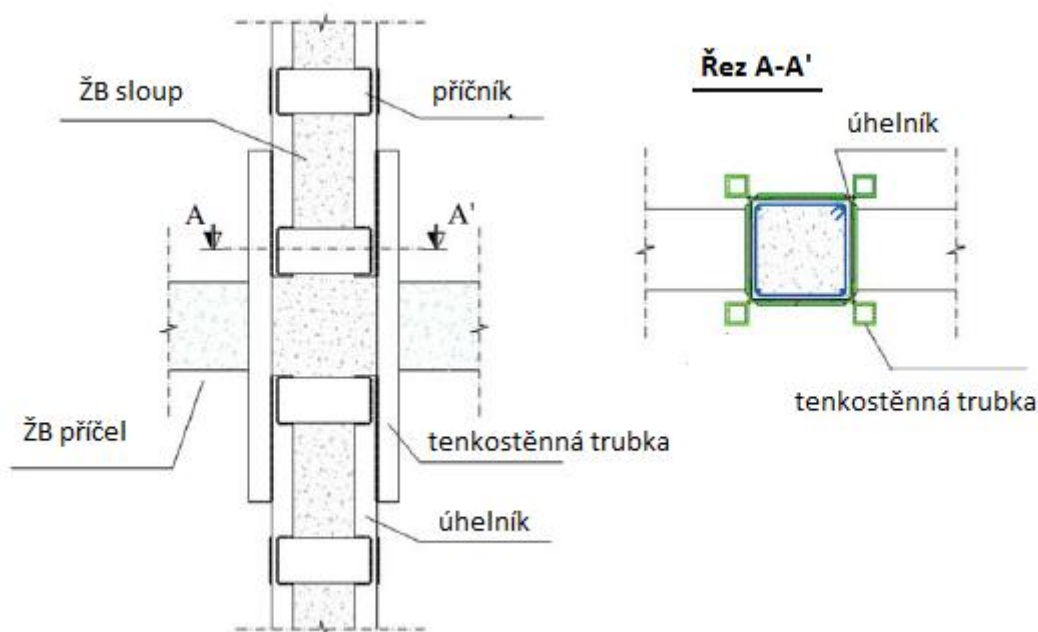
Obecně lze provést dvě úpravy v oblasti hlavy a paty sloupu, které zajistí přímé vnesení zatížení do podélných úhelníků [3]. První úprava spočívá v provedení roznášecí „hlavice“ z ocelových úhelníků.

U běžného podlaží dojde k přenosu normálových (nejčastěji tlakových) sil z úhelníků zesilujících sloup ve vyšším podlaží do vodorovné nosné konstrukce (železobetonová příčel nebo deska) a z ní opět do úhelníků, které zesilují sloup v nižším podlaží.



Obr. 10: Úprava v oblasti hlavy a paty sloupu přidáním roznášecích úhelníků [3]

Druhá úprava spočívá v přenosu zatížení z úhelníku do úhelníku pomocí k nim přivařené tenkostěnné ocelové trubky. V tomto případě není zatížena vodorovná konstrukce, je ale třeba do ní vyvrtat otvory, což mnohdy kvůli probíhající výztuži není možné.



Obr. 11: Úprava přivařením tenkostěnné trubky, která zajistí přenos I tahových sil [3]

Pomocí první úpravy lze přenášet jen tlakové síly, druhá úprava umožňuje přenos sil tlakových i tahových. Ve většině případů jsou však sloupy namáhány tlakem a přenos tahových sil by se uplatnil pouze ve chvíli, kdy by na sloup působil velký ohybový moment, a část průřezu by byla tažena (krajní sloupy). Pokud by z nějakého důvodu nebylo možné provést ani jednu z úprav bandáže, nešlo by počítat s přenosem žádného zatížení do úhelníků, ty by se potom podílely spolu s příčnicí pouze na sevření betonu [5].

## 2.5 Působení příčných pásků

Příčné pásky neboli příčnicí mají ve své podstatě dvě funkce. Za prvé, zajišťují polohu a stabilitu podélných úhelníků, tuto úlohu plní i bez aktivace. Pokud by se z nějakých důvodů neuvažovalo se sevřením betonu v zesilovaném prvku, stačí ocelové příčnicí bez zvláštních úprav přivařit k úhelníkům umístěným v rozích sloupu.

Druhou funkcí příčných pásků je sevření betonu, které má pro únosnost příznivé účinky, pro dosažení této funkce je nutné pásky aktivovat. Aktivace se provádí během sestavování bandáže. Po přivaření pásku k jednomu úhelníku se pásek ohřeje na určitou teplotu a vzápětí se přivaří ke druhému úhelníku. Stejný postup se provede po celém obvodu sloupu. Během vychládní se potom ocelové pásky smršťují a vnáší předpětí do zesilovaného sloupu.

Otázka zní, na jakou teplotu je třeba pásky ohřát? Pokud by byly pásky ohřáty málo, nebylo by možné využít celou jejich pevnost  $f_{yd}$ . Pokud by ocelové pásky naopak byly přehřáté na příliš vysokou teplotu, hrozilo by poškození zesilované železobetonové konstrukce. Je proto nutné postupovat obezřetně. V skriptech prof. Witzanyho [2] je uvedeno pro zesilování železobetonových konstrukcí rozmezí hodnot cca 250 – 500°C. Domnívám se, že je to příliš. K zodpovězení této otázky bude lepší využít znalosti teplotní délkové roztažnosti těles:

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T$$

kde  $\Delta l$  je změna délky tělesa,  $l_0$  původní délka tělesa,  $\alpha$  součinitel teplotní roztažnosti (pro ocel  $\alpha = 1,1 \cdot 10^{-5}$ ) a  $\Delta T$  značí rozdíl teplot; když poměrné přetvoření  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ , lze si rovnici zapsat jako:

$$\varepsilon = \alpha \Delta T$$

a vyjádřit rozdíl teploty:

$$\Delta T = \frac{\varepsilon}{\alpha}$$

Pro plné využití příčných pásků stačí při ohřívání dosáhnout pevnosti právě na mezi kluzu, ta se liší podle třídy oceli, ale lze ji snadno dopočítat s použitím Hookova zákona:

$$\sigma = E \varepsilon$$

v podobě:

$$\varepsilon_y = \frac{f_{yd}}{E}$$

kde  $\varepsilon_y$  je poměrné přetvoření odpovídající pevnosti na mezi kluzu,  $f_{yd}$  je pevnost na mezi kluzu a  $E$  značí modul pružnosti (pro ocel  $E = 210 \text{ GPa}$ ).

Po dosažení do rovnice vyjadřující rozdíl teploty vychází:

$$\Delta T = \frac{f_{yd}}{E \alpha}$$

Výsledky výpočtu pro některé třídy oceli jsou uvedeny v následující tabulce:

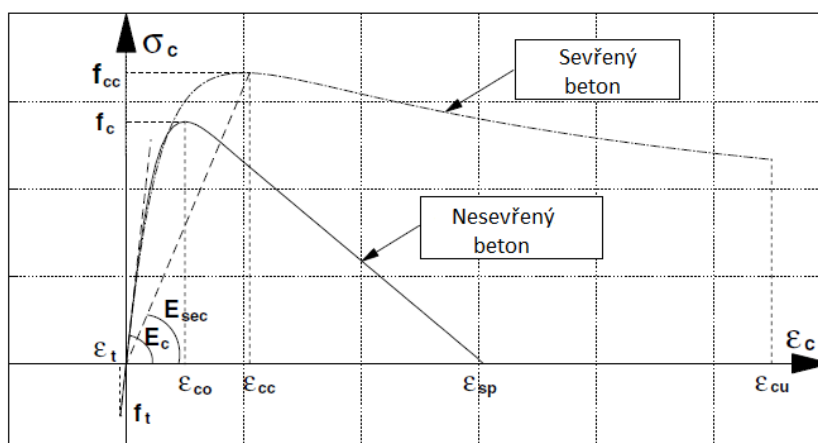
Třída oceli	Pevnost na mezi kluzu	Poměrné přetvoření na mezi kluzu	Teplota, o niž musíme pásek ohřát
	$f_{yd}$ [MPa]	$\varepsilon_y$ [-]	$\Delta T$ [°C]
S 235	235	0,00112	100
S 275	275	0,00131	120
S355	355	0,00169	150

Tab. 1: Teplota ohřátí pásku v závislosti na třídě oceli.

Na závěr lze konstatovat, že by se teplota při ohřívání ocelových pásků měla pohybovat obecně v rozmezí hodnot 100 – 200°C v závislosti na třídě použité oceli. Na sevření betonu příčnými pásky mají ovšem vliv i další faktory, jako jsou rozměry nebo osová vzdálenost pásků po výšce sloupu. O nich se zmíním v následující kapitole a poté ve třetí části této práce.

## 2.6 Sevření betonu

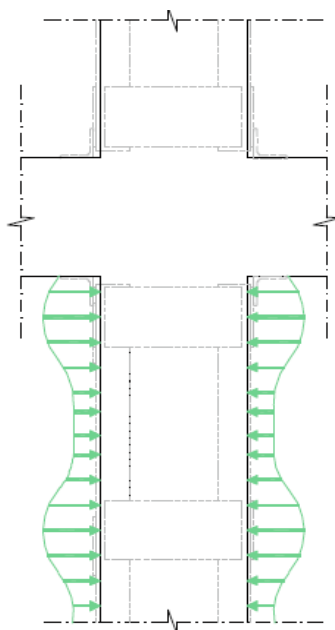
Nyní přichází na řadu problematika sevření betonu. Příčný tlak, který je příčinou tohoto sevření, zvyšuje pevnost betonu v tlaku. To je způsobeno omezením příčné deformace, čímž se zabrání šíření trhlin paralelních ke směru zatěžování. Bez působení příčného tlaku by došlo k vytvoření samostatně působících částí betonu, v důsledku sevření jsou ale tyto části přitlačeny k sobě a tím se mezi nimi zvýší tření, tudíž nedojde k usmýknutí [9].



Obr. 12: Pracovní diagram nesevřeného a sevřeného betonu [4]

Efekt vnesení příčného tlaku se projeví v pracovním diagramu betonu. Vlivem „trojosé napjatosti“ získává beton vyšší hodnotu pevnosti v tlaku  $f_{cc}$  i jí odpovídajícího poměrného přetvoření  $\varepsilon_{cc}$ . Výraz „trojosá napjatost“ je v uvozovkách uveden záměrně. Jednalo by se totiž o ideální případ,

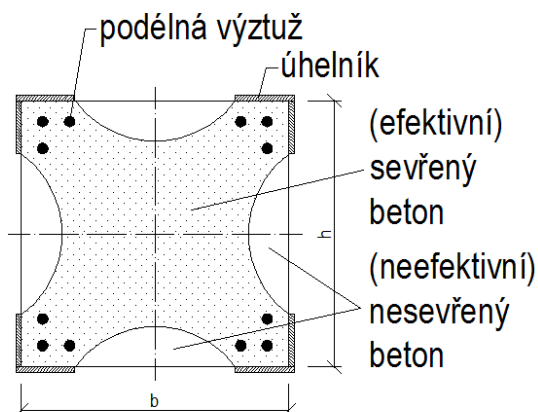
kdy je prvek ve směru všech tří os zatížen po celém svém povrchu, toho ale v případě ocelové bandáže nelze dosáhnout. Příčný tlak není po výšce sloupu konstantní. Obecně je v oblasti příčných pásků tlak intenzivnější než v mezilehlých oblastech (viz obr. 13).



Obr. 13: Proměnný průběh příčného napětí po výšce sloupu [3]

Problematiku sevření betonu velmi dobře popsal prof. J. B. Mander, který vypracoval teoretický model sevřeného betonu [6], v němž mj. zohlednil výše uvedený fakt, že příčné napětí není konstantní. Popsaný model je sice uvažován pro případ sevření běžnou betonářskou výztuží s dostatečně hustými třmínky (viz obr. 17), princip lze však využít i pro dodatečnou externí výztuž, v našem případě ocelovou bandáž (viz obr. 14).

Model spočívám v tom, že v příčném řezu železobetonovým sloupem se vyskytují dva druhy betonu. V blízkosti povrchu sloupu je to betonu nesevřený, který se v případě vyššího zatížení stává neefektivním, v oblasti jádra průřezu se nachází beton sevřený, jenž bude pokračovat v přenosu zatížení i za většího přetvoření.



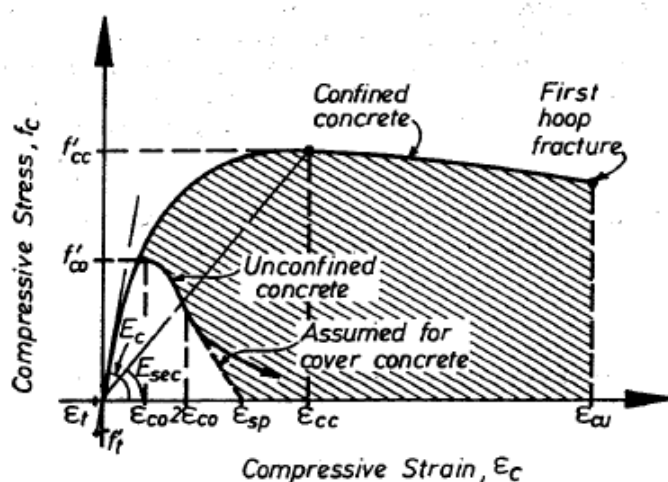
Obr. 14: Průřez sloupu sevřeného ocelovou bandáží

Jako výchozí bod návrhového modelu Mander předkládá vztahy vycházející z předchozích výzkumů, zkoušek a dřívějších teoretických modelů, tyto vztahy popisují ideální stav trojosé napjatosti docílený hydrostatickým tlakem kapaliny (zde i ve všech dalších rovnicích popisujících tento model jsem se rozhodl zachovat původní značení veličin, které vychází z amerických standardů; tedy např.  $f'_{c0}$  odpovídá naší pevnosti  $f_c$ ):

$$f'_{cc} = f'_{c0} + k_1 f_l$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0} \left( 1 + k_2 \frac{f_l}{f'_{c0}} \right)$$

kde  $f'_{cc}$  je maximální pevnost v tlaku betonu zatíženého bočním (příčným) tlakem  $f_l$ ,  $\varepsilon_{cc}$  je této pevnosti odpovídající poměrné přetvoření,  $f'_{c0}$  je pevnost nesevřeného betonu v tlaku,  $\varepsilon_{c0}$  značí jí odpovídající poměrné přetvoření, součinitele  $k_1$  a  $k_2$  slouží k přepočtu příspěvku napětí v příčném směru na směr podélný.



Obr. 15: Pracovní diagram nesevřeného a sevřeného betonu [6].

Následují vztahy popisující pracovní diagram sevřeného betonu (stress-strain model, viz obr. 15), ústřední místo zaujímá rovnice definující křivku pracovního diagramu od počátku do dosažení maximální únosnosti:

$$f_c = \frac{f'_{cc} \chi^r}{r - 1 + \chi^r}$$

přičemž:

$$f'_{cc} = f'_{c0} \left( -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_{c0}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{c0}} \right)$$

$$\chi = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}$$

kde  $\varepsilon_c$  je poměrné přetvoření betonu odpovídající napětí v betonu  $f_c$  (rovná se u nás používanému napětí  $\sigma_c$ ), dále:

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}$$

kde:

$$E_c = 5000\sqrt{f_c} \text{ [MPa]}$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}}$$

Zde je rovnice určující hodnotu poměrného přetvoření při dosažení maximální pevnosti sevřeného betonu:

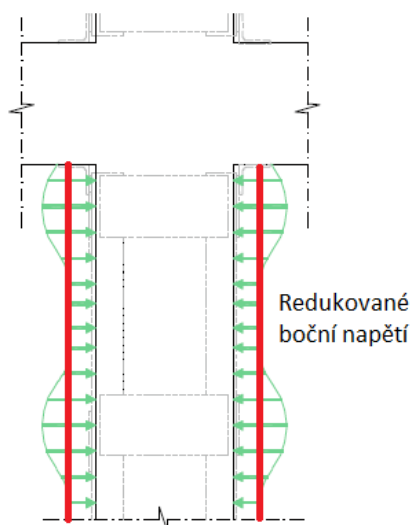
$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} - 1 \right) \right]$$

Nyní už zbývá definovat příčné (boční) napětí:

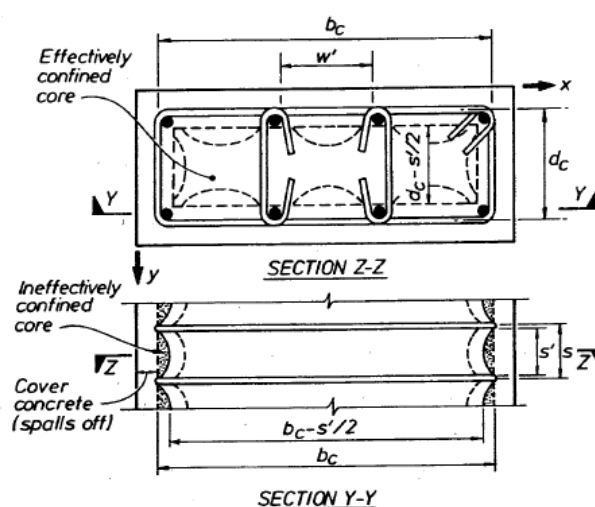
$$f'_l = f_l k_e$$

kde  $f'_l$  je předpokládaný rovnoměrný příčný (boční) tlak,  $f_l$  je vnášený příčný tlak (po výšce proměnný) a  $k_e$  je koeficient efektivity.

Koeficient efektivity  $k_e$  je velmi důležitý parametr výpočtu. Řeší totiž nerovnoměrnost bočního napětí po výšce sloupu. Tento problém lze převést do představitelnější podoby. V úrovni „obruče“ z příčných pásků je efektivní sevřená plocha betonu větší než v mezilehlé úrovni. Ze vztahu je patrné, že koeficientem efektivity se redukuje boční napětí, tím se vlastně celému sloupu přisoudí nejmenší efektivní plocha odpovídající úrovni přesně mezi příčnými pásky. Nejen že není potřeba v následujícím výpočtu uvažovat s různými úrovněmi po výšce sloupu, ale tímto opatřením se dosáhne i bezpečnostní rezervy, co se týče pevnosti sevřeného betonu v tlaku.



Obr. 16: Redukce příčného napětí



Obr. 17: Beton sevřený betonářskou výztuží [6]

Takže:

$$k_e = \frac{A_e}{A_{cc}}$$

kde:

$$A_{cc} = A_c(1 - \rho_{cc})$$

$$A_c = b_c d_c$$

přičemž  $A_e$  je efektivní plocha,  $A_c$  je plocha ohraničená výztuží, která svírá beton (třmínky a podélná výztuž) s rozměry  $b_c$  a  $d_c$ ,  $\rho_{cc}$  je poměr plochy podélné výztuže k ploše  $A_c$ .

Efektivní plocha  $A_e$  je v příčném řezu zmenšována parabolami umístěnými mezi podélnou výztuží. Plocha těchto parabol se rovná:

$$A_i = \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6}$$

kde  $w'_i$  je  $i$ -tá vzdálenost mezi dvěma podélnými výztužemi (viz obr. 17), potom:

$$A_e = \left( b_c d_c - \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2d_c} \right)$$

kde  $s'$  je vzdálenost mezi třmínky. Členy  $\left( 1 - \frac{s'}{2b_c} \right)$  a  $\left( 1 - \frac{s'}{2d_c} \right)$  zohledňují zmenšení efektivní plochy rovněž o paraboly tentokrát v podélném řezu. Výsledný koeficient efektivnosti vypadá po dosazení a úpravách takto:

$$k_e = \frac{\left( 1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6b_c d_c} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2d_c} \right)}{(1 - \rho_{cc})}$$

V případě obdélníkového průřezu sloupu je rozdílná hodnota stupně vyztužení pro směry x a y:

$$\rho_x = \frac{A_{sx}}{s d_c} \quad a \quad \rho_y = \frac{A_{sy}}{s b_c}$$

kde  $A_{sx}$  a  $A_{sy}$  jsou celkové plochy třmínků ve směru x respektive y. Boční napětí, které způsobuje sevření betonu, se potom spočítá:

$$f_{lx} = \rho_x f_{yh} \quad a \quad f_{ly} = \rho_y f_{yh}$$

kde  $f_{yh}$  je pevnost na mezi kluzu oceli použitých třmínků. A konečně efektivní boční napětí se určí ze vztahu:

$$f'_{lx} = k_e \rho_x f_{yh} \quad a \quad f'_{ly} = k_e \rho_y f_{yh}$$

Na závěr zbývá rovnice určující mezní poměrné přetvoření sevřeného betonu, ta ale není součástí původního Manderova modelu [6], rovnici přidali Montuori a Piluso [4,5] ke svému návrhovému přístupu, v němž tento model použili:

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4f_y\rho_s\varepsilon_{su}}{f_{cc}}$$

kde  $f_y$  je pevnost na mezi kluzu beton svírající výztuže,  $\rho_s$  je stupeň vyztužení a  $\varepsilon_{su}$  představuje mezní poměrné přetvoření oceli (svírající výztuž).

Uvedený model prof. Mandera velmi detailně popisuje problematiku sevření betonu, nicméně, jak už jsem výše zmínil, vychází z amerických standardů, které obecně uvažují s trochu jinými výpočtovými předpoklady, než s jakými uvažujeme v Evropě. Jeho použití bez náležitých úprav by tedy mohlo přivodit komplikace, proto bude vhodné se podívat, jaký postup doporučují evropské normy.

V základní normě pro navrhování betonových konstrukcí ČSN EN 1992-1-1 se jedna kapitola věnuje teorii ovinutých sloupů [10]. Uvažuje se zde s ovinutím železobetonového sloupu hustými třmínky nebo šroubovicí s malým stoupáním, čímž následně dochází k trojrozměrnému stavu napjatosti. Principiálně se tedy jedná o námi hledaný stav konstrukce. Eurokód 2 nabízí tyto vztahy:

$$f_{ck,c} = f_{ck} \left( 1,000 + 5,0 \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \right) \quad \text{při } \sigma_2 < 0,05f_{ck}$$

$$f_{ck,c} = f_{ck} \left( 1,125 + 2,5 \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \right) \quad \text{při } \sigma_2 > 0,05f_{ck}$$

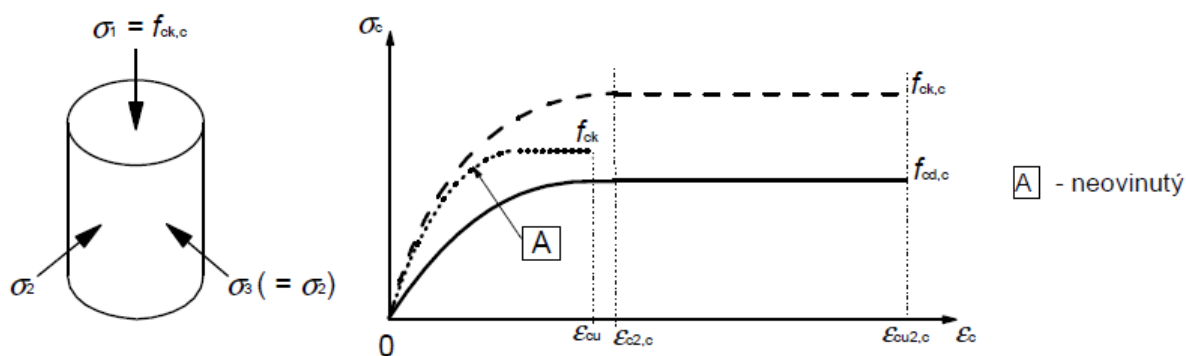
kde  $f_{ck,c}$  je zvětšená charakteristická pevnost betonu v tlaku,  $f_{ck}$  je charakteristická pevnost v tlaku a  $\sigma_2$  je boční (příčné) napětí, v normě definované pouze pro kruhový průřez,

$$\varepsilon_{c2,c} = \varepsilon_{c2} \left( \frac{f_{ck,c}}{f_{ck}} \right)^2$$

$$\varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{cu2} + 0,2 \frac{\sigma_2}{f_{ck}}$$

kde  $\varepsilon_{c2,c}$  představuje zvětšené poměrné přetvoření betonu odpovídající pevnosti  $f_{ck,c}$  a  $\varepsilon_{c2}$  je poměrné přetvoření betonu odpovídající pevnosti  $f_{ck}$ .

Dále se v ČSN EN 1992-1-1 uvádí, že pokud nemáme k dispozici přesnější údaje, lze použít uvedený pracovní diagram s výše definovanými hodnotami pevnosti v tlaku a poměrného přetvoření betonu [11].



Obr. 18: Pracovní diagram ovinutého sloupu [10]

Tento návrhový přístup je ale v případě ocelové bandáže obtížně použitelný. Předpokládá totiž ideální stav trojosé napjatosti, jehož nelze u běžné dodatečně prováděné bandáže dosáhnout.

Nyní je vhodné zamyslet se nad důvody použití ocelové bandáže. Zatímco v České republice se její použití omezuje na „prosté“ zesílení rámových konstrukcí (zvýšení únosnosti), v seizmicky namáhaných oblastech, jako je například Itálie nebo Španělsko, odkud pochází některé výše popisované návrhové přístupy, se bandáž používá zejména pro zvýšení tuhosti (současně se zvýšením únosnosti) konstrukcí, které nejsou schopny odolávat účinkům zemětřesení. Proto je na místě nahlédnout do normy zabývající se navrhováním konstrukcí odolných proti zemětřesení, zda se věnuje použití ocelové bandáže.

Touto normou je Eurokód 8, konkrétně ČSN EN 1998-3, která se jmenuje Hodnocení a zesilování pozemních konstrukcí [12]. Na konci se nachází informativní část, kde jsou popisovány způsoby zesilování různých konstrukcí, mj. i ocelová bandáž pro konstrukce železobetonové. V normě se uvádí, že je možné pro výpočet použít výše uvedené vzorce z ČSN EN 1992-1-1 (ovinutý sloup), ale vhodnější je tento model sevřeného betonu:

$$f_{cc} = f_c \left[ 1 + 3,7 \left( \frac{\alpha \rho_{sx} f_{yw}}{f_c} \right)^{0,86} \right]$$

kde  $f_{cc}$  je pevnost sevřeného betonu,  $f_c$  pevnost nesevřeného betonu v tlaku,

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c2} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f_{cc}}{f_c} - 1 \right) \right]$$

kde  $\varepsilon_{cc}$  je poměrné přetvoření sevřeného betonu a  $\varepsilon_{c2}$  poměrné přetvoření nesevřeného betonu,

$$\varepsilon_{cu} = 0,004 + 0,5 \frac{\alpha \rho_{sx} f_{yw}}{f_{cc}}$$

kde  $\varepsilon_{cu}$  značí mezní poměrné přetvoření betonu, přičemž  $f_{yw}$  je pevnost na mezi kluzu oceli bandáže, dále  $\alpha$  je součinitel účinnosti sevření:

$$\alpha = \left( 1 - \frac{s_h}{2b_0} \right) \left( 1 - \frac{s_h}{2h_0} \right) \left( 1 - \frac{\sum b_i^2}{6h_0 b_0} \right)$$

kde  $s_h$  je vzdálenost třmínků (pásků),  $b_0$  a  $h_0$  jsou rozměry sevřeného betonového průřezu, v případě externí bandáže jsou rovny vnějším rozměrům průřezu a  $b_i$  je světlá vzdálenost mezi úhelníky, potom  $\rho_{sx}$  je stupeň vyztužení příčnou výztuží:

$$\rho_{sx} = \frac{A_{sx}}{b_w s_h}$$

kde  $\rho_{sx}$  je stupeň vyztužení průřezu (bandáží),  $A_{sx}$  je plocha třmínků (pásků). Více informací o modelu sevřeného betonu norma nenabízí. U posledního vztahu se projevuje primární účel použití představeného modelu betonu, tím je určení deformační kapacity prutových konstrukcí. Vztah pro výpočet  $\rho_{sx}$  proto úplně neodpovídá záměrům této práce, to ale není důvod celý model zavrhnout.

Na první pohled je patrné, že některé vztahy se velmi nápadně podobají těm z Manderova modelu [6], proto bude nyní vhodné rovnice porovnat (viz tab. 2).

Hned pevnost sevřeného betonu v tlaku tomuto poznatku sice odporuje, jelikož se vzorce svou strukturou vzájemně dost liší, to je však dáno faktem, že vztah, který uvádí Mander, vychází ze zkoušek trojosého namáhání prováděných v 70. letech ve Spojených státech. Původ vztahu z Eurokódu se mi nepodařilo dohledat, lze si v něm ale všimnout snahy nabídnout jednoduchý a snadno čitelný vzorec. Pevnost sevřeného betonu vypočítaná oběma vztahy by se vzájemně neměla příliš lišit.

Výpočet poměrného přetvoření při dosažení pevnosti v tlaku je v obou případech naprosto totožný. Výpočet mezního přetvoření se ale trochu liší, vztah z Eurokódu navyšuje tuto hodnotu o poměr příčného tlaku a pevnosti sevřeného betonu, zatímco Manderův (ve skutečnosti se nejedná o Manderův vztah, viz strana 23) uvažuje s navyšováním mezního přetvoření, dokud nedojde k vyčerpání únosnosti ocelové bandáže.

Při srovnání součinitele efektivity  $\alpha$  a koeficientu efektivity  $k_e$  lze na první pohled spatřit, že v prvním případě se jedná pouze o čítec zlozku definujícího  $k_e$ . Vysvětlení je nasnadě, jmenovatel Manderova koeficientu  $(1 - \rho_{cc})$  ve většině případů vychází jako hodnota velmi blízká jedné, tudíž velikost koeficientu v podstatě neovlivňuje.

Porovnání vztahů pro výpočet charakteristik sevřeného betonu	
Mander (6)	Eurokód 8 (11)
<b>Pevnost v tlaku</b>	
$f'_{cc} = f'_{c0} \left( -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_{c0}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{c0}} \right)$	$f_{cc} = f_c \left[ 1 + 3,7 \left( \frac{\alpha \rho_{sx} f_{yw}}{f_c} \right)^{0,86} \right]$
<b>Poměrné přetvoření při dosažení pevnosti v tlaku</b>	
$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} - 1 \right) \right]$	$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c2} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f_{cc}}{f_c} - 1 \right) \right]$
<b>Mezní poměrné přetvoření</b>	
$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4 f_y \rho_s \varepsilon_{su}}{f_{cc}}$	$\varepsilon_{cu} = 0,004 + 0,5 \frac{\alpha \rho_{sx} f_{yw}}{f_{cc}}$
<b>Koeficient (součinitel) efektivity</b>	
$k_e = \frac{\left( 1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6 b_c d_c} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2 b_c} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2 d_c} \right)}{(1 - \rho_{cc})}$	$\alpha = \left( 1 - \frac{s_h}{2 b_0} \right) \left( 1 - \frac{s_h}{2 h_0} \right) \left( 1 - \frac{\sum b_i^2}{6 h_0 b_0} \right)$

Tab. 2: Porovnání vztahů pro výpočet charakteristik sevřeného betonu

### 3 ZVOLENÝ NÁVRHOVÝ PŘÍSTUP

V této části práce se pokusím představit návrhový přístup, který bude poté možné aplikovat pro výpočet zesílení železobetonového sloupu pomocí ocelové bandáže. V zásadě se bude jednat o syntézu návrhových přístupů, jež byly popsány v předchozí části, dále nastíním postup provádění ocelové bandáže a následně se budu věnovat popisu jednotlivých kroků návrhu a posouzení.

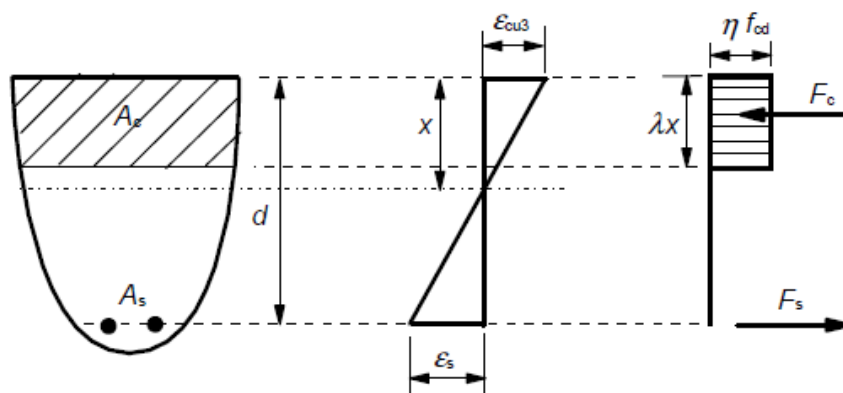
#### 3.1 Výpočtové předpoklady

Při určování únosnosti železobetonových průřezů se vychází z předpokladů uvedených v ČSN EN 1992-1-1 [11]:

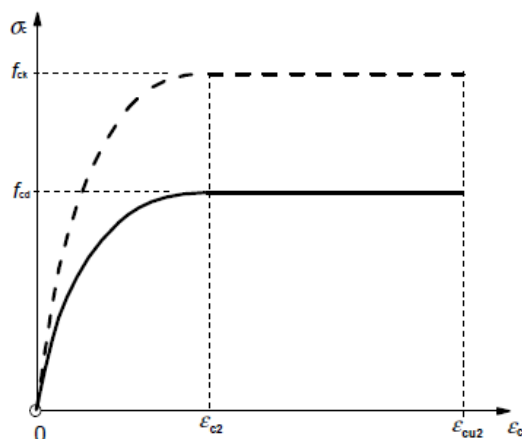
- Zachování rovinnosti průřezů.
- Dokonalá soudržnost betonářské výztuže a přilehlého betonu.
- Pevnost betonu v tahu se zanedbává.
- Napětí v tlaceném betonu se určí ze zjednodušeného návrhového pracovního diagramu (parabolicko – rektangulárního).
- Napětí v betonářské výztuži se určí z návrhového pracovního diagramu.
- Meze únosnosti je dosaženo při dosažení mezního poměrného přetvoření alespoň v jednom z materiálů.

Pro zesilování železobetonového sloupu ocelovou bandáží je třeba definovat další předpoklady [2,13]:

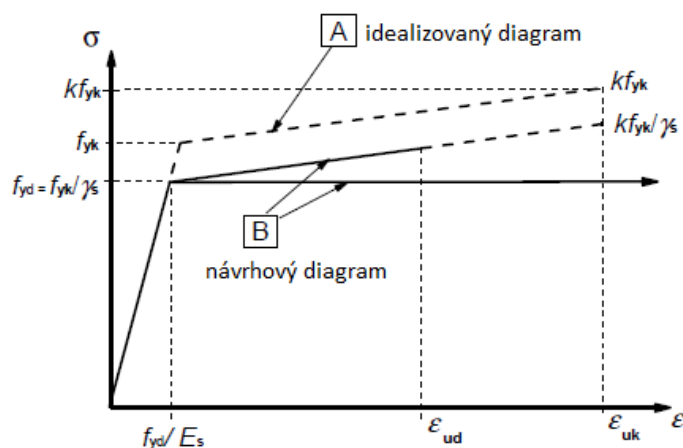
- Původní železobetonový sloup je schopen přenášet příslušný díl zatížení.
- Podélné profily ocelové bandáže převezmou část působícího zatížení.
- Napětí v ocelové bandáži se určí z návrhového pracovního diagramu.
- Ocelová bandáž změní vnitřní napjatost prvku (vliv sevření).
- Účinnost bandáže klesá s rostoucí excentricitou zatížení (týká se vlivu sevření).
- Nesoudržnost ocelové bandáže a povrchu betonu.



Obr. 19: Obdelníkové rozdělení napětí [10]



Obr. 20: Parabolicko-rektangulární pracovní diagram pro beton namáhaný tlakem [10]



Obr. 21: Schéma pracovních diagramů oceli [10]

## 3.2 Působení prvků ocelové bandáže

Nejvhodnější návrhový přístup byl již naznačen ve druhé části této práce, která se detailně věnovala působení úhelníků a pásků ocelové bandáže. Proto se nyní jen omezím na zopakování výše nastíněných závěrů.

Při návrhu a posuzování budu vycházet z návrhového přístupu R. Montuoriho a V. Pilusa [4,5]. Podélné úhelníky budu uvažovat jako další vrstvy výztuže. Při řádné úpravě bandáže v oblasti hlavy a paty sloupu pak bude možné počítat s přímým přenosem části vertikálního zatížení do ocelového profilu. Přenos zatížení způsobený třením uvažovat nebudu, čímž se dopustím chyby na stranu bezpečnou.

## 3.3 Postup provádění a konstrukční zásady

Dříve, než se začne jakkoliv do konstrukce zasahovat, je třeba provést diagnostiku železobetonového sloupu (nebo obecně všech dotčených konstrukcí). Některou ze zkoušek je nutné zjistit zejména pevnost betonu, pokud není k dispozici žádná projektová dokumentace, je rovněž potřeba určit množství a rozmístění betonářské výztuže.

Jsou-li k dispozici všechny podklady a je-li navržena zesilující konstrukci, lze přistoupit k jejímu provedení (zesilování se provádí v odlehčeném objektu, tj. po odstranění užitého zatížení a některého stálého např. podlah). Nejprve se odstraní ze sloupu všechny nadbytečné vrstvy, očistí se povrch a navlhčí se rohy sloupu (přibližně v rozsahu podélných úhelníků). Do rohů se nanese nesmršťující se cementová malta a poté se do ní umístí podélné úhelníky. Jejich délka by měla být rovna výšce sloupu (s tolerancí v řádu milimetrů). Polohu úhelníků je třeba zajistit například tesařskými svorkami.

Na jedné ze stran sloupu se přivaří koutovým svarem k jednomu podélnému úhelníku příčník z pásové oceli. Následně se provede aktivace příčného pásku, ten se nahřeje na teplotu odpovídající třídě oceli (viz tab. 1). Ihned po nahřátí se pásek přivaří stejným způsobem i k druhému protějšímú úhelníku. Takto se provede celá „obruč“ z pásků a postup se opakuje po výšce sloupu.

Jak husté po výšce mají pásky být, záleží na potřebě zesílení (čím menší vzdálenost mezi nimi zvolíme, tím větší příčný tlak vyvodí), je třeba ale dodržet zásadu, že maximální osová vzdálenost pásků  $s_{max}$  je rovna menšímu z rozměrů průřezu sloupu nebo 500 mm.

$$s_{max} = \min \left\{ \begin{array}{l} b \\ h \\ 500 \text{ mm} \end{array} \right\}$$

Tímto opatřením se omezí možnost vybočení podélné betonářské výztuže, zvláště pokud je povrch sloupu poškozen, a také možnost vybočení samotných úhelníků.

Nyní již zbývá provést úpravu bandáže v oblasti hlavy a paty sloupu. Záleží však na rozsahu zesilování, jestli se například v rámové konstrukci zesilují i příčně apod. Zde budu uvažovat pouze zvyšování únosnosti sloupu. Provlhčí se tedy roh, v němž se sloup stýká s vodorovnou konstrukcí (příčel, deska) a nanese se sem stejná nesmršťující se malta jako v rozích sloupu. Poté se do rohu umístí úhelník tak, aby jedna příruba byla vtlačena do právě provedeného maltového lože a druhá tvořila mezi podélnými úhelníky obdobu příčného pásku. Takto umístěný úhelník se přivaří k podélným úhelníkům koutovým svarem. Stejná úprava se provede po celém obvodu sloupu v oblasti hlavy i paty. Po přitížení objektu bude díky tomuto opatření zajištěn přenos části zatížení přímo do podélných úhelníků.

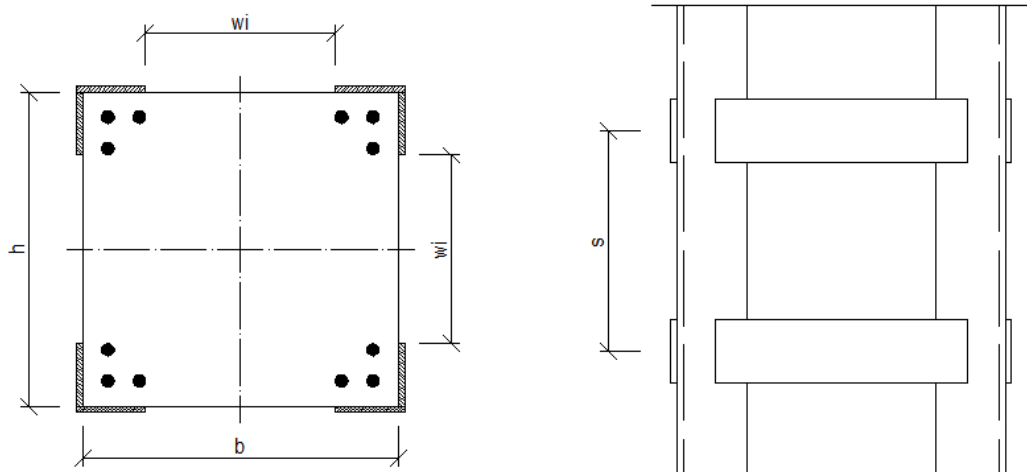
### 3.4 Výpočet charakteristik sevřeného betonu

Při výpočtu charakteristik sevřeného betonu budu vycházet z ČSN EN 1998-3 [12], její vztahy si ale trochu upravím, aby odpovídaly výše popsaným požadavkům.

Ze vstupních hodnot se nejprve spočítá součinitel efektivnosti:

$$\alpha = \left(1 - \frac{\sum w_i^2}{6hb}\right) \left(1 - \frac{s}{2b}\right) \left(1 - \frac{s}{2h}\right)$$

kde  $w_i$  je světlá vzdálenost mezi podélnými úhelníky,  $h$  je výška průřezu,  $b$  šířka průřezu a  $s$  je osová vzdálenost mezi příčnými pásky.



Obr. 22: Veličiny vstupující do výpočtu charakteristik sevřeného betonu

Poté se určí stupeň vyztužení ocelovou bandáží ve směru x a y:

$$\rho_{sx} = \frac{A_{bx}}{bs}$$

$$\rho_{sy} = \frac{A_{by}}{hs}$$

kde  $A_{bx}$  a  $A_{by}$  jsou plochy průřezů pásků ve směru osy x resp. y, zpravidla  $A_{bx} = A_{by}$ . Následně se pro oba směry spočítá příčné (boční) napětí:

$$\sigma_{lx} = \alpha \rho_{sx} f_{yb}$$

$$\sigma_{ly} = \alpha \rho_{sy} f_{yb}$$

kde  $f_{yb}$  je pevnost na mezi kluzu oceli příčného pásku. Do výpočtu pevnosti sevřeného betonu v tlaku se bude ale zadávat pouze jedna hodnota bočního napětí  $\sigma_l$ . V případě čtvercového průřezu jej lze určit jednoduše:

$$\sigma_l = \sigma_{lx} = \sigma_{ly}$$

V případě obdélníkového průřezu se provede vážený průměr (případně lze využít nomogram, který nabízí Manderův model [6]):

$$\sigma_l = \frac{\sigma_{lx} b + \sigma_{ly} h}{b + h}$$

Nyní již lze určit hledané charakteristiky sevřeného betonu, tj. charakteristickou a návrhovou pevnost v tlaku:

$$f_{ck,c} = f_{ck} \left[ 1 + 3,7 \left( \frac{\sigma_l}{f_{ck}} \right)^{0,86} \right]$$

$$f_{cd,c} = \frac{f_{ck,c}}{\gamma_c}$$

kde  $f_{ck}$  je charakteristická pevnost nesevřeného betonu a  $\gamma_c = 1,5$ ;

poměrné přetvoření sevřeného betonu při dosažení pevnosti v tlaku:

$$\varepsilon_{c2,c} = \varepsilon_{c2} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f_{ck,c}}{f_{ck}} - 1 \right) \right]$$

kde  $\varepsilon_{c2}$  značí poměrné přetvoření nesevřeného betonu;

a na závěr mezní poměrné přetvoření:

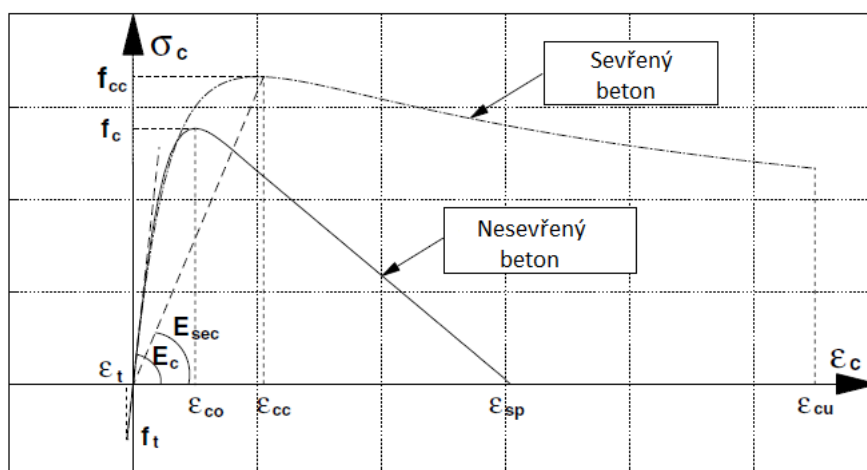
$$\varepsilon_{cu2,c} = 0,004 + 0,5 \frac{\sigma_l}{f_{ck,c}}$$

### 3.5 Pracovní diagram sevřeného betonu

Pokud jsou známy všechny charakteristiky sevřeného betonu, lze si vytvořit jeho návrhový pracovní diagram. Zde ovšem nastává problém, jaký má být průběh funkce v intervalu od počátku po dosažení pevnosti v tlaku? Výchozí ČSN EN 1998-3 [12] totiž žádnou funkci nenabízí.

Prof. Mander sice takovou funkci ve svém modelu definoval, jí popsaný průběh však přímo navazuje na průběh pracovního diagramu nesevřeného betonu užívaného ve Spojených státech. Přestože je tento průběh bližší skutečnému chování betonu, od našeho parabolicko – rektangulárního se výrazně liší, proto taková funkce není v tomto výpočtu použitelná (rovnice z [5]).

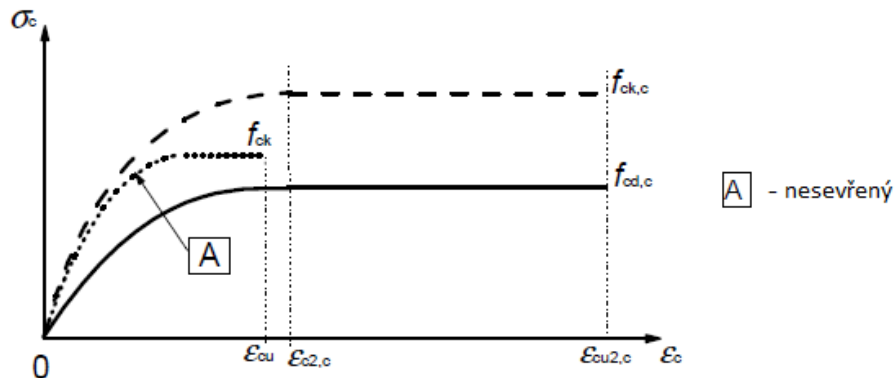
$$\sigma_c = \frac{f'_{cc} \chi r}{r - 1 + \chi^r}$$



Obr. 23: Pracovní diagram nesevřeného a sevřeného betonu [4]

Nezbývá tedy nic jiného, než se odvolat na ČSN EN 1992-1-1 [11], kde se uvádí, že pokud nejsou k dispozici přesnější údaje, lze použít uvedený pracovní diagram (viz kapitola 2.6). A protože je

znázorněn pouze schematicky v obrázku, musím zvolit funkci, která mu bude alespoň přibližně odpovídat.



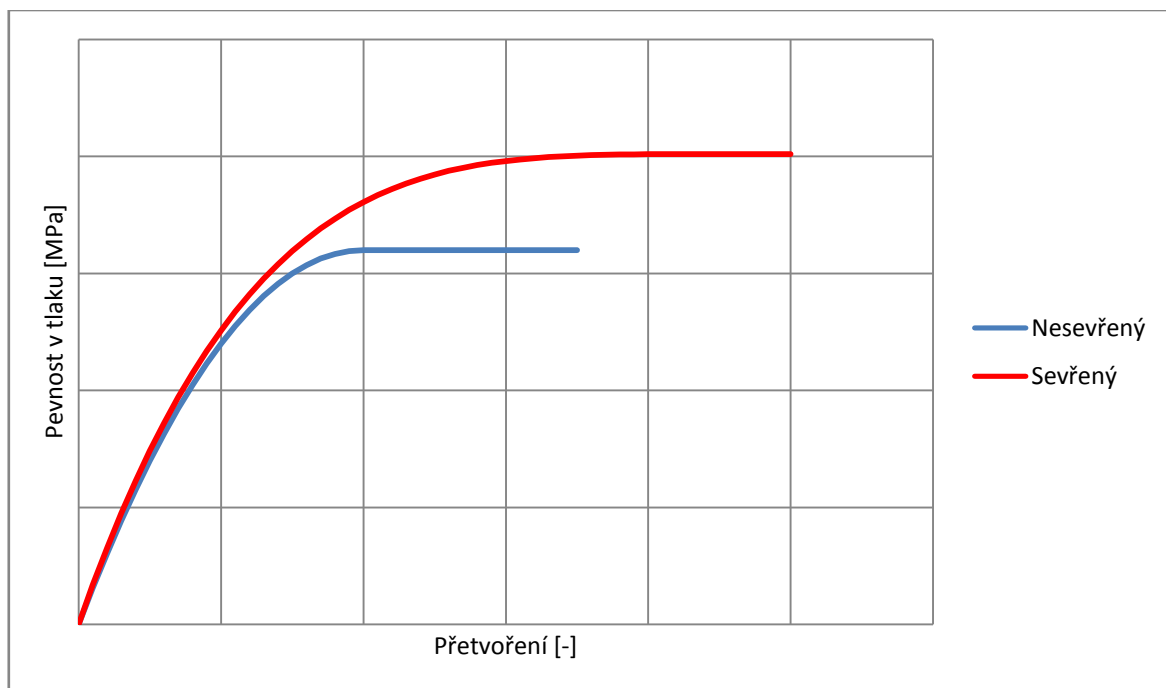
Obr. 24: Pracovní diagram ovinutého sloupu [10]

Jako nejpříhodnější se zdá vyjít z funkce popisující průběh napětí nesevřeného betonu [10]:

$$\sigma_c = f_{cd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right]$$

kde  $f_{cd}$  je návrhová pevnost betonu v tlaku,  $\varepsilon_{c2}$  jí odpovídající poměrné přetvoření betonu,  $\varepsilon_c$  značí poměrné přetvoření odpovídající napětí betonu  $\sigma_c$  a  $n$  je rovno 2 (pro beton s pevností do 50 MPa).

Jedná se vlastně o parabolu druhého stupně, takže dosadím-li za  $n$  jiné vyšší číslo, získám parabolu vyššího stupně, ta by mohla být vyhovující. Pokud se omezím na volbu celých čísel, jeví se nejlépe  $n = 4$ .



Graf 1: Navržený parabolicko-rektangulární pracovní diagram sevřeného betonu

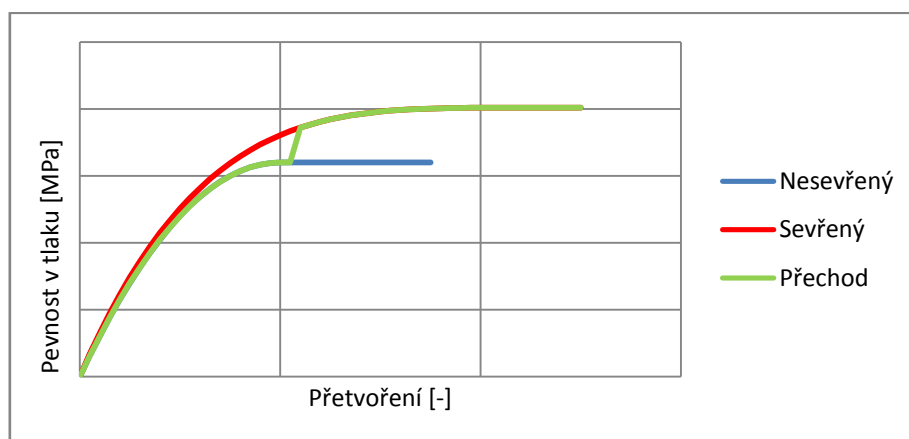
Výsledná funkce popisující průběh napětí sevřeného betonu od počátku po dosažení pevnosti v tlaku by potom mohla vypadat takto:

$$\sigma_c = f_{cd,c} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2,c}} \right)^4 \right]$$

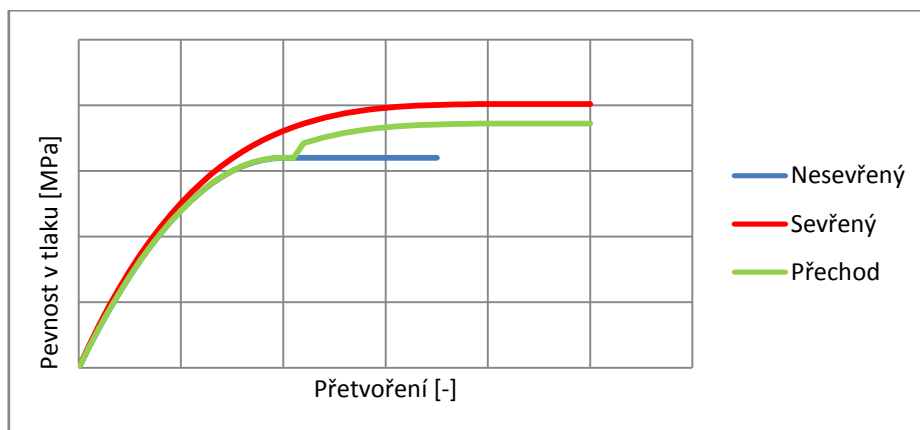
Jsem si vědom faktu, že tento přístup nemá oporu v literatuře, ta však žádný nenabízí. Problematika by tedy vyžadovala hlubší zkoumání, k němuž ale není v této práci prostor, uvažuji proto výše uvedené řešení jako zjednodušené a pouze přibližné. Jak se navíc později ukáže, nemá průběh napětí v betonu pro výpočet únosnosti zesíleného železobetonového sloupu bezprostřední vliv.

### 3.6 Přechod z jednoosého do „trojosého“ stavu napjatosti (ATENA 3D)

Před samotným posouzením zesilované konstrukce je třeba ještě vyřešit poslední problém. Jaký bude přechod mezi dvěma stavy napjatosti? Bude možné ve chvíli sevření průřezu jednoduše „přeskočit“ v pracovním diagramu z jednoosého stavu do „trojosého“ (viz graf 2)? Nemůže se stát, že při zesilování konstrukce na hranici její kapacity únosnosti (tj. při velkém přetvoření) nebude sevřený beton schopen dosáhnout své plné únosnosti v tlaku (viz graf 3)? Žádná literatura se těmito otázkám bohužel nevěnuje.



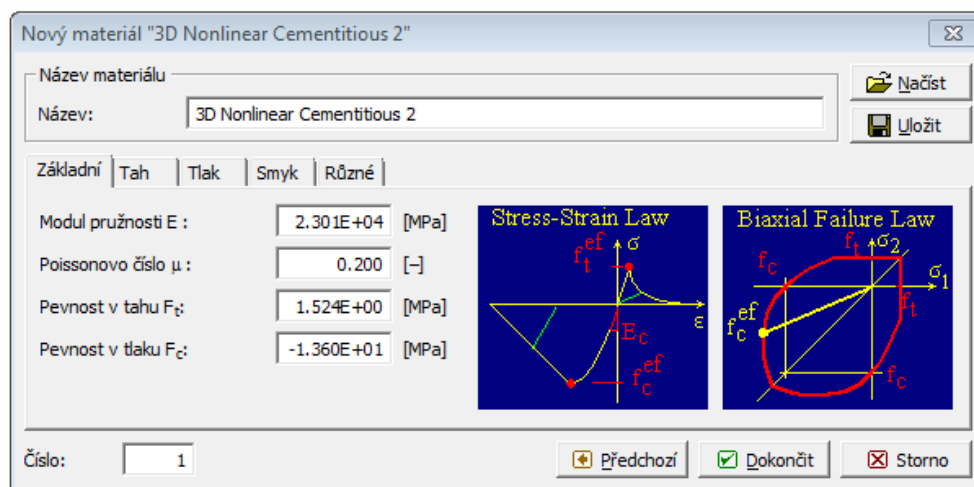
Graf 2: Přechod z jednoosého do „trojosého“ stavu napjatosti



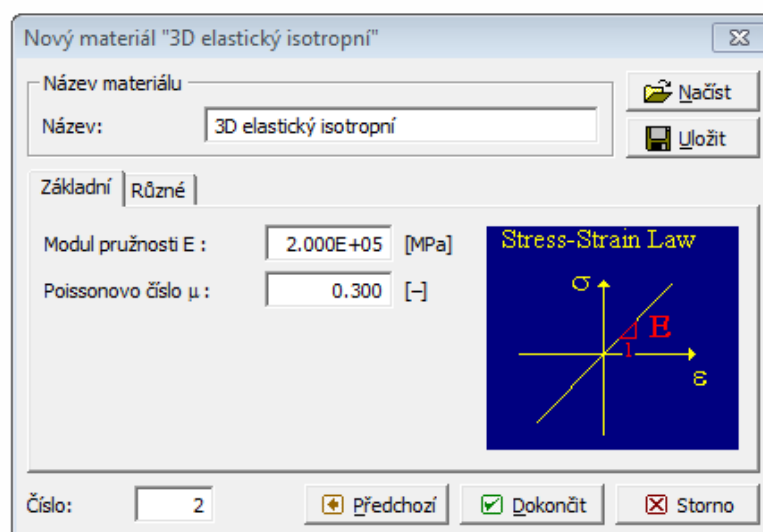
Graf 3: Přechod z jednoosého do „trojosého“ stavu napjatosti bez dosažení zvětšené pevnosti v tlaku

K vyřešení tohoto dilematu jsem použil program ATENA 3D [14,15], který slouží zejména k simulaci chování betonových a železobetonových konstrukcí. Model, který jsem v programu vytvořil, nemá ambici být věrným modelem zesílené konstrukce, slouží jen a pouze k zodpovězení výše položených otázek. Skládá se ze šesti makroprvků: betonového kvádrů (zajímám se o sevření betonu, takže betonářská výztuž není podstatná), roznášecí desky v hlavě (roznáší do konstrukce zatížení) a čtyř úhelníků (slouží také jako roznášecí desky). Příčné pásy v modelu chybí, místo nich na úhelníky v příčném směru působí plošné zatížení. Jedná se o značné zjednodušení modelu, které by ale hledané výsledky nemělo nijak negativně ovlivnit.

V celém modelu byly použity pouze dva materiály, jeden představující beton (3D Nonlinear Cementitious 2) a druhý ocelové roznášecí plochy (3D elastický izotropní). U betonu jsem zvolil pevnost v tlaku 16 MPa a u ocelových příložek (deska i úhelníky) nulovou objemovou hmotnost (aby co nejméně ovlivňovaly betonový sloup), další charakteristiky zůstaly původní.



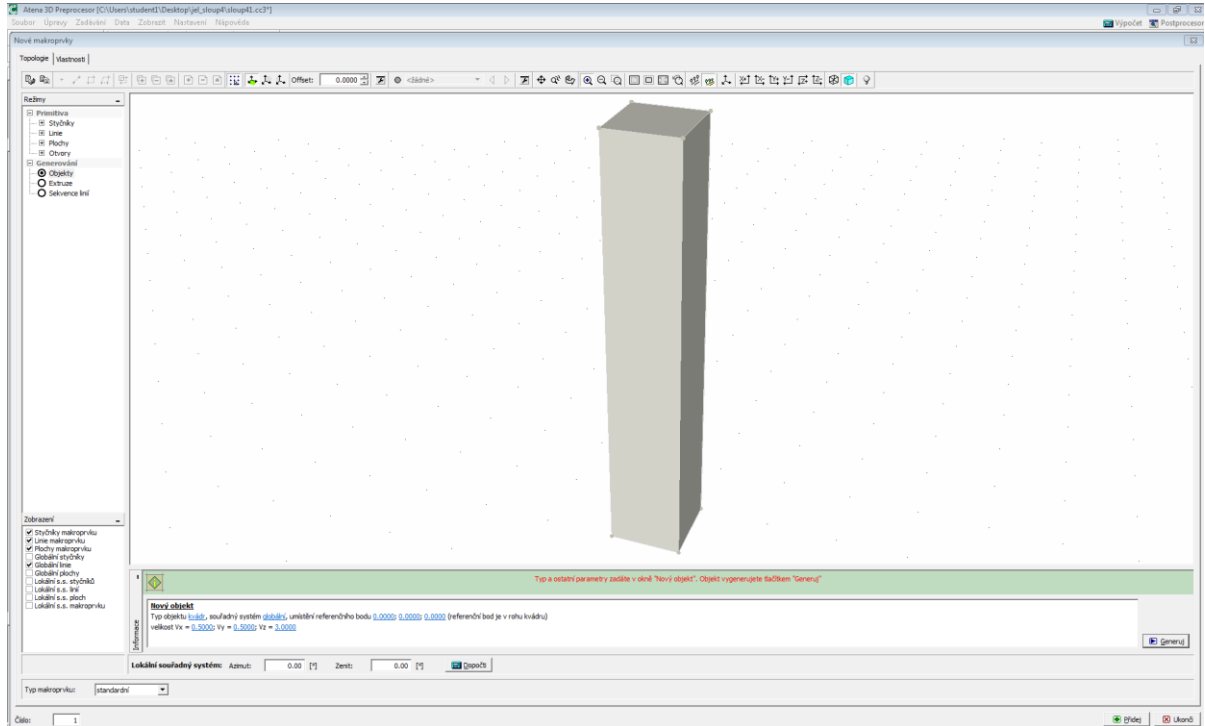
Obr. 25: Materiál představující beton



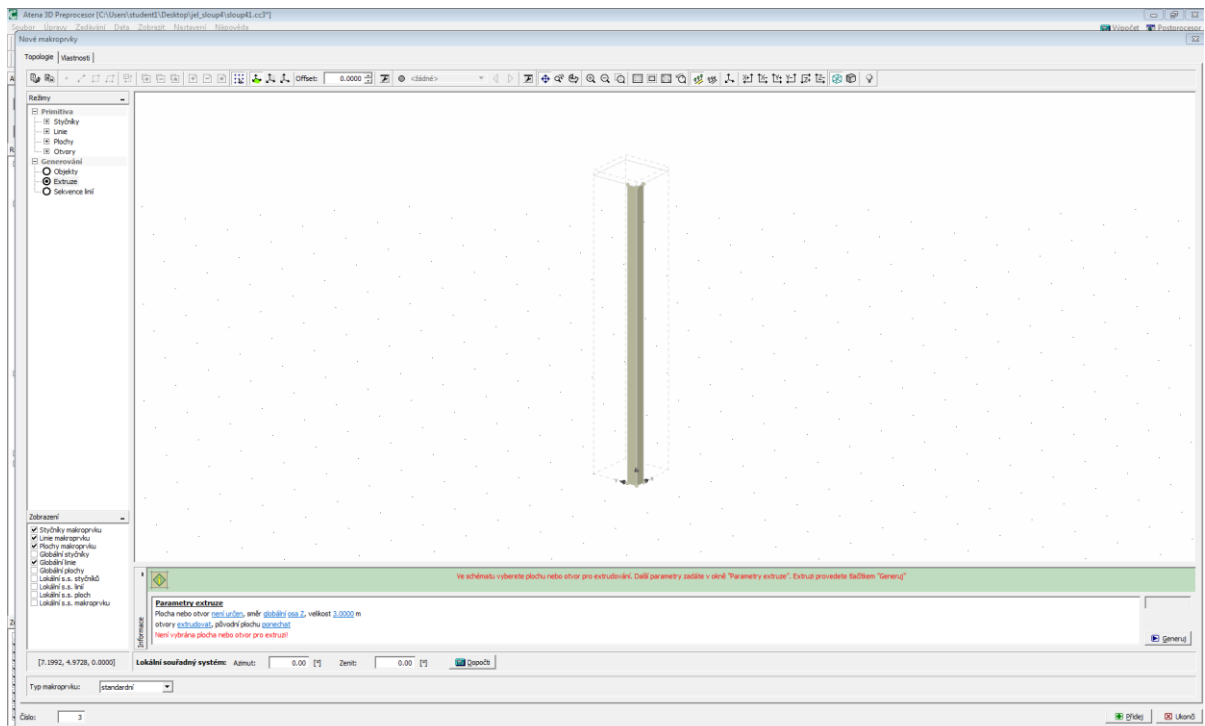
Obr. 26: Materiál představující ocelové roznášecí plochy

Jak už bylo naznačeno výše, skládá se model z celkem šesti makroprvků:

- betonový sloup 0,5 x 0,5 x 3,0 m;
- roznášecí deska 0,5 x 0,5 x 0,05 m;
- 4x úhelník 0,1 x 0,1 x 0,01 m, délka 3,0 m.



Obr. 27: Betonový sloup

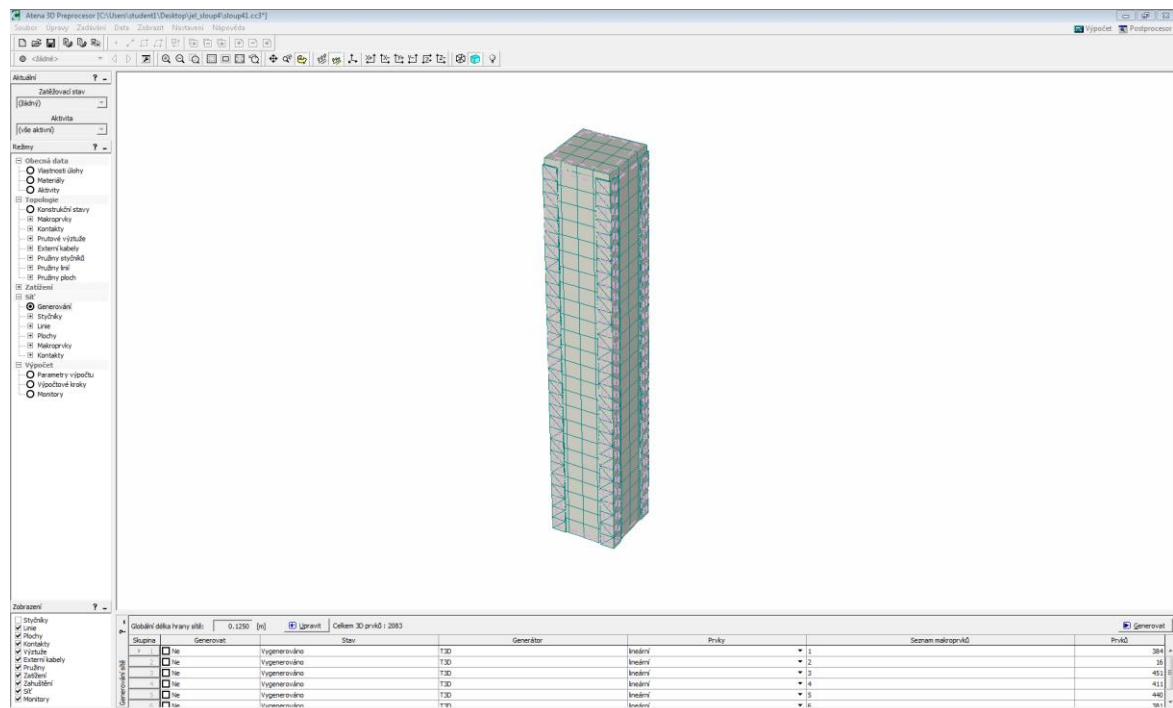


Obr. 28: Roznášecí plocha představující podélný úhelník

Mezi makroprvky reprezentujícími beton a ocelové úhelníky zůstalo zachováno přednastavené pevné spojení, tzn. beton a ocel jsou dokonale soudržné (jako spřažená konstrukce). To sice odporuje zvolenému návrhovému přístupu, ale i v tomto případě platí, že by nemělo dojít ke znehodnocení hledaných výsledků.



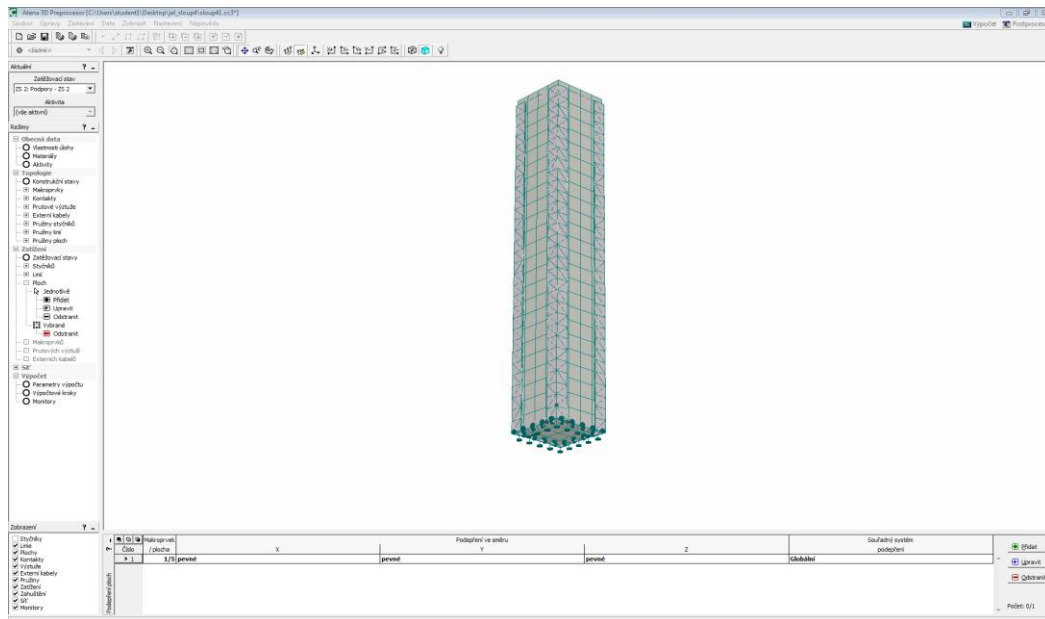
Obr. 29: Kompletní model I s roznášecí deskou



Obr. 30: Model s vygenerovanou sítí konečných prvků

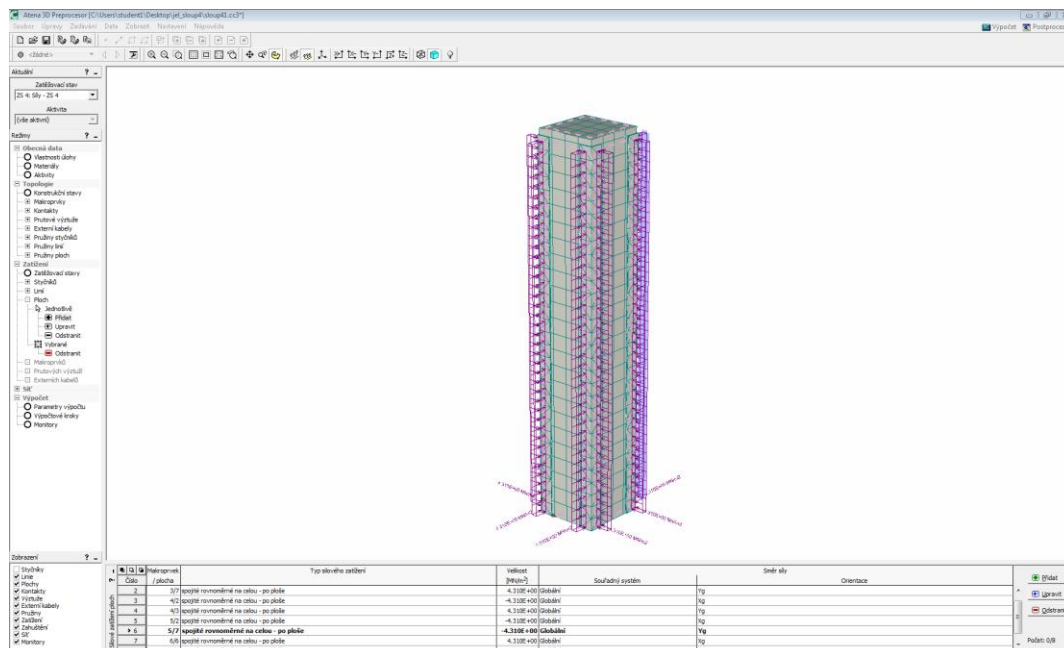
Poté bylo zadáno zatížení rozdělené do čtyř zatěžovacích stavů:

- Vlastní tíha.
- Podpory – sloupy byly v patě odebrány všechny stupně volnosti (vetknutí).



Obr. 31: Vetknutí sloupu

- Deformace – místo síly byla do sloupu vnášena deformace (0,1 mm), to umožňuje sledovat průběh napětí i po dosažení meze pevnosti. Z deformace navíc lze snadno dopočítat sílu, kterou je konstrukce zatěžována (vložením monitoru, viz obr. 33).
- Síly – během zatěžování bylo do úhelníků jednorázově vneseno příčné napětí o velikosti  $\sigma_1$ , toto plošné zatížení úhelníky přeneslo do betonového sloupu.



Obr. 32: Příčné napětí (konstantní)

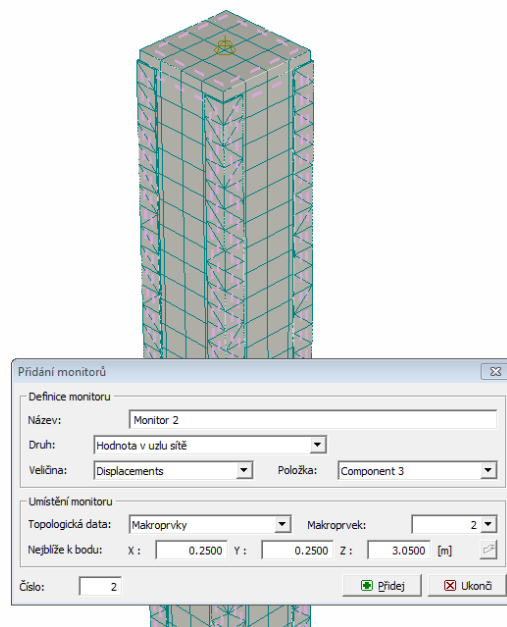
Velikost příčného napětí  $\sigma_l$  jsem určil následovně: zvolil jsem si, že po výšce sloupu budou pásky od sebe osově vzdáleny např. 0,25 m, na sloupu o výšce 3 m tedy bylo 11 pásků. Dále jsem si zvolil rozměry průřezu pásku: 5 x 100 mm, potom při použití oceli třídy S235:

$$F_b = f_{yb} A_b = 235 \cdot 10^6 \cdot 0,005 \cdot 0,1 = 117,5 \text{ kN}$$

kde  $F_b$  je síla v pásku,  $f_b$  je pevnost na mezi kluzu oceli a  $A_b$  značí plochu příčného průřezu páskem. Potom:

$$\sigma_l = \frac{\sum F_{bi}}{H l_a} = \frac{11 \cdot 117,5}{3,0 \cdot 0,1} = 4,31 \text{ MN/m}^2$$

kde  $H$  je výška sloupu (ev. podélných úhelníků) a  $l_a$  je šířka příruby podélného úhelníku.



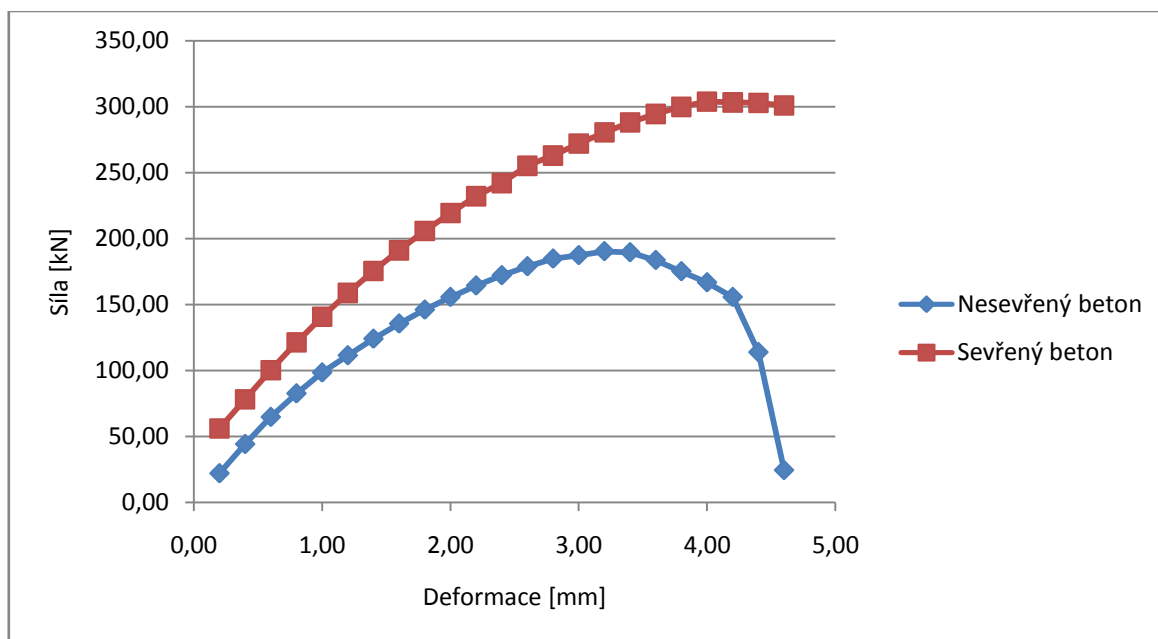
Obr. 33: Zadání monitorů, které sledují deformace v hlavě sloupu a působící sílu

Poté byly nadefinovány výpočtové kroky. V prvním výpočtovém kroku se konstrukce zatížila vlastní tíhou a jí odpovídající reakcí v podpoře. Protože si program pamatuje, v jakém stavu se konstrukce nacházela v minulém kroku, stačilo v každém následujícím přidávat pouze nové zatížení, tj. deformaci a jí odpovídající reakci. Tento postup se opakoval u všech zkušebních sloupů. U každého sloupu stačilo 24 výpočtových kroků (s dvojnásobným koeficientem zatěžování, tj. konstrukci v jednom kroku byla udělena deformaci 0,2 mm).

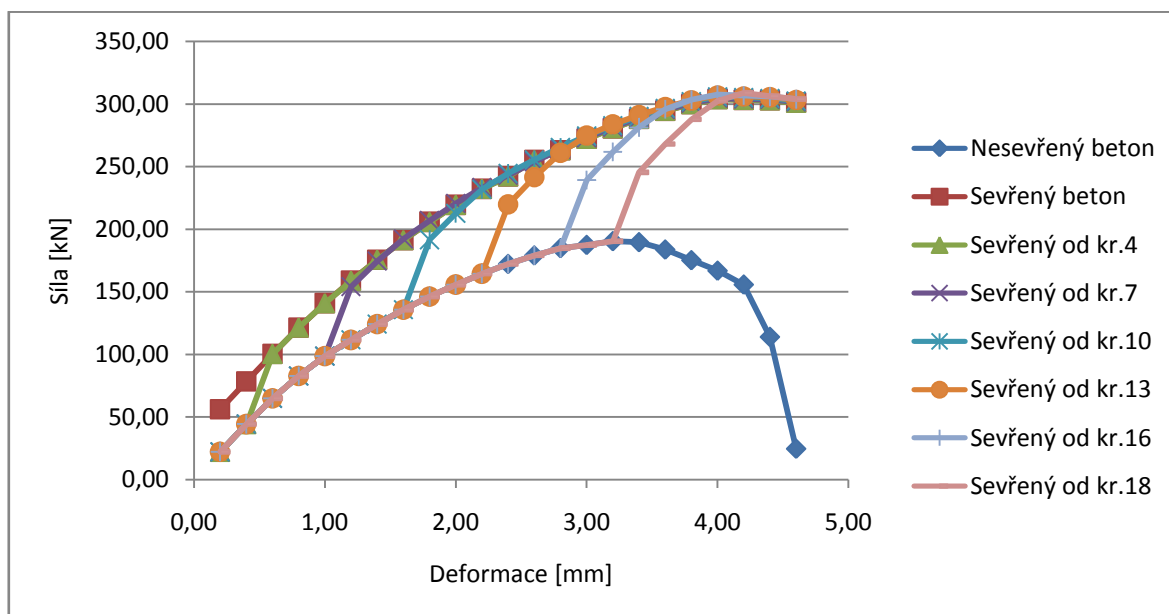
Celkem bylo simulováno chování osmi sloupů. Sedm z nich bylo v určitém kroku sevřeno příčným napětím  $\sigma_l$ , tj. byly zesíleny v určitém stavu napětí a deformace. Výstupem ze simulací bylo osm zatěžovacích křivek.

Číslo sloupu	Výpočtový krok, v němž byl sloup sevřen	Odpovídající deformace sloupu
1	bez sevření	-
2	2. krok (od počátku)	0,2 mm
3	4. krok	0,6 mm
4	7. krok	1,2 mm
5	10. krok	1,8 mm
6	13. krok	2,4 mm
7	16. krok	3,0 mm
8	18. krok	3,4 mm

Tab. 3: Výpočtové kroky, při nichž je sloup sevřen a odpovídající deformace



Graf 4: Zatěžovací křivky od počátku sevřeného a nesevřeného betonu



Graf 5: Výsledné zatěžovací křivky

Z výsledných zatěžovacích křivek vyplývá, že lze v pracovním diagramu plynule „přejít“ z jednoosého stavu napjatosti do stavu „trojosého“. Není nutné se proto obávat, že by beton sevřený i při velkém přetvoření nedosáhl své zvětšené pevnosti v tlaku. Tento závěr však vychází pouze z matematické simulace a jeho oprávněnost by bylo třeba prokázat zatěžovacími zkouškami. Pro potřeby této práce se s ním ale musím spokojit.

### 3.7 Přetvoření sloupu ve chvíli zesilování

Únosnost sevřeného betonu je již známa, rovněž jeho zvětšená poměrná přetvoření, ale aby bylo možné určit, jakého napětí bude dosaženo v podélných úhelnících, je třeba znát aktuální přetvoření konstrukce. Pokud by bylo značné, nemusela by konstrukce mít dostatečnou kapacitu k dosažení plného využití oceli (pevnosti na mezi kluzu).

Přetvoření sloupu ve chvíli zesilování lze určit poměrně snadno. Jsou totiž k dispozici dvě podmínky rovnováhy – (a) silová a (b) momentová. Nejprve provedu výpočet přetvoření pro obecný případ, kdy je část vláken betonu tažena a část tlačena.

Silová podmínka rovnováhy vypadá takto:

$$F_c + \sum_{i=1}^n F_{si} - N = 0$$

Za  $F_c$  se dosadí:

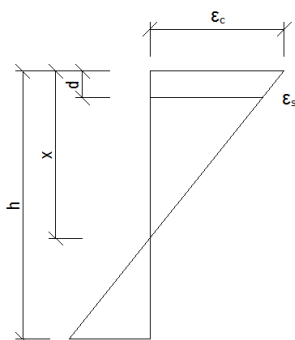
$$F_c = A_c \sigma_c = \lambda x b f_{cd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^2 \right]$$

Za  $F_{si}$  se dosadí (vychází-li se z podobnosti trojúhelníků):

$$F_{si} = A_{si} \sigma_{si} = A_{si} E_s \frac{\varepsilon_c}{x} (x - d_i)$$

Po dosazení do původní silové podmínky rovnováhy vychází tato rovnice (a):

$$\lambda x b f_{cd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^2 \right] + \sum_{i=1}^n A_{si} E_s \frac{\varepsilon_c}{x} (x - d_i) - N = 0$$



Obr. 34: Poměrné přetvoření obecně namáhaného průřezu

Momentová podmínka rovnováhy vypadá takto:

$$F_c z_c + \sum_{i=1}^n F_{si} z_{si} - M = 0$$

Za  $F_c$  a  $F_{si}$  se dosadí stejné veličiny jako u silové podmínky a  $z_c$  se rozepíše pomocí  $h$  a  $x$ , potom vychází tato rovnice (b):

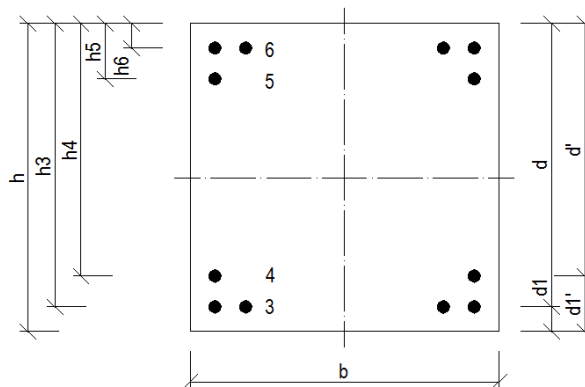
$$\lambda x b f_{cd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^2 \right] (0,5h - 0,5\lambda x) + \sum_{i=1}^n A_{si} E_s \frac{\varepsilon_c}{x} (x - d_i) z_{si} - M = 0$$

Nyní mám soustavu dvou rovnic (a, b) o dvou neznámých  $x$  a  $\varepsilon_c$ . Ostatní veličiny jsou známy, jedná se o materiálové a geometrické charakteristiky vyšetřovaného průřezu, Na  $M$  jsou výslednice vnějších sil působících na konstrukci. Nejjednodušší bude tuto soustavu vyřešit iterační metodou v programu MS Excel (funkce Řešitel).

*Ilustrativní příklad 1:* Uvažuji železobetonový sloup o průřezu 0,5 x 0,5 m a tyto materiálové charakteristiky:

Beton				Betonářská výztuž			
třída:	C16/20	$\lambda =$	0,8	typ:	B500	$\sigma_{sc} =$	400,0 E+06 Pa
fck=	16,0 E+06 Pa	$\eta =$	1,0	fyk=	500,0 E+06 Pa	$\varepsilon_{yd} =$	0,0022
fcd=	10,7 E+06 Pa	$\varepsilon_{c2} =$	0,0020	fyd=	434,8 E+06 Pa		
Ecm=	29,0 E+09 Pa	$\varepsilon_{cu2} =$	0,0035	Es=	200,0 E+09 Pa		

Geometrie:



Obr. 35: Průřez stávajícího sloupu

Výšky průřezu	Ramena vnitř. sil	Plochy výztuží	Vzdálenost výztuže
h3= 0,460 m	zs3= 0,210 m	As3= 8,04 E-04 m <sup>2</sup>	d1= 0,040 m    d= 0,460 m
h4= 0,420 m	zs4= 0,170 m	As4= 4,02 E-04 m <sup>2</sup>	d'1= 0,080 m    d'= 0,420 m
h5= 0,080 m	zs5= 0,170 m	As5= 4,02 E-04 m <sup>2</sup>	d2= 0,040 m    d= 0,460 m
h6= 0,040 m	zs6= 0,210 m	As6= 8,04 E-04 m <sup>2</sup>	d'2= 0,080 m    d'= 0,420 m

Pozn.: Vrstvy 1,2,7 a 8 jsou vyhrazeny pro budoucí ocelovou bandáž.

Na hlavu sloupu působí tyto vnější síly:  $N=-2511$  kN a  $M=228,5$  kNm, potom vyřeším podmínky rovnováhy – v šedém poli je nastaven Řešitel (funkce MS Excel), který mění hodnoty v oranžových buňkách tak, aby hodnoty v řádku „Výsledek“ (červené) byly nulové (nebo alespoň co nejlíže nule):

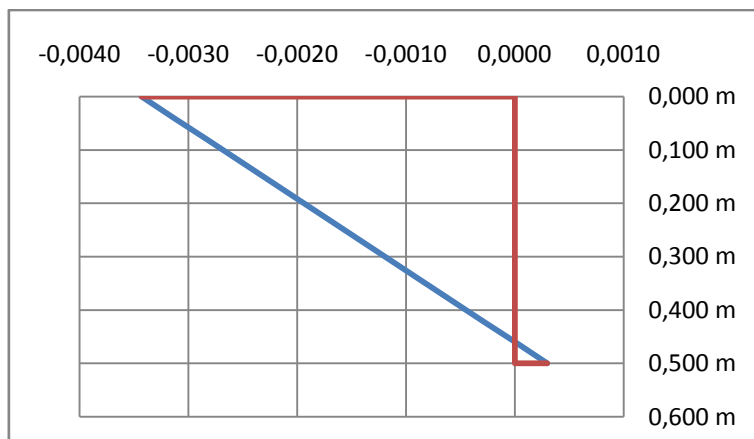
	1. podmínka (N)		2. podmínka (M)	
<b>Beton</b>	Ac=	18,40 E-02 m2	Ac=	18,40 E-02 m2
	$\sigma_c$ =	-10,7 E+06 Pa	$\sigma_c$ =	10,7 E+06 Pa
	Fc=	<b>-1,963 E+06 N</b>	zc=	0,066 m
			<b>Mc=</b>	<b>129,5 E+03 Nm</b>
<b>3. vrstva výztuže (dolní)</b>	As3=	8,04 E-04 m2	As3=	8,04 E-04 m2
	$\sigma_3$ =	-1,4 E+03 Pa	$\sigma_3$ =	-1,4 E+03 Pa
	Fs3=	<b>-1,163 E+00 N</b>	zs3=	0,210 m
			<b>Ms3=</b>	<b>-244,2 E-03 Nm</b>
<b>4. vrstva výztuže (dolní)</b>	As4=	4,02 E-04 m2	As4=	4,02 E-04 m2
	$\sigma_4$ =	-59,7 E+06 Pa	$\sigma_4$ =	-59,7 E+06 Pa
	Fs4=	<b>-23,980 E+03 N</b>	zs4=	0,170 m
			<b>Ms4=</b>	<b>-4,1 E+03 Nm</b>
<b>5. vrstva výztuže (horní)</b>	As5=	4,02 E-04 m2	As5=	4,02 E-04 m2
	$\sigma_5$ =	-434,8 E+06 Pa	$\sigma_5$ =	434,8 E+06 Pa
	Fs5=	<b>-174,783 E+03 N</b>	zs5=	0,170 m
			<b>Ms5=</b>	<b>29,7 E+03 Nm</b>
<b>6. vrstva výztuže (horní)</b>	As6=	8,04 E-04 m2	As6=	8,04 E-04 m2
	$\sigma_6$ =	-434,8 E+06 Pa	$\sigma_6$ =	434,8 E+06 Pa
	Fs6=	<b>-349,565 E+03 N</b>	zs6=	0,210 m
			<b>Ms6=</b>	<b>73,4 E+03 Nm</b>
<b>Vnitřní</b>	Ni=	-2,511 E+06 N	Mi=	228,6 E+03 Nm
<b>Vnější</b>	Ne=	2,511 E+06 N	Me=	-228,5 E+03 Nm
<b>Výsledek</b>	<b><math>\Sigma N</math>=</b>	<b>-6,640 E-07 N</b>	<b><math>\Sigma M</math>=</b>	<b>80,4 E+00 Nm</b>
<b>Nula</b>		0		0

<b>x'</b> =	0,460 m
<b><math>\epsilon_c</math></b> =	0,0034

<b>h/<math>\lambda</math></b> =	0,625 m
---------------------------------	---------

Místo skutečného  $x$  je při výpočtu uvažováno s fiktivním  $x'$ . Zatímco  $x$  nabývá hodnot od 0 do  $h$ ,  $x'$  nám umožní pohybovat se v intervalu od 0 do  $h/\lambda$ . Takže počítám-li  $A_c = \lambda x' b$ , potom v krajním případě, kdy  $x' = h/\lambda$ , je plocha betonu  $A_c = hb$ . Tento případ je předělem mezi průřezem s taženými i tlačnými vlákny, kdy  $x' < h/\lambda$ , a průřezem se všemi vlákny tlačnými (viz níže), kdy by teoreticky bylo  $x' \geq h/\lambda$ .

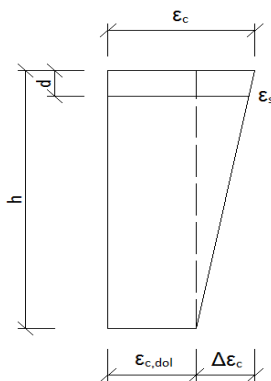
Přetvoření jednotlivých vrstev je potom v průřezu s taženými i tlačnými vlákny:



	Přetvoření	Výška
$\epsilon_c, \text{horní} =$	-0,0034	0,000 m
$\epsilon_{s6} =$	-0,0031	0,040 m
$\epsilon_{s5} =$	-0,0028	0,080 m
$\epsilon_{s4} =$	-0,0003	0,420 m
$\epsilon_{s3} =$	0,0000	0,460 m
$\epsilon_c, \text{dolní} =$	0,0003	0,500 m

Často se lze setkat s průřezy, u nichž jsou všechna vlákna betonu tlačena. V takovém případě je nutné výše uvedené podmínky rovnováhy upravit.

Nově definuji  $\epsilon_c$  jako poměrné přetvoření nejnamáhanějšího vlákna betonu,  $\epsilon_{c,dol}$  jako poměrné přetvoření vlákna na protější straně průřezu (maximální poměrné přetvoření  $\epsilon_{c,dol} = \epsilon_c$ ) a  $\Delta\epsilon_c$  jako jejich rozdíl.



Obr. 36: Poměrné přetvoření tlačného průřezu

$$\epsilon_{c,dol} = \epsilon_c - \Delta\epsilon_c$$

Potom poměrné přetvoření jedné vrstvy výztuže:

$$\epsilon_{si} = \epsilon_c - \Delta\epsilon_c + \frac{\Delta\epsilon_c}{h} (h - d_i)$$

Po úpravě vypadá takto:

$$\varepsilon_{si} = \varepsilon_c + \Delta\varepsilon_c \left( \frac{h - d_i}{h} - 1 \right)$$

Poté se dosadí do výše popsaných podmínek rovnováhy nové  $\varepsilon_{si}$ , plochu tlačného betonu ztotožním s plochou průřezu a získám opět soustavu dvou rovnic (a, b) o dvou neznámých, tentokrát  $\varepsilon_c$  a  $\Delta\varepsilon_c$ .

$$bh f_{cd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^2 \right] + \sum_{i=1}^n A_{si} E_s \left[ \varepsilon_c + \Delta\varepsilon_c \left( \frac{h - d_i}{h} - 1 \right) \right] - N = 0$$

$$bh f_{cd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^2 \right] (0,5h - 0,5\lambda x) + \sum_{i=1}^n A_{si} E_s \left[ \varepsilon_c + \Delta\varepsilon_c \left( \frac{h - d_i}{h} - 1 \right) \right] z_{si} - M = 0$$

Pro vyřešení soustavy se opět použije iterační metoda v programu MS Excel (funkce Řešitel).

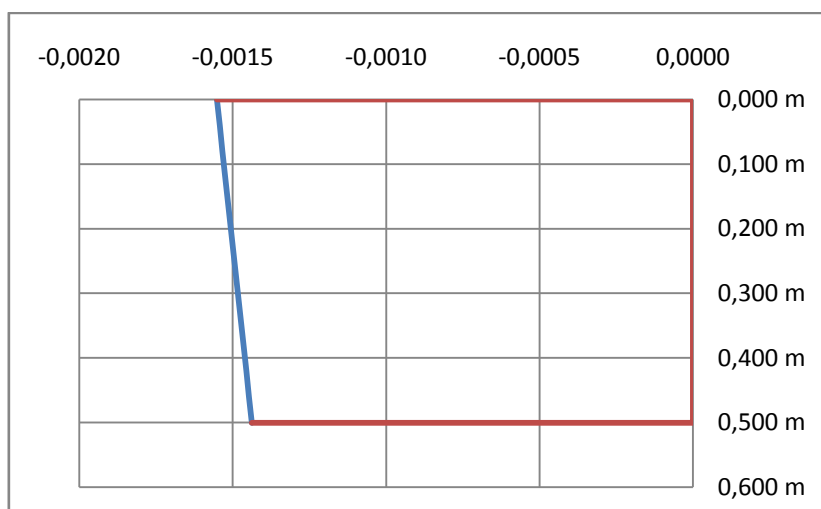
*Ilustrativní příklad 2:* Uvažuji stejný průřez jako u příkladu 1, se stejnými materiálovými charakteristikami a geometrií. Na hlavu sloupu budou působit tyto síly:  $N = -3254$  kN a  $M = 4,3$  kNm.

	1. podmínka (N)		2. podmínka (M)	
<b>Beton</b>	Ac=	25,00 E-02 m2	Ac=	25,00 E-02 m2
	$\sigma_c$ =	-10,1 E+06 Pa	$\sigma_c$ =	10,1 E+06 Pa
	<b>Fc=</b>	<b>-2,533 E+06 N</b>	zc=	0,000 m
			<b>Mc=</b>	<b>000,0 E+00 Nm</b>
<b>3. vrstva výztuže (dolní)</b>	As3=	8,04 E-04 m2	As3=	8,04 E-04 m2
	$\sigma_{s3}$ =	-289,4 E+06 Pa	$\sigma_{s3}$ =	289,4 E+06 Pa
	<b>Fs3=</b>	<b>-232,669 E+03 N</b>	zs3=	0,210 m
			<b>Ms3=</b>	<b>48,9 E+03 Nm</b>
<b>4. vrstva výztuže (dolní)</b>	As4=	4,02 E-04 m2	As4=	4,02 E-04 m2
	$\sigma_{s4}$ =	-291,2 E+06 Pa	$\sigma_{s4}$ =	291,2 E+06 Pa
	<b>Fs4=</b>	<b>-117,069 E+03 N</b>	zs4=	0,170 m
			<b>Ms4=</b>	<b>19,9 E+03 Nm</b>
<b>5. vrstva výztuže (horní)</b>	As5=	4,02 E-04 m2	As5=	4,02 E-04 m2
	$\sigma_{s5}$ =	-306,7 E+06 Pa	$\sigma_{s5}$ =	306,7 E+06 Pa
	<b>Fs5=</b>	<b>-123,311 E+03 N</b>	zs5=	0,170 m
			<b>Ms5=</b>	<b>21,0 E+03 Nm</b>
<b>6. vrstva výztuže (horní)</b>	As6=	8,04 E-04 m2	As6=	8,04 E-04 m2
	$\sigma_{s6}$ =	-308,6 E+06 Pa	$\sigma_{s6}$ =	308,6 E+06 Pa
	<b>Fs6=</b>	<b>-248,092 E+03 N</b>	zs6=	0,210 m
			<b>Ms6=</b>	<b>52,1 E+03 Nm</b>
<b>Vnitřní</b>	Ni=	-3,254 E+06 N	Mi=	4,3 E+03 Nm
<b>Vnější</b>	Ne=	3,254 E+06 N	Me=	-4,3 E+03 Nm
<b>Výsledek</b>	<b><math>\Sigma N</math>=</b>	<b>-8,690 E-05 N</b>	<b><math>\Sigma M</math>=</b>	<b>7,3 E-12 Nm</b>
<b>Nula</b>		0		0

$\Delta\varepsilon_c$ =	0,0001
$\varepsilon_c$ =	0,0016

$\varepsilon_{cu2}$ =	0,0035
-----------------------	--------

Přetvoření jednotlivých vrstev je potom:



	Přetvoření	Výška
$\epsilon_c, \text{horní} =$	-0,0016	0,000 m
$\epsilon_{s6} =$	-0,0015	0,040 m
$\epsilon_{s5} =$	-0,0015	0,080 m
$\epsilon_{s4} =$	-0,0015	0,420 m
$\epsilon_{s3} =$	-0,0014	0,460 m
$\epsilon_c, \text{dolní} =$	-0,0014	0,500 m

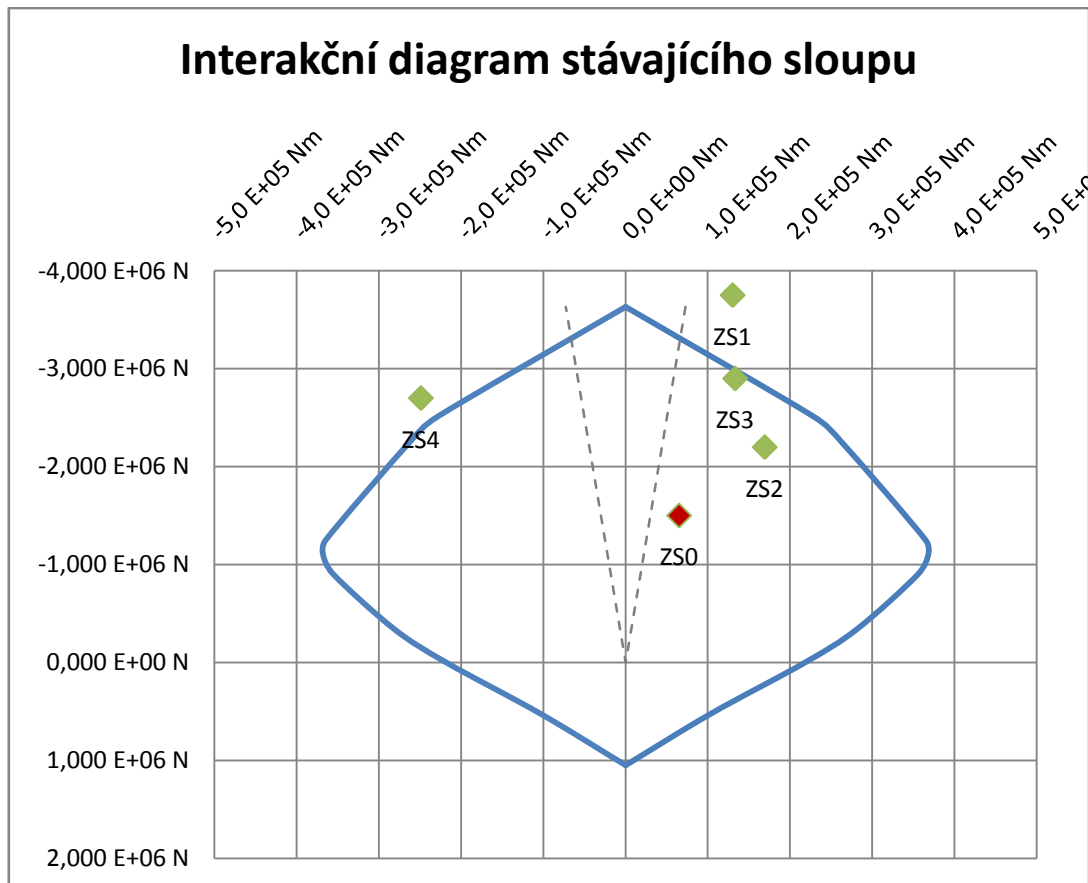
V této chvíli jsou již známy všechny veličiny, které jsou potřeba při výpočtu únosnosti zesíleného železobetonového sloupu. Lze proto přistoupit k sestavení interakčního diagramu, který bude sloužit k posouzení takového sloupu.

### 3.8 Sestavení interakčního diagramu

Sestavení interakčního diagramu bude opět nejnvhodnější předvést na názorném příkladu. Uvažuji s tím, že je již sestaven interakční diagram původního nezesíleného sloupu (viz graf 6). V této kapitole se tedy budu podrobněji věnovat jednotlivým bodům interakčního diagramu zesílené konstrukce. Výpočet bude proveden metodou mezních přetvoření [16].

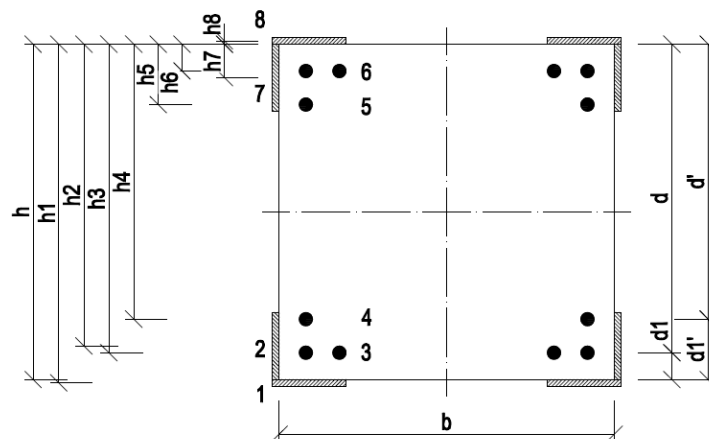
Vzhledem k tomu, že jeden z výpočtových předpokladů říká, že účinnost bandáže (lépe vliv sevření) klesá s rostoucí excentricitou, budu při výpočtu uvažovat se zvětšenými charakteristikami sevřeného betonu pouze u bodů 0, 1.3 a 1.4.

Uvažuji stejný průřez jako v příkladech předchozí kapitoly, včetně stejných materiálových i geometrických charakteristik. Zatěžovací stavy jsou náhodně zvolené, je v nich již zahrnut vliv imperfekcí a případný vliv účinků druhého řádu. Zatěžovací stav ZS0 (v grafu červený) je stav v době zesilování, tj. při odlehčení objektu, při tomto zatěžovacím stavu se počítá aktuální poměrné přetvoření (viz předchozí kapitola).



Graf 6: Interakční diagram nezesíleného sloupu

Nyní navrhnu ocelovou bandáž, tvořenou podélnými úhelníky L 40x40x4 a příčnými pásy 80x5 mm po výšce v osové vzdálenosti 250 mm. Úhelníky jsou rozděleny na dvě vrstvy výztuže, v tahu s nimi nebudu počítat (tzn. bandáž nemá potřebnou úpravu v oblasti hlavy a paty sloupu).



Obr. 37: Průřez zesíleného sloupu

Výšky průřezu		Ramena vnitřních sil		Plochy výztuží	
h1,a=	0,502 m	zs1=	0,252 m	As1,a=	7,00 E-04 m <sup>2</sup>
h2,a=	0,480 m	zs2=	0,230 m	As2,a=	3,20 E-04 m <sup>2</sup>
h3=	0,460 m	zs3=	0,210 m	As3=	8,04 E-04 m <sup>2</sup>
h4=	0,420 m	zs4=	0,170 m	As4=	4,02 E-04 m <sup>2</sup>
h5=	0,080 m	zs5=	0,170 m	As5=	4,02 E-04 m <sup>2</sup>
h6=	0,040 m	zs6=	0,210 m	As6=	8,04 E-04 m <sup>2</sup>
h7,a=	0,020 m	zs7=	0,230 m	As7,a=	3,20 E-04 m <sup>2</sup>
h8,a=	-0,002 m	zs8=	0,252 m	As8,a=	7,00 E-04 m <sup>2</sup>

Vlastnosti sevřeného betonu jsou tyto:

Sevřený beton			
třída:	C16/20	$\lambda$ =	0,8
f <sub>ck,c</sub> =	18,7 E+06 Pa	$\eta$ =	1,0
f <sub>cd,c</sub> =	12,5 E+06 Pa	$\epsilon_{c2,c}$ =	0,0037
		$\epsilon_{cu2,c}$ =	0,0160

Uvažuji např. toto aktuální přetvoření v době zesilování (a dopočítám si vrstvy 1,2,7 a 8):

	Přetvoření	Výška
$\epsilon_{c,horní}$ =	-0,0013	0,000 m
$\epsilon_{s6}$ =	-0,0013	0,040 m
$\epsilon_{s5}$ =	-0,0012	0,080 m
$\epsilon_{s4}$ =	-0,0006	0,420 m
$\epsilon_{s3}$ =	-0,0006	0,460 m
$\epsilon_{c,dolní}$ =	-0,0005	0,500 m

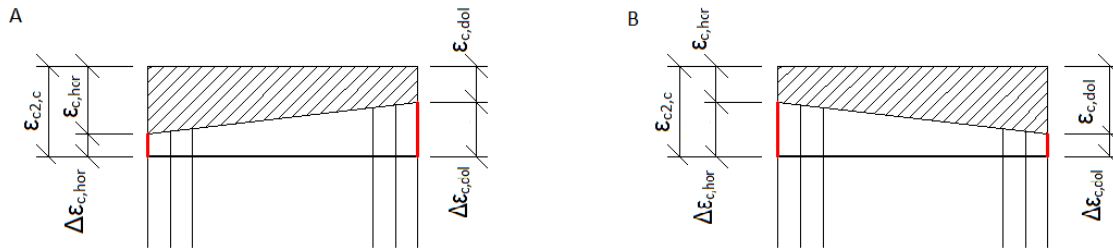
	Přetvoření	Výška
$\epsilon_{s8}$ =	-0,0013	-0,002 m
$\epsilon_{s7}$ =	-0,0013	0,020 m
$\epsilon_{s2}$ =	-0,0005	0,480 m
$\epsilon_{s1}$ =	-0,0005	0,502 m

Nyní již lze přistoupit k určení jednotlivých bodů interakčního diagramu:

*Pozn.: U každého bodu jsou dva schematické obrázky znázorňující aktuální poměrné přetvoření v hlavě sloupu a kapacitu přetvoření pro externí výztuž (úhelníky). První obrázek (A) popisuje situaci, kdy je mezní přetvoření způsobeno zatížením (zatěžovacím stavem) nacházejícím se v interakčním diagramu na stejné straně jako zatěžovací stav ve chvíli zesilování (ZS0). Jedná se o častější případ. Druhý obrázek (B) popisuje situaci, k níž by došlo, kdyby se navrhované zatížení způsobující mezní poměrné přetvoření dostalo na protější stranu interakčního diagram (tj. došlo by ke změně znaménka ohybového momentu). Tento případ je vzácnější, proto bude výpočet bodů prezentován pouze pro situaci (A).*

### Bod 0

Jedná se o prostý tlak. Ve všech vláknech betonu je dosaženo zvětšeného poměrného přetvoření  $\epsilon_{c2,c}$ . Využití výztuže závisí na přetvoření ve chvíli zesilování.



Obr. 38: Poměrné přetvoření v hlavě sloupu. Vyšrafovaná oblast – aktuální poměrné přetvoření, červeně ( $\Delta\epsilon_c$ ) - kapacita přetvoření pro úhelníky.

Jednotlivé veličiny v případě výztuže se určí takto:

$$\epsilon_{si} = \epsilon_{c2,c} - \epsilon_{si,aktuální}$$

$$\sigma_{si} = E_s \epsilon_{si}$$

$$F_{si} = \sigma_{si} A_{si}$$

$$M_{si} = F_{si} z_{si}$$

Veličiny týkající se betonu takto:

$$A_c = bh$$

$$F_c = f_{cd,c} A_c$$

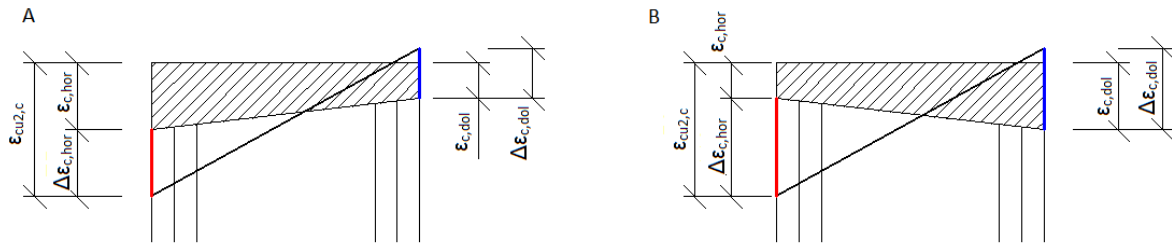
$$M_c = F_c z_c$$

Výsledné hodnoty definující polohu bodu v interakčním diagramu (a únosnost průřezu)  $N_{Rd,i}$  a  $M_{Rd,i}$  se vždy určí jako součet vnitřních sil, resp. momentů.

Bod 0							
Vrstva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
1	7,00 E-04	0,502	0,252	-0,0032	-235,0 E+06	-164,5 E+03	-41,5 E+03
2	3,20 E-04	0,480	0,230	-0,0032	-235,0 E+06	-75,2 E+03	-17,3 E+03
3	8,04 E-04	0,460	0,210	-0,0031	-434,8 E+06	-349,6 E+03	-73,4 E+03
4	4,02 E-04	0,420	0,170	-0,0031	-434,8 E+06	-174,8 E+03	-29,7 E+03
5	4,02 E-04	0,080	-0,170	-0,0025	-434,8 E+06	-174,8 E+03	29,7 E+03
6	8,04 E-04	0,040	-0,210	-0,0024	-434,8 E+06	-349,6 E+03	73,4 E+03
7	3,20 E-04	0,020	-0,230	-0,0024	-235,0 E+06	-75,2 E+03	17,3 E+03
8	7,00 E-04	-0,002	-0,252	-0,0024	-235,0 E+06	-164,5 E+03	41,5 E+03
Beton	b [m]	x [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,500	-	25,00 E-02	0,000	-12,5 E+06	-3,122 E+06	0,0 E+00
$N_{rd,0} =$		-4,651 E+06 N					
$M_{rd,0} =$		0,0 E+00 Nm					

### Bod 1.3

V tlačných vláknech betonu je dosaženo zväzšeného mezného pomerného pretvořeni  $\varepsilon_{cu2,c}$ . Neutrálñí osa prochází třetívou vrstvou výztuže, tj.  $x = h_3$ .



Obr. 39: Pomerné pretvořeni v hlavě sloupu. Vyšrafovaná oblast – aktuální pomerné pretvořeni, červeně ( $\Delta\varepsilon_c$ ) – kapacita pretvořeni pro úhelñíky při namáhání tlakem, modře ( $\Delta\varepsilon_c$ ) – kapacita pretvořeni pro úhelñíky při namáhání tahem.

Jednotlivé veličiny v případě výztuže určíme takto:

$$\varepsilon_{si} = \frac{\varepsilon_{cu2,c}}{x} (x - h_i)$$

u úhelñíků:

$$\varepsilon_{si} = \frac{\varepsilon_{cu2,c}}{x} (x - h_i) - \varepsilon_{si,aktuální}$$

dále:

$$\sigma_{si} = E_s \varepsilon_{si}$$

$$F_{si} = \sigma_{si} A_{si}$$

$$M_{si} = F_{si} z_{si}$$

Veličiny týkající se betonu takto:

$$A_c = b \lambda x$$

$$F_c = f_{cd,c} A_c$$

$$M_c = F_c z_c$$

<b>Bod 1.3</b>							
Vrstsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\varepsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
1	7,00 E-04	0,502	0,252	0,0020	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	3,20 E-04	0,480	0,230	0,0012	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	8,04 E-04	0,460	0,210	<b>0,0000</b>	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
4	4,02 E-04	0,420	0,170	-0,0014	-277,5 E+06	-111,6 E+03	-19,0 E+03
5	4,02 E-04	0,080	-0,170	-0,0132	-434,8 E+06	-174,8 E+03	29,7 E+03
6	8,04 E-04	0,040	-0,210	-0,0146	-434,8 E+06	-349,6 E+03	73,4 E+03
7	3,20 E-04	0,020	-0,230	-0,0140	-235,0 E+06	-75,2 E+03	17,3 E+03
8	7,00 E-04	-0,002	-0,252	-0,0147	-235,0 E+06	-164,5 E+03	41,5 E+03
Beton	b [m]	x [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,500	<b>0,460</b>	18,40 E-02	-0,066	-12,5 E+06	-2,298 E+06	1,5 E+05
$N_{rd,1.3} =$		-3,174 E+06 N					
$M_{rd,1.3} =$		294,6 E+03 Nm					

#### Bod 1.4

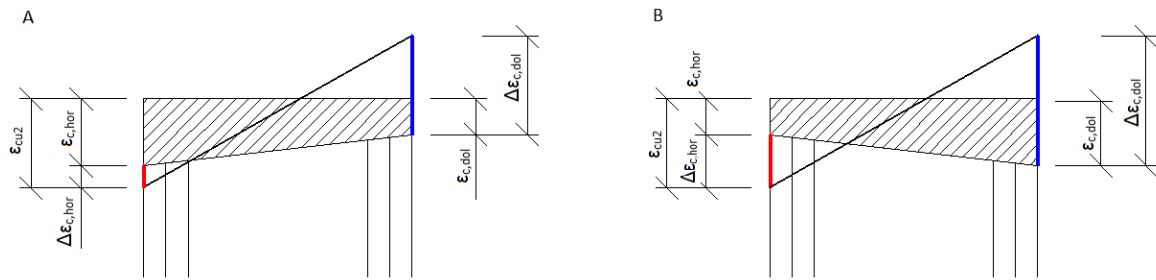
V tlačných vláknách betonu je dosaženo zväzšeného mezniho pomerného pretvoření  $\varepsilon_{cu2,c}$ . Neutrálنی osa prochází čtvrtou vrstvou výztuže, tj.  $x = h_4$ . Výpočet stejný jako u bodu 1.3.

<b>Bod 1.4</b>							
Vrstsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\varepsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
1	7,00 E-04	0,502	0,252	0,0036	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	3,20 E-04	0,480	0,230	0,0028	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	8,04 E-04	0,460	0,210	0,0015	304,0 E+06	244,4 E+03	51,3 E+03
4	4,02 E-04	0,420	0,170	<b>0,0000</b>	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
5	4,02 E-04	0,080	-0,170	-0,0129	-434,8 E+06	-174,8 E+03	29,7 E+03
6	8,04 E-04	0,040	-0,210	-0,0144	-434,8 E+06	-349,6 E+03	73,4 E+03
7	3,20 E-04	0,020	-0,230	-0,0139	-235,0 E+06	-75,2 E+03	17,3 E+03
8	7,00 E-04	-0,002	-0,252	-0,0147	-235,0 E+06	-164,5 E+03	41,5 E+03
Beton	b [m]	x [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,500	<b>0,420</b>	16,80 E-02	-0,082	-12,5 E+06	-2,098 E+06	1,7 E+05
$N_{rd,1.4} =$		-2,618 E+06 N					
$M_{rd,1.4} =$		385,3 E+03 Nm					

#### Bod 2.3

V tlačných vláknách betonu je dosaženo mezniho pomerného pretvoření  $\varepsilon_{cu2}$ . Tažená třetí vrstva výztuže dosahuje meze kluzu oceli  $\varepsilon_{yd}$ , potom:

$$x = \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{yd}} h_3$$



Obr. 40: Poměrné přetvoření v hlavě sloupu. Vyšrafovaná oblast – aktuální poměrné přetvoření, červeně ( $\Delta\epsilon_c$ ) - kapacita přetvoření pro úhelníky při namáhání tlakem, modře ( $\Delta\epsilon_c$ ) – kapacita přetvoření pro úhelníky při namáhání tahem.

Výpočet jednotlivých veličin je stejný jako u bodů 1.3 a 1.4 s výjimkou poměrného přetvoření výztuže:

$$\epsilon_{si} = \frac{\epsilon_{cu2}}{x} (x - h_i)$$

v případě úhelníků:

$$\epsilon_{si} = \frac{\epsilon_{cu2}}{x} (x - h_i) - \epsilon_{si,aktuální}$$

a síly betonu:

$$F_c = f_{cd} A_c$$

Bod 2.3							
Vrstva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
1	7,00 E-04	0,502	0,252	0,0032	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	3,20 E-04	0,480	0,230	0,0030	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	8,04 E-04	0,460	0,210	<b>0,0022</b>	434,8 E+06	349,6 E+03	73,4 E+03
4	4,02 E-04	0,420	0,170	0,0017	336,1 E+06	135,1 E+03	23,0 E+03
5	4,02 E-04	0,080	-0,170	-0,0025	-434,8 E+06	-174,8 E+03	29,7 E+03
6	8,04 E-04	0,040	-0,210	-0,0030	-434,8 E+06	-349,6 E+03	73,4 E+03
7	3,20 E-04	0,020	-0,230	-0,0020	-235,0 E+06	-75,2 E+03	17,3 E+03
8	7,00 E-04	-0,002	-0,252	-0,0022	-235,0 E+06	-164,5 E+03	41,5 E+03
Beton	b [m]	x [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,500	<b>0,284</b>	11,35 E-02	-0,136	-10,7 E+06	-1,211 E+06	1,7 E+05
	<b><math>N_{rd,2.3}</math></b>	-1,490 E+06 N					
	<b><math>M_{rd,2.3}</math></b>	423,5 E+03 Nm					

### Bod 2.4

V tlačných vláknech betonu je dosaženo mezního poměrného přetvoření  $\epsilon_{cu2}$ . Tažená čtvrtá vrstva výztuže dosahuje meze kluzu oceli  $\epsilon_{yd}$ , potom:

$$x = \frac{\epsilon_{cu2}}{\epsilon_{cu2} + \epsilon_{yd}} h_4$$

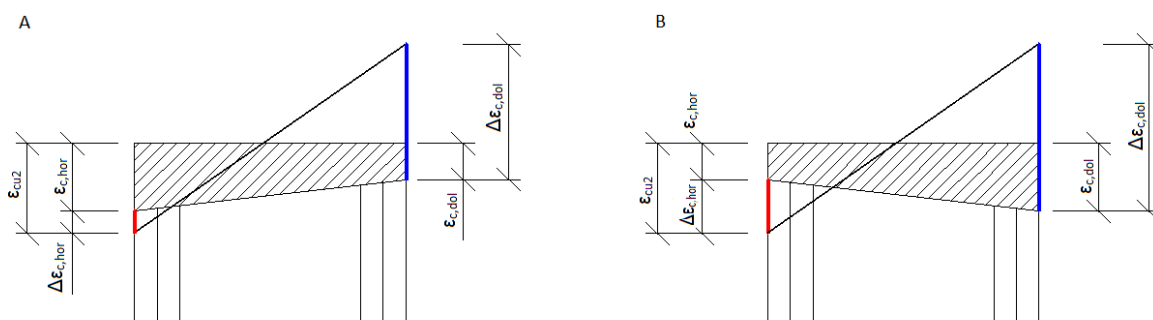
Další výpočet stejný jako u bodu 2.3.

<b>Bod 2.4</b>							
Vrstva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
1	7,00 E-04	0,502	0,252	0,0038	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	3,20 E-04	0,480	0,230	0,0035	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	8,04 E-04	0,460	0,210	0,0027	434,8 E+06	349,6 E+03	73,4 E+03
4	4,02 E-04	0,420	0,170	<b>0,0022</b>	434,8 E+06	174,8 E+03	29,7 E+03
5	4,02 E-04	0,080	-0,170	-0,0024	-434,8 E+06	-174,8 E+03	29,7 E+03
6	8,04 E-04	0,040	-0,210	-0,0030	-434,8 E+06	-349,6 E+03	73,4 E+03
7	3,20 E-04	0,020	-0,230	-0,0020	-235,0 E+06	-75,2 E+03	17,3 E+03
8	7,00 E-04	-0,002	-0,252	-0,0022	-235,0 E+06	-164,5 E+03	41,5 E+03
Beton	$b$ [m]	$x$ [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,500	<b>0,259</b>	10,36 E-02	-0,146	-10,7 E+06	-1,105 E+06	1,6 E+05
$N_{rd,2.4} =$		-1,345 E+06 N					
$M_{rd,2.4} =$		426,8 E+03 Nm					

### Bod Z.5

V tlačných vláknách betonu je dosaženo mezního poměrného přetvoření  $\epsilon_{cu2}$ . Tlačená pátá vrstva výztuže dosahuje meze kluzu oceli  $\epsilon_{yd}$ , potom:

$$x = \frac{\epsilon_{cu2}}{\epsilon_{cu2} - \epsilon_{yd}} h_5$$



Obr. 41: Poměrné přetvoření v hlavě sloupu. Vyšrafovaná oblast – aktuální poměrné přetvoření, červeně ( $\Delta\epsilon_c$ ) – kapacita přetvoření pro úhelníky při namáhání tlakem, modře ( $\Delta\epsilon_c$ ) – kapacita přetvoření pro úhelníky při namáhání tahem.

Další výpočet stejný jako u bodu 2.3.

<b>Bod Z.5</b>							
Vrstsva i	$A_{si} [m^2]$	$h_i [m]$	$z_{si} [m]$	$\epsilon_{si} [-]$	$\sigma_{si} [Pa]$	$F_{si} [N]$	$M_{si} [Nm]$
1	7,00 E-04	0,502	0,252	0,0053	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	3,20 E-04	0,480	0,230	0,0050	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	8,04 E-04	0,460	0,210	0,0041	434,8 E+06	349,6 E+03	73,4 E+03
4	4,02 E-04	0,420	0,170	0,0035	434,8 E+06	174,8 E+03	29,7 E+03
5	4,02 E-04	0,080	-0,170	<b>-0,0022</b>	-434,8 E+06	-174,8 E+03	29,7 E+03
6	8,04 E-04	0,040	-0,210	-0,0028	-434,8 E+06	-349,6 E+03	73,4 E+03
7	3,20 E-04	0,020	-0,230	-0,0019	-235,0 E+06	-75,2 E+03	17,3 E+03
8	7,00 E-04	-0,002	-0,252	-0,0022	-235,0 E+06	-164,5 E+03	41,5 E+03
Beton	$b [m]$	$x [m]$	$A_c [m^2]$	$z_c [m]$	$f_{cd} [Pa]$	$F_c [N]$	$M_c [Nm]$
	0,500	<b>0,211</b>	8,45 E-02	-0,166	-10,7 E+06	-9,009 E+05	1,5 E+05
$N_{rd,z.5} =$		-1,141 E+06 N					
$M_{rd,z.5} =$		414,1 E+03 Nm					

### Bod Z.6

V tlačných vláknách betonu je dosaženo mezního poměrného přetvoření  $\epsilon_{cu2}$ . Tlačná šestá vrstva výztuže dosahuje meze kluzu oceli  $\epsilon_{yd}$ , potom:

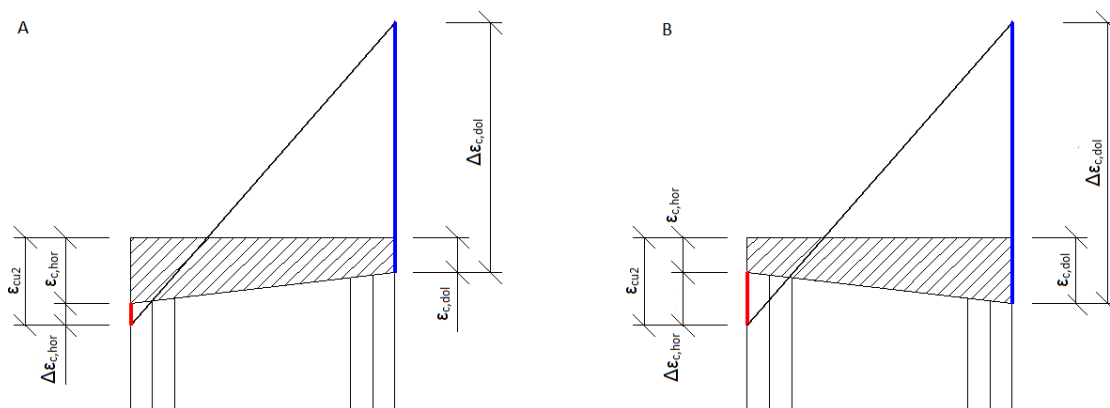
$$x = \frac{\epsilon_{cu2}}{\epsilon_{cu2} - \epsilon_{yd}} h_6$$

Další výpočet stejný jako u bodu 2.3.

<b>Bod Z.6</b>							
Vrstsva i	$A_{si} [m^2]$	$h_i [m]$	$z_{si} [m]$	$\epsilon_{si} [-]$	$\sigma_{si} [Pa]$	$F_{si} [N]$	$M_{si} [Nm]$
1	7,00 E-04	0,502	0,252	0,0136	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	3,20 E-04	0,480	0,230	0,0129	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	8,04 E-04	0,460	0,210	0,0118	434,8 E+06	349,6 E+03	73,4 E+03
4	4,02 E-04	0,420	0,170	0,0104	434,8 E+06	174,8 E+03	29,7 E+03
5	4,02 E-04	0,080	-0,170	-0,0008	-169,6 E+06	-68,2 E+03	11,6 E+03
6	8,04 E-04	0,040	-0,210	<b>-0,0022</b>	-434,8 E+06	-349,6 E+03	73,4 E+03
7	3,20 E-04	0,020	-0,230	-0,0016	-235,0 E+06	-75,2 E+03	17,3 E+03
8	7,00 E-04	-0,002	-0,252	-0,0023	-235,0 E+06	-164,5 E+03	41,5 E+03
Beton	$b [m]$	$x [m]$	$A_c [m^2]$	$z_c [m]$	$f_{cd} [Pa]$	$F_c [N]$	$M_c [Nm]$
	0,500	<b>0,106</b>	4,22 E-02	-0,208	-10,7 E+06	-4,504 E+05	9,4 E+04
$N_{rd,z.6} =$		-583,531 E+03 N					
$M_{rd,z.6} =$		340,5 E+03 Nm					

### Bod 3

Jedná se o prostý ohyb. V tlačných vláknách betonu je dosaženo mezního poměrného přetvoření  $\epsilon_{cu2}$ . Ve výpočtu vycházíme ze silové podmínky rovnováhy sil.



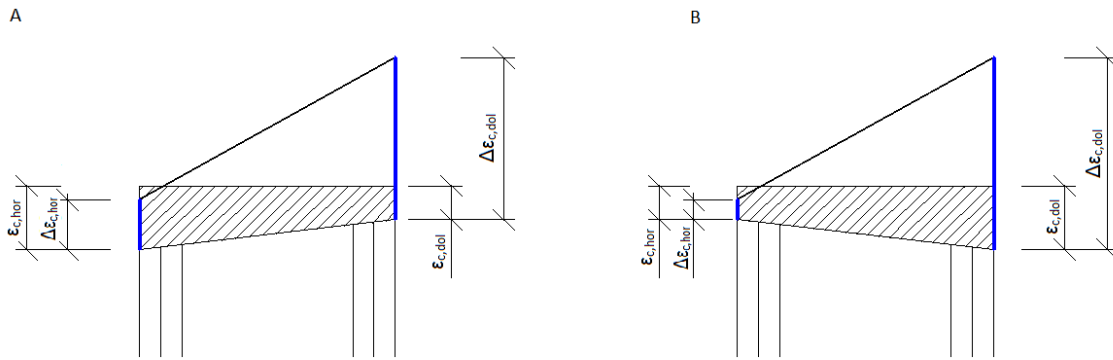
Obr. 42: Poměrné přetvoření v hlavě sloupu. Vyšrafovaná oblast – aktuální poměrné přetvoření, červeně ( $\Delta\epsilon_c$ ) – kapacita přetvoření pro úhelníky při namáhání tlakem, modře ( $\Delta\epsilon_c$ ) – kapacita přetvoření pro úhelníky při namáhání tahem.

Výpočet jednotlivých veličin je stejný jako u předchozích bodů, hodnota  $x$  se dohledá pomocí funkce programu MS Excel „Hledání řešení“, která funguje tak, že iterační metodou dopočítává hodnotu zadané buňky (oranžová –  $x$ ) tak, aby  $N_{Rd,3} = 0$ .

Bod 3							
Vrstva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
1	7,00 E-04	0,502	0,252	0,0279	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	3,20 E-04	0,480	0,230	0,0266	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	8,04 E-04	0,460	0,210	0,0248	434,8 E+06	349,6 E+03	73,4 E+03
4	4,02 E-04	0,420	0,170	0,0223	434,8 E+06	174,8 E+03	29,7 E+03
5	4,02 E-04	0,080	-0,170	0,0014	284,1 E+06	114,2 E+03	-19,4 E+03
6	8,04 E-04	0,040	-0,210	-0,0010	-207,9 E+06	-167,2 E+03	35,1 E+03
7	3,20 E-04	0,020	-0,230	-0,0010	-200,4 E+06	-64,1 E+03	14,7 E+03
8	7,00 E-04	-0,002	-0,252	-0,0023	-235,0 E+06	-164,5 E+03	41,5 E+03
Beton	$b$ [m]	$x$ [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,500	0,057	2,28 E-02	-0,227	-10,7 E+06	-2,428 E+05	5,5 E+04
	$N_{rd,3} =$	22,206 E-09 N	= 0				
	$M_{rd,3} =$	230,2 E+03 Nm					

#### Bod 4

Neutrální osa prochází společným těžištěm páté a šesté vrstvy výztuže (velmi malé poměrné přetvoření ve výztuži zanedbávám, pokud by se ale některá z vrstev nenacházela v bezprostřední blízkosti neutrální osy, je třeba její přetvoření dopočítat), vrstvy na protější straně průřezu (třetí a čtvrtá) dosahují většího přetvoření, než které odpovídá mezi kluzu oceli  $\epsilon_{yd}$ . Další výpočet stejný jako bodů 2.3.

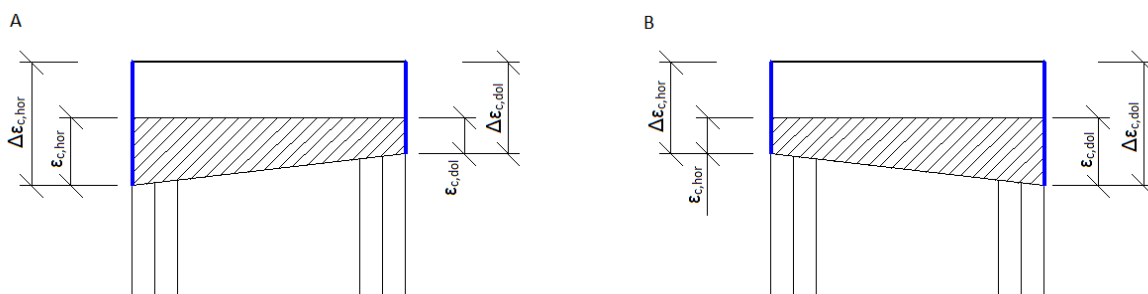


Obr. 43: Poměrné přetvoření v hlavě sloupu. Vyšrafovaná oblast – aktuální poměrné přetvoření, modře ( $\Delta\epsilon_c$ ) – kapacita přetvoření pro úhelníky při namáhání tahem.

Bod 4							
Vrstva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
1	7,00 E-04	0,502	0,252	> 0,0022	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	3,20 E-04	0,480	0,230	> 0,0022	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	8,04 E-04	0,460	0,210	> 0,0022	434,8 E+06	349,6 E+03	73,4 E+03
4	4,02 E-04	0,420	0,170	> 0,0022	434,8 E+06	174,8 E+03	29,7 E+03
5	4,02 E-04	0,080	-0,170	0,0000	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
6	8,04 E-04	0,040	-0,210	0,0000	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
7	3,20 E-04	0,020	-0,230	0,0000	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
8	7,00 E-04	-0,002	-0,252	0,0000	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
Beton	b [m]	x [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,500	-	00,00 E+00	0,000	000,0 E+00	0,000 E+00	0,0 E+00
$N_{rd,4} =$		524,348 E+03 N					
$M_{rd,4} =$		103,1 E+03 Nm					

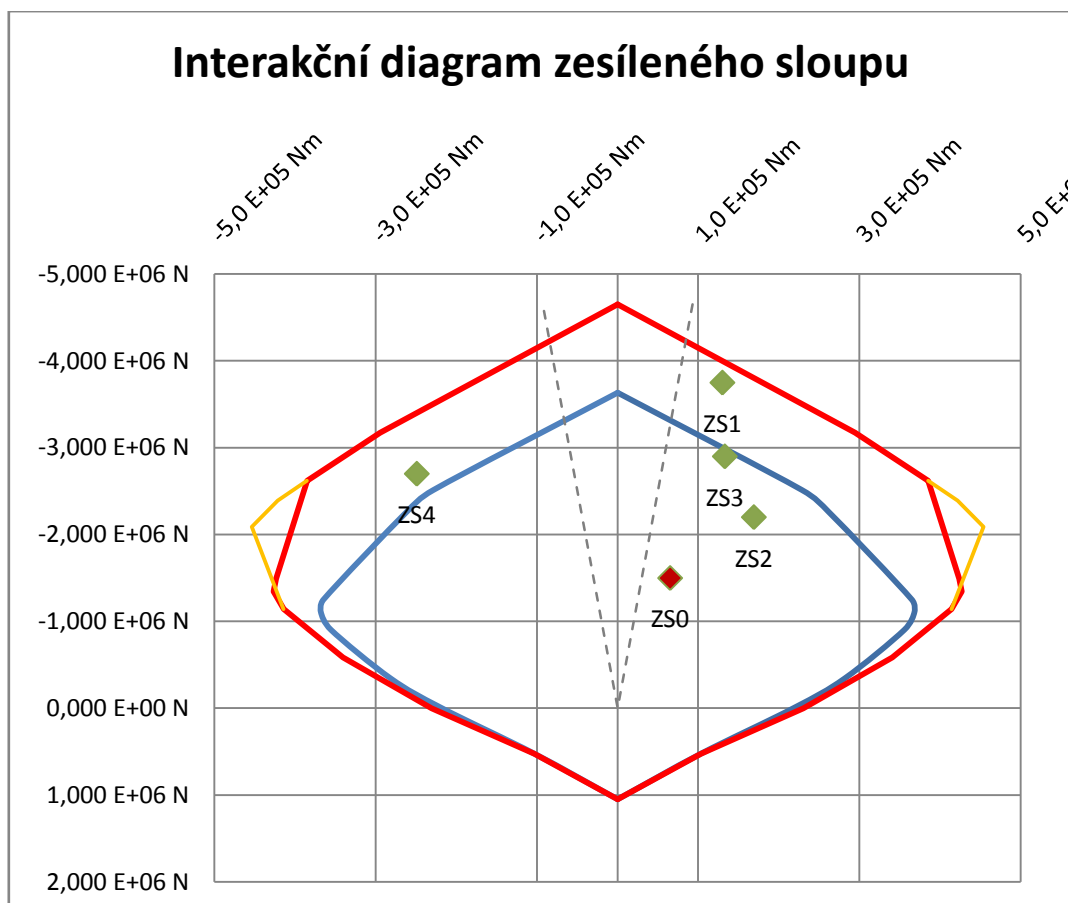
#### Bod 5

Jedná se o prostý tah. Všechny vrstvy výztuže v průřezu dosahují většího přetvoření, než které odpovídá mezi kluzu oceli  $\epsilon_{yd}$ . Další výpočet stejný jako bodů 2.3.



Obr. 44: Poměrné přetvoření v hlavě sloupu. Vyšrafovaná oblast – aktuální poměrné přetvoření, modře ( $\Delta\epsilon_c$ ) – kapacita přetvoření pro úhelníky při namáhání tahem.

Bod 5							
Vrstsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
1	7,00 E-04	0,502	0,252	> 0,0022	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	3,20 E-04	0,480	0,230	> 0,0022	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	8,04 E-04	0,460	0,210	> 0,0022	434,8 E+06	349,6 E+03	73,4 E+03
4	4,02 E-04	0,420	0,170	> 0,0022	434,8 E+06	174,8 E+03	29,7 E+03
5	4,02 E-04	0,080	-0,170	> 0,0022	434,8 E+06	174,8 E+03	-29,7 E+03
6	8,04 E-04	0,040	-0,210	> 0,0022	434,8 E+06	349,6 E+03	-73,4 E+03
7	3,20 E-04	0,020	-0,230	> 0,0022	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
8	7,00 E-04	-0,002	-0,252	> 0,0022	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
Beton	b [m]	x [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,500	-	00,00 E+00	0,000	000,0 E+00	0,000 E+00	0,0 E+00
$N_{rd,5} =$		1,049 E+06 N					
$M_{rd,5} =$		000,0 E+00 Nm					



Graf 7: Interakční diagram zesíleného sloupu

Oranžová křivka interakčního diagramu představuje alternativní průběh, kdy jsou body 2.3 a 2.4 počítány se zvětšeným poměrným přetvořením. Jak bylo uvedeno na začátku kapitoly, s ohledem na výpočtové předpoklady jsem raději uvažoval zvětšené charakteristiky betonu jen

u bodů 0, 1.3 a 1.4, použití u bodů 2.3 a 2.4 je totiž diskutabilní, proto jej zde uvádím pouze pro představu.

V interakčním diagramu je rovněž nutné znázornit minimální výstřednost tlakové normálové síly (šedé polopřímky). Uvažuje se:

$$e_0 = \max \left\{ \begin{array}{l} h/30 \\ 20 \text{ mm} \end{array} \right\}$$

## 4 ZÁVĚR

V bakalářské práci jsem se zabýval zesilováním železobetonového sloupu ocelovou bandáží. V první části byly popsány některé návrhové přístupy, zejména ze zahraničí. Z nich byl vybrán nejvhodnější přístup, který byl v následující části práce popsán.

Při popisování zvoleného návrhového přístupu jsem narazil na dva problémy, jejichž řešení žádná literatura nenabízí. Nejprve se objevila otázka týkající se průběhu křivky definující závislost napětí a poměrného přetvoření sevřeného betonu (pracovní diagram). Bylo navrženo přibližné, zjednodušující řešení, které by ale mělo být pro běžný návrh a posudek zesíleného sloupu dostačující.

Druhá otázka se týkala přechodu z jednoosého do „trojosého“ stavu napjatosti. K jejímu zodpovězení jsem použil program ATENA 3D, v němž bylo simulováno sevření betonového sloupu v různých stavech napětí a deformace. Pomocí matematické simulace byl problém vyřešen, ve skutečnosti by ale bylo třeba provést zatěžovací zkoušky.

Dále byl v práci popsán způsob určení poměrného přetvoření průřezu sloupu ve chvíli zesilování a výpočet jednotlivých bodů interakčního diagramu zesíleného sloupu. V obou případech jsem sestavil algoritmus v programu MS Excel.

V poslední části (viz příloha) byl teoretický postup výpočtu aplikován na sloup v monolitické železobetonové rámové konstrukci, sloup byl zadán vedoucím práce.

Bakalářská práce představila komplexní postup posouzení zesíleného sloupu za použití ocelové bandáže. Hodně pozornosti bylo věnováno zejména sevření betonu, které způsobilo zvětšení jeho deformačních charakteristik. To se projevilo přímo vyšší pevností samotného betonu a také nepřímo, díky zvětšeným poměrným přetvořením bylo možné více využít podélné úhelníky. Na závěr je třeba říci, že se jedná o teoretický model a proto si téma zaslouhuje další zkoumání.

## SEZNAM ZDROJŮ

- [1] VANĚK, T. *Rekonstrukce staveb*. 2. vydání. Praha: SNTL, 1989.
- [2] WITZANY, J., WASSERBAUER, R., ČEJKA, T., ZIGLER, R. *Poruchy, degradace a rekonstrukce*. Praha: ČVUT, 2010. ISBN 978-80-01-04488-9.
- [3] CALDERÓN, P. A., ADAM, J. M., IVORRA, S., PALLARÉS, F. J., GIMÉNEZ, E. Design strength of axially loaded RC columns strengthened by steel caging. *Materials and design* [online]. Elsevier. 2009, 30, 4069-4080. ISSN 0261-3069. [vid. 12 February 2014]. Dostupné z doi: 10.1016/j.matdes.2009.05.014
- [4] MONTUORI, R., PILUSO, V., RIZZANO G. Ultimate resistance of reinforced concrete columns strengthened with angles and battens: Theoretical model and experimental validation. In: *13th World Conference on Earthquake Engineering, August 1-6, 2004, Vancouver, B. C., Canada* [online]. Vancouver, 2004. [vid. 20 September 2019]. Dostupné z: [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13\\_986.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_986.pdf)
- [5] MONTUORI, R., PILUSO, V. Reinforced concrete columns strengthened with angles and battens subjected to eccentric load. *Engineering Structures* [online]. Elsevier. 2009, 31, 539-550. ISSN 0141-0296. [vid. 28 January 2014]. Dostupné z doi: 10.1016/j.engstruct.2008.10.005
- [6] MANDER, J. B., PRIESTLEY M. J. N., PARK, R. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*. 1988, 114.8, 1804-1826.
- [7] GIMÉNEZ, E., ADAM, J. M., IVORRA, S., MORAGUES, J. J., CALDERÓN, P. A. Full-scale testing of axially loaded RC columns strengthened by steel angles and strips. *Advances in Structural Engineering*. 2009, 12.2, 169-181.
- [8] GIMÉNEZ, E., ADAM, J. M., IVORRA, S., CALDERÓN, P. A. Influence of strips configuration on the behaviour of axially loaded RC columns strengthened by steel angles and strips. *Materials and design* [online]. Elsevier. 2009, 30, 4103-4111. ISSN 0261-3069. [vid. 12 February 2014]. Dostupné z doi: 10.1016/j.matdes.2009.05.010
- [9] NAVRÁTIL, J. *Předpjaté betonové konstrukce*. Brno: CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-561-7.
- [10] ČSN EN 1992-1-1: *Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. ICS 91.010.030. ČNI, 2005.
- [11] PROCHÁZKA, J., ŠMEJKAL, J., VÍTEK, J. L., VAŠKOVÁ, J. *Navrhování betonových konstrukcí. Příručka k ČSN EN 1992-1-1 a ČSN EN 1992-1-2*. Praha: ČKAIT, 2010. ISBN 978-80-87438-03-9.
- [12] ČSN EN 1998-3: *Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení – Část 3: Hodnocení a zesilování pozemních konstrukcí*. ICS 91.120.25. ČNI, 2007.

- [13] ŠTĚPÁNEK, P., JANÍK, T. Srovnání metod pro zesilování zděných a betonových pilířů. *Sanace betonových konstrukcí*. 2000, 4, 3-6. ISSN 1211-3786.
- [14] ČERVENKA, V., ČERVENKA, J. *User's Manual for ATENA 3D*. Prague: CERVENKA CONSULTING, 2011.
- [15] ČERVENKA, J., PROCHÁZKOVÁ, Z. *Tutorial for ATENA 3D*. Prague: CERVENKA CONSULTING, 2010.
- [16] *BL01: Prvky betonových konstrukcí* [online]. VUT v Brně, Fakulta stavební. [vid. 26. 3. 2014]. Dostupné z: [http://www.fce.vutbr.cz/BZK/studenti/BL01/BL01\\_skripta.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/BZK/studenti/BL01/BL01_skripta.pdf)
- [17] CAMPIONE, G. *Simplified Analytical Model for R.C. Columns Externally Strengthened with Steel Cages*. *Journal of Civil Engineering*. 2013, 2.4, 212-218.

## SEZNAM SYMBOLŮ

$A_a$	plocha průřezu úhelníku;
$A_b$	plocha průřezu příčného pásku;
$A_c$	průřezová plocha betonu;
$A_s$	průřezová plocha betonářské výztuže;
$b$	šířka průřezu;
$E$	Youngův modul pružnosti;
$f_c$	pevnost betonu v tlaku;
$f_{ck}$	charakteristická pevnost betonu v tlaku;
$f_{cd}$	návrhová pevnost betonu v tlaku;
$f_{cc}$	pevnost sevřeného betonu v tlaku;
$f_{ck,c}$	charakteristická pevnost sevřeného betonu v tlaku;
$f_{cd,c}$	návrhová pevnost sevřeného betonu v tlaku;
$f_{yd}$	pevnost na mezi kluzu výztuže;
$F_c$	síla v betonu;
$F_{si}$	síla ve výztuži;
$h$	výška průřezu;
$M$	ohybový moment;
$N$	normálová síla;
$s$	osová vzdálenost pásků po výšce sloupu;
$w_i$	světlá vzdálenost mezi přírubami podélných úhelníků;
$z$	rameno vnitřních sil;
$\alpha$	součinitel teplotní roztažnosti těles (v kapitole 2.5), nebo součinitel efektivnosti (ostatní kapitoly);
$\gamma_c$	dílčí součinitel betonu;

$\Delta T$	rozdíl teplot;
$\varepsilon$	poměrné přetvoření;
$\varepsilon_{c2}$	poměrné přetvoření betonu právě při dosažení pevnosti v tlaku;
$\varepsilon_{cu2}$	mezní poměrné přetvoření betonu;
$\varepsilon_{c2,c}$	poměrné přetvoření sevřeného betonu právě při dosažení pevnosti v tlaku;
$\varepsilon_{cu2}$	mezní poměrné přetvoření sevřeného betonu;
$\rho_{sx}$	stupeň vyztužení ocelovou bandáží ve směru osy x;
$\rho_{sy}$	stupeň vyztužení ocelovou bandáží ve směru osy y;
$\sigma_c$	napětí betonu;
$\sigma_l$	příčné (boční) napětí.

# SEZNAM PŘÍLOH

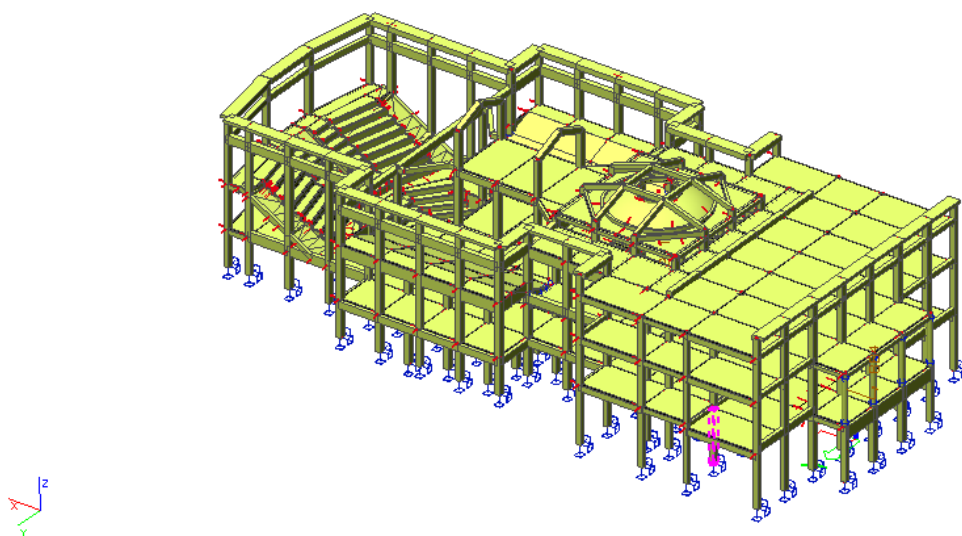
- P1 Použité podklady
- P2 Statický výpočet
- P3 Klíč kombinací
- P4 Výkresová dokumentace

Přílohy v elektronické podobě:

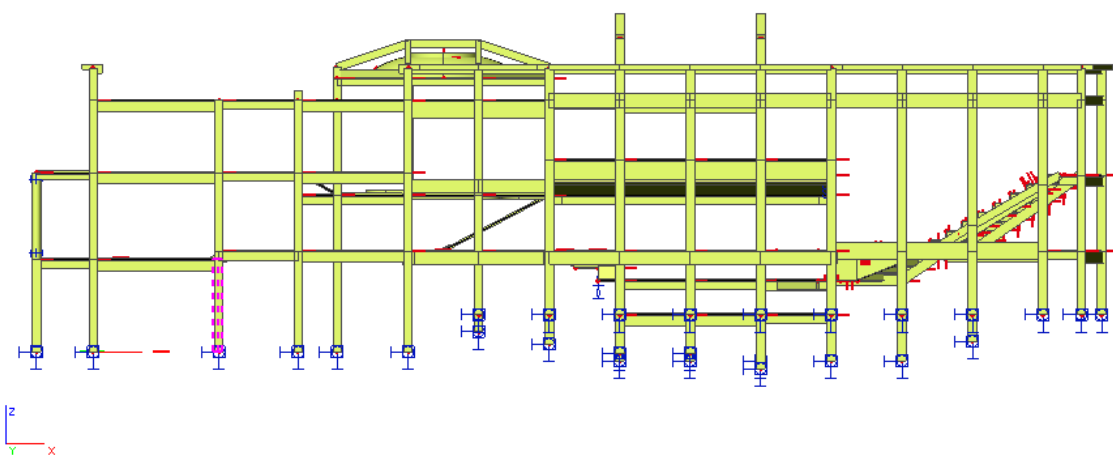
- ZESILOVANI\_HY.xlsx
- ZESILOVANI\_HZ.xlsx
- ZESILOVANI\_PY.xlsx
- ZESILOVANI\_PZ.xlsx

# P1 POUŽITÉ PODKLADY

Jako praktická aplikace v textové části práce popsaného návrhového přístupu bylo zadáno navržení a posouzení ocelové bandáže konkrétního železobetonového sloupu v budově Lékařské fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, jejíž budova byla postavena v 50. letech minulého století. Jedná se o monolitický železobetonový prostorový skelet.

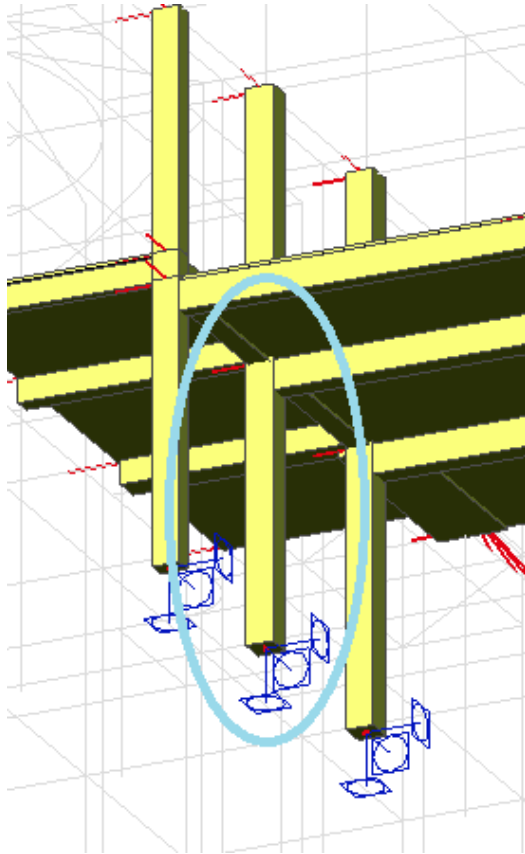


P1: Obr. 1: Axonometrický pohled

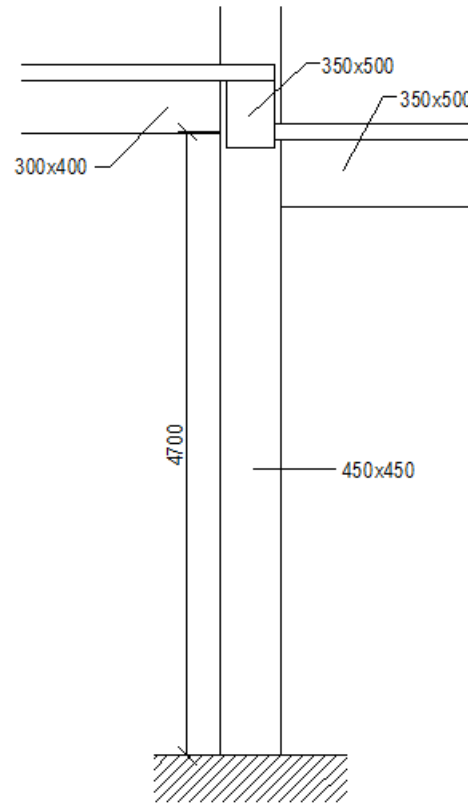


P1: Obr. 2: Boční pohled

Zadaný sloup se nachází v 1. podzemním podlaží, kde je vetknut do základové konstrukce, v oblasti hlavy sloupu se ve styčniku střetávají čtyři příčle v různých výškových úrovních (viz obr. 3 a obr. 4). Sloup délky 4700 mm má kritickou délku ve směru x:  $L_{cr,x} = 5375 \text{ mm}$  a ve směru y:  $L_{cr,y} = 5213 \text{ mm}$  (viz souřadný systém v obr. 1).



P1: Obr. 3: Zadaný sloup



P1: Obr. 4: Schéma sloupu a příčlí

Součástí zadání jsou i kombinace zatížení a vnitřní síly vznikající v hlavě a v patě sloupu:

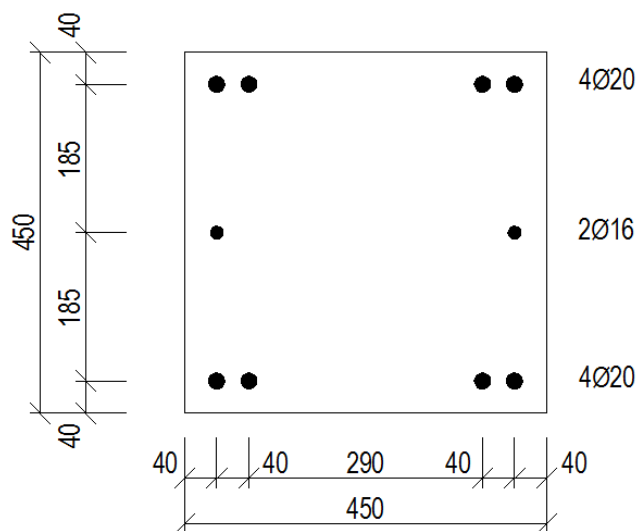
Stávající stav						
Kombinace zatížení	Hlava			Pata		
	N [kN]	$M_y$ [kNm]	$M_z$ [kNm]	N [kN]	$M_y$ [kNm]	$M_z$ [kNm]
CO1/26	-1199,92	45,86	-2,71	-1231,43	-23,75	1,52
CO1/18	-683,07	25,95	-1,83	-706,41	-13,52	1,02
CO1/58	-1123,85	42,4	-9,11	-1155,36	-21,98	4,88
CO1/59	-757,9	35,3	4,85	-781,24	-18,35	-2,48
CO1/19	-801,09	20,75	-1,9	-824,43	-10,66	1,06
CO1/5	-1080,61	56,94	-2,29	-1112,12	-29,59	1,28
CO1/38	-1049,9	44,23	1,02	-1081,42	-22,96	-0,48
CO1/39	-831,83	33,41	-5,25	-855,17	-17,29	2,85

Stav ve chvíli zesilování						
Kombinace zatížení	Hlava			Pata		
	N [kN]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]	N [kN]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]
CO4	-850,12	18,55	-2,10	-881,63	-9,61	0,84

Navrhovaný stav						
Kombinace zatížení	Hlava			Pata		
	N [kN]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]	N [kN]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]
CO3/1181	-1200,04	37,77	-2,05	-1231,55	-19,43	0,8
CO3/1172	-683,15	19,96	-1,34	-706,49	-10,31	0,49
CO3/1213	-1123,96	34,31	-8,44	-1155,47	-17,66	4,16
CO3/1214	-757,98	29,3	5,34	-781,32	-15,15	-3,02
CO3/1176	-801,17	14,76	-1,41	-824,51	-7,46	0,53
CO3/1161	-1080,73	48,85	-1,63	-1112,24	-25,26	0,56
CO3/1343	-810,92	29,15	2,15	-834,26	-15,03	-1,38
CO3/1432	-1071,02	34,4	-5,23	-1102,53	-17,69	2,49

Pozn.: Klíč kombinací v samostatné příloze.

Dále jsou zadány materiálové a geometrické charakteristiky průřezu. Konstrukce sestává z betonu třídy C3/3,5 a hladké betonářské výztuže 10 370 s pevností na mezi kluzu  $f_{yd} = 180 \text{ MPa}$ .



P1: Obr. 5: Průřez sloupu

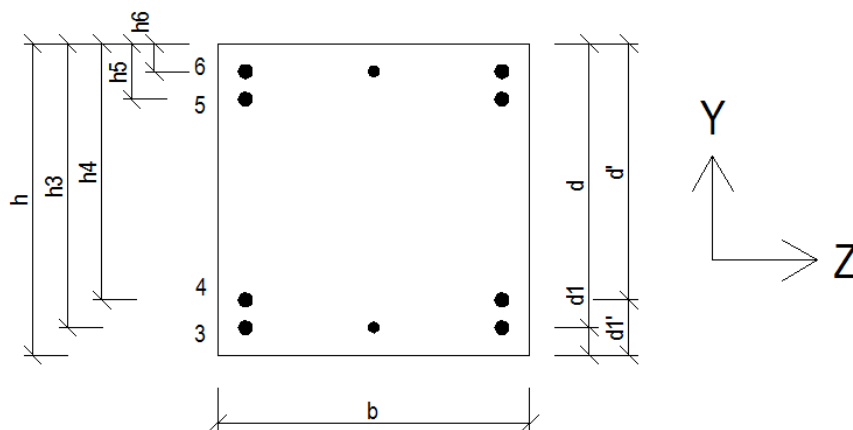
## P2 STATICKÝ VÝPOČET

### P2.1 Posouzení stávajícího sloupu ve směru „y“

Pozn.: >Ve směru „y“< je myšleno jako v rovině, v níž působí ohybový moment  $M_y$ .

Beton				Betonářská výztuž			
třída:	C3/3,5	$\lambda=$	0,8	typ:	10 370	$\sigma_{sc}=$	180,0 E+06 Pa
fck=	3,0 E+06 Pa	$\eta=$	1,0	fyk=	207,0 E+06 Pa	$\epsilon_{yd}=$	0,0009
fcd=	2,0 E+06 Pa	$\epsilon_{c2}=$	0,0020	fyd=	180,0 E+06 Pa		
Ecm=	23,0 E+09 Pa	$\epsilon_{cu2}=$	0,0035	Es=	200,0 E+09 Pa		

Stávající průřez		Výšky sloupu	
h=	0,450 m	H=	4,700 m
b=	0,450 m	Lcr=	5,375 m



Výšky průřezu		Ramena vnitř. sil		Plochy výztuží		Vzdálenost výztuže			
h3=	0,410 m	zs3=	0,185 m	As3=	8,29 E-04 m <sup>2</sup>	d1=	0,040 m	d=	0,410 m
h4=	0,370 m	zs4=	0,145 m	As4=	6,28 E-04 m <sup>2</sup>	d'1=	0,080 m	d'=	0,370 m
h5=	0,080 m	zs5=	0,145 m	As5=	6,28 E-04 m <sup>2</sup>	d2=	0,040 m	d=	0,410 m
h6=	0,040 m	zs6=	0,185 m	As6=	8,29 E-04 m <sup>2</sup>	d'2=	0,080 m	d'=	0,370 m

Sestavení interakčního diagramu:

<b>Bod 0</b>							
Vrtsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
3	8,29 E-04	0,410	0,185	-0,0020	-180,0 E+06	-149,2 E+03	-27,6 E+03
4	6,28 E-04	0,370	0,145	-0,0020	-180,0 E+06	-113,0 E+03	-16,4 E+03
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	-0,0020	-180,0 E+06	-113,0 E+03	16,4 E+03
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	-0,0020	-180,0 E+06	-149,2 E+03	27,6 E+03
Beton	$b$ [m]	$x$ [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	-	20,25 E-02	0,000	-2,0 E+06	-4,050 E+05	0,0 E+00
<b><math>N_{rd,0} =</math></b>		-929,520 E+03 N					
<b><math>M_{rd,0} =</math></b>		0,0 E+00 Nm					

<b>Bod 1.3</b>							
Vrtsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
3	8,29 E-04	0,410	0,185	<b>0,0000</b>	000,0 E+00	000,0 E+00	0,0 E+00
4	6,28 E-04	0,370	0,145	-0,0003	-68,3 E+06	-42,9 E+03	-6,2 E+03
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	-0,0028	-180,0 E+06	-113,0 E+03	16,4 E+03
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	-0,0032	-180,0 E+06	-149,2 E+03	27,6 E+03
Beton	$b$ [m]	$x$ [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	<b>0,410</b>	14,76 E-02	-0,061	-2,0 E+06	-2,952 E+05	18,0 E+03
<b><math>N_{rd,1.3} =</math></b>		-600,348 E+03 N					
<b><math>M_{rd,1.3} =</math></b>		55,8 E+03 Nm					

<b>Bod 1.4</b>							
Vrtsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
3	8,29 E-04	0,410	0,185	0,0004	75,7 E+06	62,7 E+03	1,2 E+04
4	6,28 E-04	0,370	0,145	<b>0,0000</b>	000,0 E+00	000,0 E+00	0,0 E+00
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	-0,0027	-180,0 E+06	-113,0 E+03	16,4 E+03
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	-0,0031	-180,0 E+06	-149,2 E+03	27,6 E+03
Beton	$b$ [m]	$x$ [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	<b>0,370</b>	13,32 E-02	-0,077	-2,0 E+06	-2,664 E+05	20,5 E+03
<b><math>N_{rd,1.4} =</math></b>		-465,925 E+03 N					
<b><math>M_{rd,1.4} =</math></b>		76,1 E+03 Nm					

<b>Bod 2.3</b>							
Vrtsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
3	8,29 E-04	0,410	0,185	<b>0,0009</b>	180,0 E+06	149,2 E+03	2,8 E+04
4	6,28 E-04	0,370	0,145	0,0005	94,1 E+06	59,1 E+03	8,6 E+03
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	-0,0026	-180,0 E+06	-113,0 E+03	16,4 E+03
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	-0,0031	-180,0 E+06	-149,2 E+03	27,6 E+03
Beton	$b$ [m]	$x$ [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	<b>0,326</b>	11,74 E-02	-0,095	-2,0 E+06	-2,348 E+05	22,2 E+03
<b><math>N_{rd,2.3} =</math></b>		-288,734 E+03 N					
<b><math>M_{rd,2.3} =</math></b>		102,4 E+03 Nm					

<b>Bod 2.4</b>							
Vrtsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
3	8,29 E-04	0,410	0,185	0,0014	180,0 E+06	149,2 E+03	2,8 E+04
4	6,28 E-04	0,370	0,145	<b>0,0009</b>	180,0 E+06	113,0 E+03	1,6 E+04
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	-0,0025	-180,0 E+06	-113,0 E+03	16,4 E+03
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	-0,0030	-180,0 E+06	-149,2 E+03	27,6 E+03
Beton	$b$ [m]	$x$ [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	<b>0,294</b>	10,60 E-02	-0,107	-2,0 E+06	-2,119 E+05	22,7 E+03
$N_{rd,2.4} =$		-211,909 E+03 N					
$M_{rd,2.4} =$		110,7 E+03 Nm					

<b>Bod 2.5</b>							
Vrtsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
3	8,29 E-04	0,410	0,185	0,0098	180,0 E+06	149,2 E+03	2,8 E+04
4	6,28 E-04	0,370	0,145	0,0085	180,0 E+06	113,0 E+03	1,6 E+04
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	<b>-0,0009</b>	-180,0 E+06	-113,0 E+03	16,4 E+03
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	-0,0022	-180,0 E+06	-149,2 E+03	27,6 E+03
Beton	$b$ [m]	$x$ [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	<b>0,108</b>	3,88 E-02	-0,182	-2,0 E+06	-7,754 E+04	14,1 E+03
$N_{rd,2.5} =$		-77,5 E+03 N					
$M_{rd,2.5} =$		102,1 E+03 Nm					

<b>Bod 2.6</b>							
Vrtsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
3	8,29 E-04	0,410	0,185	0,0232	180,0 E+06	149,2 E+03	2,8 E+04
4	6,28 E-04	0,370	0,145	0,0206	180,0 E+06	113,0 E+03	1,6 E+04
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	0,0017	180,0 E+06	113,0 E+03	-16,4 E+03
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	<b>-0,0009</b>	-180,0 E+06	-149,2 E+03	27,6 E+03
Beton	$b$ [m]	$x$ [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	<b>0,054</b>	1,94 E-02	-0,203	-2,0 E+06	-3,877 E+04	7,9 E+03
$N_{rd,2.6} =$		187,3 E+03 N					
$M_{rd,2.6} =$		63,1 E+03 Nm					

Pozn.: Celý průřez vychází tažen, bod bude proto v ID vynechán.

<b>Bod 3</b>							
Vrtsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
3	8,29 E-04	0,410	0,185	0,0125	180,0 E+06	149,2 E+03	2,8 E+04
4	6,28 E-04	0,370	0,145	0,0109	180,0 E+06	113,0 E+03	1,6 E+04
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	-0,0004	-77,0 E+06	-48,3 E+03	7,0 E+03
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	-0,0019	-180,0 E+06	-149,2 E+03	27,6 E+03
Beton	$b$ [m]	$x$ [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	<b>0,090</b>	3,24 E-02	-0,189	-2,0 E+06	-6,471 E+04	12,2 E+03
$N_{rd,3} =$		34,9 E-09 N					
$M_{rd,3} =$		90,8 E+03 Nm					

= 0

Bod 4							
Vrstsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
3	8,29 E-04	0,410	0,185	> 0,0009	180,0 E+06	149,2 E+03	27,6 E+03
4	6,28 E-04	0,370	0,145	> 0,0009	180,0 E+06	113,0 E+03	16,4 E+03
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	0,0000	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	0,0000	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
Beton	b [m]	x [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	-	00,00 E+00	0,000	000,0 E+00	0,000 E+00	0,0 E+00
$N_{rd,4} =$		262,3 E+03 N					
$M_{rd,4} =$		44,0 E+03 Nm					

Bod 5							
Vrstsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
3	8,29 E-04	0,410	0,185	> 0,0009	180,0 E+06	149,2 E+03	27,6 E+03
4	6,28 E-04	0,370	0,145	> 0,0009	180,0 E+06	113,0 E+03	16,4 E+03
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	> 0,0009	180,0 E+06	113,0 E+03	-16,4 E+03
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	> 0,0009	180,0 E+06	149,2 E+03	-27,6 E+03
Beton	b [m]	x [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	-	00,00 E+00	0,000	000,0 E+00	0,000 E+00	0,0 E+00
$N_{rd,5} =$		524,520 E+03 N					
$M_{rd,5} =$		-3,6 E-12 Nm					

### Posouzení stávajícího sloupu v hlavě:

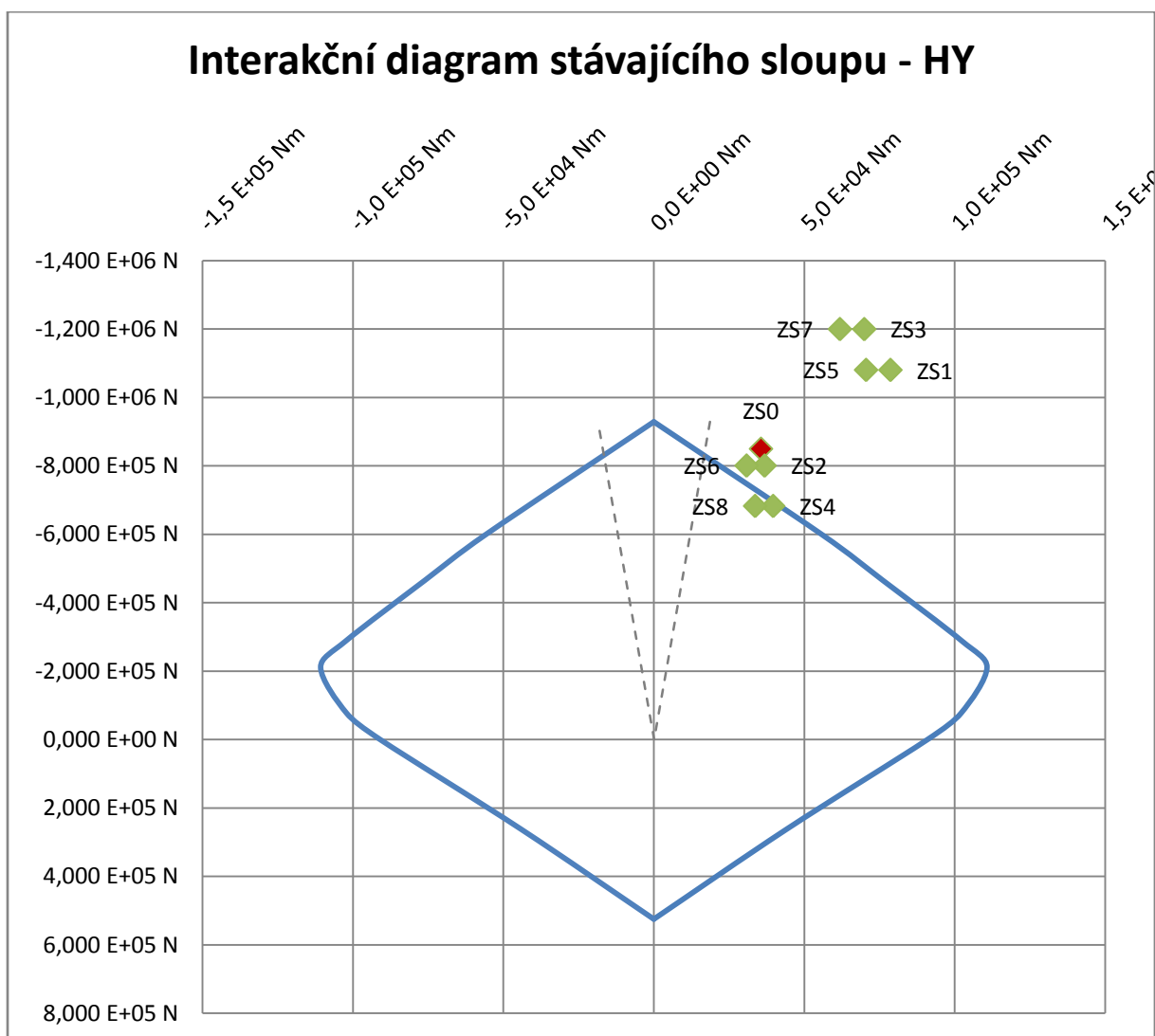
Zatěžovací stavy (s uvážením vlivu účinků 2. řádu):

Štíhlost			
$e_i =$	0,0200 m	$\omega =$	1,295
$\lambda =$	41,38		
$A =$	0,7	$B =$	1,89

Pozn.: Hodnota A určena odhadem (dovoluje norma [11]).

Stav	Zatěžovací stav	M1	M2	
Ve chvíli zesilování	ZS0	-	18,6 E+03 Nm	-9,6 E+03 Nm
Stávající	ZS1	max M	56,9 E+03 Nm	-29,6 E+03 Nm
	ZS2	min M	20,8 E+03 Nm	-10,7 E+03 Nm
	ZS3	max N	45,9 E+03 Nm	-23,8 E+03 Nm
	ZS4	min N	26,0 E+03 Nm	-13,5 E+03 Nm
Navrhovaný	ZS5	max M	48,9 E+03 Nm	-25,3 E+03 Nm
	ZS6	min M	14,8 E+03 Nm	-7,5 E+03 Nm
	ZS7	max N	37,8 E+03 Nm	-19,4 E+03 Nm
	ZS8	min N	20,0 E+03 Nm	-10,3 E+03 Nm

Zatěžovací stavy			Vliv imperfekcí					
	NEd	MEd	M0Ed	n	C	$\lambda_{lim}$	Vliv 2.řádu	MEd
ZS0	-850,120 E+03 N	18,6 E+03 Nm	35,6 E+03 Nm	1,000	2,2	58,36	-	35,6 E+03 Nm
ZS1	-1,081 E+06 N	56,9 E+03 Nm	78,6 E+03 Nm	1,000	2,2	58,36	-	78,6 E+03 Nm
ZS2	-801,090 E+03 N	20,8 E+03 Nm	36,8 E+03 Nm	1,000	2,2	58,36	-	36,8 E+03 Nm
ZS3	-1,200 E+06 N	45,9 E+03 Nm	69,9 E+03 Nm	1,000	2,2	58,36	-	69,9 E+03 Nm
ZS4	-683,070 E+03 N	26,0 E+03 Nm	39,6 E+03 Nm	1,000	2,2	58,36	-	39,6 E+03 Nm
ZS5	-1,081 E+06 N	48,9 E+03 Nm	70,5 E+03 Nm	1,000	2,2	58,36	-	70,5 E+03 Nm
ZS6	-801,170 E+03 N	14,8 E+03 Nm	30,8 E+03 Nm	1,000	2,2	58,36	-	30,8 E+03 Nm
ZS7	-1,200 E+06 N	37,8 E+03 Nm	61,8 E+03 Nm	1,000	2,2	58,36	-	61,8 E+03 Nm
ZS8	-683,150 E+03 N	20,0 E+03 Nm	33,6 E+03 Nm	1,000	2,2	58,36	-	33,6 E+03 Nm



Únosnost v hlavě sloupu ve směru „y“ nevyhovuje na kombinace normálových sil a ohybových momentů způsobených navrhovaným zatížením, dokonce ani způsobených stávajícím zatížením.

### Posouzení stávajícího sloupu v patě:

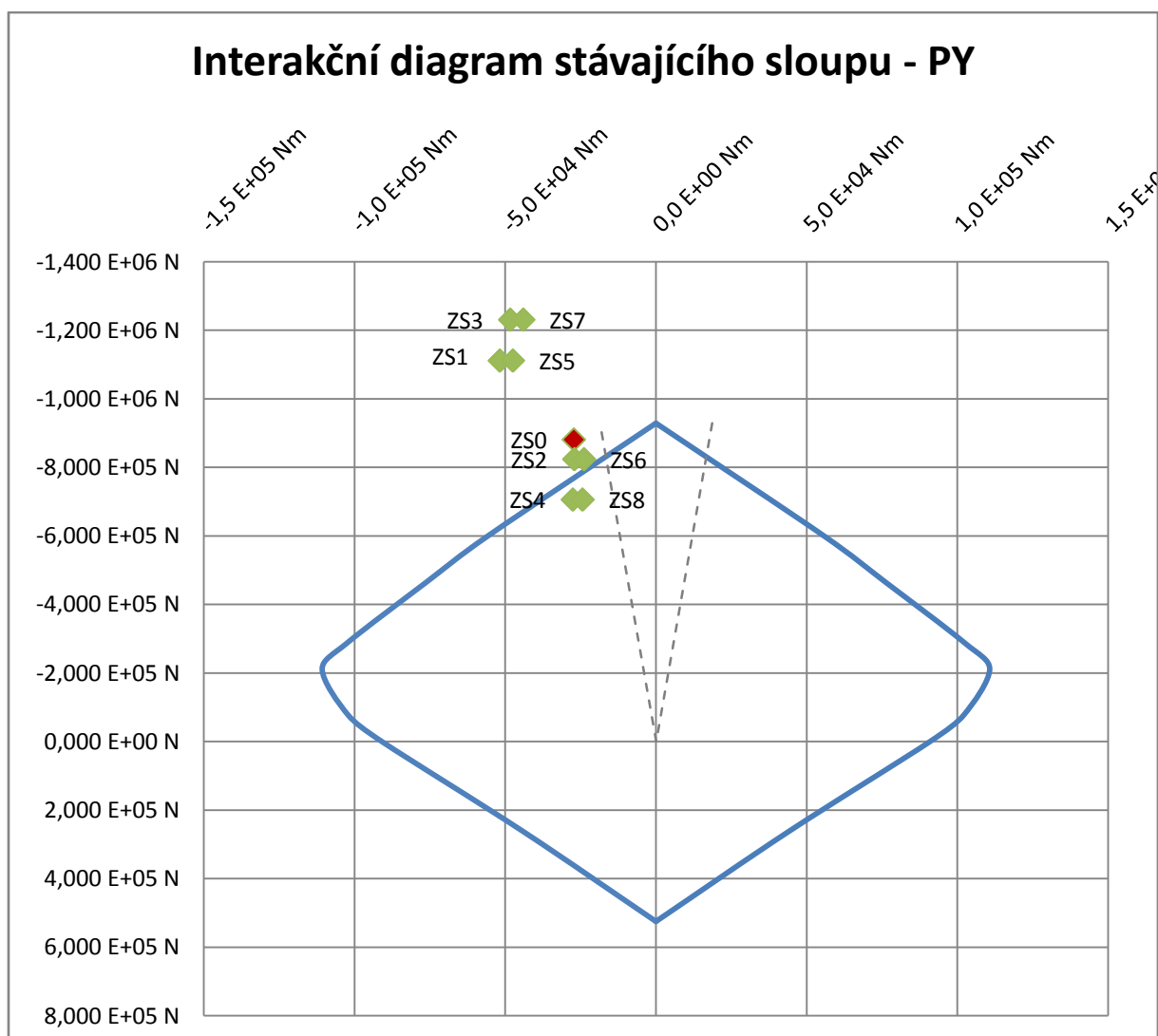
Zatěžovací stavy (s uvážením vlivu účinků 2. řádu):

Štíhlost			
ei=	0,0200 m	ω=	1,295
λ=	41,38		
A=	0,7	B=	1,89

Pozn.: Hodnota A určena odhadem (dovoluje norma [11]).

Stav	Zatěžovací stav	M1	M2	
Ve chvíli zesilování	ZS0	-	18,6 E+03 Nm	-9,6 E+03 Nm
Stávající	ZS1	max M	56,9 E+03 Nm	-29,6 E+03 Nm
	ZS2	min M	20,8 E+03 Nm	-10,7 E+03 Nm
	ZS3	max N	45,9 E+03 Nm	-23,8 E+03 Nm
	ZS4	min N	26,0 E+03 Nm	-13,5 E+03 Nm
Navrhovaný	ZS5	max M	48,9 E+03 Nm	-25,3 E+03 Nm
	ZS6	min M	14,8 E+03 Nm	-7,5 E+03 Nm
	ZS7	max N	37,8 E+03 Nm	-19,4 E+03 Nm
	ZS8	min N	20,0 E+03 Nm	-10,3 E+03 Nm

	Zatěžovací stavy		Vliv imperfekcí					
	NEd	MEd	M0Ed	n	C	λlim	Vliv 2.řádu	MEd
ZS0	-881,630 E+03 N	-9,6 E+03 Nm	-27,2 E+03 Nm	1,000	2,2	58,36	-	-27,2 E+03 Nm
ZS1	-1,112 E+06 N	-29,6 E+03 Nm	-51,8 E+03 Nm	1,000	2,2	58,36	-	-51,8 E+03 Nm
ZS2	-824,430 E+03 N	-10,7 E+03 Nm	-27,1 E+03 Nm	1,000	2,2	58,36	-	-27,1 E+03 Nm
ZS3	-1,231 E+06 N	-23,8 E+03 Nm	-48,4 E+03 Nm	1,000	2,2	58,36	-	-48,4 E+03 Nm
ZS4	-706,410 E+03 N	-13,5 E+03 Nm	-27,6 E+03 Nm	1,000	2,2	58,36	-	-27,6 E+03 Nm
ZS5	-1,112 E+06 N	-25,3 E+03 Nm	-47,5 E+03 Nm	1,000	2,2	58,36	-	-47,5 E+03 Nm
ZS6	-824,260 E+03 N	-7,5 E+03 Nm	-23,9 E+03 Nm	1,000	2,2	58,36	-	-23,9 E+03 Nm
ZS7	-1,232 E+06 N	-19,4 E+03 Nm	-44,1 E+03 Nm	1,000	2,2	58,36	-	-44,1 E+03 Nm
ZS8	-706,490 E+03 N	-10,3 E+03 Nm	-24,4 E+03 Nm	1,000	2,2	58,36	-	-24,4 E+03 Nm



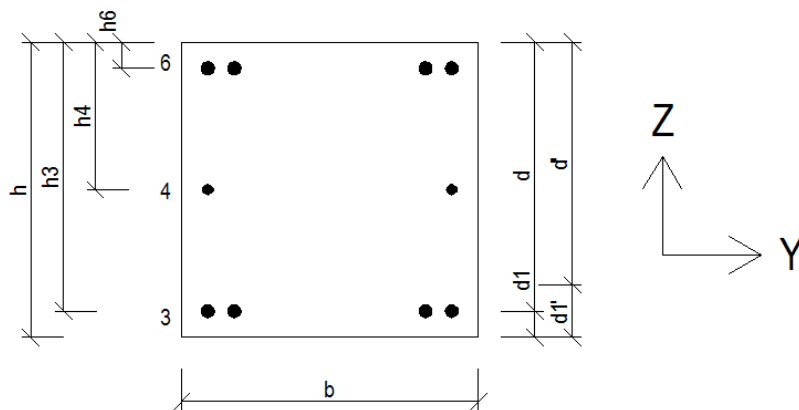
Únosnost v patě sloupu ve směru „y“ nevyhovuje na kombinace normálových sil a ohybových momentů způsobených navrhovaným zatížením, dokonce ani způsobených stávajícím zatížením.

## P2.2 Posouzení stávajícího sloupu ve směru „z“

Pozn.: >Ve směru „z“< je myšleno jako v rovině, v níž působí ohybový moment  $M_z$ .

Beton				Betonářská výztuž			
třída:	C3/3,5	$\lambda$ =	0,8	typ:	10 370	$\sigma_{sc}$ =	180,0 E+06 Pa
fck=	3,0 E+06 Pa	$\eta$ =	1,0	fyk=	207,0 E+06 Pa	$\epsilon_{yd}$ =	0,0009
fcd=	2,0 E+06 Pa	$\epsilon_{c2}$ =	0,0020	f <sub>yd</sub> =	180,0 E+06 Pa		
E <sub>cm</sub> =	23,0 E+09 Pa	$\epsilon_{cu2}$ =	0,0035	E <sub>s</sub> =	200,0 E+09 Pa		

Stávající průřez		Výšky sloupu	
h=	0,450 m	H=	4,700 m
b=	0,450 m	L <sub>cr</sub> =	5,213 m



Výšky průřezu		Ramena vnitř. sil		Plochy výztuží		Vzdálenost výztuže			
h3=	0,410 m	zs3=	0,185 m	As3=	12,57 E-04 m <sup>2</sup>	d1=	0,040 m	d=	0,410 m
h4=	0,225 m	zs4=	0,000 m	As4=	4,02 E-04 m <sup>2</sup>	d'1=	0,225 m	d'1=	0,225 m
h6=	0,040 m	zs6=	0,185 m	As6=	12,57 E-04 m <sup>2</sup>	d'2=	0,040 m	d'2=	0,410 m

Sestavení interakčního diagramu:

Bod 0							
Vrstva i	A <sub>si</sub> [m <sup>2</sup> ]	h <sub>i</sub> [m]	z <sub>si</sub> [m]	ε <sub>si</sub> [-]	σ <sub>si</sub> [Pa]	F <sub>si</sub> [N]	M <sub>si</sub> [Nm]
3	12,57 E-04	0,410	0,185	-0,0020	-180,0 E+06	-226,3 E+03	-41,9 E+03
4	4,02 E-04	0,225	0,000	-0,0020	-180,0 E+06	-72,4 E+03	000,0 E+00
6	12,57 E-04	0,040	-0,185	-0,0020	-180,0 E+06	-226,3 E+03	41,9 E+03
Beton	b [m]	x [m]	A <sub>c</sub> [m <sup>2</sup> ]	z <sub>c</sub> [m]	f <sub>cd,c</sub> [Pa]	F <sub>c</sub> [N]	M <sub>c</sub> [Nm]
	0,450	-	20,25 E-02	0,000	-2,0 E+06	-4,050 E+05	0,0 E+00
<b>N<sub>rd,0</sub>=</b>		-929,880 E+03 N					
<b>M<sub>rd,0</sub>=</b>		0,0 E+00 Nm					

Bod 1							
Vrstva i	A <sub>si</sub> [m <sup>2</sup> ]	h <sub>i</sub> [m]	z <sub>si</sub> [m]	ε <sub>si</sub> [-]	σ <sub>si</sub> [Pa]	F <sub>si</sub> [N]	M <sub>si</sub> [Nm]
3	12,57 E-04	0,410	0,185	<b>0,0000</b>	000,0 E+00	000,0 E+00	0,0 E+00
4	4,02 E-04	0,225	0,000	-0,0016	-180,0 E+06	-72,4 E+03	000,0 E+00
6	12,57 E-04	0,040	-0,185	-0,0032	-180,0 E+06	-226,3 E+03	41,9 E+03
Beton	b [m]	x [m]	A <sub>c</sub> [m <sup>2</sup> ]	z <sub>c</sub> [m]	f <sub>cd,c</sub> [Pa]	F <sub>c</sub> [N]	M <sub>c</sub> [Nm]
	0,450	<b>0,410</b>	14,76 E-02	-0,061	-2,0 E+06	-2,952 E+05	18,0 E+03
<b>N<sub>rd,1</sub>=</b>		-593,820 E+03 N					
<b>M<sub>rd,1</sub>=</b>		59,9 E+03 Nm					

<b>Bod 2</b>							
Vrstsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
3	12,57 E-04	0,410	0,185	<b>0,0009</b>	180,0 E+06	226,3 E+03	4,2 E+04
4	4,02 E-04	0,225	0,000	-0,0011	180,0 E+06	72,4 E+03	0,0 E+00
6	12,57 E-04	0,040	-0,185	-0,0031	-180,0 E+06	-226,3 E+03	41,9 E+03
Beton	b [m]	x [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	<b>0,326</b>	11,74 E-02	-0,095	-2,0 E+06	-2,348 E+05	22,2 E+03
$N_{rd,2} =$		-162,458 E+03 N					
$M_{rd,2} =$		105,9 E+03 Nm					

<b>Bod Z</b>							
Vrstsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
3	12,57 E-04	0,410	0,185	0,0232	180,0 E+06	226,3 E+03	4,2 E+04
4	4,02 E-04	0,225	0,000	0,0111	180,0 E+06	72,4 E+03	0,0 E+00
6	12,57 E-04	0,040	-0,185	<b>-0,0009</b>	-180,0 E+06	-226,3 E+03	41,9 E+03
Beton	b [m]	x [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	<b>0,054</b>	1,94 E-02	-0,203	-2,0 E+06	-3,877 E+04	7,9 E+03
$N_{rd,z} =$		33,6 E+03 N					
$M_{rd,z} =$		91,6 E+03 Nm					

Pozn.: Celý průřez vychází tažen, bod bude proto v ID vynechán.

<b>Bod 3</b>							
Vrstsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
3	12,57 E-04	0,410	0,185	0,0108	180,0 E+06	226,3 E+03	4,2 E+04
4	4,02 E-04	0,225	0,000	0,0043	180,0 E+06	72,4 E+03	0,0 E+00
6	12,57 E-04	0,040	-0,185	-0,0021	-180,0 E+06	-226,3 E+03	41,9 E+03
Beton	b [m]	x [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	<b>0,101</b>	3,62 E-02	-0,185	-2,0 E+06	-7,236 E+04	13,4 E+03
$N_{rd,3} =$		000,0 E+00 N = 0					
$M_{rd,3} =$		97,1 E+03 Nm					

<b>Bod 4</b>							
Vrstsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
3	12,57 E-04	0,410	0,185	0,0009	180,0 E+06	226,3 E+03	41,9 E+03
4	4,02 E-04	0,225	0,000	0,0005	90,0 E+06	36,2 E+03	000,0 E+00
6	12,57 E-04	0,040	-0,185	0,0000	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
Beton	b [m]	x [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	-	00,00 E+00	0,000	000,0 E+00	0,000 E+00	0,0 E+00
$N_{rd,4} =$		262,4 E+03 N					
$M_{rd,4} =$		41,9 E+03 Nm					

<b>Bod 5</b>							
Vrstsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
3	12,57 E-04	0,410	0,185	> 0,0009	180,0 E+06	226,3 E+03	41,9 E+03
4	4,02 E-04	0,225	0,000	> 0,0009	180,0 E+06	72,4 E+03	000,0 E+00
6	12,57 E-04	0,040	-0,185	> 0,0009	180,0 E+06	226,3 E+03	-41,9 E+03
Beton	b [m]	x [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	-	00,00 E+00	0,000	000,0 E+00	0,000 E+00	0,0 E+00
$N_{rd,5} =$		524,880 E+03 N					
$M_{rd,5} =$		0,0 E+00 Nm					

### Posouzení stávajícího sloupu v hlavě:

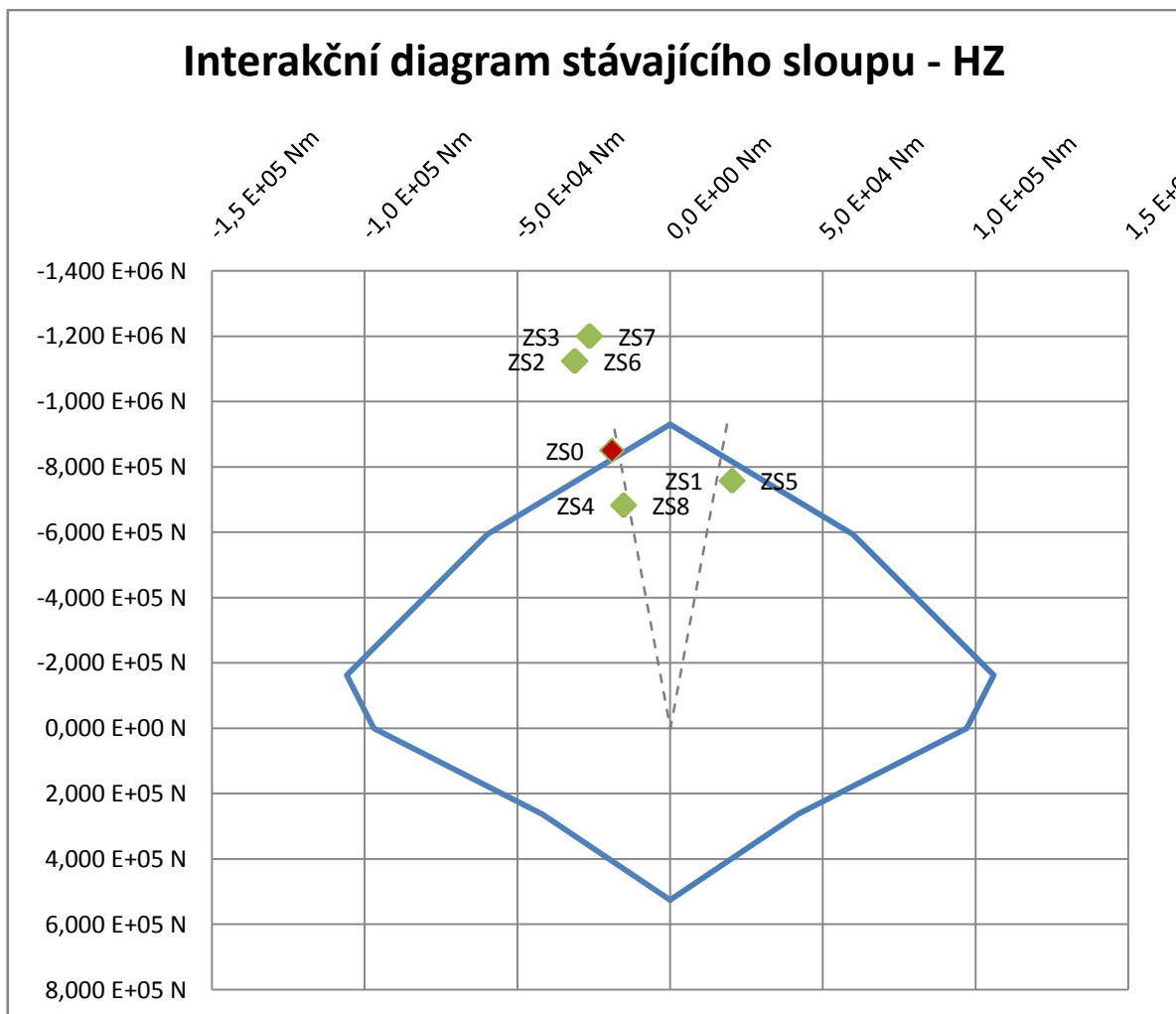
Zatěžovací stavy (s uvážením vlivu účinků 2. řádu):

<b>Štíhlost</b>			
ei=	0,0200 m	ω=	1,296
λ=	40,13		
A=	0,7	B=	1,90

Pozn.: Hodnota A určena odhadem (dovoluje norma [11]).

Stav	Zatěžovací stav	M1	M2	
Ve chvíli zesilování	ZS0	-	-2,1 E+03 Nm	0,8 E+03 Nm
Stávající	ZS1	max M	4,9 E+03 Nm	-2,5 E+03 Nm
	ZS2	min M	-9,1 E+03 Nm	4,9 E+03 Nm
	ZS3	max N	-2,7 E+03 Nm	1,5 E+03 Nm
	ZS4	min N	-1,8 E+03 Nm	1,0 E+03 Nm
Navrhovaný	ZS5	max M	5,3 E+03 Nm	-3,0 E+03 Nm
	ZS6	min M	-8,4 E+03 Nm	4,2 E+03 Nm
	ZS7	max N	-2,1 E+03 Nm	0,8 E+03 Nm
	ZS8	min N	-1,3 E+03 Nm	0,5 E+03 Nm

	Zatěžovací stavy		Vliv imperfekcí					
	NEd	MEd	MOEd	n	C	λlim	Vliv 2.řádu	MEd
ZS0	-850,120 E+03 N	-2,1 E+03 Nm	-19,1 E+03 Nm	1,00	2,1	55,72	-	-19,1 E+03 Nm
ZS1	-757,900 E+03 N	4,9 E+03 Nm	20,0 E+03 Nm	1,00	2,2	58,37	-	20,0 E+03 Nm
ZS2	-1,124 E+06 N	-9,1 E+03 Nm	-31,6 E+03 Nm	1,00	2,2	58,37	-	-31,6 E+03 Nm
ZS3	-1,200 E+06 N	-2,7 E+03 Nm	-26,7 E+03 Nm	1,00	2,3	61,03	-	-26,7 E+03 Nm
ZS4	-683,070 E+03 N	-1,8 E+03 Nm	-15,5 E+03 Nm	1,00	2,3	61,03	-	-15,5 E+03 Nm
ZS5	-757,980 E+03 N	5,3 E+03 Nm	20,5 E+03 Nm	1,00	2,3	61,03	-	20,5 E+03 Nm
ZS6	-1,124 E+06 N	-8,4 E+03 Nm	-30,9 E+03 Nm	1,00	2,2	58,37	-	-30,9 E+03 Nm
ZS7	-1,200 E+06 N	-2,1 E+03 Nm	-26,1 E+03 Nm	1,00	2,1	55,72	-	-26,1 E+03 Nm
ZS8	-683,150 E+03 N	-1,3 E+03 Nm	-15,0 E+03 Nm	1,00	2,1	55,72	-	-15,0 E+03 Nm



Únosnost v hlavě sloupu ve směru „z“ nevyhovuje na kombinace normálových sil a ohybových momentů způsobených navrhovaným zatížením, dokonce ani způsobených stávajícím zatížením.

#### Posouzení stávajícího sloupu v patě:

Zatěžovací stavy (s uvážením vlivu účinků 2. řádu):

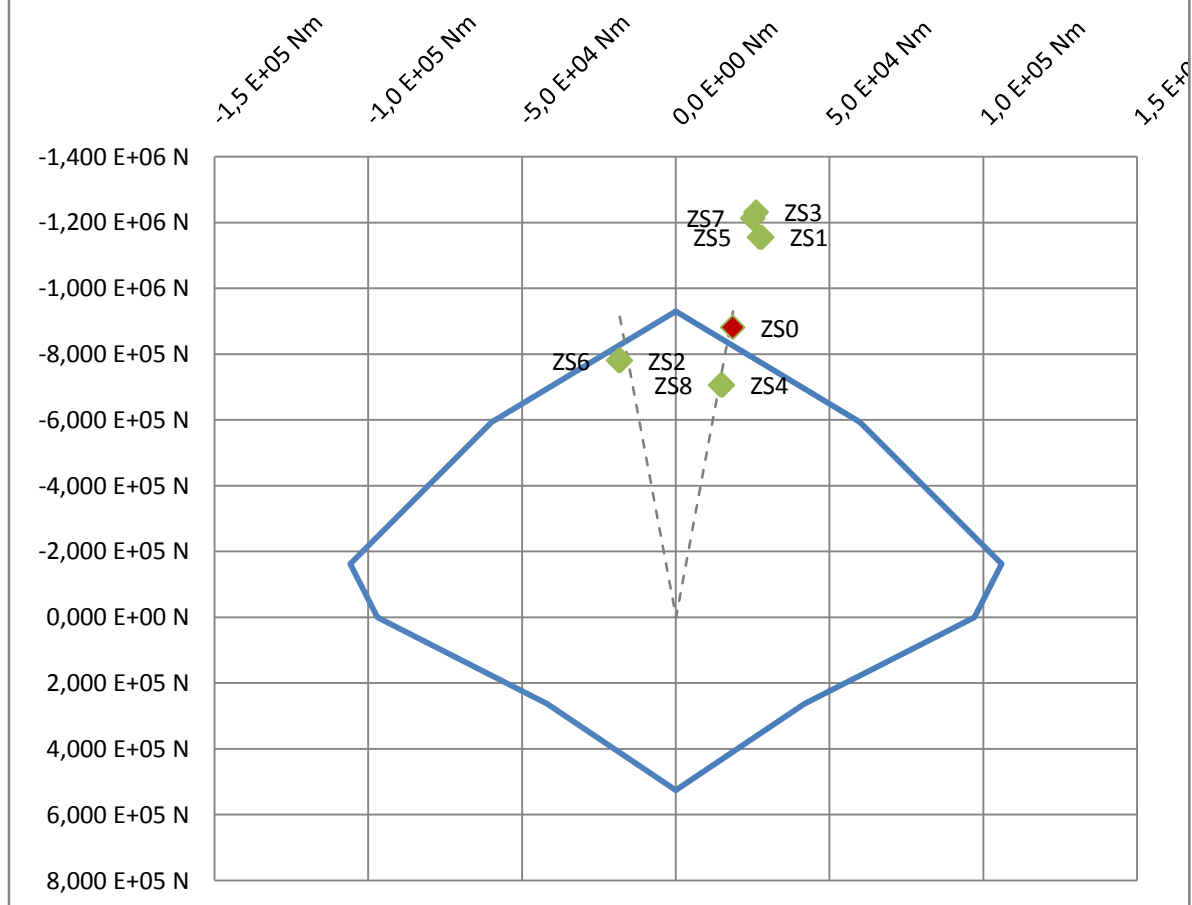
Štíhlost			
ei=	0,0200 m	ω=	1,296
λ=	40,13		
A=	0,7	B=	1,90

Pozn.: Hodnota A určena odhadem (dovoluje norma [11]).

Stav	Zatěžovací stav		M1	M2
Ve chvíli zesilování	ZS0	-	-2,1 E+03 Nm	0,8 E+03 Nm
Stávající	ZS1	max M	-9,1 E+03 Nm	4,9 E+03 Nm
	ZS2	min M	4,9 E+03 Nm	-2,5 E+03 Nm
	ZS3	max N	-2,7 E+03 Nm	1,5 E+03 Nm
	ZS4	min N	-1,8 E+03 Nm	1,0 E+03 Nm
Navrhovaný	ZS5	max M	-8,4 E+03 Nm	4,2 E+03 Nm
	ZS6	min M	5,3 E+03 Nm	-3,0 E+03 Nm
	ZS7	max N	-2,1 E+03 Nm	0,8 E+03 Nm
	ZS8	min N	-1,3 E+03 Nm	0,5 E+03 Nm

Zatěžovací stavy			Vliv imperfekcí					
	NEd	MEd	M0Ed	n	C	$\lambda_{lim}$	Vliv 2.řádu	MEd
ZS0	<b>-881,630 E+03 N</b>	0,8 E+03 Nm	18,5 E+03 Nm	1,00	2,1	55,72	-	<b>18,5 E+03 Nm</b>
ZS1	<b>-1,155 E+06 N</b>	4,9 E+03 Nm	28,0 E+03 Nm	1,00	2,2	58,37	-	<b>28,0 E+03 Nm</b>
ZS2	<b>-781,240 E+03 N</b>	-2,5 E+03 Nm	-18,1 E+03 Nm	1,00	2,2	58,37	-	<b>-18,1 E+03 Nm</b>
ZS3	<b>-1,231 E+06 N</b>	1,5 E+03 Nm	26,1 E+03 Nm	1,00	2,3	61,03	-	<b>26,1 E+03 Nm</b>
ZS4	<b>-706,410 E+03 N</b>	1,0 E+03 Nm	15,1 E+03 Nm	1,00	2,3	61,03	-	<b>15,1 E+03 Nm</b>
ZS5	<b>-1,155 E+06 N</b>	4,2 E+03 Nm	27,3 E+03 Nm	1,00	2,2	58,37	-	<b>27,3 E+03 Nm</b>
ZS6	<b>-781,320 E+03 N</b>	-3,0 E+03 Nm	-18,6 E+03 Nm	1,00	2,3	61,03	-	<b>-18,6 E+03 Nm</b>
ZS7	<b>-1,214 E+06 N</b>	0,8 E+03 Nm	25,1 E+03 Nm	1,00	2,1	55,72	-	<b>25,1 E+03 Nm</b>
ZS8	<b>-706,490 E+03 N</b>	0,5 E+03 Nm	14,6 E+03 Nm	1,00	2,1	55,72	-	<b>14,6 E+03 Nm</b>

## Interakční diagram stávajícího sloupu - PZ



Únosnost v patě sloupu ve směru „z“ nevyhovuje na kombinace normálových sil a ohybových momentů způsobených navrhovaným zatížením, dokonce ani způsobených stávajícím zatížením.

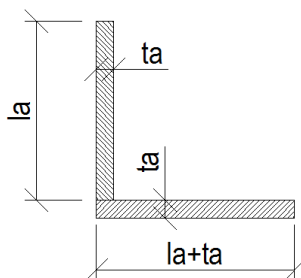
### P2.3 Návrh ocelové bandáže

Návrh:

Podélné úhelníky: L 80x80x6

Příčné pásy: 60x6  
 $s=400$  mm  
 $<s_{\max}=450$  mm

Bandáž	
Aa=	9,35 E-04 m <sup>2</sup>
ta=	0,006 m
la=	0,074 m
Ab=	3,60 E-04 m <sup>2</sup>
s=	0,400 m



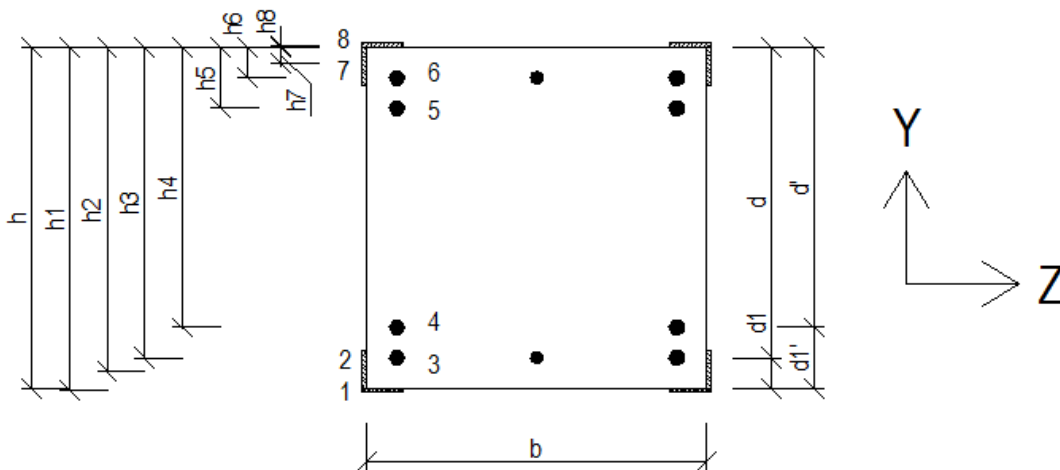
Podélné úhelníky zajišťují pouze přenos tlakových sil.

## P2.4 Posouzení zesíleného sloupu ve směru „y“

Pozn.: >Ve směru „y“< je myšleno jako v rovině, v níž působí ohybový moment  $M_y$ .

Přetvoření ve chvíli zesilování – není třeba počítat, beton dosáhl mezního poměrného přetvoření. Z tohoto důvodu budou interakční diagramy (HY, PY) symetrické.

	Přetvoření	Výška		Přetvoření	Výška
$\epsilon_c, \text{horní} =$	-0,0035	0,000 m	$\epsilon_{s8} =$	-0,0035	-0,003 m
$\epsilon_{s6} =$	-0,0035	0,040 m	$\epsilon_{s7} =$	-0,0035	0,025 m
$\epsilon_{s5} =$	-0,0035	0,080 m	$\epsilon_{s2} =$	-0,0035	0,426 m
$\epsilon_{s4} =$	-0,0035	0,370 m	$\epsilon_{s1} =$	-0,0035	0,453 m
$\epsilon_{s3} =$	-0,0035	0,410 m			
$\epsilon_c, \text{dolní} =$	-0,0035	0,450 m			



Sevření betonu:

Sevřený beton				Mezivýpočty			
třída:	C3/3,5	$\lambda =$	0,8	$w_b =$	0,302 m	$\sigma_{l,x} =$	203,0 E+03 Pa
$f_{ck,c} =$	4,1 E+06 Pa	$\eta =$	1,0	$w_h =$	0,302 m	$\sigma_{l,y} =$	203,0 E+03 Pa
$f_{cd,c} =$	2,7 E+06 Pa	$\epsilon_{c2,c} =$	0,0057	$\alpha =$	0,2160	$\sigma_l =$	203,0 E+03 Pa
		$\epsilon_{cu2,c} =$	0,0288	$\rho_{s,x} =$	0,0040		
				$\rho_{s,y} =$	0,0040		

Sestavení interakčního diagramu:

<b>Bod 0</b>							
Vrtsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
1	9,82 E-04	0,453	0,228	-0,0022	-235,0 E+06	-230,8 E+03	-52,6 E+03
2	8,88 E-04	0,413	0,188	-0,0022	-235,0 E+06	-208,7 E+03	-39,2 E+03
3	8,29 E-04	0,410	0,185	-0,0022	-180,0 E+06	-149,2 E+03	-27,6 E+03
4	6,28 E-04	0,370	0,145	-0,0022	-180,0 E+06	-113,0 E+03	-16,4 E+03
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	-0,0022	-180,0 E+06	-113,0 E+03	16,4 E+03
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	-0,0022	-180,0 E+06	-149,2 E+03	27,6 E+03
7	8,88 E-04	0,037	-0,188	-0,0022	-235,0 E+06	-208,7 E+03	39,2 E+03
8	9,82 E-04	-0,003	-0,228	-0,0022	-235,0 E+06	-230,8 E+03	52,6 E+03
Beton	$b$ [m]	$x$ [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	-	20,25 E-02	0,000	-2,7 E+06	-5,528 E+05	0,0 E+00
$N_{rd,0} =$		-1,956 E+06 N					
$M_{rd,0} =$		0,0 E+00 Nm					

<b>Bod 1.3</b>							
Vrtsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
1	9,82 E-04	0,453	0,228	0,0065	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	8,88 E-04	0,413	0,188	0,0037	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	8,29 E-04	0,410	0,185	<b>0,0000</b>	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
4	6,28 E-04	0,370	0,145	-0,0028	-180,0 E+06	-113,0 E+03	-16,4 E+03
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	-0,0232	-180,0 E+06	-113,0 E+03	16,4 E+03
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	-0,0260	-180,0 E+06	-149,2 E+03	27,6 E+03
7	8,88 E-04	0,037	-0,188	-0,0227	-235,0 E+06	-208,7 E+03	39,2 E+03
8	9,82 E-04	-0,003	-0,228	-0,0255	-235,0 E+06	-230,8 E+03	52,6 E+03
Beton	$b$ [m]	$x$ [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	<b>0,410</b>	14,76 E-02	-0,061	-2,7 E+06	-4,030 E+05	2,5 E+04
$N_{rd,1.3} =$		-1,218 E+06 N					
$M_{rd,1.3} =$		144,0 E+03 Nm					

<b>Bod 1.4</b>							
Vrtsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
1	9,82 E-04	0,453	0,228	0,0100	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	8,88 E-04	0,413	0,188	0,0068	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	8,29 E-04	0,410	0,185	0,0031	180,0 E+06	149,2 E+03	27,6 E+03
4	6,28 E-04	0,370	0,145	<b>0,0000</b>	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	-0,0226	-180,0 E+06	-113,0 E+03	16,4 E+03
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	-0,0257	-180,0 E+06	-149,2 E+03	27,6 E+03
7	8,88 E-04	0,037	-0,188	-0,0224	-235,0 E+06	-208,7 E+03	39,2 E+03
8	9,82 E-04	-0,003	-0,228	-0,0255	-235,0 E+06	-230,8 E+03	52,6 E+03
Beton	$b$ [m]	$x$ [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd,c}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	<b>0,370</b>	13,32 E-02	-0,077	-2,7 E+06	-3,636 E+05	2,8 E+04
$N_{rd,1.4} =$		-916,137 E+03 N					
$M_{rd,1.4} =$		191,5 E+03 Nm					

<b>Bod 2.3</b>							
Vrtsva i	$A_{si} [m^2]$	$h_i [m]$	$z_{si} [m]$	$\epsilon_{si} [-]$	$\sigma_{si} [Pa]$	$F_{si} [N]$	$M_{si} [Nm]$
1	9,82 E-04	0,453	0,228	0,0049	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	8,88 E-04	0,413	0,188	0,0044	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	8,29 E-04	0,410	0,185	<b>0,0009</b>	180,0 E+06	149,2 E+03	27,6 E+03
4	6,28 E-04	0,370	0,145	0,0005	94,1 E+06	59,1 E+03	8,6 E+03
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	-0,0026	-180,0 E+06	-113,0 E+03	16,4 E+03
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	-0,0031	-180,0 E+06	-149,2 E+03	27,6 E+03
7	8,88 E-04	0,037	-0,188	0,0004	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
8	9,82 E-04	-0,003	-0,228	0,0000	-6,4 E+06	-6,3 E+03	1,4 E+03
<b>Beton</b>	<b>b [m]</b>	<b>x [m]</b>	<b><math>A_c [m^2]</math></b>	<b><math>z_c [m]</math></b>	<b><math>f_{cd} [Pa]</math></b>	<b><math>F_c [N]</math></b>	<b><math>M_c [Nm]</math></b>
	0,450	<b>0,326</b>	11,74 E-02	-0,095	-2,0 E+06	-2,348 E+05	2,2 E+04
<b><math>N_{rd,2.3} =</math></b>		-295,057 E+03 N					
<b><math>M_{rd,2.3} =</math></b>		103,8 E+03 Nm					

<b>Bod 2.4</b>							
Vrtsva i	$A_{si} [m^2]$	$h_i [m]$	$z_{si} [m]$	$\epsilon_{si} [-]$	$\sigma_{si} [Pa]$	$F_{si} [N]$	$M_{si} [Nm]$
1	9,82 E-04	0,453	0,228	0,0054	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	8,88 E-04	0,413	0,188	0,0049	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	8,29 E-04	0,410	0,185	0,0014	180,0 E+06	149,2 E+03	27,6 E+03
4	6,28 E-04	0,370	0,145	<b>0,0009</b>	180,0 E+06	113,0 E+03	16,4 E+03
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	-0,0025	-180,0 E+06	-113,0 E+03	16,4 E+03
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	-0,0030	-180,0 E+06	-149,2 E+03	27,6 E+03
7	8,88 E-04	0,037	-0,188	0,0004	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
8	9,82 E-04	-0,003	-0,228	0,0000	-7,1 E+06	-7,0 E+03	1,6 E+03
<b>Beton</b>	<b>b [m]</b>	<b>x [m]</b>	<b><math>A_c [m^2]</math></b>	<b><math>z_c [m]</math></b>	<b><math>f_{cd} [Pa]</math></b>	<b><math>F_c [N]</math></b>	<b><math>M_c [Nm]</math></b>
	0,450	<b>0,294</b>	10,60 E-02	-0,107	-2,0 E+06	-2,119 E+05	2,3 E+04
<b><math>N_{rd,2.4} =</math></b>		-218,916 E+03 N					
<b><math>M_{rd,2.4} =</math></b>		112,3 E+03 Nm					

<b>Bod 2.5</b>							
Vrtsva i	$A_{si} [m^2]$	$h_i [m]$	$z_{si} [m]$	$\epsilon_{si} [-]$	$\sigma_{si} [Pa]$	$F_{si} [N]$	$M_{si} [Nm]$
1	9,82 E-04	0,453	0,228	0,0147	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	8,88 E-04	0,413	0,188	0,0134	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	8,29 E-04	0,410	0,185	0,0098	180,0 E+06	149,2 E+03	27,6 E+03
4	6,28 E-04	0,370	0,145	0,0085	180,0 E+06	113,0 E+03	16,4 E+03
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	<b>-0,0009</b>	-180,0 E+06	-113,0 E+03	16,4 E+03
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	-0,0022	-180,0 E+06	-149,2 E+03	27,6 E+03
7	8,88 E-04	0,037	-0,188	0,0012	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
8	9,82 E-04	-0,003	-0,228	-0,0001	-19,5 E+06	-19,1 E+03	4,4 E+03
<b>Beton</b>	<b>b [m]</b>	<b>x [m]</b>	<b><math>A_c [m^2]</math></b>	<b><math>z_c [m]</math></b>	<b><math>f_{cd} [Pa]</math></b>	<b><math>F_c [N]</math></b>	<b><math>M_c [Nm]</math></b>
	0,450	<b>0,108</b>	3,88 E-02	-0,182	-2,0 E+06	-7,754 E+04	1,4 E+04
<b><math>N_{rd,2.5} =</math></b>		-96,687 E+03 N					
<b><math>M_{rd,2.5} =</math></b>		106,5 E+03 Nm					

**Bod Z.6** Pozn. k bodu Z.6: Celý průřez vychází tažen, bod bude proto v ID vynechán.

Vrstsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
1	9,82 E-04	0,453	0,228	0,0294	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	8,88 E-04	0,413	0,188	0,0268	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	8,29 E-04	0,410	0,185	0,0232	180,0 E+06	149,2 E+03	27,6 E+03
4	6,28 E-04	0,370	0,145	0,0206	180,0 E+06	113,0 E+03	16,4 E+03
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	0,0017	180,0 E+06	113,0 E+03	-16,4 E+03
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	<b>-0,0009</b>	-180,0 E+06	-149,2 E+03	27,6 E+03
7	8,88 E-04	0,037	-0,188	0,0024	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
8	9,82 E-04	-0,003	-0,228	-0,0002	-39,0 E+06	-38,3 E+03	8,7 E+03
<b>Beton</b>	<b>b [m]</b>	<b>x [m]</b>	<b><math>A_c</math> [m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>z_c</math> [m]</b>	<b><math>f_{cd}</math> [Pa]</b>	<b><math>F_c</math> [N]</b>	<b><math>M_c</math> [Nm]</b>
	0,450	<b>0,054</b>	1,94 E-02	-0,203	-2,0 E+06	-3,877 E+04	7,9 E+03
<b><math>N_{rd,Z.6} =</math></b>		149,013 E+03 N					
<b><math>M_{rd,Z.6} =</math></b>		71,8 E+03 Nm					

**Bod 3**

Vrstsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
1	9,82 E-04	0,453	0,228	0,0186	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	8,88 E-04	0,413	0,188	0,0169	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	8,29 E-04	0,410	0,185	0,0133	180,0 E+06	149,2 E+03	27,6 E+03
4	6,28 E-04	0,370	0,145	0,0117	180,0 E+06	113,0 E+03	16,4 E+03
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	-0,0002	-43,7 E+06	-27,4 E+03	4,0 E+03
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	-0,0019	-180,0 E+06	-149,2 E+03	27,6 E+03
7	8,88 E-04	0,037	-0,188	0,0015	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
8	9,82 E-04	-0,003	-0,228	-0,0001	-24,6 E+06	-24,2 E+03	5,5 E+03
<b>Beton</b>	<b>b [m]</b>	<b>x [m]</b>	<b><math>A_c</math> [m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>z_c</math> [m]</b>	<b><math>f_{cd}</math> [Pa]</b>	<b><math>F_c</math> [N]</b>	<b><math>M_c</math> [Nm]</b>
	0,450	<b>0,085</b>	3,07 E-02	-0,191	-2,0 E+06	-6,143 E+04	1,2 E+04
<b><math>N_{rd,3} =</math></b>		-20,729 E-06 N					
<b><math>M_{rd,3} =</math></b>		92,8 E+03 Nm					

= 0

**Bod 4**

Vrstsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
1	9,82 E-04	0,453	0,228	> 0,0009	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	8,88 E-04	0,413	0,188	> 0,0009	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	8,29 E-04	0,410	0,185	> 0,0009	180,0 E+06	149,2 E+03	27,6 E+03
4	6,28 E-04	0,370	0,145	> 0,0009	180,0 E+06	113,0 E+03	16,4 E+03
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	0,0000	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	0,0000	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
7	8,88 E-04	0,037	-0,188	0,0000	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
8	9,82 E-04	-0,003	-0,228	0,0000	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
<b>Beton</b>	<b>b [m]</b>	<b>x [m]</b>	<b><math>A_c</math> [m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>z_c</math> [m]</b>	<b><math>f_{cd}</math> [Pa]</b>	<b><math>F_c</math> [N]</b>	<b><math>M_c</math> [Nm]</b>
	0,450	-	00,00 E+00	0,000	000,0 E+00	0,000 E+00	0,0 E+00
<b><math>N_{rd,4} =</math></b>		262,260 E+03 N					
<b><math>M_{rd,4} =</math></b>		44,0 E+03 Nm					

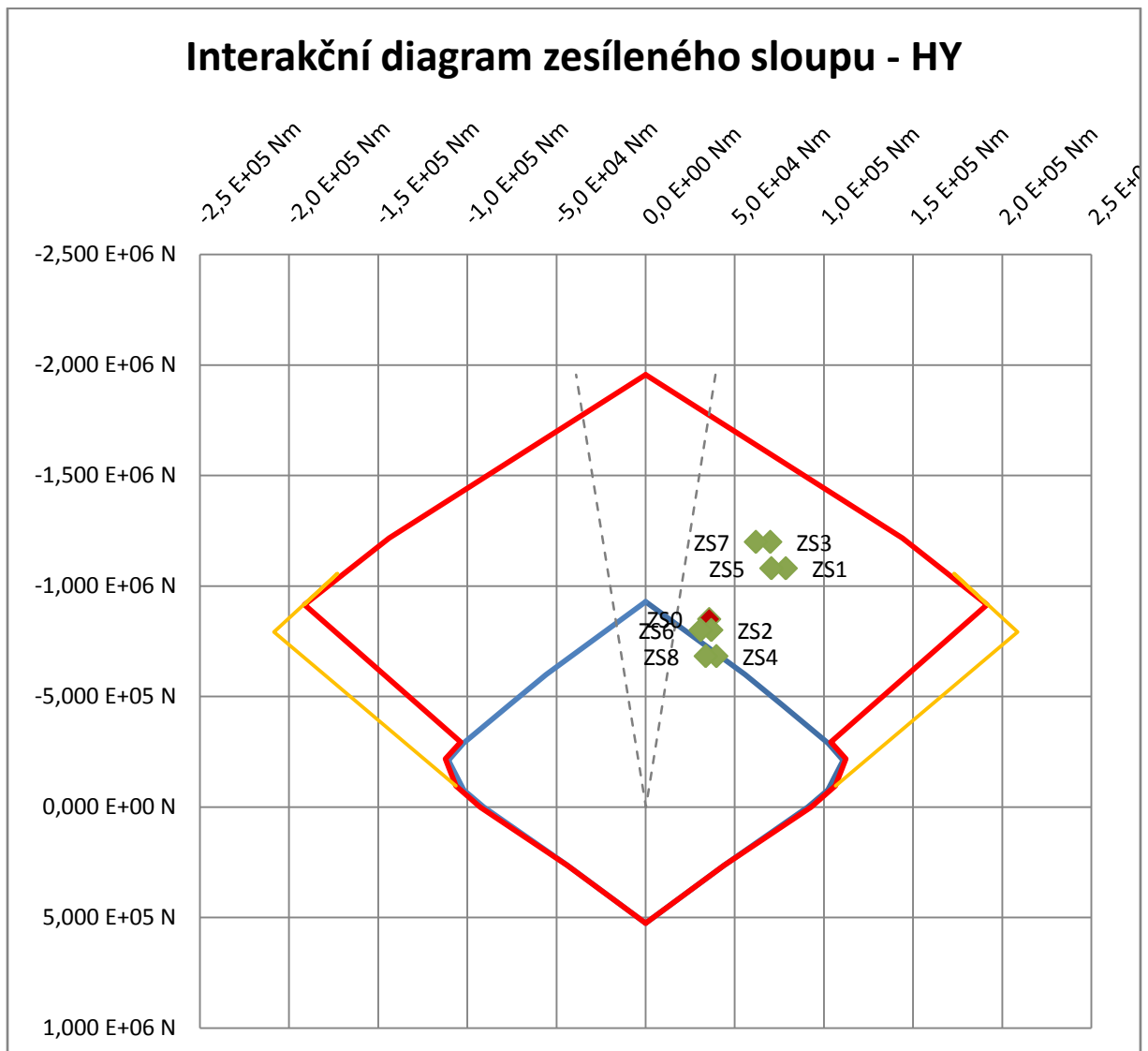
<b>Bod 5</b>							
Vrstsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
1	9,82 E-04	0,453	0,228	> 0,0009	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	8,88 E-04	0,413	0,188	> 0,0009	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	8,29 E-04	0,410	0,185	> 0,0009	180,0 E+06	149,2 E+03	27,6 E+03
4	6,28 E-04	0,370	0,145	> 0,0009	180,0 E+06	113,0 E+03	16,4 E+03
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	> 0,0009	180,0 E+06	113,0 E+03	-16,4 E+03
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	> 0,0009	180,0 E+06	149,2 E+03	-27,6 E+03
7	8,88 E-04	0,037	-0,188	> 0,0009	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
8	9,82 E-04	-0,003	-0,228	> 0,0009	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
Beton	b [m]	x [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	-	00,00 E+00	0,000	000,0 E+00	0,000 E+00	0,0 E+00
<b>N<sub>rd,5</sub>=</b>		524,520 E+03 N					
<b>M<sub>rd,5</sub>=</b>		-3,6 E-12 Nm					

Alternativní body:

<b>Bod (2.3)</b>							
Vrstsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
1	9,82 E-04	0,453	0,228	0,0075	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	8,88 E-04	0,413	0,188	0,0046	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	8,29 E-04	0,410	0,185	<b>0,0009</b>	180,0 E+06	149,2 E+03	27,6 E+03
4	6,28 E-04	0,370	0,145	-0,0020	-180,0 E+06	-113,0 E+03	-16,4 E+03
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	-0,0230	-180,0 E+06	-113,0 E+03	16,4 E+03
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	-0,0259	-180,0 E+06	-149,2 E+03	27,6 E+03
7	8,88 E-04	0,037	-0,188	-0,0226	-235,0 E+06	-208,7 E+03	39,2 E+03
8	9,82 E-04	-0,003	-0,228	-0,0255	-235,0 E+06	-230,8 E+03	52,6 E+03
Beton	b [m]	x [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	<b>0,398</b>	14,31 E-02	-0,066	-2,7 E+06	-3,907 E+05	2,6 E+04
<b>N<sub>rd,(2.3)</sub>=</b>		-1,056 E+06 N					
<b>M<sub>rd,(2.3)</sub>=</b>		172,8 E+03 Nm					

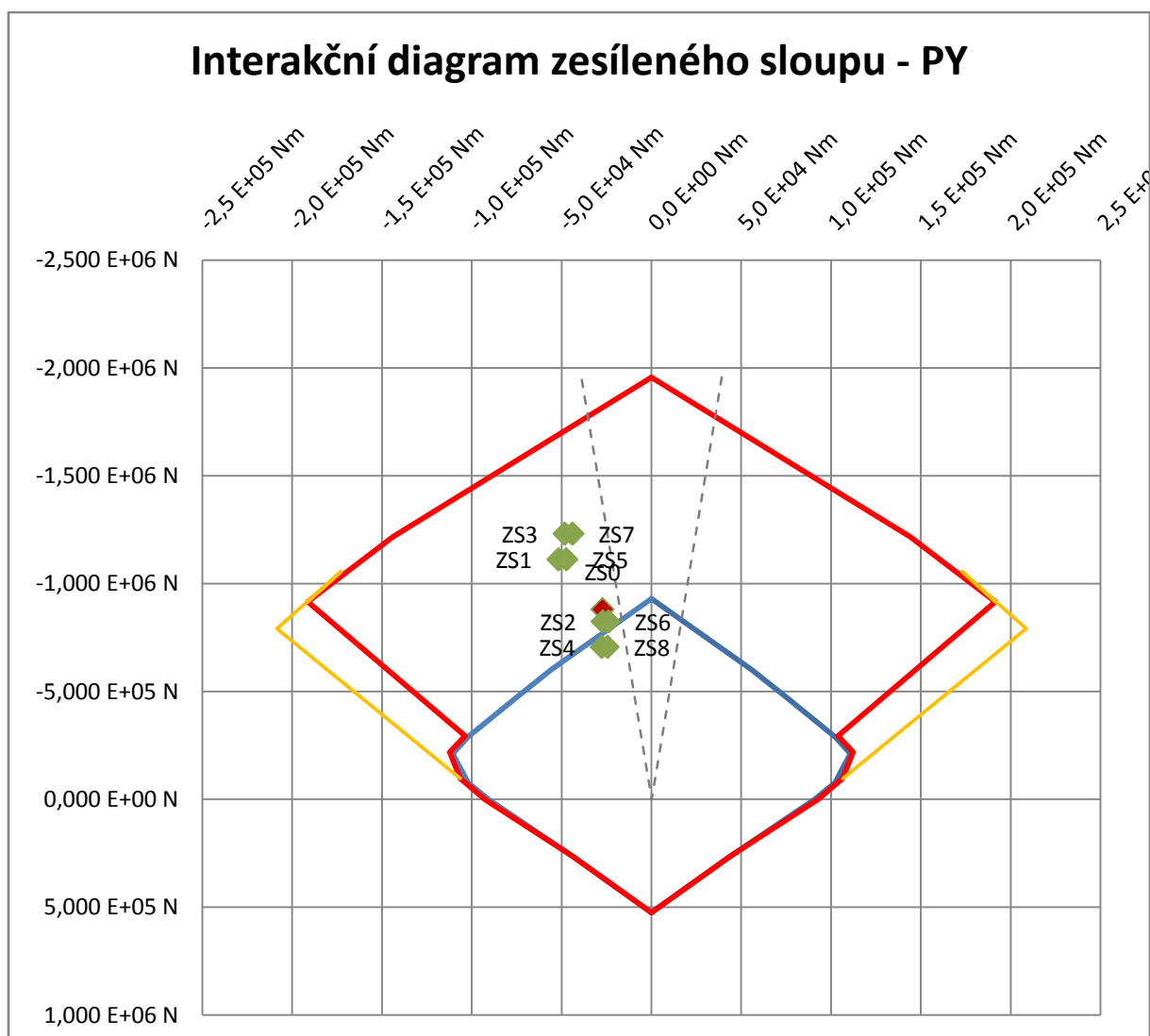
Bod (2.4)							
Vrstsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
1	9,82 E-04	0,453	0,228	0,0111	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	8,88 E-04	0,413	0,188	0,0079	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	8,29 E-04	0,410	0,185	0,0041	180,0 E+06	149,2 E+03	27,6 E+03
4	6,28 E-04	0,370	0,145	<b>0,0009</b>	180,0 E+06	113,0 E+03	16,4 E+03
5	6,28 E-04	0,080	-0,145	-0,0224	-180,0 E+06	-113,0 E+03	16,4 E+03
6	8,29 E-04	0,040	-0,185	-0,0256	-180,0 E+06	-149,2 E+03	27,6 E+03
7	8,88 E-04	0,037	-0,188	-0,0223	-235,0 E+06	-208,7 E+03	39,2 E+03
8	9,82 E-04	-0,003	-0,228	-0,0255	-235,0 E+06	-230,8 E+03	52,6 E+03
Beton	b [m]	x [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	<b>0,359</b>	12,92 E-02	-0,081	-2,7 E+06	-3,526 E+05	2,9 E+04
$N_{rd,(2.4)}=$		-792,073 E+03 N					
$M_{rd,(2.4)}=$		208,6 E+03 Nm					

Posouzení zesíleného sloupu v hlavě:



Únosnost v hlavě sloupu ve směru „y“ vyhovuje na kombinace normálových sil a ohybových momentů způsobených navrhovaným zatížením.

**Posouzení zesíleného sloupu v patě:**



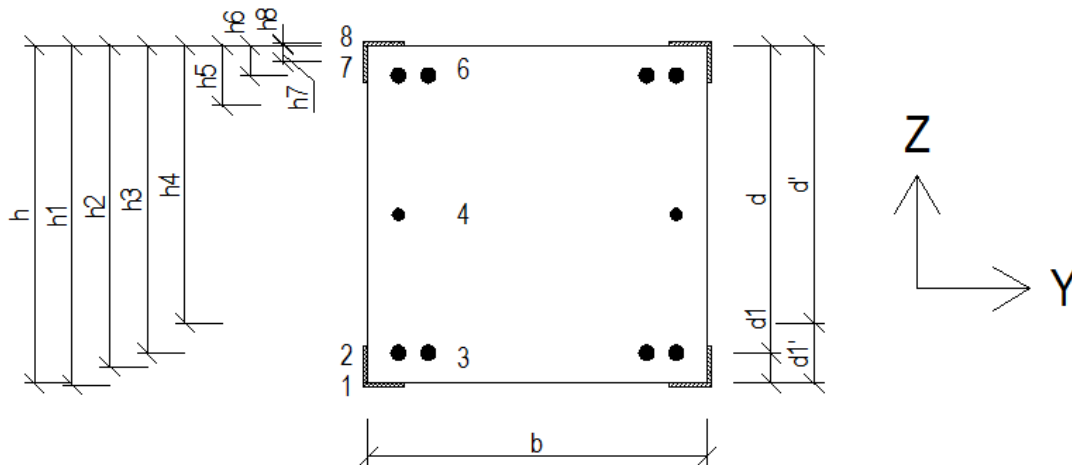
Únosnost v patě sloupu ve směru „y“ vyhovuje na kombinace normálových sil a ohybových momentů způsobených navrhovaným zatížením.

## P2.5 Posouzení zesíleného sloupu ve směru „z“

Pozn.: >Ve směru „z“< je myšleno jako v rovině, v níž působí ohybový moment  $M_z$ .

Přetvoření ve chvíli zesilování – není třeba počítat, beton dosáhl mezního poměrného přetvoření. Z tohoto důvodu budou interakční diagramy (HZ, PZ) symetrické.

	Přetvoření	Výška		Přetvoření	Výška
$\epsilon_{c,horní} =$	-0,0035	0,000 m	$\epsilon_{s8} =$	-0,0035	-0,003 m
$\epsilon_{s6} =$	-0,0035	0,040 m	$\epsilon_{s7} =$	-0,0035	0,025 m
$\epsilon_{s5} =$	-0,0035	0,080 m	$\epsilon_{s2} =$	-0,0035	0,426 m
$\epsilon_{s4} =$	-0,0035	0,370 m	$\epsilon_{s1} =$	-0,0035	0,453 m
$\epsilon_{s3} =$	-0,0035	0,410 m			
$\epsilon_{c,dolní} =$	-0,0035	0,450 m			



Sevření betonu:

Sevřený beton				Mezivýpočty			
třída:	C3/3,5	$\lambda =$	0,8	wb =	0,302 m	$\sigma_{l,x} =$	203,0 E+03 Pa
fck,c =	4,1 E+06 Pa	$\eta =$	1,0	wh =	0,302 m	$\sigma_{l,y} =$	203,0 E+03 Pa
fcd,c =	2,7 E+06 Pa	$\epsilon_{c2,c} =$	0,0057	$\alpha =$	0,2160	$\sigma_l =$	203,0 E+03 Pa
		$\epsilon_{cu2,c} =$	0,0288	$\rho_{s,x} =$	0,0040		
				$\rho_{s,y} =$	0,0040		

Sestavení interakčního diagramu:

<b>Bod 0</b>							
Vrtsva i	$A_{si} [m^2]$	$h_i [m]$	$z_{si} [m]$	$\epsilon_{si} [-]$	$\sigma_{si} [Pa]$	$F_{si} [N]$	$M_{si} [Nm]$
1	9,82 E-04	0,453	0,228	-0,0022	-235,0 E+06	-230,8 E+03	-52,6 E+03
2	8,88 E-04	0,413	0,188	-0,0022	-235,0 E+06	-208,7 E+03	-39,2 E+03
3	12,57 E-04	0,410	0,185	-0,0022	-180,0 E+06	-226,3 E+03	-41,9 E+03
4	4,02 E-04	0,225	0,000	-0,0022	-180,0 E+06	-72,4 E+03	000,0 E+00
6	12,57 E-04	0,040	-0,185	-0,0022	-180,0 E+06	-226,3 E+03	41,9 E+03
7	8,88 E-04	0,037	-0,188	-0,0022	-235,0 E+06	-208,7 E+03	39,2 E+03
8	9,82 E-04	-0,003	-0,228	-0,0022	-235,0 E+06	-230,8 E+03	52,6 E+03
<b>Beton</b>	<b>b [m]</b>	<b>x [m]</b>	<b><math>A_c [m^2]</math></b>	<b><math>z_c [m]</math></b>	<b><math>f_{cd,c} [Pa]</math></b>	<b><math>F_c [N]</math></b>	<b><math>M_c [Nm]</math></b>
	0,450	-	20,25 E-02	0,000	-2,7 E+06	-5,528 E+05	0,0 E+00
	<b><math>N_{rd,0} =</math></b>	<b>-1,957 E+06 N</b>					
	<b><math>M_{rd,0} =</math></b>	<b>0,0 E+00 Nm</b>					

<b>Bod 1</b>							
Vrtsva i	$A_{si} [m^2]$	$h_i [m]$	$z_{si} [m]$	$\epsilon_{si} [-]$	$\sigma_{si} [Pa]$	$F_{si} [N]$	$M_{si} [Nm]$
1	9,82 E-04	0,453	0,228	0,0065	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	8,88 E-04	0,413	0,188	0,0037	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	12,57 E-04	0,410	0,185	<b>0,0000</b>	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
4	4,02 E-04	0,225	0,000	-0,0130	-180,0 E+06	-72,4 E+03	000,0 E+00
6	12,57 E-04	0,040	-0,185	-0,0260	-180,0 E+06	-226,3 E+03	41,9 E+03
7	8,88 E-04	0,037	-0,188	-0,0227	-235,0 E+06	-208,7 E+03	39,2 E+03
8	9,82 E-04	-0,003	-0,228	-0,0255	-235,0 E+06	-230,8 E+03	52,6 E+03
<b>Beton</b>	<b>b [m]</b>	<b>x [m]</b>	<b><math>A_c [m^2]</math></b>	<b><math>z_c [m]</math></b>	<b><math>f_{cd,c} [Pa]</math></b>	<b><math>F_c [N]</math></b>	<b><math>M_c [Nm]</math></b>
	0,450	<b>0,410</b>	14,76 E-02	-0,061	-2,7 E+06	-4,030 E+05	2,5 E+04
	<b><math>N_{rd,1} =</math></b>	<b>-1,141 E+06 N</b>					
	<b><math>M_{rd,1} =</math></b>	<b>158,3 E+03 Nm</b>					

<b>Bod 2</b>							
Vrtsva i	$A_{si} [m^2]$	$h_i [m]$	$z_{si} [m]$	$\epsilon_{si} [-]$	$\sigma_{si} [Pa]$	$F_{si} [N]$	$M_{si} [Nm]$
1	9,82 E-04	0,453	0,228	0,0049	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	8,88 E-04	0,413	0,188	0,0044	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	12,57 E-04	0,410	0,185	<b>0,0009</b>	180,0 E+06	226,3 E+03	41,9 E+03
4	4,02 E-04	0,225	0,000	-0,0011	-180,0 E+06	-72,4 E+03	000,0 E+00
6	12,57 E-04	0,040	-0,185	-0,0031	-180,0 E+06	-226,3 E+03	41,9 E+03
7	8,88 E-04	0,037	-0,188	0,0004	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
8	9,82 E-04	-0,003	-0,228	0,0000	-6,4 E+06	-6,3 E+03	1,4 E+03
<b>Beton</b>	<b>b [m]</b>	<b>x [m]</b>	<b><math>A_c [m^2]</math></b>	<b><math>z_c [m]</math></b>	<b><math>f_{cd,c} [Pa]</math></b>	<b><math>F_c [N]</math></b>	<b><math>M_c [Nm]</math></b>
	0,450	<b>0,326</b>	11,74 E-02	-0,095	-2,0 E+06	-2,348 E+05	2,2 E+04
	<b><math>N_{rd,2} =</math></b>	<b>-313,501 E+03 N</b>					
	<b><math>M_{rd,2} =</math></b>	<b>107,4 E+03 Nm</b>					

<b>Bod Z</b>							
Vrtsva i	$A_{si} [m^2]$	$h_i [m]$	$z_{si} [m]$	$\epsilon_{si} [-]$	$\sigma_{si} [Pa]$	$F_{si} [N]$	$M_{si} [Nm]$
1	9,82 E-04	0,453	0,228	0,0294	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	8,88 E-04	0,413	0,188	0,0268	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	12,57 E-04	0,410	0,185	0,0232	180,0 E+06	226,3 E+03	41,9 E+03
4	4,02 E-04	0,225	0,000	0,0111	180,0 E+06	72,4 E+03	000,0 E+00
6	12,57 E-04	0,040	-0,185	<b>-0,0009</b>	-180,0 E+06	-226,3 E+03	41,9 E+03
7	8,88 E-04	0,037	-0,188	0,0024	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
8	9,82 E-04	-0,003	-0,228	-0,0002	-39,0 E+06	-38,3 E+03	8,7 E+03
Beton	$b [m]$	$x [m]$	$A_c [m^2]$	$z_c [m]$	$f_{cd,c} [Pa]$	$F_c [N]$	$M_c [Nm]$
	0,450	<b>0,054</b>	1,94 E-02	-0,203	-2,0 E+06	-3,877 E+04	7,9 E+03
$N_{rd,z} =$		-4,707 E+03 N					
$M_{rd,z} =$		100,3 E+03 Nm					

<b>Bod 3</b>							
Vrtsva i	$A_{si} [m^2]$	$h_i [m]$	$z_{si} [m]$	$\epsilon_{si} [-]$	$\sigma_{si} [Pa]$	$F_{si} [N]$	$M_{si} [Nm]$
1	9,82 E-04	0,453	0,228	0,0297	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	8,88 E-04	0,413	0,188	0,0270	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	12,57 E-04	0,410	0,185	0,0233	180,0 E+06	226,3 E+03	41,9 E+03
4	4,02 E-04	0,225	0,000	0,0112	180,0 E+06	72,4 E+03	000,0 E+00
6	12,57 E-04	0,040	-0,185	-0,0009	-176,3 E+06	-221,6 E+03	41,0 E+03
7	8,88 E-04	0,037	-0,188	0,0024	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
8	9,82 E-04	-0,003	-0,228	-0,0002	-39,3 E+06	-38,6 E+03	8,8 E+03
Beton	$b [m]$	$x [m]$	$A_c [m^2]$	$z_c [m]$	$f_{cd} [Pa]$	$F_c [N]$	$M_c [Nm]$
	0,450	<b>0,053</b>	1,92 E-02	-0,204	-2,0 E+06	-3,849 E+04	7,8 E+03
$N_{rd,3} =$		555,345 E-06 N = 0					
$M_{rd,3} =$		99,5 E+03 Nm					

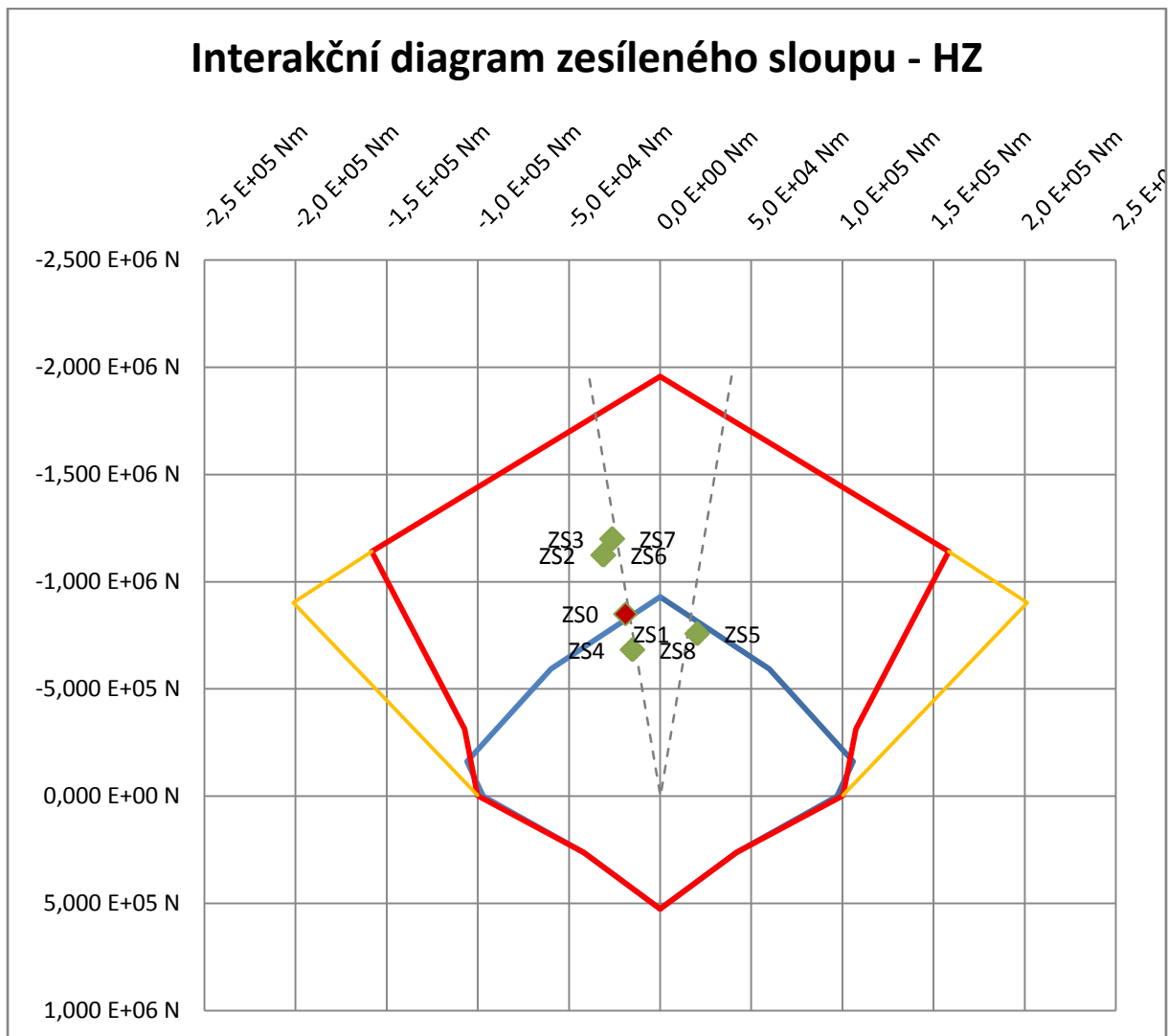
<b>Bod 4</b>							
Vrtsva i	$A_{si} [m^2]$	$h_i [m]$	$z_{si} [m]$	$\epsilon_{si} [-]$	$\sigma_{si} [Pa]$	$F_{si} [N]$	$M_{si} [Nm]$
1	9,82 E-04	0,453	0,228	> 0,0009	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	8,88 E-04	0,413	0,188	> 0,0009	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	12,57 E-04	0,410	0,185	0,0009	180,0 E+06	226,3 E+03	41,9 E+03
4	4,02 E-04	0,225	0,000	0,0005	90,0 E+06	36,2 E+03	000,0 E+00
6	12,57 E-04	0,040	-0,185	0,0000	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
7	8,88 E-04	0,037	-0,188	0,0000	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
8	9,82 E-04	-0,003	-0,228	0,0000	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
Beton	$b [m]$	$x [m]$	$A_c [m^2]$	$z_c [m]$	$f_{cd} [Pa]$	$F_c [N]$	$M_c [Nm]$
	0,450	-	00,00 E+00	0,000	000,0 E+00	0,000 E+00	0,0 E+00
$N_{rd,4} =$		262,440 E+03 N					
$M_{rd,4} =$		41,9 E+03 Nm					

<b>Bod 5</b>							
Vrstsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
1	9,82 E-04	0,453	0,228	> 0,0009	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	8,88 E-04	0,413	0,188	> 0,0009	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	12,57 E-04	0,410	0,185	> 0,0009	180,0 E+06	226,3 E+03	41,9 E+03
4	4,02 E-04	0,225	0,000	> 0,0009	180,0 E+06	72,4 E+03	000,0 E+00
6	12,57 E-04	0,040	-0,185	> 0,0009	180,0 E+06	226,3 E+03	-41,9 E+03
7	8,88 E-04	0,037	-0,188	> 0,0009	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
8	9,82 E-04	-0,003	-0,228	> 0,0009	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
Beton	b [m]	x [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	-	00,00 E+00	0,000	000,0 E+00	0,000 E+00	0,0 E+00
<b>N<sub>rd,5</sub>=</b>		524,880 E+03 N					
<b>M<sub>rd,5</sub>=</b>		000,0 E+00 Nm					

Alternativní body:

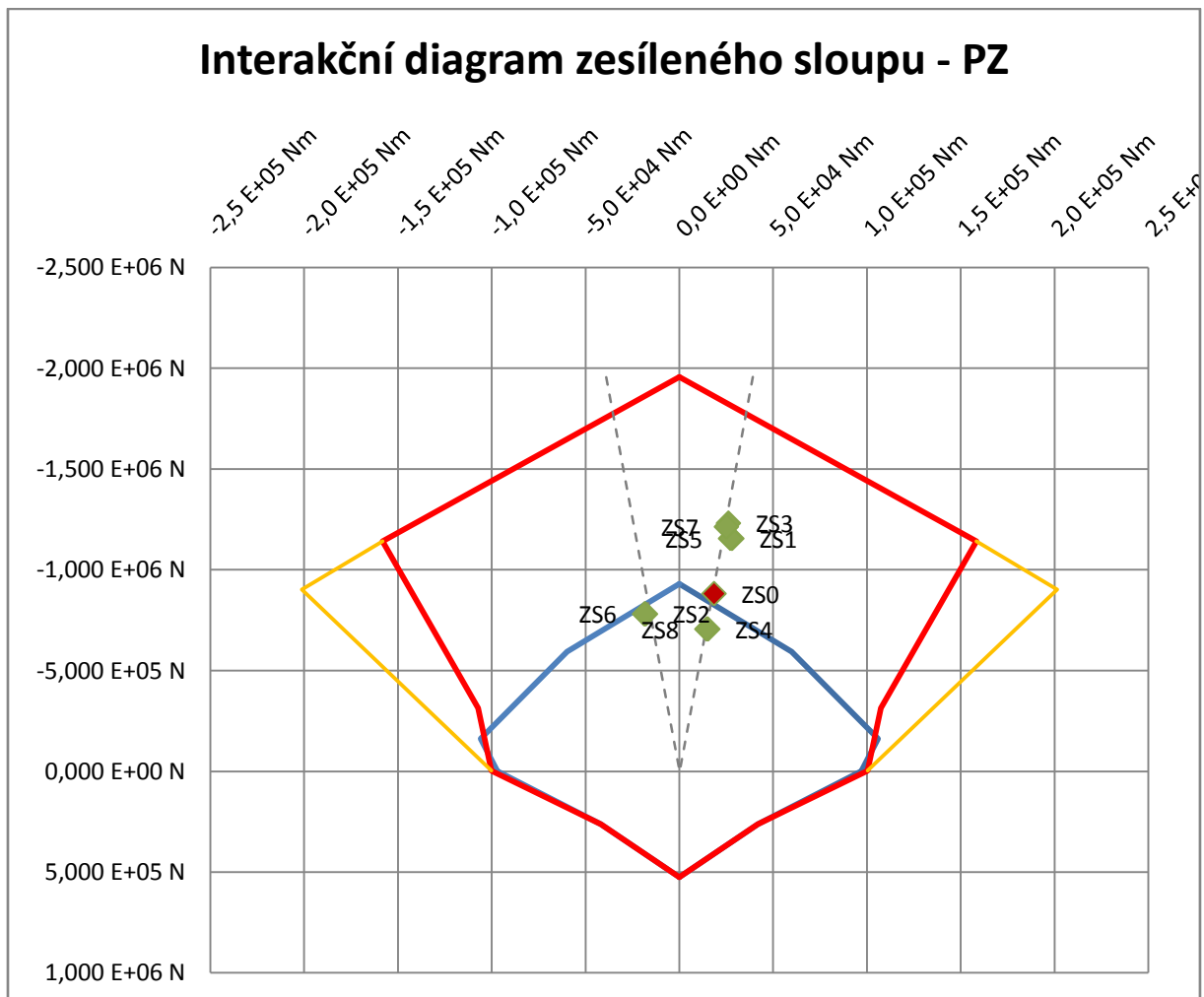
<b>Bod (2)</b>							
Vrstsva i	$A_{si}$ [m <sup>2</sup> ]	$h_i$ [m]	$z_{si}$ [m]	$\epsilon_{si}$ [-]	$\sigma_{si}$ [Pa]	$F_{si}$ [N]	$M_{si}$ [Nm]
1	9,82 E-04	0,453	0,228	0,0075	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
2	8,88 E-04	0,413	0,188	0,0046	000,0 E+00	000,0 E+00	000,0 E+00
3	12,57 E-04	0,410	0,185	<b>0,0009</b>	180,0 E+06	226,3 E+03	41,9 E+03
4	4,02 E-04	0,225	0,000	-0,0125	-180,0 E+06	-72,4 E+03	000,0 E+00
6	12,57 E-04	0,040	-0,185	-0,0259	-180,0 E+06	-226,3 E+03	41,9 E+03
7	8,88 E-04	0,037	-0,188	-0,0226	-235,0 E+06	-208,7 E+03	39,2 E+03
8	9,82 E-04	-0,003	-0,228	-0,0255	-235,0 E+06	-230,8 E+03	52,6 E+03
Beton	b [m]	x [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$z_c$ [m]	$f_{cd}$ [Pa]	$F_c$ [N]	$M_c$ [Nm]
	0,450	<b>0,398</b>	14,31 E-02	-0,066	-2,7 E+06	-3,907 E+05	2,6 E+04
<b>N<sub>rd,(2)</sub>=</b>		-902,554 E+03 N					
<b>M<sub>rd,(2)</sub>=</b>		201,3 E+03 Nm					

Posouzení zesíleného sloupu v hlavě:



Únosnost v hlavě sloupu ve směru „z“ vyhovuje na kombinace normálových sil a ohybových momentů způsobených navrhovaným zatížením.

Posouzení zesíleného sloupu v patě:



Únosnost v patě sloupu ve směru „z“ vyhovuje na kombinace normálových sil a ohybových momentů způsobených navrhovaným zatížením.

## P2.6 Posouzení zesíleného sloupu na dvouosé namáhání ohybem

Posuzovat průřez na dvouosé namáhání není třeba při splnění dvou podmínek:

$$\frac{\lambda_y}{\lambda_z} \leq 2 \left( \text{čtvercový průřez sloupu} \Rightarrow \frac{\lambda_y}{\lambda_z} = 1 \right) \dots \text{splněna}$$

$$\frac{e_y/h_{eq}}{e_z/b_{eq}} \leq 0,2 \text{ nebo } \frac{e_z/h_{eq}}{e_y/b_{eq}} \leq 0,2$$

Hlava sloupu (ZS3):  $M_{Edy} = 69,9 \text{ kNm}$ ,  $M_{Edz} = 26,7 \text{ kNm}$ ,  $N_{Ed} = 1200 \text{ kN}$ .

$$b_{eq} = i_y \sqrt{12} = \sqrt{\frac{I_y}{A}} 12 = \sqrt{\frac{1}{12} b h^3}{A} 12 = \sqrt{\frac{3,42 \cdot 10^{-3}}{0,45^2}} 12 = 0,450 \text{ m}$$

$$b_{eq} = h_{eq} = 0,450 \text{ m}$$

$$e_z = \frac{M_{Edy}}{N_{Ed}} = \frac{69,9}{1200} = 0,05825 \text{ m}$$

$$e_y = \frac{M_{Edz}}{N_{Ed}} = \frac{26,7}{1200} = 0,02225 \text{ m}$$

Podmínka:

$$\frac{e_y/h_{eq}}{e_z/b_{eq}} = \frac{0,02225/0,45}{0,05825/0,45} = 0,38 > 0,2 \dots \text{nesplněna} \Rightarrow \text{v hlavě nutné posouzení}$$

Pata sloupu (ZS3):  $M_{Edy} = 23,8 \text{ kNm}$ ,  $M_{Edz} = 1,5 \text{ kNm}$ ,  $N_{Ed} = 1231 \text{ kN}$ .

$$b_{eq} = h_{eq} = 0,450 \text{ m}$$

$$e_z = \frac{M_{Edy}}{N_{Ed}} = \frac{23,8}{1231} = 0,0193 \text{ m}$$

$$e_y = \frac{M_{Edz}}{N_{Ed}} = \frac{1,5}{1231} = 0,0012 \text{ m}$$

Podmínka:

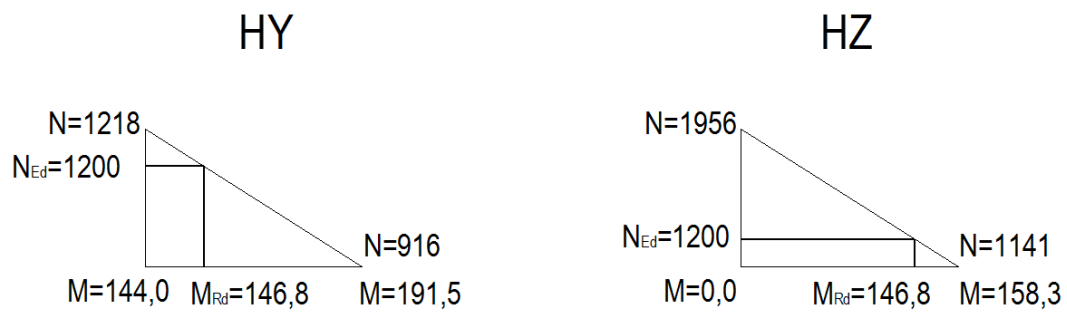
$$\frac{e_y/h_{eq}}{e_z/b_{eq}} = \frac{0,0012/0,45}{0,0193/0,45} = 0,06 < 0,2 \dots \text{splněna}$$

Posouzení v hlavě (ZS3):

$$\frac{N_{Ed} = 1200 \text{ kN}}{N_{Rd0} = 1956 \text{ kN}} = 0,61 \Rightarrow a = 1,425$$

$$M_{Edy} = 69,9 \text{ kNm}$$

$$M_{Edz} = 26,7 \text{ kNm}$$



Určení ohybového momentu na mezi únosnosti s využitím rovnosti trojúhelníků, vždy mezi dvěma body příslušného interakčního diagramu.

$$\left(\frac{M_{Edy}}{M_{Rdy}}\right)^a + \left(\frac{M_{Edz}}{M_{Rdz}}\right)^a = \left(\frac{69,9}{146,8}\right)^{1,425} + \left(\frac{26,7}{146,8}\right)^{1,425} = 0,43 \leq 1,00$$

VYHOVUJE