

Obsah

1. OVLÁDÁNÍ A FUNKCE PROGRAMU	2
1.1. OBEČNÉ	2
1.2. OVLÁDÁNÍ	2
1.3. PRŮŘEZ A VYZTUŽENÍ	3
1.4. MATERIÁLY	7
1.4.1. <i>Beton</i>	7
1.4.2. <i>Výztuž</i>	11
1.5. POSOUZENÍ A VÝSTUP	13
2. ZPŮSOBY VÝPOČTU INTERAKČNÍHO DIAGRAMU	17
2.1. SEŠTAVENÍ KŮRKY INTERAKČNÍHO DIAGRAMU	17
2.2. VÝPOČET JEDNOHO BODU INTERAKČNÍHO DIAGRAMU	20
2.2.1. <i>Poloha neutrální osy</i>	20
2.2.2. <i>Výpočet sil v průřezu</i>	21
2.2.3. <i>Omezení přetvoření celého tlačného průřezu</i>	23
2.2.4. <i>Výpočet ohybových momentů</i>	24
2.3. MINIMÁLNÍ EXCENTRICITA	26

1. Ovládání a funkce programu

1.1. Obecné

Program vznikl v rámci mé diplomové práce, aby usnadnil posuzování železobetonových prvk podle SN EN 1992-1-1.

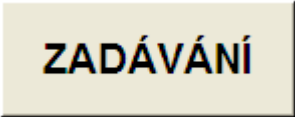
Základní úlohou je posouzení železobetonového pruhu namáhaného normálovou silou a ohybovým momentem v jednom směru (namáhání N+M). Toto posouzení probíhá pomocí vykreslení rovinného interakčního diagramu.

Kvůli jednoduchosti je základním prostředím tabulkový editor MS Excel, minimální potřebná verze je MS Excel 97 (doporučuje se alespoň 2003). Samotný výpočet byl naprogramován v programovacím jazyce Visual Basic for Applications (VBA).

1.2. Ovládání

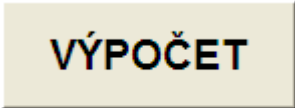
Uživatel se pohybuje pouze v listu „N+M Posudek“!

Hned po spuštění programu je dobré spustit mód zadávání stiskem tlačítka se stejným názvem

A rectangular button with a light beige background and a thin black border. The text "ZADÁVÁNÍ" is centered on the button in a bold, black, sans-serif font.

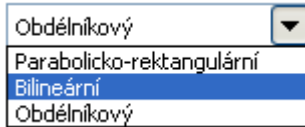


V tomto módu se zadávají vstupní hodnoty, aniž by probíhal výpočet pro každé změny, což by velice zdržovalo zadávání a celkovou práci. Interakční diagram v tomto módu není spočítán.

Jsou-li zadány všechny vstupní hodnoty, stiskem tlačítka

A rectangular button with a light beige background and a thin black border. The text "VÝPOČET" is centered on the button in a bold, black, sans-serif font.

se provede výpočet a zobrazí se interakční diagram. Pro případné další změny vstupních hodnot je dobré opět přepnout do módu zadávání. Šipka vedle tlačítek ZADÁVÁNÍ a VÝPOČET ukazuje na právě aktivní mód.

Vstupní data se vkládají vyplněným pouze následujícími částmi:

- všechna tzv. rozbalovací menu – např.:

- všechny buňky se žlutým podkladem – např.: 
- políčka pro zaktivování/deaktivování řady výztužných prutů
 - aktivní:
 - neaktivní:
- řádky (u políček prutů výztuže): 

Upozornění: Při psání buňky určené pro výpočet (buňky bez žlutého podkladu) dojde k psaní vzorce a program již nemusí dále pokračovat správně!

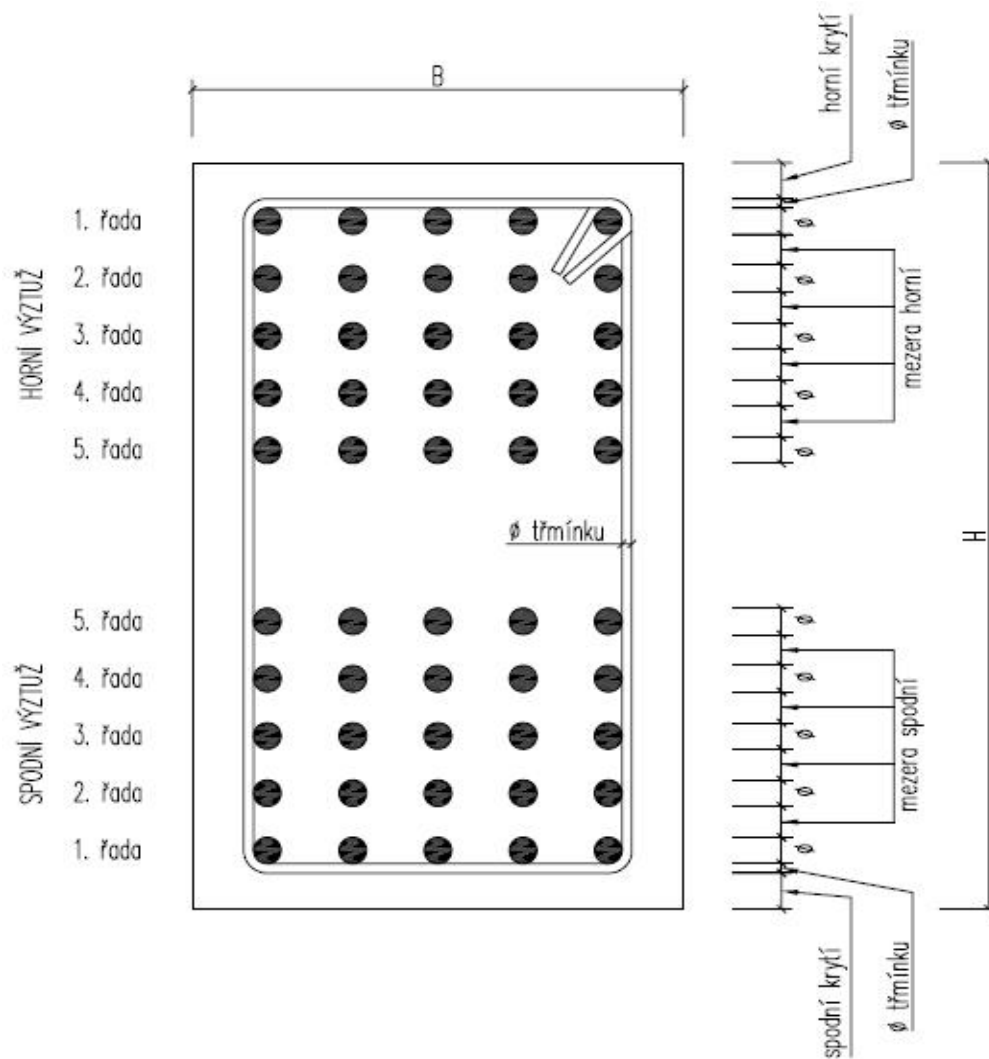
1.3. Průřez a vyztužení

Program umožňuje výpočet obdélníkového průřezu. Rozměry průřezu jsou velikostí neomezené, avšak platí, že čím vyšší průřez se posuzuje, tím déle bude výpočet trvat. Výztuž lze rozmístit maximálně do deseti vrstev, z toho pět vrstev se uvažuje pět spodním a pět pět horním lící prvku. V odstavci PRŮŘEZ se zadávají tyto vstupy:

- výška průřezu H
- šířka průřezu B
- horní krytí
- spodní krytí
- **t mínku**
- mezera horní
- mezera dolní

Význam jednotlivých veličin je zřejmý z obrázku 1.

Důležité: Celkové krytí hlavní nosné výztuže se přímo nezadá. Program jej dopočte jako součet hodnot krytí výztuže a **t mínku**.



Obrázek 1 Význam vstupních parametrů pro průřez a výztužení

Horní a spodní mezera je sv. tlá. vzdálenost prutů výztuže ve svislém směru. Tato hodnota vstupuje do výpočtu pouze, pokud jsou zadány alespoň dvě a více vrstev výztuže u příslušného líce průřezu. V takovém případě se automaticky vedle možnosti pro zadání velikosti mezery objeví kontrola, je-li mezera dostatečně velká. Např.:

mezera horní [mm] **30** \geq 30 mm = min. mezera **vyhovuje**

Kritérium posouzení – min. mezera – se podle SN EN 1992-1-1 vypočte jako:

max 1,2 ; max zrna kameniva 5mm; 20mm

V případě programu: je uvažován nejvyšší profil spodní/horní výztuže
 max. zrna kameniva se zadává v odstavci BETON
 výsledná hodnota je zaokrouhlena na 5 mm nahoru

Samotné vyztužení jednotlivých vrstev se zadává v odstavci VYZTUŽENÍ PRŮJEZU. K dispozici jsou pruty standardních profilů, tj.: 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30 a 32 mm. Počet prutů v jedné vrstvě není nijak omezen, ovšem program si doporučuje velikost svtlé vzdálenosti mezi pruty ve vodorovném směru a v případě, že je tato vzdálenost příliš malá, upozorní hláškou vedle příslušné řady výztuže.

VÝZTUŽ NESPLNÍ PODMÍNKU PRO MINIMÁLNÍ SVĚTLOU VZDÁLENOST !

Kritérium posouzení je stejné jako v případě mezery ve svislém směru. Při doporučování vodorovné mezery program uvažuje krytí výztuže vpravo a vlevo stejné, jako je krytí u spodního nebo horního povrchu. Není-li toto pro pevnou šířku průjezu splněno, je vhodné použití menšího počtu prutů v těmto průměrech tak, že celkové plochy výztuže se přibližně rovnají, jako je tomu v následujícím příkladě.

Příklad: Šířka průjezu $B = 300$ mm

Krytí 25 mm

tloušťka míčku 10 mm

max. zrno kameniva 22 mm

vyztužení – porovnání dvou řad:

		Ø [mm]	počet prutů	d [mm]	A_s [mm ²]
1. řada	<input checked="" type="checkbox"/>	18	6	44	1526,814
2. řada	<input checked="" type="checkbox"/>	20	5	93	1570,796

1. řada: **minimální mezera** $\max \{1, 2 \cdot 18; 22\} = 38$ mm

zaokrouhlení na 5 mm nahoru = 30 mm

skutečná mezera = $(300 - 2 \cdot (25 + 10) - 6 \cdot 18) / 5 = 24,4$ mm < 30 mm

2. řada: **minimální mezera** $\max \{1, 2 \cdot 20; 22\} = 42$ mm

zaokrouhlení na 5 mm nahoru = 30 mm

skutečná mezera = $(300 - 2 \cdot (25 + 10) - 5 \cdot 20) / 4 = 32,5$ mm > 30 mm

Podmínku pro minimální svtlou vzdálenost výztuže splňuje pouze 2. řada, zatímco plochy vyztužení jsou v obou případech prakticky stejné.

V odstavci KONTROLA STUPN VYZTUŽENÍ program posoudí minimální vyztužení tahovou výztuží i celkové maximální vyztužení pr ezu. Podmínky pro minimální plochu tažené výztuže jsou dv :

- $A_s \geq 0,0013 \cdot b \cdot d$
- $A_s \geq 0,26 \cdot f_{ctm} \cdot b \cdot d / f_{yk}$

b_t je ší ka tažené ásti pr ezu (v p ípad obdél níkového pr ezu jeho ší ka)

d je vzdálenost t žišt tažené výztuže od nejvíce tla eného vlákna pr ezu

f_{ctm} je st ední hodnota pevnosti betonu v tahu

f_{yk} je charakteristická hodnota meze kluzu betoná ské výztuže

Pro posouzení stupn vyztužení uvažuje program jako taženou výztuž vždy **spodní výztuž** bez ohledu na namáhání pr ezu. Tla ená vlákna jsou uvažována horní. Pr ez vyhovuje, pokud takto vypo tená plocha tažené výztuže je v tší nebo rovna než $A_{s,min1}$ a zároveň než $A_{s,min2}$.

Podmínka pro celkové maximální vyztužení pr ezu:

- $A_s \leq 0,04 \cdot b \cdot h$

b je ší ka pr ezu

h je výška pr ezu

Pr ez vyhovuje, pokud celková plocha veškeré výztuže (v . tla ené) není v tší než $A_{s,max}$.

Pozn.: Výše popsání díl í kontroly jsou pouze informativní a nemají vliv na výpo et a vykreslení interak ního diagramu – ten bude vykreslen, i když zadaný pr ez je nevyhovující nebo z praktického hlediska neproveditelný.

1.4. Materiály

Materiály se zadávají v odstavcích BETON a VÝZTUŽ.

1.4.1. Beton

Beton je charakterizován pevnostní třídou. Na výběr jsou třídy od C12/15 až po vysokopevnostní beton C90/105 (pro betony třídy C55/67 a vyšší nastávají ve výpočtu nepatrné odchylky od SN EN 1992-1-1, které jsou popsány dále v této kapitole). Po vybrání třídy betonu jsou na základě následující tabulky doloženy pevnostní a deformační charakteristiky potřebné k výpočtu.

třída betonu	f_{ck} [MPa]	f_{ctm} [MPa]	$\epsilon_{c,u}$ [‰]
C12/15	12	1,6	3,5
C16/20	16	1,9	3,5
C20/25	20	2,2	3,5
C25/30	25	2,6	3,5
C30/37	30	2,9	3,5
C35/45	35	3,2	3,5
C40/50	40	3,5	3,5
C45/55	45	3,8	3,5
C50/60	50	4,1	3,5
C55/67	55	4,2	3,2
C60/75	60	4,4	3,0
C70/85	70	4,6	2,8
C80/95	80	4,8	2,8
C90/105	90	5,0	2,8

Tabulka 1 Pevnostní a deformační charakteristiky beton

f_{ck} je charakteristická pevnost betonu v tlaku

f_{ctm} je střední hodnota pevnosti betonu v tahu

$\epsilon_{c,u}$ je maximální dovolené prodloužení betonu v tlaku

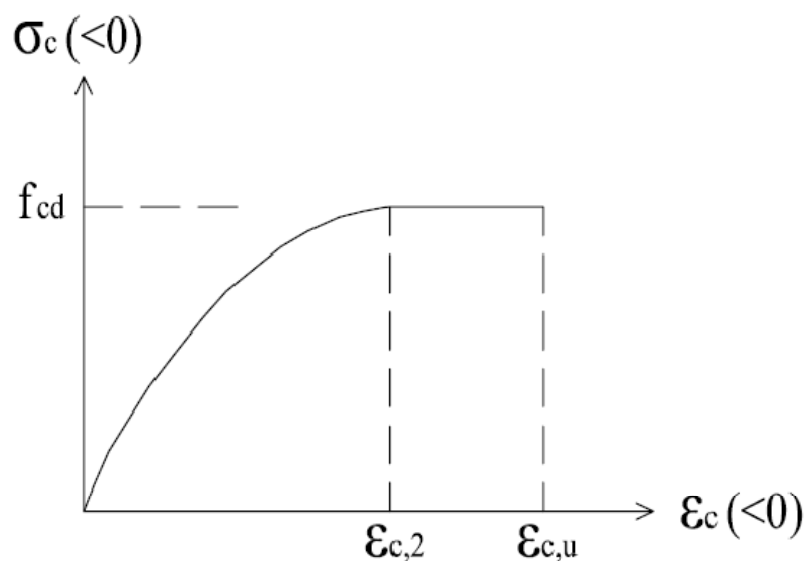
Ostatní parametry jsou pro všechny betony uvažovány stejně a to s následujícími hodnotami:

- Prodloužení, za kterého vznikne v betonu podle skutečného pracovního diagramu maximální tlakové napětí: $\epsilon_{c,1}$ 2,0‰

- $\epsilon_{c,2} = 2,0\text{‰}$ viz obrázek 2 – parabolicko rektangulární pracovní diagram betonu – hodnota není přesná pro vysokopevnostní betony
- $\epsilon_{c,3} = 1,75\text{‰}$ viz obrázek 3 – bilineární pracovní diagram betonu – hodnota není přesná pro vysokopevnostní betony
- součinitel spolehlivosti betonu: $\gamma_c = 1,5$

Chování betonu charakterizuje také volba pracovního diagramu. Na výbře v odstavci PŘÍKLADY jsou tři idealizované pracovní diagramy betonu.

- Parabolicko rektangulární



Obrázek 2 Parabolicko rektangulární pracovní diagram betonu

Tento diagram sestává ze dvou částí. V oblasti $0 < \epsilon_c < \epsilon_{c,2}$ platí parabolický průběh napětí v závislosti na přetvoření podle vztahu:

$$f_c = f_{cd} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c,2}} \right)^n$$

V tomto vztahu nastává odchylka od normy SN EN 1992-1-1 pro vysokopevnostní betony. Exponent závorky má být u betonu třídy C55/67 a vyšších odlišný.

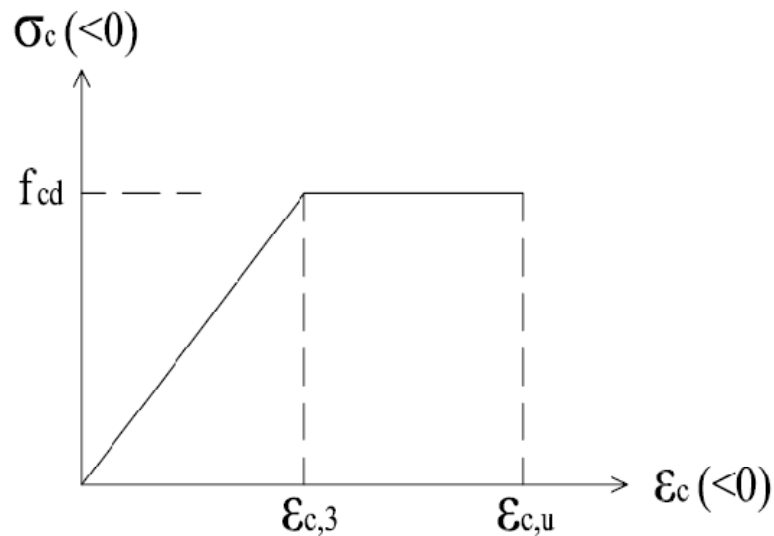
Stejně tak hodnota $\epsilon_{c,2}$ je uvažována hodnotou 2,0 ‰, která platí pouze pro betony běžných pevností, tedy do třídy C50/60.

Hodnota $\epsilon_{c,u}$ se uvažuje podle tabulky 1, pro vysokopevnostní betony má být u parabolicko rektangulárního diagramu v řádu desetín % odlišná.

V oblasti $\epsilon_{c,2} < \epsilon < \epsilon_{c,u}$ platí $\sigma_c = f_{cd}$.

Beton v tahu nep sobí.

- Bilineární



Obrázek 3 Bilineární pracovní diagram betonu

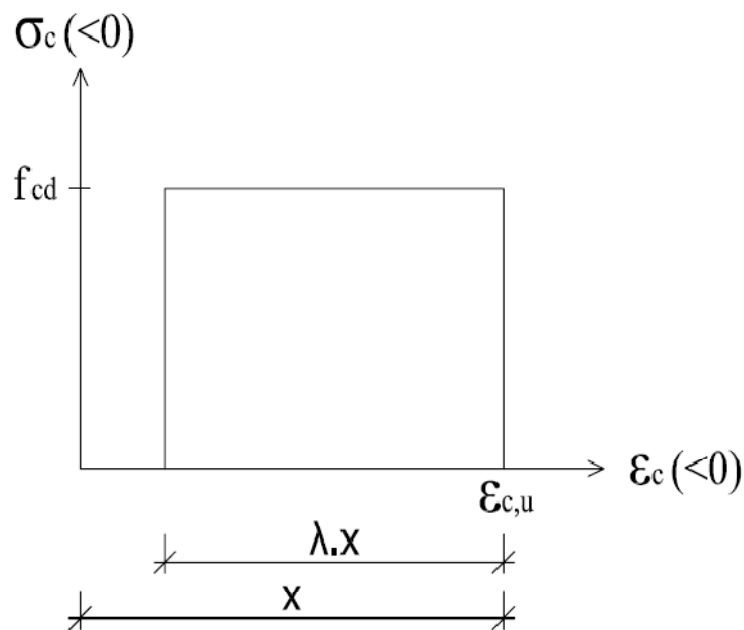
Pro $0 < \epsilon < \epsilon_{c,3}$ roste nap tí lineárn ě, v oblasti $\epsilon_{c,3} < \epsilon < \epsilon_{c,u}$ platí $\sigma_c = f_{cd}$.

$\epsilon_{c,3}$ je uvažována hodnotou 1,75 ‰, která platí pouze pro betony běžných pevností, tedy do třídy C50/60.

Stejn ě jako v předchozím případě se hodnota $\epsilon_{c,u}$ uvažuje podle tabulky 1, pro vysokopevnostní betony má být u bilineárního diagramu v řádu desetín % odlišná.

Beton v tahu nep sobí.

- Obdélníkový



Obrázek 4 Obdélníkový pracovní diagram betonu

x je vzdálenost neutrální osy od tlačných vláken.

$\lambda \cdot x$ je výška tlačné části průřezu, kde platí $\sigma_c = f_{cd}$. V ostatních vláknech betonu je napětí nulové. Součinitel λ nabývá hodnot:

pro betony třídy do C50/60 včetně :	0,8
pro betony třídy C55/67 a vyšší ¹ :	$0,8 - \frac{f_{ck} - 50}{400}$

V případě obdélníkového pracovního diagramu jsou hodnoty $\epsilon_{c,u}$ uvažovány na základě tabulky 1 a jsou v souladu s EN 1992-1-1.

Beton v tahu opticky neprobíhá.

Upozornění: Obdélníkový pracovní diagram betonu lze použít pouze v kombinaci s diagramem oceli s neomezeným pětvoením (viz kapitola 1.4.2). V ostatních případech nastane situace, kdy materiálem s mezním pětvoením je ocel a beton nedosáhne pětvoení $\epsilon_{c,u}$. V takovém případě je obdélníkový pracovní diagram nepoužitelný a výpočet nelze provést.

¹ f_{ck} se dosazuje v MPa

V případě výberu nevhodné kombinace pracovních diagram se výpočet neprovede a objeví se hláška:

!! NEVHODNĚ ZVOLENÉ PŘEDPOKLADY !!

U betonu se dále zadá maximální zrno kameniva pro určení minimální svtlé vzdálenosti mezi pruty výztuže – viz kapitola 1.3.

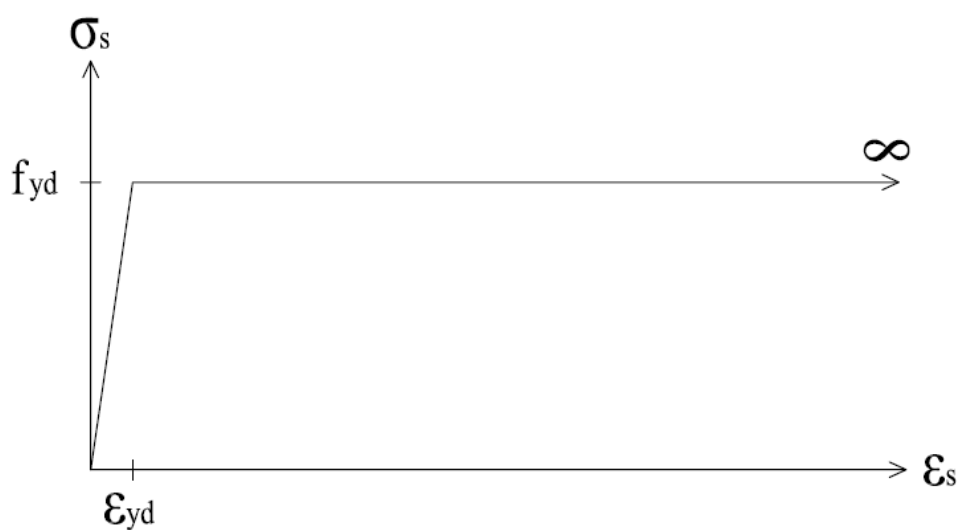
1.4.2. Výztuž

Betonáská výztuž je na výber pouze typu R 10 505. Ve výpočtech jsou použity tyto parametry:

- charakteristická hodnota meze kluzu: f_{yk} 500 MPa
- charakteristická hodnota meze tahové pevnosti²: f_{tk} 550 MPa
- Youngův modul pružnosti: E 200 000 MPa
- součinitel spolehlivosti betonáské výztuže: M_s 1,15

V odstavci PŘEDPOKLADY umožňuje program výber ze tří idealizovaných pracovních diagram výztuže (oceli):

- Pracovní diagram s vodorovnou horní částí a neomezeným prodloužením



Obrázek 5 Pracovní diagram oceli s vodorovnou horní částí a neomezeným prodloužením

² mez tahové pevnosti vstupuje do výpočtu pouze v případě výberu idealizovaného pracovního diagramu oceli s rostoucí horní částí

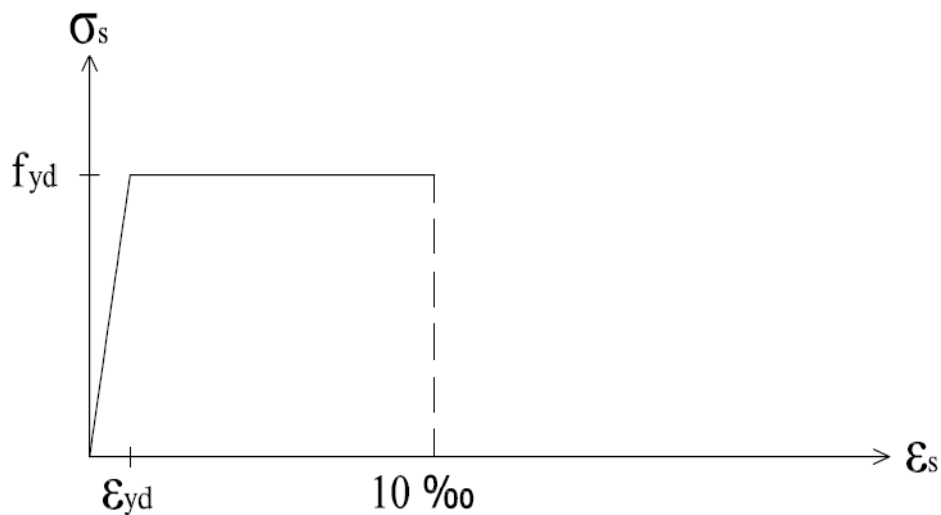
ϵ_{yd} je p etvo ení, p i kterém dosáhne výztuž návrhové hodnoty meze kluzu:

$$\frac{f_{yd}}{E} = \frac{f}{E} = \frac{500}{1,15 \cdot 200\,000} = 0,00217 = 2,17\text{‰}$$

Pro $0 \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{yd}$ roste nap tí lineárn ě podle Hookeova zákona $\sigma_s = E_s \cdot \epsilon_s$. V oblasti $\epsilon_s \leq \epsilon_{yd}$ platí $\sigma_s = f_{yd}$.

P etvo ení výztuže v tomto diagramu není omezeno a teoreticky m ůže r ťst do nekone ných hodnot.

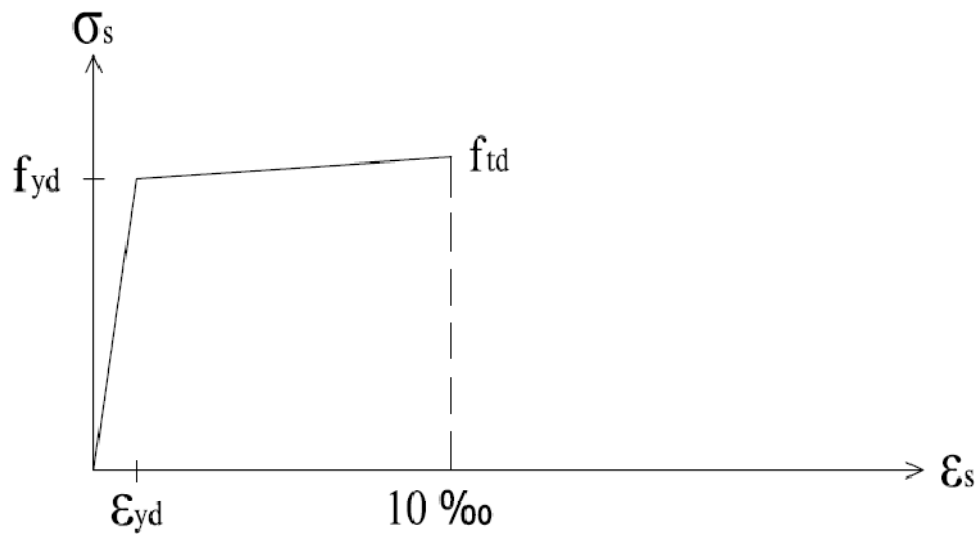
- Pracovní diagram s vodorovnou horní v ětví a omezeným p etvo ením



Obrázek 6 Pracovní diagram oceli s vodorovnou horní v ětví a omezeným p etvo ením

Platí stejné vztahy jako u předchozího diagramu oceli, rozdíl je pouze v omezení maximálního pom rného p etvo ení hodnotou 10 ‰. Betoná ská výztuž m ůže být p i výpo tu materiálem omezujícím p etvo ení pr ťezu.

- Pracovní diagram oceli s rostoucí horní v tví



Obrázek 7 Pracovní diagram oceli s rostoucí horní v tví

Pro $0 \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{yd}$ roste napětí lineárně podle Hookeova zákona $\sigma_s = E_s \cdot \epsilon_s$.

Pro $\epsilon_{yd} < \epsilon_s < 10\text{‰}$ roste napětí opět lineárně, ale podle vztahu³:

$$\sigma_s = \frac{f_{td} - f_{yd}}{10} \cdot (\epsilon_s - \epsilon_{yd}) + f_{yd}$$

Přetvoření větší než 10‰ nemůže nastat, betonáková výztuž tak může být přetvořena materiálem omezujícím přetvoření průřezu.

1.5. Posouzení a výstup

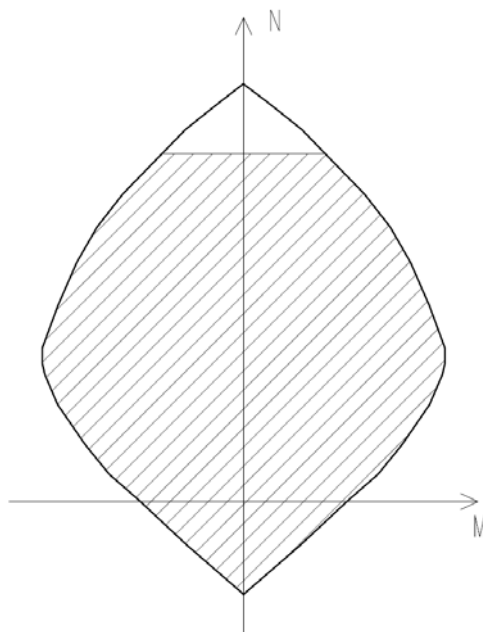
Po zadání všech vstupních hodnot dojde stiskem tlačítka pro výpočet (viz kapitola 1.2) k vykreslení interakčního diagramu. Způsob výpočtu je detailně vysvětlen v kapitole 2. Pro posouzení průřezu se zadají v odstavci NAMÁHÁNÍ návrhové hodnoty normálové síly a ohybového momentu, kterými je průřez zatížen, a pro které se bude posuzovat. Ohybový moment otáčí kolem vodorovné osy a v kladném smyslu táhne spodní vlákna. Normálová síla se zadává se znaménkem mínus, pokud je tlaková.

V interakčním diagramu se objeví bod o souřadnicích $M_{y,Ed}$ a $N_{x,Ed}$, které jsou zadány v odstavci NAMÁHÁNÍ. Např.:

50; -1000

³ Vztah vyplývá z podobnosti trojúhelníků z obrázku 7

Průez z hlediska SN EN 1992-1-1 na dané zatížení vyhoví, pokud se tento bod nachází v oblasti „uvnitř“ křivky interakčního diagramu a zároveň pod přímkou vymežující minimální excentricitu. Tato oblast je na obrázku 8 vyznačena šrafováním.



Obrázek 8 Interakční diagram s vyznačením vyhovující oblasti

Pro případ, že poloha bodu není přesně určitelná (např. bod leží velice blízko k křivce), je pod interakčním diagramem odstavec POSOUZENÍ.

V části ohybová únosnost je porovnán ohybový moment od zatížení s ohybovým momentem únosnosti pro danou normálovou sílu. Pokud je průez zatížen momentem se záporným znaménkem, porovnání bude provedeno rovněž s hodnotou momentu únosnosti se záporným znaménkem, tedy táhnoucím horní vlákna. Porovnání je vyjádřeno také procentuálně jako využití ohybové únosnosti.

Část silová únosnost porovnává normálovou sílu od zatížení s maximální dovolenou normálovou sílou, která je omezena minimální excentricitou. Toto posouzení probíhá, jen pokud se bod se souřadnicemi zatížení blíží k této křivce a nemuselo by být jasné, zda leží pod ní.

Strany pí tisku z programu jsou nastaveny tak, aby odstavec posouzení nebyl vytištěn. Odstavec posouzení má být jen informativní pro uživatele programu.

Na následujících dvou stranách je ukázka konkrétního výstupu z programu.

KONTROLA STUPNĚ VYZTUŽENÍ

tahová [mm²] 678,58 > 95,6 = $A_{s,min1} = 0,0013 * b_t * d$
> 99,4 = $A_{s,min2} = 0,26 * f_{ctm} * b_t * d / f_{yk}$

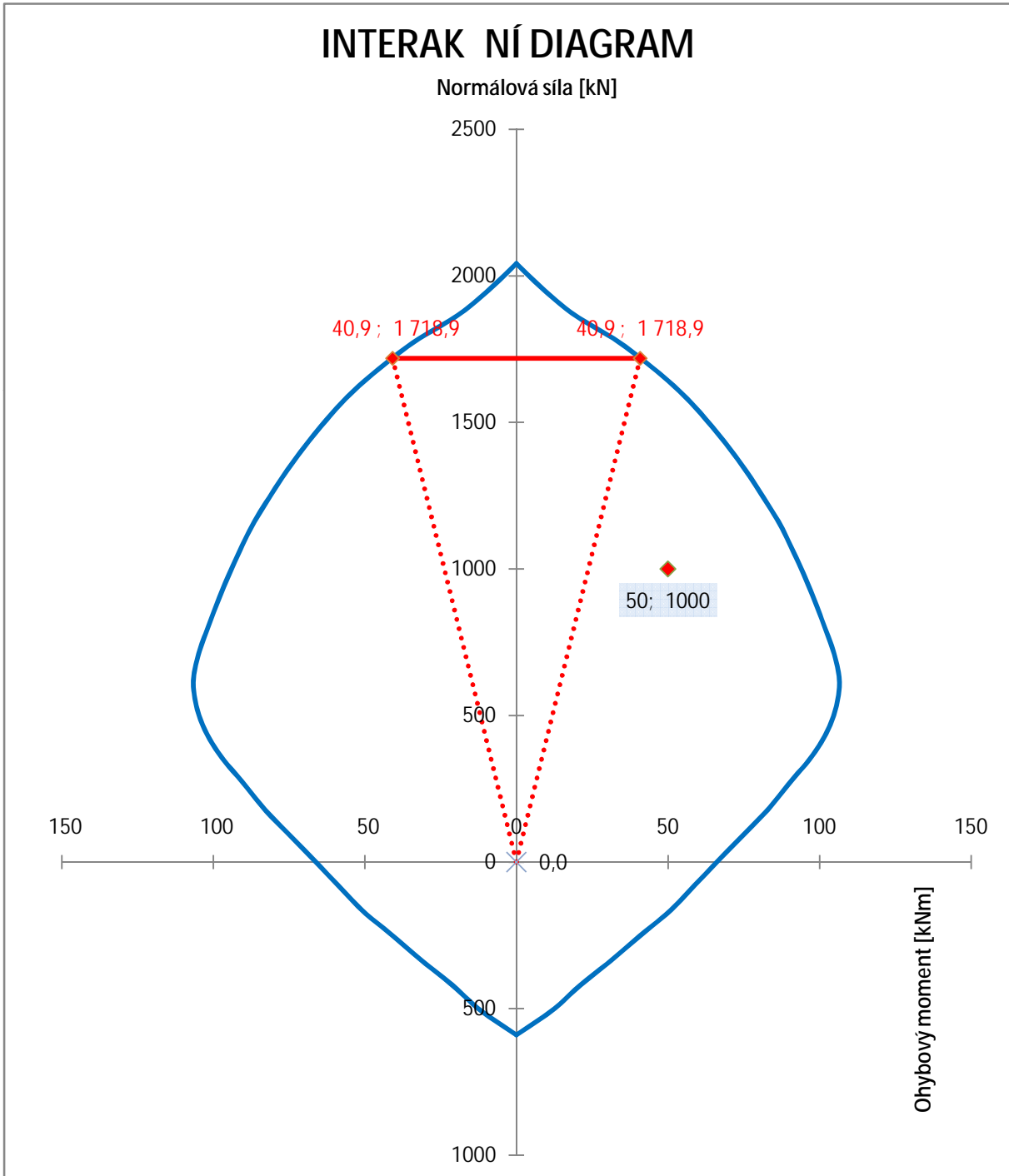
vyhovuje

veškerá [mm²] 1357,2 < 3600,0 = $A_{s,max} = 0,04 * b * h$

vyhovuje

VÝPOČET

$x^+ = 202,0 \text{ mm}$ $x^- = 202,0 \text{ mm}$
 $M_{Rd}^+ = 94,1303 \text{ kNm}$ $M_{Rd}^- = -94,13029 \text{ kNm}$



2. Způsob výpočtu interakčního diagramu

2.1. Sestavení kvadranty interakčního diagramu

V této kapitole je vysvětlen postup výpočtu, jakým program kvadranty interakčního diagramu sestaví. Kvadranty interakčního diagramu je mezní hranice únosnosti železobetonového prutu namáhaného kombinací normálové síly a ohybového momentu. Ohraničuje oblast, ve které se nachází takové kombinace normálové síly a ohybového momentu, pro které je železobetonový prut z hlediska posouzení podle normy vyhovující.

Bezpečný postup výpočtu interakčního diagramu, který program **nepoužívá**, je takový, že je vypočteno pět základních bodů (centrický tah, prostý ohyb, hranice mezi porušením tahem a tlakem – maximální využití obou materiálů, bod, kdy neutrální osa prochází výztuží a centrický tlak). Mezilehlé body se nepořítají, pouze se spojí přímkou nebo zaoblenou kvadrantem, což může být při tak malém množství spojitých bodů nevhodné. Pokud je prut vyztužen ve více vrstvách, může navíc vést výpočet k zanedbání výztuže blízko neutrální osy, ve které není dosaženo meze kluzu.

Program proto **používá** náročnější, ale přesnější způsob výpočtu.

1) Z následujících vztahů jsou nejprve vypočteny normálové síly dvou základních bodů:

- centrický tlak – bod 0: $N = A_c \cdot f_{ck} + A_s \cdot E_s \cdot \sigma_s$
- centrický tah – bod t: $N = A_s \cdot f_{yk}$

A_c je plocha železobetonového prutu

σ_s je součinitel upravující pevnost betonu v tlaku v případě použití obdélníkového idealizovaného diagramu betonu – nabývá hodnot:

pro betony třídy do C50/60 včetně:	1,0
pro betony třídy C55/67 a vyšší ⁴ :	$1,0 - \frac{f_{ck} - 50}{200}$

⁴ f_{ck} se dosazuje v MPa

pro parabolicko rektangulární a bilineární pracovní diagram betonu
se souinitel ve vzorci neobjevuje

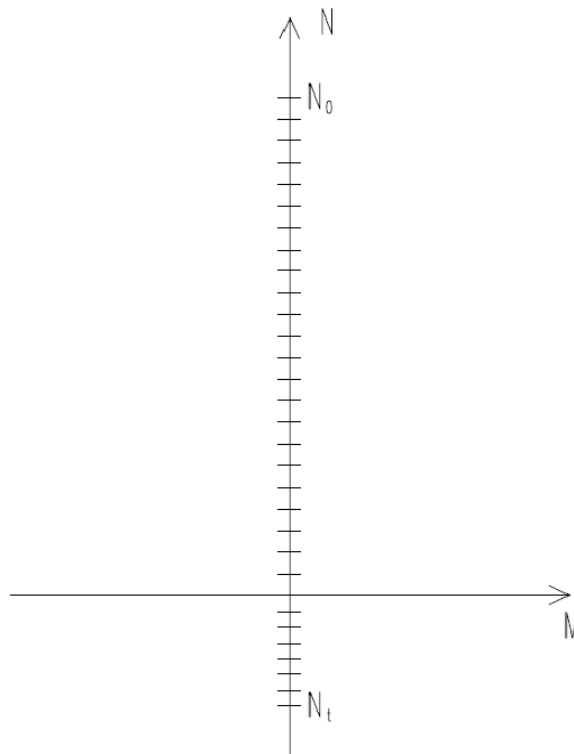
f_{cd} je návrhová pevnost betonu v tlaku

A_s je plocha veškeré výztuže v průřezu

E_s je Youngův modul pružnosti

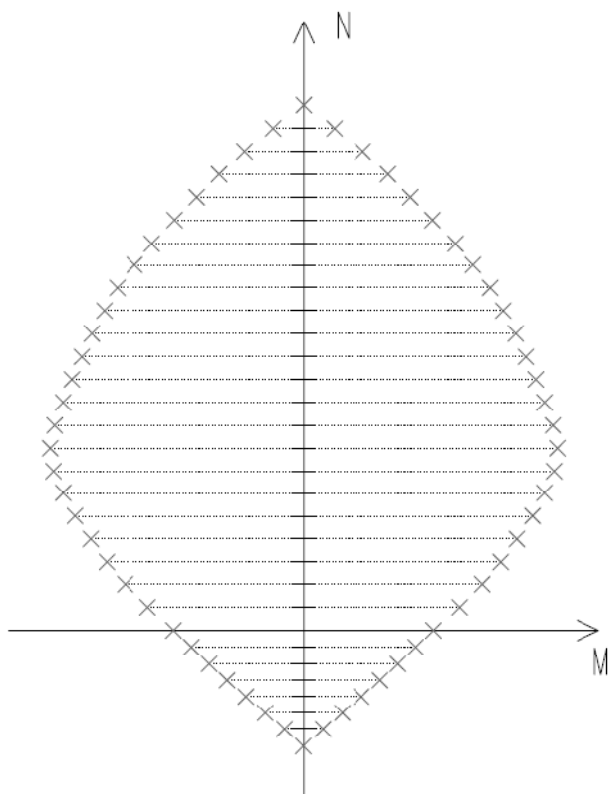
s je počet výztuže (v případě centrického tlaku stejné ve všech vrstvách)

- 2) Oblast mezi centrickým tlakem a centrickým tahem na ose normálové síly je následně rozdělena na 30 dílků (obrázek 9). Celkem je tedy řešeno 31 hodnot normálových sil.



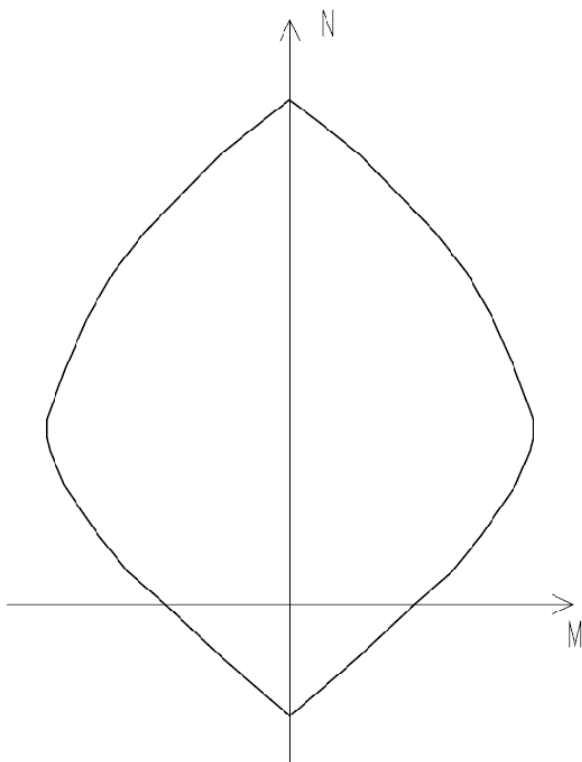
Obrázek 9 Rozdělení osy normálové síly na 30 dílků

- 3) Pro každou z 31 hodnot normálových sil jsou dopsány dvě hodnoty příslušných ohybových momentů (kladný a záporný). Toto je naznačeno na obrázku 10. Přesný popis vztahu ohybových momentů příslušajících jedné normálové síle se nachází v kapitole 2.2.



Obrázek 10 Dopolné hodnoty ohybových momentů

4) Spojením bodů se vytvoří křivka interakčního diagramu (obrázek 11).



Obrázek 11 Příklad interakčního diagramu

2.2. Výpočet jednoho bodu interakčního diagramu

Vypočtení hodnot ohybových moment M p íslušejících jedné normálové síle se provádí v následujících krocích:

- 1) Určení polohy neutrální osy.
- 2) Výpočet sil v průřezu.
- 3) Výpočet p íslušných ohybových moment M (kladného a záporného).

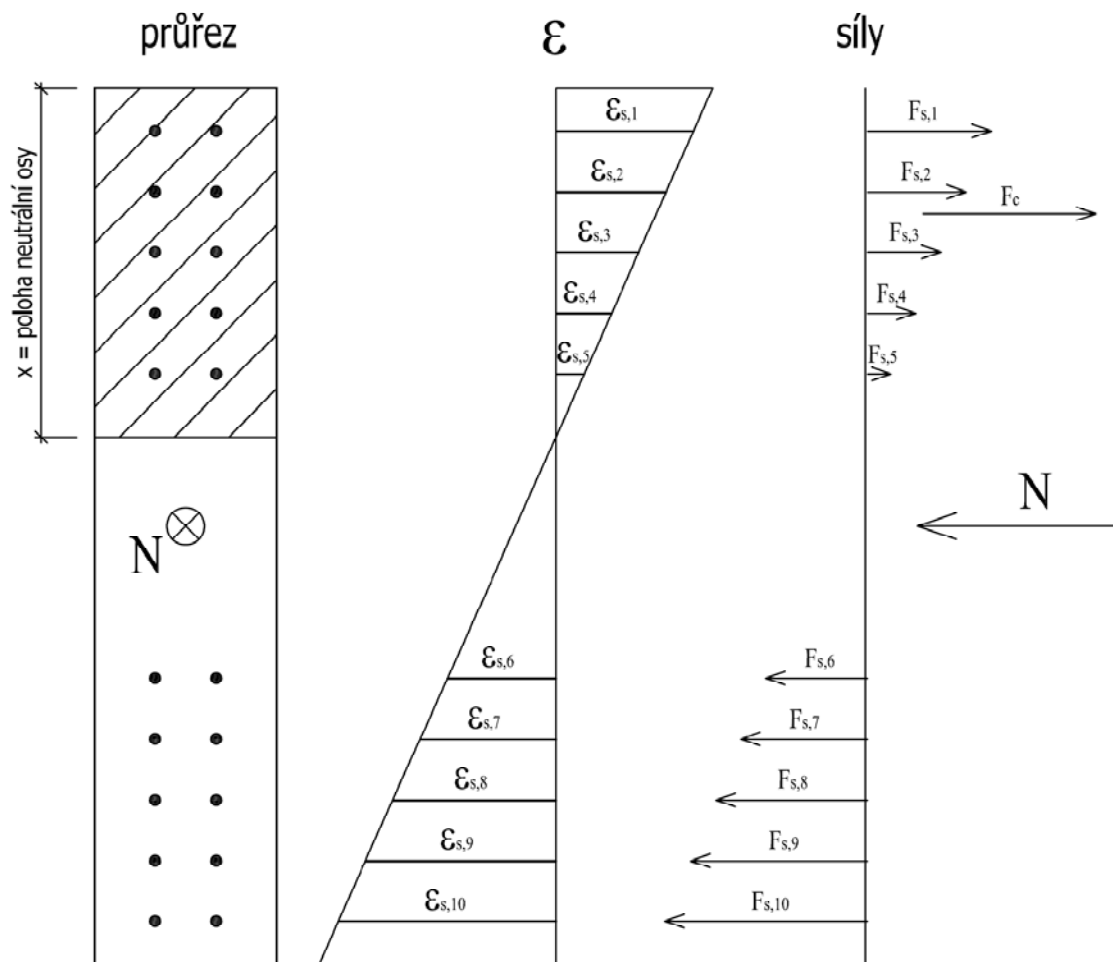
2.2.1. Poloha neutrální osy

Protože napětí výztuže nacházející se blízko neutrální osy nedosahuje meze kluzu, nelze pro výpočet sil v průřezu použít metodu mezní rovnováhy. Pro b h poměrné deformace po výšce průřezu se určí metodou mezních pětvoení. Omezující je maximální dovolené pětvoení tlakového betonu nebo výztuže (v případě pracovních diagram s omezeným pětvoením výztuže).

Neutrální osa se nachází v takové poloze, při které platí rovnováha sil vzniklých pětvoením průřezu se zatížením, tedy s normálovou silou, ke které se dopoítávají ohybové momenty (obrázek 12). Hledání této polohy program provádí postupným dosazováním výšky tlakové části průřezu x od 1 mm do desetinásobku výšky průřezu s krokem 1 mm⁵. Pro každou hodnotu je otestována rovnováha sil na průřezu. Jako správná je vrácena ta hodnota x , pro kterou je podmínka rovnováhy splněna. Celý postup lze shrnout v těchto bodech:

- 1) Volba výšky tlakové části průřezu $x = 1$ mm.
- 2) Výpočet poměrného pětvoení ve vrstvách výztuže a v krajních vláknech tlakového betonu metodou mezních pětvoení.
- 3) Výpočet všech sil v průřezu.
- 4) Zkouška silové podmínky rovnováhy – pokud nevyjde, zvětšení hodnoty x a opakování výpočtu.
- 5) Při splnění podmínky rovnováhy určení dané hodnoty x jako správné pro výpočet p íslušejících ohybových moment M .

⁵ pro centrický tlak ($N = N_0$) je neutrální osa v nekonečnu. Pro rostoucí pracovní diagram oceli je velikost tlakové části x hledána také v záporných hodnotách (pomyslná neutrální osa může být nad průřezem).



Obrázek 12 Rovnováha sil železobetonového průřezu

2.2.2. Výpočet sil v průřezu

Je-li známa poloha neutrální osy, pak lze určit jednotlivých vrstev výztuže $\epsilon_{s,i}$ se podle te z podobnosti trojúhelníků. Při volbě pracovního diagramu s neomezeným pětvoením výztuže je vždy na mezi deformace nejvíce tláčené vlákno betonu, které tak tvoří známou hodnotu pro dopočet z podobnosti trojúhelníků. V případě volby pracovního diagramu s omezeným pětvoením výztuže může být touto známou hodnotou navíc pětvoení v nejvíce tažené vrstvě výztuže.

Poloha sil v jednotlivých vrstvách výztuže je jasně dána osou prutu. Velikosti sil ve výztuži se vypočítou na základě vztahu:

$$F_i = A_i \cdot \sigma_i$$

A_i je plocha i-té vrstvy výztuže

$\sigma_{s,i}$ je napětí v i-té vrstvě výztuže vyvolané přetvořením $\epsilon_{s,i}$, vypočtené z tohoto přetvoření na základě vztahů z kapitoly 1.4.2 podle volby pracovního diagramu

Poloha (vzdálenost d_c od nejvíce tlakovaných vláken betonu) a velikost síly v betonu se určují následovně :

- poloha: $d_c = \beta \cdot x$
- velikost: $F_c = \gamma \cdot b \cdot f_{cd}$

x je výška tlakované části průřezu

b je šířka průřezu

f_{cd} je návrhová pevnost betonu v tlaku

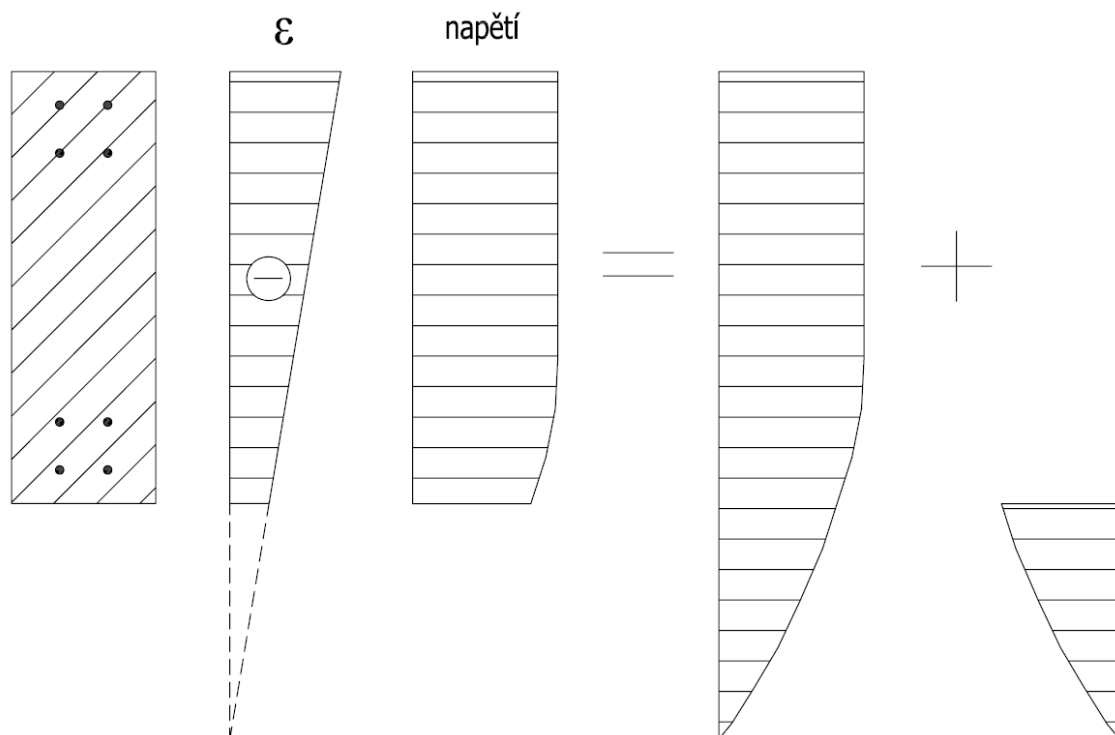
β a γ jsou součinitelé určené z následující tabulky:

Pracovní diagram	$ \epsilon_c \leq 1,75 \text{ ‰}$	$1,75 \text{ ‰} \leq \epsilon_c \leq 2 \text{ ‰}$	$2 \text{ ‰} \leq \epsilon_c \leq 3,5 \text{ ‰}$	$ \epsilon_c = 3,5 \text{ ‰}$
Parabolicko- rektangulární		$\beta = \frac{\epsilon_c (6 - \epsilon_c)}{12}$ $\gamma = \frac{8 - \epsilon_c}{4 (6 - \epsilon_c)}$	$\beta = \frac{3 \epsilon_c - 2}{3 \epsilon_c}$ $\gamma = \frac{\epsilon_c (3 \epsilon_c - 4) + 2}{2 \epsilon_c (3 \epsilon_c - 2)}$	$\beta = 0,8095$ $\gamma = 0,4160$
Bilineární	$\beta = \frac{\epsilon_c}{3,5}$ $\gamma = \frac{1}{3}$	$\beta = \frac{2 \epsilon_c - 1,75}{2 \epsilon_c}$ $\gamma = \frac{3 \epsilon_c (\epsilon_c - 1,75) + 1,75^2}{3 \epsilon_c (2 \epsilon_c - 1,75)}$		$\beta = 0,75$ $\gamma = 0,3889$
Obdélníkové	—————			$\beta = 0,8$ $\gamma = 0,4$

Tabulka 2 Součinitelé β a γ pro určení velikosti a polohy síly v betonu

Vzorce uvedené v tabulce 2 pro parabolicko rektangulární a bilineární pracovní diagram betonu jsou odvozeny integrací příslušného průřezu napětí po výšce průřezu. Hodnota ϵ_c je přetvoření nejvíce tlakovaného vlákna betonu a dosazuje se v ‰. Ve skutečnosti lze tyto vzorce použít pouze, pokud celý obrazec napětí leží v průřezu, což znamená, pokud neutrální osa prochází průřezem. V případě dostatečně velké normálové síly je ale celý průřez tlakovaný (body interakčního diagramu ležící v horní části) a neutrální osa je jen pomyslná a leží mimo průřez. Aby bylo možné použít vzorce z tabulky 2

i v takovém případě, je obrazec napětí vyjádřen jako součet dvou obrazců, pro které lze vzorce použít. Tento způsob výpočtu je naznačen na obrázku 13.



Obrázek 13 Vyjádření obrazce napětí pro použití vzorců z tabulky 2

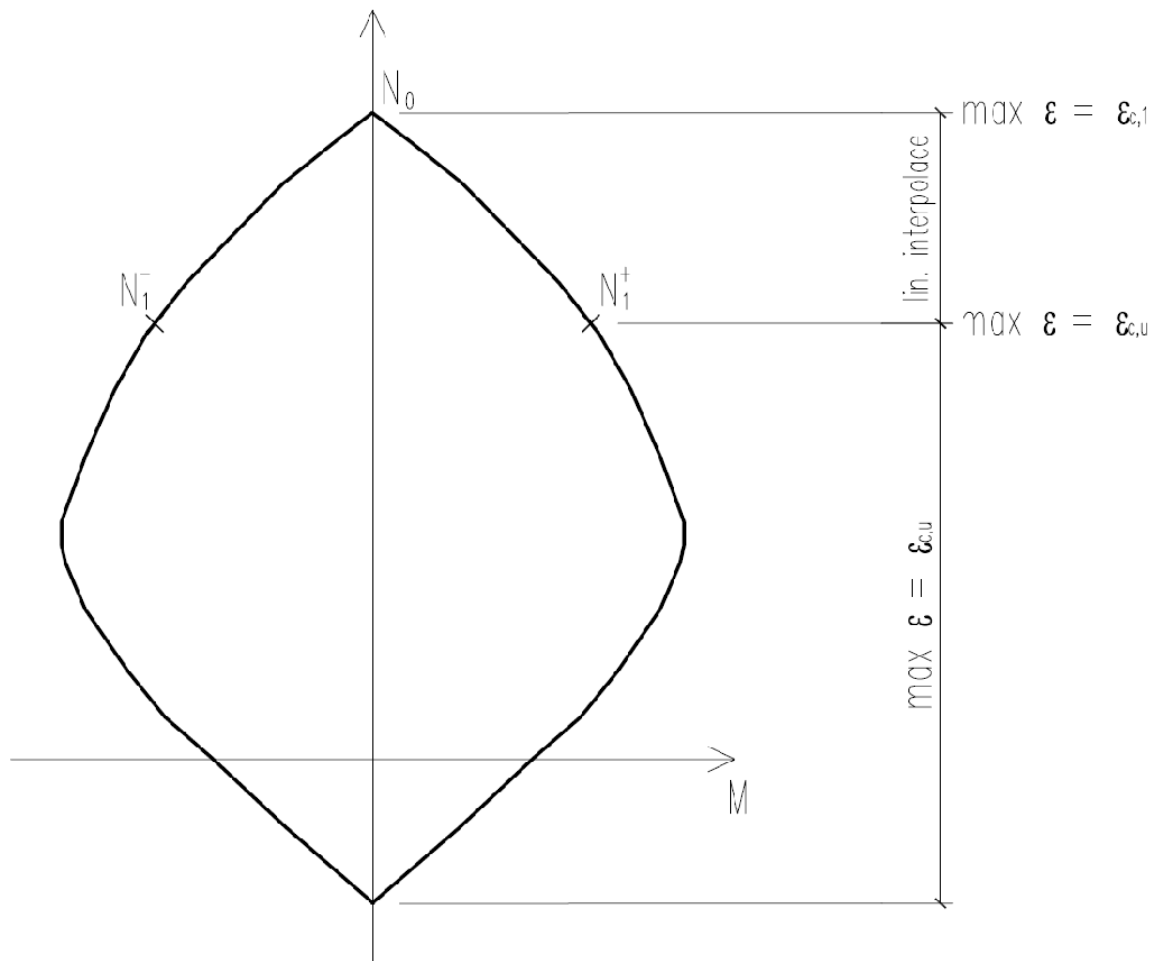
Pro oba obrazce na pravé straně rovnice z obrázku 13 lze použít vzorce z tabulky 2. Tyto vzorce jsou tedy univerzální a jsou používány při výpočtu všech bodů interakčního diagramu.

2.2.3. Omezení pravoúhelní celého tlakového pruhu

V kapitole 1.4.1 bylo uvedeno, že podle skutečného pracovního diagramu nastává v betonu maximální tlakové napětí za pravoúhelní cca 2 ‰. Tato skutečnost je v interakčním diagramu zohledněna omezením maximálního tlakového pravoúhelní v případě, že je celý pruh tlakový. Toto omezení ovlivní průběh deformace po výšce pruhu.

Bod, vypočtený pro neutrální osu procházející vrstvou výztuže ležící nejbližší taženým vláknem, je označen jako bod N_1 . Jedná se o nejnižší hodnotu tlakové normálové síly, pro kterou vznikají v pruhu pouze tlakové síly. Pravoúhelní tlakový beton v tomto bodě je omezeno hodnotou $\sigma_{c,u}$ (tabulka 1, kapitola 1.4.1). V bodě N_0 (centrický tlak) je omezeno hodnotou $\sigma_{c,1} = 2 \text{ ‰}$. Maximální dovolené tlakové pravoúhelní bodů nacházejících

se v interakčním diagramu mezi body N_1 a N_0 je vytvořeno lineární interpolací mezi těmito hodnotami (obrázek 14).

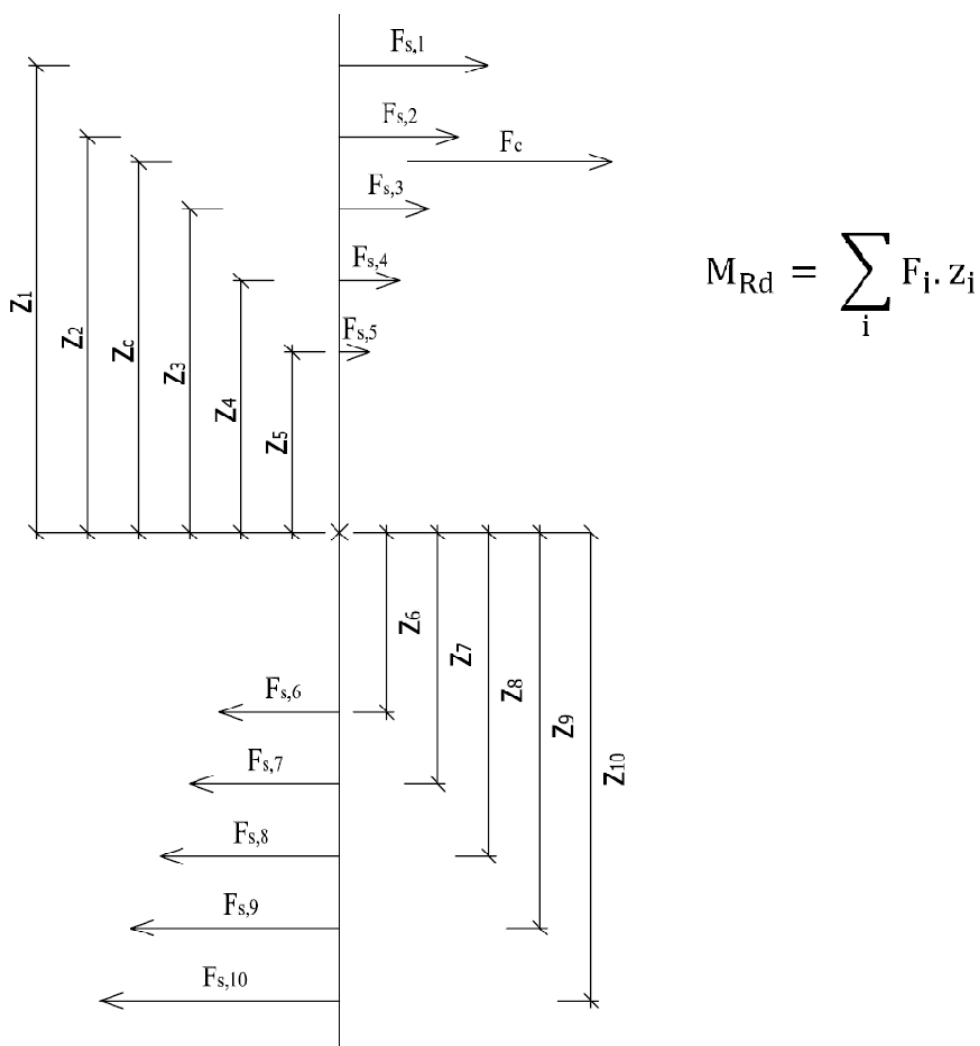


Obrázek 14 Omezení tlakového pětvení pr ezu bod interak ního diagramu

2.2.4. Výpočet ohybových momentů

Ohybový moment, který v interakčním diagramu přísluší dané normálové síle, je ve skutečnosti momentem únosnosti M_{Rd} pr ezu zatíženého danou normálovou silou. Vypočte se jako součet momentů od jednotlivých sil v pr ezu ke střednímu pr ezu (obrázek 15).

síly



Obrázek 15 Výpočet ohybového momentu ze sil v průřezu

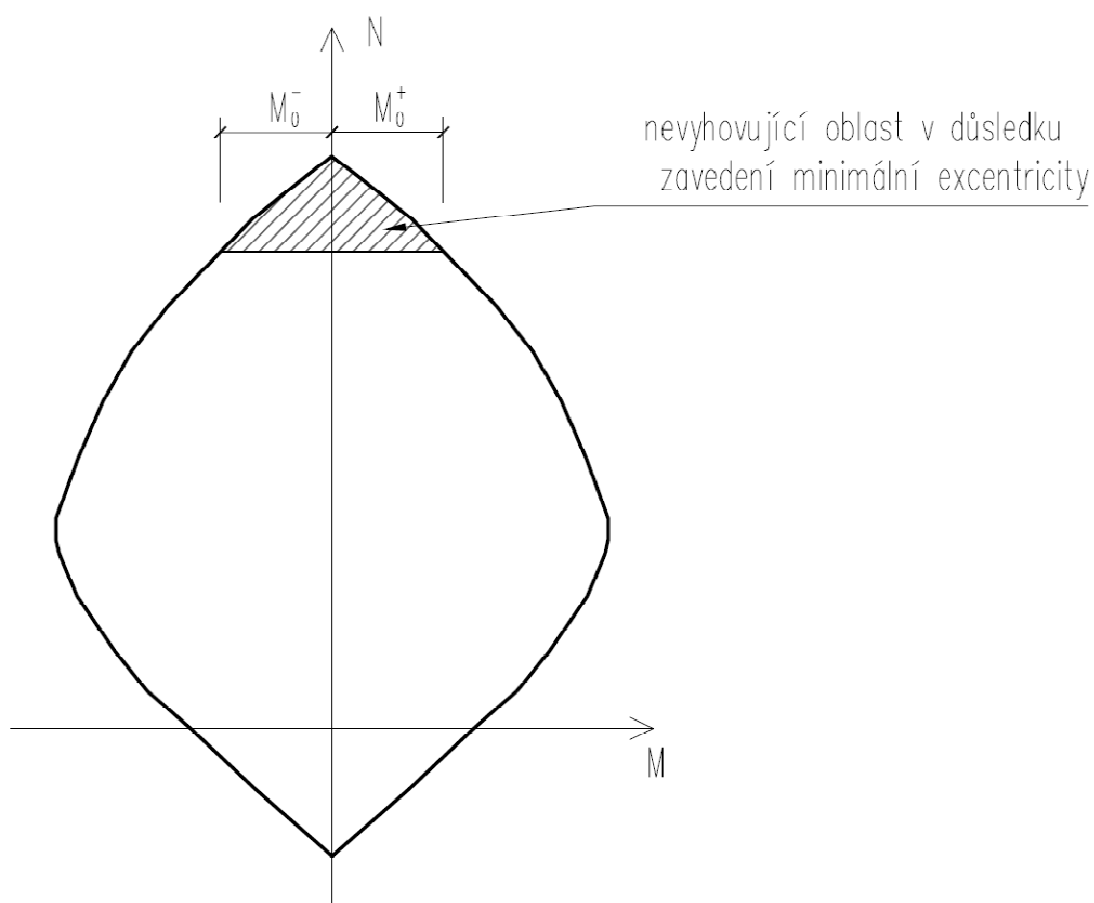
Ohybový moment se záporným znaménkem je vypočten obdobným způsobem, který je popsán výše. Jako tlačivá jsou uvažována spodní vlákna průřezu a velikost tlačivé oblasti x je na určována odspodu. Další výpočty jsou identické. Při symetrickém vyztužení průřezu mají oba momenty (M_{Rd}^+ i M_{Rd}) stejnou velikost.

2.3. Minimální excentricita

Jelikož železobetonový prvek je nehomogenní, což se může projevit zejména při plném využití betonového prvu (centrický tlak – bod N_0), je v normě SN EN 1992-1-1 zavedena minimální excentricita e_0 tlakové normálové síly působící na prvek. Minimální excentricita se uvažuje v obou směrech (vzniká kladný i záporný ohybový moment) a v interakčním diagramu se projeví omezením únosnosti v horní části diagramu (obrázek 16). Její velikost je definována takto:

$$e = \max \left\{ \frac{h}{30}; 20 \text{ mm} \right\}$$

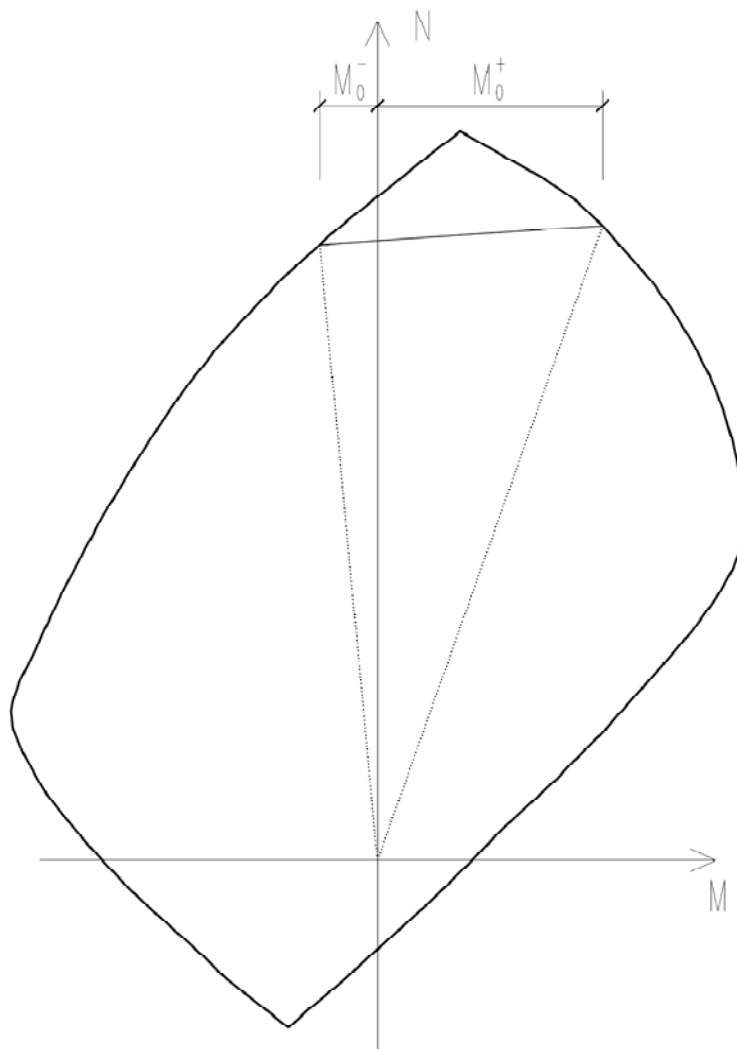
h je výška prvu ve směru namáhání ohybovým momentem a dosazuje se v milimetrech. Výsledná e_0 vyjde také v milimetrech.



Obrázek 16 Interakční diagram po zavedení minimální excentricity

Hodnota momentu M_0^+ a M_0^- je vypočtena ze vztahu $M_0 = N_0 \cdot e_0$. Pokud je prvek vyztužen nesymetricky, je k minimální excentricitě navíc skutečná excentricita e_s ,

tedy vzdálenost t žiště ideálního průřezu od jeho středů. Síla působící s těmito excentricitami tak zatíží průřez navíc ohybovým momentem $M_0 = N_0 \cdot (e_0 + e_s)$. Hodnoty M_0^+ a M_0^- se v případě nesymetricky vyztuženého průřezu nerovnají (obrázek 17).



Obrázek 17 Interakční diagram nesymetricky vyztuženého průřezu

Před vynesáním omezující přímky musí být k momentu m M_0 dopořeny mezní normálové síly. Program nezná funkci, která najde příslušnou normálovou sílu odpovídající ohybovému momentu, takže mezní normálové síly jsou dopořeny lineární interpolací mezi body se známými souřadnicemi. Jak již bylo zmíněno, tento bod je po výšce diagramu 30, takže interpolace je velice přesná a chyba vzniklá interpolováním je zanedbatelná.

Souřadnice bodů jsou vyneseny do interakčního diagramu a jsou spojeny vždy přímkou. Vyhovující oblast interakčního diagramu se nachází pod touto přímkou.

Seznam literatury:

- [1] KOHOUTKOVÁ, A. – TRTÍK, K. – VAŠKOVÁ, J. – VODI KA, J.: *Betonové konstrukce 1*, VUT, Praha, 2005
- [2] MYSLÍN, J.: *Programování v jazyce Visual Basic*, Computer Media, Kralice na Hané, 2004
- [3] PROCHÁZKA, J. a kolektiv: *Betonové konstrukce – Příklady navrhování podle Eurocode 2*, Procon, Praha, 1999
- [4] Norma ČSN EN 1992-1-1 – *Navrhování betonových konstrukcí – část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*