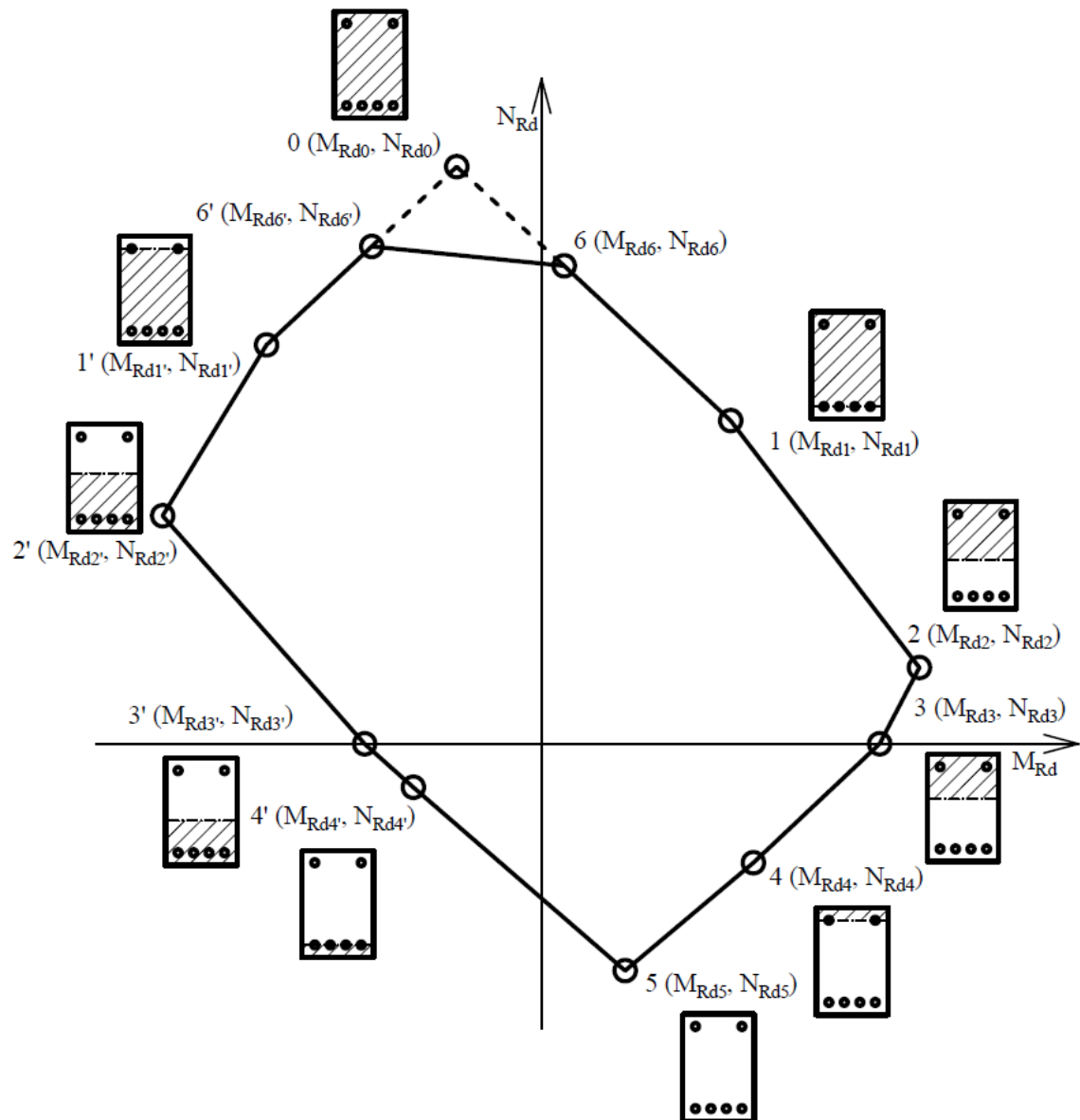


## 2.1 Bodový interakční diagram

V rámci této diplomové práce byl vytvořen program pro sestavení bodového interakčního diagramu. V této kapitole je tento interakčního diagram popsán.

Bodový interakční diagram se skládá z pravé a levé části. Pravá část interakčního diagramu je sestavena ze sedmi bodů, kde šest bodů odpovídá šesti charakteristickým typům namáhání (přesněji řečeno, únosnostem průřezu při daných typech namáhání) a sedmý bod zavádí podmínku minimální výstřednosti síly. Pro sestavení levé části diagramu je třeba vypočítat dalších pět bodů, které odpovídají bodům 1 až 4 a bodu 6 s tím rozdílem, že je uvažováno zatížení záporným momentem, který táhne horní vlákna průřezu.



Obr. 2.1: Interakční diagram

Pro stanovení bodů interakčního diagramu je využit postup obdobný postupu v publikaci [3]. V této kapitole je tento postup rozveden, upraven a doplněn odvozením a popsáním všech vztahů potřebných k výpočtu jednotlivých bodů. Popis postupu výpočtu je rozdělen tak, že v každé podkapitole je popsán jeden typ namáhání a postup výpočtu normálové a momentové únosnosti při daném namáhání pro zatížení kladným a záporným momentem.

V jednotlivých podkapitolách je při popisu postupu výpočtu odkazováno na obecné vzorce odvozené a vysvětlené v teoretické části této práce. Tyto obecné vzorce jsou pak upravovány na konkrétnější vztahy platné pro daný způsob namáhání a zvolené pracovní diagramy.

### 2.1.1 Předpoklady výpočtu

Při výpočtu napětí ve výztuži je uvažován pracovní diagram betonářské oceli s vodorovnou větví bez omezení poměrného přetvoření, viz kapitola 1.2.1. Při výpočtu napětí v betonu je uvažováno rovnoměrné obdélníkové rozdělení napětí v tlačené oblasti betonu, viz kapitola 1.2.7.

Oslabení betonového průřezu výztuží není uvažováno. Těžiště průřezu je uvažováno v polovině výšky průřezu.

Dalšími uvažovanými předpoklady jsou:

- zachování rovinnosti průřezu při deformaci – přetvoření vláken je přímo úměrné jejich vzdálenosti od neutrální osy,
- dokonalá soudržnost betonu a výztuže – poměrné přetvoření výztuže je rovno přetvoření přilehlého betonu,
- nulová pevnost betonu v tahu.

### 2.1.2 Bod 0 – Rovnoměrně rozdělené stlačení po celé výšce průřezu

K porušení průřezu dojde dosažením maximálního poměrného přetvoření betonu  $\varepsilon_{c,max}$ , které je při tomto způsobu namáhání rovno poměrnému přetvoření betonu při dosažení maximálního napětí v betonu  $\varepsilon_{ci}$ , viz kapitola 1.1.3.1. Pro námi uvažovaný pracovní diagram betonu je maximálního napětí v betonu dosaženo při poměrném přetvoření betonu  $\varepsilon_{c3}$  a platí tedy

$$\varepsilon_c = -\varepsilon_{c3}^* \quad (2.1.1)$$

Přetvoření výztuže je rovno přetvoření betonu (viz kapitola 1.1.3.2) a lze jej tedy vypočítat pomocí vztahu (1.1.21), který lze upravit do tvaru

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{s2} = -\varepsilon_{c3} \quad (2.1.2)$$

Při výpočtu síly v tlačené části betonu je uvažováno rovnoměrné rozdělení tlakového napětí na celé výšce průřezu. Pro výpočet napětí v tlačěném betonu platí vztah

$$\sigma_c = -\eta f_{cd}^\dagger \quad (2.1.3)$$

\*Hodnota  $\varepsilon_{c3}$  přebírána z normy je kladná. Průřez je tlačěn, hodnotu deformace je tedy nutno uvažovat záporně.

†Beton je tlačěn, napětí tedy musí být záporné. Z toho důvodu je ve vztahu znaménko mínus.

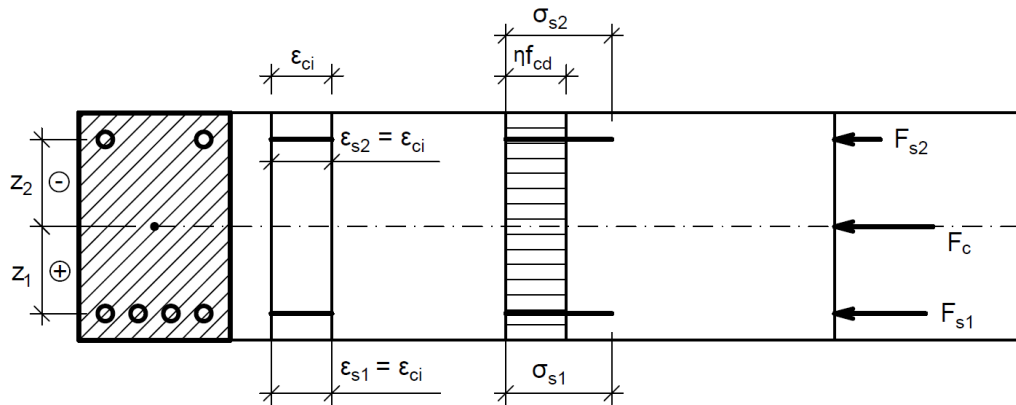
Napětí ve výztuži vypočítáme pomocí vztahu (1.2.2), který lze pro upravit do tvaru

$$\sigma_{s1} = \sigma_{s2} = -\min(|-\varepsilon_{c3}|E_s; f_{yd}). \quad (2.1.4a)$$

Normálová a momentová únosnost je dána vztahy

$$N_{Rd0} = bh\sigma_c + A_{s1}\sigma_{s1} + A_{s2}\sigma_{s2} \quad (2.1.5)$$

$$M_{Rd0} = A_{s1}\sigma_{s1}z_1 + A_{s2}\sigma_{s2}z_2 \quad (2.1.6)$$



Obr. 2.2: Namáhání průřezu v bodě 0

### 2.1.3 Bod 1 a 1' – Převážně tlačný průřez, neutrální osa prochází těžištěm výztuže

U tohoto způsobu namáhání předpokládáme, že na mezi únosnosti průřezu dojde k porušení průřezu drcením tlačného betonu, blíže viz kapitola 1.1.1. Vzhledem k tomu, že neutrální osa prochází průřezem, je maximální dovolené přetvoření betonu  $\varepsilon_{c,max}$  rovno meznímu poměrnému přetvoření betonu  $\varepsilon_{cu}$ . Pro námi zvolený pracovní diagram je hodnota mezního poměrného přetvoření betonu rovna  $\varepsilon_{cu3}$  a pro poměrné přetvoření krajních tlačných vláken betonu tedy platí vztah

$$\varepsilon_{c,max} = -\varepsilon_{cu3}^*. \quad (2.1.7)$$

Při výpočtu síly v tlačené části betonu je uvažováno rovnoměrné rozdělení tlakového napětí na účinné výšce tlačené oblasti  $\lambda x$ , viz kapitola 1.2.7. Pro výpočet napětí v tlačném betonu platí vztah

$$\sigma_c = -\eta f_{cd}^\dagger. \quad (2.1.8)$$

\*Hodnota  $\varepsilon_{cu3}$  přebíraná z normy je kladná. Průřez je tlačný, hodnotu deformace je tedy nutno uvažovat záporně.

†Beton je tlačný, napětí tedy musí být záporné. Z toho důvodu je ve vztahu znaménko mínus.

### 2.1.3.1 Bod 1 – Namáhání kladným momentem, neutrální osa prochází těžištěm dolní výztuže

Pro tento případ namáhání, kdy neutrální osa prochází těžištěm výztuže  $S_1$  platí, že výška tlačené oblasti je rovna vzdálenosti neutrální osy od horních vláken, a ta je rovna vzdálenosti dolní výztuže od horních vláken – tedy platí

$$x = x_{no} = h - d_1. \quad (2.1.9)$$

Přetvoření výztuže na mezi únosnosti průřezu lze vypočítat pomocí vztahů (1.1.10), které lze pro daný případ namáhání dále upravit do tvarů

$$\varepsilon_{s1} = 0, \quad (2.1.10a)$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{(h - d_1) - d_2}{(h - d_1)} (-\varepsilon_{cu3}). \quad (2.1.10b)$$

Napětí ve výztuži na mezi únosnosti průřezu lze vypočítat pomocí vztahu (1.2.2), který lze pro daný případ namáhání dále upravit do tvaru

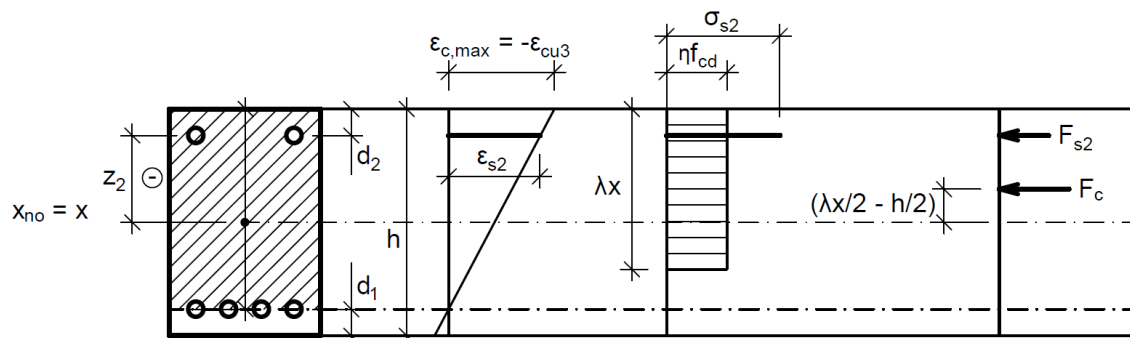
$$\sigma_{s1} = 0, \quad (2.1.11a)$$

$$\sigma_{s2} = -\min(|\varepsilon_{s2}|E_s; f_{yd}). \quad (2.1.11b)$$

Normálová a momentová únosnost je dána vztahy

$$N_{Rd1} = b(\lambda x)\sigma_c + A_{s2}\sigma_{s2}, \quad (2.1.12)$$

$$M_{Rd1} = b(\lambda x)\sigma_c(\lambda x/2 - h/2) + A_{s2}\sigma_{s2}z_2. \quad (2.1.13)$$



Obr. 2.3: Namáhání průřezu v bodě 1

### 2.1.3.2 Bod 1' – Namáhání záporným momentem, neutrální osa prochází těžištěm horní výztuže

Pro tento případ namáhání, kdy neutrální osa prochází těžištěm výztuže  $S_2$  platí, že výška tlačené oblasti je rovna vzdálenosti neutrální osy od dolních vláken, a ta je rovna vzdálenosti horní výztuže od dolních vláken – tedy platí

$$x = x_{no} = h - d_2. \quad (2.1.14)$$

Přetvoření výztuže na mezi únosnosti průřezu lze vypočítat pomocí vztahů (1.1.12), které lze pro daný případ namáhání dále upravit do tvaru

$$\varepsilon_{s1} = \frac{(h - d_2) - d_1}{(h - d_2)} (-\varepsilon_{cu3}), \quad (2.1.15a)$$

$$\varepsilon_{s2} = 0. \quad (2.1.15b)$$

Napětí ve výztuži na mezi únosnosti průřezu lze, stejně jako v případě zatížení kladným momentem, vypočítat pomocí vztahu (1.2.2), který lze pro daný případ namáhání dále upravit do tvaru

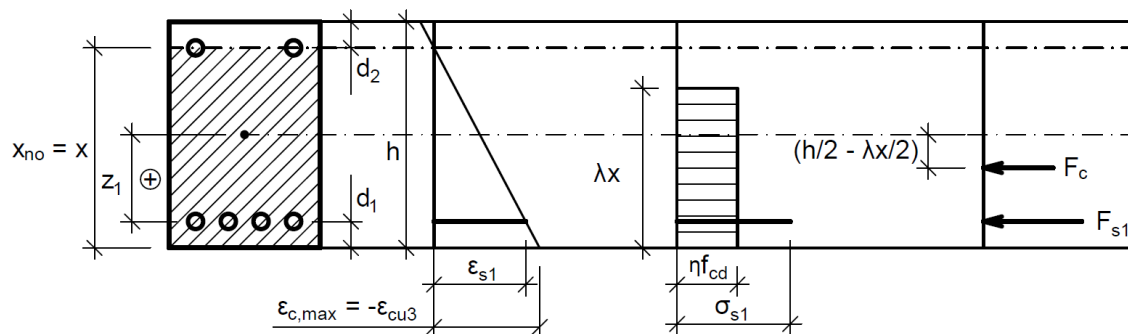
$$\sigma_{s1} = -\min(|\varepsilon_{s1}|E_s; f_{yd}), \quad (2.1.16a)$$

$$\sigma_{s2} = 0. \quad (2.1.16b)$$

Normálová a momentová únosnost je dána vztahy

$$N_{Rd1'} = b(\lambda x)\sigma_c + A_{s1}\sigma_{s1}, \quad (2.1.17)$$

$$M_{Rd1'} = b(\lambda x)\sigma_c(h/2 - \lambda x/2) + A_{s2}\sigma_{s2}z_1. \quad (2.1.18)$$



Obr. 2.4: Namáhání průřezu v bodě 1'

### 2.1.4 Bod 2 a 2' – Částečně tlačенý průřez, tažená výztuž na mezi kluzu

U tohoto způsobu namáhání opět předpokládáme, že na mezi únosnosti průřezu dojde k porušení průřezu drcením tlačené části betonu, blíže viz kapitola 1.1.1. Pro poměrné přetvoření krajních tlačných vláken betonu  $\varepsilon_{c,max}$  platí vztah (2.1.7) a pro napětí v tlačené části betonu  $\sigma_c$  platí vztah (2.1.8).

### 2.1.4.1 Bod 2 – Namáhání kladným momentem, spodní tažená výztuž je na mezi kluzu

Pro tento případ namáhání, kdy je spodní tažená výztuž  $S1$  na mezi kluzu, platí pro poměrné přetvoření této výztuže

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{sy} = f_{yd}/E_s.$$

Vzhledem k předpokladu spodní výztuže na mezi kluzu a předpokladu mezního poměrného přetvoření betonu v krajních tlačných vláknech lze z podobnosti trojúhelníků na obr. 2.5 sestavit rovnici

$$\frac{\varepsilon_{cu3}}{x_{bal,1}} = \frac{\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_{sy}^*}{h - d_1},$$

ze které získáme vztah pro výpočet výšky tlačné oblasti

$$x = x_{bal,1} = (h - d_1) \frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_{sy}}. \quad (2.1.19)$$

Přetvoření horní tlačné výztuže  $S2$  na mezi únosnosti průřezu lze vypočítat pomocí vztahu (1.1.10b), který lze pro daný případ namáhání dále upravit do tvaru

$$\varepsilon_{s2} = \frac{x_{bal,1} - d_2}{x_{bal,1}} (-\varepsilon_{cu3}). \quad (2.1.20)$$

Napětí ve výztuži na mezi únosnosti průřezu lze vypočítat pomocí vztahu (1.2.2), který lze pro daný případ namáhání dále upravit do tvaru

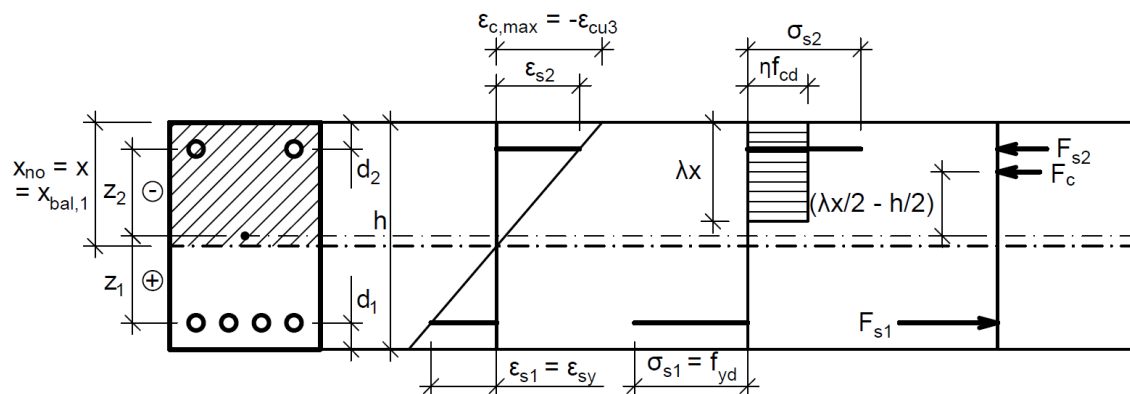
$$\sigma_{s1} = f_{yd}, \quad (2.1.21a)$$

$$\sigma_{s2} = -\min(|\varepsilon_{s2}|E_s; f_{yd}). \quad (2.1.21b)$$

Normálová a momentová únosnost je dána vztahy

$$N_{Rd2} = b(\lambda x_{bal,1})\sigma_c + A_{s1}\sigma_{s1} + A_{s2}\sigma_{s2}, \quad (2.1.22)$$

$$M_{Rd2} = b(\lambda x_{bal,1})\sigma_c(\lambda x_{bal,1}/2 - h/2) + A_{s1}\sigma_{s1}z_1 + A_{s2}\sigma_{s2}z_2. \quad (2.1.23)$$



Obr. 2.5: Namáhání průřezu v bodě 2

\*Výztuž je na mezi kluzu, proto můžeme místo  $\varepsilon_{s1}$  psát  $\varepsilon_{sy}$ .

### 2.1.4.2 Bod 2' – Namáhání záporným momentem, horní tažená výztuž je na mezi kluzu

Postup výpočtu pro bod 2' je analogický s postupem výpočtu pro bod 2. Autor práce proto níže uvádí výklad pouze ve zkrácené formě.

Poměrné přetvoření horní tažené výztuže

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{sy} = f_{yd}/E_s.$$

Z podobnosti trojúhelníků na obr. 2.6 sestavíme rovnici

$$\frac{\varepsilon_{cu3}}{x_{bal,1}} = \frac{\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_{sy}^*}{h - d_2}.$$

ze které získáme vztah pro výpočet výšky tlačené oblasti

$$x = x_{bal,1} = (h - d_2) \frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_{sy}}. \quad (2.1.24)$$

Přetvoření spodní tlačené výztuže vychází ze vztahu (1.1.12b), který lze upravit do tvaru

$$\varepsilon_{s1} = \frac{x_{bal,1} - d_1}{x_{bal,1}} (-\varepsilon_{cu3}). \quad (2.1.25)$$

Napětí ve výztuži je dáno vztahy

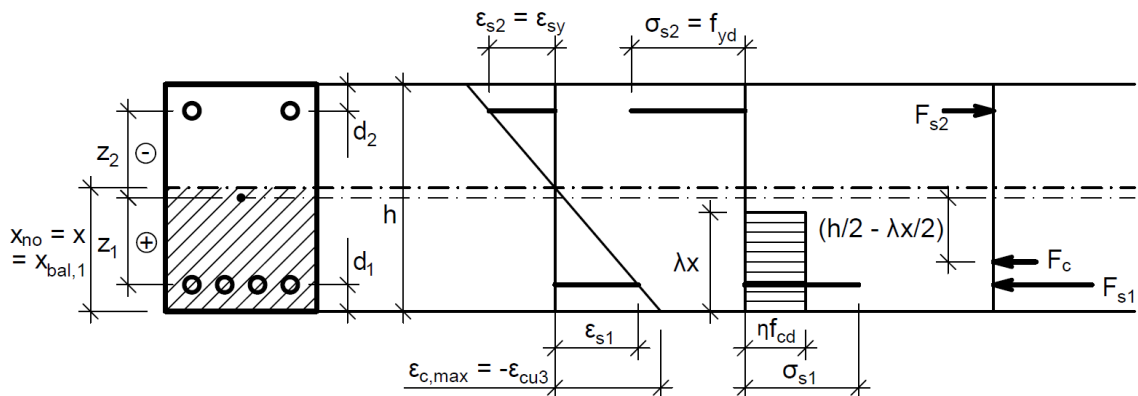
$$\sigma_{s1} = -\min(|\varepsilon_{s1}|E_s; f_{yd}), \quad (2.1.26a)$$

$$\sigma_{s2} = f_{yd}. \quad (2.1.26b)$$

Normálová a momentová únosnost je dána vztahy

$$N_{Rd2'} = b(\lambda x_{bal,1})\sigma_c + A_{s1}\sigma_{s1} + A_{s2}\sigma_{s2}, \quad (2.1.27)$$

$$M_{Rd2'} = b(\lambda x_{bal,1})\sigma_c(h/2 - \lambda x_{bal,1}/2) + A_{s1}\sigma_{s1}z_1 + A_{s2}\sigma_{s2}z_2. \quad (2.1.28)$$



Obr. 2.6: Namáhání průřezu v bodě 2'

\*Výztuž je na mezi kluzu, proto můžeme místo  $\varepsilon_{s1}$  psát  $\varepsilon_{sy}$ .

### 2.1.5 Bod 3 a 3' – Prostě ohýbaný průřez

V případě namáhání prostým ohybem je normálová síla v průřezu rovna nule a musí tedy platit vztah

$$\sum F_i = F_c + F_{s1} + F_{s2} = 0, \quad (2.1.29)$$

$$\begin{aligned} \text{kde } F_c &= b(\lambda x)\sigma_c, \\ F_{s1} &= A_{s1}\sigma_{s1}, \\ F_{s2} &= A_{s2}\sigma_{s2}. \end{aligned}$$

U tohoto způsobu namáhání předpokládáme, že na mezi únosnosti průřezu dojde k drce-ní tlačeneho betonu, blíže viz kapitola 1.1.1. Pro poměrné přetvoření krajních tlačeneých vláken  $\varepsilon_{c,max}$  platí vztah (2.1.7) a pro napětí v tlačené části betonu  $\sigma_c$  platí vztah (2.1.8).

#### 2.1.5.1 Bod 3 – Namáhání kladným momentem

Poměrné přetvoření výztuže lze vypočítat pomocí vztahu (1.1.10), který lze pro daný případ namáhání upravit do tvaru

$$\varepsilon_{s1} = \frac{x - (h - d_1)}{x}(-\varepsilon_{cu3}), \quad (2.1.30a)$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{x - d_2}{x}(-\varepsilon_{cu3}). \quad (2.1.30b)$$

Napětí ve výztuži na mezi únosnosti průřezu lze vypočítat pomocí vztahu (1.2.2), který lze rozepsat následovně

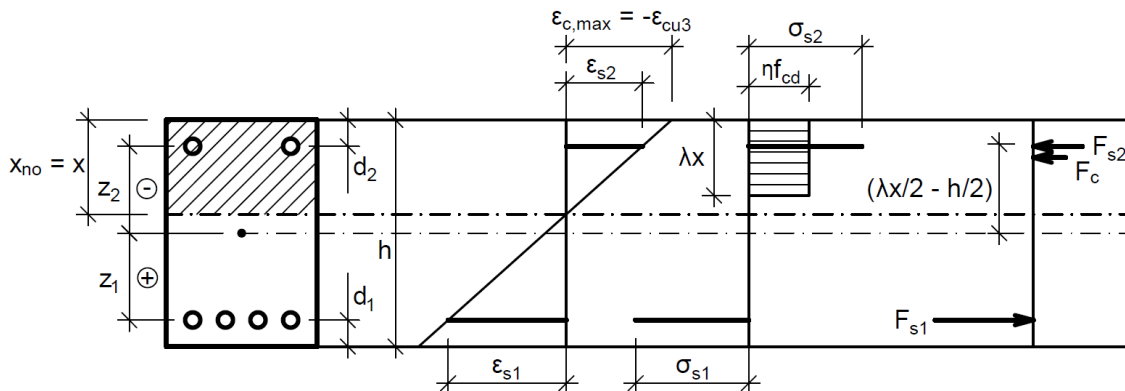
$$\sigma_{s1} = \text{sgn}(\varepsilon_{s1}) \min(|\varepsilon_{s1}|E_s; f_{yd}), \quad (2.1.31a)$$

$$\sigma_{s2} = \text{sgn}(\varepsilon_{s2}) \min(|\varepsilon_{s2}|E_s; f_{yd}). \quad (2.1.31b)$$

Pro výpočet poměrného přetvoření výztuže, a tedy i napětí ve výztuži, je třeba znát výšku tlačené oblasti betonu. Zde nastává problém, jelikož pro výpočet výšky tlačené oblasti betonu nelze sestavit analytický vztah. Autor této práce zvolil jako řešení iteraci metodou půlení intervalu. Vysvětlení iterace metodou půlení intervalu viz příloha A.

Po iteračním stanovení výšky tlačené oblasti můžeme určit napětí ve výztuži pomocí vztahu (2.1.31) a následně můžeme vypočítat momentovou únosnost pomocí vztahu

$$M_{Rd3} = b(\lambda x)\sigma_c(\lambda x/2 - h/2) + A_{s1}\sigma_{s1}z_1 + A_{s2}\sigma_{s2}z_2. \quad (2.1.32)$$



Obr. 2.7: Namáhání průřezu v bodě 3



### 2.1.5.2 Bod 3' – Namáhání záporným momentem

Poměrné přetvoření výztuže lze vypočítat pomocí vztahu (1.1.12), který lze pro daný případ namáhání upravit do tvaru

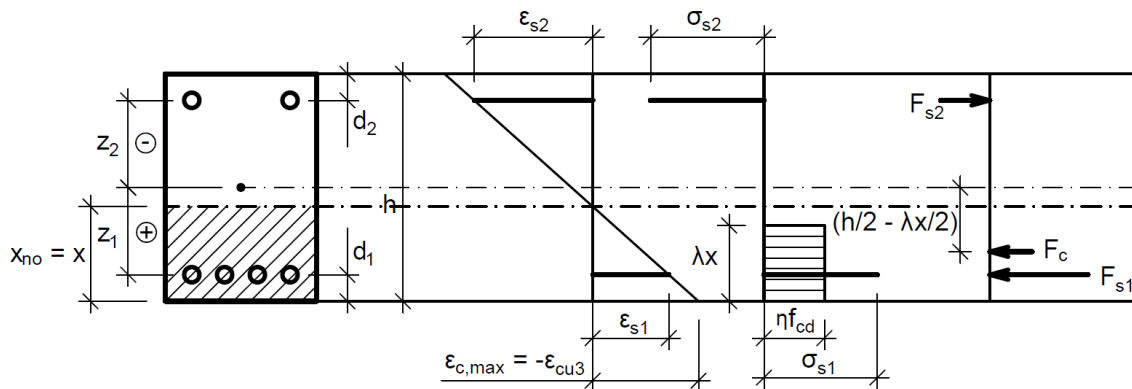
$$\varepsilon_{s1} = \frac{x - d_1}{x} (-\varepsilon_{cu3}), \quad (2.1.33a)$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{x - (h - d_2)}{x} (-\varepsilon_{cu3}). \quad (2.1.33b)$$

Pro napětí ve výztuži platí vztah (2.1.31). Výška tlačené oblasti se určí, stejně jako v případě namáhání průřezu kladným momentem, iterační metodou půlení intervalu.

Po iteračním stanovení výšky tlačené oblasti určíme napětí ve výztuži pomocí vztahu (2.1.31) a následně vypočítáme momentovou únosnost pomocí vztahu

$$M_{Rd3'} = b(\lambda x)\sigma_c(h/2 - \lambda x/2) + A_{s1}\sigma_{s1}z_1 + A_{s2}\sigma_{s2}z_2. \quad (2.1.34)$$



Obr. 2.8: Namáhání průřezu v bodě 3'

### 2.1.6 Bod 4 a 4' – Převážně tažený průřez, neutrální osa prochází těžištěm výztuže

U tohoto způsobu namáhání opět předpokládáme, že na mezi únosnosti průřezu dojde k porušení průřezu drcením tlačeného betonu, blíže viz kapitola 1.1.1. Pro poměrné přetvoření krajních tlačených vláken betonu  $\varepsilon_{c,max}$  platí vztah (2.1.7) a pro napětí v tlačené části betonu  $\sigma_c$  platí vztah (2.1.8). Specifikem toho případu namáhání je to, že na mezi únosnosti průřezu uvažujeme nulové přetvoření té výztuže, která je blíže k tlačeným vláknům.

Postup výpočtu tohoto bodu se mírně liší od postupu v publikaci [3], který zanedbává sílu v tlačeném betonu. V níže uvedeném výpočtu tuto sílu nezanedbáváme, jelikož u nízkých a širokých průřezů může tato síla nabývat značných hodnot.

### 2.1.6.1 Bod 4 – Namáhání kladným momentem, neutrální osa prochází horní výztuží

Níže je uveden postup pro výpočet přetvoření a napětí ve spodní tažené výztuži. Za zmínku však stojí, že v běžných průřezích bude výztuž vždy za mezí kluzu a napětí v ní tedy bude rovno  $f_{yd}$  (za předpokladu použití pracovního diagramu oceli s vodorovnou horní větví). Například při použití výztuže B500B by muselo platit  $d' \leq 0,62 d_2$  (což je u běžných průřezů velmi nepravděpodobné), aby výztuž nebyla za mezí kluzu.

Pro poměrné přetvoření výztuže platí vztahy (1.1.10), které lze pro daný případ namáhání upravit na vztahy

$$\varepsilon_{s1} = \frac{d_1 + d_2 - h}{d_2} (-\varepsilon_{c3}), \quad (2.1.35a)$$

$$\varepsilon_{s2} = 0. \quad (2.1.35b)$$

Dosazením poměrného přetvoření výztuže do vztahu (1.2.2) získáme vztahy pro napětí ve výztuži pro daný případ namáhání

$$\sigma_{s1} = \text{sgn}(\varepsilon_{s1}) \min(|\varepsilon_{s1}| E_s; f_{yd}), \quad (2.1.36a)$$

$$\sigma_{s2} = 0. \quad (2.1.36b)$$

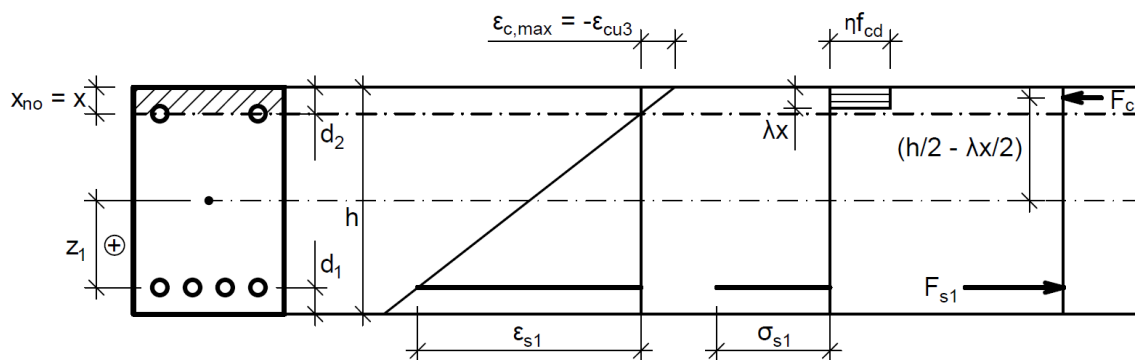
Neutrální osa prochází těžištěm výztuže  $S_2$ , pro výšku tlačené oblasti tedy platí

$$x = d_2. \quad (2.1.37)$$

Normálovou a momentovou únosnost můžeme pak vypočítat pomocí vztahů

$$N_{RdA} = b(\lambda x)\sigma_c + A_{s1}\sigma_{s1}, \quad (2.1.38)$$

$$M_{RdA} = b(\lambda x)\sigma_c(\lambda x/2 - h/2) + A_{s1}\sigma_{s1}z_1. \quad (2.1.39)$$



Obr. 2.9: Namáhání průřezu v bodě 4

### 2.1.6.2 Bod 4' – Namáhání záporným momentem, neutrální osa prochází spodní výztuží

Pro bod 4' rovněž platí, že v běžných průřezích bude tažená výztuž vždy za mezí kluzu a napětí v ní tedy bude rovno  $f_{yd}$ , blíže viz podkapitola 2.1.6.1. I přesto je však níže uveden obecný postup.

Postup výpočtu pro bod 4' je analogický s postupem výpočtu pro bod 4. Autor práce proto níže uvádí výklad ve stručné formě.

Pro poměrné přetvoření výztuže platí vztahy

$$\varepsilon_{s1} = 0, \quad (2.1.40a)$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{d_1 + d_2 - h}{d_2} (-\varepsilon_{c3}). \quad (2.1.40b)$$

Pro napětí ve výztuži platí vztahy

$$\sigma_{s1} = 0, \quad (2.1.41a)$$

$$\sigma_{s2} = \text{sgn}(\varepsilon_{s2}) \min(|\varepsilon_{s2}| E_s; f_{yd}). \quad (2.1.41b)$$

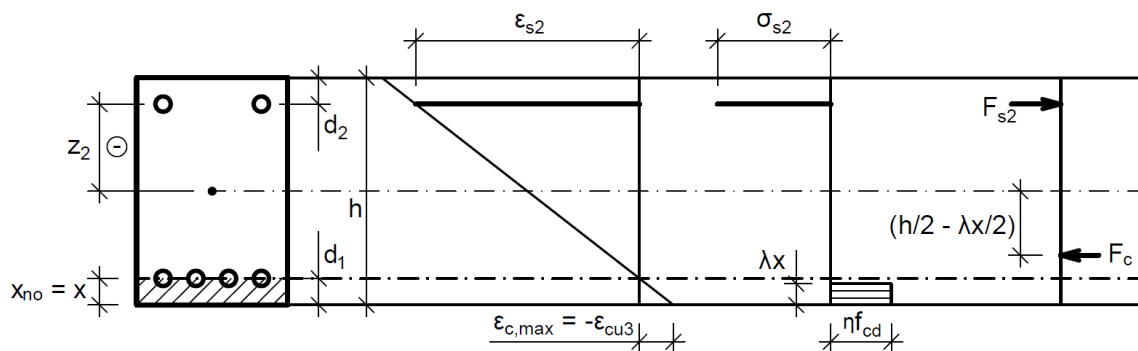
Neutrální osa prochází těžištěm výztuže  $S_1$ , pro výšku tlačené oblasti tedy platí

$$x = d_2. \quad (2.1.42)$$

Pro výpočet normálové a momentové únosnosti průřezu platí vztahy

$$N_{Rd4'} = b(\lambda x)\sigma_c + A_{s2}\sigma_{s2}, \quad (2.1.43)$$

$$M_{Rd4'} = b(\lambda x)\sigma_c(h/2 - \lambda x/2) + A_{s2}\sigma_{s2}z_2. \quad (2.1.44)$$



Obr. 2.10: Namáhání průřezu v bodě 4'

### 2.1.7 Bod 5 – Rovnoměrně rozdělené protažení po celé výšce průřezu

V případě rovnoměrného protažení průřezu je dosaženo meze únosnosti průřezu při dosažení mezního poměrného přetvoření výztuže, a platí tedy

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{s2} = \varepsilon_{ud}. \quad (2.1.45)$$

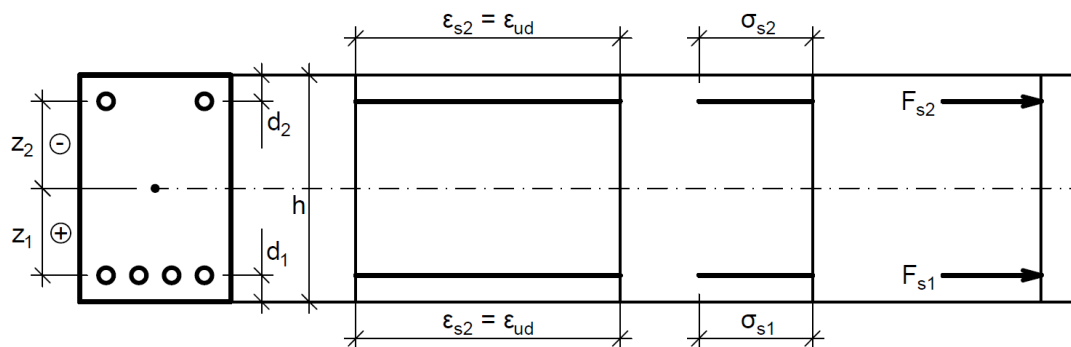
Dosažením poměrného přetvoření výztuže do vztahu (1.2.2) získáme napětí ve výztuži

$$\sigma_{s1} = \sigma_{s2} = f_{yd}. \quad (2.1.46)$$

Normálovou a momentovou únosnost vypočítáme pomocí vztahů

$$N_{Rd5} = A_{s1}\sigma_{s1} + A_{s2}\sigma_{s2}, \quad (2.1.47)$$

$$M_{Rd5} = A_{s1}\sigma_{s1}z_1 + A_{s2}\sigma_{s1}z_1. \quad (2.1.48)$$



Obr. 2.11: Namáhání průřezu v bodě 5

### 2.1.8 Bod 6 a 6' – Průřez namáhaný tlakovou silou s minimální výstředností

Při plném využití betonového průřezu v tlaku se mohou projevit nehomogenity a imperfekce průřezu, a proto, jak požaduje norma [1], předpokládáme minimální výstřednost tlakové normálové síly

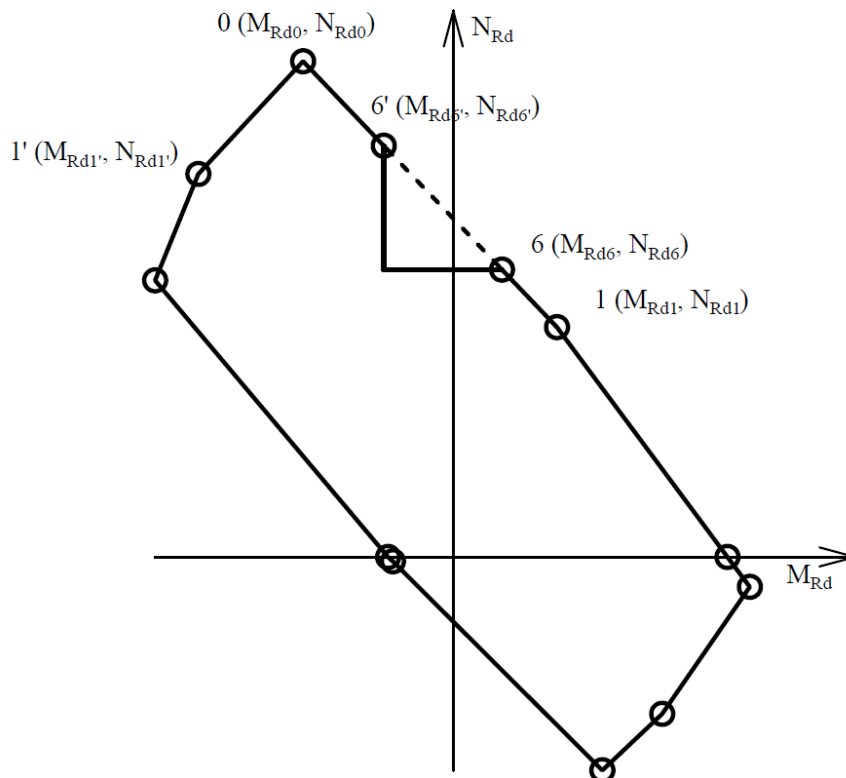
$$e_0 = \max(h/30; 20 \text{ mm}), \quad (2.1.49)$$

kde  $h$  je výška průřezu ve směru namáhání ohybovým momentem.

Norma [1] nspecifikuje od jakého bodu je třeba výstřednost uvažovat. Autor této práce soudí, že se nabízí dvě možnosti – uvažovat výstřednost od střednice prvku (tj.  $h/2$ ), anebo od působíště síly způsobující rovnoměrné stlačení průřezu, tj. působíště síly  $N_{Rd0}$ .

Část interakčního diagramu s maximálními hodnotami tlakových sil (tj. část v okolí bodu 0) vyjadřuje únosnost při namáhání blízkém ideálnímu (rovnoměrnému) tlakovému namáhání, viz kapitola 1.1.3 a 2.1.2. Při tomto ideálním tlakovém namáhání se mohou nejvíce projevit nehomogenity a imperfekce průřezu, a proto je názorem autora této práce, že právě tuto část interakčního diagramu bychom měli vyloučit. Minimální výstřednost tlakové normálové síly tedy uvažujeme od působíště síly  $N_{Rd0}$ . Dalším argumentem pro uvažování minimální výstřednosti od působíště síly  $N_{Rd0}$  je to, že: Uvažovali-li bychom minimální výstřednost od střednice prvku, pak pro výrazně nesouměrně vyztužené průřezy by oříznutí nedávalo smysl, viz obr. 2.12 – body 6 a 6' leží na spojnici bodů 0 a 1 a při omezení diagramu vzniká velmi podivný tvar. Zdůvodnění vodorovného omezení viz podkapitola 2.1.9.1.

Zavedením podmínky minimální výstřednosti tlakové síly omezujeme interakční diagram shora – snížíme tedy hodnotu maximální dovolené normálové síly.



Obr. 2.12: Interakční diagram –  $b = 200 \text{ mm}$ ,  $h = 300 \text{ mm}$ ,  $\rho_1 = 3 \%$  a  $\rho_2 = 0,5 \%$

### 2.1.8.1 Bod 6 – Namáhání kladným momentem

Bodem 6, který vyjadřuje únosnost při namáhání silou působící s výstředností  $e_{Rd6} = e_{Rd0} - e_0$ , omezuje pravou část interakčního diagramu shora.

Vztah pro výpočet normálové a momentové únosnosti průřezu při zatížení silou o výstřednosti  $e_{Rd6}$  lze odvodit následovně.

Víme, že mezi normálovou silou a momentem platí vztah

$$M_{Rd6} = e_{Rd6} N_{Rd6}, \quad (2.1.50)$$

kde  $e_{Rd6} = e_{Rd0} - e_0$ .

Dále víme, že bod 6 leží na spojnicí bodů 0 a 1. Spojnicí těchto bodů je přímka, jež je definována lineární funkcí ve tvaru

$$M_{Rd} = k_{01} N_{Rd} + b_{01}, \quad (2.1.51)$$

kde  $k_{01}$  je směrnice přímky

kde  $b_{01}$  je absolutní člen.

Víme, že body 0 [ $M_{Rd0}$ ;  $N_{Rd0}$ ] a 1 [ $M_{Rd1}$ ;  $N_{Rd1}$ ] leží na dané přímce a dosazením těchto bodů do rovnice (2.1.51) získáme rovnice

$$M_{Rd0} = k_{01} N_{Rd0} + b_{01}, \quad (2.1.52a)$$

$$M_{Rd1} = k_{01} N_{Rd1} + b_{01}, \quad (2.1.52b)$$

ze kterých po jejich odečtení a úpravě výsledku získáme vztah pro výpočet směrnice spojnice bodů 0 a 1

$$k_{01} = \frac{M_{Rd1} - M_{Rd0}}{N_{Rd1} - N_{Rd0}}, \quad (2.1.53)$$

a dosazením vztahu (2.1.53) do rovnice (2.1.52b) získáme vztah pro výpočet absolutního členu funkce spojnice bodů 0 a 1

$$b_{01} = M_{Rd1} - k_{01} N_{Rd1}. \quad (2.1.54)$$

Posledním krokem je vyřešení problému dvou rovnic o dvou neznámých, tj. rovnice (2.1.50) a (2.1.51). Porovnáním těchto dvou rovnic můžeme vyjádřit vztah pro výpočet normálové únosnosti průřezu

$$\begin{aligned} M_{Rd6} &= M_{Rd6}, \\ e_{Rd6} N_{Rd6} &= k_{01} N_{Rd6} + b_{01}, \\ e_{Rd6} N_{Rd6} &= k_{01} N_{Rd6} + (M_{Rd1} - k_{01} N_{Rd1}), \\ N_{Rd6} &= \frac{(M_{Rd1} - k_{01} N_{Rd1})}{e_{Rd6} - k_{01}}. \end{aligned} \quad (2.1.55)$$

Po výpočtu normálové únosnosti průřezu pomocí vztahu (2.1.55) můžeme učít momentovou únosnost průřezu pomocí vztahu (2.1.50).

### 2.1.8.2 Bod 6' – Namáhání záporným momentem

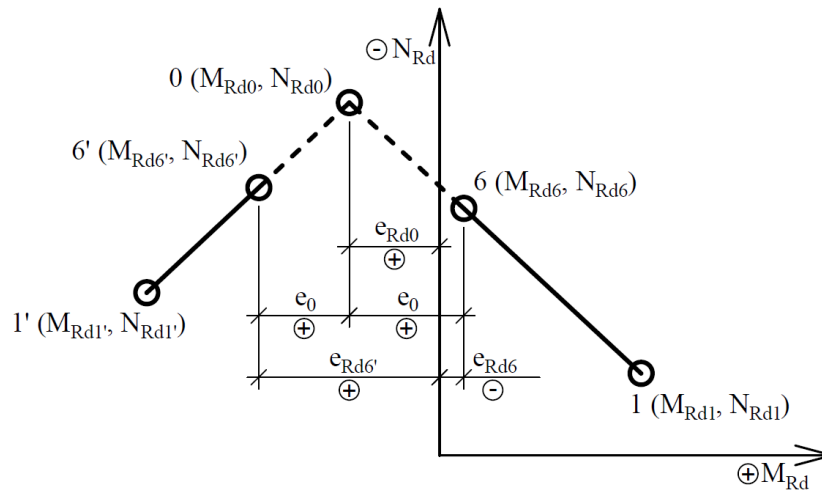
Bodem 6', který vyjadřuje namáhání silou působící s výstředností  $e_{Rd6'} = e_{Rd0} + e_0$ , omezujeme levou část interakčního diagramu shora.

Odvození vztahu pro výpočet normálové únosnosti průřezu při zatížení silou o výstřednosti  $e_{Rd6'}$  je analogické s odvozením vztahu (2.1.55). Normálovou a momentovou únosnost tedy můžeme vypočítat pomocí vztahů

$$N_{Rd6'} = \frac{(M_{Rd1'} - k_{01'} N_{Rd1'})}{e_{Rd6'} - k_{01'}}, \quad (2.1.56)$$

$$M_{Rd6'} = e_{Rd6'} N_{Rd6'}, \quad (2.1.57)$$

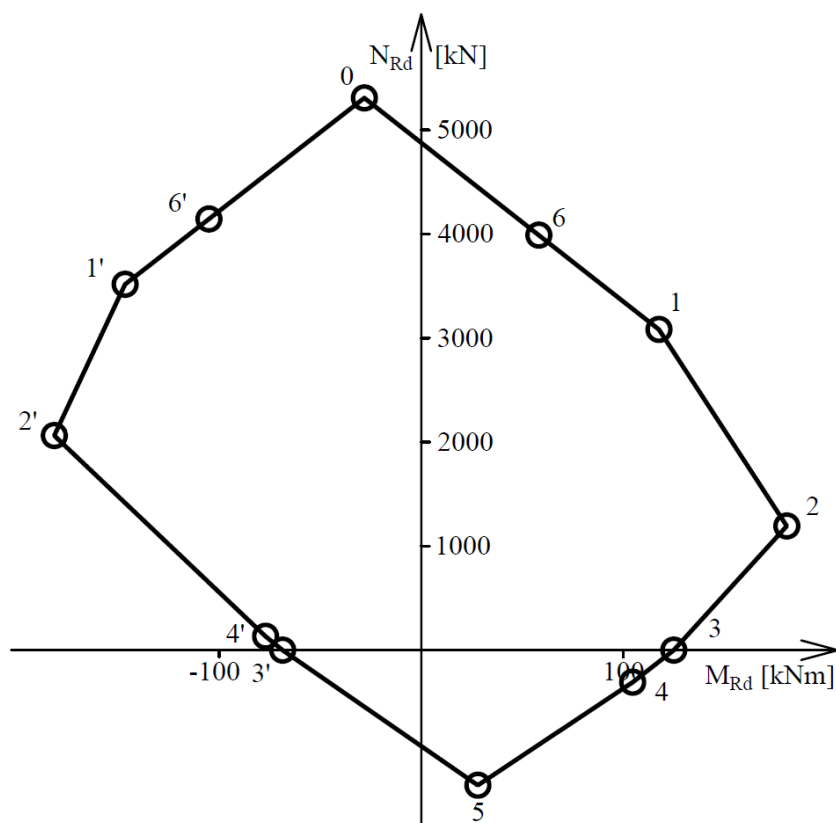
$$\text{kde } k_{01'} = \frac{M_{Rd1'} - M_{Rd0}}{N_{Rd1'} - N_{Rd0}}. \quad (2.1.58)$$



Obr. 2.13: Vyznačení uvažovaných excentricit včetně znamének

### 2.1.9 Sestrojení interakčního diagramu

Pravá část bodového interakčního diagramu je sestrojena vynesáním bodů 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 a jejich spojením popořadě od největší po nejmenší normálovou sílu. Levá část bodového interakčního diagramu je sestrojena vynesáním bodů 0, 1', 2', 3', 4', 5, 6' a jejich spojením popořadě od největší po nejmenší normálovou sílu. Za zmínku stojí fakt, že číslování bodů nemusí být vždy v souladu s pořadím daným hodnotou normálové síly – například v případě nízkých a širokých průřezů může být normálová síla v bodě 4 záporná, a tudíž řazení bodů dle velikosti normálové síly vzestupně by mohlo být Bod 2' → Bod 4' → Bod 3' → Bod 5, viz obr. 2.14. Tlaková síla je vynášena záporně směrem nahoru, moment je vynášen kladně směrem vpravo.



Obr. 2.14: Interakční diagram –  $b = 1000$  mm,  $h = 200$  mm,  $\rho_1 = 1$  % a  $\rho_2 = 0,5$  %

### 2.1.9.1 Omezení horní části diagramu

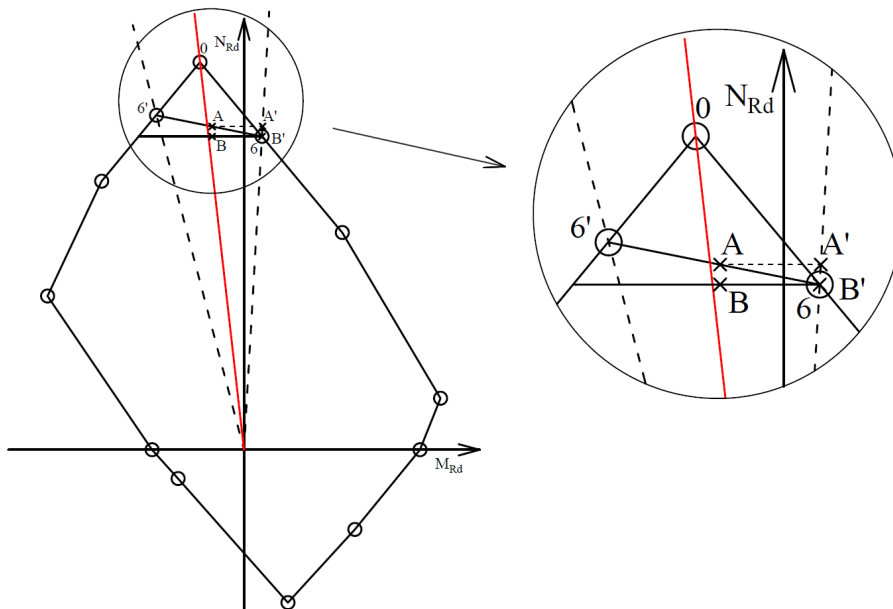
Omezení horní části diagramu z důvodu požadované minimální výstřednosti tlakové síly  $e_0$  je sestrojeno tak, že je zvolena větší (méně záporná) hodnota z hodnot  $N_{Rd6}$  a  $N_{Rd6'}$ , a tou je proložena vodorovná úsečka, která omezuje diagram shora. V publikaci [3] je horní část diagramu omezena spojnici bodů 6 a 6', toto však autor této práce považuje za nesprávný postup a níže uvádí argumenty pro své tvrzení.

Spojíme-li počátek souřadného systému a bod 0, získáme tak přímku, na níž leží body jejichž excentricita od střednice je  $e_{Rd0}$ , tj. body vyjadřující namáhání způsobující rovnoměrné stlačení průřezu – přímku značíme na obr. 2.15 červenou čarou. Spojnice počátku a bodu 6 je přímka, na níž leží body vyjadřující namáhání silou, jejíž excentricita od střednice je  $e_{Rd6} = e_{Rd0} - e_0$ , tj. požadovaná minimální výstřednost síly od střednice průřezu – přímku značíme přerušovaně. Spojnice počátku a bodu 6' je přímka, na níž leží body vyjadřující namáhání silou, jejíž excentricita od střednice je  $e_{Rd6'} = e_{Rd0} + e_0$ , tj. požadovaná minimální výstřednost síly od střednice průřezu – přímku značíme přerušovaně. Jak lze vidět na obr. 2.15, všechny body ležící mezi čárkovanými čarami podmínku minimální výstřednosti nesplňují (jejich výstřednost od střednice je menší než požadovaná minimální výstřednost). Chceme-li uvážit podmínku minimální výstřednosti pro bod ležící v této oblasti, musíme tento bod „posunout“ horizontálně (neměníme normálovou sílu, pouze zvětšujeme excentricitu) na průnik s čárkovanou čarou.

V případě, že bychom zvolili postup uvedený v publikaci [3] a spojili bod 6 a 6', bod A by měl vyhovovat návrhu, jelikož neleží mimo interakční diagram. Tento bod však nesplňuje podmínku minimální výstřednosti, a proto jej musíme „posunout“ na průnik s čárkovanou čarou – bod A'. Tento posunutý bod A' však leží mimo interakční diagram a bod tedy

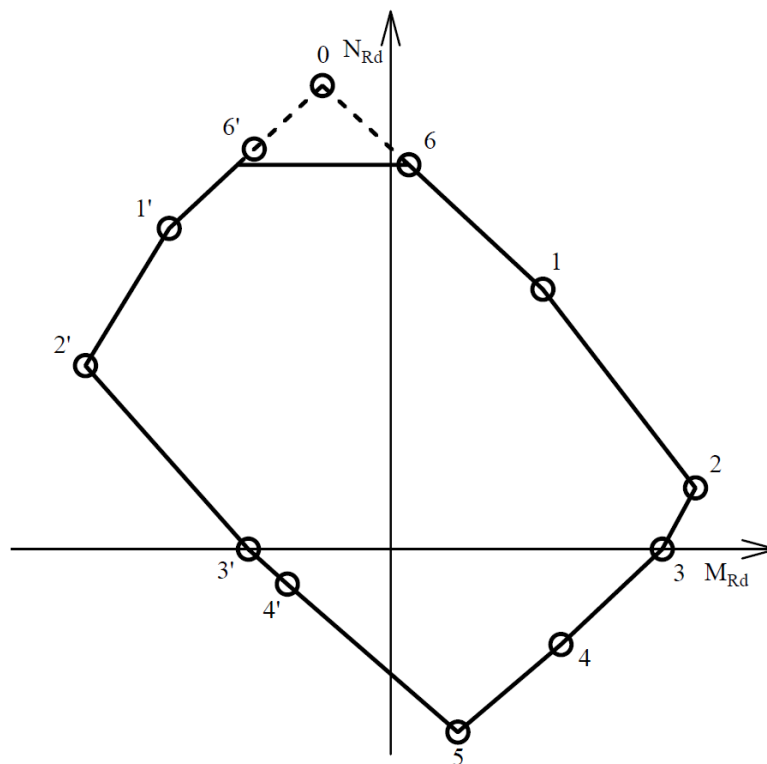


nevyhovuje – zvolený způsob zajištění splnění podmínky minimální výstřednosti (spojení bodů 6 a 6') je tedy nesprávný. Uděláme-li však horizontální úsečku procházející bodem 6 a zvolíme bod B na této úsečce, pak tento bod po „posunutí“ na průnik s čárkovanou čarou leží v bodě 6, tedy neleží mimo interakční diagram, a tedy vyhovuje – tento postup zajištění splnění podmínky minimální výstřednosti je tudíž správný.



**Obr. 2.15:** Schéma popisující vodorovné omezení horní části diagramu

Interakční diagram průřezu s vodorovným omezením horní části diagramu je zobrazen níže na [obr. 2.16](#).



**Obr. 2.16:** Interakční diagram s vodorovným omezením horní části