



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí

**Tvorba výpočetní aplikace pro analýzu
železobetonových sloupů pomocí interakčního diagramu**

Development of Computer Application for Analysis of
Reinforced Concrete Columns by Interaction Diagram

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb
Vedoucí práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D.

Jakub Holan

Praha, 2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Holan Jméno: Jakub Osobní číslo: 410750

Zadávací katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Tvorba výpočetní aplikace pro analýzu železobetonových sloupů pomocí interakčního diagramu

Název diplomové práce anglicky: Development of Computer Application for Analysis of Reinforced Concrete Columns by Interaction Diagram

Pokyny pro vypracování:

Popis postupu pro tvorbu interakčního diagramu s využitím nelineárních pracovních diagramů pro symetricky i nesymetricky vyztužené průřezy.

Popis způsobů porušení železobetonových prvků.

Popis materiálových modelů.

Algoritmizace problému. Implementace algoritmu v prostředí MATLAB. Tvorba uživatelského rozhraní pro vytvořenou aplikaci. Popis aplikace. Příklady využití aplikace

Seznam doporučené literatury:

[1] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, ed. 2. Praha: Český normalizační institut, 2011.

[2] PROCHÁZKA, Jaroslav a kol. Navrhování betonových konstrukcí 1. 2., upr. vyd. Praha: ČBS Servis, 2006.

[3] GILBERT, Raymond Ian, Neil Colin MICKLEBOROUGH a Gianluca RANZI. Design of Prestressed Concrete to Eurocode 2, Second Edition. Boca Raton: CRC Press, 2017.

[4] BEEBY, Andrew W. a R. S. NARAYANAN. Designers' Handbook to Eurocode 2 Part 1.1: Design of concrete structures London: Thomas Telford, 1995.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 10.10.2017

Termín odevzdání diplomové práce: 7. 1. 2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

10.10.2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Jakub Holan

Název diplomové práce: Tvorba výpočetní aplikace pro analýzu železobetonových sloupů pomocí interakčního diagramu

Základní část: Tvorba výpočetní aplikace pro analýzu železobetonových sloupů pomocí interakčního diagramu podíl: 100 %

Formulace úkolů:

Popis postupu pro tvorbu interakčního diagramu s využitím nelineárních pracovních diagramů pro symetricky i nesymetricky vyztužené průřezy.

Popis způsobů porušení železobetonových prvků.

Popis materiálových modelů.

Algoritmizace problému.

Implementace algoritmu v prostředí MATLAB.

Tvorba uživatelského rozhraní pro vytvořenou aplikaci.

Popis aplikace.

Příklady využití aplikace

Podpis vedoucího

Datum: 10. 10. 2017

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: - podíl: 0 %

Konzultant (jméno, katedra): -

Formulace úkolů: -

Podpis konzultanta: Datum:

3. Část: - podíl: 0 %

Konzultant (jméno, katedra): -

Formulace úkolů: -

Podpis konzultanta: Datum:

4. Část: - podíl: 0 %

Konzultant (jméno, katedra): -

Formulace úkolů: -

Podpis konzultanta: Datum:

Poznámka: Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci (vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1.stranou zadání již ve 2.týdnu semestru)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 7. ledna 2018

Podpis

Handwritten signature in black ink, appearing to read 'Kobus'.

Poděkování

Touto cestou bych rád velice poděkoval vedoucímu této diplomové práce Ing. Radku Štefanovi, Ph.D., za ochotné vedení, předané znalosti, podnětné rady při konzultacích, věnovaný čas a zapůjčenou literaturu.

Tato diplomová práce byla vypracována za podpory grantu Studentské grantové soutěže ČVUT v Praze č. SGS17/044/OHK1/1T/11.

V Praze dne 7. ledna 2018

Jakub Holan

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou porušení a únosnosti železobetonových průřezů a sestrojení interakčního diagramu oboustranně vyztuženého železobetonového obdélníkového průřezu. Cílem této práce je podrobné teoretické prozkoumání problematiky a vytvoření výpočetního programu pro sestrojení přesného interakčního diagramu.

Práce přehledně a podrobně shrnuje a popisuje způsoby porušení železobetonových průřezů, pracovní diagramy materiálů a postupy sestrojení interakčních diagramů průřezů. Práce představuje algoritmy pro sestrojení tří typů interakčních diagramů. Prvním z nich je zjednodušený bodový interakční diagram, při jehož sestrojení jsou uvažovány nejjednodušší pracovní diagramy materiálů. Druhý algoritmus rovněž uvažuje nejjednodušší pracovní diagramy materiálů, avšak sestrojuje interakční diagram z mnoha bodů. Třetím je mnohobodový interakční diagram, při jehož sestrojení jsou používány nelineární pracovní diagramy materiálů. Pomocí třetího algoritmu byla vytvořena parametrická studie, v níž bylo vyšetřeno, jaký mají jednotlivé vstupní parametry výpočtu vliv na velikost a tvar interakčního diagramu průřezu.

V rámci této práce byl vytvořen program pro sestrojení interakčního diagramu. K zadávání vstupních hodnot slouží vytvořené grafické rozhraní programu a při výpočtech jsou používány výše zmíněné algoritmy. Tento program je popsán v této práci a přiložen jako příloha.

Hlavním přínosem této práce je vytvořený program, který umožňuje rychle a jednoduše sestrojít přesný interakční diagram průřezu a rovněž umožňuje sestrojít bodový interakční diagram průřezu, který lze porovnat s ručním výpočtem. Dalším významným výstupem této práce je přehledné sjednocení a popsání celé problematiky porušení a únosnosti železobetonových průřezů namáhaných normálou silou a ohybovým momentem. Práce poskytuje jak dostatek informací pro důkladné teoretické pochopení problematiky, tak ucelený popis postupu výpočtu únosnosti průřezu a popis sestrojení interakčního diagramu, včetně vysvětlení a odvození všech vztahů.

Klíčová slova: interakční diagram, železobeton, oboustranně vyztužený průřez, způsoby porušení, pracovní diagram, výpočetní pomůcka, program.

Abstract

This thesis deals with the matter of destruction and load-bearing capacity of reinforced concrete cross-sections and the matter of constructing interaction diagram of a reinforced concrete rectangular cross-section. The objective of this thesis is a thorough theoretical examination of said matters and a development of a computer program capable of constructing interaction diagrams.

Thesis clearly and thoroughly summarizes and describes potential manners of cross-section destruction, stress-strain behaviour of materials and methods of constructing interaction diagrams. Thesis introduces three algorithms for the construction of three different types of interaction diagrams. The first type is a simplified point interaction diagram assuming the most simplified stress-strain behaviour of materials. For the second one, also the most simplified stress-strain behaviour of materials is assumed, however the diagram is constructed using multiple points. Third type is an interaction diagram assuming complex nonlinear stress-strain behaviour of materials. Using third, the most complex, algorithm a parametric study has been conducted. This study has examined and analysed the impacts of each input argument on the size and shape of interaction diagram of reinforced concrete cross-sections.

As a part of this thesis a computer program capable of constructing interaction diagrams was developed. The program is an implementation of the three aforementioned algorithms. A graphical user interface is used to input arguments for the computation and construction of the interaction diagram. The program is described in this thesis and attached in the appendix of this thesis.

The most significant contribution of this thesis lies in providing a computer program capable of constructing accurate interaction diagram as well as constructing simplified point interaction diagram which can be compared with calculation by hand. Another significant output of this thesis is an organized unification and description of the matter regarding destruction and load-bearing capacity of reinforced concrete cross-sections loaded by bending moment and normal force. This thesis provides enough information for thorough understanding of said matter. Thesis also provides unified description of how to calculate load-bearing capacity of a cross-section and how to construct interaction diagram of a reinforced concrete cross-section, including explanations and derivations of all formulas.

Key words: interaction diagram, reinforced concrete, double-sided reinforcement of cross-section, manners of destruction, stress-strain behaviour, computing tool, program.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 1 |
| 1 Teoretická část | 3 |
| 1.1 Způsoby porušení železobetonových prvků | 5 |
| 1.1.1 Porušení dosažením maximálního dovoleného poměrného přetvoření betonu v tlaku | 5 |
| 1.1.2 Porušení dosažením mezního poměrného přetvoření výztuže | 13 |
| 1.1.3 Porušení při rovnoměrném stlačení | 16 |
| 1.1.4 Porušení při rovnoměrném tahu | 17 |
| 1.2 Závislost napětí na přetvoření materiálu | 18 |
| 1.2.1 Pracovní diagram oceli návrhový s vodorovnou horní větví | 18 |
| 1.2.2 Pracovní diagram oceli návrhový se stoupající horní větví | 19 |
| 1.2.3 Pracovní diagram betonu pro nelineární analýzu konstrukce | 20 |
| 1.2.4 Pracovní diagram betonu návrhový parabolicko-rektangulární | 21 |
| 1.2.5 Pracovní diagram betonu návrhový bilineární | 22 |
| 1.2.6 Pracovní diagram betonu návrhový s klesající větví | 23 |
| 1.2.7 Rovnoměrné obdélníkové rozdělení napětí v tlačené oblasti betonu | 24 |
| 1.2.8 Porovnání pracovních diagramů betonu | 25 |
| 1.3 Pevnostní a deformační charakteristiky betonu | 28 |
| 1.3.1 Analytické vztahy | 29 |
| 2 Praktická část | 31 |
| 2.1 Bodový interakční diagram | 33 |
| 2.1.1 Předpoklady výpočtu | 34 |
| 2.1.2 Bod 0 – Rovnoměrně rozdělené stlačení po celé výšce průřezu | 34 |
| 2.1.3 Bod 1 a 1' – Převážně tlačený průřez, neutrální osa prochází těžištěm výztuže | 35 |
| 2.1.4 Bod 2 a 2' – Částečně tlačený průřez, tažená výztuž na mezi kluzu | 37 |
| 2.1.5 Bod 3 a 3' – Prostě ohýbaný průřez | 40 |
| 2.1.6 Bod 4 a 4' – Převážně tažený průřez, neutrální osa prochází těžištěm výztuže | 41 |
| 2.1.7 Bod 5 – Rovnoměrně rozdělené protažení po celé výšce průřezu | 44 |
| 2.1.8 Bod 6 a 6' – Průřez namáhaný tlakovou silou s minimální výstředností | 45 |
| 2.1.9 Sestrojení interakčního diagramu | 47 |
| 2.2 Mnohobodový interakční diagram – nejjednodušší pracovní diagramy | 51 |
| 2.2.1 Předpoklady výpočtu | 51 |
| 2.2.2 Kontrola minimální výstřednosti tlakové normálové síly | 52 |
| 2.2.3 Pravá část diagramu – namáhání kladným momentem | 54 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 2.2.4 | Levá část diagramu – namáhání záporným momentem | 57 |
| 2.2.5 | Sestrojení interakčního diagramu | 59 |
| 2.2.6 | Popis interakčního diagramu | 59 |
| 2.3 | Mnohobodový interakční diagram – libovolné pracovní diagramy | 63 |
| 2.3.1 | Předpoklady výpočtu | 63 |
| 2.3.2 | Kontrola minimální výstřednosti tlakové normálové síly | 64 |
| 2.3.3 | Pravá část diagramu – namáhání kladným momentem | 64 |
| 2.3.4 | Levá část diagramu – namáhání záporným momentem | 70 |
| 2.3.5 | Rovnoměrně rozdělené stlačení po výšce průřezu | 74 |
| 2.3.6 | Rovnoměrné rozdělení protažení po výšce průřezu | 75 |
| 2.3.7 | Sestrojení interakčního diagramu | 75 |
| 2.3.8 | Popis interakčního diagramu | 76 |
| 2.4 | Parametry ovlivňující tvar interakčního diagramu | 81 |
| 2.4.1 | Základní parametry průřezu | 81 |
| 2.4.2 | Vliv betonu a výztuže na celkovou únosnost průřezu | 81 |
| 2.4.3 | Poměr výšky ku šířce průřezu | 83 |
| 2.4.4 | Třída výztuže | 84 |
| 2.4.5 | Pracovní diagramy oceli | 86 |
| 2.4.6 | Plocha výztuže | 87 |
| 2.4.7 | Vzdálenost výztuže od bližších krajních vláken | 87 |
| 2.4.8 | Tažnost výztuže | 92 |
| 2.4.9 | Třída betonu | 93 |
| 2.4.10 | Pracovní diagramy betonu | 95 |
| 2.5 | Program pro sestavení interakčního diagramu | 97 |
| 2.6 | Porovnání řešených příkladů | 98 |
| 2.6.1 | Příklad 1 | 98 |
| 2.6.2 | Příklad 2 | 101 |
| 3 | Shrnutí a diskuze | 105 |
| | Závěr | 109 |
| | Literatura | 111 |
| A | Iterace metodou půlení intervalů | 113 |
| A.1 | Vzorový příklad iterace metodou půlení intervalů | 113 |
| B | Manuál k programu IDP 1.0 | 117 |
| B.1 | Instalace knihovny a programu | 118 |
| B.1.1 | Uživatel programu nemá nainstalované prostředí MATLAB R2017a | 118 |
| B.1.2 | Uživatel programu má nainstalované prostředí MATLAB R2017a | 121 |
| B.2 | Spuštění programu a výběr typu interakčního diagramu | 122 |
| B.3 | Bodový interakční diagram | 124 |
| B.4 | Mnohobodový (zjednodušený) interakční diagram | 128 |
| B.5 | Mnohobodový interakční diagram | 131 |
| B.6 | Další obecné informace k programu | 136 |
| B.7 | Systémové informace | 136 |

Popis použitých symbolů

| | |
|---------------|--|
| $S1$ | výztuž 1 (spodní výztuž) |
| $S2$ | výztuž 2 (horní výztuž) |
| d' | osová vzdálenost mezi horní a dolní výztuží |
| d_1 | osová vzdálenost výztuže 1 od nejbližších krajních (spodních) vláken |
| d_2 | osová vzdálenost výztuže 2 od nejbližších krajních (horních) vláken |
| e_0 | požadovaná minimální výstřednost tlakové normálové síly (od působíště síly N_{Rd0}) |
| e_{Rd0} | výstřednost normálové síly N_{Rd0} od střednice |
| e_{Rd6} | výstřednost normálové síly N_{Rd6} od střednice |
| $e_{lim,l}$ | požadovaná minimální výstřednost střednice, platí pro body na levé části interakčního diagramu |
| $e_{lim,p}$ | požadovaná minimální výstřednost střednice, platí pro body na pravé části interakčního diagramu |
| i | pořadí iterace v cyklu (cyklus poloh neutrální osy) |
| j | pořadí iterace v cyklu (cyklus vrstev betonu) |
| k_r | krok neutrální osy (o kolik mm se změní poloha neutrální osy mezi jednotlivými iteracemi cyklu) |
| x_1 | začátek intervalu |
| x_2 | konec intervalu |
| $x_{bal,1}$ | balanční vzdálenost neutrální osy (poloha, kdy nejnamáhanější tažená výztuž je na mezi kluzu) |
| x_{hr} | hraniční vzdálenost neutrální osy od nejvíce tlačných vláken, viz (1.1.2) |
| $x_{max,l}$ | maximální dovolená vzdálenost neutrální osy od dolních tlačných vláken, při které je dolní tažená výztuž za mezi kluzu |
| $x_{max,p}$ | maximální dovolená vzdálenost neutrální osy od horních tlačných vláken, při které je horní tažená výztuž za mezi kluzu |
| $x_{min,1,l}$ | požadovaná minimální vzdálenost neutrální osy od krajních dolních vláken, při které je poměrné přetvoření horní tlačné výztuže větší než 0, $8\varepsilon_{ci}$ |
| $x_{min,1,p}$ | požadovaná minimální vzdálenost neutrální osy od krajních horních vláken, při které je poměrné přetvoření dolní tlačné výztuže větší než 0, $8\varepsilon_{ci}$ |
| $x_{min,2,l}$ | požadovaná minimální vzdálenost neutrální osy od dolních tlačných vláken, při které je poměrné přetvoření horních tlačných vláken průřezu větší než 0, $8\varepsilon_{ci}$ |
| $x_{min,2,p}$ | požadovaná minimální vzdálenost neutrální osy od horních tlačných vláken, při které je poměrné přetvoření dolních tlačných vláken průřezu větší než 0, $8\varepsilon_{ci}$ |

| | |
|-----------------------|--|
| x_{no} | poloha neutrální osy, kladně směrem k méně tlačným (příp. více taženým) vláknům |
| x_v | poloha vrstvy, tj. vzdálenost od neutrální osy |
| A_{si} | průřezová plocha výztuže i |
| E_s | návrhová hodnota modulu pružnosti výztuže |
| E_{cm} | průměrná hodnota modulu pružnosti betonu |
| F_c | síla v tlačném betonu |
| F_i | i -tá síla |
| $F_{c,v}$ | síla ve vrstvě betonu |
| F_{si} | síla ve výztuži i |
| $M_{F_{c,v}}$ | moment ke střednici od síly ve vrstvě betonu |
| M_{F_c} | moment ke střednici od síly v tlačené části betonu |
| M_{Rd0} | normálová únosnost průřezu pro bod 0 (rovnoměrné stlačení průřezu po celé jeho výšce) |
| M_{Rdi} | momentová únosnost průřezu pro bod i |
| M_{Rd} | momentová únosnost průřezu (kladný moment táhne dolní vlákna průřezu) |
| N_{Rd0} | normálová únosnost průřezu pro bod 0 (rovnoměrné stlačení průřezu) |
| N_{Rdi} | normálová únosnost průřezu pro bod i |
| N_{Rd} | normálová únosnost průřezu |
| $N_{min,l}$ | největší tlaková síla na levé straně diagramu, blíže viz kapitola 2.2.5 |
| $N_{min,p}$ | největší tlaková síla na pravé straně diagramu, blíže viz kapitola 2.2.5 |
| η | součinitel pro obdélníkové rozdělení napětí (viz kapitola 1.2.7) |
| λ | součinitel pro obdélníkové rozdělení napětí (viz kapitola 1.2.7) |
| ρ_i | stupeň vyztužení i -tou výztuží |
| $\sigma_{c,bilin}$ | napětí v betonu při použití bilineárního pracovního diagramu |
| $\sigma_{c,par-rek}$ | napětí v betonu při použití parabolicko-rektangulárního pracovního diagramu |
| σ_c | napětí v tlačném betonu |
| σ_{s1} | napětí ve výztuži 1 |
| σ_{s2} | napětí ve výztuži 2 |
| σ_{si} | napětí ve výztuži i |
| σ_s | napětí ve výztuži |
| $\varepsilon_{c,dol}$ | poměrné přetvoření krajních dolních vláken betonového průřezu |
| $\varepsilon_{c,hor}$ | poměrné přetvoření krajních horních vláken betonového průřezu |
| $\varepsilon_{c,kr}$ | poměrné přetvoření krajních nejvíce tlačných (případně nejméně tažených) vláken betonového průřezu |
| $\varepsilon_{c,max}$ | maximální dovolené poměrné přetvoření betonu v nejvíce namáhaných tlačných vláknech |
| ε_{c1} | poměrné přetvoření betonu v tlaku při dosažení maximálního napětí v betonu (obecný pracovní diagram) |
| ε_{c2} | poměrné přetvoření betonu oddělující parabolickou a rektangulární část pracovního diagramu |
| ε_{c3} | poměrné přetvoření betonu oddělující lineární a konstantní část pracovního diagramu |

| | |
|---------------------|---|
| ε_{ci} | poměrné přetvoření betonu v tlaku při dosažení maximálního napětí v betonu (i-tý pracovní diagram) |
| ε_{cu1} | mezní poměrné přetvoření betonu v tlaku pro obecný pracovní diagram (dosazujeme kladnou hodnotu, jelikož takto ji uvažuje norma) |
| ε_{cu2} | mezní poměrné přetvoření betonu pro parabolicko-rektangulární pracovní diagram (dosazujeme kladnou hodnotu, jelikož takto ji uvažuje norma) |
| ε_{cu3} | mezní poměrné přetvoření betonu pro bilineární pracovní diagram (dosazujeme kladnou hodnotu, jelikož takto ji uvažuje norma) |
| ε_{cu} | mezní poměrné přetvoření betonu v tlaku (dosazujeme zápornou hodnotu, jelikož se jedná o tlakovou deformaci) |
| ε_c | poměrné přetvoření betonu |
| ε_{si} | poměrné přetvoření výztuže i |
| ε_{sy} | poměrné přetvoření výztuže na mezi kluzu ($\varepsilon_{sy} = f_{yd}/E_s$) |
| ε_s | poměrné přetvoření výztuže |
| ε_{ud} | návrhová hodnota mezního přetvoření výztuže, viz kapitola 1.1.2 |
| ε_{uk} | charakteristická hodnota mezního přetvoření výztuže, viz kapitola 1.1.2 |
| ε_v | poměrné přetvoření vrstvy betonu |
| b_{01} | absolutní člen lineární funkce popisující spojnicí bodů 0 a 1 |
| b | šířka průřezu |
| e_{Rdi} | výstřednost normálové síly v bodě i |
| f_{cd} | návrhová hodnota pevnosti betonu v tlaku |
| f_{ck} | charakteristická hodnota pevnosti betonu v tlaku |
| f_{cm} | průměrná hodnota pevnosti betonu v tlaku |
| f_{ud} | návrhová hodnota napětí ve výztuži na mezi pevnosti |
| f_{uk} | charakteristická hodnota napětí ve výztuži na mezi pevnosti |
| f_{yd} | návrhová hodnota napětí ve výztuži na mezi kluzu |
| f_{yk} | charakteristická hodnota napětí ve výztuži na mezi kluzu |
| h_t | vzdálenost těžiště průřezu od horních vláken průřezu (uvažováno rovné $h/2$) |
| h_v | výška vodorovné vrstvy betonu |
| h | výška průřezu |
| k_{ij} | směrnice lineární funkce popisující spojnicí bodů i a j |
| n | exponent pro výpočet napětí dle parabolicko-rektangulárního diagramu |
| x | výška tlačené oblasti |
| z_1 | vzdálenost výztuže 1 od těžiště (kladně směrem od těžiště k dolním vláknům) |
| z_2 | vzdálenost výztuže 2 od těžiště (záporně směrem od těžiště k horním vláknům) |

Seznam obrázků

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Hraniční hodnota vzdálenosti neutrální osy | 5 |
| 1.2 | Schéma porušení dosažením mezního poměrného přetvoření v betonu | 6 |
| 1.3 | Poměrné přetvoření v krajních tlačných vláknech betonu | 8 |
| 1.4 | Třída betonu C16/20, stupeň vyztužení 4 % | 9 |
| 1.5 | Třída betonu C25/30, stupeň vyztužení 4 % | 9 |
| 1.6 | Třída betonu C40/50, stupeň vyztužení 4 % | 9 |
| 1.7 | Poměrné přetvoření betonu při porušení dosažením mezního přetvoření betonu | 10 |
| 1.8 | Schéma pro odvození vztahu pro výpočet ε_s při namáhání kladným momentem | 11 |
| 1.9 | Schéma pro odvození vztahu pro výpočet ε_s při namáhání záporným momentem | 12 |
| 1.10 | Schéma porušení dosažením mezního poměrného přetvoření výztuže | 13 |
| 1.11 | Poměrné přetvoření betonu při porušení dosažením mezního přetvoření výztuže | 14 |
| 1.12 | Schéma pro odvození vztahu pro ε_{s2} | 15 |
| 1.13 | Schéma pro odvození vztahu pro ε_{s1} | 15 |
| 1.14 | Schéma porušení při rovnoměrném tlaku | 16 |
| 1.15 | Schéma porušení při rovnoměrném tahu | 17 |
| 1.16 | Pracovní diagram betonářské oceli s vodorovnou větví (podle [1, Obrázek 3.8]) | 18 |
| 1.17 | Pracovní diagram betonářské oceli se stoupající větví (podle [1, Obrázek 3.8]) | 19 |
| 1.18 | Pracovní diagram betonu v tlaku pro analýzu konstrukce (třída pevnosti betonu C30/37) | 20 |
| 1.19 | Parabolicko-rektangulární pracovní diagram (třída pevnosti betonu C30/37) . | 21 |
| 1.20 | Bilineární pracovní diagram (třída pevnosti betonu C30/37) | 22 |
| 1.21 | Pracovní diagram betonu návrhový s klesající větví (třída pevnosti betonu C30/37) | 23 |
| 1.22 | Rovnoměrné rozdělení napětí v tlačené oblasti betonu | 24 |
| 1.23 | Pracovní diagram betonu odpovídající uvažovanému rovnoměrnému rozdělení napětí (třída pevnosti betonu C30/37) | 24 |
| 1.24 | Porovnání výsledků z různých pracovních diagramů ($b = 200$ mm, $x = 350$ mm) | 25 |
| 1.25 | Pracovní diagramy betonu pro betonu pevnostní třídy C16/20 | 26 |
| 1.26 | Pracovní diagramy betonu pro beton pevnostní třídy C30/37 | 26 |
| 1.27 | Pracovní diagramy betonu pro beton pevnostní třídy C60/75 | 26 |
| 1.28 | Pevnostní a deformační charakteristiky betonu (převzato z [1, Tabulka 3.1]) . | 28 |
| 2.1 | Interakční diagram | 33 |
| 2.2 | Namáhání průřezu v bodě 0 | 35 |
| 2.3 | Namáhání průřezu v bodě 1 | 36 |
| 2.4 | Namáhání průřezu v bodě 1' | 37 |
| 2.5 | Namáhání průřezu v bodě 2 | 38 |
| 2.6 | Namáhání průřezu v bodě 2' | 39 |
| 2.7 | Namáhání průřezu v bodě 3 | 40 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.8 | Namáhání průřezu v bodě 3' | 41 |
| 2.9 | Namáhání průřezu v bodě 4 | 42 |
| 2.10 | Namáhání průřezu v bodě 4' | 43 |
| 2.11 | Namáhání průřezu v bodě 5 | 44 |
| 2.12 | Interakční diagram – $b = 200$ mm, $h = 300$ mm, $\rho_1 = 3$ % a $\rho_2 = 0,5$ % | 45 |
| 2.13 | Vyznačení uvažovaných excentricit včetně znamének | 47 |
| 2.14 | Interakční diagram – $b = 1000$ mm, $h = 200$ mm, $\rho_1 = 1$ % a $\rho_2 = 0,5$ % | 48 |
| 2.15 | Schéma popisující vodorovné omezení horní části diagramu | 49 |
| 2.16 | Interakční diagram s vodorovným omezením horní části | 49 |
| 2.17 | Interakční diagram ($h = 200$ mm, $k_r = 10$ mm) | 51 |
| 2.18 | Vyznačení uvažovaných excentricit včetně znamének | 53 |
| 2.19 | Průběh poměrného přetvoření po výšce průřezu při minimální požadované vzdálenosti neutrální osy od horních vláken | 54 |
| 2.20 | Schéma poměrného přetvoření, napětí a sil v průřezu | 56 |
| 2.21 | Průběh poměrného přetvoření po výšce průřezu při minimální požadované vzdálenosti neutrální osy od dolních vláken | 57 |
| 2.22 | Schéma poměrného přetvoření, napětí a sil v průřezu | 58 |
| 2.23 | Interakční diagram – $b = 200$ mm, $h = 300$ mm, B500B C30/37, $\rho_1 = 1$ %, $\rho_2 = 0,5$ %, $k_r = 10$ | 59 |
| 2.24 | Interakční diagram – $b = 200$ mm, $h = 302$ mm, B500B C30/37, $\rho_1 = 1$ %, $\rho_2 = 0,5$ %, $k_r = 10$ | 60 |
| 2.25 | Poměr změn přetvoření krajních vláken při změně polohy neutrální osy | 61 |
| 2.26 | Průběh poměrného přetvoření po výšce průřezu při minimální požadované vzdálenosti neutrální osy od horních vláken | 65 |
| 2.27 | Průběh poměrného přetvoření po výšce průřezu při maximální dovolené vzdálenosti neutrální osy od horních vláken | 66 |
| 2.28 | Průběh poměrného přetvoření po výšce průřezu při minimální požadované vzdálenosti neutrální osy od dolních vláken | 70 |
| 2.29 | Průběh poměrného přetvoření po výšce průřezu při maximální dovolené vzdálenosti neutrální osy od dolních vláken | 71 |
| 2.30 | Interakční diagram – $b = 200$ mm, $h = 300$ mm, B500B C30/37, $\rho_1 = 2$ %, $\rho_2 = 1$ %, $k_r = 10$ | 75 |
| 2.31 | Interakční diagram průřezu (C30/37, B500B, $b = 200$ mm, $h = 300$ mm, $d_1 = d_2 = 35$ mm, $\rho_1 = 2$ %, $\rho_2 = 1$ %) | 76 |
| 2.32 | Horní část interakčního diagramu na obr. 2.31 | 78 |
| 2.33 | Závislost napětí v betonu na poměrném přetvoření betonu | 78 |
| 2.34 | Změna poměrného přetvoření a napětí v krajních vláknech při změně polohy neutrální osy | 79 |
| 2.35 | Interakční diagramy – únosnost betonu a celková, beton třídy C30/37 | 82 |
| 2.36 | Interakční diagramy – únosnost betonu a celková, beton třídy C16/20 | 82 |
| 2.37 | Interakční diagramy – únosnost betonu a celková, beton třídy C60/75 | 82 |
| 2.38 | Interakční diagramy – únosnost betonu a celková, různé třídy betonu | 82 |
| 2.39 | Interakční diagramy – různé poměry h/b , stejná šířka, stejné stupně vyztužení | 83 |
| 2.40 | Interakční diagramy – různé poměry h/b , stejná šířka, stejné plochy výztuže | 83 |
| 2.41 | Interakční diagramy – různé šířky (200 mm, 300 mm, 400 mm), stejné výšky (300 mm), stejné plochy výztuže | 84 |
| 2.42 | Interakční diagramy – různé pevnostní třídy výztuže | 85 |
| 2.43 | Interakční diagramy – různé třídy výztuže, $d_1 = d_2 = 55$ mm | 85 |
| 2.44 | Interakční diagramy – různé třídy výztuže, $d_1 = d_2 = 75$ mm | 85 |

| | | |
|------|---|-----|
| 2.45 | Interakční diagramy – různé pracovní diagramy oceli | 86 |
| 2.46 | Interakční diagramy – různé plochy výztuže | 87 |
| 2.47 | Interakční diagramy – různé plochy výztuže, $A_{s2} > A_{s1}$, beton třídy C16/20 | 87 |
| 2.48 | Interakční diagramy – různé polohy výztuže, $\rho_1 = \rho_2 = 1 \%$ | 88 |
| 2.49 | Vliv změny polohy výztuže na momentovou únosnost rovnoměrně namáhaného průřezu | 89 |
| 2.50 | Interakční diagramy – různé polohy výztuže 1, $d_2 = 25 \text{ mm}$ | 90 |
| 2.51 | Interakční diagramy – různé polohy výztuže 2, $d_1 = 25 \text{ mm}$ | 90 |
| 2.52 | Interakční diagramy – různé polohy obou výztuží | 91 |
| 2.53 | Interakční diagramy – různé polohy obou výztuží | 91 |
| 2.54 | Pravá dolní část interakčního diagramu | 93 |
| 2.55 | Přiblížení pravé dolní části interakčního diagramu | 93 |
| 2.56 | Interakční diagramy – různé pevnostní třídy betonu | 94 |
| 2.57 | Interakční diagramy – různé pevnostní třídy betonu, $\rho_1 = 1 \%$, $\rho_2 = 0,5 \%$ | 94 |
| 2.58 | Interakční diagramy – různé pevnostní třídy betonu, $\rho_1 = \rho_2 = 0$ | 94 |
| 2.59 | Interakční diagram – parabolicko-rektangulární pracovní diagram betonu | 95 |
| 2.60 | Interakční diagram – bilineární pracovní diagram betonu | 95 |
| 2.61 | Interakční diagram – návrhový obecný pracovní diagram betonu s klesající větví | 96 |
| 2.62 | Interakční diagramy – různé pracovní diagramy betonu | 96 |
| 2.63 | Porovnání interakčních diagramů – diagram dle publikace je označen červeně, diagram pomocí programu je označen modře | 100 |
| 2.64 | Porovnání interakčních diagramů – diagram dle publikace je označen červeně, diagram pomocí programu je označen modře | 100 |
| 2.65 | Porovnání interakčních diagramů – diagram dle publikace je označen červeně, diagram pomocí programu je označen modře | 101 |
| 2.66 | Porovnání interakčních diagramů – diagram dle publikace je označen červeně, diagram pomocí programu je označen modře | 103 |
| B.1 | Instalace 0 | 118 |
| B.2 | Instalace 1 | 118 |
| B.3 | Instalace 2 | 119 |
| B.4 | Instalace 3 | 119 |
| B.5 | Instalace 4 | 119 |
| B.6 | Instalace 5 | 119 |
| B.7 | Instalace 6 | 119 |
| B.8 | Instalace 7 | 119 |
| B.9 | Instalace 8 | 119 |
| B.10 | Instalace 9 | 119 |
| B.11 | Stažení | 120 |
| B.12 | Instalace 0 | 120 |
| B.13 | Instalace 1 | 121 |
| B.14 | Instalace 2 | 121 |
| B.15 | Instalace 3 | 121 |
| B.16 | Instalace 4 | 121 |
| B.17 | Instalace 5 | 121 |
| B.18 | Instalace 6 | 121 |
| B.19 | Úvodní obrazovka | 122 |
| B.20 | Obrazovka načítání | 123 |

| | | |
|------|--|-----|
| B.21 | Nápověda k programu | 123 |
| B.22 | Nápověda k bodovému interakčnímu diagramu | 123 |
| B.23 | Nápověda k mnohobodovému interakčnímu diagramu | 123 |
| B.24 | Nápověda k průřezu | 124 |
| B.25 | Nápověda k posudku | 124 |
| B.26 | Nápověda k materiálům | 124 |
| B.27 | Bodový interakční diagram – zadání vstupních hodnot | 125 |
| B.28 | Bodový interakční diagram – vykreslení | 126 |
| B.29 | Nápověda k bodům intrakčního diagramu | 127 |
| B.30 | Nápověda k bodu 0 | 127 |
| B.31 | Nápověda k bodu 1 | 127 |
| B.32 | Mnohobodový (zjednodušený) interakční diagram – zadání vstupních hodnot | 128 |
| B.33 | Nápověda k nastavení výpočtu | 129 |
| B.34 | Nápověda k významným bodům interakčního diagramu | 129 |
| B.35 | Mnohobodový (zjednodušený) interakční diagram – vykreslení | 130 |
| B.36 | Výběr pracovních diagramů | 131 |
| B.37 | Nápověda k pracovním diagramům betonu | 132 |
| B.38 | Nápověda k pracovním diagramům oceli | 132 |
| B.39 | Zadávání materiálů při pracovním diagramu oceli s vodorovnou horní větví | 132 |
| B.40 | Zadávání materiálů při pracovním diagramu oceli se stoupající horní větví | 132 |
| B.41 | Mnohobodový interakční diagram – zadání vstupních hodnot, v předchozím kroku zvolen pracovní diagram oceli se stoupající větví | 133 |
| B.42 | Nápověda k nastavení výpočtu | 134 |
| B.43 | Nápověda k významným bodům interakčního diagramu | 134 |
| B.44 | Mnohobodový interakční diagram – vykreslení | 135 |

Úvod

V rámci diplomové práce se věnuji problematice sestrojení přesného interakčního diagramu oboustranně vyztuženého železobetonového obdélníkového průřezu. Mimo teoretického prozkoumání této problematiky se také věnuji vytvoření algoritmu a výpočetního programu pro sestrojení interakčního diagramu.

V současné době nelze jednoduše získat volně dostupný program pro sestrojení interakčního diagramu průřezu. Ruční výpočet a sestrojení interakčního diagramu oboustranně vyztuženého průřezu je časově náročné, a proto se často sestrojuje pouze zjednodušený bodový interakční diagram složený pouze z několika bodů vyjadřujících únosnost průřezu při charakteristických typech namáhání. Při výpočtu únosnosti se používají pouze nejjednodušší pracovní diagramy materiálů a zavádějí se různé nepřesné předpoklady pro zjednodušení výpočtu.

Hlavní motivací k vypracování této práce a vytvoření programu je snaha zjednodušit posuzování průřezu, poskytnutím jednoduchého volně dostupného programu, pomocí něhož bude možné rychle sestroit přesný interakční diagram průřezu v souladu s platnými českými normami za použití komplexních a přesných pracovních diagramů a postupů.

V teoretické části se budu věnovat problémům, které je nutné prozkoumat k tomu, aby bylo možné vypočítat únosnost průřezu a sestroit interakční diagram průřezu. Nejprve se zaměřím na problematiku porušení železobetonových prvků při daných způsobech namáhání. Dále dále se pak budu zabývat problematikou stanovení napětí v materiálech při porušení průřezu. V této části práce rovněž uvedu uvažované materiálové a deformační vlastnosti betonu.

V praktické části se budu věnovat postupu výpočtu únosnosti průřezu při dané poloze neutrální osy a postupu sestrojení interakčního diagramu. Dále v této části práce popíši tvar a významné body interakčního diagramu, a to, jak jednotlivé parametry průřezu ovlivňují velikost a tvar interakčního diagramu průřezu. Na konci této části práce bude vytvořený program popsán a budou zde umístěny vzorové příklady řešené vytvořeným programem.

Hlavním cílem této diplomové práce je vytvoření výše zmíněného jednoduchého volně dostupného programu. Dalším cílem je přehledné sjednocení a popsání celé problematiky porušení a únosnosti průřezu namáhaného normálovou silou a ohybovým momentem. Mezi další cíle dále patří popsání postupu sestrojení interakčního diagramu a popsání samotného vytvořeného programu.

Kapitola 1

Teoretická část

Teoretická část této diplomové práce je rozdělena na tři části, přičemž je každá část zaměřena na popis a sjednocení jedné problematiky.

První část se věnuje způsobům porušení železobetonových průřezů. V této části je odvozeno a vysvětleno, zda a proč při dané poloze neutrální osy dojde k selhání průřezu porušením výztuže, či drcením tlačného betonu. Pro oba způsoby selhání průřezu jsou odvozeny vztahy pro výpočet poměrného přetvoření betonu a výztuže v okamžiku selhání průřezu. V této části je rovněž důkladně prozkoumána problematika průběhu poměrného přetvoření po výšce zcela tlačného průřezu v okamžiku selhání průřezu.

Druhá část se věnuje závislosti napětí v materiálu na poměrném přetvoření materiálu. V této části jsou popsány pracovní diagramy betonu a výztuže, a také odvozeny vztahy pro výpočet napětí z poměrného přetvoření.

V poslední části jsou vypsány zaokrouhlené uvažované hodnoty pevnostních a deformačních charakteristik tříd betonů a analytické vztahy, které se používají pro stanovení těchto hodnot.

1.1 Způsoby porušení železobetonových prvků

1.1.1 Porušení dosažením maximálního dovoleného poměrného přetvoření betonu v tlaku

K porušení dosažením maximálního dovoleného poměrného přetvoření betonu v tlaku (dále jen „maximální poměrné přetvoření betonu $\varepsilon_{c,max}$ “) dojde v případě, že průřez je namáhán takovým způsobem, že platí následující: Při zvětšující se velikosti působící síly dojde dříve k dosažení maximálního poměrného přetvoření betonu $\varepsilon_{c,max}$ v nejvíce tlačných vláknech, než dojde k dosažení mezního protažení výztuže ε_{ud} v nejvíce namáhané výztuži. Ke kolapsu dojde rozdrčením tlačného betonu, a proto tento způsob porušení budeme dále nazývat jako „porušení drcením betonu“. Schéma průběhu poměrného přetvoření po výšce průřezu při tomto způsobu porušení viz [obr. 1.2](#).

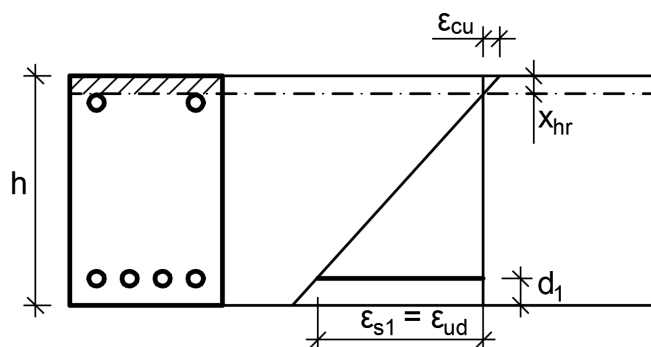
Předpokládejme nyní, že maximální poměrné přetvoření betonu $\varepsilon_{c,max}$ je rovno meznímu přetvoření betonu v tlaku ε_{cu} (platí v případě, že neutrální osa prochází průřezem). Přesněji se hodnotě maximálního poměrného přetvoření betonu $\varepsilon_{c,max}$ budeme věnovat později v této kapitole.

K porušení drcením betonu dojde v případě, že vzdálenost neutrální osy od nejvíce tlačných krajních vláken je větší než hraniční vzdálenosti x_{hr} . Z podobnosti trojúhelníků na [obr. 1.1](#) lze sestavit rovnici

$$\frac{x_{hr}}{|\varepsilon_{cu}|} = \frac{h - d_1}{\varepsilon_{ud} + |\varepsilon_{cu}|}, \quad (1.1.1)$$

ze které získáme vztah pro výpočet hraniční vzdálenosti

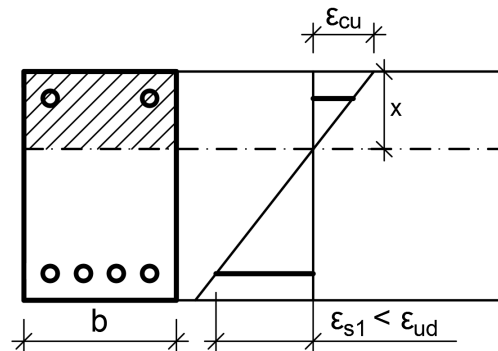
$$x_{hr} = \frac{|\varepsilon_{cu}|}{\varepsilon_{ud} + |\varepsilon_{cu}|} (h - d_1). \quad (1.1.2)$$



Obr. 1.1: Hraniční hodnota vzdálenosti neutrální osy

Hodnota mezního poměrného přetvoření výztuže ε_{ud} závisí na třídě tažnosti výztuže, viz kapitola 1.1.2. Uvažujeme-li však pracovní diagram oceli s vodorovnou horní větví (viz [obr. 1.16](#)), není nutné omezovat poměrné přetvoření výztuže (viz [1], čl. 3.2.7 (2)) a do vztahu tedy za proměnnou ε_{ud} dosazujeme nekonečno. Tím získáme hodnotu $x_{hr} \rightarrow 0$ a můžeme tedy konstatovat následující: uvažujeme-li pracovní diagram oceli s vodorovnou horní větví a zároveň je alespoň část průřezu tlačena (tj. průřez není zcela tažen), pak k porušení průřezu dojde drcením betonu.

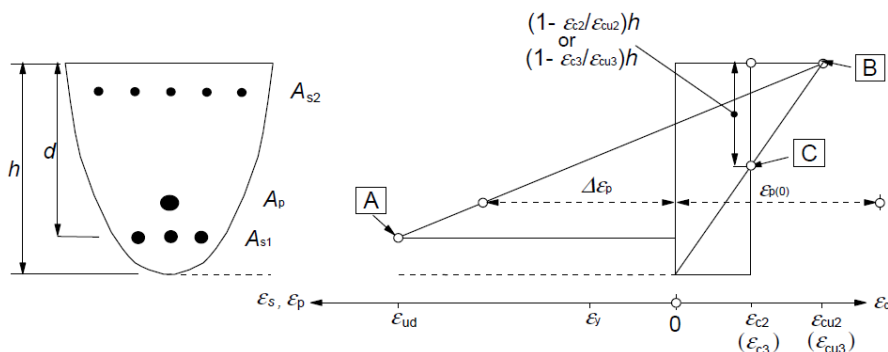
Hodnota mezního poměrného přetvoření v betonu v tlaku ε_{cu} je dána normou ČSN EN 1992-1-1 [1] a závisí na třídě betonu a uvažovaném pracovním diagramu betonu. Hodnoty se pohybují od 0,0026 do 0,0035, viz kapitola 1.3.



Obr. 1.2: Schéma porušení dosažením mezního poměrného přetvoření v betonu

Norma [1] a publikace [3], [6], [7] uvádějí (viz níže), že poměrné přetvoření v tlaceném betonu na mezi únosnosti průřezu by v některých případech nemělo být omezeno hodnotou ε_{cu} , nýbrž hodnotou menší, a to v závislosti na výstřednosti působící síly, neboli na poloze neutrální osy. Tuto menší hodnotu nazýváme maximální (dovolené) poměrné přetvoření betonu $\varepsilon_{c,max}$.

„Možný rozsah průběhu poměrných přetvoření je uveden na obrázku 6.1.



- [A] – mezní poměrné přetvoření betonářské výztuže
- [B] – mezní poměrné přetvoření betonu v tlaku
- [C] – mezní poměrné přetvoření betonu při prostém tlaku

Obrázek 6.1 – Možné průběhy poměrných přetvoření v mezním stavu únosnosti “
[1, čl. 6.1(6)]

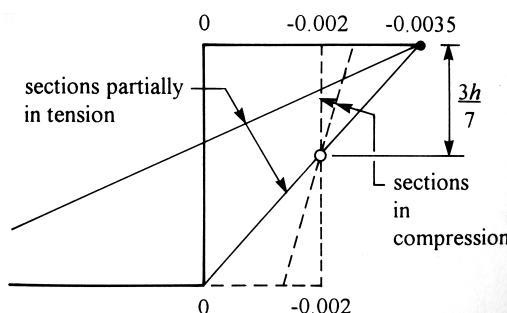
„Při uvažování zjednodušených pracovních diagramů betonu je nutno si uvědomit, že u železobetonových průřezů při dostředně působící mezní tlakové síle v betonu je nutno uvažovat mezní poměrné přetvoření betonu hodnotami ε_{c2} nebo ε_{c3} (viz Tab. 3.1). Teprve při zvětšující se výstřednosti této síly stoupá mezní poměrné přetvoření betonu v tlaceném okraji až na hodnoty ε_{cu2} nebo ε_{cu3} v závislosti na použitém pracovním diagramu.“

[3, kap. 6.2]

„EC2 adopts values taken from the CEB Model Code. These comprise of limit of 0,0035 for flexure and for bending and axial load where the neutral axis remains within the section, and a limit of between 0,0035 and 0,002 for sections loaded so that the whole section is in compression.“

[6, kap. 5.1.1.]

„Figure 8.1 (taken from 4.11 in EC2) shows the strain conditions assumed at the ultimate limit state for reinforced concrete.“



For cross-sections not fully in compression, the concrete is assumed to fail in compression when the strain reaches 0,0035. (...) For cross-sections that are completely in compression, the strain is limited to 0,002 at a height of 3/7h from the most compressed face.“

[7, kap. 8.1]

Shrneme-li vše výše uvedené, získáme následující postup pro výpočet maximálního poměrného přetvoření betonu $\varepsilon_{c,max}$. Pro případy namáhání, kdy:

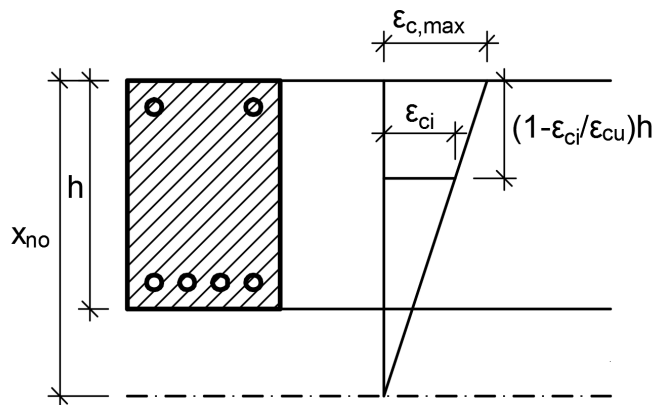
- je průřez pouze částečně tlačěn (neutrální osa leží v průřezu), platí, že poměrné přetvoření v krajních tlačných vláknech betonu $\varepsilon_{c,max}$ je rovno meznímu poměrnému přetvoření v betonu v tlaku ε_{cu} .
- je průřez celý tlačěn (neutrální osa leží mimo průřez), určíme maximální poměrné přetvoření betonu $\varepsilon_{c,max}$ v krajních tlačných vláknech betonu v závislosti na vzdálenosti neutrální osy od krajních nejvíce tlačných vláken a z předpokladu, že ve vzdálenosti $(1 - \varepsilon_{ci}/\varepsilon_{cu})h$ od krajních nejvíce tlačných vláken je velikost poměrného přetvoření rovna ε_{ci} . Z podobnosti trojúhelníků na obr. 1.3 lze sestavit rovnici

$$\frac{|\varepsilon_{c,max}|}{x_{no}} = \frac{|\varepsilon_{ci}|}{x_{no} - (1 - |\varepsilon_{ci}|/|\varepsilon_{cu}|)h}, \quad (1.1.3)$$

ze které získáme vztah pro výpočet maximálního poměrného přetvoření v krajních tlačných vláknech betonu

$$\varepsilon_{c,max} = - \left(\frac{|\varepsilon_{ci}|}{x_{no} - (1 - |\varepsilon_{ci}|/|\varepsilon_{cu}|)h} x_{no} \right)^*. \quad (1.1.4)$$

*Znaménko mínus dáváme před závorku z toho důvodu, že se jedná o poměrné přetvoření v tlaku, a hodnota tudíž musí být záporná.



Obr. 1.3: Poměrné přetvoření v krajních tlačných vláknech betonu

Zavedeme-li do vztahu (1.1.4) podmínku, že přetvoření nesmí překročit hodnotu ε_{cu} , získáme následující obecný vztah pro výpočet maximálního poměrného přetvoření $\varepsilon_{c,max}$ pro všechny polohy neutrální osy

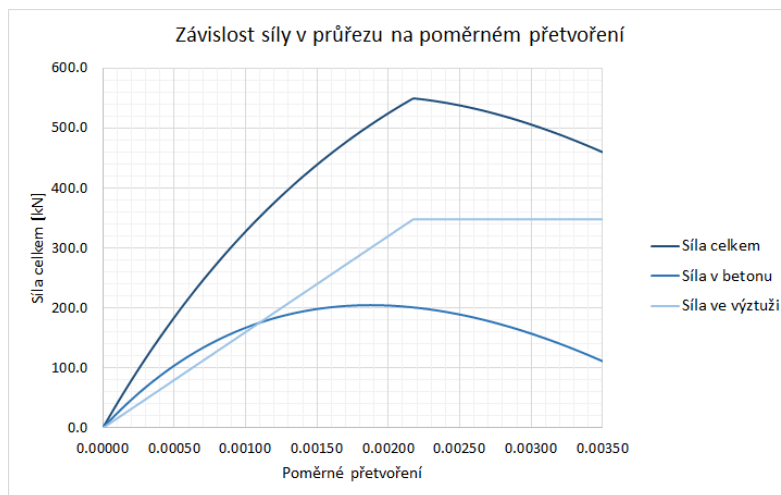
$$\varepsilon_{c,max} = - \min \left(\frac{x_{no}}{x_{no} - (1 - |\varepsilon_{ci}|/|\varepsilon_{cu}|)h} |\varepsilon_{ci}|; |\varepsilon_{cu}| \right). \quad (1.1.5)$$

Norma [1] ani publikace [7] neuvádí, proč je v případě plně tlačných průřezů nutné uvažovat maximální dovolené poměrné přetvoření $\varepsilon_{c,max}$ namísto mezního poměrného přetvoření ε_{cu} . Publikace [3] uvádí následující důvod.

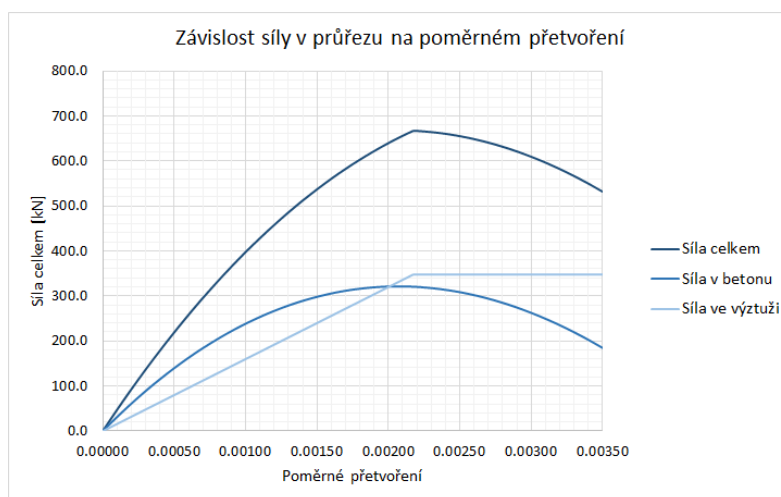
„...správně bychom měli uvažovat pracovní diagram betonu s klesající větví. Uvažujeme-li normálovou sílu N působící v těžišti betonového souměrně vyztuženého průřezu, pak maximální hodnotu této síly obdržíme při maximální možné hodnotě napětí betonu, které při uvažování pracovního diagramu s klesající větví odpovídá přetvoření při dosažení vrcholu tohoto pracovního diagramu.“

[3, kap. 6.2]

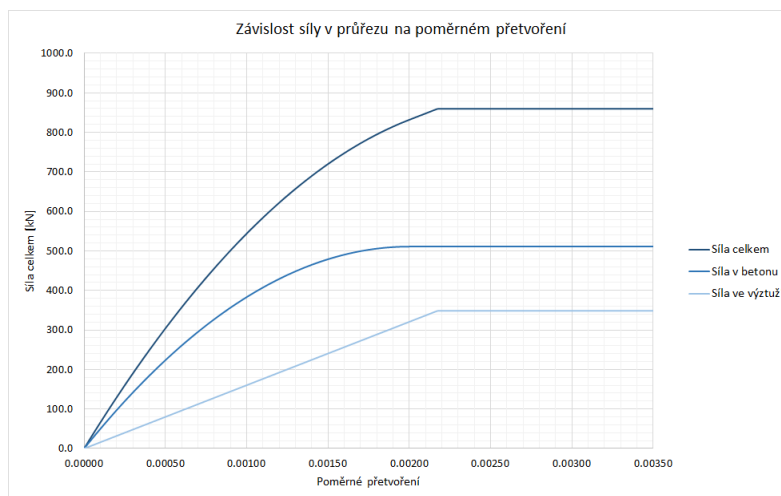
Avšak dle autora této práce není tento argument úplně správný, a to ze dvou důvodů. Za prvé, uvažujeme-li výše zmíněný pracovní diagram betonu s klesající větví, pak v případě průřezů z nižších pevnostních tříd betonu maximální hodnotu normálové síly N neobdržíme při maximální možné hodnotě napětí betonu, viz obr. 1.4 a obr. 1.5. Toto platí dokonce nejen v případě pracovního diagramu betonu s klesající větví, ale i v případě pracovního diagramu s vodorovnou větví, viz obr. 1.6.



Obr. 1.4: Třída betonu C16/20, stupeň vyztužení 4 %



Obr. 1.5: Třída betonu C25/30, stupeň vyztužení 4 %



Obr. 1.6: Třída betonu C40/50, stupeň vyztužení 4 %

Za druhé, pro návrh průřezu většinou nevyužíváme pracovní diagram s klesající větví, nýbrž zjednodušené pracovní diagramy s vodorovnou větví (viz kapitola 1.2.4 a 1.2.5), pro které platí, že maximální hodnota napětí je konstantní na celém intervalu $\langle \varepsilon_{ci}; \varepsilon_{cu} \rangle$. Díky tomu můžeme při maximální hodnotě napětí uvažovat poměrné přetvoření rovné hodnotě ε_{cu} . Autor této práce si uvědomuje, že se jedná o „zjednodušené“ diagramy, a že napětí v betonu po určité hodnotě poměrného přetvoření skutečně klesá, avšak domnívá se, že tato skutečnost je již zahrnuta v redukci napětí z hodnoty f_{ck} na hodnotu f_{cd} , a proto tuto skutečnost můžeme zanedbat. Nejsilnějším argumentem autora této práce pro výše uvedená tvrzení je fakt, že autor považuje za vysoce nekonzistentní volit návrhový diagram s vodorovnou větví, a přitom rovněž zakládat výpočet na tvrzení, že větev je klesající.

Publikace [6] poskytuje pouze stručné vysvětlení zvoleného přístupu, kde uvádí, že logika redukce poměrného přetvoření spočívá v tom, že k porušení dojde při poměrném přetvoření odpovídajícím dosažení maximálního napětí v betonu. Jak již ale bylo vysvětleno výše, autor tento argument nepovažuje za platný.

I přes výše uvedené námitky vůči zvolenému přístupu k omezení maximálního poměrného přetvoření betonu, autor této práce tento přístup uznává, přijímá za platný a dále ho v této práci a všech výpočtech využívá. Autor tento přístup uznává a využívá z toho důvodu, že je specifikován v návrhové normě [1] a zároveň užíván v praxi.

1.1.1.1 Poměrné přetvoření betonu

Při odvozování vztahu pro výpočet poměrného přetvoření betonu ε_v ve vzdálenosti x_v od krajních nejvíce tlačných vláken vycházíme z předpokladu, že na mezi únosnosti průřezu je dosaženo poměrného přetvoření $\varepsilon_{c,max}$ v nejvíce namáhaných tlačných vláknech. Z podobnosti trojúhelníků na obr. 1.7 lze sestavit rovnici

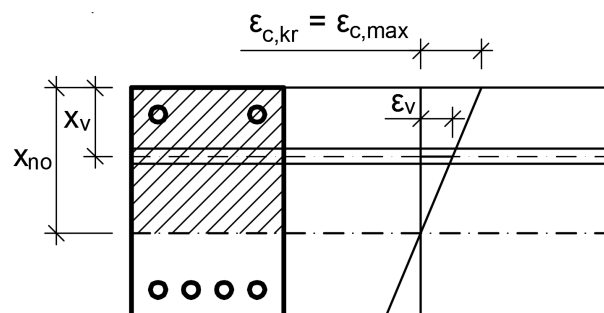
$$\frac{\varepsilon_v}{x_{no} - x_v} = \frac{\varepsilon_{c,kr}}{x_{no}}, \quad (1.1.6)$$

ze které získáme vztah pro výpočet poměrného přetvoření betonu

$$\varepsilon_v = \frac{x_{no} - x_v}{x_{no}} \varepsilon_{c,kr}, \quad (1.1.7)$$

a dosadíme-li za poměrné přetvoření krajních vláken hodnotu $\varepsilon_{c,max}$, získáme vztah

$$\varepsilon_v = \frac{x_{no} - x_v}{x_{no}} \varepsilon_{c,max}. \quad (1.1.8)$$



Obr. 1.7: Poměrné přetvoření betonu při porušení dosažením mezního přetvoření betonu

1.1.1.2 Poměrné přetvoření výztuže

Při odvozování vztahů pro výpočet poměrného přetvoření výztuže ε_s vycházíme z předpokladu, že na mezi únosnosti průřezu je dosaženo poměrného přetvoření $\varepsilon_{c,max}$ v nejvíce namáhaných tláčených vláknech.

Namáhání kladným momentem (táhne spodní vlákna)

Pro výztuž $S1$ lze z podobnosti trojúhelníků na obr. 1.8 sestavit rovnici

$$\frac{\varepsilon_{s1}}{(h - d_1) - x_{no}} = \frac{\varepsilon_{c,kr}}{-x_{no}^*},$$

ze které získáme vztah pro výpočet poměrného přetvoření výztuže $S1$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{x_{no} - (h - d_1)}{x_{no}} \varepsilon_{c,kr}. \quad (1.1.9a)$$

Analogicky lze pro výztuž $S2$ z podobnosti trojúhelníků sestavit rovnici

$$\frac{\varepsilon_{s2}}{x_{no} - d_2} = \frac{\varepsilon_{c,kr}}{x_{no}},$$

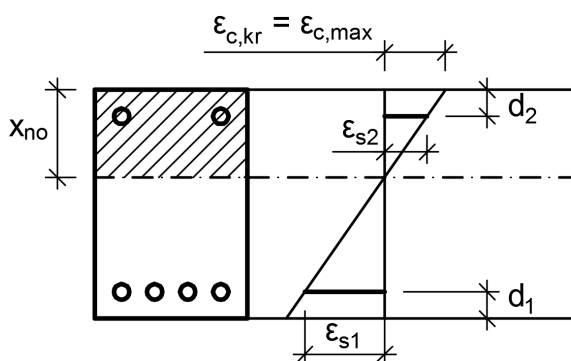
ze které získáme vztah pro výpočet poměrného přetvoření výztuže $S2$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{x_{no} - d_2}{x_{no}} \varepsilon_{c,kr}. \quad (1.1.9b)$$

Dosadíme-li za poměrné přetvoření krajních vláken hodnotu $\varepsilon_{c,max}$, získáme vztahy pro výpočet poměrného přetvoření výztuže při porušení průřezu drcením betonu

$$\varepsilon_{s1} = \frac{x_{no} - (h - d_1)}{x_{no}} \varepsilon_{c,max}, \quad (1.1.10a)$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{x_{no} - d_2}{x_{no}} \varepsilon_{c,max}. \quad (1.1.10b)$$



Obr. 1.8: Schéma pro odvození vztahu pro výpočet ε_s při namáhání kladným momentem

*Před vzdálenost dáváme znaménko mínus, jelikož ji měříme na opačné straně neutrální osy v porovnání s měřením vzdáleností výztuže od neutrální osy. Znaménko mínus před vzdáleností je nutné pro získání správného znaménka přetvoření výztuže.

Namáhání záporným momentem (táhne horní vlákna)

Pro výztuž $S1$ lze z podobnosti trojúhelníků na obr. 1.9 sestavit rovnici

$$\frac{\varepsilon_{s1}}{x_{no} - d_1} = \frac{\varepsilon_{c,kr}}{x_{no}},$$

ze které získáme vztah pro výpočet poměrného přetvoření výztuže $S1$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{x_{no} - d_1}{x_{no}} \varepsilon_{c,kr}. \quad (1.1.11a)$$

Analogicky lze pro výztuž $S2$ z podobnosti trojúhelníků sestavit rovnici

$$\frac{\varepsilon_{s2}}{(h - d_2) - x_{no}} = \frac{\varepsilon_{c,kr}}{-x_{no}^*},$$

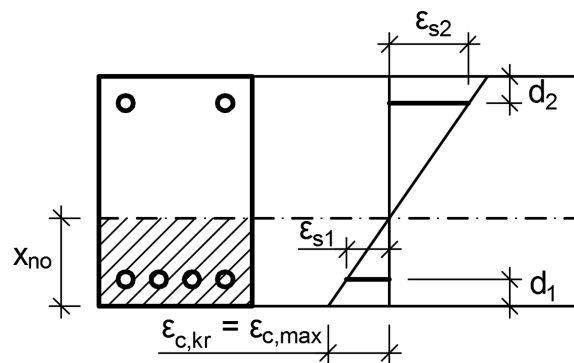
ze které získáme vztah pro výpočet poměrného přetvoření výztuže $S2$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{x_{no} - (h - d_2)}{x_{no}} \varepsilon_{c,kr}. \quad (1.1.11b)$$

Dosadíme-li za poměrné přetvoření krajních vláken hodnotu $\varepsilon_{c,max}$, získáme vztahy pro výpočet poměrného přetvoření výztuže při porušení průřezu drcením betonu

$$\varepsilon_{s1} = \frac{x_{no} - d_1}{x_{no}} \varepsilon_{c,max}, \quad (1.1.12a)$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{x_{no} - (h - d_2)}{x_{no}} \varepsilon_{c,max}. \quad (1.1.12b)$$



Obr. 1.9: Schéma pro odvození vztahu pro výpočet ε_s při namáhání záporným momentem

*Před vzdálenost dáváme znaménko mínus, jelikož ji měříme na opačné straně neutrální osy v porovnání s měřením vzdálenosti výztuže od neutrální osy. Znaménko mínus před vzdáleností je nutné pro získání správného znaménka přetvoření výztuže.

1.1.2 Porušení dosažením mezního poměrného přetvoření výztuže

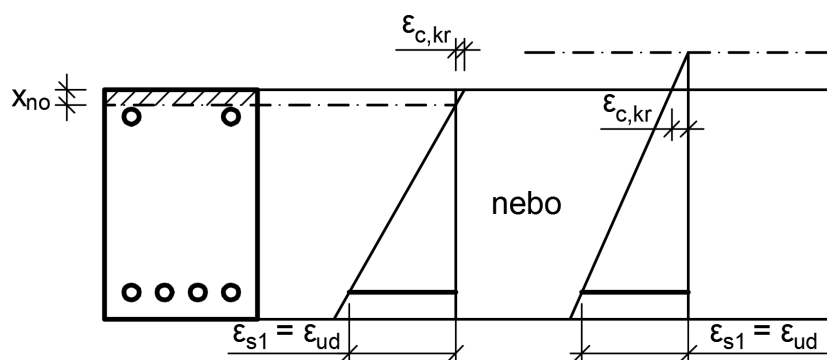
Porušení dosažením mezního poměrného přetvoření výztuže odpovídá namáhání takového, že při zvětšující se velikosti působící síly dojde dříve k dosažení mezního protažení výztuže ε_{ud} než k dosažení maximálního dovoleného poměrného přetvoření v betonu v tlaku $\varepsilon_{c,max}$. Je uvažováno, že při dosažení mezního protažení výztuže dojde k porušení (tj. přetržení či nadměrnému protažení) výztuže. Při tomto způsobu namáhání tedy dojde ke kolapsu porušením nejvíce namáhané výztuže. Schéma průběhu poměrného přetvoření po výšce průřezu při tomto způsobu porušení viz obr. 1.10.

Charakteristická hodnota mezního poměrného přetvoření výztuže ε_{uk} , při kterém se předpokládá porušení výztuže, je rovna tažnosti výztuže, která závisí na udané třídě tažnosti.

| | | |
|---------------------------------|-----------------|----------------------------|
| Třída tažnosti A (normální) | tažnost = 2,5 % | $\varepsilon_{uk} = 0,025$ |
| Třída tažnosti B (vysoká) | tažnost = 5,0 % | $\varepsilon_{uk} = 0,050$ |
| Třída tažnosti C (velmi vysoká) | tažnost = 7,5 % | $\varepsilon_{uk} = 0,075$ |

Návrhová hodnota mezního přetvoření tažené výztuže ε_{ud} se vypočítá ze vztahu

$$\varepsilon_{ud} = 0,9 \varepsilon_{uk} \quad (1.1.13)$$



Obr. 1.10: Schéma porušení dosažením mezního poměrného přetvoření výztuže

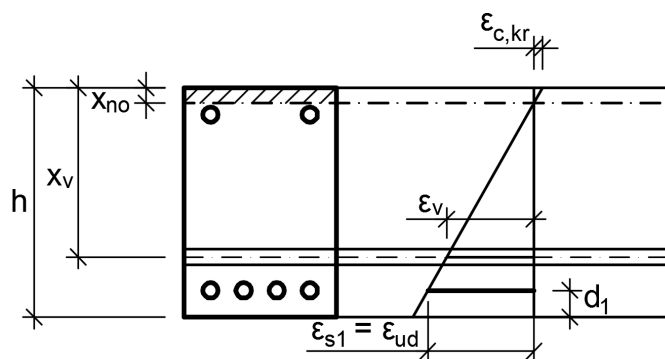
1.1.2.1 Poměrné přetvoření betonu

Při odvozování vztahu pro výpočet poměrného přetvoření betonu ε_v ve vzdálenosti x_v od krajních nejvíce tlačných (případně nejméně tažených) vláken vycházíme z předpokladu, že na mezi únosnosti průřezu je dosaženo mezního poměrného přetvoření výztuže ε_{ud} v nejvíce namáhané výztuži. Z podobnosti trojúhelníků na obr. 1.11 lze sestavit rovnici

$$\frac{\varepsilon_v}{x_v - x_{no}} = \frac{\varepsilon_{ud}}{(h - d_1) - x_{no}}, \quad (1.1.14)$$

ze které získáme vztah pro výpočet poměrného přetvoření betonu

$$\varepsilon_v = \frac{x_v - x_{no}}{(h - d_1) - x_{no}} \varepsilon_{ud}. \quad (1.1.15)$$



Obr. 1.11: Poměrné přetvoření betonu při porušení dosažením mezního přetvoření výztuže

Z hlediska přehlednosti a konzistentnosti postupu výpočtu by bylo výhodné, kdybychom pro výpočet poměrného přetvoření betonu použili stejný vztah jako v případě porušení průřezu drcením tlačeneho betonu, tj. vztah (1.1.7). Uvedený vztah závisí na poměrném přetvoření nejvíce tlačeneých (případně nejméně tažených) krajních vláken průřezu. Stanovíme-li tedy poměrné přetvoření těchto vláken při selhání průřezu porušením výztuže, můžeme pro výpočet poměrného přetvoření betonu použít uvedený vztah.

Z podobnosti trojúhelníků na obr. 1.11 lze sestavit rovnici

$$\frac{\varepsilon_{c,kr}}{-x_{no}^*} = \frac{\varepsilon_{ud}}{h - d_1 - x_{no}}, \quad (1.1.16)$$

ze které získáme vztah pro výpočet poměrného přetvoření nejvíce tlačeneých (případně nejméně tažených) krajních vláken průřezu při selhání průřezu porušením výztuže

$$\varepsilon_{c,kr} = \frac{x_{no}}{x_{no} - h + d_1} \varepsilon_{ud}. \quad (1.1.17)$$

Pro výpočet poměrného přetvoření betonu ve vzdálenosti x_v od krajních nejvíce tlačeneých (případně nejméně tažených) vláken můžeme tedy použít buď vztah (1.1.15), nebo vztah (1.1.7), kde za poměrné přetvoření krajních vláken dosadíme hodnotu vypočtenou pomocí vztahu (1.1.17).

1.1.2.2 Poměrné přetvoření výztuže

Při odvozování vztahu pro výpočet poměrného přetvoření výztuže ε_s vycházíme z předpokladu, že na mezi únosnosti průřezu je dosaženo mezního poměrného přetvoření ε_{ud} v nejvíce namáhané výztuži.

Namáhání kladným momentem (táhne spodní vlákna průřezu)

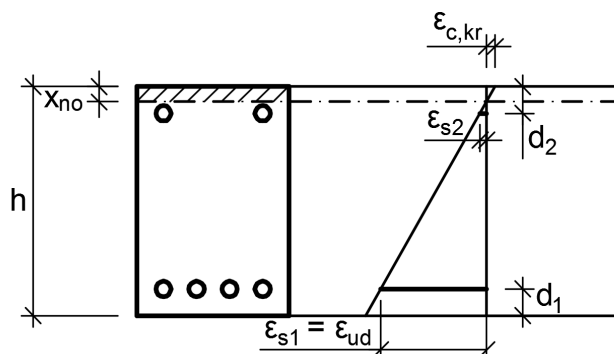
V případě zatížení kladným momentem je méně namáhána horní výztuž, pro níž lze z podobnosti trojúhelníků na obr. 1.12 sestavit rovnici

$$\frac{\varepsilon_{s2}}{d_2 - x_{no}} = \frac{\varepsilon_{ud}}{(h - d_1) - x_{no}},$$

*Vzdálenost dosazujeme záporně, jelikož ji měříme na opačnou stranu než měříme vzdálenost výztuže S_1 .

ze které lze odvodit vztah

$$\varepsilon_{s2} = \frac{d_2 - x_{no}}{(h - d_1) - x_{no}} \varepsilon_{ud}. \quad (1.1.18)$$



Obr. 1.12: Schéma pro odvození vztahu pro ε_{s2}

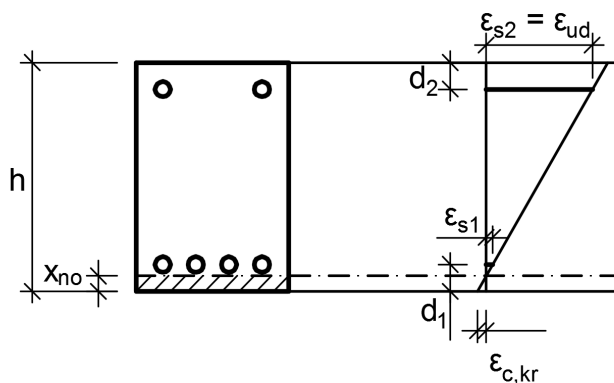
Namáhání záporným momentem (táhne horní vlákna průřezu)

V případě zatížení záporným momentem je méně namáhána dolní výztuž, pro níž lze z podobnosti trojúhelníků na obr. 1.13 sestavit rovnici

$$\frac{\varepsilon_{s1}}{d_1 - x_{no}} = \frac{\varepsilon_{ud}}{(h - d_2) - x_{no}},$$

ze které lze odvodit vztah

$$\varepsilon_{s1} = \frac{d_1 - x_{no}}{(h - d_2) - x_{no}} \varepsilon_{ud}. \quad (1.1.19)$$



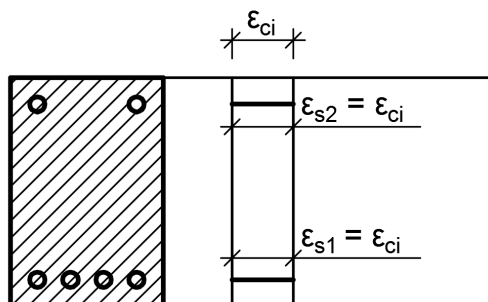
Obr. 1.13: Schéma pro odvození vztahu pro ε_{s1}

Z hlediska přehlednosti a konzistentnosti postupu výpočtu by opět bylo výhodné, kdybychom pro výpočet poměrného přetvoření výztuže použili stejný vztah jako v případě porušení průřezu drcením tlačného betonu, tj. vztah (1.1.9), který závisí na poměrném přetvoření nejvíce tlačných (případně nejméně tažených) krajních vláken průřezu. Vztah pro výpočet této hodnoty byl již odvozen výše, viz (1.1.17).

Pro výpočet poměrného přetvoření výztuže můžeme tedy použít buď vztahy (1.1.18) a (1.1.19), nebo vztahy (1.1.9) a (1.1.11), kde za přetvoření krajních vláken dosadíme hodnotu vypočtenou pomocí vztahu (1.1.17).

1.1.3 Porušení při rovnoměrném stlačení

K rovnoměrnému stlačení průřezu dojde při namáhání tlakovou normálovou silou působící v těžišti ideálního průřezu. Při tomto rovnoměrném stlačení dojde k porušení průřezu drcením tlačného betonu, blíže viz kapitola 1.1.1. Vzhledem k rovnoměrnému stlačení po celé výšce průřezu je poměrné přetvoření betonu i výztuže ve všech bodech průřezu stejné.



Obr. 1.14: Schéma porušení při rovnoměrném tlaku

1.1.3.1 Poměrné přetvoření betonu

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.1.1, publikace [3] doporučuje v případě rovnoměrného stlačení omezit poměrné přetvoření betonu hodnotou ε_{ci} . Toto je v souladu s obecným vztahem pro výpočet maximálního poměrného přetvoření betonu (1.1.5), jelikož při rovnoměrném stlačení průřezu je vzdálenost neutrální osy od krajních vláken rovna nekonečnu a dosadíme-li nekonečno do výše uvedeného vztahu, získáme jako výsledek právě hodnotu ε_{ci} . Na mezi únosnosti průřezu tedy ve všech bodech průřezu platí pro poměrné přetvoření betonu vztah

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{ci}. \quad (1.1.20)$$

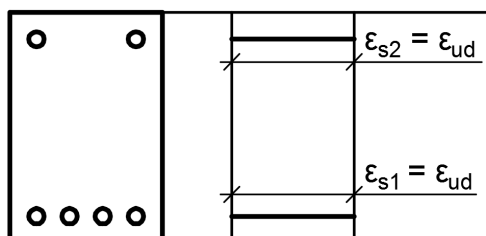
1.1.3.2 Poměrné přetvoření výztuže

Vzhledem k rovnoměrnému rozdělení přetvoření po celé výšce průřezu a předpokladu dokonalé soudržnosti mezi betonem a výztuží, je poměrné přetvoření výztuže rovno poměrnému přetvoření v betonu. Na mezi únosnosti průřezu tedy pro poměrné přetvoření výztuže platí

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{s2} = \varepsilon_c = \varepsilon_{ci}. \quad (1.1.21)$$

1.1.4 Porušení při rovnoměrném tahu

K porušení při rovnoměrném tahu dojde při namáhání tahovou normálovou silou působící v těžišti veškeré výztuže průřezu. Vzhledem k tomu, že síla působí v těžišti veškeré výztuže, je poměrné přetvoření veškeré výztuže v průřezu vždy stejné, a na mezi únosnosti průřezu je dosaženo mezní přetvoření výztuže ε_{ud} ve veškeré výztuži současně. Jedná se tedy o specifický případ porušení dosažením mezního poměrného přetvoření výztuže.



Obr. 1.15: Schéma porušení při rovnoměrném tahu

1.1.4.1 Poměrné přetvoření betonu

Při tomto způsobu porušení je poměrné přetvoření ve všech místech průřezu stejné. Pro poměrné přetvoření betonu, ve kterémkoliv místě průřezu, tedy platí vztah

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{ud}. \quad (1.1.22)$$

1.1.4.2 Poměrné přetvoření výztuže

V případě namáhání tahovou silou v těžišti výztuží je poměrné přetvoření horní i dolní výztuže stejné, a platí pro ně vztah

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{s2} = \varepsilon_{ud}. \quad (1.1.23)$$

1.2 Závislost napětí na přetvoření materiálu

1.2.1 Pracovní diagram oceli návrhový s vodorovnou horní větví

Pro výpočet napětí ve výztuži platí vztahy

$$\sigma_s = \varepsilon_s E_s \quad \text{pro } |\varepsilon_s| \leq \varepsilon_{sy}, \quad (1.2.1a)$$

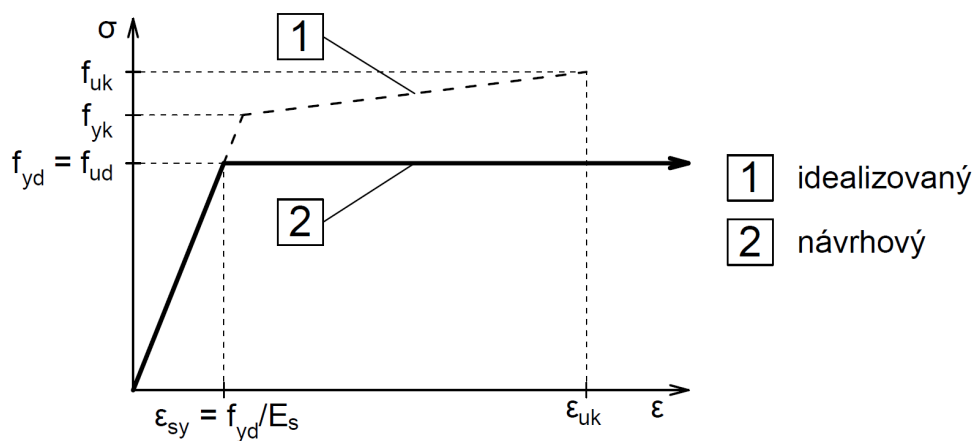
$$\sigma_s = \text{sgn}(\varepsilon_s) f_{yd} \quad \text{pro } |\varepsilon_s| > \varepsilon_{sy}, \quad (1.2.1b)$$

$$\text{kde } \varepsilon_{sy} = f_{yd}/E_s, \quad (1.2.1c)$$

které lze nahradit jedním, kompaktnějším vztahem

$$\sigma_s = \text{sgn}(\varepsilon_s) \min(|\varepsilon_s| E_s; f_{yd}). \quad (1.2.2)$$

Poměrné přetvoření výztuže není omezeno.



Obr. 1.16: Pracovní diagram betonářské oceli s vodorovnou větví (podle [1, Obrázek 3.8])

1.2.2 Pracovní diagram oceli návrhový se stoupající horní větví

Pro výpočet napětí ve výztuži platí vztahy

$$\sigma_s = \varepsilon_s E_s \quad \text{pro } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy}, \quad (1.2.3a)$$

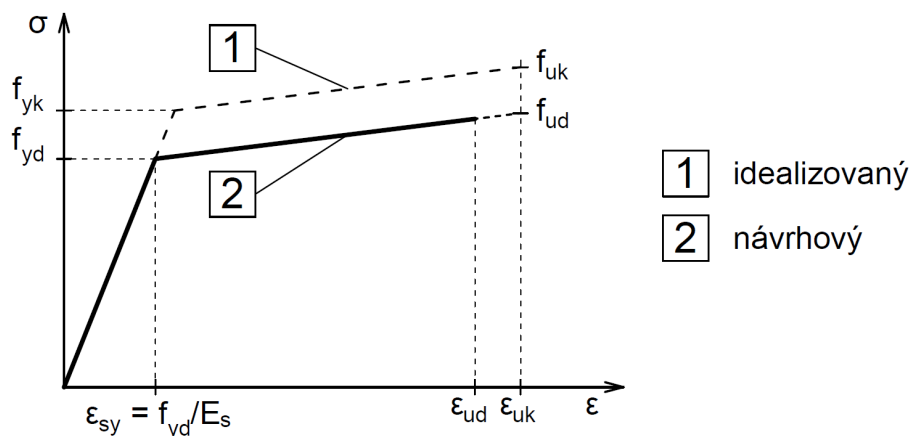
$$\sigma_s = \text{sgn}(\varepsilon_s) \left(f_{yd} + \frac{|\varepsilon_s| - \varepsilon_{sy}}{\varepsilon_{uk} - \varepsilon_{sy}} (f_{ud} - f_{yd}) \right) \quad \text{pro } \varepsilon_s > \varepsilon_{sy}, \quad (1.2.3b)$$

$$\text{kde } \varepsilon_{sy} = f_{yd}/E_s, \quad (1.2.3c)$$

které lze nahradit jedním, kompaktnějším vztahem

$$\sigma_s = \text{sgn}(\varepsilon_s) \min \left(|\varepsilon_s| E_s; f_{yd} + \frac{|\varepsilon_s| - |\varepsilon_{sy}|}{\varepsilon_{uk} - \varepsilon_{sy}} (f_{ud} - f_{yd}) \right). \quad (1.2.4)$$

Poměrné přetvoření výztuže je omezeno hodnotou ε_{ud} .



Obr. 1.17: Pracovní diagram betonářské oceli se stoupající větví (podle [1, Obrázek 3.8])

1.2.3 Pracovní diagram betonu pro nelineární analýzu konstrukce

Typ pracovního diagramu, kde napětí narůstá parabolicky a po dosažení maximální pevnosti opět parabolicky klesá, viz obr. 1.18, nejlépe odpovídá skutečnému působení betonu, a proto o něm dále budeme hovořit jako o „obecném pracovním diagramu“, či zkráceně jen „obecném diagramu“.

Norma ČSN EN 1992-1-1 [1] uvádí, že tento pracovní diagram lze použít pro výpočet účinků zatížení při krátkodobém jednoosém zatížení. Norma dále nspecifikuje, zda je možné tento diagram použít také pro navrhování průřezů. Vzhledem k tomu, že maximální napětí v betonu při použití tohoto diagramu je rovno průměrné hodnotě pevnosti betonu f_{cm} , je podle autora této práce nevhodné použít tento pracovní diagram pro navrhování průřezů.

Autor této práce se dále domnívá, že pro návrh průřezu je možné využít obecný pracovní diagram s klesající větví v případě, že je maximální hodnota napětí rovna návrhové pevnosti betonu f_{cd} . Této variantě se blíže věnuje kapitola 1.2.6.

Vztah mezi poměrným přetvořením a napětím betonu, viz obr. 1.18, je vyjádřen vztahem

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = -\frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \quad (1.2.5)$$

$$\text{kde } \eta = \frac{|\varepsilon_c|}{\varepsilon_{c1}},$$

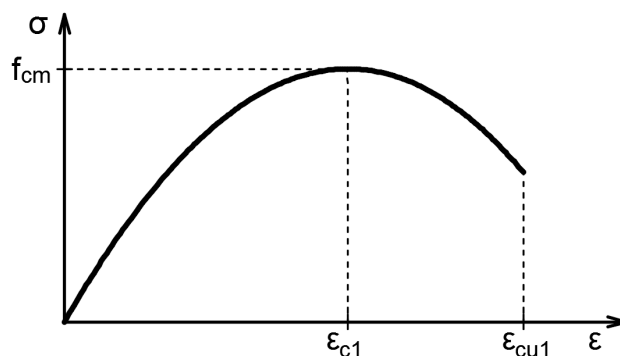
$$k = 1,05 \frac{\varepsilon_{c1} E_{cm}}{f_{cm}}.$$

Výše uvedený vztah (1.2.5) lze pro rychlejší výpočet přepsat do tvaru

$$\sigma_c = -\frac{1,05 |\varepsilon_c| E_{cm} - f_{cm} (|\varepsilon_c|/\varepsilon_{c1})^2}{1,05 |\varepsilon_c| E_{cm}/f_{cm} - 2 |\varepsilon_c|/\varepsilon_{c1} + 1}. \quad (1.2.6)$$

Pro výpočet poměrného přetvoření betonu při dosažení maximálního napětí v betonu ε_{c1} používáme vztah (1.3.3). Pro výpočet mezního poměrného přetvoření betonu ε_{cu1} využíváme vztah (1.3.6).

Uvedené vztahy platí pouze pro tlacený beton. V taženém betonu je vždy uvažováno nulové napětí.



Obr. 1.18: Pracovní diagram betonu v tlaku pro analýzu konstrukce (třída pevnosti betonu C30/37)

1.2.4 Pracovní diagram betonu návrhový parabolicko-rektangulární

Návrhový parabolicko-rektangulární pracovní diagram betonu, je zjednodušením obecného pracovního diagramu. Při zvyšujícím se poměrném přetvoření narůstá velikost napětí parabolicky až do hodnoty f_{cd} při poměrném přetvoření ε_{c2} . Rychlost a způsob nárůstu napětí je velmi podobný jako u obecného pracovního diagramu, a tudíž tento pracovní diagram velmi dobře popisuje skutečné chování betonu při zvětšujícím se stlačení až do hodnoty ε_{c2} . Na rozdíl od obecného pracovního diagramu však po dosažení poměrného přetvoření ε_{c2} při dalším zvyšování poměrného přetvoření napětí neklesá, nýbrž zůstává konstantní, viz obr. 1.19. Vzhledem k parabolickému způsobu nárůstu napětí je tento pracovní diagram pro ruční výpočet příliš složitý a nepoužitelný. Pro jeho přesnost je však tento pracovní diagram vhodný při výpočtu pomocí softwaru.

Pro velikost napětí v betonu při použití parabolicko-rektangulárního pracovního diagramu platí v oblasti $0 \leq |\varepsilon_c| \leq \varepsilon_{c2}$ vztah

$$\sigma_c = -f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{|\varepsilon_c|}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right], \quad (1.2.7a)$$

kde $n = 2,00$

pro $f_{ck} \leq 50$ MPa,

$$n = 1,4 + 23,4[(90 - f_{ck})/100]^4$$

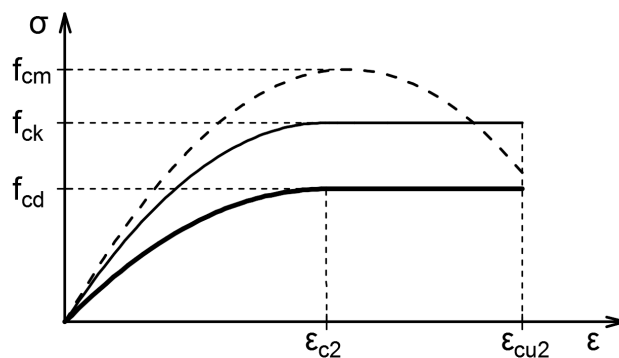
pro $f_{ck} \geq 55$ MPa,

a v oblasti $\varepsilon_{c2} \leq |\varepsilon_c| \leq \varepsilon_{cu2}$ vztah

$$\sigma_c = -f_{cd}. \quad (1.2.7b)$$

Pro výpočet poměrného přetvoření betonu při dosažení maximálního napětí v betonu ε_{c2} používáme vztah (1.3.4). Pro výpočet mezního poměrného přetvoření betonu ε_{cu2} využíváme vztah (1.3.7).

Uvedené vztahy platí pouze pro tlacený beton. V taženém betonu je vždy uvažováno nulové napětí.



Obr. 1.19: Parabolicko-rektangulární pracovní diagram (třída pevnosti betonu C30/37)

1.2.5 Pracovní diagram betonu návrhový bilineární

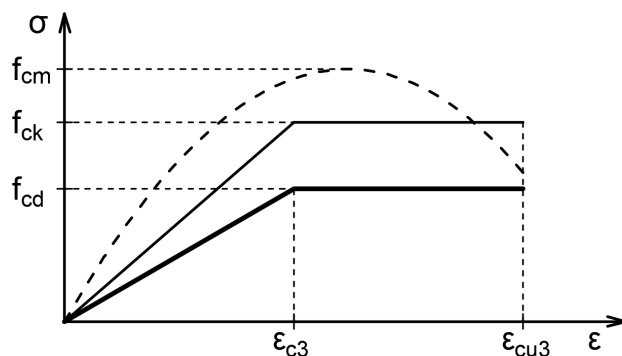
Bilineární pracovní diagram, dále jen bilineární diagram, je zjednodušením parabolicko-rectangulárního pracovního diagramu. Bilineární diagram je nejjednodušší pracovní diagram, který pro stanovení napětí v betonu při daném poměrném přetvoření norma poskytuje. Při zvyšujícím se poměrném přetvoření narůstá velikost napětí lineárně až do hodnoty f_{cd} při poměrném přetvoření ε_{c3} . Stejně jako v případě parabolicko-rectangulárního diagramu, po dosažení poměrného přetvoření ε_{c3} při dalším zvyšování poměrného přetvoření zůstává napětí konstantní, viz [obr. 1.20](#).

Při použití bilineárního pracovního diagramu lze velikost napětí v betonu stanovit ze vztahu

$$\sigma_c = - \min(|\varepsilon_c| E_{cm}; f_{cd}). \quad (1.2.8)$$

Pro výpočet poměrného přetvoření betonu při dosažení maximálního napětí v betonu ε_{c3} používáme vztah (1.3.5). Pro výpočet mezního poměrného přetvoření betonu ε_{cu3} využíváme vztah (1.3.8).

Uvedený vztah platí pouze pro tlačný beton. V taženém betonu je vždy uvažováno nulové napětí.



Obr. 1.20: Bilineární pracovní diagram (třída pevnosti betonu C30/37)

1.2.6 Pracovní diagram betonu návrhový s klesající větví

Norma [1] ve článku 3.1.7 (2) uvádí, že pro navrhování průřezů lze použít i jiné zjednodušené pracovní diagramy, pokud jsou rovnocenné nebo více konzervativní než pracovní diagram uvedený ve článku 3.1.7 (1), tj. parabolicko-rektangulární návrhový pracovní diagram, viz kapitola 1.2.4.

Pracovní diagram s klesající větví, o maximální hodnotě napětí rovné f_{cd} (tj. závislost napětí na poměrném přetvoření je dána vztahem (1.2.9)), dále jen „návrhový obecný pracovní diagram“, splňuje podmínku uvedenou v předchozím odstavci. Splnění této podmínky je zřejmé z obr. 1.24, kde můžeme vidět, že pro betony všech pevnostních tříd platí následující: Celková síla v tlačené oblasti v případě použití návrhového obecného pracovního diagramu je menší než celková síla v tlačené oblasti v případě použití parabolicko-rektangulárního pracovního diagramu. Pro betony středních a vyšších pevnostních tříd rovněž platí, že při jakékoliv hodnotě poměrného přetvoření betonu je napětí dle návrhového obecného pracovního diagramu menší než napětí dle parabolicko-rektangulárního pracovního diagramu, viz obr. 1.26 a obr. 1.27.

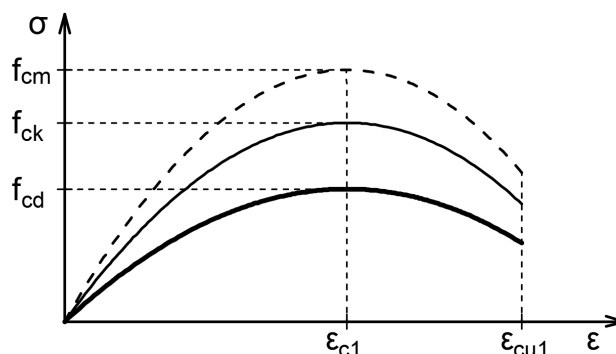
Vztah pro výpočet napětí v závislosti na poměrném přetvoření vychází ze vztahu (1.2.5) s tím rozdílem, že proměnná f_{cm} je nahrazena proměnnou f_{cd} . Po úpravě získáme následující vztah pro výpočet napětí v tlačeném betonu.

$$\sigma_c = \frac{1,05 |\varepsilon_c| E_{cm} - f_{cd} (|\varepsilon_c| / \varepsilon_{c1})^2}{1,05 |\varepsilon_c| E_{cm} / f_{cd} - 2 |\varepsilon_c| / \varepsilon_{c1} + 1}. \quad (1.2.9)$$

Pro výpočet poměrného přetvoření betonu při dosažení maximálního napětí v betonu ε_{c1} používáme vztah (1.3.3). Pro výpočet mezního poměrného přetvoření betonu ε_{cu1} využíváme vztah (1.3.6).

Uvedený vztah platí pouze pro tlačený beton. V taženém betonu je vždy uvažováno nulové napětí.

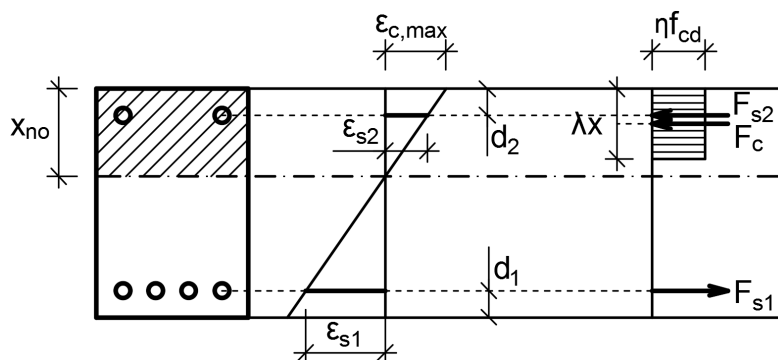
Tento návrhový pracovní diagram nejlépe popisuje chování betonu při zvětšujícím se stlačení. Zároveň je však možná až zbytečně moc konzervativní a vzhledem ke složitosti výpočtu je pro ruční výpočet nepoužitelný.



Obr. 1.21: Pracovní diagram betonu návrhový s klesající větví (třída pevnosti betonu C30/37)

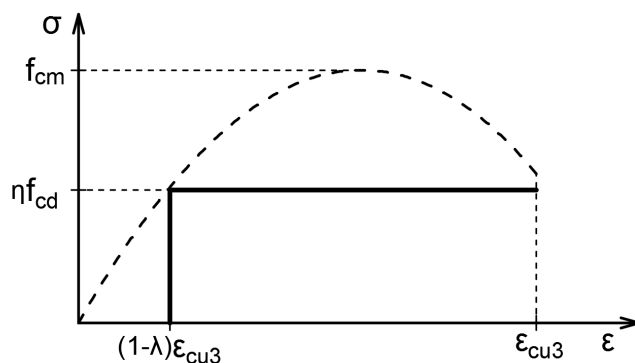
1.2.7 Rovnoměrné obdélníkové rozdělení napětí v tlačené oblasti betonu

Nejjednodušší způsob, který norma poskytuje pro určení síly v tlačené oblasti betonu, je předpoklad rovnoměrného rozdělení tlakového napětí o velikost ηf_{cd} na účinné výšce tlačené oblasti λx , viz obr. 1.22.



Obr. 1.22: Rovnoměrné rozdělení napětí v tlačené oblasti betonu

Ačkoliv norma v souvislosti s tímto předpokladem nemluví o pracovním diagramu, v zásadě se jedná o zvláštní pracovní diagram, kdy velikost napětí závisí pouze na tom, zda poměrné přetvoření betonu je větší, nebo menší než poměrné přetvoření $(1 - \lambda)\epsilon_{cu3}$, viz obr. 1.23.



Obr. 1.23: Pracovní diagram betonu odpovídající uvažovanému rovnoměrnému rozdělení napětí (třída pevnosti betonu C30/37)

Tento předpoklad rovnoměrného rozdělení tlakového napětí je z hlediska ručního výpočtu velmi výhodný, protože umožňuje vytvořit jednoduchý vztah pro výpočet celkové síly v tlačené oblasti betonu

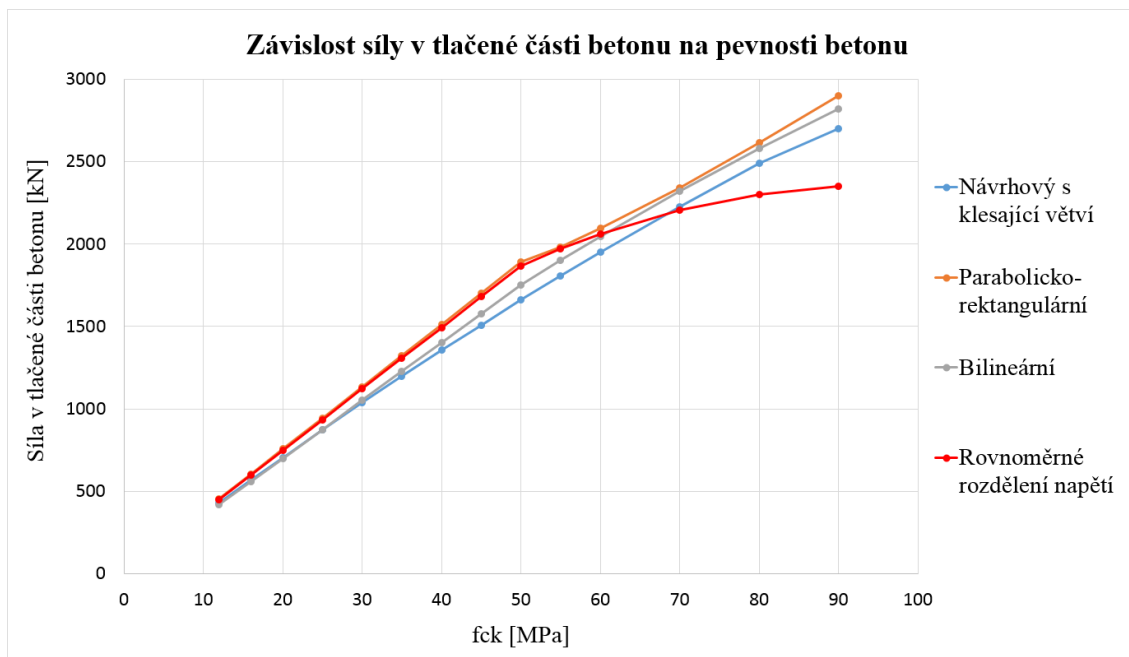
$$F_c = b\lambda x\eta(-f_{cd}), \quad (1.2.10)$$

| | |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| kde $\lambda = 0,8$ | pro $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$, |
| $\eta = 1,0$ | pro $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$, |
| $\lambda = 0,8 - (f_{ck} - 50)/400$ | pro $f_{ck} \geq 55 \text{ MPa}$, |
| $\eta = 1,0 - (f_{ck} - 50)/200$ | pro $f_{ck} \geq 55 \text{ MPa}$. |

1.2.8 Porovnání pracovních diagramů betonu

1.2.8.1 Vztah mezi rovnoměrným obdélníkovým rozdělením napětí a ostatními pracovními diagramy

Pro betony pevnostních tříd do třídy C55/67 (včetně třídy C55/67) platí, že výsledky získané při výpočtu celkové tlakové síly v betonu za předpokladu rovnoměrného rozdělení tlakového napětí se nejlépe shodují s výsledky získanými při uvažování parabolicko-rektangulárního pracovního diagramu. Pro betony třídy 70/85 až 90/105 se výsledky nejlépe shodují s výsledky získanými při uvažování obecného pracovního diagramu, viz obr. 1.24. Pro betony běžných pevnostních tříd tedy lze říci, že předpoklad rovnoměrného rozdělení tlakového napětí vychází z parabolicko-rektangulárního pracovního diagramu.



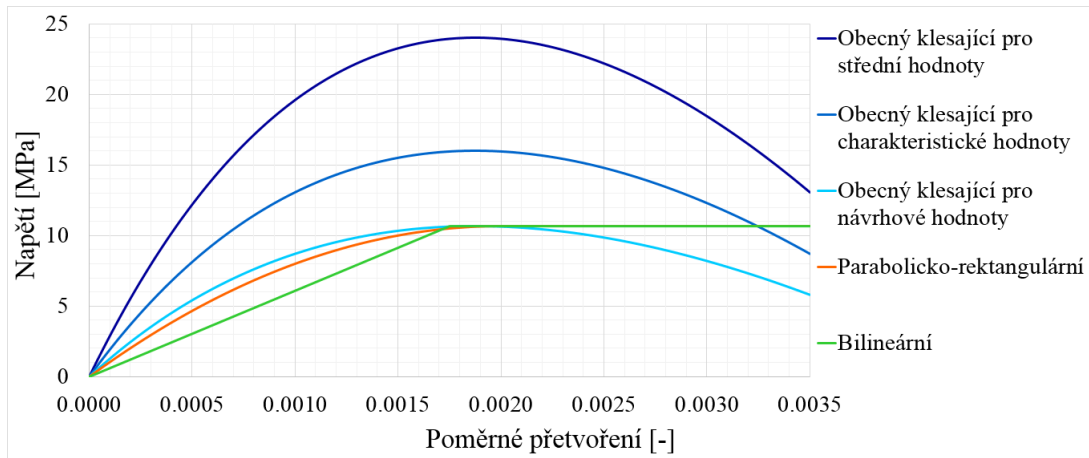
Obr. 1.24: Porovnání výsledků z různých pracovních diagramů ($b = 200$ mm, $x = 350$ mm)

1.2.8.2 Bezpečnost jednotlivých návrhových pracovních diagramů

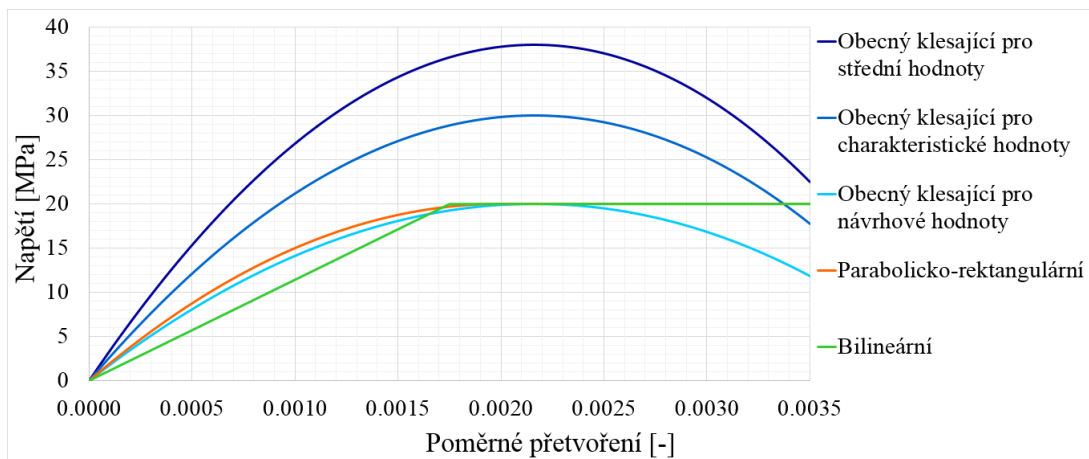
Při porovnání křivek v grafu závislosti síly v tlačené části betonu na třídě pevnosti betonu, viz obr. 1.24, lze také konstatovat, že pro třídy betonů do C60/75 (včetně třídy C60/75) je nejbezpečnější navrhovat průřezy s předpokladem bilineárního pracovního diagramu a pro vyšší třídy betonů je nejbezpečnější navrhovat průřezy s předpokladem rovnoměrného rozdělení napětí.

1.2.8.3 Porovnání pracovních diagramů

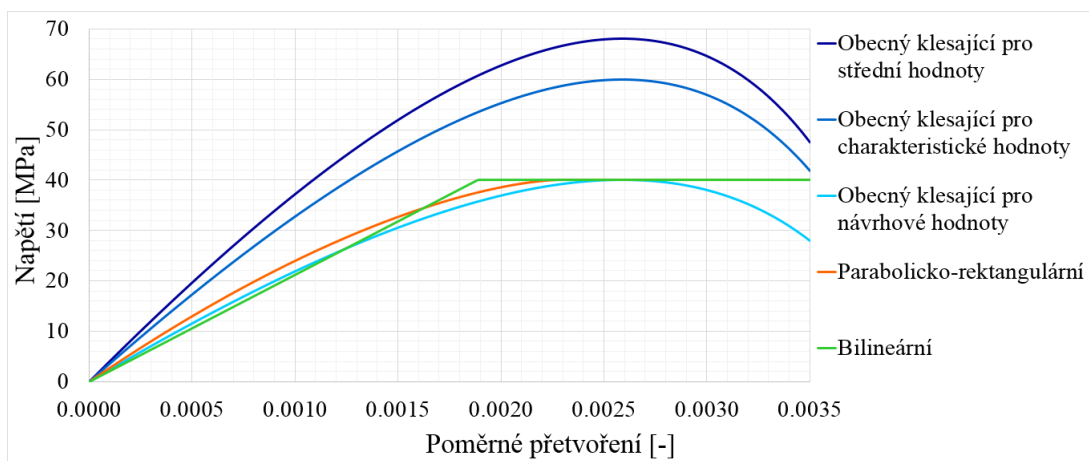
Pro představu vzájemné závislosti mezi jednotlivými pracovními diagramy jsou níže zobrazeny pracovní diagramy pro nižší, běžnou a vyšší pevnostní třídu betonu.



Obr. 1.25: Pracovní diagramy betonu pro betonu pevnostní třídy C16/20



Obr. 1.26: Pracovní diagramy betonu pro beton pevnostní třídy C30/37



Obr. 1.27: Pracovní diagramy betonu pro beton pevnostní třídy C60/75

Obecný a parabolicko-rektangulární diagram

Z grafů uvedených na předchozí stránce je zřejmé, že pro všechny tři třídy betonu platí, že rostoucí část parabolicko-rektangulárního diagramu je téměř shodná s rostoucí částí návrhového obecného pracovního diagramu, a tudíž parabolicko-rektangulární diagram velmi věrně popisuje skutečné působení betonu při nárůstu napětí.

Poměrné přetvoření při maximální hodnotě napětí v betonu

Dále stojí za povšimnutí fakt, že při nižších pevnostech betonu platí pro všechny pracovní diagramy skutečnost, že maximálního napětí v betonu je dosaženo při přibližně stejném poměrném přetvoření, viz obr. 1.25. S rostoucí pevností betonu se však zvětšuje rozdíl mezi hodnotou poměrného přetvoření, která odpovídá maximálnímu napětí dle bilineárního diagramu, a hodnotou poměrného přetvoření, která odpovídá maximálnímu napětí dle parabolicko-rektangulárního a obecného diagramu, viz obr. 1.27.

Bilineární a parabolicko-rektangulární diagram

Z grafů lze též vyčíst, že nárůst napětí je strmější v případě parabolicko-rektangulárního diagramu – například při poměrném přetvoření $\varepsilon_c = 0,001$ pro beton třídy C16/20 platí $\sigma_{c,par-rek} = 1,31\sigma_{c,bilin}$, a je tedy bezpečnější použít bilineární diagramu pro návrh průřezu. Se zvyšující se třídou betonu se však rozdíl v rychlosti nárůstu napětí snižuje – například při výše zmíněném poměrném přetvoření $\varepsilon_c = 0,001$ pro beton třídy C60/75 platí $\sigma_{c,par-rek} = 1,13\sigma_{c,bilin}$. Vzhledem ke skutečnosti uvedené v předchozím odstavci je dokonce možné, že pro vyšší třídy betonu bude při některých hodnotách poměrného přetvoření napětí dle bilineární diagramu větší než napětí dle parabolicko-rektangulárního diagramu – například při poměrném přetvoření $\varepsilon_c = 0,002$ pro beton třídy C60/75 platí $\sigma_{c,par-rek} = 0,96\sigma_{c,bilin}$, viz obr. 1.27.

Obecný diagram pro charakteristické hodnoty a návrhové diagramy s konstantní horní větví

Porovnáme-li pracovní diagramy pro beton třídy C16/20 (viz obr. 1.25), můžeme si všimnout, že při poměrném přetvoření $\varepsilon_c \geq 0,00324$ platí: Hodnota napětí dle návrhových diagramů je větší než hodnota napětí dle obecného diagramu pro charakteristické hodnoty pevnosti. Pro beton třídy C30/37 je tato zlomová hodnota rovna $\varepsilon_c = 0,00337$ (viz obr. 1.26), a v případě třídy betonu C60/75 je hodnota napětí dle návrhových diagramů vždy menší než hodnota napětí dle obecného diagramu pro charakteristické hodnoty pevnosti, viz obr. 1.27.

1.3 Pevnostní a deformační charakteristiky betonu

Pevnostní a deformační charakteristiky tříd betonů jsou převzaty z normy ČSN EN 1992-1-1 [1].

Norma poskytuje jak tabulku s charakteristikami tříd betonů (viz obr. 1.28), tak analytické vztahy pro výpočet některých charakteristik, viz kapitola 1.3.1.

Programy pro výpočet a sestavení interakčního diagramu průřezu vytvořené v rámci této diplomové práce využívají při výpočtu pevnostní a deformační charakteristiky stanovené pomocí analytických vztahů.

| | Pevnostní třídy betonu | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| f_{ck} (MPa) | 12 | 16 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| $f_{ck,cube}$ (MPa) | 15 | 20 | 25 | 30 | 37 | 45 | 50 | 55 | 60 | 67 | 75 | 85 | 95 | 105 |
| f_{cm} (MPa) | 20 | 24 | 28 | 33 | 38 | 43 | 48 | 53 | 58 | 63 | 68 | 78 | 88 | 98 |
| f_{ctm} (MPa) | 1,6 | 1,9 | 2,2 | 2,6 | 2,9 | 3,2 | 3,5 | 3,8 | 4,1 | 4,2 | 4,4 | 4,6 | 4,8 | 5 |
| $f_{ctk,0,05}$ (MPa) | 1,1 | 1,3 | 1,5 | 1,8 | 2 | 2,2 | 2,5 | 2,7 | 2,9 | 3 | 3,1 | 3,2 | 3,4 | 3,5 |
| $f_{ctk,0,95}$ (MPa) | 2 | 2,5 | 2,9 | 3,3 | 3,8 | 4,2 | 4,6 | 4,9 | 5,3 | 5,5 | 5,7 | 6 | 6,3 | 6,6 |
| E_{cm} (GPa) | 27 | 29 | 30 | 31 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 41 | 42 | 44 |
| ε_{c1} (‰) | 1,80 | 1,90 | 2,00 | 2,10 | 2,20 | 2,25 | 2,30 | 2,40 | 2,45 | 2,50 | 2,60 | 2,70 | 2,80 | 2,80 |
| ε_{cu1} (‰) | 3,50 | | | | | | | | | 3,20 | 3,00 | 2,80 | 2,80 | 2,80 |
| ε_{c2} (‰) | 2,00 | | | | | | | | | 2,20 | 2,30 | 2,40 | 2,50 | 2,60 |
| ε_{cu2} (‰) | 3,50 | | | | | | | | | 3,10 | 2,90 | 2,70 | 2,60 | 2,60 |
| n | 2,00 | | | | | | | | | 1,75 | 1,60 | 1,45 | 1,40 | 1,40 |
| ε_{c3} (‰) | 1,75 | | | | | | | | | 1,80 | 1,90 | 2,00 | 2,20 | 2,30 |
| ε_{cu3} (‰) | 3,50 | | | | | | | | | 3,10 | 2,90 | 2,70 | 2,60 | 2,60 |

Obr. 1.28: Pevnostní a deformační charakteristiky betonu (převzato z [1, Tabulka 3.1])

1.3.1 Analytické vztahy

Do níže uvedených vztahů pro výpočet charakteristik betonu je nutno dosazovat v MPa.

Střední pevnost betonu [MPa]

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (1.3.1)$$

Střední modul pružnosti betonu [MPa]

$$E_{cm} = 22000(f_{cm}/10)^{0,3} \quad (1.3.2)$$

Poměrné přetvoření při maximálním napětí pro obecný diagram

$$\varepsilon_{c1} = \min(0,7f_{cm}^{0,31}; 2,8) \quad (1.3.3)$$

Poměrné přetvoření na přechodu parabolické a rektangulární části diagramu

$$\varepsilon_{c2} = 2,00 \quad \text{pro } f_{ck} < 50 \text{ MPa} \quad (1.3.4a)$$

$$\varepsilon_{c2} = 2,00 + 0,085(f_{ck} - 50)^{0,53} \quad \text{pro } f_{ck} \geq 50 \text{ MPa} \quad (1.3.4b)$$

Poměrné přetvoření na přechodu lineární a konstantní části diagramu

$$\varepsilon_{c3} = 1,75 \quad \text{pro } f_{ck} < 50 \text{ MPa} \quad (1.3.5a)$$

$$\varepsilon_{c3} = 1,75 + 0,55[(f_{ck} - 50)/40] \quad \text{pro } f_{ck} \geq 50 \text{ MPa} \quad (1.3.5b)$$

Mezní poměrné přetvoření pro obecný diagram

$$\varepsilon_{cu1} = 3,50 \quad \text{pro } f_{ck} < 50 \text{ MPa} \quad (1.3.6a)$$

$$\varepsilon_{cu1} = 2,80 + 27[(98 - f_{cm})/100]^4 \quad \text{pro } f_{ck} \geq 50 \text{ MPa} \quad (1.3.6b)$$

Mezní poměrné přetvoření pro parabolicko-rektangulární a bilineární diagram

$$\varepsilon_{cu2} = \varepsilon_{cu3} = 3,50 \quad \text{pro } f_{ck} < 50 \text{ MPa} \quad (1.3.7a)$$

$$\varepsilon_{cu2} = \varepsilon_{cu3} = 2,60 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4 \quad \text{pro } f_{ck} \geq 50 \text{ MPa} \quad (1.3.7b)$$

Exponent pro výpočet napětí dle parabolicko-rektangulárního diagramu

$$n = 2,00 \quad \text{pro } f_{ck} < 50 \text{ MPa} \quad (1.3.8a)$$

$$n = 1,40 + 23,4[(90 - f_{ck})/100]^4 \quad \text{pro } f_{ck} \geq 50 \text{ MPa} \quad (1.3.8b)$$

Kapitola 2

Praktická část

Praktická část této diplomové práce se věnuje zejména sestrojení interakčního diagramu průřezu. Interakční diagram průřezu je graf uzavřené křivky, která je spojnicí bodů, kde každý bod vyjadřuje únosnost průřezu při dané poloze neutrální osy. Interakční diagram průřezu se používá pro posouzení navrženého průřezu tak, že bod vyjadřující působící zatížení je vyneseno do grafu, a leží-li uvnitř křivky interakčního diagramu, navržený průřez vyhovuje.

První kapitola této části práce se věnuje bodovému interakčnímu diagramu. Tento zjednodušený interakční diagram je sestrojen z dvanácti charakteristických bodů. Postup výpočtu těchto bodů vychází z postupu v [3, kap. 6.3] a je upraven tak, že nejsou zanedbány některé věci, které v postupu v publikaci [3, kap. 6.3] zanedbány jsou. Každý bod diagramu vyjadřuje únosnost průřezu při daném charakteristickém způsobu namáhání (např. rovnoměrný tlak nebo prostý ohyb), a u každého bodu je uveden celý postup výpočtu únosnosti průřezu. Na konci této části je popsán způsob sestrojení tohoto interakčního diagramu.

Druhá kapitola se věnuje mnohobodovému zjednodušenému interakčnímu diagramu. Tento interakční diagram je sestrojen z velkého množství bodů, a díky tomu se jedná o plynulejší křivku. Počet bodů závisí na vstupních parametrech výpočtu. Postup výpočtu únosnosti průřezu je shodný pro všechny body interakčního diagramu. Pouze některé vztahy použité při výpočtu závisí na tom, zda bod leží na pravé, či levé části interakčního diagramu. Celý postup výpočtu a všechny vztahy použité při výpočtu jsou uvedeny v této kapitole a na konci kapitoly je opět vysvětleno, jakým způsobem je sestrojen tento interakční diagram. Na konci této kapitoly je interakční diagram popsán a zvláštní pozornost je věnována horní části interakčního diagramu.

Třetí kapitola se věnuje mnohobodovému interakčnímu diagramu. Tento interakční diagram je velmi podobný mnohobodovému zjednodušenému interakčnímu diagramu. Rozdíl mezi nimi je ve způsobu výpočtu síly v tlačeném betonu a v použitých pracovních diagramech materiálů. Mnohobodový (nezjednodušený) interakční diagram počítá sílu v tlačeném betonu přesněji a využívá přesnějších pracovních diagramů. V této kapitole je opět vypsán celý postup výpočtu a všechny vztahy použité při výpočtu. Na konci této kapitoly je interakční diagram popsán a zvláštní pozornost je věnována významným bodům interakčního diagramu.

Ve čtvrté kapitole je zkoumán vliv jednotlivých parametrů průřezu na velikost a tvar interakčního diagramu.

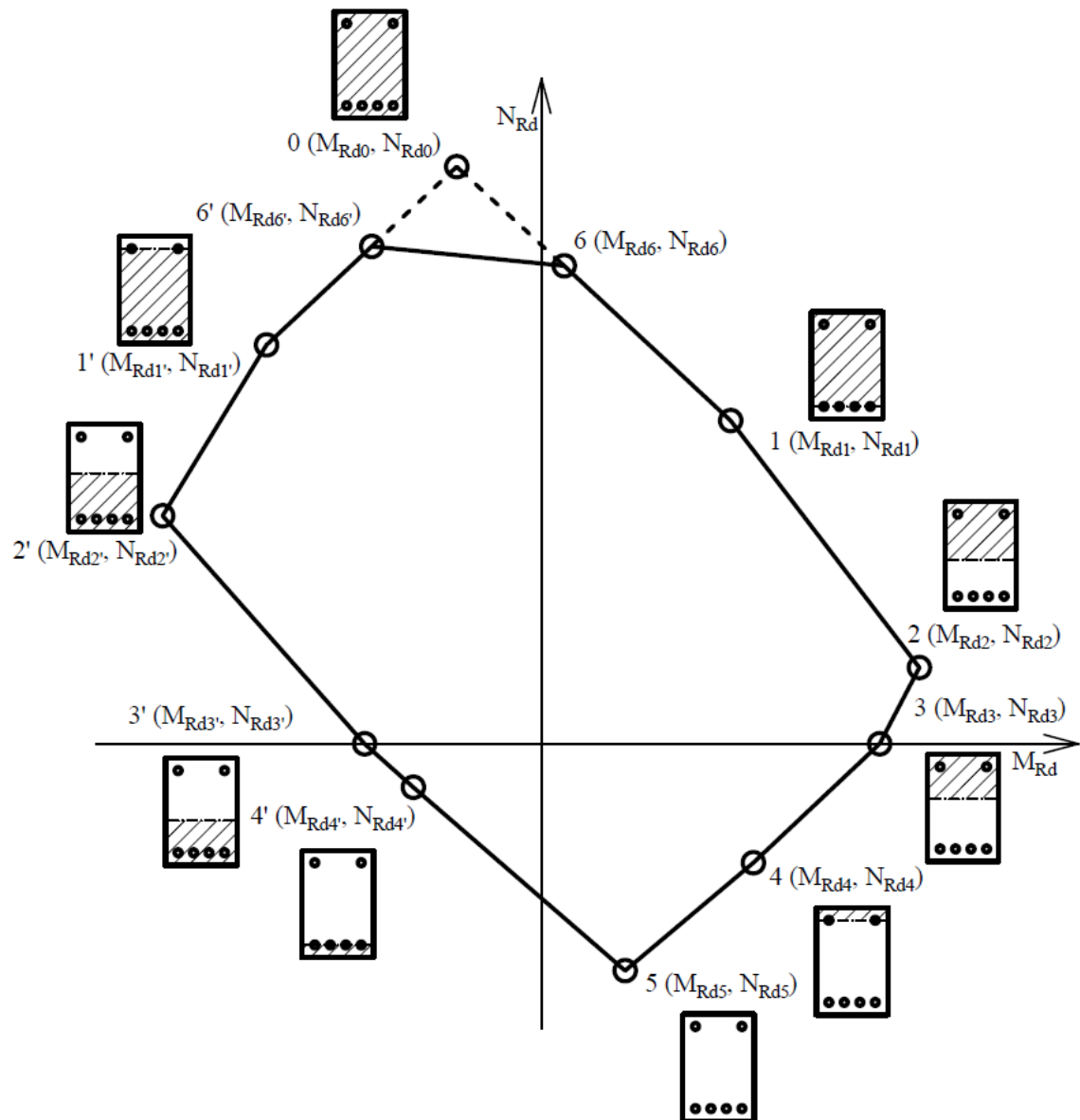
V páté kapitole je popsán výpočetní program pro sestrojení interakčního diagramu vytvořený v rámci této práce.

Na konci praktické části této diplomové práce jsou vypočítány vzorové příklady z dostupné literatury a výsledky získané pomocí programu jsou porovnány s výsledky v dostupné literatuře.

2.1 Bodový interakční diagram

V rámci této diplomové práce byl vytvořen program pro sestavení bodového interakčního diagramu. V této kapitole je tento interakční 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 ε_{ci} , viz kapitola 1.1.3.1. Pro námi uvažovaný pracovní diagram betonu je maximálního napětí v betonu dosaženo při poměrném přetvoření betonu ε_{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 ε_{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.

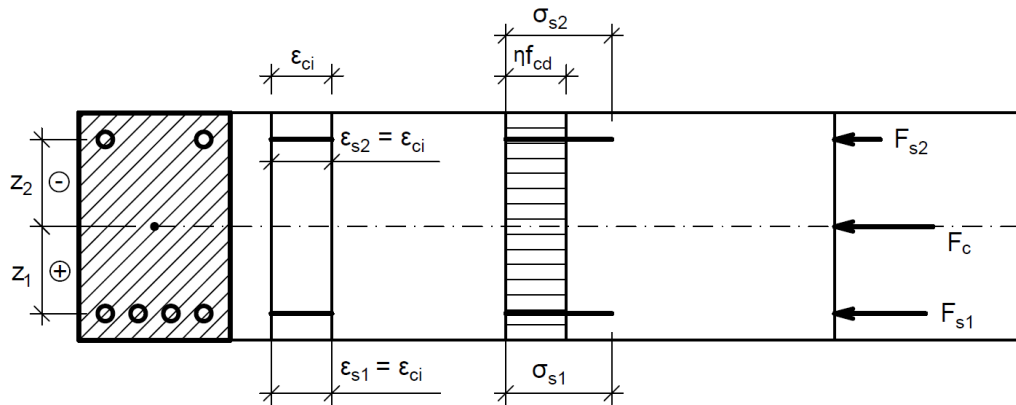
Napětí ve výztuži vypočítáme pomocí vztahu (1.2.2), který lze pro upravit do tvaru

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

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 tlačенý průřez, neutrální osa prochází těžištěm výztuže

U tohoto způsobu namáhání předpokládáme, že na mezi únosnosti průřezu dojde k porušení průřezu drcením tlačенého 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 ε_{cu} . Pro námi zvolený pracovní diagram je hodnota mezního poměrného přetvoření betonu rovna ε_{cu3} a pro poměrné přetvoření krajních tlačенých vláken betonu tedy platí vztah

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

Při výpočtu síly v tlačенé části betonu je uvažováno rovnoměrné rozdělení tlakového napětí na účinné výšce tlačенé oblasti λx , viz kapitola 1.2.7. Pro výpočet napětí v tlačném betonu platí vztah

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

*Hodnota ε_{cu3} přebíraná z normy je kladná. Průřez je tlačен, hodnotu deformace je tedy nutno uvažovat záporně.

†Beton je tlačен, 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

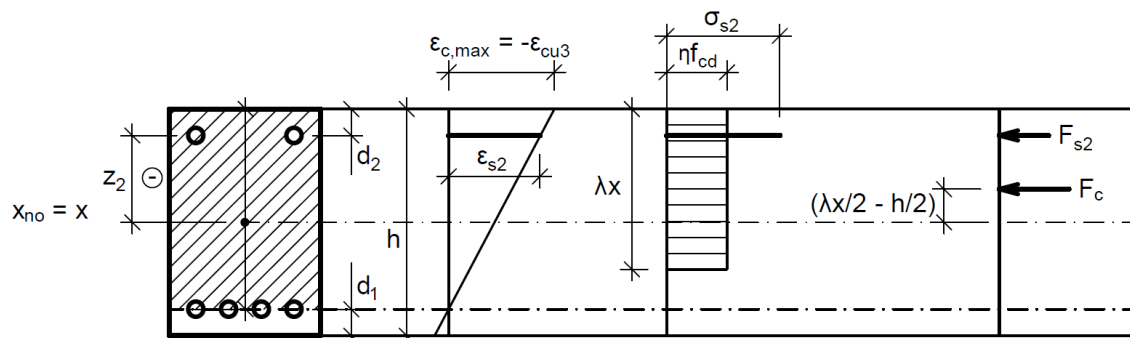
$$\sigma_{s1} = 0, \quad (2.1.11a)$$

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

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

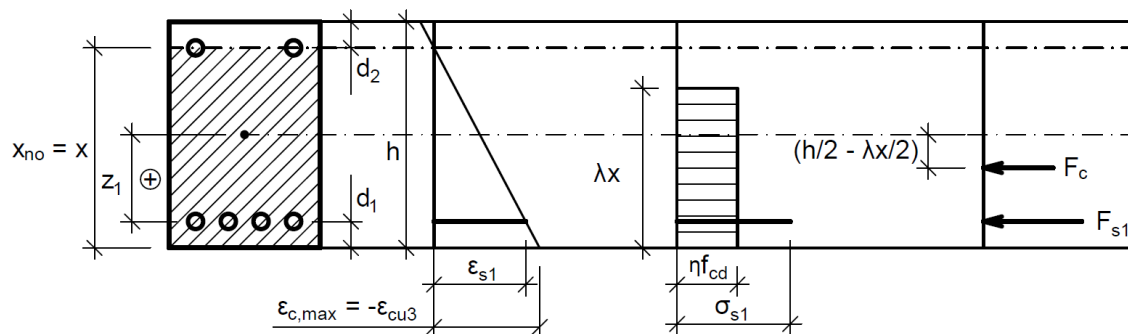
$$\sigma_{s1} = -\min(|\varepsilon_{s1}|E_s; f_{yd}), \quad (2.1.16a)$$

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

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 oblasti, 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 σ_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 tlačenech 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 tlačené oblasti

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

Přetvoření horní tlačené 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

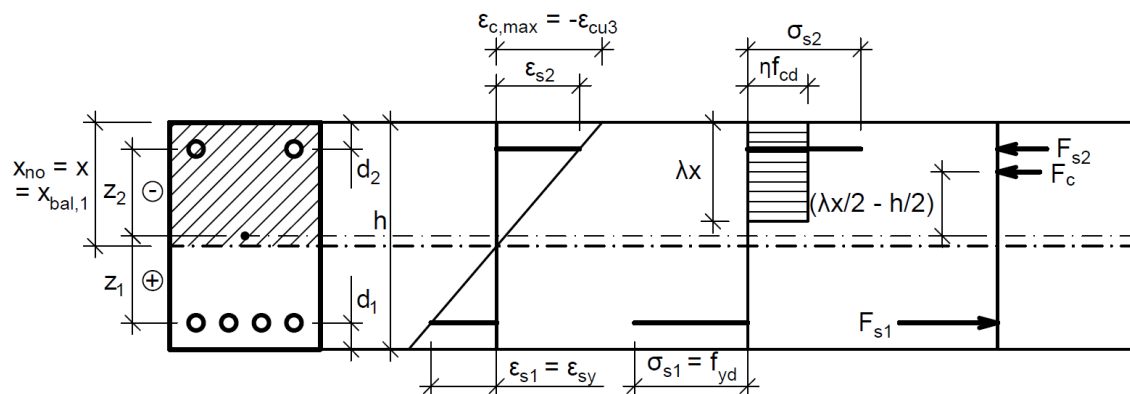
$$\sigma_{s1} = f_{yd}, \quad (2.1.21a)$$

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

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 ε_{s1} psát ε_{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

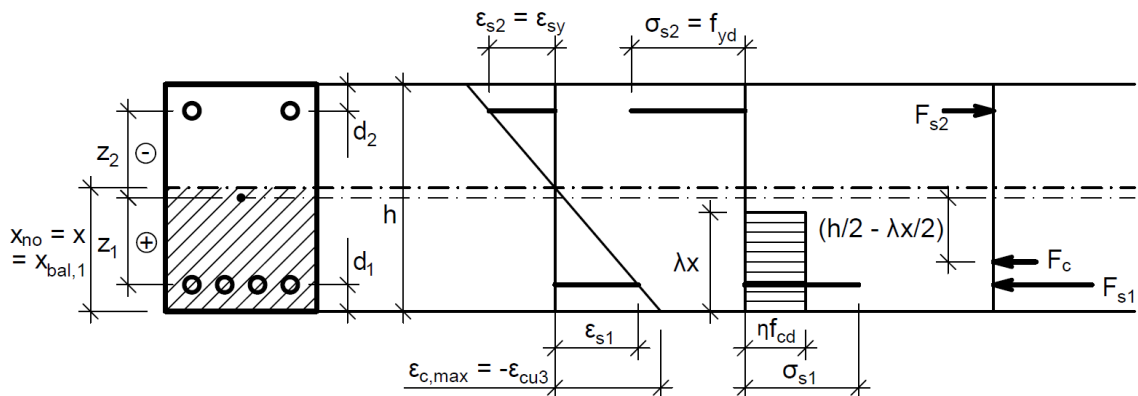
$$\sigma_{s1} = -\min(|\varepsilon_{s1}|E_s; f_{yd}), \quad (2.1.26a)$$

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

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 ε_{s1} psát ε_{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 drčení tlačeneho betonu, blíže viz kapitola 1.1.1. Pro poměrné přetvoření krajních tlačenech vláken $\varepsilon_{c,max}$ platí vztah (2.1.7) a pro napětí v tlačené části betonu σ_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

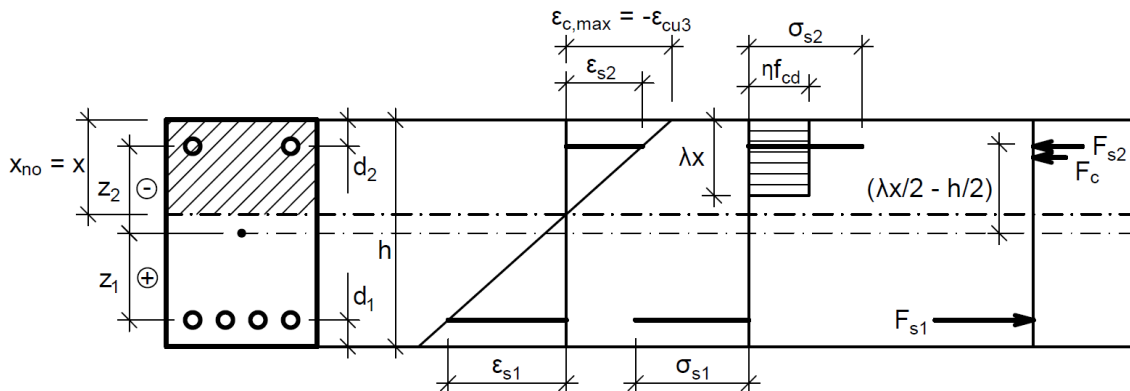
$$\sigma_{s1} = \text{sgn}(\varepsilon_{s1}) \min(|\varepsilon_{s1}|E_s; f_{yd}), \quad (2.1.31a)$$

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

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

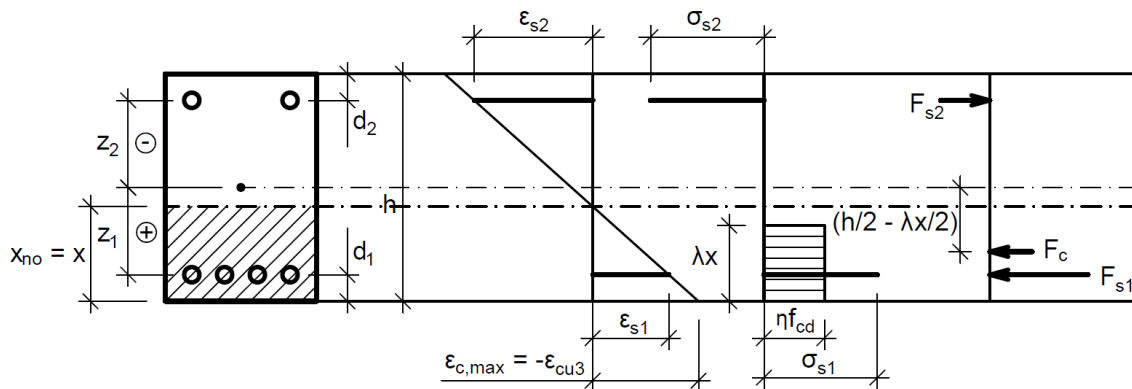
$$\varepsilon_{s1} = \frac{x - d_1}{x} (-\varepsilon_{cu3}), \quad (2.1.33a)$$

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

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 σ_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

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

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

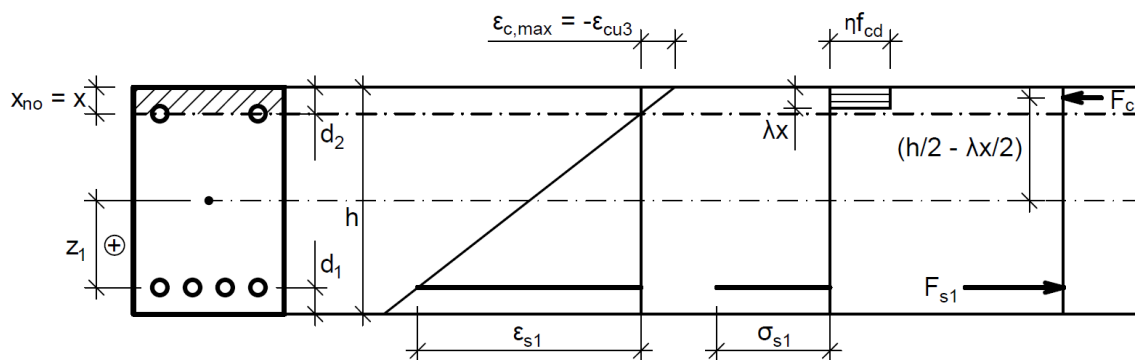
Neutrální osa prochází těžištěm výztuže S_2 , pro výšku tlačené oblasti tedy platí

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

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

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

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

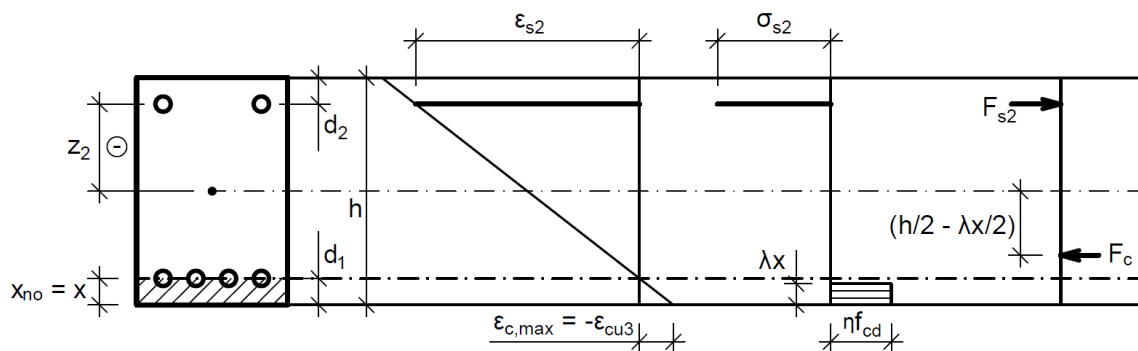
Neutrální osa prochází těžištěm výztuže S_1 , pro výšku tlačené oblasti tedy platí

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

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

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

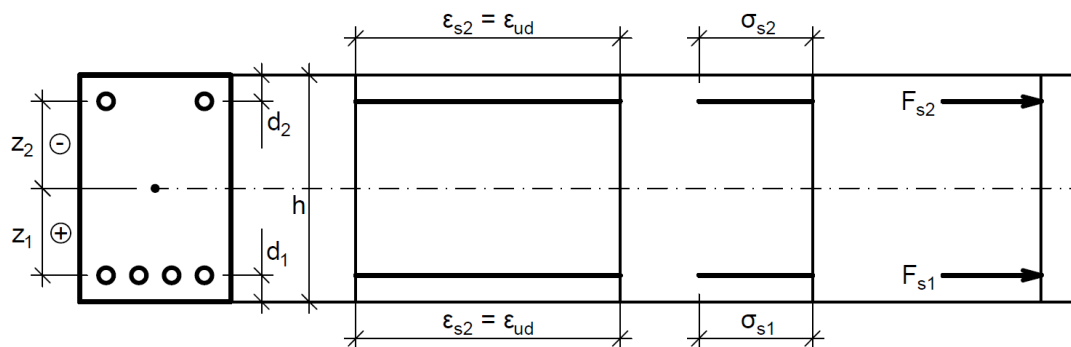
Dosažením poměrného přetvoření výztuže do vztahu (1.2.2) získáme napětí ve výztuži

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

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

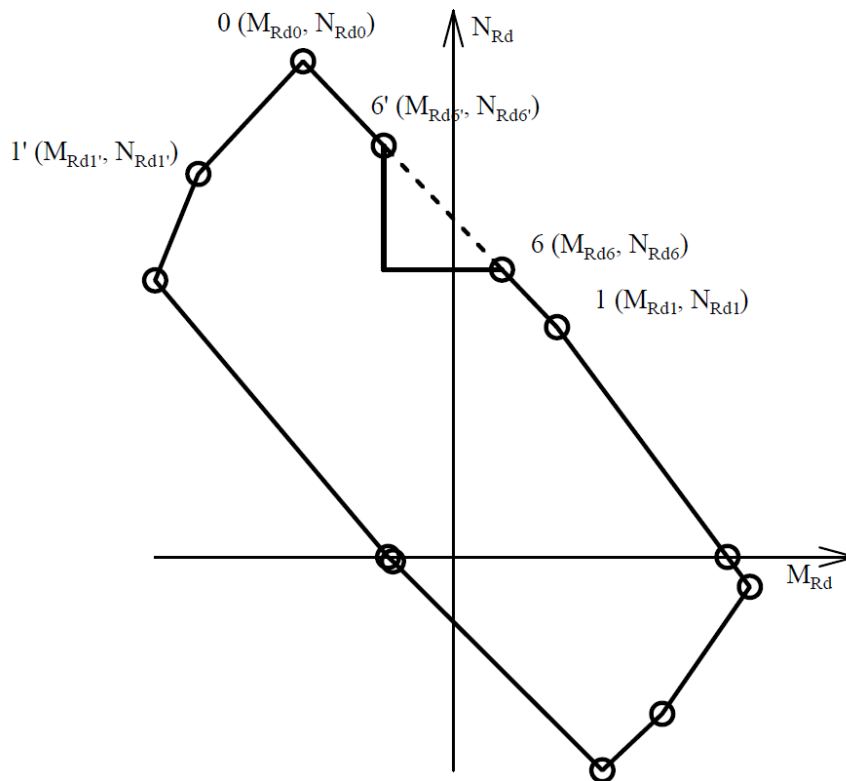
$$e_0 = \max(h/30; 20 \text{ mm}), \quad (2.1.49)$$

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 nabízejí 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

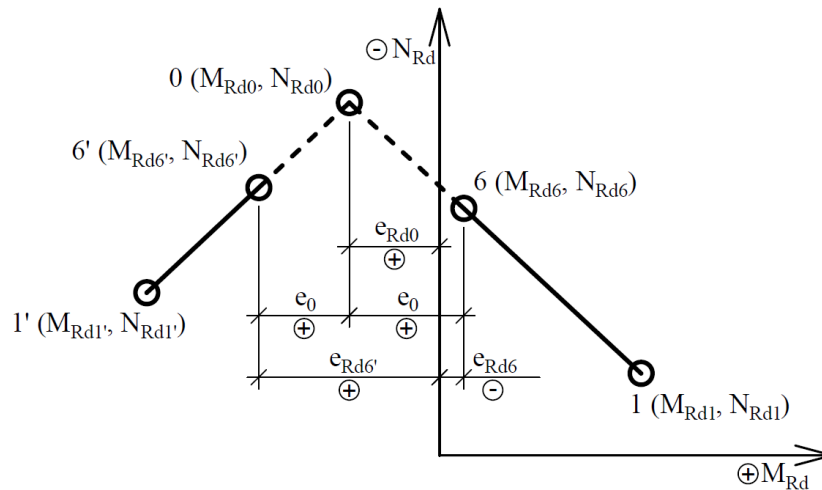
Bodem 6', který vyjadřuje namáhání silou působící s výstředností $e_{Rd6'} = e_{Rd0} + e_0$, omezujeme levou část interakčního diagramu shora.

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

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

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

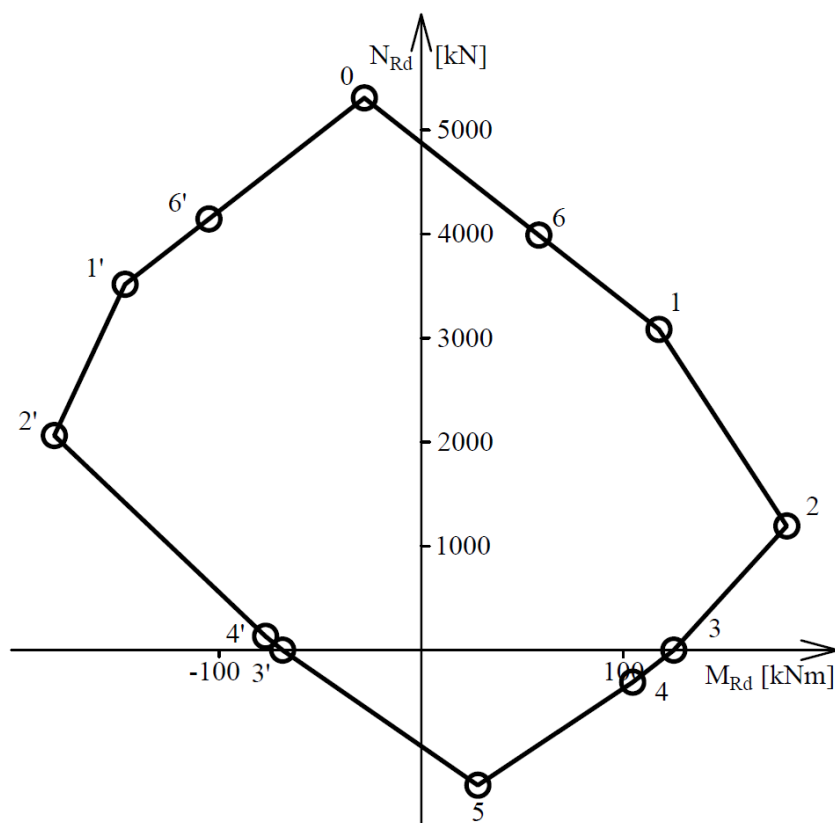
$$\text{kde } k_{01'} = \frac{M_{Rd1'} - M_{Rd0}}{N_{Rd1'} - N_{Rd0}}. \quad (2.1.58)$$



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 $\rho_2 = 0,5$ %

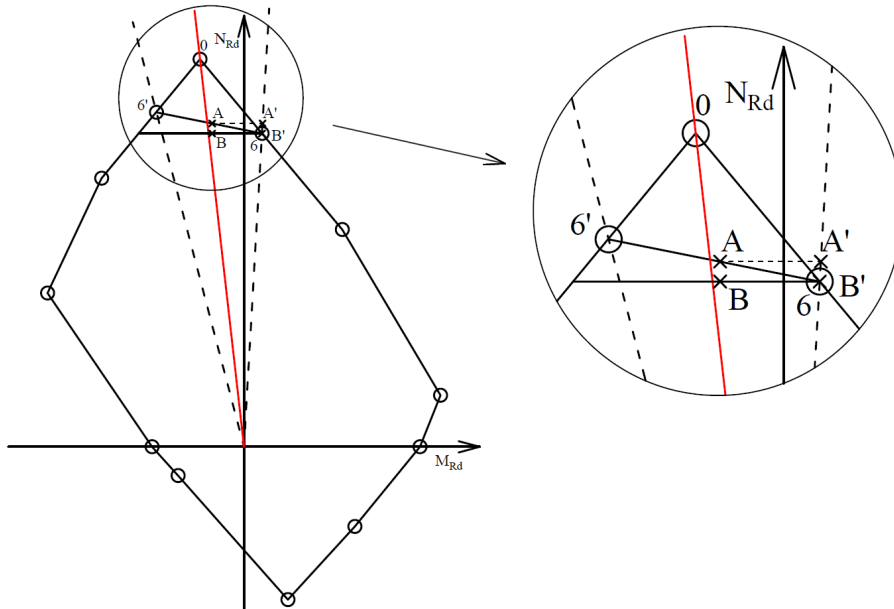
2.1.9.1 Omezení horní části diagramu

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.

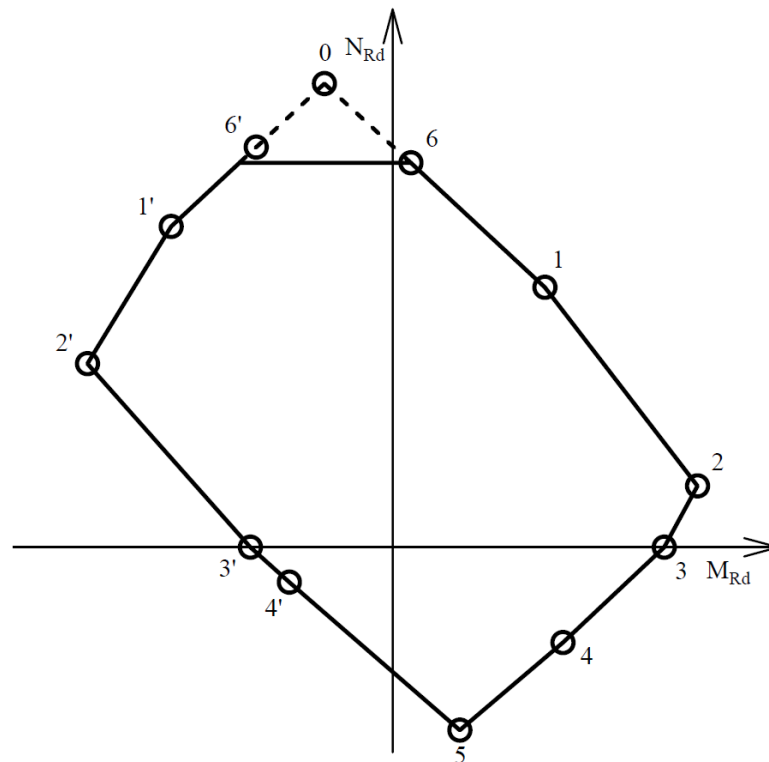
V případě, že bychom zvolili postup uvedený v publikaci [3] a spojili bod 6 a 6', bod A by měl vyhovovat návrhu, jelikož neleží mimo interakční diagram. Tento bod však nesplňuje podmínku minimální výstřednosti, a proto jej musíme „posunout“ na průnik s čárkovanou čarou – bod A'. Tento posunutý bod A'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

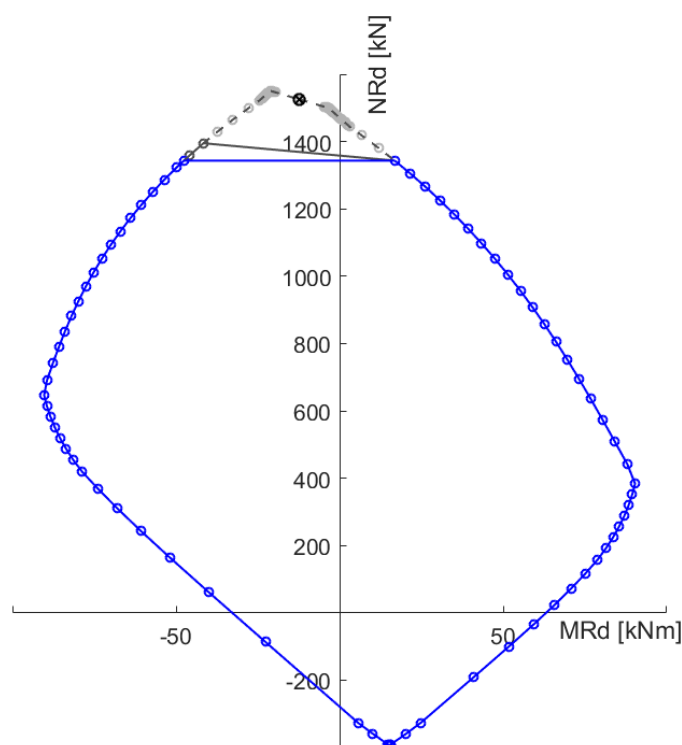


Obr. 2.16: Interakční diagram s vodorovným omezením horní části

2.2 Mnohobodový interakční diagram – nejjednodušší pracovní diagramy

Druhý program vytvořený v rámci této práce je v zásadě také bodovým diagramem, kde každý bod definujeme polohou neutrální osy a typem namáhání (zda je průřez namáhán kladným, či záporným momentem).

Počet bodů interakčního diagramu si volí sám uživatel, a to nepřímo, volbou „délky kroku“ neutrální osy, tzn. o kolik milimetrů se změní poloha neutrální osy při výpočtu následujícího bodu. Za zmínku stojí, že již při délce kroku pouhých $h/20$ (h dosazujeme v milimetrech) je vygenerován dostatečný počet bodů na to, aby po jejich spojení vznikl interakční diagram ve tvaru plynulé křivky, viz obr. 2.17.



Obr. 2.17: Interakční diagram ($h = 200$ mm, $k_r = 10$ mm)

2.2.1 Předpoklady výpočtu

Při výpočtu síly v tlačené části betonu uvažujeme rovnoměrné rozdělení tlakového napětí na účinné výšce tlačené oblasti λx , viz kapitola 1.2.7. Pro výpočet napětí v tlačeném betonu tedy platí vztah

$$\sigma_c = -\eta f_{cd}^* \quad (2.2.1)$$

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

Pracovní diagram betonářské oceli uvažujeme s vodorovnou větví bez omezení poměrného přetvoření, viz kapitola 1.2.1. Tento pracovní diagram volíme z následujících dvou důvodů. Za prvé, výrazně se tím zjednoduší postup výpočtu – při malé výšce tlačené oblasti dochází k velkému poměrnému přetvoření výztuže a použili-li bychom pracovní diagram se stoupající větví (který má omezení poměrného přetvoření), museli bychom řešit, zda dojde k selhání průřezu drcením betonu nebo porušením výztuže. Za druhé, je možné výsledky lépe porovnat s ručním výpočtem – při ručních výpočtech jak v praxi, tak při výuce, je totiž rovněž uvažován pracovní diagram s vodorovnou větví. Pro výpočet interakčního diagramu při použití pracovního diagramu se stoupající větví autor odkazuje na program popsany v kapitole 2.3.

Vzhledem k tomu, že poměrné přetvoření výztuže není omezeno, můžeme uvažovat, že meze únosnosti průřezu je vždy dosaženo při dosažení maximálního dovoleného poměrného přetvoření betonu $\varepsilon_{c,max}$ v krajních nejvíce tlačenech vláknech, viz kapitola 1.1.1.1. Pro námi uvažovaný pracovní diagram betonu platí

$$\varepsilon_{c,max} = - \left(\frac{|\varepsilon_{c3}|}{x_{no} - (1 - |\varepsilon_{c3}|/|\varepsilon_{cu3}|)h} x_{no} \right). \quad (2.2.2)$$

Při výpočtu únosnosti průřezu při rovnoměrném protažení průřezu uvažujeme, že na mezi únosnosti průřezu je veškerá výztuž za mezí kluzu.

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.

2.2.2 Kontrola minimální výstřednosti tlakové normálové síly

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1.8, norma [1] předepisuje minimální výstřednost tlakové síly e_0 a tuto minimální výstřednost e_0 uvažujeme od působíště síly N_{Rd0} , tj. od síly vyvolávající rovnoměrné stlačení průřezu.

Podmínka minimální výstřednosti tlakové síly od působíště síly vyvolávající rovnoměrné tlakové přetvoření průřezu je

$$-e_{Rdi} + e_{Rd0} \geq e_0^* \quad \text{pro pravou část interakčního diagramu,} \quad (2.2.3a)$$

$$e_{Rdi} - e_{Rd0} \geq e_0^\dagger \quad \text{pro levou část interakčního diagramu.} \quad (2.2.3b)$$

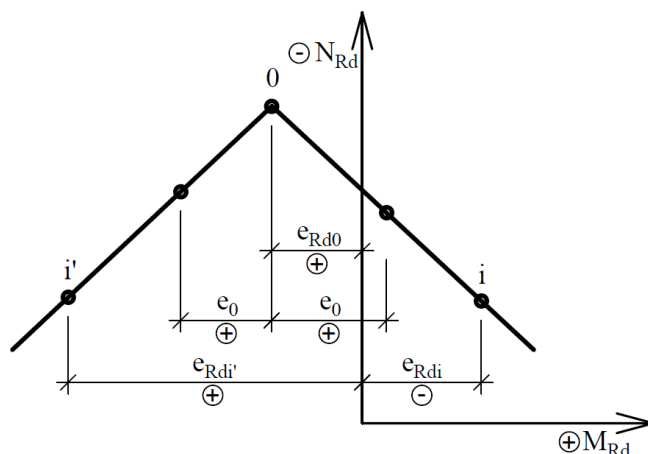
*Záporná výstřednost síly N_{Rdi} zvětšuje vzdálenost bodu i od bodu 0 a kladná výstřednost síly N_{Rd0} zvětšuje vzdálenost bodu 0 od bodu i – vychází z konvence vykreslování ID, viz obr. 2.18.

†Kladná výstřednost síly N_{Rdi} zvětšuje vzdálenost bodu i od bodu 0 a kladná výstřednost síly N_{Rd0} zmenšuje vzdálenost bodu 0 od bodu i – vychází z konvence vykreslování ID, viz obr. 2.18.

Při výpočtu únosnosti průřezu však momentovou únosnost počítáme vzhledem ke střednici prvku a excentricita síly na mezi únosnosti je tedy rovněž vztahována ke střednici prvku. Podmínku minimální výstřednosti je tedy vhodné upravit na podmínku minimální výstřednosti tlakové síly od střednice prvku

$$e_{Rdi} \leq e_{Rd0} - e_0 \quad \text{pro pravou část interakčního diagramu,} \quad (2.2.4a)$$

$$e_{Rdi} \geq e_{Rd0} + e_0 \quad \text{pro levou část interakčního diagramu.} \quad (2.2.4b)$$



Obr. 2.18: Vyznačení uvažovaných excentricit včetně znamének

V dalším textu, není-li specifikováno jinak, je výstředností síly myšlena vzdálenost působíště tlakové síly od střednice prvku, tj. poloviny výšky průřezu.

Ze vztahů (2.2.4) je zřejmé, že hodnota minimální výstřednosti síly závisí na výstřednosti e_{Rd0} , kterou tedy musíme stanovit jako první, a až poté můžeme ověřit podmínku minimální výstřednosti. Výstřednost e_{Rd0} vypočteme z poměru momentové a normálové únosnosti průřezu při namáhání vyvolávajícím rovnoměrné stlačení průřezu. Postup pro stanovení této únosnosti je uveden v kapitole 2.1.2, níže tedy uvádíme rovnou vztahy pro výpočet únosnosti

$$N_{Rd0} = bh(-\eta f_{cd}) + A_{s1}(-f_{yd}) + A_{s2}(-f_{yd}), \quad (2.2.5)$$

$$M_{Rd0} = A_{s1}(-f_{yd})z_1 + A_{s2}(-f_{yd})z_2. \quad (2.2.6)$$

Po určení únosnosti průřezu můžeme vypočítat výstřednost síly N_{Rd0} pomocí vztahu

$$e_{Rd0} = M_{Rd0}/N_{Rd0}. \quad (2.2.7)$$

Ověření splnění podmínky minimální výstřednosti normálové síly (2.2.4) provádíme při výpočtu každého bodu interakčního diagramu, blíže viz kapitola 2.2.3 a 2.2.4. Pokud není tato podmínka splněna, bod je použit pouze pro konstrukci interakčního diagramu bez omezení minimální výstřednosti síly (přerušovaná čára na obr. 2.17). Pokud je tato podmínka splněna, bod je použit rovněž pro konstrukci interakčního diagramu s omezením minimální výstřednosti síly (plná čára na obr. 2.17).

2.2.3 Pravá část diagramu – namáhání kladným momentem

Pravá část diagramu je spojnice bodů, kde každý bod vyjadřuje únosnost průřezu při zvolené poloze neutrální osy a při předpokladu, že na mezi únosnosti průřezu je dosaženo maximálního dovoleného poměrného přetvoření betonu v krajních horních vláknech průřezu.

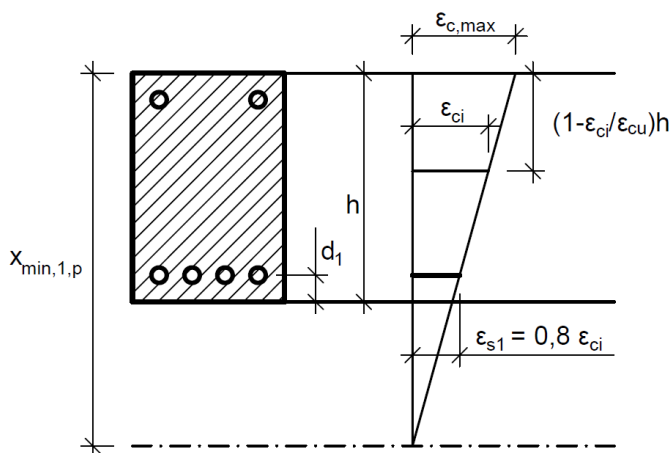
Polohu neutrální osy definujeme její vzdáleností x_{no} od nejvíce tlačných, případně nejméně tažených (v případě plně taženého průřezu), vláken. Při namáhání kladným momentem tedy měříme vzdálenost od krajních horních vláken průřezu (měříme kladně směrem k dolním vláknům).

První polohu neutrální osy volíme tak, aby první bod byl co nejbližší bodu 0, tj. bodu vyjadřujícímu únosnost průřezu při namáhání způsobujícím rovnoměrné stlačení průřezu. Volíme tedy takovou polohu neutrální osy, kdy celý průřez je tlačěn a poměrné přetvoření výztuže se výrazně neliší od poměrného přetvoření výztuže při namáhání vyjádřeném bodem 0. Bod 0 a první bod pravé části diagramu se nacházejí v horní části diagramu, která bude nakonec „oříznuta“ zavedením podmínky minimální výstřednosti normálové síly, a nemusíme tedy řešit zvlášť přesné přiblížení se bodu 0. Autor této práce volí jako dostatečnou přesnost přiblížení takovou, kdy maximální rozdíl mezi poměrným přetvořením výztuže v prvním bodě pravé části diagramu a poměrným přetvořením výztuže v bodě 0 je 20 %. Z průběhu poměrného přetvoření po výšce průřezu na obr. 2.19 je vidět, že větší rozdíl mezi poměrnými přetvořeními bude ve spodní výztuži. Hledáme tedy takovou vzdálenost neutrální osy od horních vláken, aby poměrné přetvoření této spodní výztuže bylo rovno 80 % poměrného přetvoření výztuže v bodě 0, tedy aby platilo $\varepsilon_{s1} = 0,8 \varepsilon_{c3}$. Z podobnosti trojúhelníků na obr. 2.19 lze sestavit rovnici

$$\frac{0,8 \varepsilon_{c3}}{x_{min,1,p} - h + d_1} = \frac{\varepsilon_{c3}}{x_{min,1,p} - (1 - \varepsilon_{c3}/\varepsilon_{cu3})h}, \quad (2.2.8)$$

ze které získáme vztah pro výpočet minimální vzdálenosti neutrální osy od horních vláken při první iteraci cyklu

$$x_{min,1,p} = \lceil 5 [h - d_1 - 0,8(1 - \varepsilon_{c3}/\varepsilon_{cu3})h] \rceil^*. \quad (2.2.9)$$



Obr. 2.19: Průběh poměrného přetvoření po výšce průřezu při minimální požadované vzdálenosti neutrální osy od horních vláken

*Vzdálenost zaokrouhlujeme nahoru na celá čísla (vzdálenost počítáme v milimetrech)

Postup výpočtu každého bodu pravé části interakčního diagramu, tj. výpočet normálové a momentové únosnosti pro každou polohu neutrální osy, je stejný. Výpočet všech bodů je tedy prováděn v iteracích jednoho cyklu, kde je na konci každé iterace zmenšena vzdálenost neutrální osy od horních vláken o k_r a zvětšena hodnota proměnné i o 1. Cyklus probíhá do té doby, dokud je vzdálenost neutrální osy od horních vláken větší než 0, tzn. dokud se neutrální osa nachází pod horní hranou průřezu a horní vlákna průřezu jsou tlačena.

2.2.3.1 Postup výpočtu únosnosti průřezu

Pro výpočet únosnosti průřezu je třeba znát vzdálenost neutrální osy od horních vláken, dále jen „vzdálenost neutrální osy“. Před spuštěním cyklu je vzdálenosti neutrální osy přiřazena hodnota $x_{min,1,p}$ a proměnné i je přiřazena hodnota 1. Při výpočtu prvního bodu, tj. v první iteraci cyklu, tedy platí

$$x_{no} = x_{min,1,p}. \quad (2.2.10)$$

V dalších iteracích pak za vzdálenost neutrální osy dosazujeme hodnotu stanovenou na konci předchozí iterace vztahem

$$x_{no} = x_{no} - k_r^*. \quad (2.2.11)$$

V závislosti na vzdálenosti neutrální osy je v dalším kroku iterace stanoveno maximální dovolené poměrné přetvoření betonu $\varepsilon_{c,max}$ pomocí vztahu (2.2.2).

Dále předpokládáme poměrné přetvoření krajních horních vláken rovné maximálnímu dovolenému poměrnému přetvoření betonu $\varepsilon_{c,max}$ a stanovujeme poměrné přetvoření výztuže pomocí vztahů (1.1.10) a z poměrného přetvoření výztuže stanovujeme napětí ve výztuži pomocí vztahu (1.2.2).

Po stanovení napětí ve výztuži je možno vypočítat sílu v dolní a horní výztuži ze vztahů

$$F_{s1} = \sigma_{s1} A_{s1}, \quad (2.2.12a)$$

$$F_{s2} = \sigma_{s2} A_{s2}. \quad (2.2.12b)$$

Výšku tlačené oblasti průřezu stanovíme pomocí vztahu (2.2.13), kde omezení shora hodnotou h/λ vychází ze skutečnosti, že účinná výška tlačené oblasti λx nemůže být větší než výška průřezu h .

$$x = \min(x_{no}; h/\lambda). \quad (2.2.13)$$

Sílu v tlačeném betonu vypočítáme ze vztahu

$$F_c = (\lambda x) b \sigma_c. \quad (2.2.14)$$

Normálovou a momentovou únosnost průřezu můžeme vypočítat pomocí vztahů

$$N_{Rdi} = F_c + F_{s1} + F_{s2}, \quad (2.2.15)$$

$$M_{Rdi} = F_c(\lambda x/2 - h/2) + F_{s1} z_1 + F_{s2} z_2. \quad (2.2.16)$$

*Zároveň pro vzdálenost neutrální osy v dané iteraci platí vztah $x_{no} = x_{min,1,p} - (i - 1)k_r$

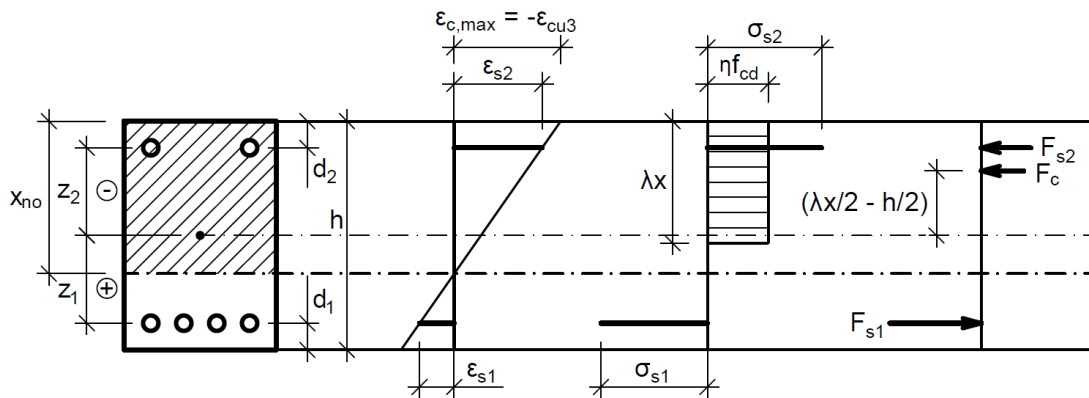
Výstřednost mezní normálové síly od střednice prvku vypočteme z mezní normálové síly a mezního momentu pomocí vztahu

$$e_{Rdi} = M_{Rdi} / N_{Rdi}. \quad (2.2.17)$$

Jak již bylo řečeno v kapitole 2.2.2, výstřednost mezní normálové síly e_{Rdi} porovnáváme s minimální výstředností tlakové síly od střednice prvku, a platí-li

$$e_{Rdi} \leq e_{Rd0} - e_0, \quad (2.2.18)$$

pak je bod $[M_{Rdi}, N_{Rdi}]$ použit pro konstrukci interakčního diagramu s omezením minimální výstřednosti síly (plná čára na obr. 2.17). V případě, že podmínka není splněna, je bod použit pouze pro konstrukci interakčního diagramu bez omezení minimální výstřednosti síly (přerušovaná čára na obr. 2.17).



Obr. 2.20: Schéma poměrného přetvoření, napětí a sil v průřezu

2.2.4 Levá část diagramu – namáhání záporným momentem

Postup sestavení levé části interakčního diagramu je analogický s postupem sestavení pravé části (viz kapitola 2.2.3), a proto jsou níže uvedené popisy zestručněny.

Každý bod levé části interakčního diagramu vyjadřuje únosnost průřezu při zvolené poloze neutrální osy a při předpokladu, že na mezi únosnosti průřezu je dosaženo maximálního dovoleného poměrného přetvoření betonu v krajních dolních vláknech průřezu.

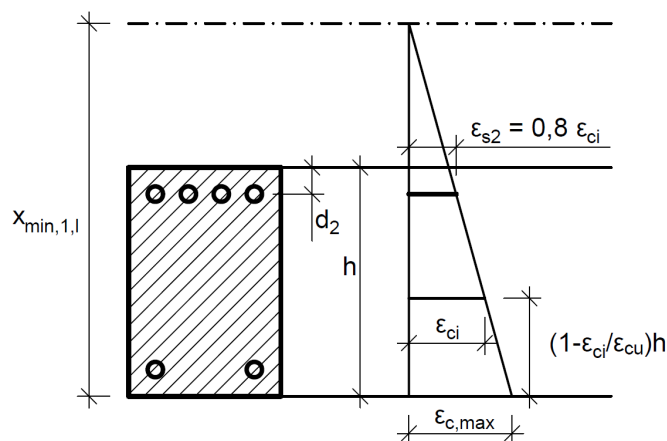
Polohu neutrální osy definujeme její vzdáleností x_{no} od nejvíce tlačených, případně nejméně tažených (v případě plně taženého průřezu), vláken. Pro namáhání záporným momentem tedy měříme vzdálenost od krajních dolních vláken průřezu (měříme kladně směrem k horním vláknům).

První polohu neutrální osy volíme takovou, aby poměrné přetvoření horní výztuže bylo nejméně rovno 80 % poměrného přetvoření výztuže při namáhání rovnoměrným stlačením, tedy aby platilo $\varepsilon_{s2} = 0,8 \varepsilon_{c3}$. Z podobnosti trojúhelníků na obr. 2.21 lze sestavit rovnici

$$\frac{0,8 \varepsilon_{c3}}{x_{min,1,l} - h + d_2} = \frac{\varepsilon_{c3}}{x_{min,1,l} - (1 - \varepsilon_{c3}/\varepsilon_{cu3})h}, \quad (2.2.19)$$

ze které získáme vztah pro výpočet minimální vzdálenosti neutrální osy od dolních vláken při první iteraci cyklu

$$x_{min,1,l} = [5 [h - d_2 - 0,8(1 - \varepsilon_{c3}/\varepsilon_{cu3})h]]^*. \quad (2.2.20)$$



Obr. 2.21: Průběh poměrného přetvoření po výšce průřezu při minimální požadované vzdálenosti neutrální osy od dolních vláken

Výpočet bodů je opět prováděn v iteracích jednoho cyklu, stejně jako při výpočtu bodů pravé strany diagramu, viz kapitola 2.2.3.

*Vzdálenost zaokrouhlujeme nahoru na celá čísla (vzdálenost počítáme v milimetrech)

2.2.4.1 Postup výpočtu únosnosti průřezu

Níže uvedený postup je analogický s postupem pro výpočet bodu pravé strany interakčního diagramu. Z toho důvodu je vysvětlení zestručněno a je odkazováno na již vypsané vztahy. Důkladnější vysvětlení viz kapitola 2.2.3.1.

Při výpočtu prvního bodu, tj. v první iteraci cyklu, platí

$$x_{no} = x_{min,1,l}. \quad (2.2.21)$$

V dalších iteracích pak za vzdálenost neutrální osy dosazujeme hodnotu stanovenou na konci předchozí iterace vztahem

$$x_{no} = x_{no} - k_r^*. \quad (2.2.22)$$

Maximální dovolené poměrné přetvoření betonu $\varepsilon_{c,max}$ stanovíme pomocí vztahu (2.2.2).

Poměrné přetvoření výztuže stanovíme pomocí vztahů (1.1.12), z poměrného přetvoření výztuže stanovíme napětí ve výztuži pomocí vztahu (1.2.2) a po stanovení napětí ve výztuži vypočítáme sílu v dolní a horní výztuži pomocí vztahů (2.2.12).

Pro výšku tlačené oblasti průřezu platí vztah (2.2.13) a sílu v tlačěném betonu vypočítáme ze vztahu (2.2.14).

Normálovou a momentovou únosnost průřezu vypočítáme pomocí vztahů

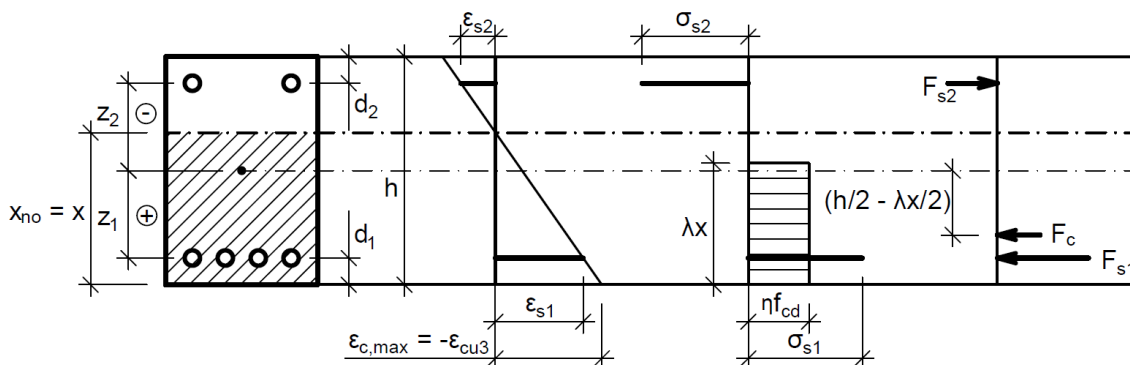
$$N_{Rdi} = F_c + F_{s1} + F_{s2}, \quad (2.2.23)$$

$$M_{Rdi} = F_c(h/2 - \lambda x/2) + F_{s1}z_1 + F_{s2}z_2. \quad (2.2.24)$$

Výstřednost mezní normálové síly e_{Rdi} vypočteme pomocí vztahu (2.2.17). Vypočtenou hodnotu porovnáme s požadovanou minimální výstředností tlakové síly, a platí-li

$$e_{Rdi} \geq e_{Rd0} + e_0, \quad (2.2.25)$$

je bod $[M_{Rdi}, N_{Rdi}]$ použit pro konstrukci interakčního diagramu s omezením minimální výstřednosti síly (plná čára na obr. 2.17). V případě, že podmínka není splněna, je bod použit pouze pro konstrukci interakčního diagramu bez omezení minimální výstřednosti síly (přerušovaná čára na obr. 2.17).



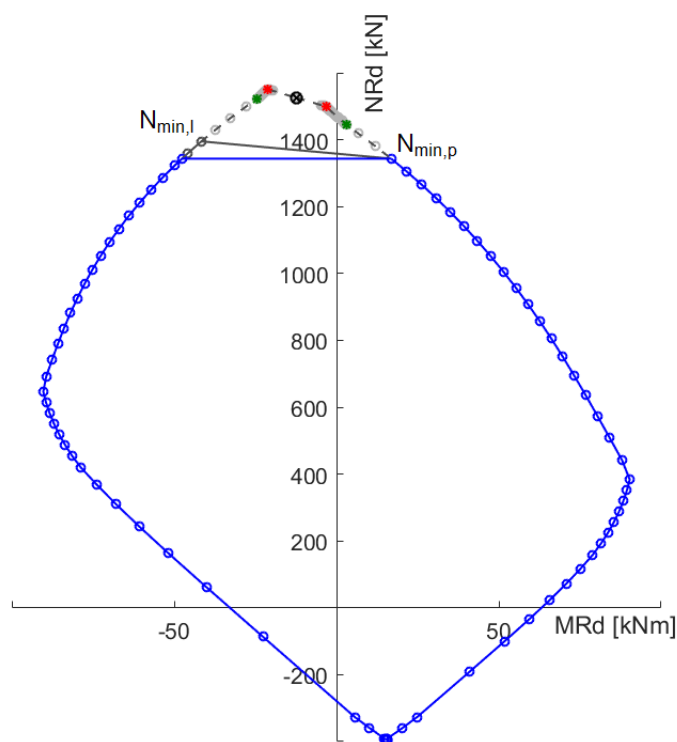
Obr. 2.22: Schéma poměrného přetvoření, napětí a sil v průřezu

* Zároveň pro vzdálenost neutrální osy v dané iteraci platí vztah $x_{no} = x_{min,1,l} - (i - 1)k_r$

2.2.5 Sestrojení interakčního diagramu

Interakční diagram je sestaven ze čtyř částí. První částí je bod 0 vyjadřující únosnost při rovnoměrném stlačení průřezu (viz kapitola 2.1.2), druhou částí je pravá část diagramu (viz kapitola 2.2.3), třetí částí je bod vyjadřující únosnost při rovnoměrném protažení průřezu (viz kapitola 2.1.7) a čtvrtou částí je levá část diagramu (viz kapitola 2.2.4).

Omezení horní části diagramu z důvodu podmínky minimální výstřednosti tlakové síly e_0 je sestaveno tak, že je zvolena větší (méně záporná) hodnota z hodnot $N_{min,p}$ a $N_{min,l}$ ($N_{min,p}$ je největší tlaková síla splňující podmínku minimální výstřednosti síly na pravé straně diagramu a $N_{min,l}$ je největší tlaková síla splňující podmínku minimální výstřednosti síly na levé straně diagramu). Zvolenou hodnotou je proložena vodorovná úsečka, která omezuje diagram shora. Zdůvodnění tohoto způsobu omezení diagramu viz kapitola 2.1.9.1.



Obř. 2.23: Interakční diagram – $b = 200$ mm, $h = 300$ mm, B500B C30/37, $\rho_1 = 1$ %, $\rho_2 = 0,5$ %, $k_r = 10$

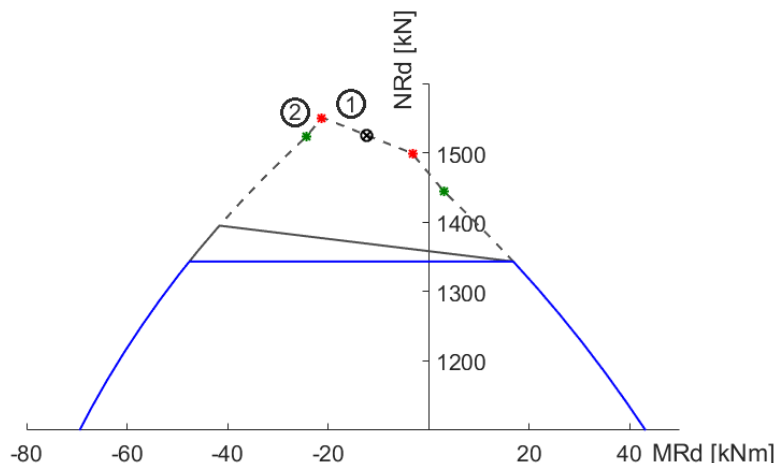
2.2.6 Popis interakčního diagramu

2.2.6.1 Konvence vykreslování a značení

Tlaková síla je vynášena záporně směrem nahoru a moment je vynášen kladně směrem vpravo. Modrou plnou čarou je vykreslen interakční diagram se zavedenou podmínkou minimální výstřednosti normálové síly a vodorovným omezením diagramu shora. Tmavě šedou plnou čarou je vykreslena část diagramu se zavedenou podmínkou minimální výstřednosti normálové síly a šikmým omezením diagramu shora – první body vyjadřující namáhání normálovou silou, která splňuje podmínku minimální výstřednosti, jsou prostě spojeny. Světle šedou přerušovanou čarou je vykreslena část diagramu bez zavedení podmínky minimální výstřednosti normálové síly. Bod označený proškrtnutým černým kolečkem značí bod 0, tj. namáhání rovnoměrným stlačení průřezu.

2.2.6.2 Popis horní části interakčního diagramu

Na obr. 2.23 lze vidět zvláštní tvar horní části interakčního diagramu. Na obr. 2.24 je detailně zobrazena tato horní část diagramu, a protože má levá horní část diagramu nejzvláštnější tvar, je níže v této podkapitole detailně popsána.



Obr. 2.24: Interakční diagram – $b = 200$ mm, $h = 302$ mm, B500B C30/37, $\rho_1 = 1$ %, $\rho_2 = 0,5$ %, $k_r = 10$

Oblast 1

Oblast 1 je označení pro oblast od bodu označeného černým proškrtnutým kolečkem do bodu označeného červeným křížkem. Černé proškrtnuté kolečko značí bod vyjadřující únosnost při rovnoměrném stlačení průřezu. Červený křížek značí bod vyjadřující únosnost při namáhání, kde více tlačena (dolní) výztuž právě dosáhla meze kluzu. Níže je zdůvodněno, proč je křivka od prvního bodu ke druhému rostoucí.

Při rovnoměrném stlačení průřezu (na grafu bod označený černým kolečkem) je přetvoření ve všech bodech průřezu rovné ε_{c3} , a pro beton třídy C30/37 platí $\varepsilon_{c3} < \varepsilon_{sy}$ – výztuž tedy není plně využita (napětí ve výztuži je menší než napětí na mezi kluzu výztuže).

Při zvětšující se výstřednosti tlakové síly směrem k dolním vláknům (tj. při zmenšující se vzdálenosti neutrální osy od dolních vláken průřezu) se mění průběh poměrného přetvoření po výšce průřezu, viz obr. 2.25. Poměrné přetvoření (stlačení) horních vláken klesá* a poměrné přetvoření (stlačení) vláken dolních roste*. Jak lze vidět na obr. 2.25, poměrné přetvoření horních krajních vláken klesá rychleji než poměrné přetvoření dolních vláken roste. Poměr změn poměrných přetvoření krajních vláken je přibližně 4:3 (horní:dolní).

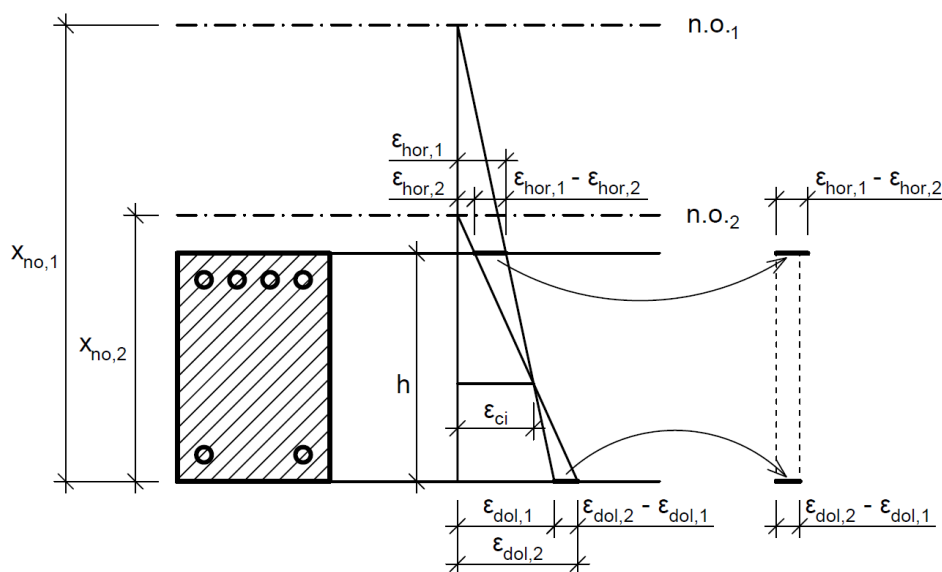
Pro výztuž u horních a dolních vláken platí totéž, co pro krajní vlákna průřezu – poměrné přetvoření horní výztuže klesá rychleji než poměrné přetvoření dolní výztuže roste. Se změnou poměrného přetvoření se mění i napětí ve výztuži – napětí v horní výztuži klesá† a napětí v dolní výztuži roste†. Napětí v horní výztuži rovněž klesá rychleji než napětí v dolní výztuži roste. Průřez je však nesouměrně vyztužený a plocha výztuže u dolních

*Poměrné přetvoření v tlaku (stlačení) je běžně uvažováno jako záporné přetvoření, a tudíž se zvětšujícím se poměrným stlačením se zvětšuje záporná hodnota, a z matematického pohledu se tedy hodnota poměrného přetvoření zmenšuje. Pro přehlednost a lepší pochopení však uvažujeme přetvoření v absolutních hodnotách. Větší poměrné stlačení (více záporné poměrné přetvoření) tedy považujeme za větší poměrné přetvoření a naopak.

†Platí totéž, co pro poměrné přetvoření – více záporná hodnota je považována za větší napětí a naopak.

vláken je dvakrát větší než plocha výztuže u horních vláken (platí $A_{s1} = 2A_{s2}$), a tudíž při stejné změně napětí ve výztužích bude změna síly v dolní výztuži dvakrát větší než změna síla v horní výztuži. Vezmeme-li v potaz, jak poměr změn napětí (4:3), tak poměr ploch výztuží (1:2), získáme přibližný poměr změn v silách ve výztužích při změně polohy neutrální osy. Tento poměr je přibližně 4:6 (horní:dolní).

Zjišťujeme tedy, že při zmenšující se vzdálenosti neutrální osy od dolních vláken průřezu se tlaková síla v dolní výztuži zvětšuje[†] rychleji, než se síla ve výztuži dolní zmenšuje[†] – suma sil ve výztužích se tedy zvětšuje[†]. V průběhu výše popsaných změn sil ve výztužích je průřez stále plně tlačěn, a tudíž se celková tlaková síla v betonu nemění. Shrňme-li vše výše uvedené, pak můžeme konstatovat, že: Při zmenšující se vzdálenosti neutrální osy od dolních vláken průřezu se zvětšuje[†] suma všech vnitřních sil působících v průřezu, a tudíž se zvětšuje normálová únosnost průřezu.



Obr. 2.25: Poměr změn přetvoření krajních vláken při změně polohy neutrální osy

Oblast 2

Oblast 2 je označení pro oblast od bodu označeného červeným křížkem do bodu označeného zeleným křížkem. Červený křížek značí bod vyjadřující únosnost při namáhání, kde více tlačená (dolní) výztuž právě dosáhla meze kluzu. Zelený křížek značí první bod vyjadřující únosnost při namáhání, kde část průřezu je tažena (průřez již není zcela tlačěn). Níže je zdůvodněno, proč křivka v oblasti 2 již není rostoucí, nýbrž klesající.

Normálová únosnost průřezu roste se zmenšující se vzdáleností neutrální osy od dolních vláken průřezu pouze do chvíle, kdy je dosaženo meze kluzu v dolní tlačené výztuži (červený křížek na obr. 2.24). Ve chvíli, kdy je dosaženo meze kluzu v dolní tlačené výztuži, se již napětí ve výztuži nezvyšuje (uvažujeme pracovní diagram oceli s vodorovnou horní větví). Zároveň však stále klesá[†] napětí v horní výztuži, tedy klesá[†] i síla v horní výztuži, a tudíž klesá[†] i suma sil ve výztužích.

Průřez je stále plně tlačěn a celková tlaková síla v betonu se tedy nemění. Suma všech vnitřních sil působících v průřezu, tj. normálová únosnost průřezu, se tedy rovněž zmenšuje[†].

[†] Platí totéž, co pro poměrné přetvoření – více záporná hodnota je považována za větší napětí a naopak.

Druhý zlom křivky interakčního diagramu (zelený křížek)

Při zmenšující se vzdálenosti neutrální osy je nakonec dosaženo takové polohy neutrální osy, kdy průřez již není plně tlačěn, nýbrž pouze částečně tlačěn. Zelený křížek značí přechod mezi plně tlačěným a částečně tlačěným průřezem. Body nad zeleným křížkem vyjadřují únosnosti plně tlačěných průřezů.

Shrnutí

Křivka interakčního diagramu roste v oblasti 1, jelikož se změnou polohy neutrální osy roste tlaková síla v dolní výztuži rychleji, než tlaková síla v horní výztuži klesá. Průřez je zcela tlačěn a tlaková síla v betonu se nemění. Suma všech vnitřních sil, která odpovídá normálové únosnosti průřezu, tedy roste[†].

Křivka interakčního diagramu klesá v oblasti 2, jelikož dolní výztuž je za mezí kluzu, a tlaková síla v ní tedy již neroste. Zároveň však, se změnou polohy neutrální osy, tlaková síla v horní výztuži stále klesá. Průřez je stále zcela tlačěn a tlaková síla v betonu se nemění. Suma všech vnitřních sil, která odpovídá normálové únosnosti průřezu, tedy klesá[†].

Druhý zlom křivky interakčního diagramu (zelený křížek) značí přechod mezi plně tlačěným a částečně tlačěným průřezem.

2.3 Mnohobodový interakční diagram – libovolné pracovní diagramy

Třetí program vytvořený v rámci této práce je velmi podobný programu druhému, a platí vše uvedené v úvodu kapitoly 2.2.

Tento program se od druhého programu liší zejména způsobem výpočtu síly v tlačeném betonu. V druhém programu uvažujeme rovnoměrné rozdělení tlakového napětí na účinné výšce tlačené oblasti a celkovou sílu v tlačeném betonu počítáme jako součin tohoto průměrného napětí a účinné plochy tlačené části betonu. V případě tohoto programu však rozdělujeme průřez na vrstvy o dané výšce (výšku určuje uživatel) a počítáme průměrné poměrné přetvoření každé vrstvy v polovině její výšky. Pokud je toto průměrné poměrné přetvoření záporné (vrstva je tlačena), počítáme průměrné napětí v daném vrstvě. Pokud je toto průměrné poměrné přetvoření nezáporné (vrstva není tlačena), uvažujeme napětí v daném vrstvě rovné nule. Způsob výpočtu napětí závisí na volbě pracovního diagramu betonu (volí uživatel). Tlakovou sílu v dané vrstvě vypočítáme jako součin napětí v dané vrstvě a plochy dané vrstvy. Celková síla v tlačeném betonu je pak suma všech tlakových sil v jednotlivých tlačených vrstvách.

Tento program se rovněž liší způsobem výpočtu napětí ve výztuži. V tomto programu si totiž uživatel může, na rozdíl od předchozího programu, zvolit pracovní diagram oceli.

V tomto programu je rovněž ověřováno, zda poměrné přetvoření výztuže nepřekročilo tažnost výztuže. Na rozdíl od druhého programu, který vždy uvažoval selhání průřezu drcením tlačeného betonu, může být v případě tohoto programu uvažováno porušení průřezu jak drcením tlačeného betonu, tak porušením výztuže.

2.3.1 Předpoklady výpočtu

Předpokládaný způsob porušení průřezu volíme v závislosti na způsobu namáhání průřezu. Pro tlačený průřez (částečně či úplně) v první řadě uvažujeme, že k porušení dojde drcením betonu. Následně provádíme kontrolu tažnosti výztuže, a je-li poměrné přetvoření výztuže menší než její tažnost, pak skutečně dojde k porušení průřezu drcením betonu, a k výpočtu poměrného přetvoření průřezu tedy používáme postup uvedený v kapitole 1.1.1. Pokud je však poměrné přetvoření výztuže větší než její mezní poměrné přetvoření, pak k selhání průřezu dojde porušením výztuže, a k výpočtu používáme postup uvedený v kapitole 1.1.2. Pro průřez zcela tažený uvažujeme, že k porušení dojde porušením výztuže a k výpočtu poměrného přetvoření průřezu používáme postup uvedený v kapitole 1.1.2. Postup výběru způsobu porušení a postup výpočtu poměrného přetvoření jsou blíže popsány v kapitole 2.3.3.

Velikost napětí v tlačeném betonu závisí na poměrném přetvoření betonu. Tato závislost je definována pracovním diagramem betonu. Pracovní diagram betonu volí uživatel programu, a to z níže uvedených možností. Popis a porovnání těchto pracovních diagramů lze nalézt v kapitole 1.2.

- obecný se středními hodnotami pevností (viz obr. 1.18),
- návrhový parabolicko-rektangulární (viz obr. 1.19),
- návrhový bilineární (viz obr. 1.20),
- návrhový s klesající větví, tj. obecný s návrhovými hodnotami pevností (viz obr. 1.21).

Napětí v tažené vrstvě betonu je vždy uvažováno jako rovné nule, tj. uvažujeme nulovou pevnost betonu v tahu.

Velikost napětí ve výztuži závisí na poměrném přetvoření výztuže. Tato závislost je definována pracovním diagramem oceli. Pracovní diagram oceli volí uživatel programu, a to z následujících možností: pracovní diagram s vodorovnou větví bez omezení poměrného přetvoření (viz obr. 1.16) a pracovní diagram se stoupající větví (viz obr. 1.17). Popis těchto pracovních diagramů lze nalézt v kapitole 1.2. Při zvolení pracovního diagramu s vodorovnou větví bez omezení poměrného přetvoření má uživatel programu možnost zadat, že při výpočtu má být uvažováno omezení poměrného přetvoření výztuže.

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.

2.3.2 Kontrola minimální výstřednosti tlakové normálové síly

V tomto programu je kontrola minimální výstřednosti tlakové normálové síly prováděna stejně jako v předchozím programu. Platí tedy vše uvedené v kapitole 2.2.2, kromě postupu pro stanovení únosnosti průřezu při namáhání rovnoměrným stlačením průřezu. V tomto případě používáme pro stanovení této únosnosti postup popsany v kapitole 2.3.5.

2.3.3 Pravá část diagramu – namáhání kladným momentem

Pravá část diagramu je spojnice bodů, kde je poloha každého bodu definována normálovou a momentovou únosností průřezu (namáhaného kladným momentem) při dané poloze neutrální osy.

Polohu neutrální osy definujeme její vzdáleností x_{no} od nejvíce tlačených, případně nejméně tažených (v případě plně taženého průřezu), vláken. Pro namáhání kladným momentem tedy měříme vzdálenost od krajních horních vláken průřezu (měříme kladně směrem k dolním vláknům).

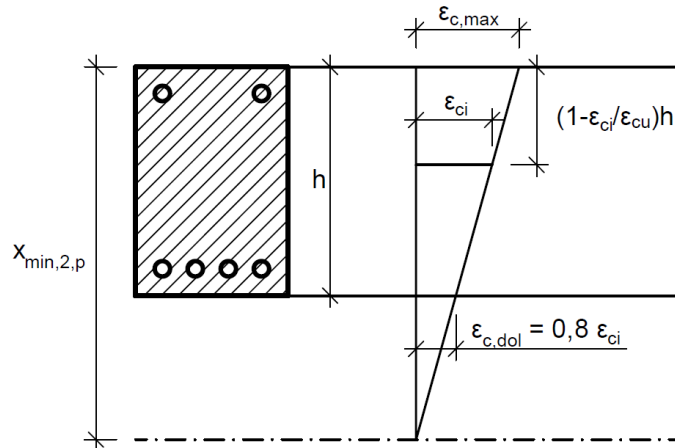
První polohu neutrální osy volíme tak, aby první bod byl co nejbližší bodu 0, tj. bodu vyjadřujícímu únosnost průřezu při namáhání rovnoměrným stlačením průřezu. Bod 0 a první bod pravé části diagramu se nacházejí v horní části diagramu, která bude nakonec „oříznuta“ zavedením podmínky minimální výstřednosti normálové síly, a nemusíme tedy řešit zvlášť přesně přiblížení se bodu 0. Autor této práce považuje za dostatečnou přesnost přiblížení takovou, kdy se poměrné přetvoření krajních vláken průřezu při namáhání vyjádřeném bodem 0 liší nejvýše o 20 % oproti poměrnému přetvoření krajních vláken průřezu při namáhání vyjádřeném prvním bodem pravé strany diagramu. Z průběhu poměrného přetvoření po výšce průřezu na obr. 2.26 je vidět, že větší rozdíl mezi poměrnými přetvořeními bude u dolního povrchu průřezu. Hledáme tedy takovou vzdálenost neutrální osy od horních vláken, aby poměrné přetvoření krajních dolních vláken bylo rovno 80 % poměrného přetvoření krajních dolních vláken při namáhání vyjádřeném bodem 0, tedy

aby platilo $\varepsilon_{c,dol} = 0,8 \varepsilon_{ci}$. Z podobnosti trojúhelníků na obr. 2.26 lze sestavit rovnici

$$\frac{0,8 \varepsilon_{ci}}{x_{min,2,p} - h} = \frac{\varepsilon_{ci}}{x_{min,2,p} - (1 - \varepsilon_{ci}/\varepsilon_{cu})h}, \quad (2.3.1)$$

ze které získáme vztah pro výpočet minimální vzdálenosti neutrální osy od horních vláken

$$x_{min,2,p} = [5h [1 - 0,8(1 - \varepsilon_{ci}/\varepsilon_{cu})]]^*. \quad (2.3.2)$$



Obr. 2.26: Průběh poměrného přetvoření po výšce průřezu při minimální požadované vzdálenosti neutrální osy od horních vláken

Poslední polohu neutrální osy volíme tak, aby celý průřez byl tažen a veškerá výztuž byla za mezí kluzu. Při poslední poloze neutrální osy tedy musí být splněny dvě podmínky. Pro splnění první podmínky, tj. celý průřez je tažen, musí platit, že vzdálenost neutrální osy od horních vláken tedy je nekladná (kladný směr uvažujeme směrem k dolním vláknům). Pro ověření druhé podmínky, tj. veškerá tažená výztuž je za mezí kluzu, je třeba stanovit vztah pro výpočet polohy neutrální osy, při které je tato podmínka splněna. Z podobnosti trojúhelníků na obr. 2.27 lze sestavit rovnici

$$\frac{\varepsilon_{ud} - \varepsilon_{sy}}{h - d_1 - d_2} = \frac{\varepsilon_{sy}}{d_2 - x_{max,p}}, \quad (2.3.3)$$

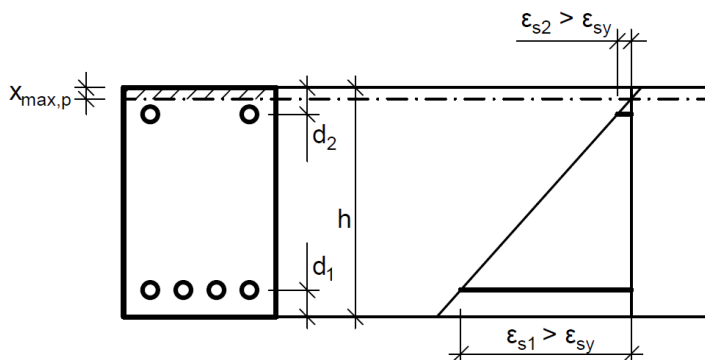
ze které získáme vztah pro výpočet maximální vzdálenosti neutrální osy od horních vláken při poslední iteraci cyklu

$$x_{max,p} = \left[d_2 - \frac{\varepsilon_{sy}}{\varepsilon_{ud} - \varepsilon_{sy}} (h - d_1 - d_2) \right]^\dagger. \quad (2.3.4)$$

Sloučíme-li výše uvedený vztah s první podmínkou, tj. celý průřez musí být tažen, získáme konečný vztah pro výpočet maximální vzdálenosti neutrální osy od horních vláken při poslední iteraci cyklu

$$x_{max,p} = \min \left(0; \left[d_2 - \frac{\varepsilon_{sy}}{\varepsilon_{ud} - \varepsilon_{sy}} (h - d_1 - d_2) \right] \right). \quad (2.3.5)$$

*Vzdálenost zaokrouhlujeme nahoru na celá čísla (vzdálenost počítáme v milimetrech).



Obr. 2.27: Průběh poměrného přetvoření po výšce průřezu při maximální dovolené vzdálenosti neutrální osy od horních vláken

Za zmínku stojí, že není-li omezeno poměrné přetvoření výztuže, pak při nulové hodnotě vzdálenosti neutrální osy od horních vláken je vždy již veškerá výztuž za meze kluzu a platí tedy, že je-li splněna první podmínka, pak druhá podmínka je též rovněž splněna – postačí tedy splnění pouze první podmínky, tj. $x_{no} \leq 0$. Pokud je omezeno poměrné přetvoření výztuže, pak pro běžné průřezy ($d_1 = d_2 \leq 35$ mm, $h \leq 700$ mm, ocel B500B) rovněž platí, že meze kluzu je dosaženo ve veškeré výztuži ještě před dříve než je dosaženo nulové hodnoty vzdálenosti neutrální osy od horních vláken, tedy ještě při částečně tlačeném průřezu (neutrální osa prochází průřezem). Pro průřezy o velkých výškách, případně průřezy s malými vzdálenostmi výztuží od povrchů, platí, že meze kluzu ve veškeré výztuži je dosaženo až při zcela taženém průřezu (neutrální osa je nad horní hranou průřezu).

Na první pohled se může zdát matoucí, že „minimální vzdálenost“ je větší než „maximální vzdálenost“. Je však třeba si uvědomit, že v prvním případě se jedná o minimální požadovanou vzdálenost, jelikož podmínka je splněna při této a jakékoliv větší vzdálenosti – proto ji označujeme jako „minimální vzdálenost“. V druhém případě se jedná o maximální dovolenou vzdálenost, jelikož požadovaná podmínka je splněna při této a jakékoliv menší vzdálenosti – proto ji označujeme jako „maximální vzdálenost“.

Postup výpočtu každého bodu pravé části interakčního diagramu, tj. výpočet normálové a momentové únosnosti průřezu pro každou polohu neutrální osy, je stejný. Výpočet všech bodů je tedy prováděn v iteracích jednoho cyklu, kde na konci každé iterace je zmenšena vzdálenost neutrální osy od horních vláken o k_r , a zvětšena hodnota proměnné i o 1. Cyklus probíhá do té doby, dokud je vzdálenost neutrální osy od horních vláken v předchozí iteraci větší než $x_{max,p}$, přesněji řečeno dokud je vzdálenost neutrální osy od horních vláken v budoucí iteraci větší než $x_{max,p} - k_r$. Poslední iterace tedy proběhne s první hodnotou vzdálenosti neutrální osy od horních vláken, která bude menší než hodnota $x_{max,p}$.

2.3.3.1 Postup výpočtu únosnosti průřezu

Pro výpočet únosnosti průřezu je nejprve třeba stanovit vzdálenost neutrální osy od horních vláken, dále jen „vzdálenost neutrální osy“, a také způsob porušení průřezu.

†Vzdálenost zaokrouhlujeme dolů na celá čísla (vzdálenost počítáme v milimetrech)

Vzdálenost neutrální osy

Před spuštěním cyklu je vzdálenosti neutrální osy přiřazena hodnota $x_{min,2,p}$ a proměnné i je přiřazena hodnota 1. Při výpočtu prvního bodu, tj. v první iteraci cyklu, tedy platí

$$x_{no} = x_{min,2,p}, \quad (2.3.6)$$

a v dalších iteracích pak za vzdálenost neutrální osy dosazujeme hodnotu stanovenou na konci předchozí iterace vztahem

$$x_{no} = x_{no} - k_r^*. \quad (2.3.7)$$

Maximální dovolené poměrné přetvoření betonu

K tomu, aby bylo možné stanovit způsob porušení průřezu, je nejprve třeba určit maximální dovolené poměrné přetvoření betonu. To je vypočítáno pomocí vztahu (1.1.5).

Způsob porušení průřezu a poměrné přetvoření výztuže a krajních vláken průřezu

Známe-li vzdálenost neutrální osy a maximální dovolené poměrné přetvoření betonu, můžeme určit způsob porušení průřezu. Postup určení způsobu porušení závisí na poloze neutrální osy a na tom, zda je omezena tažnost výztuže.

Prochází-li neutrální osa nad průřezem (průřez je tedy plně tažen), pak uvažujeme, že k selhání průřezu dojde porušením výztuže, viz kapitola 1.1.2. Jelikož je výztuž u dolního povrchu více namáhána, je za její poměrné přetvoření dosazena návrhová hodnota mezního poměrného přetvoření výztuže, platí tedy $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{ud}$. Poměrné přetvoření méně namáhané (horní) výztuže je vypočítáno pomocí vztahu (1.1.9b) a poměrné přetvoření krajních méně tažených (horních) vláken průřezu je vypočítáno pomocí vztahu (1.1.17).

Prochází-li neutrální osa průřezem nebo pod průřezem (průřez je tedy částečně, či plně tlačěn) a tažnost výztuže není omezena, pak uvažujeme, že k porušení dojde drcením tlaččeného betonu, viz kapitola 1.1.1. Za poměrné přetvoření krajních nejvíce tlaččených vláken (horních vláken) průřezu tedy dosazujeme maximální dovolené poměrné přetvoření betonu $\varepsilon_{c,max}$ a poměrné přetvoření výztuže je vypočítáno pomocí vztahů (1.1.9).

Prochází-li neutrální osa průřezem nebo pod průřezem (průřez je tedy částečně, či plně tlačěn) a tažnost výztuže je omezena, pak nejprve předpokládáme, že k porušení dojde drcením tlaččeného betonu a následně tento předpoklad ověřujeme. Za poměrné přetvoření krajních nejvíce tlaččených vláken (horních vláken) průřezu je tedy nejprve dosazeno maximální dovolené poměrné přetvoření betonu a poměrné přetvoření výztuže je vypočítáno pomocí vztahů (1.1.9). Po výpočtu poměrného přetvoření výztuže je ověřeno, zda poměrné přetvoření více tažené výztuže (v tomto případě výztuže u dolního povrchu) nepřekročilo návrhovou hodnotu mezního poměrného přetvoření výztuže. Pokud tato hodnota nebyla překročena, pak prvotní předpoklad porušení průřezu drcením tlaččeného betonu byl správný a vypočtené hodnoty poměrného přetvoření krajních vláken a výztuže jsou platné. Pokud však hodnota byla překročena, pak prvotní předpoklad byl nesprávný, k selhání průřezu dojde porušením výztuže a pro výpočet poměrného přetvoření krajních vláken a výztuže je použit stejný postup jako v případě namáhání, kdy neutrální osa prochází nad průřezem.

*Zároveň pro vzdálenost neutrální osy v dané iteraci platí vztah $x_{no} = x_{min,2,p} - (i - 1)k_r$

Napětí a síla ve výztuži

Po stanovení poměrného přetvoření výztuže můžeme vypočítat napětí ve výztuži. Zvolí-li uživatel pracovní diagram oceli se stoupající horní větví, pak je napětí ve výztuži vypočítáno pomocí vztahu (1.2.4). Zvolí-li uživatel pracovní diagram oceli s vodorovnou horní větví, pak je napětí ve výztuži vypočítáno pomocí vztahu (1.2.2). Z napětí ve výztuži je následně vypočítána síla v dolní a horní výztuži pomocí vztahů (2.2.12).

Síla v tlačené části betonu

Celková tlaková síla v tlačené části betonu je určena tak, že je průřez rozdělen na vodorovné vrstvy a celková tlaková síla je sumou sil v jednotlivých tlačených vrstvách. Postup výpočtu síly je stejný v každé vrstvě, a výpočet všech sil tedy probíhá v iteracích jednoho cyklu. Cyklus probíhá do té doby, dokud platí $j < h/h_v$, tzn. dokud nejsou vypočítány síly ve všech vrstvách. Postup jedné iterace, tedy postup výpočtu síly v jedné vodorovné vrstvě je uveden níže.

Pro spuštění iterace je třeba znát počet již proběhlých iterací j . Před spuštěním cyklu je této proměnné přiřazena hodnota 0 a na začátku každé iterace je tato hodnota zvětšena o 1.

Po spuštění iterace je nejprve třeba stanovit polohu vrstvy, tedy vzdálenost její střednice od krajních nejvíce tlačených (horních) vláken průřezu, dále jen „vzdálenost vrstvy“. Postup výpočtu je zaveden tak, že vrstvy jsou voleny postupně od vrstvy nejvzdálenější od krajních nejvíce tlačených vláken průřezu k vrstvě nejbližší. V případě namáhání kladným momentem je tedy první vrstva ta vrstva, jež obsahuje krajní dolní vlákna průřezu. Před spuštěním cyklu je vzdálenosti „nulté“ vrstvy přiřazena hodnota $h + h_v/2$ a na začátku každé iterace je zmenšena vzdálenost vrstvy o h_v . Při výpočtu síly v první vrstvě, tj. v první iteraci cyklu, tedy platí

$$x_v = h - h_v/2. \quad (2.3.8)$$

V dalších iteracích je pak vzdálenost aktuální vrstvy stanovena ze vzdálenosti předchozí vrstvy vztahem

$$x_v = x_v - h_v. \quad (2.3.9)$$

Známe-li vzdálenost vrstvy a poměrné přetvoření krajních nejvíce tlačených vláken průřezu (postup stanovení viz výše v této kapitole), můžeme stanovit průměrné poměrné přetvoření vrstvy betonu, tj. poměrné přetvoření betonu v polovině výšky vrstvy, pomocí vztahu (1.1.7).

Průměrné napětí ve vrstvě závisí na poměrném přetvoření vrstvy a na zvoleném pracovním diagramu betonu. Pokud je průměrné poměrné přetvoření vrstvy nezáporné (vrstva není tlačena), uvažujeme napětí v daném vrstvě rovné nule. Pokud je průměrné poměrné přetvoření vrstvy záporné (vrstva je tlačena), počítáme průměrné napětí v daném vrstvě. Vztah pro výpočet průměrného napětí ve vrstvě je volen v závislosti na zvoleném pracovním diagramu betonu, viz tab. 2.1.

| Pracovní diagram | Vztah pro výpočet napětí |
|--|--------------------------|
| Obecný se středními hodnotami pevností (viz obr. 1.18) | (1.2.5) |
| Návrhový parabolicko-rektangulární (viz obr. 1.19) | (1.2.7) |
| Návrhový bilineární (viz obr. 1.20) | (1.2.8) |
| Návrhový s klesající větví (viz obr. 1.21) | (1.2.9) |

Tab. 2.1: Tabulka vztahů pro výpočet napětí v závislosti na zvoleném pracovním diagramu

Po určení průměrného napětí ve vrstvě je vypočítána síla ve vrstvě pomocí vztahu

$$F_{c,v} = bh_v\sigma_c, \quad (2.3.10)$$

a moment od síly ve vrstvě pomocí vztahu

$$M_{F_{c,v}} = F_{c,v}(x_v - h_t). \quad (2.3.11)$$

Na konci iterace je tlaková síla působící ve vrstvě přičtena k silám z již vypočtených vrstev

$$F_c = F_c + F_{c,v}, \quad (2.3.12)$$

a moment od tlakové síly působící ve vrstvě je přičten k momentům od tlakových sil z již vypočtených vrstev

$$M_{F_c} = M_{F_c} + M_{F_{c,v}}. \quad (2.3.13)$$

Únosnost průřezu

Celková normálová a momentová únosnost průřezu je vypočítána pomocí vztahů

$$N_{Rdi} = F_c + F_{s1} + F_{s2}, \quad (2.3.14)$$

$$M_{Rdi} = M_{F_c} + F_{s1}z_1 + F_{s2}z_2. \quad (2.3.15)$$

Kontrola výstřednosti normálové síly

Výstřednost mezní normálové síly od střednice prvku je vypočítána z mezní normálové síly a mezního momentu pomocí vztahu

$$e_{Rdi} = M_{Rdi}/N_{Rdi}. \quad (2.3.16)$$

Jak již bylo řečeno v kapitole 2.2.2, výstřednost mezní normálové síly e_{Rdi} porovnáváme s minimální výstředností tlakové síly od střednice prvku, a platí-li

$$e_{Rdi} \leq e_{Rd0} - e_0 \quad (2.3.17)$$

pak je bod $[M_{Rdi}, N_{Rdi}]$ použit jak pro konstrukci interakčního diagramu bez omezení minimální výstředností síly (přerušovaná čára na obr. 2.23), tak pro konstrukci interakčního diagramu s omezením minimální výstředností síly (plná čára na obr. 2.23). V případě, že podmínka není splněna, je bod použit pouze pro konstrukci interakčního diagramu bez omezení minimální výstředností síly (přerušovaná čára na obr. 2.23).

2.3.4 Levá část diagramu – namáhání záporným momentem

Postup sestavení levé části interakčního diagramu je analogický s postupem sestavení pravé části, a proto jsou níže uvedené popisy zestručněny. Pro lepší pochopení postupů tedy autor této práce doporučuje nejprve přečíst postup sestavení pravé části, viz [kapitola 2.3.3](#).

Levá část diagramu je spojnice bodů, kde je poloha každého bodu definována normálovou a momentovou únosností průřezu (namáhaného záporným momentem) při dané poloze neutrální osy.

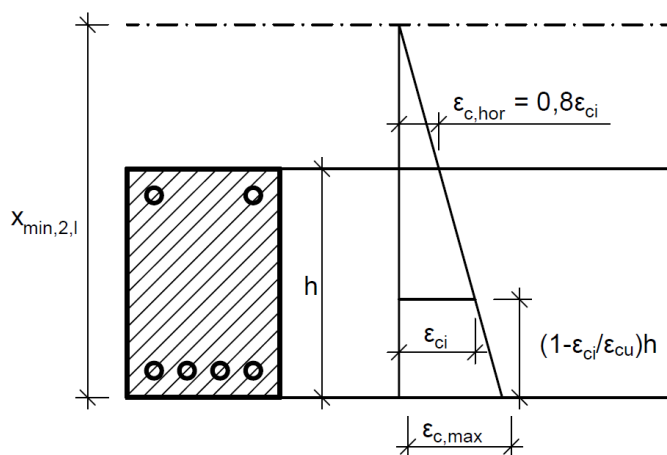
Polohu neutrální osy definujeme její vzdáleností x_{no} od nejvíce tlačných, případně nejméně tažených (v případě plně taženého průřezu), vláken. Pro namáhání záporným momentem tedy měříme vzdálenost od krajních dolních vláken průřezu (měříme kladně směrem k horním vláknům).

První polohu neutrální osy volíme tak, aby se poměrné přetvoření krajních horních vláken průřezu při namáhání vyjádřeném bodem 0 lišilo nejvýše o 20 % oproti poměrnému přetvoření krajních horních vláken průřezu při namáhání vyjádřeném prvním bodem levé strany diagramu. Hledáme tedy takovou vzdálenost neutrální osy od dolních vláken, aby poměrné přetvoření krajních horních vláken bylo rovno 80 % poměrného přetvoření krajních horních vláken při namáhání vyjádřeném bodem 0, tedy aby platilo $\varepsilon_{c,hor} = 0,8\varepsilon_{ci}$. Z podobnosti trojúhelníků na [obr. 2.28](#) lze sestavit rovnici

$$\frac{0,8\varepsilon_{ci}}{x_{min,2,l} - h} = \frac{\varepsilon_{ci}}{x_{min,2,l} - (1 - \varepsilon_{ci}/\varepsilon_{cu})h}, \quad (2.3.18)$$

ze které získáme vztah pro výpočet minimální vzdálenosti neutrální osy od dolních vláken

$$x_{min,2,l} = \lceil 5h [1 - 0,8(1 - \varepsilon_{ci}/\varepsilon_{cu})] \rceil^*. \quad (2.3.19)$$



Obr. 2.28: Průběh poměrného přetvoření po výšce průřezu při minimální požadované vzdálenosti neutrální osy od dolních vláken

*Vzdálenost zaokrouhlujeme nahoru na celá čísla (vzdálenost počítáme v milimetrech)

Poslední polohu neutrální osy volíme tak, aby celý průřez byl tažen a veškerá výztuž byla za mezí kluzu. Pro splnění první podmínky, tj. celý průřez je tažen, musí platit, že vzdálenost neutrální osy od dolních vláken je nekladná (kladný směr uvažujeme směrem k horním vláknům). Pro ověření druhé podmínky, tj. veškerá tažená výztuž je za mezí kluzu, je třeba stanovit vztah pro výpočet polohy neutrální osy, při které je tato podmínka splněna. Z podobnosti trojúhelníků na obr. 2.29 lze sestavit rovnici

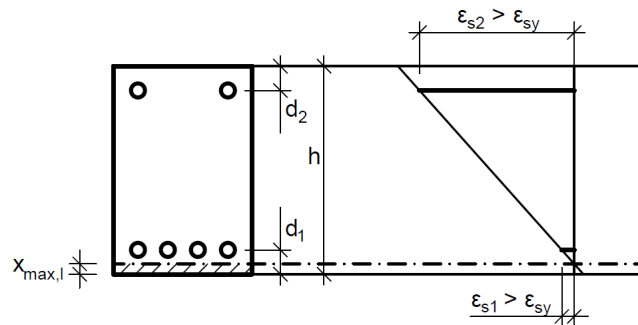
$$\frac{\varepsilon_{ud} - \varepsilon_{sy}}{h - d_1 - d_2} = \frac{\varepsilon_{sy}}{d_1 - x_{max,l}}, \quad (2.3.20)$$

ze které získáme vztah pro výpočet maximální vzdálenosti neutrální osy od dolních vláken při poslední iteraci cyklu

$$x_{max,l} = \left[d_1 - \frac{\varepsilon_{sy}}{\varepsilon_{ud} - \varepsilon_{sy}} (h - d_1 - d_2) \right]^*. \quad (2.3.21)$$

Sloučíme-li výše uvedený vztah s první podmínkou, tj. celý průřez musí být tažen, získáme konečný vztah pro výpočet maximální vzdálenosti neutrální osy od dolních vláken při poslední iteraci cyklu

$$x_{max,l} = \min \left(0; \left[d_1 - \frac{\varepsilon_{sy}}{\varepsilon_{ud} - \varepsilon_{sy}} (h - d_1 - d_2) \right] \right). \quad (2.3.22)$$



Obr. 2.29: Průběh poměrného přetvoření po výšce průřezu při maximální dovolené vzdálenosti neutrální osy od dolních vláken

Postup výpočtu každého bodu levé části interakčního diagramu, tj. výpočet normálové a momentové únosnosti průřezu pro každou polohu neutrální osy, je stejný. Výpočet všech bodů je tedy prováděn v iteracích jednoho cyklu, kde na začátku každé iterace je zvětšena hodnota proměnné i o 1 a na konci každé iterace je zmenšena vzdálenost neutrální osy od dolních vláken o k_r . Cyklus probíhá do té doby, dokud je vzdálenost neutrální osy od dolních vláken v předchozí iteraci větší než $x_{max,l}$, přesněji řečeno dokud je vzdálenost neutrální osy od dolních vláken v budoucí iteraci větší než $(x_{max,l} - k_r)$. Poslední iterace tedy proběhne s první hodnotou vzdálenosti neutrální osy od dolních vláken, která bude menší než hodnota $x_{max,l}$.

*Vzdálenost zaokrouhluje dolů na celá čísla (vzdálenost počítáme v milimetrech)

2.3.4.1 Postup výpočtu únosnosti průřezu

Pro výpočet únosnosti průřezu je nejprve třeba stanovit vzdálenost neutrální osy od dolních vláken, dále jen „vzdálenost neutrální osy“, a také způsob porušení průřezu.

Vzdálenost neutrální osy

Před spuštěním cyklu je vzdálenosti neutrální osy přiřazena hodnota $x_{min,1,l}$ a proměnné i je přiřazena hodnota 0. Při výpočtu prvního bodu, tj. v první iteraci cyklu, tedy pro vzdálenost neutrální osy platí

$$x_{no} = x_{min,2,l}, \quad (2.3.23)$$

a v dalších iteracích pak za vzdálenost neutrální osy dosazujeme hodnotu stanovenou na konci předchozí iterace vztahem

$$x_{no} = x_{no} - k_r^*. \quad (2.3.24)$$

Maximální dovolené poměrné přetvoření betonu

K tomu, aby bylo možné stanovit způsob porušení průřezu, je nejprve třeba určit maximální dovolené poměrné přetvoření betonu. To je vypočítáno pomocí vztahu (1.1.5).

Způsob porušení průřezu a poměrné přetvoření výztuže

Postup určení způsobu porušení závisí na poloze neutrální osy a na tom, zda je omezena tažnost výztuže.

Prochází-li neutrální osa pod průřezem (průřez je tedy plně tažen), pak je za poměrné přetvoření horní výztuže dosazena návrhová hodnota mezního poměrného přetvoření výztuže, platí tedy $\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{ud}$. Poměrné přetvoření dolní výztuže je vypočítáno pomocí vztahu (1.1.11a) a poměrné přetvoření krajních méně tažených vláken (dolních vláken) průřezu je vypočítáno pomocí vztahu (1.1.17).

Prochází-li neutrální osa průřezem nebo nad průřezem (průřez je tedy částečně, či plně tlaččen) a tažnost výztuže není omezena, pak je za poměrné přetvoření krajních nejvíce tlaččených vláken (dolních vláken) průřezu dosazeno maximální dovolené poměrné přetvoření betonu $\varepsilon_{c,max}$ a poměrné přetvoření výztuže je vypočítáno pomocí vztahů (1.1.11).

Prochází-li neutrální osa průřezem nebo nad průřezem (průřez je tedy částečně, či plně tlaččen) a tažnost výztuže je omezena, pak je nejprve za poměrné přetvoření krajních nejvíce tlaččených vláken (dolních vláken) průřezu dosazeno maximální dovolené poměrné přetvoření betonu $\varepsilon_{c,max}$ a poměrné přetvoření výztuže je vypočítáno pomocí vztahů (1.1.11). Pokud poměrné přetvoření více tažené (horní) výztuže nepřekročilo návrhovou hodnotu mezního přetvoření výztuže, pak vypočtené hodnoty poměrného přetvoření krajních vláken a výztuže jsou platné. Jestliže však poměrné přetvoření více tažené (horní) výztuže překročilo návrhovou hodnotu mezního přetvoření výztuže, pak k selhání průřezu dojde porušením výztuže a pro výpočet poměrného přetvoření krajních vláken a výztuže je použit stejný postup jako v případě namáhání, kdy neutrální osa prochází pod průřezem.

* Zároveň pro vzdálenost neutrální osy v dané iteraci platí vztah $x_{no} = x_{min,2,l} - (i - 1)k_r$

Napětí a síla ve výztuži

Zvolí-li uživatel pracovní diagram oceli se stoupající horní větví, pak je napětí ve výztuži vypočítáno pomocí vztahu (1.2.4). Zvolí-li uživatel pracovní diagram oceli s vodorovnou horní větví, pak je napětí ve výztuži vypočítáno pomocí vztahu (1.2.2). Z napětí ve výztuži je následně vypočítána síla v dolní a horní výztuži pomocí vztahů (2.2.12).

Síla v tlačené části betonu

Celková tlaková síla v tlačené části betonu je určena tak, že je průřez rozdělen na vodorovné vrstvy a celková tlaková síla je sumou sil v jednotlivých tlačných vrstvách. Postup výpočtu síly je stejný v každé vrstvě, a výpočet všech sil tedy probíhá v iteracích jednoho cyklu. Cyklus probíhá do té doby, dokud platí $j < h/h_v$, tzn. dokud nejsou vypočítány síly ve všech vrstvách. Postup jedné iterace, tedy postup výpočtu síly v jedné vodorovné vrstvě je uveden níže.

Pro spuštění iterace je třeba znát počet již proběhlých iterací j . Před spuštěním cyklu je této proměnné přiřazena hodnota 0 a na začátku každé iterace je tato hodnota zvětšena o 1.

Nejprve je stanovena poloha vrstvy, tedy vzdálenost její střednice od krajních nejvíce tlačných (dolních) vláken průřezu, dále jen „vzdálenost vrstvy“. První vrstva je ta vrstva, jež obsahuje krajní horní vlákna průřezu. Před spuštěním cyklu je tedy vzdálenosti „nulté“ vrstvy přiřazena hodnota $h + h_v/2$ a na začátku každé iterace je zmenšena vzdálenost vrstvy o h_v . Při výpočtu síly v první vrstvě, tj. v první iteraci cyklu, tedy platí

$$x_v = h - h_v/2. \quad (2.3.25)$$

V dalších iteracích je pak vzdálenost aktuální vrstvy stanovena ze vzdálenosti předchozí vrstvy vztahem

$$x_v = x_v - h_v. \quad (2.3.26)$$

Průměrné poměrné přetvoření vrstvy betonu, tj. poměrné přetvoření betonu v polovině výšky vrstvy, je vypočítáno pomocí vztahu (1.1.7).

Pokud je průměrné poměrné přetvoření vrstvy nezáporné (vrstva není tlačena), uvažujeme napětí v daném vrstvě rovné nule. Pokud je průměrné poměrné přetvoření vrstvy záporné (vrstva je tlačena), počítáme průměrné napětí v daném vrstvě. Vztah pro výpočet průměrného napětí ve vrstvě je volen v závislosti na zvoleném pracovním diagramu betonu, viz tab. 2.1.

Síla ve vrstvě je vypočítána pomocí vztahu

$$F_{c,v} = bh_v\sigma_c, \quad (2.3.27)$$

a moment od síly ve vrstvě je vypočítán pomocí vztahu

$$M_{F_{c,v}} = F_{c,v}(h_t - x_v). \quad (2.3.28)$$

Na konci iterace je tlaková síla působící ve vrstvě přičtena k silám z již vypočtených vrstev

$$F_c = F_c + F_{c,v}, \quad (2.3.29)$$

a moment od tlakové síly působící ve vrstvě je přičten k momentům od tlakových sil z již vypočtených vrstev

$$M_{F_c} = M_{F_c} + M_{F_{c,v}}. \quad (2.3.30)$$

Únosnost průřezu

Normálová únosnost průřezu je vypočítána pomocí vztahu (2.3.14) a momentová únosnost průřezu pomocí vztahu (2.3.14).

Kontrola výstřednosti normálové síly

Výstřednost normálové síly od střednice prvku je vypočítána pomocí vztahu (2.3.16).

Jak již bylo řečeno v kapitole 2.2.2, výstřednost mezní normálové síly e_{Rdi} porovnáváme s minimální výstředností tlakové síly od střednice prvku, a platí-li

$$e_{Rdi} \geq e_{Rd0} + e_0, \quad (2.3.31)$$

pak je bod $[M_{Rdi}, N_{Rdi}]$ použit jak pro konstrukci interakčního diagramu bez omezení minimální výstředností síly (přerušovaná čára na obr. 2.17), tak pro konstrukci interakčního diagramu s omezením minimální výstředností síly (plná čára na obr. 2.17). V případě, že podmínka není splněna, je bod použit pouze pro konstrukci interakčního diagramu bez omezení minimální výstředností síly (přerušovaná čára na obr. 2.17).

2.3.5 Rovnoměrně rozdělené stlačení po výšce průřezu

Při rovnoměrném stlačení průřezu dojde porušení průřezu dosažením maximálního poměrného přetvoření betonu $\varepsilon_{c,max}$, které je při tomto způsobu namáhání rovno poměrnému přetvoření betonu při dosažení maximální napětí v betonu ε_{ci} , viz kapitola 1.1.3.1. Pro všechny body průřezu tedy platí

$$\varepsilon_c = -\varepsilon_{ci}^*. \quad (2.3.32)$$

Vzhledem k tomu, že poměrné přetvoření betonu je ve všech bodech stejné, bude i napětí ve všech bodech stejné. Velikost napětí závisí na použitém pracovním diagramu betonu. V případě použití návrhových pracovních diagramů platí

$$\sigma_c = -f_{cd}^\dagger. \quad (2.3.33a)$$

a v případě použití obecného pracovního diagramu se středními hodnotami pevností platí

$$\sigma_c = -f_{cm}^\dagger. \quad (2.3.33b)$$

Přetvoření výztuže je rovno přetvoření betonu (viz kapitola 1.1.3.2) a lze jej tedy vypočítat pomocí vztahu (1.1.21).

Napětí ve výztuži vypočítáme pomocí vztahu (1.2.4) v případě použití pracovního diagramu se stoupající horní větví a pomocí vztahu (1.2.2) v případě použití pracovního diagramu s vodorovnou horní větví.

Normálová a momentová únosnost je dána vztahy

$$N_{Rd0} = bh\sigma_c + A_{s1}\sigma_{s1} + A_{s2}\sigma_{s2}, \quad (2.3.34)$$

$$M_{Rd0} = A_{s1}\sigma_{s1}z_1 + A_{s2}\sigma_{s2}z_2. \quad (2.3.35)$$

*Hodnota ε_{ci} přebíraná 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.

2.3.6 Rovnoměrné rozdělení protažení po výšce průřezu

Při rovnoměrném protažení průřezu dojde porušení průřezu dosažením mezního poměrného přetvoření výztuže, a platí tedy

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{s2} = \varepsilon_{ud}. \quad (2.3.36)$$

Napětí ve výztuži závisí na použitém pracovním diagramu oceli. V případě použití pracovního diagramu se stoupající horní větví platí pro velikost napětí ve výztuži vztah (1.2.4) a dosažením poměrného přetvoření výztuže ε_{ud} získáme napětí ve výztuži

$$\sigma_{s1} = \sigma_{s2} = f_{ud}. \quad (2.3.37a)$$

V případě použití pracovního diagramu s vodorovnou horní větví platí pro velikost napětí ve výztuži vztah (1.2.2) a dosažením poměrného přetvoření výztuže ε_{ud} získáme napětí ve výztuži

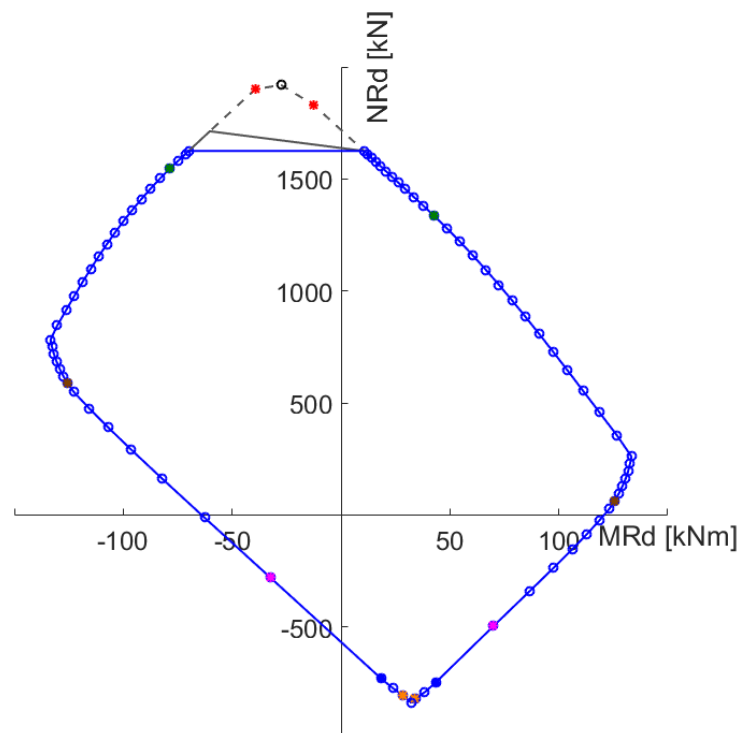
$$\sigma_{s1} = \sigma_{s2} = f_{yd}. \quad (2.3.37b)$$

Normálovou a momentovou únosnost vypočítáme pomocí vztahů

$$N_{Rd5} = A_{s1}\sigma_{s1} + A_{s2}\sigma_{s2}, \quad (2.3.38)$$

$$M_{Rd5} = A_{s1}\sigma_{s1}z_1 + A_{s2}\sigma_{s2}z_2. \quad (2.3.39)$$

2.3.7 Sestrojení interakčního diagramu



Obr. 2.30: Interakční diagram – $b = 200$ mm, $h = 300$ mm, B500B C30/37, $\rho_1 = 2$ %, $\rho_2 = 1$ %, $k_r = 10$

Interakční diagram je sestaven ze čtyř částí. První částí je bod 0 vyjadřující únosnost při rovnoměrném stlačení průřezu (viz kapitola 2.3.5), druhou částí je pravá část diagramu (viz kapitola 2.3.3), třetí částí je bod vyjadřující únosnost při rovnoměrném protažení průřezu (viz kapitola 2.3.6) a čtvrtou částí je levá část diagramu (viz kapitola 2.3.4).

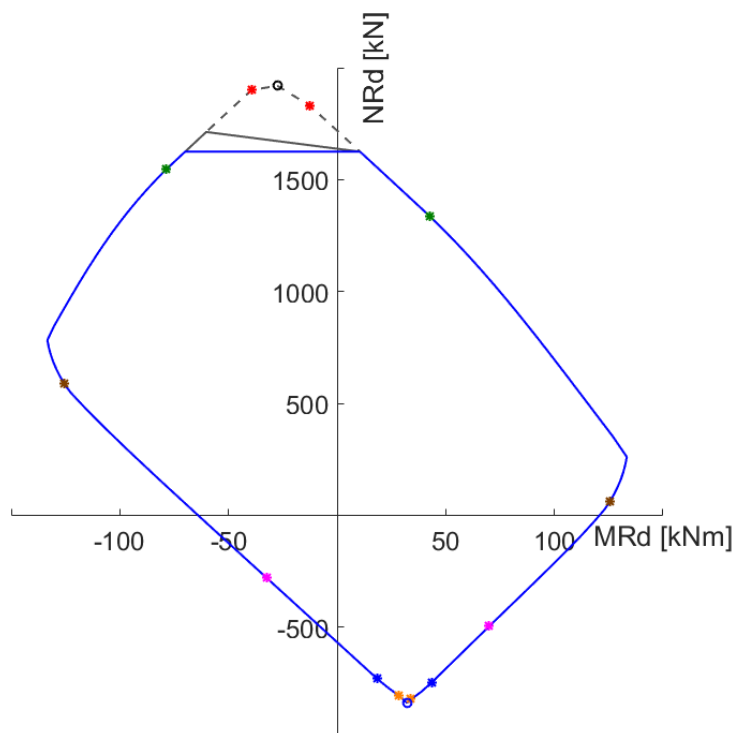
Omezení horní části diagramu z důvodu podmínky minimální výstřednosti tlakové síly e_0 je sestaveno stejným způsobem jako v případě druhého programu, viz kapitola 2.2.5.

2.3.8 Popis interakčního diagramu

2.3.8.1 Vzorový interakční diagram

Vzhled interakčního diagramu, tj. jeho tvar a poloha významných bodů, závisí na více faktorech. Níže je jako příklad zobrazen interakční diagram průřezu s následujícími parametry: třída betonu C30/37, třída oceli B500B, šířka $b = 200$ mm, výška $h = 300$ mm, vzdálenost výztuží od krajních vláken průřezu $d_1 = d_2 = 35$ mm, stupeň vyztužení dolní výztuží $\rho_1 = 2$ %, stupeň vyztužení horní výztuží $\rho_2 = 1$ %, parabolicko-rektangulární pracovní diagram betonu, pracovní diagram oceli se stoupající horní větví.

Další příklady interakčních diagramů a vlivy vstupních parametrů na vzhled interakčního diagramu viz kapitola 2.4.



Obr. 2.31: Interakční diagram průřezu (C30/37, B500B, $b = 200$ mm, $h = 300$ mm, $d_1 = d_2 = 35$ mm, $\rho_1 = 2$ %, $\rho_2 = 1$ %)

2.3.8.2 Konvence vykreslování a značení

Konvence vykreslování a značení je shodná s konvencí druhého programu, viz kapitola 2.2.6.1.

2.3.8.3 Významné body interakčního diagramu

V této podkapitole jsou pouze stručně popsány významné body interakčního diagramu. Detailní popis jednotlivých oblastí horní části interakčního diagramu a zdůvodnění jejich tvaru viz podkapitola 2.3.8.4.

Černé kolečko označuje únosnost při rovnoměrném stlačení průřezu.

Červený křížek označuje první zlom interakčního diagramu a označuje únosnost při namáhání, kdy je právě dosaženo meze kluzu ve více tlačené výztuži. Od tohoto bodu níže se již se změnou polohy neutrální osy napětí ve více tlačené výztuži nemění (v případě uvažování pracovního diagramu s vodorovnou horní větví), případně se mění relativně málo (v případě uvažování pracovního diagramu se stoupající horní větví).

Zelený křížek označuje druhý zlom křivky interakčního diagramu a označuje poslední únosnost, při které je průřez zcela tlačén. Všechny body příslušné straně interakčního diagramu umístěné pod tímto bodem, vyjadřují namáhání, při kterém je průřez pouze částečně tlačén, případně zcela tažen.

K zalomení grafu při maximální hodnotě momentové únosnosti dochází při dosažení meze kluzu v tažené výztuži.

Hnědý křížek označuje poslední bod, který vyjadřuje namáhání, při kterém je napětí v tlačené výztuži za mezí kluzu. Všechny body na příslušné straně interakčního diagramu umístěné pod tímto bodem vyjadřují namáhání, při kterých je napětí v tlačené výztuži pod mezí kluzu.

Fialový křížek označuje poslední bod, který vyjadřuje namáhání, při kterém je napětí v méně tažené výztuži pod mezí kluzu výztuže. Všechny body na příslušné straně interakčního diagramu umístěné pod tímto bodem vyjadřují namáhání, při kterých je napětí v méně tažené výztuži nad mezí kluzu.

Modrý křížek označuje přechod mezi selháním průřezu drcením betonu a selháním průřezu porušením výztuže.

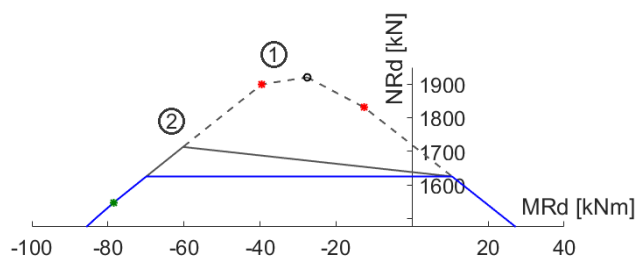
Oranžový křížek značí poslední bod pravé (případně levé) strany interakčního diagramu. Tento poslední bod je pak prostě spojen s bodem vyjadřujícím únosnost při rovnoměrném protažení průřezu.

Modré kolečko značí namáhání vyvolávající rovnoměrné protažení průřezu. Zároveň se jedná o namáhání, při kterém je dosaženo maximální normálové tahové únosnosti průřezu.

2.3.8.4 Horní část

Některá fakta a některé implikace jsou v této podkapitole uvedeny, avšak nejsou zde rozvedeny a objasněny. To z toho důvodu, že byly již uvedeny a objasněny při popisu interakčního diagramu druhého programu, a autor nepovažuje za nutné, je zde znovu opakovat. Pro lepší pochopení problematiky tedy autor odkazuje na podkapitolu 2.2.6.2.

V této podkapitole jsou popsány jednotlivé oblasti interakčního diagramu. Označení oblastí viz obr. 2.32.



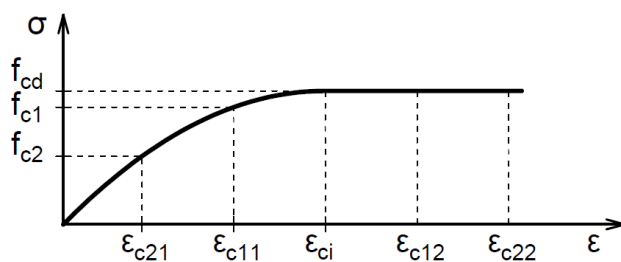
Obr. 2.32: Horní část interakčního diagramu na obr. 2.31

Oblast 1

Oblast 1 je označení pro oblast od bodu označeného černým kolečkem do bodu označeného červeným křížkem. V této podkapitole je vysvětleno, proč je sklon křivky na pravé straně různý od sklonu křivky na levé straně.

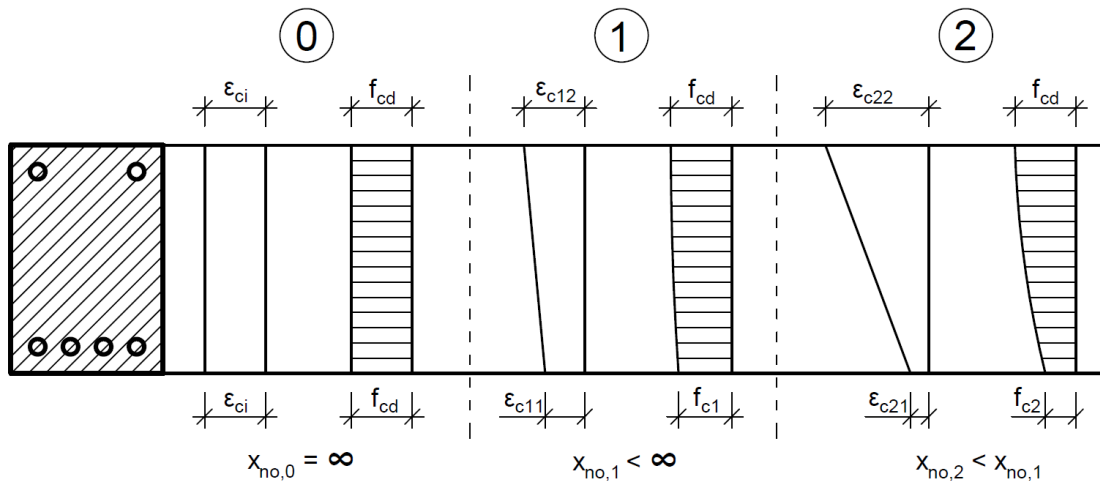
Normálová únosnost průřezu je dána třemi silami – celkovou silou v tlačené části betonu, silou ve více tlačené výztuži a silou v méně tlačené výztuži. Pro pochopení rozdílných sklonů křivky je nejprve nutné uvědomit si, jak se jednotlivé síly mění při zmenšující se vzdálenosti neutrální osy od nejvíce více tlačených vláken průřezu, dále jen „při změně polohy neutrální osy“.

Z výše uvedených tří vnitřních sil lze nejjednodušeji popsat změnu celkové síly v tlačeném betonu při změně polohy neutrální osy. Celková síla v tlačeném betonu je největší v případě, kdy je průřez namáhán tak, že poměrné přetvoření je konstantní po výšce průřezu (průřez je rovnoměrně stlačen). Je tomu tak proto, že při rovnoměrném stlačení uvažujeme, že hodnota poměrného přetvoření je rovna ε_{ci} . Se změnou polohy neutrální osy se pak poměrné přetvoření betonu snižuje na jedné straně krajních vláken a zvětšuje na druhé straně vláken. Při snížení poměrného přetvoření betonu pod hodnotu ε_{ci} napětí v betonu klesá, ale při zvětšení poměrného přetvoření napětí neroste, nýbrž zůstává stejné*, viz obr. 2.33. Z tohoto důvodu se, se změnou polohy neutrální osy, průměrné napětí v tlačeném betonu snižuje, viz obr. 2.34. Můžeme tedy říci, že se změnou polohy neutrální osy se celková síla v tlačeném betonu snižuje.



Obr. 2.33: Závislost napětí v betonu na poměrném přetvoření betonu

*V případě pracovního diagramu s klesající větví se napětí při zvětšení poměrného přetvoření dokonce rovněž snižuje.



Obr. 2.34: Změna poměrného přetvoření a napětí v krajních vláknech při změně polohy neutrální osy

Popsat změny sil ve výztužích je o něco náročnější. Nejprve je třeba popsat, jak se mění poměrné přetvoření a napětí ve výztuži se změnou polohy neutrální osy. Jak lze vidět na obr. 2.25, poměrné přetvoření méně tlačných krajních vláken (a rovněž i méně tlačené výztuže) klesá rychleji než poměrné přetvoření více tlačných krajních vláken (a rovněž i více tlačené výztuže) roste. Poměr změny poměrného přetvoření méně tlačené výztuže ku změně poměrného přetvoření více tlačené výztuže je přibližně 4:3. Stejný poměr je i mezi změnami napětí ve výztužích*. Napětí v méně tlačené výztuži tedy klesá přibližně 1,33krát rychleji než napětí ve více tlačené výztuži roste.

Jelikož síla ve výztuži závisí nejen na napětí ve výztuži, ale i na ploše výztuže, je třeba popsat i vliv poměru plochy horní výztuže a plochy dolní výztuže. Pro průřez, jehož interakční diagram popisujeme, platí, že plocha dolní výztuže je dvakrát větší než plocha horní výztuže. Při stejné změně napětí ve výztužích bude tedy změna síly v dolní výztuži dvakrát větší než změna síla v horní výztuži.

Nyní máme stanovený vztah mezi plochami výztuží a vztah mezi změnami napětí ve výztužích. První vztah však porovnává horní a dolní výztuž, zatímco druhý vztah porovnává méně a více tlačnou výztuž. Obecně nelze říci, zda méně tlačená výztuž je dolní nebo horní výztuž a naopak. Lze však říci, že v případě namáhání kladným momentem je horní výztuž více tlačena a v případě namáhání záporným momentem je dolní výztuž více tlačena. Dále jsou tedy popsány tyto dvě varianty namáhání zvlášť.

Při namáhání kladným momentem (pravá část interakčního diagramu) je méně tlačena dolní výztuž a poměr změny napětí v dolní výztuži ku změně napětí v horní výztuži je přibližně 4:3 – tj. při změně polohy neutrální osy se napětí v dolní výztuži sníží přibližně 1,33krát více než se napětí v horní výztuži zvětší. A vezmeme-li v potaz, jak poměr změn napětí (dolní:horní 4:3), tak poměr ploch výztuží (dolní:horní 2:1), získáme přibližný poměr změn v silách ve výztužích při změně polohy neutrální osy. Tento poměr je přibližně 8:3 (dolní:horní). Tlaková síla v dolní výztuži tedy klesá přibližně 2,67krát (8/3krát) rychleji než tlaková síla v horní výztuži roste. Suma sil ve výztužích tedy klesá při zmenšující se vzdálenosti neutrální osy od nejvíce více tlačných vláken průřezu.

*V oblasti 1 platí, že horní i dolní výztuž není za mezí kluzu. Platí tedy Hookův zákon – napětí je přímo úměrné poměrnému přetvoření.

Při namáhání záporným momentem (levá část interakčního diagramu) je méně tlačena horní výztuž a poměr změny napětí v dolní výztuži ku změně napětí v horní výztuži je přibližně 3:4 – tj. při změně polohy neutrální osy se napětí v horní výztuži sníží přibližně 1,33krát více než se napětí v dolní výztuži zvětší. A vezmeme-li v potaz, jak poměr změn napětí (dolní:horní 3:4), tak poměr ploch výztuží (dolní:horní 2:1), získáme přibližný poměr změn v silách ve výztužích při změně polohy neutrální osy. Tento poměr je přibližně 6:4 (dolní:horní). Tlaková síla v dolní výztuži tedy roste přibližně 1,5krát rychleji než tlaková síla v horní výztuži klesá. Suma sil ve výztužích tedy roste při zmenšující se vzdálenosti neutrální osy od nejvíce více tlačенých vláken průřezu.

Souhrnem všeho výše uvedeného je, že při namáhání kladným momentem (pravá část interakčního diagramu) a zmenšující se vzdálenosti neutrální osy od nejvíce tlačенých vláken průřezu, klesá celková síla v tlačенém betonu a klesá suma sil ve výztužích. A dále, že při namáhání záporným momentem (levá část interakčního diagramu) a zmenšující se vzdálenosti neutrální osy od nejvíce tlačенých vláken průřezu klesá celková síla v tlačенém betonu a roste suma sil ve výztužích. Z toho můžeme vyvodit závěr, že při namáhání kladným momentem se suma všech sil v průřezu (tj. normálová únosnost průřezu) zmenšuje rychleji než při namáhání záporným momentem, a proto je sklon pravé části diagramu strmější než sklon levé části diagramu.

Oblast 2

Oblast 2 je označení pro oblast od bodu označeného červeným křížkem do bodu označeného zeleným křížkem. V této podkapitole je vysvětleno, proč je sklon křivky na pravé straně různý od sklonu křivky na levé straně.

Sklon křivky je dán změnou normálové únosnosti při zmenšující se vzdálenosti neutrální osy od nejvíce tlačенých vláken průřezu, dále jen „při změně polohy neutrální osy“. Tato změna normálové únosnosti je dána změnou síly v tlačенém betonu a změnou sil ve výztužích.

Změna síly v tlačенém betonu je stejná při namáhání kladným momentem (pravá strana diagramu) a při namáhání záporným momentem (levá strana diagramu). Síly v tlačенém betonu tedy nezpůsobuje rozdílnost sklonů křivek na pravé a levé straně diagramu.

Pro více tlačенou výztuž platí, že se zvyšujícím se poměrným přetvořením této výztuže se napětí v ní již nemění*. Je tomu tak, protože výztuž je již za mezí kluzu. Méně tlačенá výztuž je pod mezí kluzu, a se změnou poměrného přetvoření se tedy mění napětí v této výztuži. Při změně polohy neutrální osy se tedy mění jen napětí v méně tlačенé výztuži – napětí v ní klesá. Při namáhání kladným momentem je dolní výztuž tou méně tlačенou výztuží, jejíž napětí se mění. Při namáhání záporným momentem je horní výztuž tou méně tlačенou výztuží, jejíž napětí se mění. Pro průřez, jehož interakční diagram popisujeme, platí, že plocha dolní výztuže je dvakrát větší než plocha horní výztuže. Při stejné změně napětí ve výztužích se tedy síla v dolní výztuži změní dvakrát více než síla v horní výztuži. Z výše uvedeného lze tedy vyvodit závěr, že při namáhání kladným momentem se zmenšuje tlaková síla v méně tlačенé (dolní) výztuži rychleji, než se zmenšuje tlaková síla v méně tlačенé (horní) výztuži při namáhání momentem záporným. Z toho důvodu je křivka na pravé straně diagramu (namáhání kladným momentem) strmější než křivka na levé straně diagramu (namáhání záporným momentem).

*V případě pracovního diagramu oceli se stoupající horní větví se napětí mění (roste), avšak tato změna je malá a lze ji zanedbat.

2.4 Parametry ovlivňující tvar interakčního diagramu

Tvar interakčního diagramu závisí na mnoha parametrech. Zejména to jsou: poměr výšky průřezu ku šířce průřezu, třída výztuže, pracovní diagram oceli, plocha výztuže, vzdálenost výztuže od krajních vláken průřezu, tažnost výztuže, třída pevnosti betonu, pracovní diagram betonu. Tato kapitola se věnuje tomu, jak jednotlivé parametry ovlivňují tvar a velikost interakčního diagramu.

2.4.1 Základní parametry průřezu

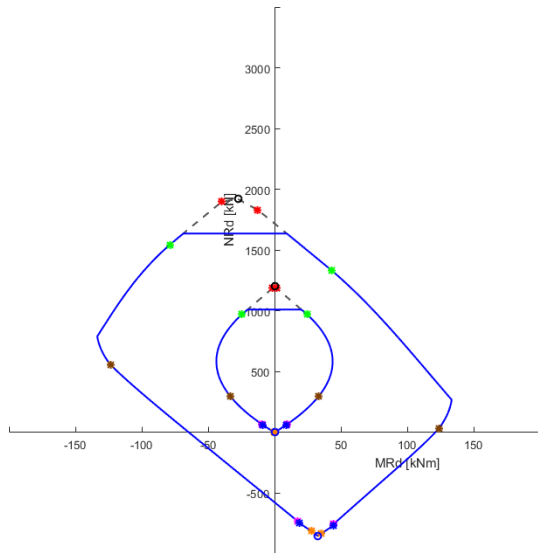
V dalších podkapitolách jsou vykreslovány interakční diagramy průřezu a není-li specifikováno jinak, pak parametry tohoto průřezu jsou následující: třída pevnosti betonu C30/37, třída oceli B500B ($f_{yk} = 500$ MPa, $f_{uk} = 540$ MPa), šířka průřezu $b = 200$ mm, výška průřezu $h = 300$ mm, vzdálenost os výztuží od krajních vláken průřezu $d_1 = d_2 = 35$ mm, stupeň vyztužení dolní výztuží $\rho_1 = 2$ %, stupeň vyztužení horní výztuží $\rho_2 = 1$ %, parabolicko-rektangulární pracovní diagram betonu, pracovní diagram oceli se stoupající horní větví.

2.4.2 Vliv betonu a výztuže na celkovou únosnost průřezu

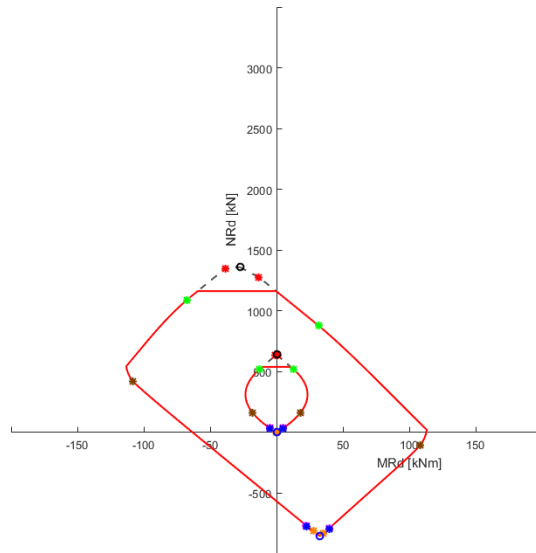
Celková únosnost průřezu je z části zajištěna betonem a z části výztuží. To, jak velká část je zajištěna betonem, závisí zejména na rozměrech průřezu a třídě pevnosti betonu (tj. na maximální pevnosti betonu v tlaku) – čím větší jsou rozměry průřezu a třída pevnosti betonu, tím větší část celkové únosnosti zajišťuje beton. To, jak velká část je zajištěna výztuží, závisí zejména na ploše výztuže a třídě výztuže (tj. mezi kluzu a mezi pevností výztuže) – čím větší je plocha výztuže a třída výztuže, tím větší část celkové únosnosti zajišťuje výztuž.

Na obr. 2.35 jsou vykresleny dva interakční diagramy průřezu. Větší z nich je interakční diagram průřezu o parametrech uvedených v podkapitole 2.4.1. Menší z nich je interakční diagram stejného průřezu s tím rozdílem, že průřez není vyztužen. Menší z interakčních diagramů tedy vyjadřuje únosnost průřezu zajištěnou betonem a část mezi větším a menším interakčním diagramem vyjadřuje únosnost průřezu zajištěnou výztuží.

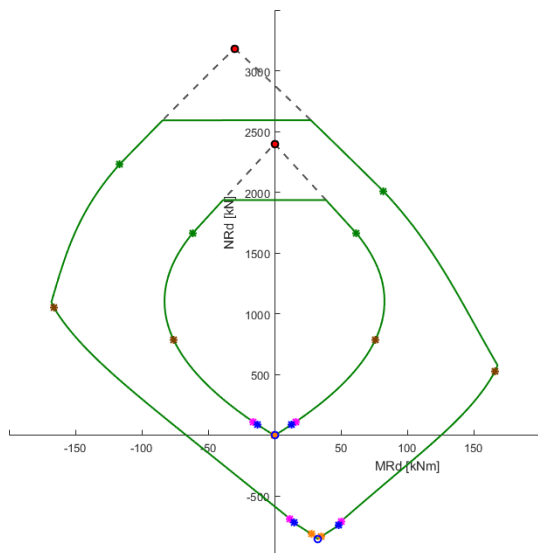
Na obr. 2.36 jsou vykresleny interakční diagramy průřezu, kde třída pevnosti betonu je C16/20. Na obr. 2.37 jsou vykresleny interakční diagramy průřezu, kde třída pevnosti betonu je C60/75. Na obr. 2.38 jsou interakční diagramy ze všech tří předcházejících obrázků – červeně C16/20, modře C30/37, zeleně C60/75.



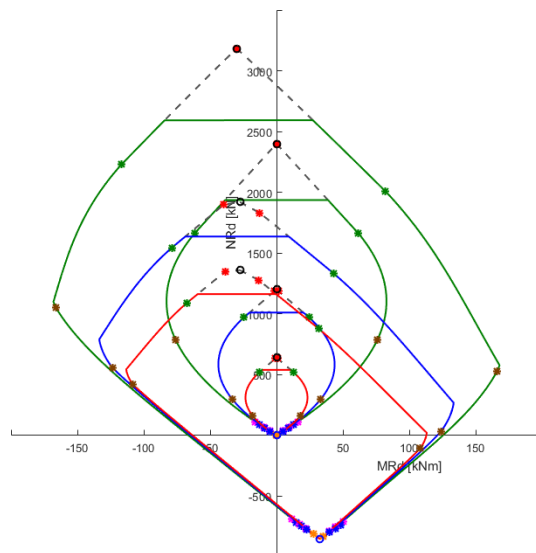
Obr. 2.35: Interakční diagramy – únosnost betonu a celková, beton třídy C30/37



Obr. 2.36: Interakční diagramy – únosnost betonu a celková, beton třídy C16/20



Obr. 2.37: Interakční diagramy – únosnost betonu a celková, beton třídy C60/75



Obr. 2.38: Interakční diagramy – únosnost betonu a celková, různé třídy betonu

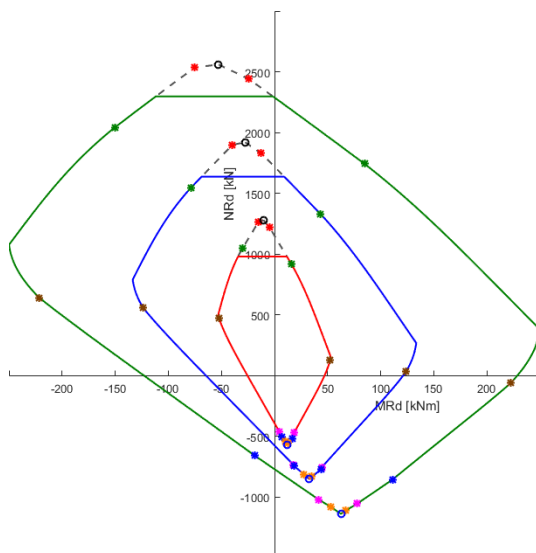
2.4.3 Poměr výšky ku šířce průřezu

Změna poměru výšky ku šířce průřezu ovlivňuje jak velikost, tak tvar interakčního diagramu. Na obr. 2.39 a obr. 2.40 jsou vykresleny interakční diagramy tří průřezů s následujícími poměry h/b : 2/2 (červená), 3/2 (modrá), 4/2 (zelená). Všechny průřezy mají šířku $b = 200$ mm – mění se tedy výška průřezu.

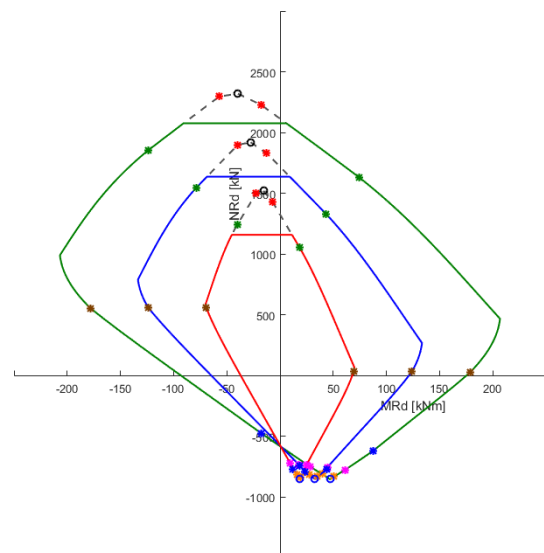
Na obr. 2.39 jsou vykresleny interakční diagramy průřezů, jejichž stupeň vyztužení zůstává zachován stejný ($\rho_1 = 2\%$, $\rho_2 = 1\%$) – plocha výztuže v jednotlivých průřezích je tedy rozdílná. Rozdílná plocha výztuže v jednotlivých průřezích způsobuje, že je ovlivněna normálová i momentová únosnost jak nad vodorovnou osou, tak pod vodorovnou osou. Nad osou je normálová a momentová únosnost ovlivněna změnou plochy betonu a změnou plochy výztuže. Pod osou je pak normálová a momentová únosnost ovlivněna zejména změnou plochy výztuže, jelikož většina betonu je již tažená, a tudíž vyloučena z působení.

Na obr. 2.40 jsou vykresleny interakční diagramy průřezů, jejichž plocha výztuže je zůstává zachována stejná ($A_{s1} = 0,02 \cdot 200 \cdot 300 \text{ mm}^2$, $A_{s2} = 0,01 \cdot 200 \cdot 300 \text{ mm}^2$) – stupeň vyztužení jednotlivých průřezů je tedy rozdílný. Stejná plocha výztuže v jednotlivých průřezích způsobuje, že normálová a momentová únosnost jsou výrazně ovlivněny pouze nad vodorovnou osou, kde změna plochy betonu má velký vliv. Pod osou (kde změna plochy betonu má malý vliv) je únosnost také ovlivněna, avšak mnohem méně. Můžeme tedy říci, že s rostoucí tahovou normálovou silou klesá vliv výšky průřezu na normálovou i momentovou únosnost. Při maximální tahové normálové síle má výška průřezu vliv pouze na momentovou únosnost průřezu, nikoliv na normálovou únosnost průřezu.

Problematiku lze shrnout následovně. Výška průřezu má vliv zejména na plochu betonu, a tudíž ovlivňuje zejména část interakčního diagramu nad vodorovnou osou, jelikož v této části jsou body vyjadřující únosnost při takovém namáhání, kdy působí velká část betonu.

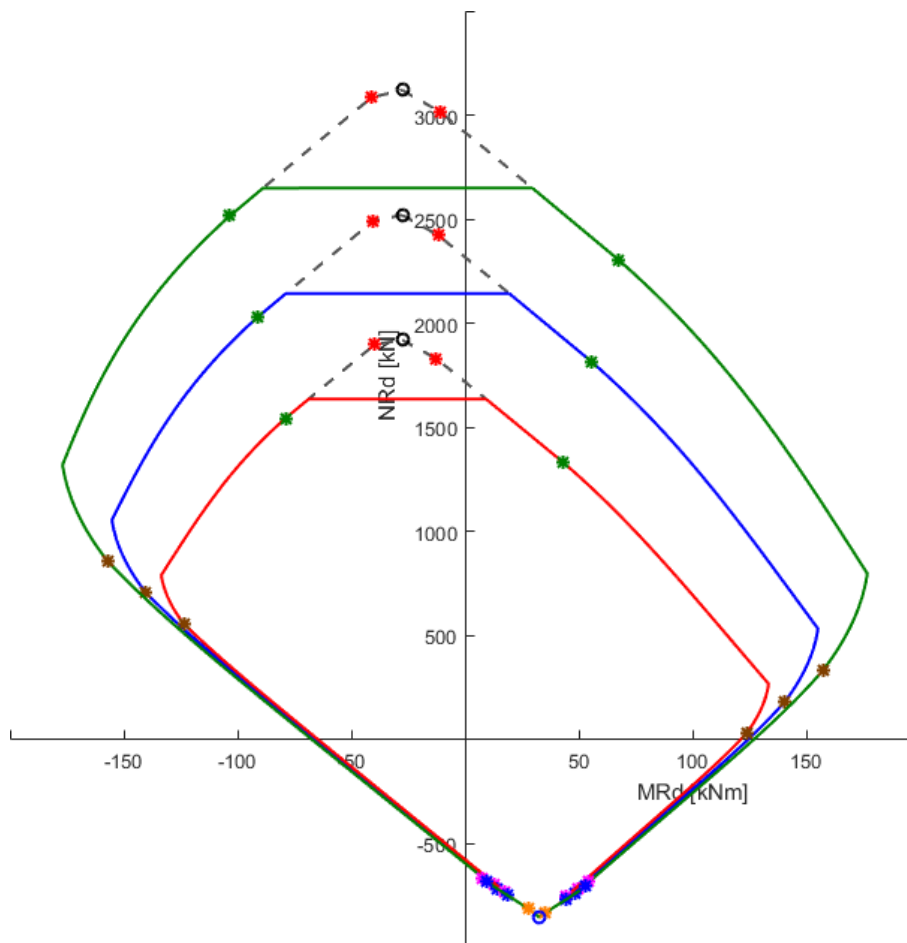


Obr. 2.39: Interakční diagramy – různé poměry h/b , stejná šířka, stejné stupně vyztužení



Obr. 2.40: Interakční diagramy – různé poměry h/b , stejná šířka, stejné plochy výztuže

V případě, že všechny průřezy mají stejnou výšku a mění se šířka (viz obr. 2.41), graf vypadá velmi podobně jako v případě různých pevnostních tříd betonu, viz obr. 2.56. To je dáno tím, že šířka průřezu ovlivňuje pouze sílu v tlačeném betonu a třída pevnosti betonu také ovlivňuje zejména sílu v tlačeném betonu.

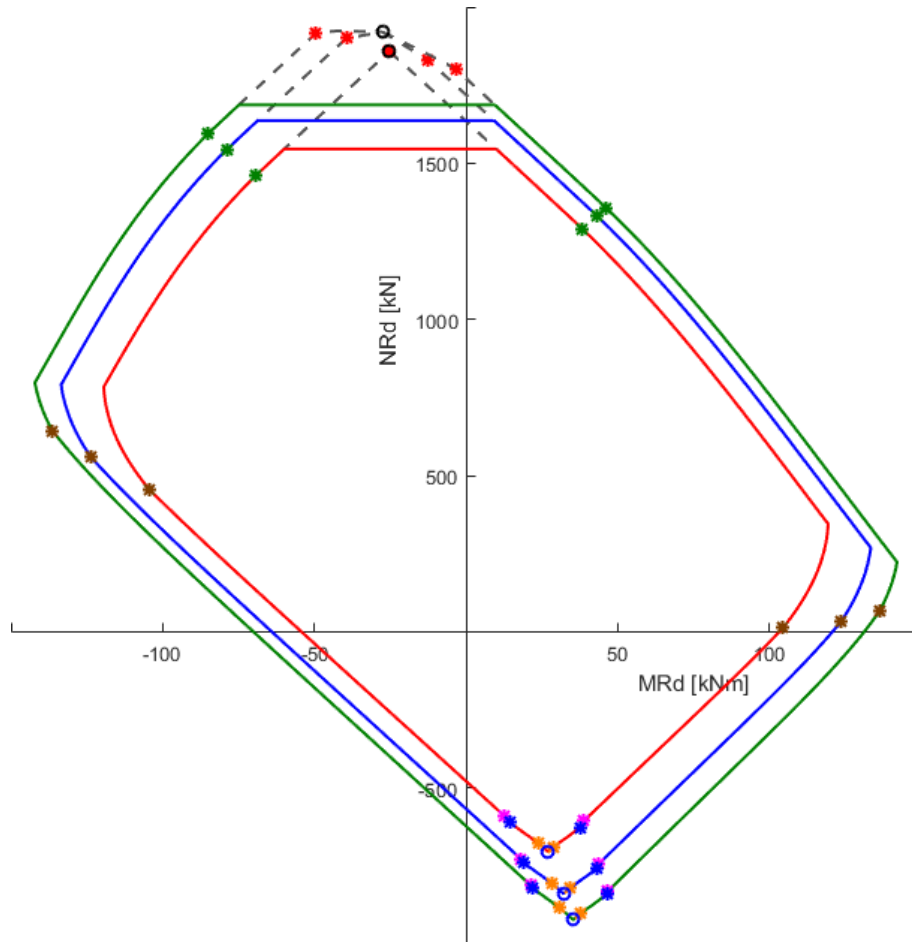


Obr. 2.41: Interakční diagramy – různé šířky (200 mm, 300 mm, 400 mm), stejných výšek (300 mm), stejné plochy výztuže

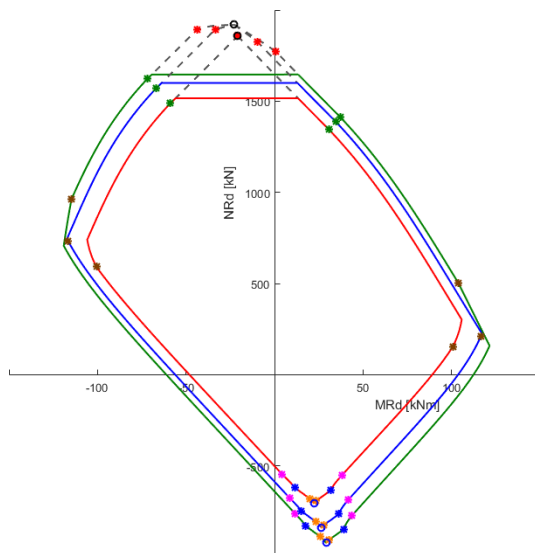
2.4.4 Třída výztuže

Velikost a tvar interakčního diagramu velmi závisí na třídě výztuže, tj. mezi kluzu a mezi pevnosti výztuže. Na obr. 2.42 jsou vykresleny tři interakční diagramy průřezu při různých třídách výztuže. Červenou barvou je označen interakční diagram při uvažování výztuže z oceli B420B ($f_{yk} = 420$ MPa, $f_{uk} = 453.6$ MPa), modrou barvou při uvažování výztuže z oceli B500B ($f_{yk} = 500$ MPa, $f_{uk} = 540$ MPa) a zelenou barvou při uvažování výztuže z oceli B550B ($f_{yk} = 550$ MPa, $f_{uk} = 594$ MPa).

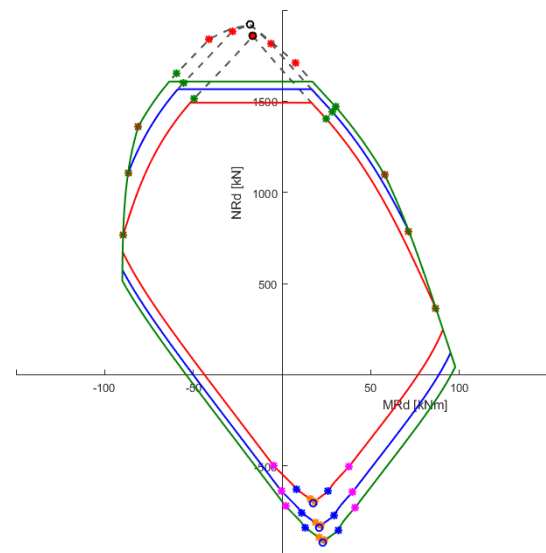
Z interakčních diagramů na obr. 2.42 se může zdát, že změna třídy výztuže způsobuje zejména změnu velikosti interakčního diagramu, a nikoliv i změnu tvaru. Podíváme-li se však na obr. 2.43 a obr. 2.44, zjišťujeme, že při jiné volbě parametrů (v tomto případě při jiné osové vzdálenosti výztuže od krajních vláken) způsobuje změna třídy výztuže nejen změnu velikosti, ale i změnu tvaru interakčního diagramu.



Obr. 2.42: Interakční diagramy – různé pevnostní třídy výztuže



Obr. 2.43: Interakční diagramy – různé třídy výztuže, $d_1 = d_2 = 55$ mm



Obr. 2.44: Interakční diagramy – různé třídy výztuže, $d_1 = d_2 = 75$ mm

2.4.5 Pracovní diagramy oceli

Při výpočtu únosnosti průřezu při dané poloze neutrální osy je možné zvolit buď pracovní diagram oceli s vodorovnou horní větví (viz kapitola 1.2.1), a nebo pracovní diagram oceli se stoupající horní větví (viz kapitola 1.2.2). Pro pracovní diagram oceli se stoupající horní větví platí, že po dosažení meze kluzu výztuže napětí roste se zvyšujícím se poměrným přetvořením výztuže. Zatímco pro pracovní diagram oceli s vodorovnou horní větví platí, že napětí zůstává konstantní po dosažení meze kluzu výztuže.

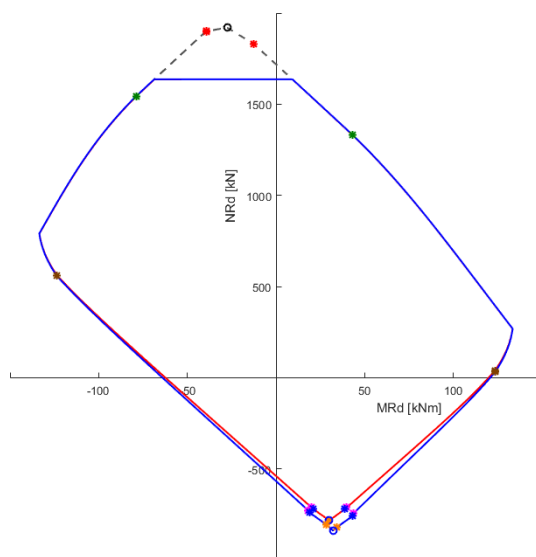
Pro většinu bodů interakčního diagramu platí, že průřez je namáhán tak, že alespoň jedna z výztuží je za mezí kluzu. Z toho vyplývá, že pro většinu bodů interakčního diagramu platí, že hodnota vypočtené únosnosti průřezu závisí na zvoleném pracovním diagramu oceli. A tedy téměř celý tvar interakčního diagramu se změní, změníme-li uvažovaný pracovní diagram oceli.

Jak lze však vidět na obr. 2.45, pro většinu bodů interakčního diagramu platí, že změna uvažovaného pracovního diagramu oceli způsobí pouze minimální, téměř nezpozorovatelnou, změnu únosnosti průřezu – a tudíž i nezpozorovatelnou změnu tvaru interakčního diagramu. K výrazné změně tvaru interakčního diagramu dochází pouze v dolní části diagramu, kde body vyjadřují únosnost při takovém namáhání, že poměrné přetvoření tažené výztuže je veliké.

Výše uvedené poznatky lze tedy shrnout následovně. Tvar horní poloviny interakčního diagramu nezávisí na volbě pracovního diagramu oceli. Tvar dolní poloviny interakčního diagramu závisí na volbě pracovního diagramu oceli a to tak, že zvolíme-li pracovní diagram oceli se stoupající horní větví, pak se interakční diagram zvětší (viz obr. 2.45) – tedy při dané poloze neutrální osy je únosnost průřezu větší.

Na obr. 2.45 je vykreslen interakční diagram průřezu o parametrech uvedených v kapitole 2.4.1. Pro průřezy o jiných parametrech může být rozdíl interakčních diagramů v dolní části jiný. Například, rozdíl mezi jednotlivými interakčními diagramy je přímo úměrný stupni vyztužení.

Červenou barvou je označen interakční diagram průřezu při uvažování pracovního diagramu oceli s vodorovnou horní větví.



Obr. 2.45: Interakční diagramy – různé pracovní diagramy oceli

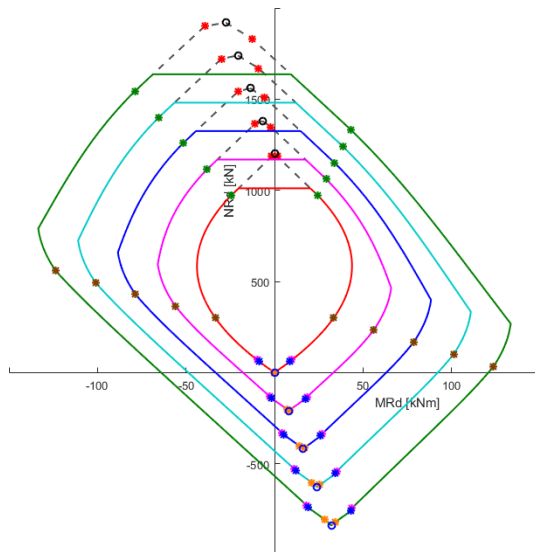
2.4.6 Plocha výztuže

Celková únosnost průřezu je z části zajištěna betonem, a z části výztuží, blíže viz podkapitola 2.4.2. Plocha výztuže ovlivňuje část únosnosti zajištěnou výztuží – čím větší je plocha výztuže, tím větší část celkové únosnosti zajišťuje výztuž.

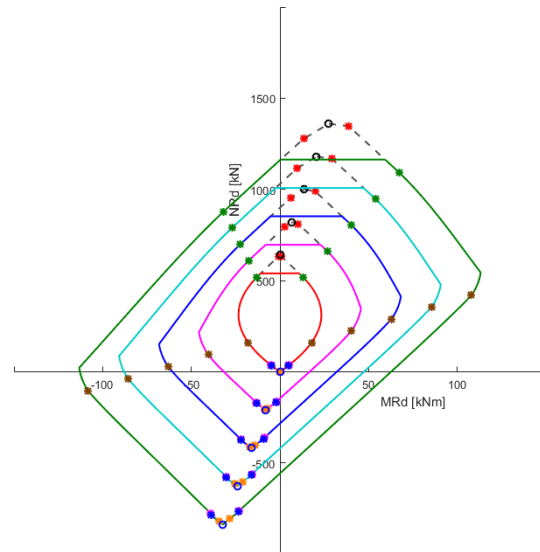
Na obr. 2.46 jsou vykresleny interakční diagramy průřezů s různými plochami výztuže. Plochy dolních výztuží a barevné označení interakčních diagramů je následující: 0 mm² (červený), 300 mm² (fialový), 600 mm² (modrý), 900 mm² (tyrkysový), 1200 mm² (zeleň). Plocha horní výztuže je vždy poloviční v porovnání s dolní výztuží. Největší plocha výztuže (1200 mm²) odpovídá stupni vyztužení 2 %. Ostatní parametry průřezu, viz podkapitola 2.4.1.

Na obr. 2.47 jsou vykresleny interakční diagramy průřezů se stejnými plochami výztuže jako na obr. 2.46. Třída betonu je však C16/20 a hodnoty ploch výztuží uvedené v předchozím odstavci platí pro horní výztuž. Plocha dolní výztuže je v porovnání s plochou horní výztuže vždy poloviční.

Z obr. 2.46 a obr. 2.47 je zřejmé, že s rostoucí plochou výztuže v průřezu se zvětšuje interakční diagram průřezu a mění se jeho tvar – zvětšuje se únosnost v tahu, zvětšuje se momentová únosnost při rovnoměrném namáhání průřezu (diagram je tedy více nesouměrný podle svislé osy) a diagram je méně plynulý. Rovněž je z těchto dvou grafů zřejmé, že s klesající třídou pevnosti betonu roste vliv plochy výztuže na celkovou únosnost.



Obr. 2.46: Interakční diagramy – různé plochy výztuže



Obr. 2.47: Interakční diagramy – různé plochy výztuže, $A_{s2} > A_{s1}$, beton třídy C16/20

2.4.7 Vzdálenost výztuže od bližších krajních vláken

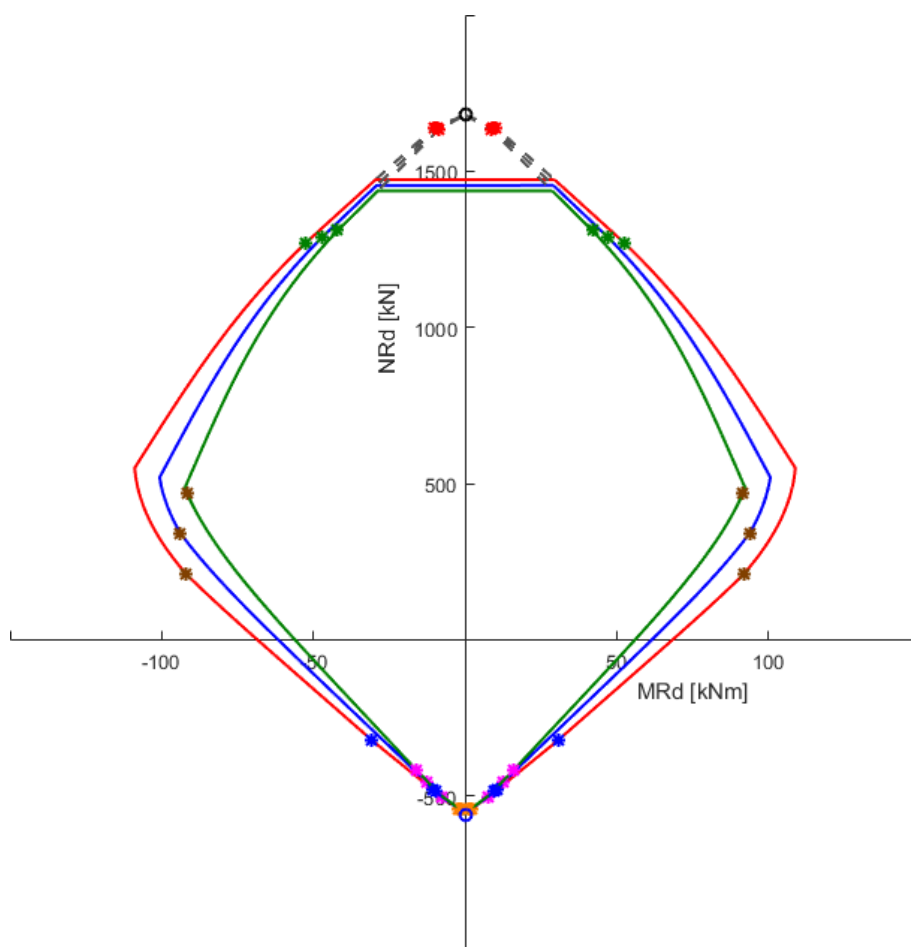
Poloha výztuže má vliv zejména na momentovou únosnost průřezu a změna polohy výztuže má tedy za následek zejména změnu tvaru interakčního diagramu průřezu. Normálová únosnost průřezu je také ovlivněna, avšak relativně málo.

Níže, na obr. 2.48, jsou vykresleny interakční diagramy tří průřezů, jejichž stupně vyztužení jsou $\rho_1 = \rho_2 = 1\%$. Červenou barvou je označen interakční diagram průřezu, pro jehož výztuž platí $d_1 = d_2 = 25$ mm. Modrou barvou je označen interakční diagram průřezu, pro jehož výztuž platí $d_1 = d_2 = 40$ mm. Zelenou barvou je označen interakční diagram

průřezu, pro jehož výztuž platí $d_1 = d_2 = 55$ mm. Z grafu je zřejmé, že absolutní rozdíl mezi jednotlivými interakčními diagramy roste s momentem. To je způsobeno právě tím, že poloha výztuže má vliv zejména na momentovou únosnost průřezu. Z grafu lze rovněž vyvodit, že s rostoucí vzdáleností výztuže od bližších krajních vláken průřezu klesá momentová únosnost průřezu. Tudíž největší interakční diagram má ten průřez, jehož výztuž je nejbližší k povrchu průřezu. Pro možnost jednoduššího budoucího odkazování jsou zde přehledně zformulovány výše uvedené teze:

Teze 1 *S rostoucí vzdáleností výztuže od bližších krajních vláken průřezu klesá momentová únosnost průřezu.*

Teze 2 *Největší interakční diagram má ten průřez, jehož výztuž je nejbližší k povrchu průřezu.*



Obr. 2.48: Interakční diagramy – různé polohy výztuže, $\rho_1 = \rho_2 = 1$ %

Interakční diagramy nesymetricky vyztužených průřezů jsou vykresleny na obr. 2.50 až obr. 2.53. U těchto nesymetricky vyztužených průřezů teze 1 neplatí ve všech bodech – platí však ve velké většině bodů, a tudíž stále platí teze 2. Neplatnost v některých bodech je způsobena tím, že v porovnání se symetricky vyztuženými průřezy je změněna poloha bodů vyjadřujících únosnosti průřezů při rovnoměrných namáháních*. Bližší vysvětlení viz níže.

*rovnoměrné stlačení a rovnoměrné protažení

Pro symetricky vyztužený průřez platí, že při rovnoměrném namáhání průřezu se vyruší momenty od sil ve výztužích. Pro symetricky vyztužený průřez rovněž platí, že při rovnoměrném namáhání nevzniká moment od síly v betonu – při rovnoměrném stlačení působí síla na střednici* a při rovnoměrném protažení je síla v betonu nulová.

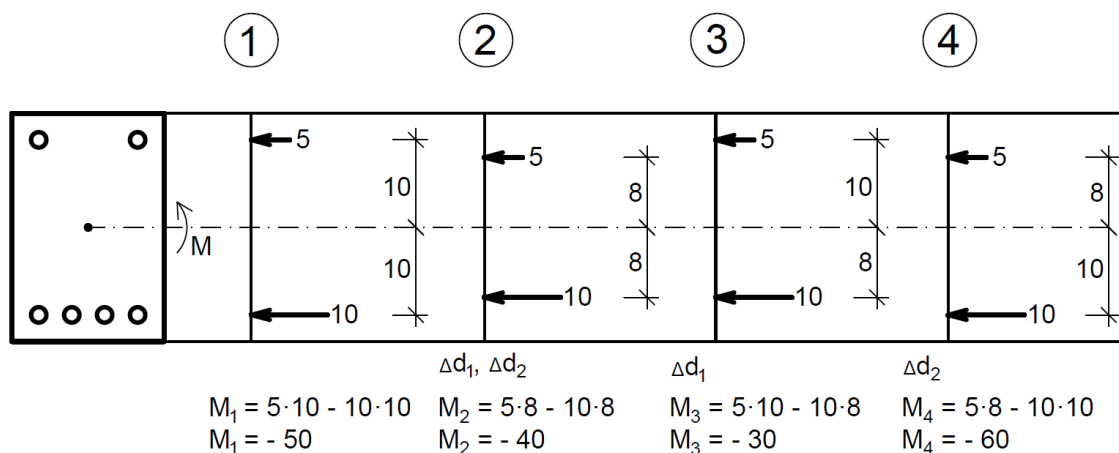
V případě nesymetrického vyztužení se však při rovnoměrném namáhání průřezu nevyruší momenty od sil ve výztužích a síla v betonu nepůsobí na střednici – rovnoměrně namáhaný průřez díky tomu tedy má nenulovou momentovou únosnost. A vzhledem k tomu, že změna polohy výztuže změní působíště síly od výztuže, tak ovlivní i velikost momentu od této síly a tím i momentovou únosnost průřezu. Změna momentové únosnosti změní umístění bodu, vyjadřujícího danou únosnost, na grafu. V případě nesymetrického vyztužení tedy změna polohy výztuže mění umístění bodů, vyjadřujících únosnost při rovnoměrném namáhání, na grafu.

Způsob, jakým je ovlivněna momentová únosnost rovnoměrně namáhaného průřezu při změně polohy výztuže, je pro nerovnoměrně vyztužený průřez ($\rho_1 > \rho_2$) popsán na obr. 2.49. Ze schématu lze vyvodit následující tři teze pro momentovou únosnost rovnoměrně namáhaného průřezu.

Teze 3 *Zvětší-li se vzdálenost obou výztuží od bližších krajních vláken o stejnou hodnotu, pak momentová únosnost rovnoměrně namáhaného průřezu klesne.*

Teze 4 *Zvětší-li se vzdálenost výztuže o větší ploše od bližších krajních vláken, pak momentová únosnost rovnoměrně namáhaného průřezu klesne.*

Teze 5 *Zvětší-li se vzdálenost výztuže o menší ploše od bližších krajních vláken, pak momentová únosnost rovnoměrně namáhaného průřezu vzroste.*

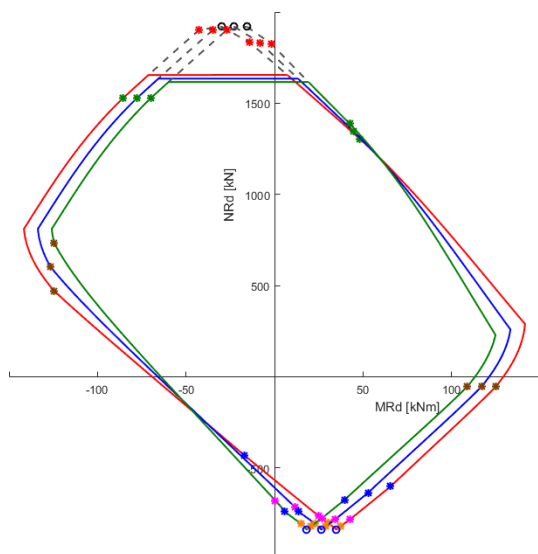


Obr. 2.49: Vliv změny polohy výztuže na momentovou únosnost rovnoměrně namáhaného průřezu

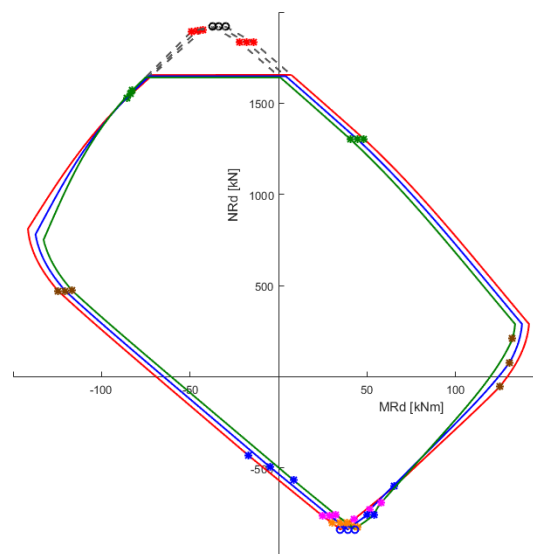
*v polovině výšky průřezu a to je bod, ke kterému počítáme momentové působení

Na obr. 2.50 jsou vykresleny interakční diagramy tří průřezů. Ve všech těchto průřezích má horní výztuž $S2$ stále stejnou polohu (platí $d_2 = 25$ mm) a rozdílnou polohu má pouze dolní výztuž $S1$. Červenou barvou je označen interakční diagram průřezu, pro jehož dolní výztuž platí $d_1 = 25$ mm. Modrou barvou je označen interakční diagram průřezu, pro jehož dolní výztuž platí $d_1 = 40$ mm. Zelenou barvou je označen interakční diagram průřezu, pro jehož dolní výztuž platí $d_1 = 55$ mm. V souladu s tezí 2 je největší interakční diagram ten červený. Dále, v souladu s tezí 4 má největší momentovou únosnost při rovnoměrném namáhání ten průřez, jehož interakční diagram je označen červenou barvou. Průřez, který má největší interakční diagram, má tedy i největší momentovou únosnost při rovnoměrném namáhání. Z toho důvodu se interakční diagramy kříží právě v dolní levé části a horní pravé části.

Na obr. 2.51 jsou vykresleny interakční diagramy tří průřezů. Ve všech těchto průřezích má dolní výztuž $S1$ stále stejnou polohu (platí $d_1 = 25$ mm) a rozdílnou polohu má pouze horní výztuž $S2$. Červenou barvou je označen interakční diagram průřezu, pro jehož horní výztuž platí $d_2 = 25$ mm. Modrou barvou je označen interakční diagram průřezu, pro jehož horní výztuž platí $d_2 = 40$ mm. Zelenou barvou je označen interakční diagram průřezu, pro jehož horní výztuž platí $d_2 = 55$ mm. V souladu s tezí 2 je největší interakční diagram ten červený. Dále, v souladu s tezí 5 má nejmenší momentovou únosnost při rovnoměrném namáhání průřez, jehož interakční diagram je označen červenou barvou. Průřez, který má největší interakční diagram, má tedy nejmenší momentovou únosnost při rovnoměrném namáhání. Z toho důvodu se interakční diagramy kříží právě v horní levé části a dolní pravé části.



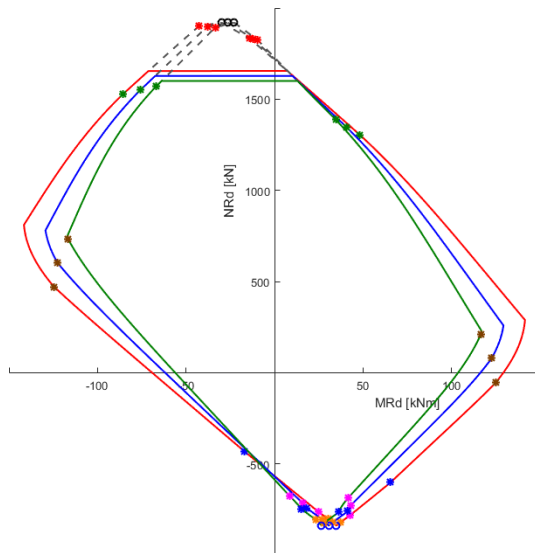
Obr. 2.50: Interakční diagramy – různé polohy výztuže 1, $d_2 = 25$ mm



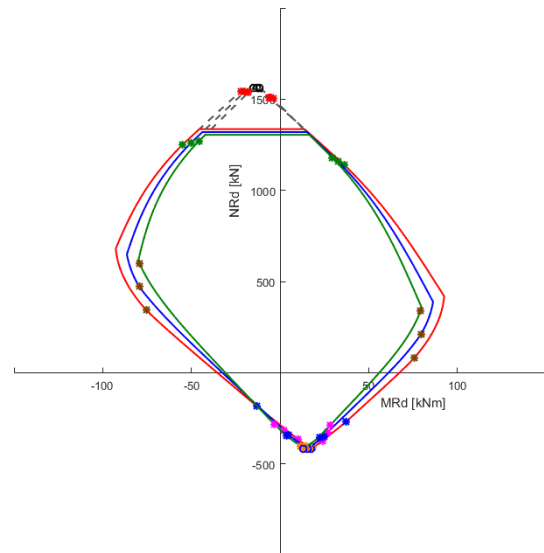
Obr. 2.51: Interakční diagramy – různé polohy výztuže 2, $d_1 = 25$ mm

Na obr. 2.52 jsou vykresleny interakční diagramy tří průřezů. Červenou barvou je označen interakční diagram průřezu, pro jehož výztuž platí $d_1 = d_2 = 25$ mm. Modrou barvou je označen interakční diagram průřezu, pro jehož výztuž platí $d_1 = d_2 = 40$ mm. Zelenou barvou je označen interakční diagram průřezu, pro jehož výztuž platí $d_1 = d_2 = 55$ mm. V souladu s tezí 2 je největší interakční diagram ten červený. Dále, v souladu s tezí 3 má největší momentovou únosnost při rovnoměrném namáhání průřez, jehož interakční diagram je označen červenou barvou. Průřez, který má největší interakční diagram, má tedy i největší momentovou únosnost při rovnoměrném namáhání. Z toho důvodu se interakční diagramy kříží právě v dolní levé části a horní pravé části.

Na obr. 2.53 jsou vykresleny interakční diagramy tří průřezů, jejichž stupně vyztužení jsou $\rho_1 = 1$ % a $\rho_2 = 0,5$ %. Značení interakčních diagramů a polohy výztuží jsou stejné jako na výše popsaném obr. 2.52. Ačkoliv velikostmi se liší, tvary interakčních diagramů na obr. 2.53 jsou velmi podobné jako tvary interakčních diagramů na obr. 2.52. Tudíž vše uvedené pro obr. 2.52 v předchozím odstavci platí i pro obr. 2.53.



Obr. 2.52: Interakční diagramy – různé polohy obou výztuží



Obr. 2.53: Interakční diagramy – různé polohy obou výztuží

2.4.8 Tažnost výztuže

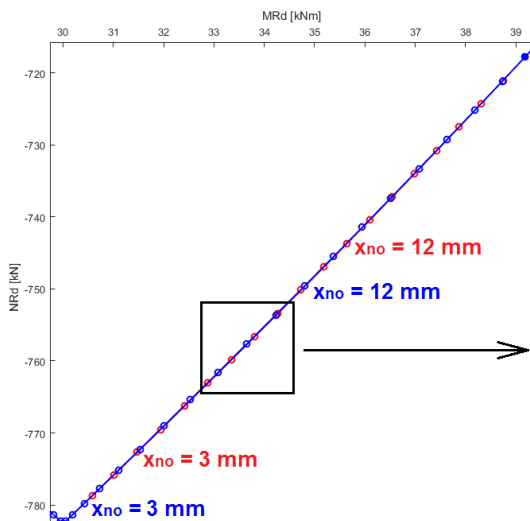
Maximální dovolené poměrné přetvoření výztuže, dále jen „tažnost výztuže“, je implicitně omezeno v případě pracovního diagramu oceli se stoupající horní větví, jelikož norma [1] to nařizuje v případě tohoto pracovního diagramu. V případě pracovního diagramu oceli s vodorovnou horní větví norma dovoluje neomezovat tažnost výztuže, přesněji řečeno uvažovat tažnost rovnou nekonečnu. V rámci výpočtu interakčního diagramu pomocí třetího programu má však uživatel možnost zvolit, zda má být v případě pracovního diagramu oceli s vodorovnou horní větví omezena tažnost výztuže, či nikoliv. Níže je prozkoumán vliv omezení tažnosti výztuže na tvar interakčního diagramu při uvažování pracovního diagramu oceli s vodorovnou horní větví.

Prvně je důležité si uvědomit, kdy se projevuje omezení tažnosti výztuže a tedy, o jak důležitou problematiku se jedná. Většina bodů interakčního diagramu vyjadřuje únosnost při selhání průřezu drcením tlačeneho betonu. Při výpočtu většiny bodů interakčního diagramu tedy nemá tažnost výztuže vliv na výpočet a výsledek, jelikož vliv tažnosti výztuže se projevuje pouze při selhání průřezu porušením výztuže. K tomuto způsobu selhání průřezu dochází, když poměrné přetvoření výztuže je velmi veliké, což odpovídá namáháním, kdy výška tlačene oblasti je velmi malá (pro výztuž B500B se jedná o hodnoty menší než přibližně 6 % výšky průřezu) nebo nulová. Na interakčním diagramu jsou body, reprezentující únosnost při tomto způsobu porušení, umístěny mezi bodem označeným modrým křížkem a bodem označeným modrým kolečkem. Jedná se o velmi malou oblast, a tudíž o ne příliš důležitou problematiku. Nicméně, z akademického hlediska je vhodné tuto problematiku prozkoumat a popsat.

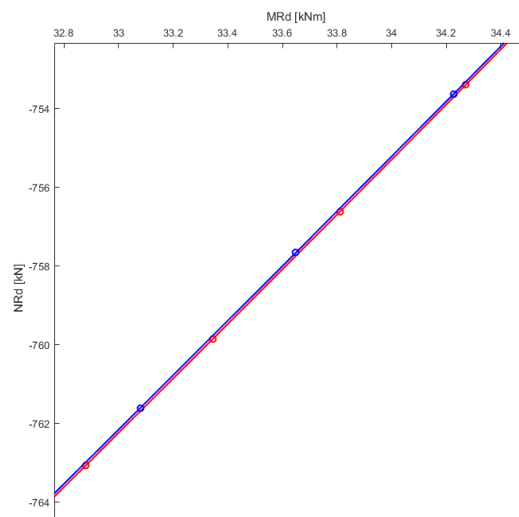
Co se týká samotného porovnání výsledků výpočtu bez omezení tažnosti výztuže a výpočtu s omezením tažnosti výztuže, bylo zjištěno následující. Je-li omezena tažnost výztuže, pak v případě namáhání, kdy selhání průřezu je způsobeno porušením výztuže, je normálová únosnost průřezu větší až o přibližně 1 % a momentová únosnost je menší až o přibližně 3 %. Zajímavým zjištěním je však fakt, že spojnice bodů vyjadřujících únosnost průřezů s omezením tažnosti výztuže je téměř totožná se spojnicí bodů vyjadřujících únosnost průřezů bez omezení tažnosti výztuže, viz [obr. 2.54](#). V oblasti, kde se křivky nejvíce rozcházejí je rozdíl mezi normálovými únosnostmi přibližně 0,01 % a rozdíl mezi momentovými únosnostmi je přibližně 0,05 %, viz [obr. 2.55](#). Tudíž můžeme konstatovat, že ačkoliv se únosnost průřezu při omezení tažnosti výztuže viditelně liší v porovnání s únosností průřezu bez omezení tažnosti výztuže, křivky interakčních diagramů se téměř vůbec neliší.

Konkrétní hodnoty výše uvedené platí pro interakční diagramy na [obr. 2.54](#) a [obr. 2.55](#). Ověření, že křivky interakčních diagramů se téměř vůbec neliší bylo také provedeno pro všechny kombinace následující parametrů:

- Pracovní diagram betonu: parabolicko-rektangulární, bilineární, návrhový obecný s klesající větví
- Stupeň vyztužení dolní výztuží: 2 %, 1 %
- Stupeň vyztužení horní výztuží: 1 %, 0,5 %
- Vzdálenost výztuže od bližších krajních vláken průřezu: 25 mm, 35 mm, 45 mm
- Poměr šířky a výšky průřezu (b/h): 2/3, 1/3
- Třída pevnosti betonu: C16/20, C30/37, C55/67



Obr. 2.54: Pravá dolní část interakčního diagramu



Obr. 2.55: Přiblížení pravé dolní části interakčního diagramu

Výřezy na obr. 2.54 a obr. 2.55 jsou z interakčního diagramu průřezu o parametrech uvedených v kapitole 2.4.1 pouze s tím rozdílem, že je uvažován pracovní diagram oceli s vodorovnou horní větví. Modrou barvou jsou označeny body vyjadřující únosnost průřezu při omezení tažnosti výztuže a červenou barvou jsou označeny body vyjadřující únosnost průřezu bez omezení tažnosti výztuže.

2.4.9 Třída betonu

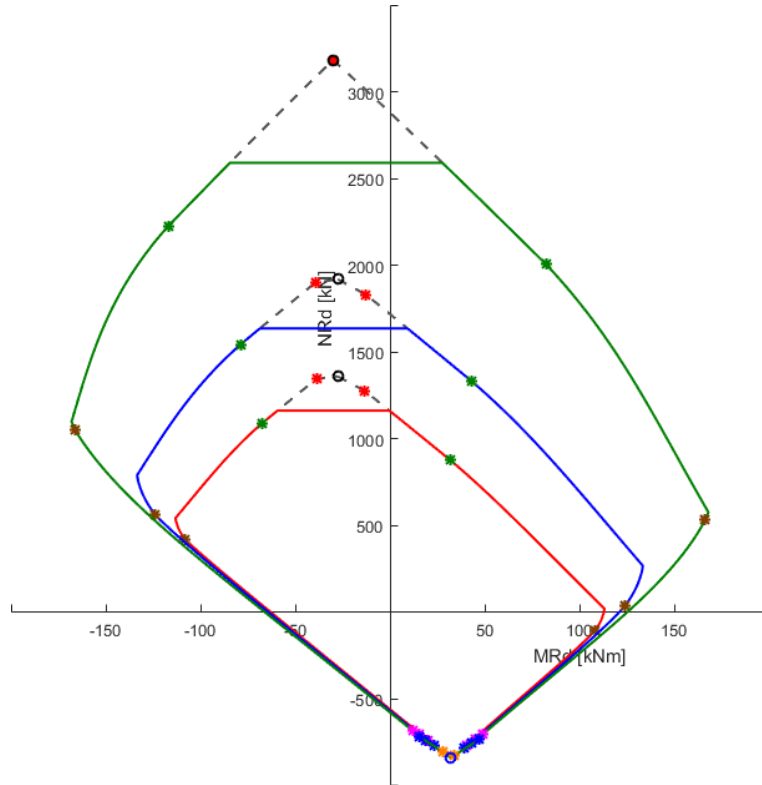
Na obr. 2.56 jsou vykresleny tři interakční diagramy průřezu při různých třídách pevnosti betonu. Červenou barvou je označen interakční diagram při uvažování třídy pevnosti betonu C16/20, modrou barvou při uvažování třídy pevnosti betonu C30/37 a zelenou barvou při uvažování třídy pevnosti betonu C60/75.

Jak můžeme vidět na obr. 2.56, třída pevnosti betonu ovlivňuje zejména velikosti interakčního diagramu průřezu, ale malou měrou ovlivňuje i tvar interakčního diagramu*. Rovněž můžeme vidět, že třída pevnosti betonu výrazně ovlivňuje pouze část diagramu nad vodorovnou osou, tj. v případě, že normálová síla působící v průřezu je záporná. Je tomu tak, jelikož body pod vodorovnou osou vyjadřují únosnost při takovém namáhání průřezu, kde většinu únosnosti průřezu zajišťuje výztuž průřezu a beton má pouze minimální vliv.

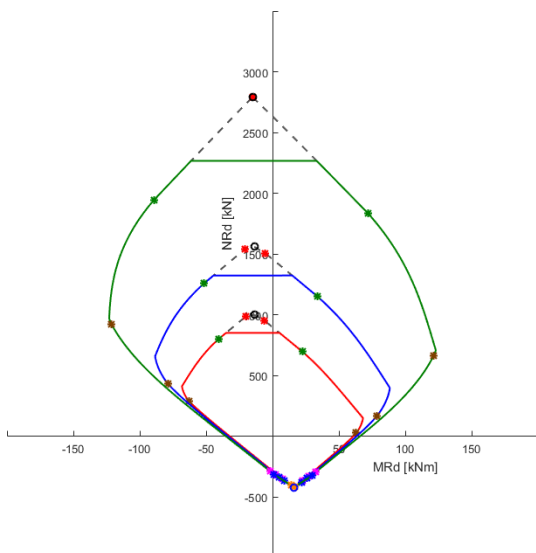
Část únosnosti průřezu je zajištěna betonem a část únosnosti průřezu je zajištěna výztuží, blíže viz kapitola 2.4.2. To, jak velký vliv na tvar a velikost interakčního diagramu bude mít změna třídy betonu, tedy závisí na tom, jak velkou část celkové únosnosti průřezu zajišťuje beton. Při zachování rozměrů průřezu a zmenšení stupně vyztužení průřezu zůstává plocha betonu téměř stejná, ale plocha výztuže se zmenšuje – poměrově je tedy betonu více a zajišťuje tedy větší část celkové únosnosti průřezu. Na obr. 2.57 jsou vykresleny interakční diagramy průřezu, jehož stupeň vyztužení je poloviční, tj. $\rho_1 = 1\%$, $\rho_2 = 0,5\%$. Vidíme, že v případě polovičního stupně vyztužení je rozdíl mezi interakčními diagramy větší než v případě předchozího stupně vyztužení. Můžeme tedy konstatovat, že čím men-

*Srovnejte polohu červených bodů na červeném a zeleném diagramu.

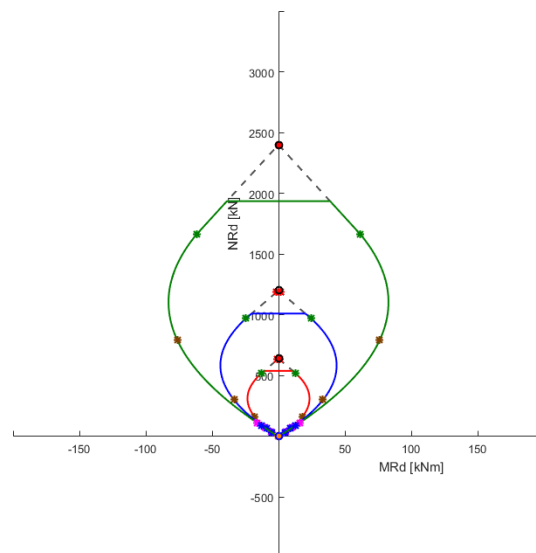
ší je stupeň vyztužení průřezu, tím větší část celkové únosnosti průřezu zajišťuje beton, a tudíž tím větší bude mít změna třídy pevnosti betonu vliv na tvar a velikost interakčního diagramu. Největší rozdíl mezi interakčními diagramy bude tedy v případě prostého betonového průřezu bez vyztužení, viz obr. 2.58.



Obr. 2.56: Interakční diagramy – různé pevnostní třídy betonu



Obr. 2.57: Interakční diagramy – různé pevnostní třídy betonu, $\rho_1 = 1\%$, $\rho_2 = 0,5\%$



Obr. 2.58: Interakční diagramy – různé pevnostní třídy betonu, $\rho_1 = \rho_2 = 0$

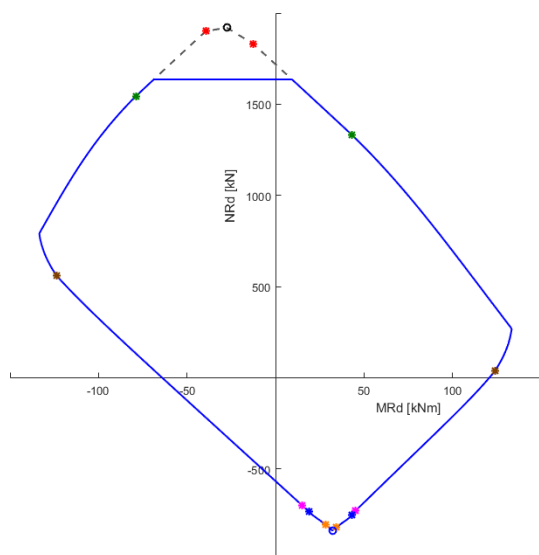
2.4.10 Pracovní diagramy betonu

Níže jsou vykresleny interakční diagramy průřezu o parametrech uvedených v podkapitole 2.4.1. Na obr. 2.59 je vykreslen interakční diagram při uvažování parabolicko-rektangulárního pracovního diagramu betonu, na obr. 2.60 při uvažování bilineárního pracovního diagramu betonu a na obr. 2.61 při uvažování návrhového obecného pracovního diagramu betonu s klesající větví. Na obr. 2.62 jsou tyto interakční diagramy sloučeny do jednoho grafu. Porovnáním těchto interakčních diagramů zjistíme, že dolní polovina všech interakčních diagramů je prakticky stejná – při běžném měřítku není poznat žádný rozdíl. Horní polovina se mírně liší a největší rozdíl je v horní části diagramu. Tato horní část je však vyloučena z interakčního diagramu podmínkou minimální výstřednosti tlakové síly. V platné oblasti interakčního diagramu se rozdíl mezi jednotlivými interakčními diagramy (tj. rozdíl únosností průřezů při použití různých pracovních diagramů betonu) pohybuje přibližně od 0 do 3,5 %.

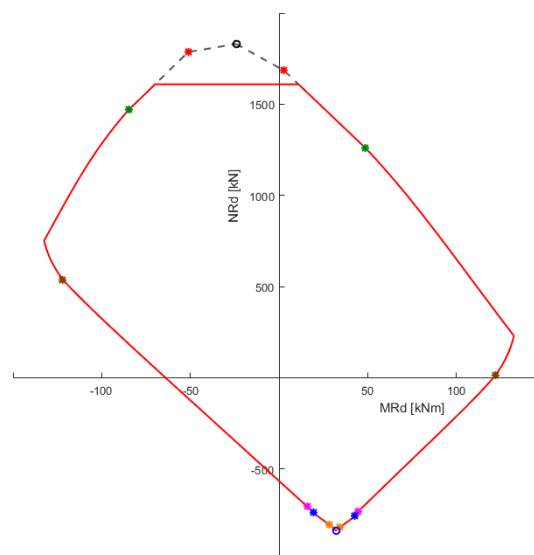
Můžeme tedy konstatovat, že volba pracovního diagramu betonu nemá zásadní vliv na interakční diagram průřezu.

Za povšimnutí stojí, že modrý interakční diagram (při výpočtu použit parabolicko-rektangulární pracovní diagram betonu) a zelený (při výpočtu použit návrhový obecný pracovní diagram betonu s klesající větví) interakční diagram jsou velmi podobné. Červený interakční diagram (při výpočtu použit bilineární pracovní diagram betonu) se nejvíce liší od modrého interakčního diagramu (při výpočtu použit parabolicko-rektangulární pracovní diagram betonu).

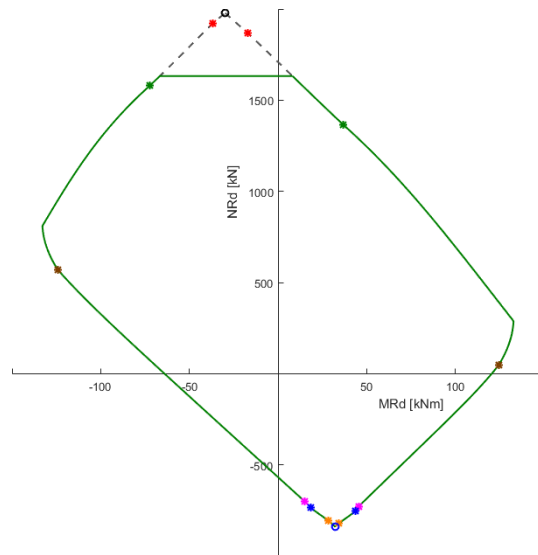
Konkrétní hodnoty výše uvedené platí pro interakční diagramy na obr. 2.62, tj. interakční diagramy průřezu o parametrech uvedených v kapitole 2.4.1. Pro průřezy o jiných parametrech se však hodnoty téměř neliší.



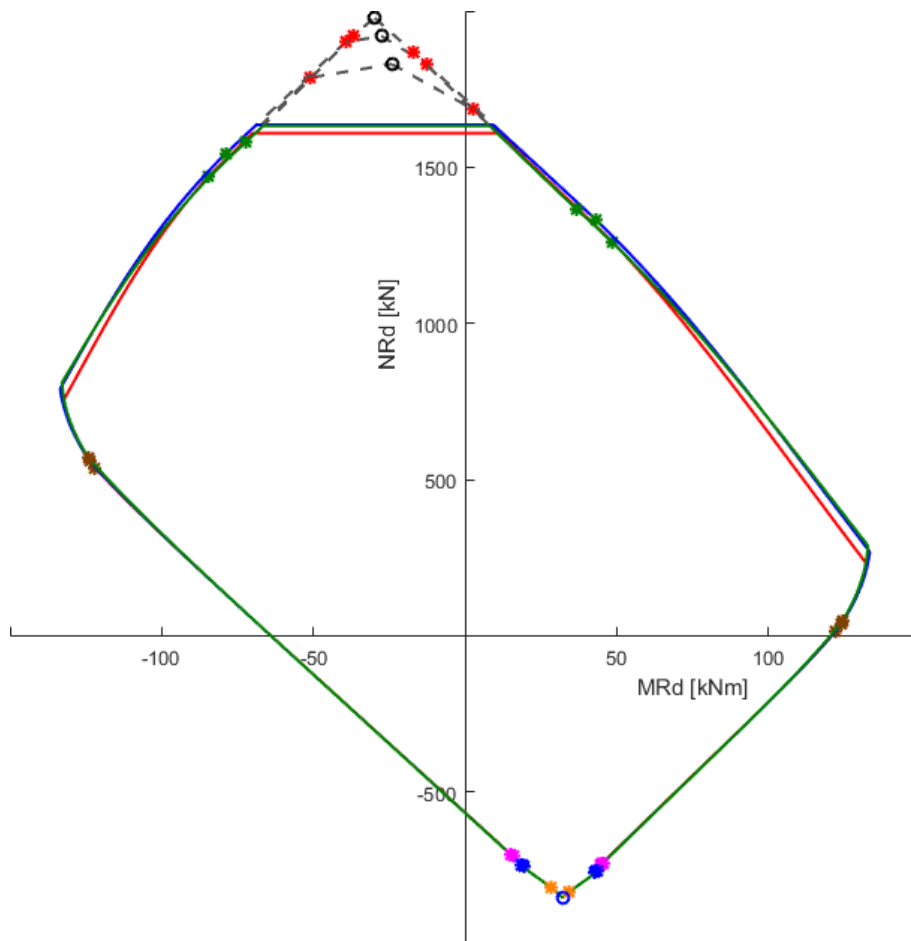
Obr. 2.59: Interakční diagram – parabolicko-rektangulární pracovní diagram betonu



Obr. 2.60: Interakční diagram – bilineární pracovní diagram betonu



Obr. 2.61: Interakční diagram – návrhový obecný pracovní diagram betonu s klesající větví



Obr. 2.62: Interakční diagramy – různé pracovní diagramy betonu

2.5 Program pro sestrojení interakčního diagramu

V rámci této diplomové práce byl vytvořen výpočetní program „IDP 1.0 – Interakční diagram průřezu“, který slouží k sestrojení interakčního diagramu oboustranně vyztuženého železobetonového průřezu. V této kapitole je program stručně popsán. Pro lepší přehlednost práce není detailní popis programu uveden v této kapitole, nýbrž v [příloze B](#).

Program byl vytvořen v prostředí MATLAB R2015b. Pro jeho spuštění je nutné nainstalovat knihovnou nástroje MATLAB, postup viz [kapitola B.1](#). Program je umístěn na příloženém CD-ROMu.

Vytvořený program obsahuje tři samostatné podprogramy:

- podprogram pro sestrojení bodového interakčního diagramu – pro výpočet a sestrojení je použit postup uvedený v kapitole [2.1](#),
- podprogram pro sestrojení mnohobodového interakčního diagramu za použití nejjednodušších pracovních diagramů – pro výpočet a sestrojení je použit postup uvedený v kapitole [2.2](#),
- podprogram pro sestrojení mnohobodového interakčního diagramu za použití nelineárních pracovních diagramů – pro výpočet a sestrojení je použit postup uvedený v kapitole [2.3](#).

Použití každého podprogramu je velmi jednoduché. V prvním okně uživatel zadává parametry průřezu, volí materiálové charakteristiky a parametry výpočtu. Následně, po stisknutí tlačítka Výpočet, je otevřeno nové okno s vykresleným interakčním diagramem.

Program obsahuje rozsáhlou nápovědu, která poskytuje dostatek informací pro pohodlné použití programu i bez manuálu.

Více informací o programu včetně snímků jednotlivých oken programu, viz [příloha B](#).

2.6 Porovnání řešených příkladů

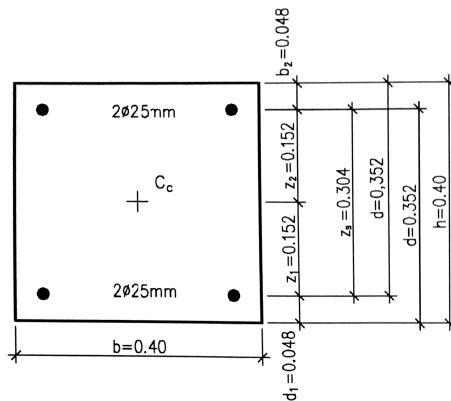
Všechny postupy a vztahy pro výpočet již byly uvedeny v předchozích kapitolách této práce. Autor tedy nepovažuje za zvlášť přínosné zahrnovat do této práce řešení konkrétních příkladů, protože by se jednalo pouze o dosazení číselných hodnot do již vypsanych vztahů.

Autor však považuje za přínosné vypočítat pomocí vytvořeného programu příklady, které jsou řešeny v dostupné literatuře, a porovnat výsledky získané programem s výsledky v literatuře. V podkapitolách této kapitoly tedy budou uvedena zadání příkladů a porovnány jejich výsledky.

Autor této práce nenalezl v dostupné literatuře týkající se interakčních diagramů žádné komplexní řešené příklady, které by umožňovaly rozsáhle porovnat výsledky získané pomocí programu s literaturou. V publikaci [4] však byly alepoň nalezeny řešené příklady týkající se sestrojení bodového interakčního diagramu. Zadání těchto příkladů budou uvedena níže v podkapitolách. V těchto podkapitolách budou rovněž porovnány výsledky získané pomocí programu s výsledky uvedenými v publikaci [4].

2.6.1 Příklad 1

„Vykreslete interakční diagram průřezu sloupu. Rozměry průřezu a výztuž jsou patrné z obr. 5.1.1. Betonová krycí vrstva podélné výztuže ($\phi=25$ mm) sloupu byla stanovena hodnotou $c=35$ mm. Třída betonu C30/37, ocel B500B. Při výpočtu uvažujte rovnoměrné rozdělení napětí v betonu a neomezené přetvoření tahové výztuže.



Obr. 5.1.1 Průřez sloupu

“
[4, příklad 5.1]

V publikaci [4, příklad 5.1] je uveden postup výpočtu a výsledky. V prvním sloupci v tab. 2.2 jsou tyto výsledky vypsány. V tabulce jsou rovněž vypsány výsledky stanovené programem IDP 1.0. Výsledky z publikace jsou porovnány s výsledky z programu a jejich případné rozdíly jsou stručně objasněny. Interakční diagram je souměrný podle osy y – je proto nadbytečné porovnávat obě poloviny interakčního diagramu. Porovnány budou pouze body pravé strany interakčního diagramu.

| | Publikace | Program | Odchylka | Zdůvodnění odchylky |
|-----------|-----------|----------|----------|---|
| N_{Rd0} | -3985.60 | -3887.22 | 2.50 % | Rozdílné poměrné přetvoření betonu |
| M_{Rd0} | 0 | 0 | 0 % | - |
| N_{Rd6} | -3521.00 | -3465.09 | 1.59 % | Hodnota závisí na únosnosti N_{Rd0} |
| M_{Rd6} | 70.40 | 69.30 | 1.59 % | Hodnota závisí na únosnosti M_{Rd0} |
| N_{Rd1} | -2680.00 | -2679.65 | 0.01 % | Program provádí výpočet přesněji |
| M_{Rd1} | 198.30 | 198.25 | 0.03 % | Program provádí výpočet přesněji |
| N_{Rd2} | -1389.50 | -1389.66 | 0.01 % | Program provádí výpočet přesněji |
| M_{Rd2} | 287.10 | 287.00 | 0.03 % | Program provádí výpočet přesněji |
| N_{Rd3} | 0 | 0 | 0 % | - |
| M_{Rd3} | 139.00 | 138.89 | 0.07 % | V publikaci je zanedbána tlač. výztuž a beton |
| N_{Rd4} | 427.17 | 119.65 | 257.02 % | V publikaci je zanedbána sílu v betonu |
| M_{Rd4} | 64.90 | 120.42 | 85.55 % | V publikaci je zanedbána sílu v betonu |
| N_{Rd5} | 854.30 | 853.69 | 0.07 % | Program provádí výpočet přesněji |
| M_{Rd5} | 0 | 0 | 0 % | - |

Tab. 2.2: Porovnání výsledků výpočtů

Z dat v tab. 2.2 lze vyvodit následující závěry.

Pro většinu únosností platí, že odchylka je způsobena pouze přesností výpočtu.

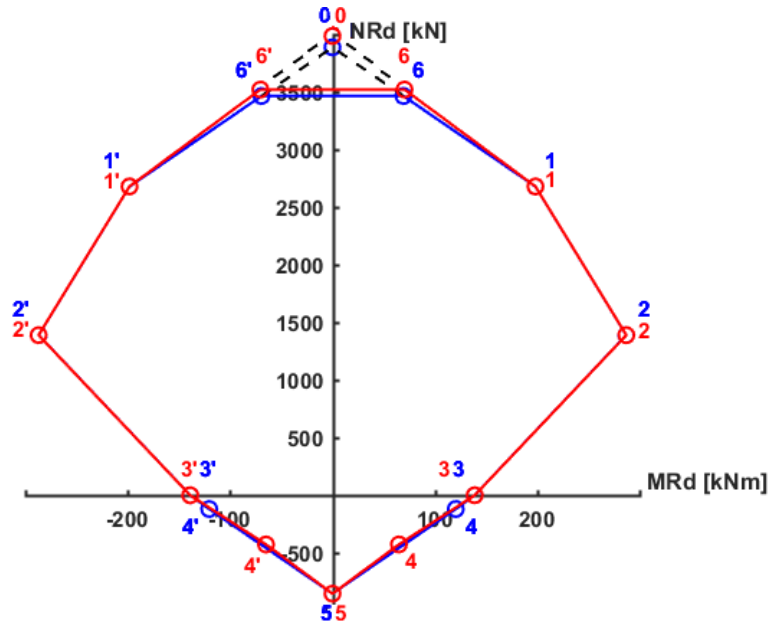
Odchylka bodů N_{Rd0} je způsobena tím, že publikace [4] uvažuje poměrné stlačení betonu rovné ε_{c2} a program uvažuje poměrné stlačení betonu rovné ε_{c3}^* . Rozdílné poměrné přetvoření způsobuje rozdílné v napětích ve výztužích, a to způsobuje rozdílné síly ve výztužích, což má za následek rozdílné únosnosti N_{Rd0} .

Při výpočtu únosnosti N_{Rd6} a M_{Rd6} uvažujeme, že bod 6 leží na spojnici bodů 0 a 1. To znamená, že únosnost N_{Rd0} ovlivňuje únosnosti N_{Rd6} a M_{Rd6} . Z toho vyplývá, že odchylka únosností N_{Rd0} (popsaná v předchozím odstavci) ovlivňuje odchylky únosností N_{Rd6} a M_{Rd6} .

Rozdíl momentových únosností při prostém ohybu je způsoben tím, že postup v publikaci [4] nezapočítává tlačenu výztuž při výpočtu výšky tlačené oblasti průřezu, a rovněž zanedbává sílu v tlačené části betonu při výpočtu momentové únosnosti.

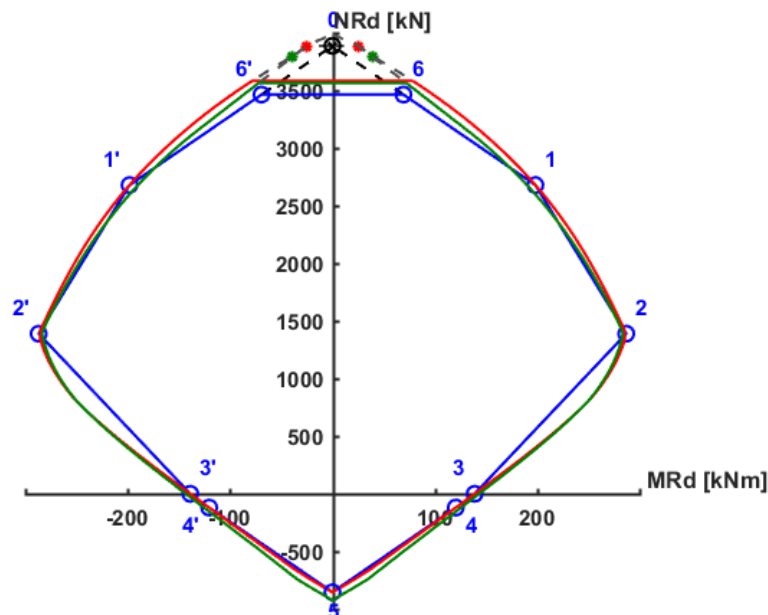
Postup v publikaci [4] zanedbává sílu v tlačeném betonu při výpočtu únosností N_{Rd4} a M_{Rd4} . Program při výpočtu těchto únosností tuto sílu nezanedbává. To způsobuje velký rozdíl v hodnotách únosností. Na obr. 2.63 vidíme, že poloha bodů je značně rozdílná, avšak spojnice všech bodů se liší pouze minimálně.

*Při předpokladu rovnoměrného rozdělení napětí v betonu má být dle normy [4, čl. 3.1.7 (3)] uvažováno poměrné stlačení betonu rovné ε_{c3} .



Obr. 2.63: Porovnání interakčních diagramů – diagram dle publikace je označen červeně, diagram pomocí programu je označen modře

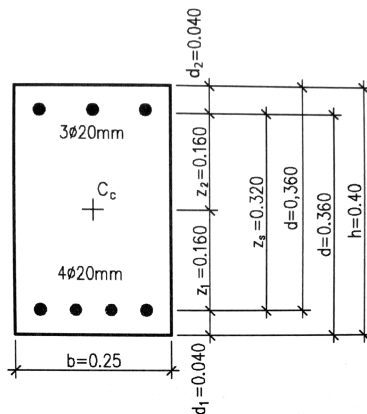
Pro možnost vzájemného porovnání interakčních diagramů sestavených dle různých postupů jsou níže do jednoho grafu (obr. 2.64) vykresleny interakční diagramy výše zadaného průřezu. Modrý interakční diagram je bodový diagram sestavený programem za použití postupu uvedeného v kapitole 2.1. Červený interakční diagram je mnohabodový diagram sestavený programem za použití postupu uvedeného v kapitole 2.2. Zelený interakční diagram je mnohabodový diagram sestavený programem za použití postupu uvedeného v kapitole 2.3 – uvažován byl parabolicko-rektangulární pracovní diagram betonu a pracovní diagram oceli se stoupající větví.



Obr. 2.64: Porovnání interakčních diagramů – diagram dle publikace je označen červeně, diagram pomocí programu je označen modře

2.6.2 Příklad 2

„Vykreslete interakční diagram průřezu sloupu. Rozměry průřezu a výztuž jsou patrné z obr. 5.2.1. Betonová krycí vrstva podélné výztuže ($\phi=25$ mm) sloupu byla stanovena hodnotou $c=30$ mm. Třída betonu C25/30, ocel B500B. Při výpočtu uvažujte rovnoměrné rozdělení napětí v betonu a neomezené přetvoření tahové výztuže.

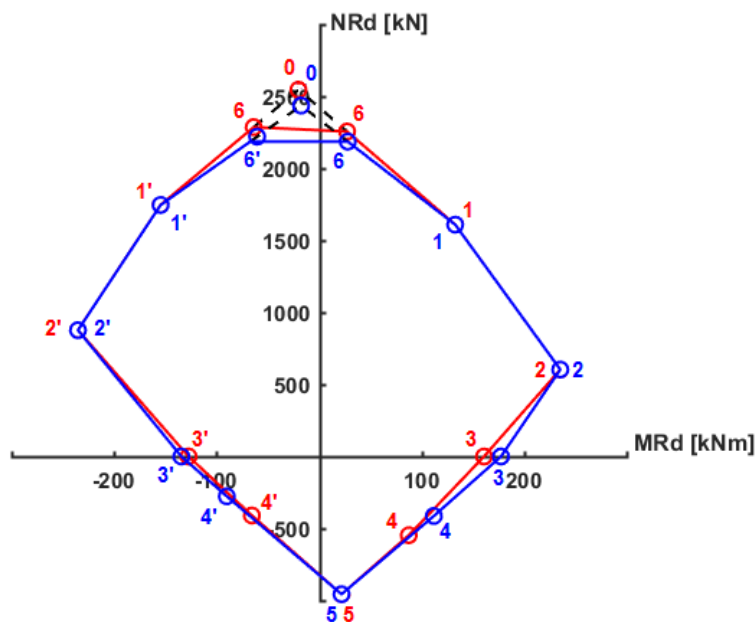


Obr. 5.2.1 Průřez sloupu

“

[4, příklad 5.1]

Tento příklad je zkoumán stejně jako předchozí příklad, a proto bude jeho výklad zestručněn. Komplexnější výklad, viz podkapitola 2.6.1.



Obr. 2.65: Porovnání interakčních diagramů – diagram dle publikace je označen červeně, diagram pomocí programu je označen modře

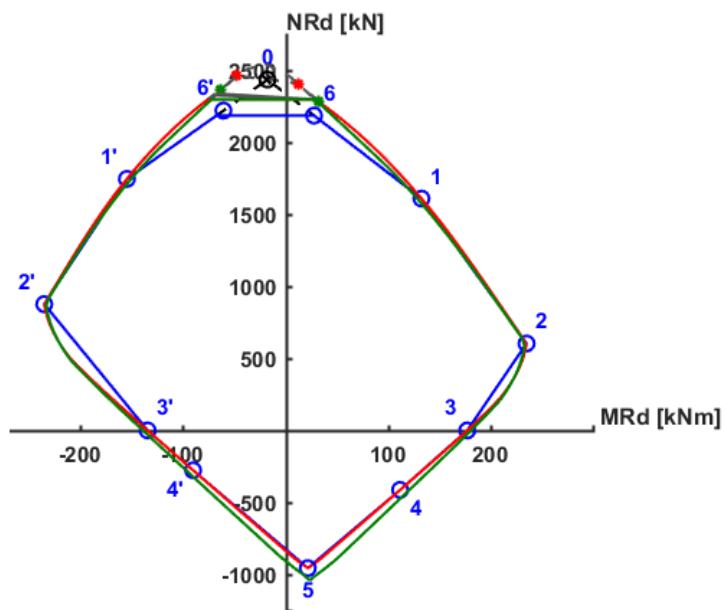
V tab. 2.3 jsou vypsány a porovnány výsledky stanovené programem IDP 1.0 s výsledky uvedenými v publikaci [4]. Interakční diagram (obr. 2.65) není souměrný podle osy y, a proto jsou porovnány obě poloviny interakčního diagramu.

| | Publikace | Program | Odchylka | Zdůvodnění odchylky |
|------------|-----------|----------|----------|---|
| N_{Rd0} | -2546.20 | -2436.36 | 4.51 % | Rozdílné poměrné přetvoření betonu |
| M_{Rd0} | -20.16 | -17.59 | 14.61 % | Rozdílné poměrné přetvoření betonu |
| $N_{Rd6'}$ | -2286.60 | -2220.57 | 2.97 % | Hodnota závisí na únosnosti N_{Rd0} |
| $M_{Rd6'}$ | -63.80 | -60.45 | 5.54 % | Hodnota závisí na únosnosti M_{Rd0} |
| N_{Rd6} | -2256.10 | -2186.06 | 3.20 % | Hodnota závisí na únosnosti N_{Rd0} |
| M_{Rd6} | 27.30 | 27.94 | 2.34 % | Hodnota závisí na únosnosti M_{Rd0} |
| $N_{Rd1'}$ | -1746.80 | -1746.36 | 0.03 % | Program provádí výpočet přesněji |
| $M_{Rd1'}$ | -154.70 | -154.62 | 0.05 % | Program provádí výpočet přesněji |
| N_{Rd1} | -1609.80 | -1609.77 | 0.002 % | Program provádí výpočet přesněji |
| M_{Rd1} | 132.80 | 132.76 | 0.03 % | Program provádí výpočet přesněji |
| $N_{Rd2'}$ | -603.30 | -876.82 | 45.34 % | Chyba ve skriptech |
| $M_{Rd2'}$ | -235.30 | -235.28 | 0.01 % | Program provádí výpočet přesněji |
| N_{Rd2} | -603.30 | -603.64 | 0.06 % | Program provádí výpočet přesněji |
| M_{Rd2} | 235.30 | 235.28 | 0.01 % | Program provádí výpočet přesněji |
| $N_{Rd3'}$ | 0 | 0 | 0 % | - |
| $M_{Rd3'}$ | -127.40 | -134.44 | 5.53 % | V publikaci je zanedbána tlač. výztuž a beton |
| N_{Rd3} | 0 | 0 | 0 % | - |
| M_{Rd3} | 160.90 | 177.43 | 10.27 % | V publikaci je zanedbána tlač. výztuž a beton |
| $N_{Rd4'}$ | 409.80 | 276.44 | 48.24 % | V publikaci je zanedbána sílu v betonu |
| $M_{Rd4'}$ | -65.60 | -90.10 | 37.35 % | V publikaci je zanedbána sílu v betonu |
| N_{Rd4} | 546.80 | 413.03 | 32.39 % | V publikaci je zanedbána sílu v betonu |
| M_{Rd4} | 87.50 | 111.95 | 27.94 % | V publikaci je zanedbána sílu v betonu |
| N_{Rd5} | 956.60 | 956.14 | 0.05 % | Program provádí výpočet přesněji |
| M_{Rd5} | 21.90 | 21.85 | 0.23 % | - |

Tab. 2.3: Porovnání výsledků výpočtů

Zdůvodnění odchylek uvedených v tab. 2.3 bylo již podrobně rozvedeno v předchozí podkapitole 2.6.1. Jediným dříve nerozvedeným zdůvodněním je „Chyba ve skriptech“ – to je rozvedeno dále. Při výpočtu normálové únosnosti $N_{Rd2'}$ v publikaci [4] je síla ve výztuži přičtena, přičemž správně má být odečtena – to způsobuje výše uvedenou chybu. Po přepočítání výpočtu v publikaci bylo zjištěno, že při správném výpočtu je hodnota normálové únosnosti $N_{Rd2'}$ rovna -877,3 a odchylka od únosnosti vypočítané programem je rovna 0.05 %.

Pro možnost vzájemného porovnání interakčních diagramů sestrojených dle různých postupů jsou níže do jednoho grafu (obr. 2.64) vykresleny interakční diagramy výše zadaného průřezu. Modrý interakční diagram je bodový diagram sestrojený programem za použití postupu uvedeného v kapitole 2.1. Červený interakční diagram je mnohabodový diagram sestrojený programem za použití postupu uvedeného v kapitole 2.2. Zelený interakční diagram je mnohabodový diagram sestrojený programem za použití postupu uvedeného v kapitole 2.3 – uvažován byl parabolicko-rektangulární pracovní diagram betonu a pracovní diagram oceli se stoupající větví.



Obr. 2.66: Porovnání interakčních diagramů – diagram dle publikace je označen červeně, diagram pomocí programu je označen modře

Kapitola 3

Shrnutí a diskuze

V teoretické části této práce byly detailně popsány a vysvětleny způsoby porušení železobetonových průřezů namáhaných normálovou silou a ohybovým momentem. U každého způsobu porušení byly sestaveny vztahy pro výpočet poměrných přetvoření materiálů na mezi únosnosti průřezu. Dále byly v teoretické části popsány pracovní diagramy materiálů včetně schémat, a u každého pracovního diagramu byl sestaven vztah pro výpočet napětí v závislosti na poměrném přetvoření materiálu. Pracovní diagramy betonu byly vzájemně porovnány tak, že bylo poukázáno na jejich podobnosti a rozdíly, a na to, co z nich vyplývá. Kromě toho byla hodnocena i bezpečnost použití jednotlivých pracovních diagramů.

Praktická část byla věnována interakčním diagramům. V prvních třech kapitolách byly popsány různé postupy sestavení interakčních diagramů. První kapitola se týkala bodového interakčního diagramu a postupu sestavení vycházejícího z dostupné literatury. Tento postup byl upraven tak, aby byl výpočet prováděn přesněji. Druhá kapitola se týkala interakčního diagramu sestaveného z mnoha bodů, kde každý bod vyjadřoval únosnost průřezu při zvolené poloze neutrální osy. Při výpočtu únosnosti průřezu byly uvažovány, stejně jako v případě prvního postupu, nejjednodušší materiálové modely. V této kapitole byl detailně zdůvodněn zvláštní tvar horní části diagramu a byly popsány významné body této části. Třetí kapitola se také týkala interakčního diagramu sestaveného z mnoha bodů, avšak v tomto případě byly uvažovány komplexní nelineární materiálové modely. Za zmínku stojí, že zde bylo vyřešeno, jak vypočítat sílu v tlačeném betonu při použití nelineárních pracovních diagramů betonu. Objasněn byl i rozdílný sklon pravé a levé horní části interakčního diagramu, a také zde byly popsány významné body celého interakčního diagramu.

Kromě postupů sestavení interakčních diagramů byla v praktické části rovněž provedena parametrická studie zkoumající vliv jednotlivých vstupních parametrů na velikost a tvar interakčního diagramu.

V rámci praktické části práce byl také vytvořen program pro sestavení interakčního diagramu. Program obsahuje tři podprogramy, kde každý podprogram využívá k sestavení interakčního diagramu jeden z výše zmíněných postupů. K programu bylo rovněž vytvořeno grafické uživatelské rozhraní umožňující jednoduše zadat vstupní parametry výpočtu. Součástí programu je také rozsáhlá nápověda umožňující použití programu i bez nastudování manuálu k programu.

Na konci praktické části byly za pomoci vytvořeného programu vypočítány příklady z dostupných publikací, a výsledky stanovené programem byly porovnány s výsledky uvedenými v dostupné literatuře. Většina výsledků se shodovala velmi přesně. Některé výsledky se lišily z důvodu přesnějšího výpočtu v případě programu, případně z důvodu chyb v literatuře.

Při vypracovávání práce autor narazil na několik náročných problémů, které bylo nutné vyřešit. Tyto problémy a jejich řešení jsou rozvedeny níže.

Nejprve bylo nutné vyřešit otázku maximálního dovoleného poměrného přetvoření betonu, tj. jaké poměrné přetvoření betonu by mělo být uvažováno v krajních vláknech průřezu na mezi únosnosti průřezu. Pro případy částečně tlačných průřezů bylo řešení jasné – maximální dovolené poměrné přetvoření bylo uvažováno rovné meznímu poměrnému přetvoření betonu ε_{cu} . Složitě však bylo rozhodnout o hodnotě maximálního dovoleného poměrného přetvoření v případě plně tlačných průřezů. Nakonec bylo stanoveno, že poměrné přetvoření betonu ve vzdálenosti $(1 - \varepsilon_{ci}/\varepsilon_{cu})h$ od nejmíce tlačných vláken je rovno ε_{ci} , a že maximální dovolené poměrné přetvoření betonu v krajních vláknech se dopočítá pomocí známé polohy neutrální osy.

Další otázka se týkala omezení interakčního diagramu shora, kde se nabízely dva možné způsoby řešení. První způsob spočíval ve spojení bodů, jejichž normálové únosnosti byly $N_{min,p}$ a $N_{min,l}$ ($N_{min,p}$ je největší tlaková síla splňující podmínku minimální výstřednosti síly na pravé straně diagramu a $N_{min,l}$ je největší tlaková síla splňující podmínku minimální výstřednosti síly na levé straně diagramu). Druhým možným řešením bylo zvolit větší (méně zápornou) hodnotu z hodnot $N_{min,p}$ a $N_{min,l}$, a poté bodem o zvolené normálové únosnosti proložit vodorovnou úsečku. V podkapitole věnující se této otázce bylo ukázáno, že první způsob omezení horní části je nesprávný, a proto byla zvolena možnost druhá.

Návrhová norma ČSN EN 1992-1-1 uvádí, že má být uvažována minimální výstřednost tlakové síly e_0 . Neuvádí však, od kterého bodu má být tato výstřednost uvažována. Nabízejí se dvě možnosti: uvažovat ji od poloviny výšky průřezu, anebo od působíště síly způsobující rovnoměrné stlačení. V této práci bylo odvozeno a vysvětleno, že uvažovat tuto výstřednost od poloviny výšky průřezu má za následek absurdní výsledky, a proto je tato výstřednost uvažována od působíště síly způsobující rovnoměrné stlačení.

Kromě výše zmíněných problémů autor při zpracovávání práce objevil další zajímavá zjištění, která budou stručně zmíněna níže.

Při sestavování interakčních diagramů bylo zjištěno, že v některých případech nemá průřez maximální normálovou únosnost průřezu při namáhání rovnoměrným stlačením. Toto platí pouze pro nesouměrně vyztužené průřezy, a to v případě, že výztuž není za mezí kluzu při porušení způsobeném rovnoměrným stlačením. Souvisí to se změnou napětí ve výztuži při rostoucí excentricitě působící síly. Vzhledem k nesouměrnosti vyztužení a skutečnosti, že výztuž je pod mezí kluzu, roste po určitou dobu (do dosažení meze kluzu ve více tlačené výztuži) celková tlaková síla od výztuží při rostoucí excentricitě působící síly. To způsobuje, že průřez nemá maximální normálovou únosnost průřezu při namáhání rovnoměrným stlačením.

Porovnáním pracovních diagramů betonů bylo zjištěno, že pro betony tříd pevnosti do C55/60 (včetně) lze říci, že předpoklad rovnoměrného rozdělení tlakového napětí vychází z parabolicko-rektangulárního pracovního diagramu. Pro betony tříd pevnosti do C70/85 (včetně) platí, že při posuzování průřezu je nejbezpečnější uvažovat návrhový

pracovní diagram s klesající větví (a druhý nejbezpečnější je návrhový bilineární pracovní diagram). Pro betony všech tříd pevnosti platí, že nejméně bezpečné je používat parabolicko-rektangulární pracovní diagram. V neposlední řadě stojí za zmínku, že pro betony nižších a středních tříd pevnosti platí, že při poměrném přetvoření betonu ε_{cu} je charakteristická hodnota napětí dle pracovního diagramu s klesající větví menší než hodnota napětí dle návrhových pracovních diagramů.

Parametrická studie provedená v praktické části odhalila, které parametry mají značný vliv na velikost a tvar interakčního diagramu, a které parametry mají naopak téměř nulový vliv. Největší vliv na velikost mají pouze rozměry průřezu (zejména výška), třída pevnosti betonu a plocha výztuže. Naopak velmi malý vliv mají pracovní diagramy materiálů (v řádu procent) a tažnost výztuže (v řádu desetin až setin procent). Zajímavé zjištění, které nemusí být na první pohled zřejmé je to, že šířka průřezu má na velikost a tvar interakčního diagramu stejný vliv jako třída betonu.

Nakonec je vhodné zmínit, že interakční diagramy sestrojené dle jednotlivých postupů se od sebe liší velmi málo. Bodový interakční diagram se od mnohabodového interakčního diagramu uvažujícího nejjednodušší pracovní diagramy liší nepříliš výrazně, a to pouze v oblastech největších momentových únosností a v oblasti největší normálové únosnosti v tlaku. Mnohabodový interakční diagram uvažující nejjednodušší pracovní diagramy se od mnohabodového interakčního diagramu uvažujícího komplexní pracovní diagramy liší pouze nepatrně, a to v oblasti maximální normálové únosnosti v tahu.

Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo vytvoření volně dostupného výpočetního programu pro sestrojení přesného interakčního diagramu. Dalším cílem bylo podrobné teoretické prozkoumání celé problematiky porušení a únosnosti průřezu namáhaného normálovou silou a ohybovým momentem. Dále měl být také popsán postup sestrojení interakčního diagramu a popsán samotný vytvoření program.

Všechny cíle práce byly úspěšně splněny. Hlavní cíl byl naplněn vytvořením programu v prostředí MATLAB. Vytvořený program je možné použít jak k sestrojení bodového interakčního diagramu, při jehož sestrojení jsou uvažovány nejjednodušší pracovní diagramy, tak k sestrojení mnohabodového interakčního diagramu, při jehož sestrojení jsou uvažovány komplexní nelineární pracovní diagramy. Součástí programu je rozsáhlá nápověda. K zadávání dat slouží vytvořené grafické uživatelské rozhraní. Problematika porušení průřezu byla přehledně a podrobně popsána v teoretické části, a v praktické části práce byly popsány různé postupy sestrojení interakčního diagramu. Na konci praktické části byla na řešených příkladech demonstrována správná funkčnost programu. Samotný program byl detailně popsán v příloze B.

Vzhledem k nenáročnosti instalace a přehlednému ovládní programu jej lze snadno využít při výuce, výzkumech a dalších akademických činnostech. Program nalezne využití i v praxi, kde může být bezplatně používán, a to za předpokladu, že se bude jednat o nekomerční použití v souladu s akademickou licencí.

Ačkoliv byly všechny cíle práce splněny a problematika byla podrobně popsána a sjednocena, je zde stále prostor pro další rozšíření práce. Z teoretického hlediska by bylo možné zaměřit se na interakční diagram obecného průřezu. V praktické části by pak bylo vhodné implementovat algoritmy výpočtu v jiném programovacím jazyce tak, aby byl vytvořen samostatný program, pro jehož spuštění by nebylo třeba instalovat žádné další knihovny ani soubory.

Vzhledem k rozsáhlým možnostem uplatnění považuje autor za hlavní přínos práce vytvořený program pro sestrojení interakčního diagramu. Další přínos podle autora spočívá v detailním prozkoumání a popsání všech aspektů problematiky, v sestavení nových postupů a odvození nových vztahů.

Literatura

- [1] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. ed. 2. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [2] ČSN EN 1992-1-1 ZMĚNA Z3 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Praha: ÚNMZ, 2015.
- [3] PROCHÁZKA, Jaroslav a kol. *Navrhování betonových konstrukcí 1. 2.*, upr. vyd. Praha: ČBS Servis, 2006. ISBN 80-903807-1-9.
- [4] KOHOUTKOVÁ, Alena, Jaroslav PROCHÁZKA a Jitka VAŠKOVÁ. *Navrhování železobetonových konstrukcí: Příklady a postupy*. Praha: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05587-8.
- [5] GILBERT, Raymond Ian, Neil Colin MICKLEBOROUGH a Gianluca RANZI. *Design of Prestressed Concrete to Eurocode 2, Second Edition*. Boca Raton: CRC Press, 2017. ISBN 978-13-15-38950-9.
- [6] BEEBY, Andrew W. a R. S. NARAYANAN. *Designers' Handbook to Eurocode 2 Part 1.1: Design of concrete structures* London: Thomas Telford, 1995. ISBN 0 7277 1668 9.
- [7] BETONVERENIGING, THE CONCRETE SOCIETY a DEUTSCHER BETONVEREIN. *Design aids for EC2. Design of Concrete Structures. Design aids for ENV 1992-1-1. Eurocode 2, part 1*. London: E & FN Spon, 1997. ISBN 0 419 21190 X.

Příloha A

Iterace metodou půlení intervalů

Obecně je postup použití této metody následující. Na začátku je zvolen interval, kde funkční hodnoty v krajních bodech mají opačná znaménka. Dále je stanovena funkční hodnota pro argument rovný bodu ve středu (polovině) intervalu, a v závislosti na znaménku této funkční hodnoty je bod ve střed intervalu zvolen jako jeden z krajních bodů nového intervalu (druhý krajní bod zůstává stejný). Změněn je ten krajní bod, jehož funkční hodnota má stejné znaménko jako funkční hodnota bodu ve středu intervalu.

Iteraci metodou půlení intervalu používáme ke stanovení výšky tlačené oblasti v případě namáhání průřezu prostým ohybem, viz kapitola 2.1.5.

Iterační způsob výpočtu výšky tlačené oblasti metodou půlení intervalů spočívá v tom, že zvolíme hranice intervalu $\langle x_1, x_2 \rangle$ a vypočteme jejich průměr (tj. „polovinu intervalu“), který dosadíme za výšku tlačené oblasti x . Dále spočítáme sílu v tlačené oblasti betonu a síly ve výztužích a ověříme výsledek sumy sil. V případě, že výsledek není uspokojivý, provedeme příslušnou úpravu intervalu – dále viz níže.

Pro první iteraci volíme hranice intervalu $x_1 = 0$ a $x_2 = h$ – výšku tlačené oblasti tedy volíme $x = (0 + h)/2$. Pro danou výšku tlačené oblasti určíme poměrné přetvoření výztuže, dále pak napětí ve výztuži, sílu ve výztuži, sílu v tlačěném betonu a sumu sil, viz (2.1.29).

Platí-li $\sum F_i > 0$, pak záporná tlaková síla v betonu nebyla dostatečně velká, a tedy zvolená výška tlačené oblasti nebyla dostatečně velká. Víme tedy, že hledaná hodnota výšky tlačené oblasti bude větší než x , a tudíž bude ležet v intervalu $\langle x, x_2 \rangle$. Volíme tedy novou spodní hranici intervalu $x_1 = x$ a výpočet opakujeme. Platí-li $\sum F_i < 0$, pak upravíme horní hranici intervalu $x_2 = x$ a výpočet opakujeme.

Tyto kroky opakujeme dokud nezískáme dostatečnou přesnost výsledku, tj. sumy sil $\sum F_i$. Autor této práce považuje za dostatečnou přesnost 0,001.

A.1 Vzorový příklad iterace metodou půlení intervalů

Jako vzorový příklad pro názorné předvedení řešení pomocí iterace metodou půlení intervalů volíme stanovení reálného kořenu funkce třetího řádu.

Stanovte reálný kořen funkce $y(x) = x^3 + 2x^2 - 3x + 4$ (tj. najděte reálné x , pro které platí $y(x) = 0$) použitím iterace metodou půlení intervalů. Kořen leží v intervalu $\langle -10, 10 \rangle$.

Před samotným stanovením kořene je třeba stanovit funkční hodnoty na okrajích intervalu.

$$y(-10) = -1000 + 200 + 30 + 4 = -766$$

$$y(10) = 1000 + 200 - 30 + 4 = 1174$$

V první iteraci cyklu volíme hranice intervalu $x_1 = -10$ a $x_2 = 10$. Do funkce tedy dosazujeme hodnotu $x = (-10 + 10)/2 = 0$ a získáváme funkční hodnotu $y(0) = 4$. Jelikož je funkční hodnota při dosazení dolní hranice intervalu záporná a funkční hodnota při dosazení průměru hranic intervalu je kladná, bude hledaný kořen funkce ležet mezi dolní hranicí intervalu a průměrem hranic intervalu. Volíme tedy novou horní hranici intervalu $x_2 = (-10 + 10)/2 = 0$.

V druhé iteraci cyklu postupujeme stejně, avšak s tím rozdílem, že hranice intervalu jsou $x_1 = -10$ a $x_2 = 0$. Do funkce dosazujeme průměr hranic $x = -5$ a získáváme funkční hodnotu $y(-5) = -56$. Jelikož je funkční hodnota při dosazení průměru hranic intervalu záporná a funkční hodnota při dosazení horní hranice intervalu je kladná, bude hledaný kořen funkce ležet mezi průměrem hranic intervalu a horní hranicí intervalu. Volíme tedy novou dolní hranici intervalu $x_1 = (-10 + 0)/2 = -5$.

Další postup je analogický s předchozím, proto bude zapsán stručněji.

Třetí iterace:

$$\begin{aligned}x &\in \langle -5, 0 \rangle \\x &= (-5 + 0)/2 = -2,5 \\y(-2,5) &= 8,375 \\x_2 &= -2,5\end{aligned}$$

Čtvrtá iterace:

$$\begin{aligned}x &\in \langle -5, -2,5 \rangle \\y(-3,75) &= -9,359 \\x_1 &= -3,75\end{aligned}$$

Pátá iterace:

$$\begin{aligned}x &\in \langle -3,75, -2,5 \rangle \\y(-3,125) &= 2,389 \\x_2 &= -3,125\end{aligned}$$

Šestá iterace:

$$\begin{aligned}x &\in \langle -3,75, -3,125 \rangle \\y(-3,438) &= -2,674 \\x_1 &= -3,438\end{aligned}$$

Sedmá iterace:

$$\begin{aligned}x &\in \langle -3,438, -3,125 \rangle \\y(-3,281) &= 0,049 \\x_2 &= -3,281\end{aligned}$$

Již při sedmé iteraci jsme se přiblížili velmi blízko k hledané hodnotě $y(x) = 0$. Pro představu dalšího zpřesňování uvádíme hodnoty při 13., 18. a 19. iteraci.

Třináctá iterace:

$$\begin{aligned}x &\in \langle -3, 286, -3, 281 \rangle \\y(-3, 284) &= 0,010 \\x_2 &= -3, 284\end{aligned}$$

Osmnáctá iterace:

$$\begin{aligned}x &\in \langle -3, 2843, -3, 2841 \rangle \\y(-3, 2842) &= 0,0008 \\x_2 &= -3, 2842\end{aligned}$$

Devatenáctá iterace:

$$\begin{aligned}x &\in \langle -3, 2843, -3, 2842 \rangle \\y(-3, 28426) &= 0,0002 \\x_1 &= -3, 28426\end{aligned}$$

Příloha B

Manuál k programu IDP 1.0

Toto je manuál k programu „IDP - Interakční diagram průřezu 1.0“, který byl vytvořen v rámci této diplomové práce za podpory grantu Studentské grantové soutěže ČVUT v Praze č. SGS17/044/OHK1/1T/11.

Program slouží k sestrojení interakčního diagramu oboustranně vyztuženého obdélníkového železobetonového průřezu a obsahuje celkem tři samostatné podprogramy:

- podprogram pro sestrojení bodového interakčního diagramu – pro výpočet a sestrojení je použit postup uvedený v kapitole 2.1,
- podprogram pro sestrojení mnohobodového interakčního diagramu za použití nejjednodušších pracovních diagramů – pro výpočet a sestrojení je použit postup uvedený v kapitole 2.2,
- podprogram pro sestrojení mnohobodového interakčního diagramu za použití nelineárních pracovních diagramů – pro výpočet a sestrojení je použit postup uvedený v kapitole 2.3.

Jednotlivé podprogramy se při výpočtech a sestrojení striktně drží všech vztahů a postupů uvedených v této práci. Z toho důvodu nejsou v této příloze rozebírány teoretické ani praktické stránky postupu výpočtu a sestrojení, které probíhají na pozadí při použití podprogramů.

Program byl vytvořen v prostředí MATLAB R2015b*, zkompileován v prostředí MATLAB R2017a† a odzkoušen v operačním systému Windows 7 Ultimate a Windows 7 Home Premium.

Pro spuštění programu je nutné mít nainstalované prostředí MATLAB† nebo nainstalovat knihovnu tohoto nástroje, viz podkapitola B.1.

Program obsahuje rozsáhlou nápovědu, která poskytuje dostatek informací pro pohodlné použití programu i bez tohoto manuálu. Okno nápovědy lze vždy vyvolat stlačením tlačítka s otazníkem, které je vždy umístěno u pole nebo prvku, kterého se týká. Okna některých nápověd jsou popsána dále v této kapitole.

Program IDP 1.0 je spolu s knihovnou nástroje MATLAB (viz podkapitola B.1) dostupný na CD-ROMu přiloženém k této práci. Program je rovněž volně dostupný na webových stránkách katedry betonových a zděných konstrukcí, konkrétně na osobních stránkách Ing. Radka Štefana, Ph.D., <<http://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/software/idp/idp.cz.html>>.

*MATLAB. Ver. 8.6.0.267246 (R2015b). USA: The MathWorks, 2015.

†MATLAB. Ver. 9.2.0.538062 (R2017a). USA: The MathWorks, 2017.

B.1 Instalace knihovny a programu

Kroky nutné k instalaci a úspěšnému spuštění programu závisí na tom, zda uživatel má na svém zařízení nainstalovaný program MATLAB R2017a*, či nikoliv.

B.1.1 Uživatel programu nemá nainstalované prostředí MATLAB R2017a

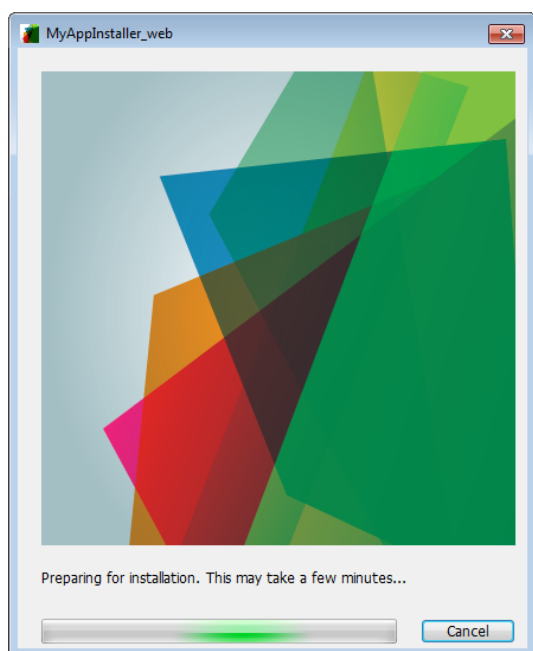
Program IDP 1.0 při výpočtu využívá knihovny prostředí MATLAB. Pro jeho spuštění je tedy nutné tyto knihovny stáhnout a nainstalovat. Knihovny lze nainstalovat následujícími dvěma způsoby.

B.1.1.1 Způsob 1 - Instalátor přiložený k programu

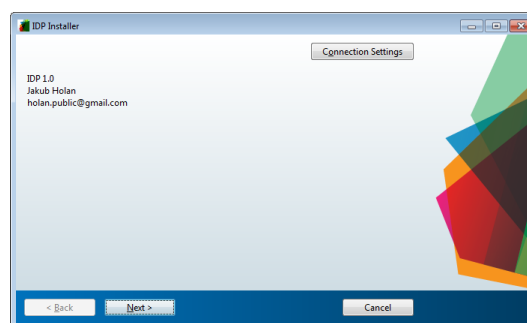
Tento způsob instalace autor práce doporučuje, a to z toho důvodu, že je rychlejší a jednodušší, než způsob druhý.

Na CD-ROMu, který k této práci je přiložen, je umístěn soubor MyAppInstaller_web. Při spuštění tohoto souboru je otevřen instalátor, viz obr. B.1. Po jeho načtení jsou zobrazeny informace o instalovaném programu, viz obr. B.2. V kroku na obr. B.3 je možné zvolit instalační složku programu IDP 1.0, a v kroku na obr. B.4 je možné zvolit instalační složku kompilátoru. V dalším kroku, viz obr. B.5, je nutné potvrdit souhlas s licenčním ujednáním. V kroku na obr. B.6 jsou shrnuty informace o instalaci a po stlačení tlačítka Install je spuštěna instalace. Po úspěšném stažení kompilátoru (obr. B.7) a instalaci (obr. B.8) je zobrazeno hlášení o úspěšném dokončení instalace (obr. B.9).

Po dokončení instalace je možné spustit program otevřením souboru IDP.exe. Tento soubor je umístěn na CD-ROMu, který je k této práci přiložen. Soubor IDP.exe byl rovněž během instalace kompilátoru nainstalován do složky zvolené v kroku na obr. B.4 – zde v podsložce application je možné program nalézt, viz obr. B.10.

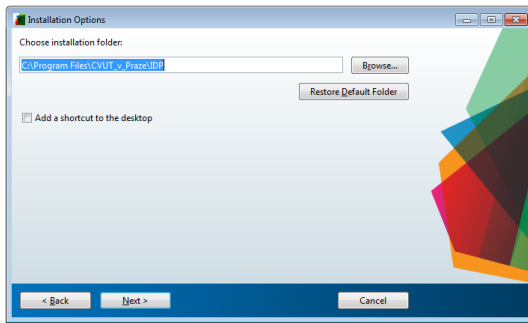


Obr. B.1: Instalace 0

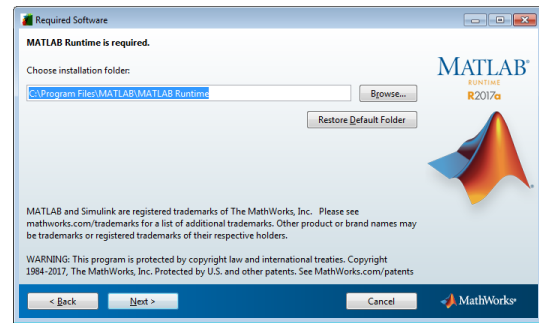


Obr. B.2: Instalace 1

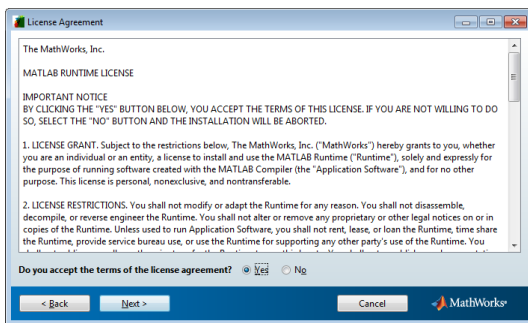
*MATLAB. Ver. 9.2.0.538062 (R2017a). USA: The MathWorks, 2017.



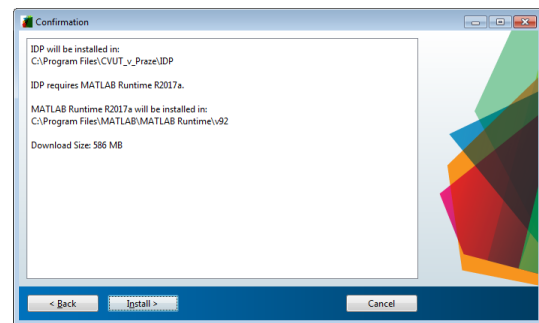
Obr. B.3: Instalace 2



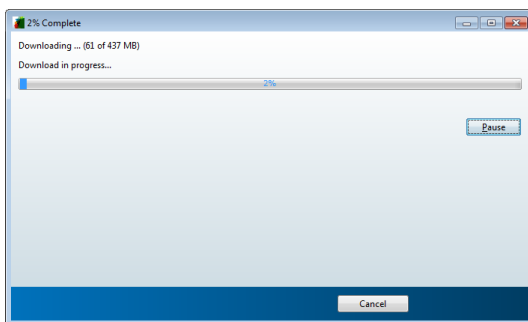
Obr. B.4: Instalace 3



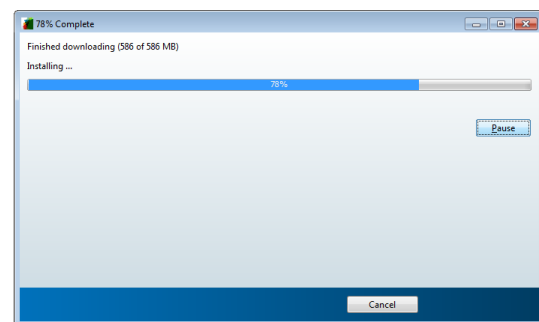
Obr. B.5: Instalace 4



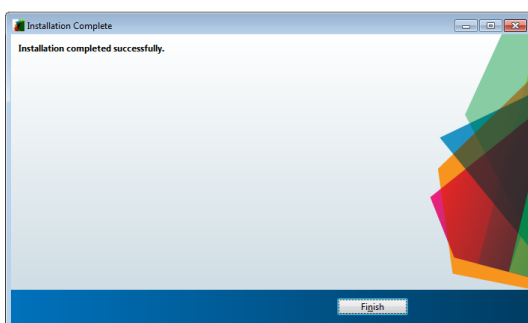
Obr. B.6: Instalace 5



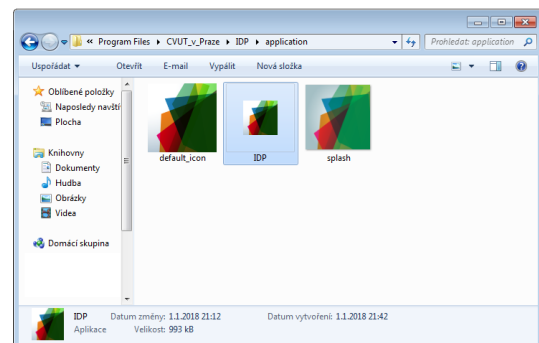
Obr. B.7: Instalace 6



Obr. B.8: Instalace 7



Obr. B.9: Instalace 8



Obr. B.10: Instalace 9

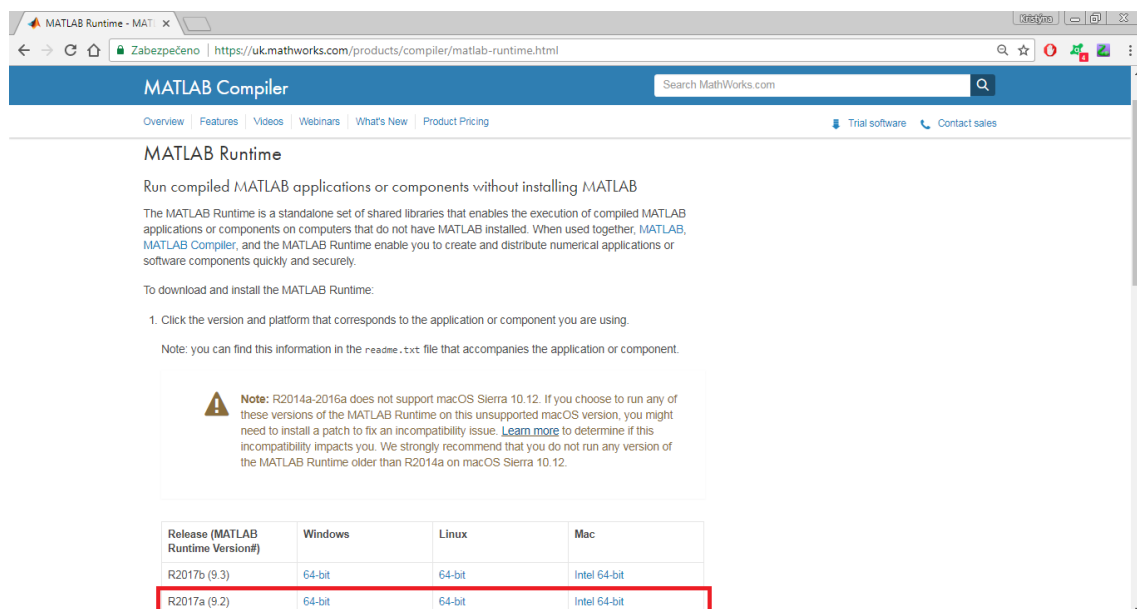
B.1.1.2 Způsob 2 - Instalátor stažený z webových stránek

Toto je alternativní způsob instalace.

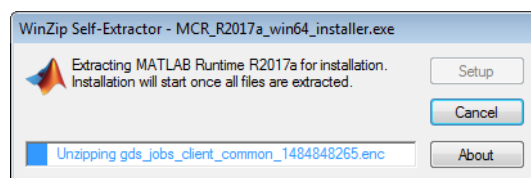
Kompilátor* lze rovněž stáhnout z webových stránek společnosti MathWorks <<https://www.mathworks.com/products/compiler/matlab-runtime.html>>. Na těchto stránkách vyberte kompilátor verze „R2017a (9.2)“ pro odpovídající operační systém, viz obr. B.11. Po dokončení stahování soubor otevřete.

Po spuštění staženého souboru dojde k extrahování instalačních souborů (obr. B.12) a po dokončení extrahování se otevře úvodní okno instalace (obr. B.13). V dalším kroku (obr. B.14) je nutné potvrdit souhlas s licenčním ujednáním. V dalším kroku (obr. B.15) lze zvolit instalační složku kompilátoru. Následně jsou shrnuty informace o instalaci (obr. B.16) a po stlačení tlačítka **Install** je spuštěna instalace. Po úspěšné instalaci (obr. B.17) je zobrazeno hlášení o úspěšném dokončení instalace (obr. B.18).

Po dokončení instalace kompilátoru je možné spustit program otevřením souboru `IDP.exe`. Tento program je umístěn na CD-ROMu, který je k této práci přiložen.

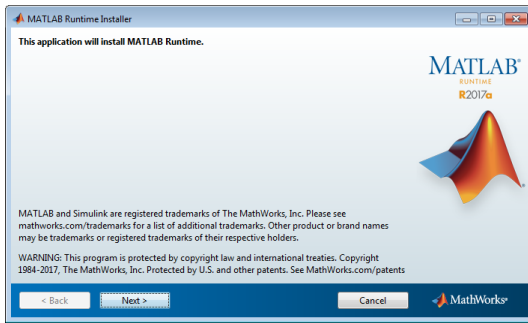


Obr. B.11: Stažení

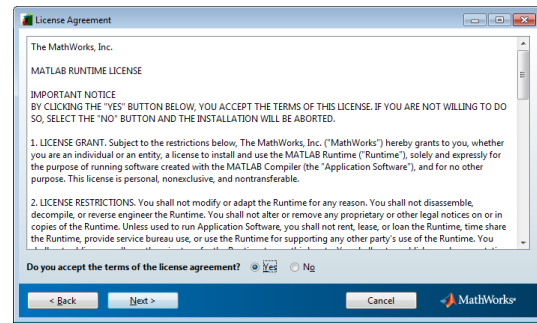


Obr. B.12: Instalace 0

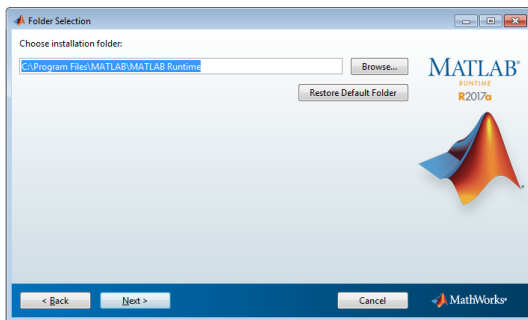
*Kompilátor obsahuje knihovny MATLAB.



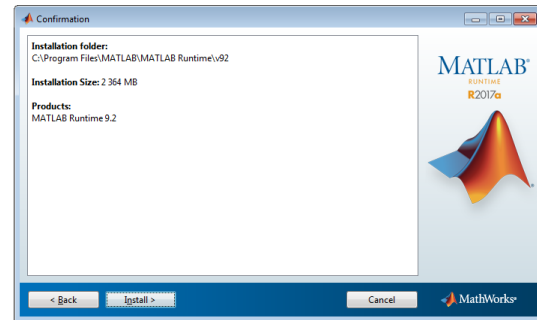
Obr. B.13: Instalace 1



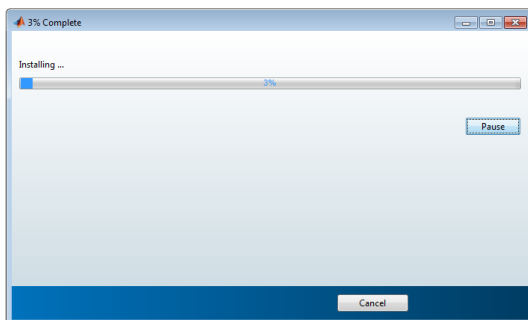
Obr. B.14: Instalace 2



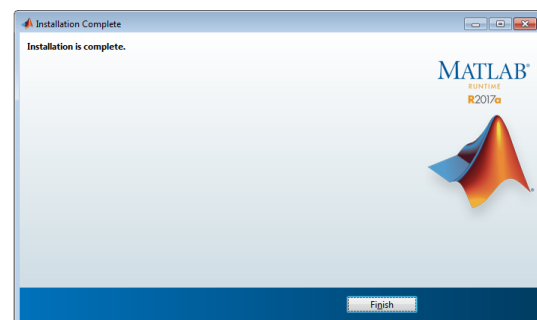
Obr. B.15: Instalace 3



Obr. B.16: Instalace 4



Obr. B.17: Instalace 5



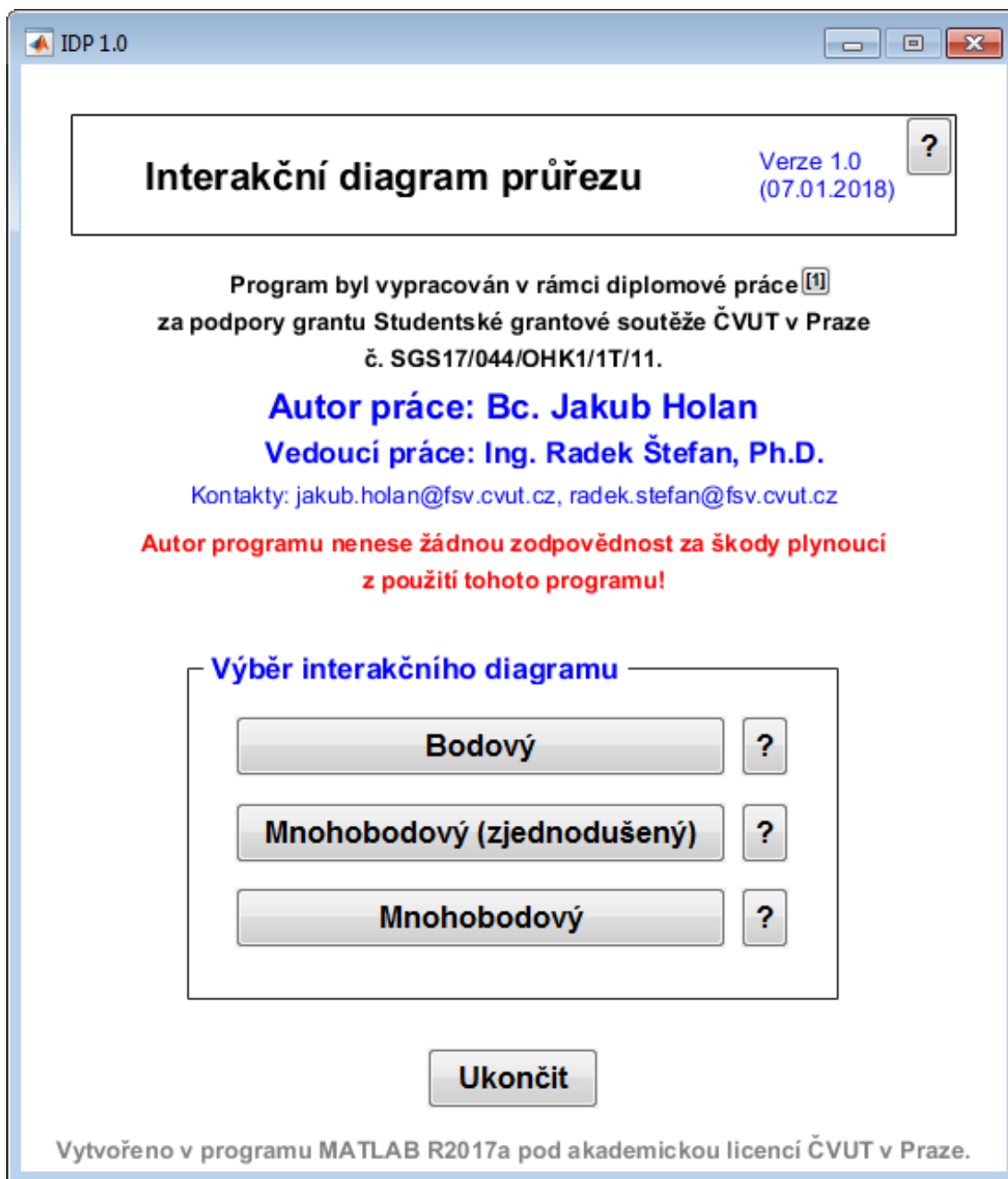
Obr. B.18: Instalace 6

B.1.2 Uživatel programu má nainstalované prostředí MATLAB R2017a

Program IDP 1.0 při výpočtu využívá knihovny prostředí MATLAB. Tyto knihovny jsou součástí programu MATLAB R2017a. V případě, že uživatel má toto prostředí nainstalované, není třeba činit další kroky před spuštěním programu „IDP 1.0“. Program je možné spustit otevřením souboru IDP . exe. Tento soubor je umístěn na CD-ROMu, který je k této práci přiložen.

B.2 Spuštění programu a výběr typu interakčního diagramu

Program „IDP 1.0“ se spustí otevřením souboru IDP.exe, umístěného na CD-ROMu. Po otevření souboru se objeví obrazovka načítání (obr. B.20), která po několika sekundách zmizí a objeví se úvodní okno programu IDP, viz obr. B.19.

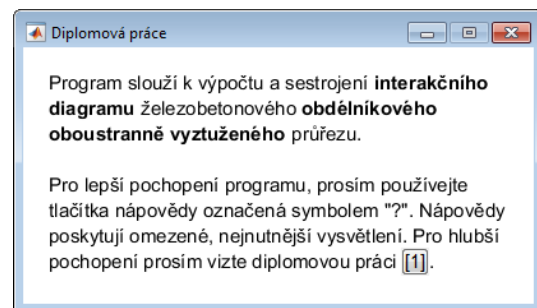


Obr. B.19: Úvodní obrazovka

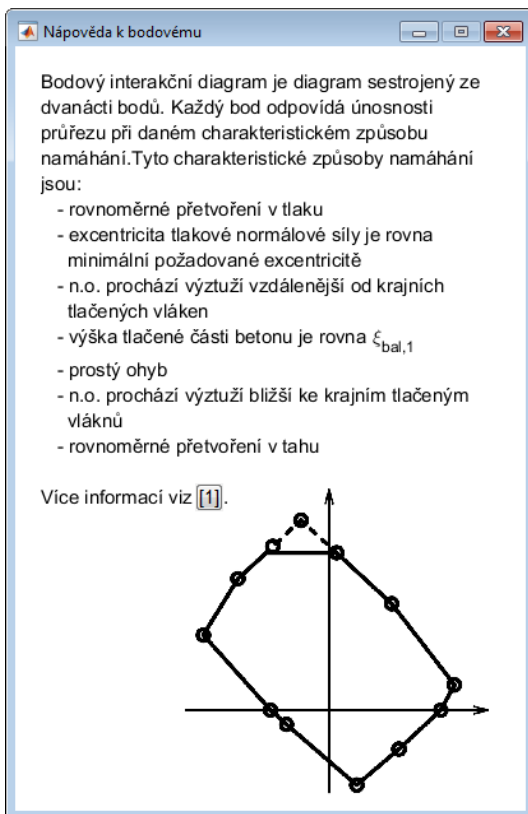
Úvodní okno obsahuje informace o programu, autorech a kontakty. Popis programu je uveden v nápovědě k programu, viz obr. B.21. V úvodním okně uživatel stisknutím příslušného tlačítka zvolí, jaký typ interakčního diagramu chce použít. Informace o jednotlivých typech interakčních diagramů jsou uvedeny v nápovědách. Okno nápovědy k bodovému interakčnímu diagramu je zobrazeno na obr. B.22, a k mnohobodovému interakčnímu diagramu na obr. B.23. Nápověda k mnohobodovému zjednodušenému je velmi podobná mnohobodovému (nezjednodušenému) interakčnímu diagramu.



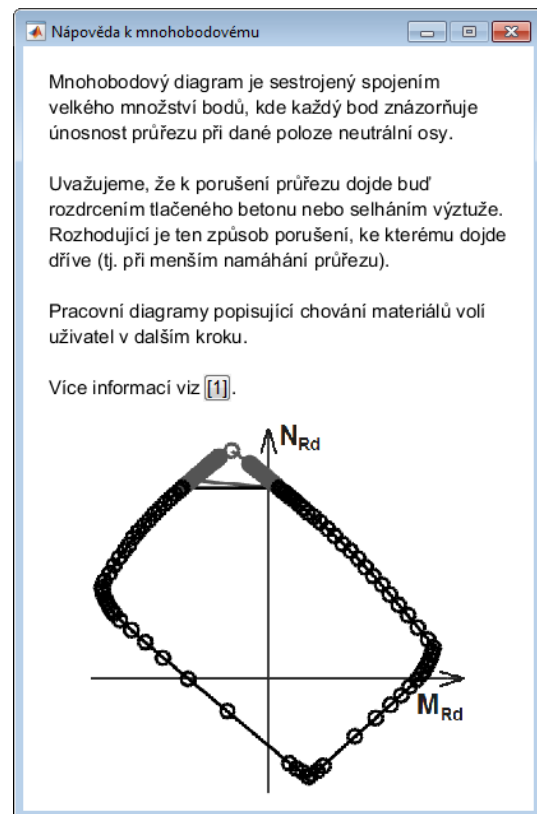
Obr. B.20: Obrazovka načítání



Obr. B.21: Nápověda k programu



Obr. B.22: Nápověda k bodovému interakčnímu diagramu

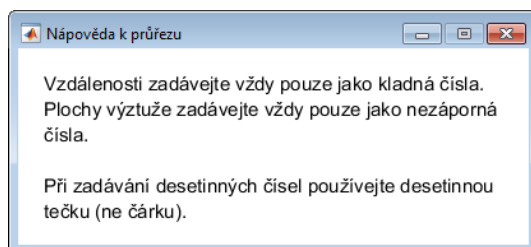


Obr. B.23: Nápověda k mnohobodovému interakčnímu diagramu

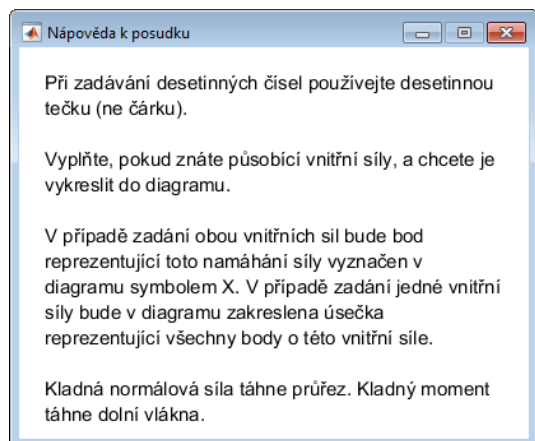
B.3 Bodový interakční diagram

Bodovému interakčnímu diagramu se velmi rozsáhle věnuje kapitola 2.1 této práce, a proto již popis tohoto typu interakčního diagramu, jeho výpočtu ani sestavení nebude v této kapitole znovu opakován. Tato kapitola se bude věnovat pouze popisu a ovládání oken podprogramu.

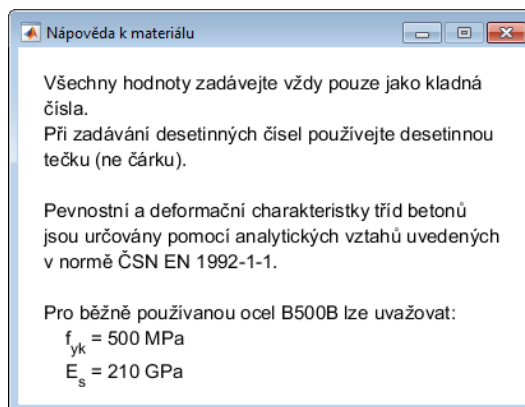
Po otevření okna tohoto podprogramu stisknutím příslušného tlačítka v předchozím kroku (obr. B.19) se objeví okno pro zadání vstupních hodnot, viz obr. B.27. Ovládání a zadávání je velmi intuitivní. Do žlutých políček se zadávají parametry průřezů, charakteristiky materiálů a případně působící vnitřní síly (slouží pro posouzení návrhu, známe-li působící vnitřní síly; není nutné zadávat). Materiálové vlastnosti betonu se nezadávají, pouze se volí třída pevnosti betonu. Ke každé části zadávání vstupů je vytvořena nápověda poskytující dodatečné vysvětlení a informuje o případných omezeních pro zadávané hodnoty. Okna nápověd jsou zobrazena na obr. B.24 až obr. B.26.



Obr. B.24: Nápověda k průřezu



Obr. B.25: Nápověda k posudku

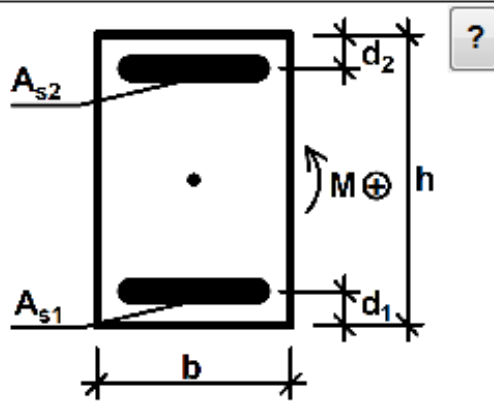


Obr. B.26: Nápověda k materiálům

Nástroj pro sestavení bodového interakčního diagramu
Vyplňte všechna žlutá políčka a stiskněte "Výpočet".

Charakteristiky průřezu

$b =$ mm
 $h =$ mm
 $d_1 =$ mm
 $d_2 =$ mm
 $A_{s1} =$ mm²
 $A_{s2} =$ mm²



Materiály

Třída betonu:

Vlastnosti oceli

$f_{yk} =$ MPa

$E_s =$ GPa

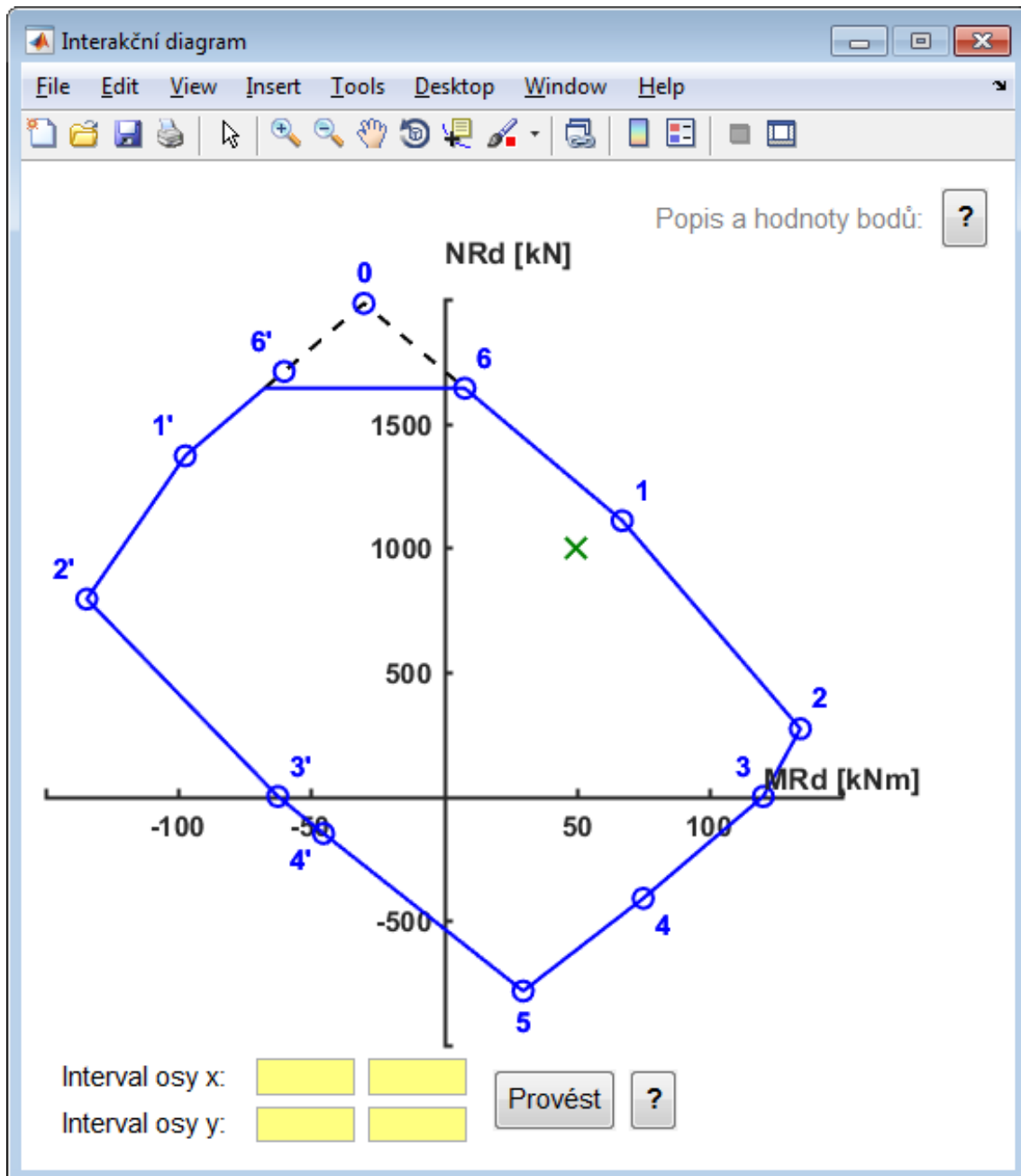
Posudek

$N_{Ed} =$ kN

$M_{Ed} =$ kNm

Obr. B.27: Bodový interakční diagram – zadání vstupních hodnot

Stisknutím tlačítka Výpočet je spuštěna kontrola zadaných vstupních dat. Pokud byl některý vstup zadán neplatně (tj. nebylo dodrženo omezení uvedené v nápovědě), barva příslušného pole se změní na červenou a výpočet interakčního diagramu není proveden. V případě, že jsou všechny vstupy zadány platně, je proveden výpočet a objeví se nové okno s vykresleným interakčním diagramem, viz obr. B.28.



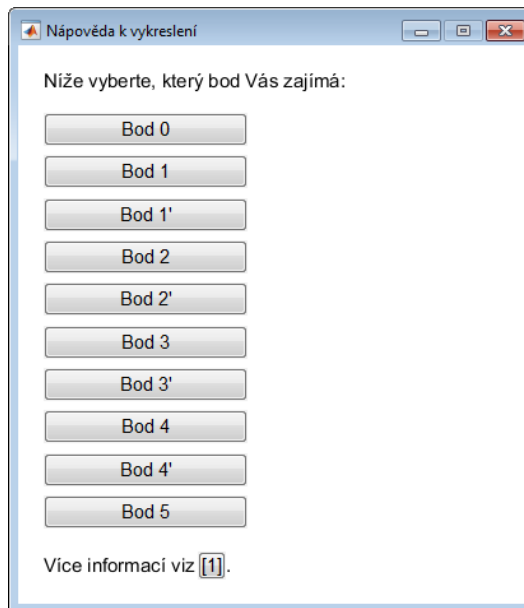
Obr. B.28: Bodový interakční diagram – vykreslení

Intervaly vykreslených os grafu interakčního diagramu jsou automaticky nastaveny tak, aby byl vykreslen celý interakční diagram. Uživatel programu má však možnost změnit tyto intervaly zadáním libovolných číselných hodnot do žlutých polí pod vykresleným grafem a následným stisknutím tlačítka **Provést**. I v tomto případě je prováděna kontrola zadaných vstupních dat. V případě, že je pole ponecháno prázdné, je za hodnotu dosazena původní automaticky zvolená hodnota.

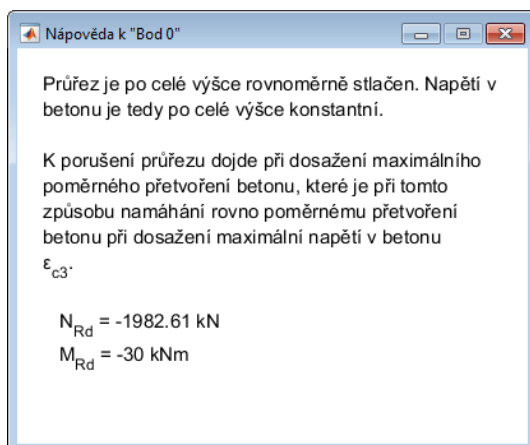
Symbol křížku na obr. B.28 označuje bod vyjadřující namáhání vnitřními silami zadanými v předchozím kroku (obr. B.27) do polí pro posudek. Zelená barva značí, že bod leží uvnitř interakčního diagramu, a namáhání tudíž návrhu vyhovuje. Poloha bodu (tj. zda leží uvnitř, či vně diagramu) je posuzována vždy při stisknutí tlačítka **Výpočet**, a je vždy porovnávána

s interakčním diagramem průřezu, jehož parametry jsou právě zadány v okně pro vstupy. Tedy, je-li vykresleno více interakčních diagramů, poloha bodu je zkoumána jen pokud je tento bod právě vykreslován, a je porovnávána jen s tím diagramem, který je právě vykreslován.

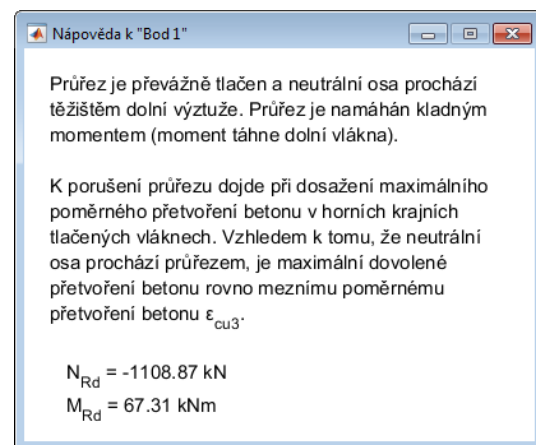
Nápověda v pravém horním rohu poskytuje informace o vyznačených bodech interakčního diagramu, tj. jaký způsob namáhání reprezentují a jaká je únosnost při tomto způsobu namáhání, viz obr. B.29, obr. B.30 a obr. B.31. V případě, že je vykresleno více interakčních diagramů, platí hodnoty únosností zobrazené v nápovědě pro poslední vykreslený interakční diagram.



Obr. B.29: Nápověda k bodům intrakčního diagramu



Obr. B.30: Nápověda k bodu 0



Obr. B.31: Nápověda k bodu 1

Lišta nad grafem interakčního diagramu (viz obr. B.28) umožňuje uživateli graf upravovat a případně uložit (ve formátu png, pdf a další).

B.4 Mnohobodový (zjednodušený) interakční diagram

Mnohobodovému (zjednodušenému) interakčnímu diagramu se rozsáhle věnuje kapitola 2.2 této práce, a proto již popis tohoto typu interakčního diagramu nebude v této kapitole opakován. Kapitola se bude věnovat pouze popisu a ovládání oken podprogramu.

Tento podprogram je velmi podobný podprogramu pro sestavení bodového interakčního diagramu (kapitola B.3), a proto bude popis tohoto podprogramu značně zestručněn – budou popsány zejména odlišnosti tohoto podprogramu od předchozího podprogramu. Z toho důvodu autor důrazně doporučuje nejprve prostudovat kapitola B.3.

Po otevření okna tohoto podprogramu stisknutím příslušného tlačítka v předchozím kroku (obr. B.19) se objeví okno pro zadání vstupních hodnot, viz obr. B.32.

Nástroj pro sestavení zjednodušeného mnohobodového interakčního diagramu

Vyplněte všechna žlutá políčka a stiskněte "Výpočet".

Charakteristiky průřezu

$b = 200$ mm
 $h = 300$ mm
 $d_1 = 35$ mm
 $d_2 = 35$ mm
 $A_{s1} = 1200$ mm²
 $A_{s2} = 600$ mm²

Materiály

Třída betonu: C30/37
 Vlastnosti oceli: $f_{yk} = 500$ MPa, $E_s = 210$ GPa

Posudek

$N_{Ed} =$ kN
 $M_{Ed} =$ kNm

Nastavení výpočtu

Krok neutrální osy: 10 mm

Barva diagramu

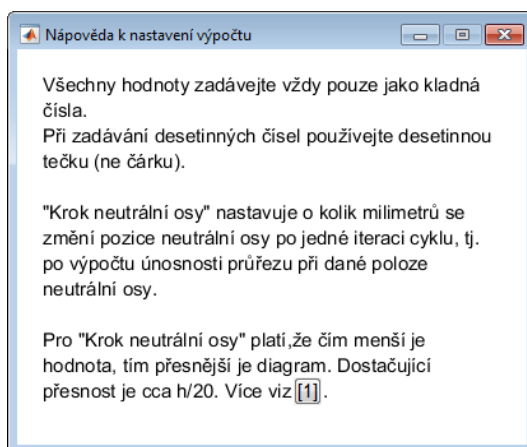
modrá

Zpět Výpočet

Obr. B.32: Mnohobodový (zjednodušený) interakční diagram – zadání vstupních hodnot

Okno pro zadání vstupů (obr. B.32) je velmi podobné oknu pro zadání vstupů v případě bodového interakčního diagramu (obr. B.27), a platí pro něj tedy všechny informace uvedené pro okno na obr. B.27 v předchozí kapitole B.3.

V části nastavení výpočtu je možné nastavit hodnotu „krok neutrální osy“. Tato hodnota ovlivňuje počet bodů, ze kterých je interakční diagram sestaven. Platí, že čím menší je hodnota, tím větší je počet bodů, a tím přesnější interakční diagram je. Počet bodů rovněž ovlivňuje rychlost výpočtu, a proto autor doporučuje volit tuto hodnotu v mezích od $h/100$ do $h/10$. Návod k nastavení výpočtu je zobrazen na obr. B.33

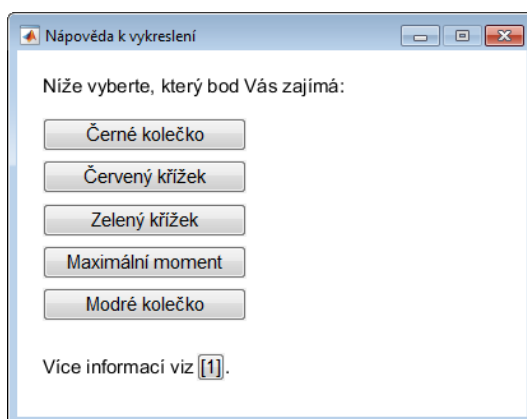


Obr. B.33: Návod k nastavení výpočtu

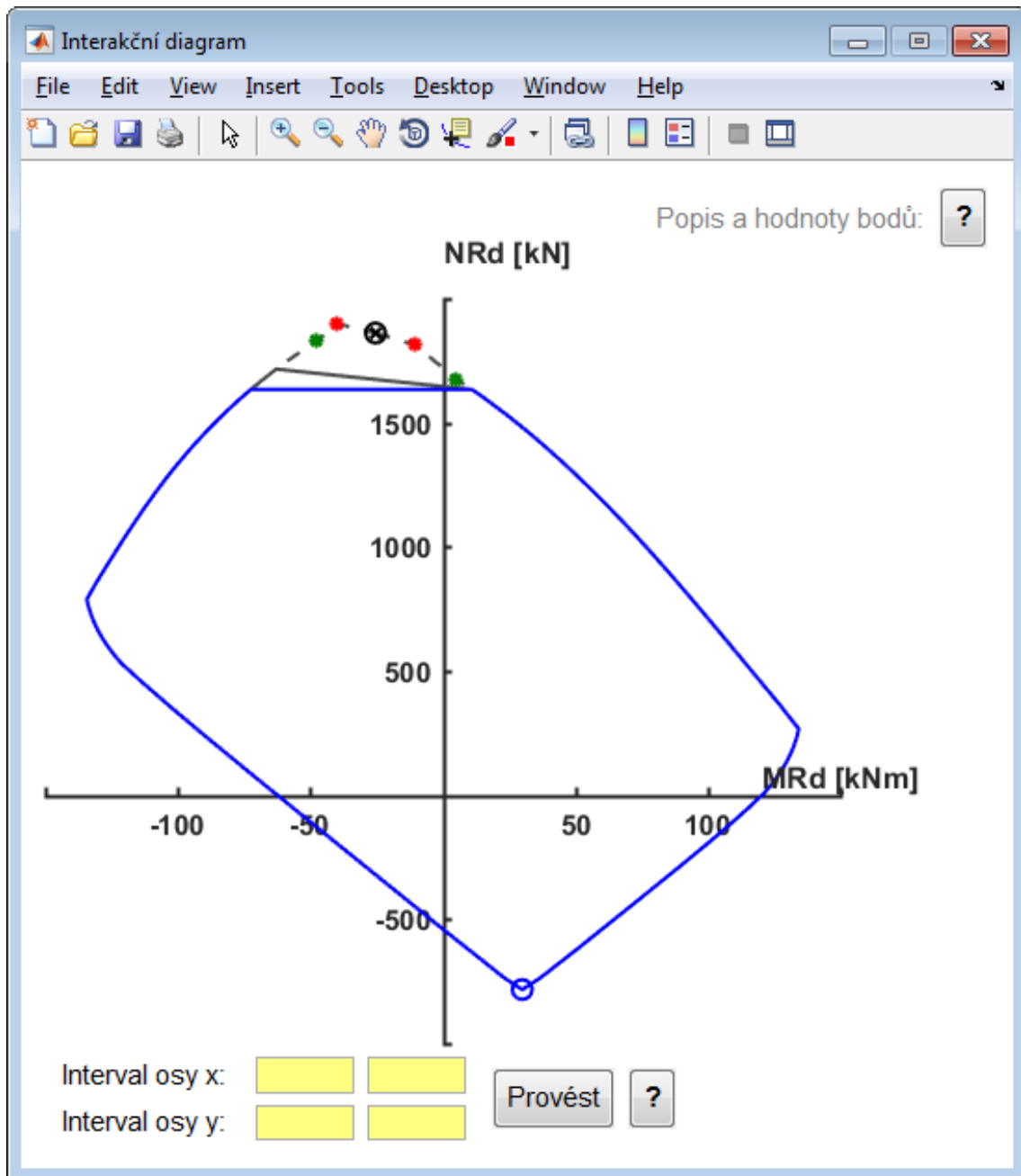
Stejně jako předchozí podprogram (kapitola B.3), provádí i tento podprogram kontrolu zadaných vstupních dat po stisknutí tlačítka Výpočet, a pokud jsou všechny vstupy zadány platně, je proveden výpočet a objeví se nové okno s vykresleným interakčním diagramem, viz obr. B.35.

Intervaly vykreslených os grafu interakčního diagramu jsou opět automaticky nastaveny tak, aby byl vykreslen celý interakční diagram. Uživatel programu má opět možnost tyto intervaly změnit zadáním číselných hodnot do žlutých polí pod vykresleným grafem.

Na vykresleném interakčním diagramu jsou vyznačeny jiné významné body, než na interakčním diagramu dle předchozího podprogramu (obr. B.28). Z toho důvodu je nápověda k vykreslenému grafu patřičně upravena, viz obr. B.29. Významné body jsou důkladně popsány v kapitole 2.2.6.2 a 2.3.8.3 této práce.



Obr. B.34: Návod k významným bodům interakčního diagramu



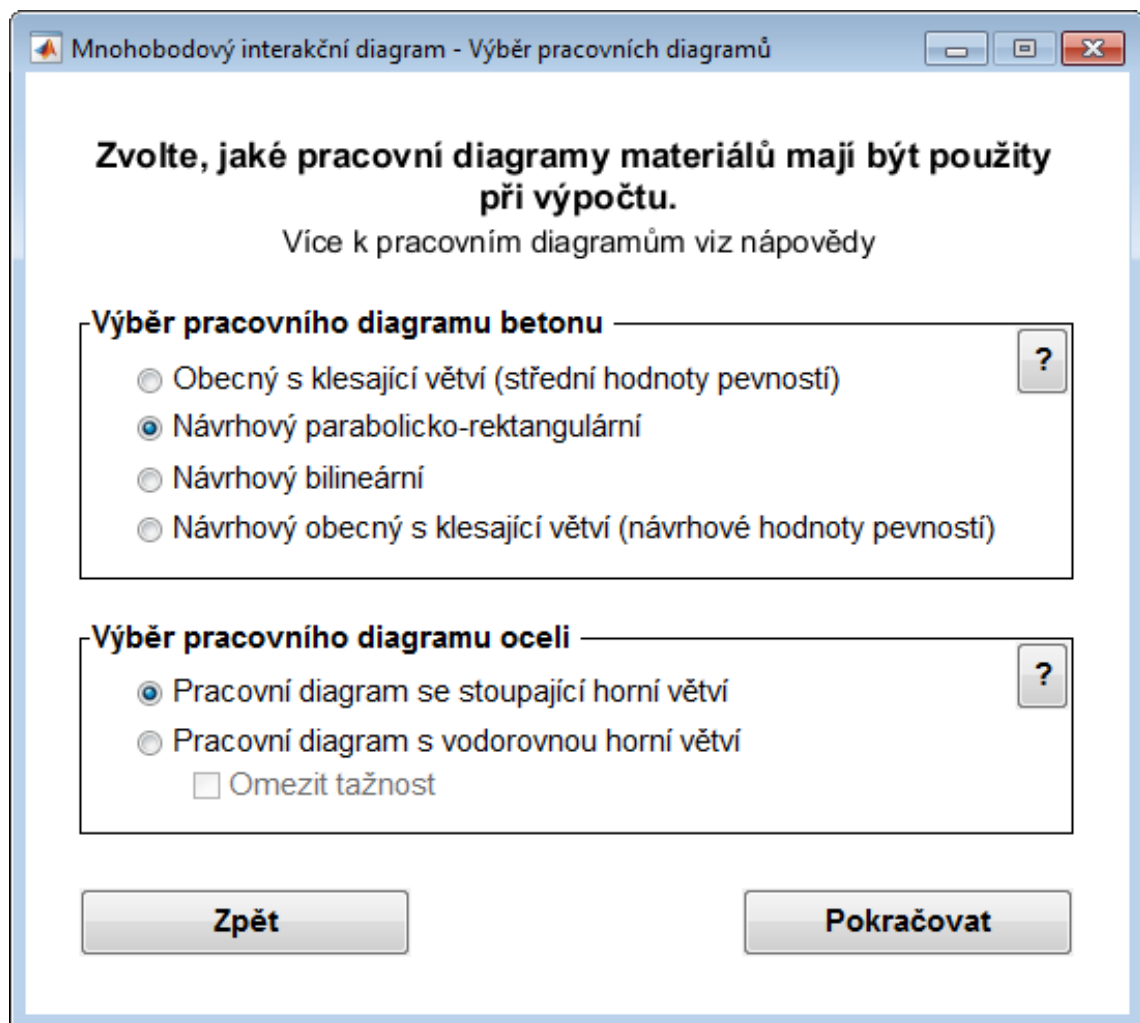
Obr. B.35: Mnohobodový (zjednodušený) interakční diagram – vykreslení

B.5 Mnohobodový interakční diagram

Mnohobodovému interakčnímu diagramu se velmi rozsáhle věnuje kapitola 2.3 této práce, a proto již v této kapitole nebude opakován popis tohoto diagramu, ani postup výpočtu a sestrojení. Tato kapitola se bude věnovat pouze popisu a ovládání oken podprogramu.

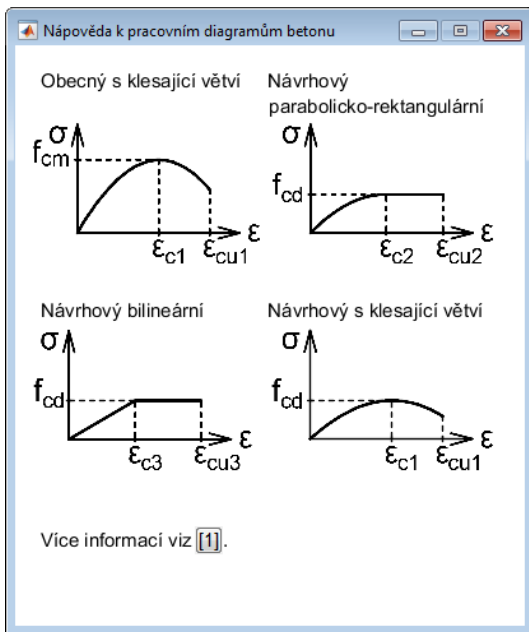
Tento podprogram je velmi podobný podprogramu pro sestrojení bodového interakčního diagramu (kapitola B.3) a podprogramu pro sestrojení mnohobodového (zjednodušeného) interakčního diagramu (kapitola B.4). Popis tohoto podprogramu je tedy značně zestručněn – jsou zde popsány zejména odlišnosti od dvou dříve popsaných podprogramů. Z toho důvodu autor důrazně doporučuje nejprve prostudovat kapitoly B.3 a B.4.

Po otevření okna tohoto podprogramu stisknutím příslušného tlačítka v předchozím kroku (obr. B.19) se objeví okno pro výběr pracovních diagramů materiálů, viz obr. B.36. Uživatel volí pracovní diagramy označením příslušného přepínače (anglicky *radio button*) – vždy lze vybrat pouze jeden pracovní diagram betonu a jeden pracovní diagram oceli. V případě výběru pracovního diagramu oceli s vodorovnou horní větví má uživatel možnost zvolit, zda má být omezena tažnost oceli, či nikoliv.

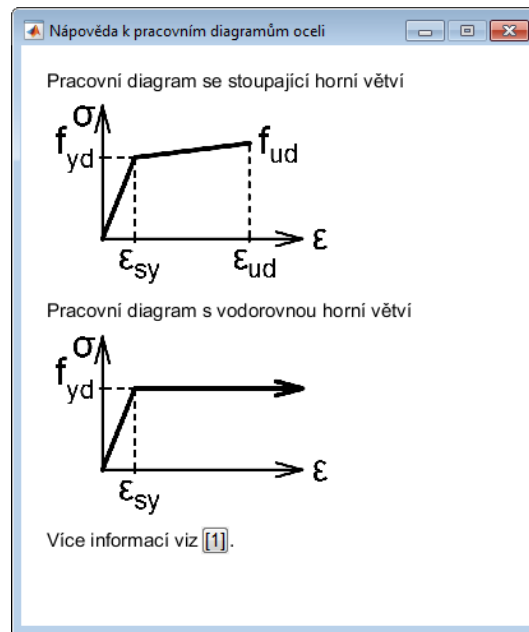


Obr. B.36: Výběr pracovních diagramů

K pracovním diagramům materiálů jsou opět poskytnuty nápovědy, viz obr. B.37 a obr. B.38.



Obr. B.37: Nápověda k pracovním diagramům betonu



Obr. B.38: Nápověda k pracovním diagramům oceli

Po výběru pracovních diagramů a stisknutí tlačítka Pokračovat je zobrazeno okno pro zadávání vstupních parametrů výpočtu, viz obr. B.41. Volba pracovního diagramu oceli má vliv na vzhled tohoto okna podprogramu, viz obr. B.39 a obr. B.40.

Obr. B.39: Zadávání materiálů při pracovním diagramu oceli s vodorovnou horní větví

Obr. B.40: Zadávání materiálů při pracovním diagramu oceli se stoupající horní větví

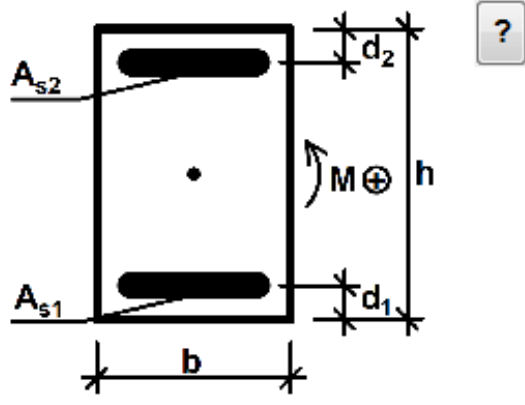
Mnohobodový interakční diagram - Vstupy

Nástroj pro sestavení mnohobodového interakčního diagramu

Vyplňte všechna žlutá políčka a stiskněte "Výpočet".

Charakteristiky průřezu

$b = 200$ mm
 $h = 300$ mm
 $d_1 = 35$ mm
 $d_2 = 35$ mm
 $A_{s1} = 1200$ mm²
 $A_{s2} = 600$ mm²



Materiály

Třída betonu: C30/37

Vlastnosti oceli

$f_{yk} = 500$ MPa
 $f_{uk} = 550$ MPa
 $E_s = 210$ GPa
 $\varepsilon_{uk} = 0.05$

Posudek

$N_{Ed} =$ kN
 $M_{Ed} =$ kNm

Nastavení výpočtu

Krok neutrální osy: 10 mm
 Tloušťka vrstvy betonu: 10 mm

Diagram

Barva: modrá

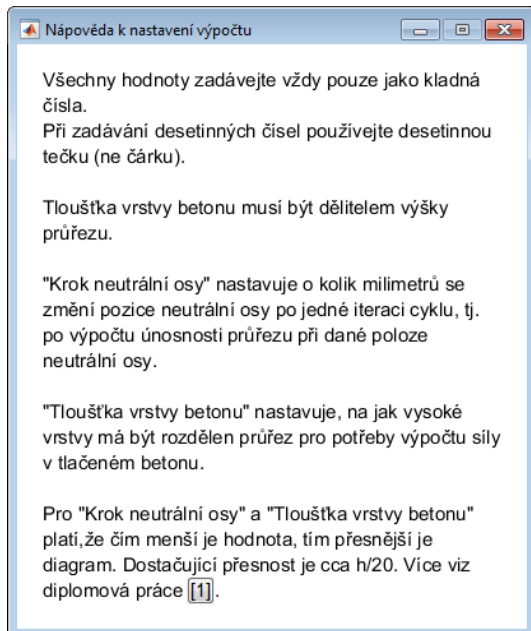
Významné body:

Zpět Výpočet

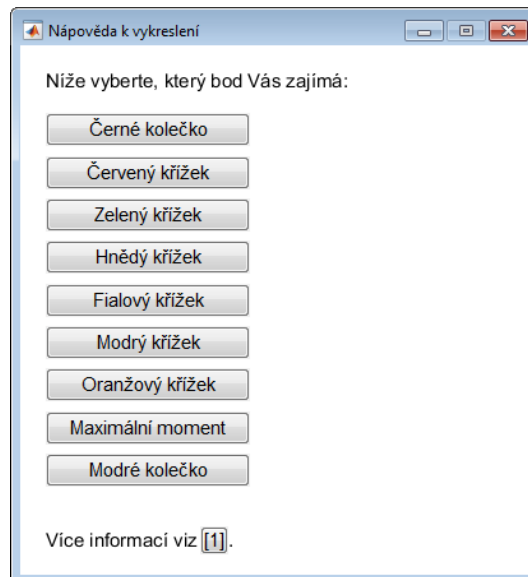
Obr. B.41: Mnohobodový interakční diagram – zadání vstupních hodnot, v předchozím kroku zvolen pracovní diagram oceli se stoupající větví

Okno pro zadání vstupů (obr. B.41) je opět velmi podobné oknu pro zadání vstupů v případě dříve popsaných podprogramů (obr. B.27 a obr. B.32). Pro okno vstupních hodnot tohoto podprogramu tedy platí všechny informace uvedené pro okna v předchozích kapitolách (B.3 a B.4).

V části nastavení výpočtu se nově objevuje proměnná „tloušťka vrstvy betonu“. Tato hodnota ovlivňuje jak přesně bude vypočítána síla v tlačené části betonu. Platí, že čím větší je hodnota, tím přesnější je výpočet, a tím přesnější je interakční diagram. Počet bodů rovněž ovlivňuje rychlost výpočtu, a proto autor doporučuje volit tuto hodnotu v mezích od $h/50$ do $h/10$. Zvolená hodnota tloušťky vrstvy betonu musí být dělitelem výšky průřezu. Náповěda k nastavení výpočtu je zobrazena na obr. B.32



Obr. B.42: Náповěda k nastavení výpočtu

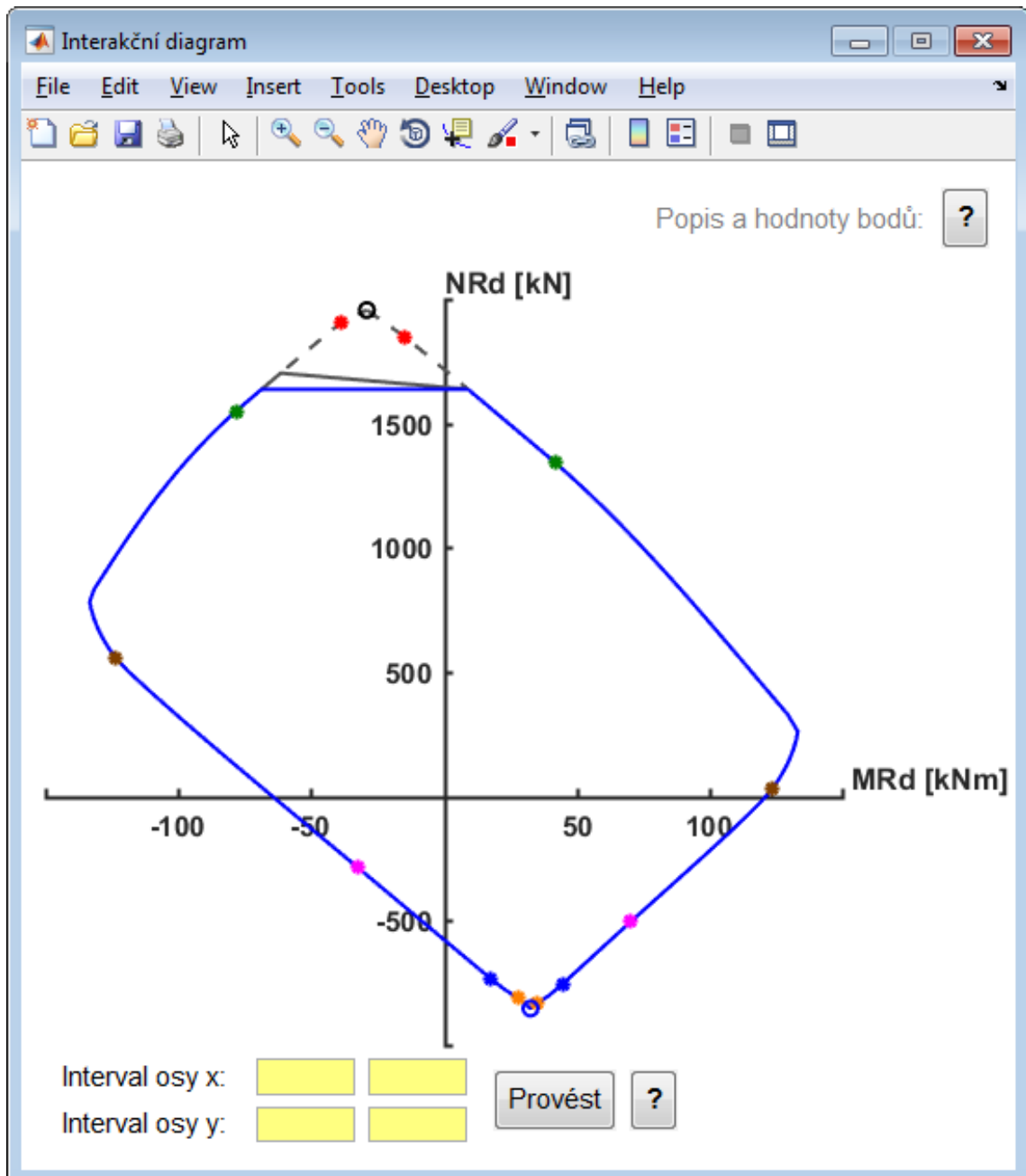


Obr. B.43: Náповěda k významným bodům interakčního diagramu

Stejně jako předchozí podprogramy i tento podprogram provádí kontrolu zadaných vstupních dat po stisknutí tlačítka Výpočet, a pokud jsou všechny vstupy zadány platně, výpočet je proveden a objeví se nové okno s vykresleným interakčním diagramem, viz obr. B.44.

Intervaly vykreslených os grafu interakčního diagramu jsou opět automaticky nastaveny tak, aby byl vykreslen celý interakční diagram. Uživatel programu má opět možnost tyto intervaly změnit zadáním číselných hodnot do žlutých polí pod vykresleným grafem.

Na vykresleném interakčním diagramu jsou vyznačeny jiné významné body, než na interakčních diagramech dle dříve popsaných podprogramů. Z toho důvodu je náповěda k vykreslenému grafu patřičně upravena, viz obr. B.43. Významné body jsou důkladně popsány v kapitole 2.3.8.3 této práce.



Obr. B.44: Mnohobodový interakční diagram – vykreslení

B.6 Další obecné informace k programu

Na [obr. B.27](#), [obr. B.32](#) a [obr. B.41](#) jsou zobrazena okna pro zadání vstupů. Z těchto oken se lze pomocí tlačítka Zpět vrátet na hlavní okno programu ([obr. B.19](#)).

Při návratu zpět na hlavní okno programu jsou hodnoty zadané v polích pro vstupní hodnoty uloženy. V případě, že uživatel opětovně otevře okno pro zadání vstupních hodnot stejného podprogramu, dříve uložené hodnoty se objeví v patřičných polích. V případě, že uživatel otevře okno pro zadávání vstupních hodnot jiného podprogramu, dříve uložené hodnoty budou smazány a všechna pole budou nyní prázdná.

Okno s vykresleným interakčním diagramem není zavřeno v případě vykreslení nového interakčního diagramu. Okno není zavřeno ani v případě, že uživatel stiskne tlačítko Zpět a navrátí se na hlavní okno programu [obr. B.19](#). To umožňuje vykreslovat více interakčních diagramů (vypočítaných dle různých postupů) do stejného grafu. Toho lze využít jak k porovnání interakčních diagramů různých průřezů vypočítaných dle stejného postupu, tak k porovnání interakčních diagramů stejného průřezu vypočítaných dle různých postupů.

B.7 Systémové informace

Program IDP 1.0 byl vytvořen a odzkoušen v programovacím prostředí MATLAB R2015b (Ver. 8.6.0.267246) a MATLAB R2017a (Ver. 9.2.0.538062). Program byl vytvořen na operačním systému Windows 7 Ultimate 64bit na zařízení Lenovo G780. Poslední odzkoušení proběhlo dne 7. ledna 2018.

Program byl dále odzkoušen 7. ledna 2018 na operačním systému Windows 7 Home Premium 64bit na zařízení Sony Vaio PGM-71811M. Na tomto zařízení byla nainstalována knihovna MATLAB Runtime 2017a (v92).

Finální verze programu byla zkompileována na operačním systému Windows 7 Ultimate 64bit na zařízení Lenovo G780 v prostředí MATLAB R2017a (Ver. 9.2.0.538062).

