

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



Tvorba výpočetní aplikace pro návrh předpjatého betonového vazníku

Development of Computer Application for Design of Prestressed Concrete Girder

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Vedoucí práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D.

Zpracovala: Veronika Litošová

Praha 2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Litošová Jméno: Veronika Osobní číslo: 477393

Zadávací katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Tvorba výpočetní aplikace pro návrh předpjatého betonového vazníku

Název bakalářské práce anglicky: Development of Computer Application for Design of Prestressed Concrete Girder

Pokyny pro vypracování:

Popis postupu pro tvorbu návrh předpjatého betonového vazníku.

Algoritmizace problému.

Implementace algoritmu v prostředí Python.

Tvorba uživatelského rozhraní pro vytvořenou aplikaci.

Popis aplikace.

Příklady využití aplikace.

Shrnutí a závěr.

Seznam doporučené literatury:

Normy: ČSN EN 1990, ČSN EN 1991-1-1, ČSN EN 1992-1-1

Procházka, J., a kol. Navrhování železobetonových konstrukcí. Příklady a postupy.

Procházka, J., a kol. Navrhování betonových konstrukcí 1. Prvky z prostého a železového betonu.

Foglar, M. Betonové konstrukce 3 - Navrhování betonových konstrukcí na MSP.

Benko V., Bilčík J., Fillo L., Halvonik J., Betonové konštrukcie, Navrhovanie podľa STN EN 1992-1-1.

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

Datum zadání bakalářské práce: 17.02.2021 Termín odevzdání bakalářské práce: 16.05.2021

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 bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské 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“.

17.02.2021

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně pod odborným dohledem vedoucího bakalářské práce a použité informační zdroje uvedla v souladu s Metodickým pokynem č. 1/2009 O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 16. 5. 2021

Veronika Litošová

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu práce Ing. Radku Štefanovi, Ph.D., za ujetí se tohoto postu, navedení mne na správnou cestu a za dohled na zdárné dokončení bakalářské práce. Též mé rodině, která strpěla období intenzivní tvorby.

Abstrakt

Předmětem mé bakalářské práce je vytvoření výpočetní aplikace, jakožto nástroje pro návrh předem předpjatého betonového vazníku a jeho následné posouzení.

Výpočetní aplikace urychluje proces návrhu a umožňuje v relativně krátkém čase sledovat dopad změn vstupních údajů na celkový návrh (např. poměr druhů ztrát předpětí) a splnění podmínek mezních stavů. Samotný výpočet probíhající na pozadí výpočetní aplikace je podrobně popsán pro jeho přiblížení a seznámení s problematikou.

Výpočetní aplikace je volně k dispozici na internetu.

Klíčová slova: *betonové konstrukce, návrh předpětí, předpjatý beton, vazník, výpočetní aplikace, ztráty předpětí*

Abstract

The objective of the bachelor thesis is the development of a computer application as a tool for design of prestressed concrete girder and its subsequent analysis.

The computer application provides faster design and allows to observe the impact of input data changes on the overall design (e.g. the ratio of prestress losses) and the compliance of the limit state conditions in a relatively short time. The calculation procedure implemented in the application is described in detail.

The computer application is freely available on the Internet.

Keywords: *concrete structures, prestressed concrete design, prestressed concrete, girder, computer application, prestress losses*

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek	11
1 Úvod	14
1.1 Představení	14
1.2 Motivace	14
1.3 Cíl	14
2 Návrh předpětí	15
2.1 Princip	15
2.2 Metody návrhu předpětí	15
2.2.1 Metoda vyrovnání napětí	15
2.2.2 Metoda vyrovnání zatížení	16
3 Stupeň předpětí	17
3.1 Využití a návrh	17
3.2 Plné předpětí	17
3.3 Omezené předpětí	18
3.4 Částečné předpětí	18
4 Změny předpětí	19
4.1 Princip	19
4.2 Role v návrhu předpětí	19
4.3 Druhy změn předpětí	19
5 Návrh předpjatého betonového vazníku	20
5.1 Úvod a omezující podmínky	20
5.2 Geometrie průřezu	20
5.3 Průřezové charakteristiky	20
5.4 Materiálové charakteristiky	21
5.5 Zatížení	26
5.5.1 Kombinace zatížení MSÚ	26
5.5.2 Kombinace zatížení MSP	26
5.6 Krycí vrstva	27
5.7 Předběžná kontrola mezních stavů	30

5.7.1	MSP	30
5.7.2	MSÚ	31
5.8	Návrh předpětí	31
5.8.1	Úvod	31
5.8.2	Předpínací síla	32
5.8.3	Omezující podmínky pro okamžik vnesení předpětí	33
5.8.4	Omezující podmínky na konci životnosti	33
5.9	Ztráty předpětí	34
5.9.1	Okamžité	34
5.9.2	Dlouhodobé	35
5.10	Posouzení MSP	39
5.10.1	Úvod	39
5.10.2	Okamžik vnesení předpětí	39
5.10.3	Na konci životnosti	40
5.11	Posouzení MSÚ	41
5.11.1	Ohyb a normálová síla	41
5.11.2	Smyk	42
6	Výpočetní aplikace	44
6.1	Úvod	44
6.2	Vývoj	44
6.3	Fáze 0. Vstupní hodnoty	46
6.4	Fáze I. Vložení vstupních hodnot & k návrhu předpětí	53
6.5	Fáze II. Ke ztrátám	56
6.6	Fáze III. Výpočet ztrát & posouzení	57
6.7	Fáze IV. Finální návrh	60
7	Ověření výpočetní aplikace	62
7.1	Úvod	62
7.2	Porovnání bodů tvořící diagram	62
7.3	Porovnání výsledných diagramů	63
8	Vzorový příklad	65
8.1	Úvod	65

8.2	Vstupní hodnoty	66
8.3	Průřezové charakteristiky	66
8.3.1	Výpočet	66
8.3.2	Výpočetní aplikace	68
8.4	Materiálové charakteristiky	68
8.4.1	Materiálové charakteristiky betonu	68
8.4.2	Materiálové charakteristiky předpínací a betonářské výztuže	69
8.4.3	Materiálové charakteristiky – výpočetní aplikace	70
8.5	Zatížení	70
8.5.1	Tabulka zatížení	70
8.5.2	Kombinace zatížení MSÚ	71
8.5.3	Kombinace zatížení MSP	71
8.5.4	Zatížení – výpočetní aplikace	72
8.6	Krycí vrstva	72
8.7	Předběžná kontrola mezních stavů	73
8.7.1	MSP	73
8.7.2	MSÚ	73
8.7.3	Předběžná kontrola mezních stavů – výpočetní aplikace	74
8.8	Návrh předpětí	74
8.8.1	Parametry předpětí	74
8.8.2	Předběžné posouzení v okamžiku vnesení předpětí	75
8.8.3	Předběžné posouzení na konci životnosti	76
8.8.4	Návrh předpětí – výpočetní aplikace	77
8.9	Ztráty předpětí	77
8.9.1	Doplňující vstupní hodnoty	77
8.9.2	Okamžité	78
8.9.3	Dlouhodobé	78
8.9.4	Ztráty předpětí – výpočetní aplikace	81
8.10	Posouzení MSP	81
8.10.1	Posouzení v okamžiku vnesení předpětí	81
8.10.2	Posouzení na konci životnosti	82
8.10.3	Posouzení MSP – výpočetní aplikace	83
8.11	Posouzení MSÚ	84

8.11.1	Ohyb a normálová síla	84
8.11.2	Smyk	85
8.11.3	Posouzení MSÚ – výpočetní aplikace	86
8.12	Finální návrh – výpočetní aplikace	86
9	Závěr	88
	Seznam obrázků	89
	Seznam tabulek	91
	Reference	92

Seznam použitých symbolů a zkratk

A	plocha průřezu
A_p	průřezová plocha předpínací výztuže
b	šířka průřezu
c_{min}	minimální krycí vrstva
$c_{min,b}$	minimální krycí vrstva z hlediska soudržnosti
$c_{min,dur}$	minimální krycí vrstva z hlediska podmínek prostředí
c_{nom}	nominální krycí vrstva
d_p	průměr předpínací výztuže
d_p^h	nejkratší vzdálenost mezi předpínací výztuží a horními krajními vlákny
E_{cm}	sečnový modul pružnosti betonu
E_p	modul pružnosti předpínací výztuže
e_p	excentricita působíště předpínací síly vzhledem k těžišti betonového průřezu
e_d	vzdálenost od těžiště průřezu ke krajním dolním vláknům
e_h	poloha horních krajních vláken vzhledem k těžišti průřezu
f_{Ed}	návrhová hodnota liniového zatížení konstrukce
f_{cd}	návrhová válcová pevnost betonu v tlaku
f_{ck}	charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku
$f_{ck(t)}$	charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku v okamžiku t
$f_{ck,k}$	charakteristická krychelná pevnost betonu v tlaku
f_{cm}	průměrná hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku
$f_{cm(t)}$	průměrná hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku v okamžiku t
f_{ctd}	návrhová pevnost betonu v dostředném tahu
$f_{ctk;0,05}$	5% kvantil charakteristické pevnosti betonu v dostředném tahu
$f_{ctk;0,95}$	95% kvantil charakteristické pevnosti betonu v dostředném tahu
f_{ctm}	průměrná hodnota pevnosti betonu v dostředném tahu
$f_{ctm(t)}$	průměrná hodnota pevnosti betonu v dostředném tahu v okamžiku t
f_{cvd}	návrhová smyková pevnost betonu
f_{pk}	charakteristická pevnost předpínací oceli v tahu
$f_{p0,1k}$	charakteristická smluvní mez kluzu 0,1% předpínací oceli
$f_{p0,2k}$	charakteristická smluvní mez kluzu 0,2% předpínací oceli
f_{pd}	návrhová pevnost předpínací oceli v tahu
f_{yd}	návrhová mez kluzu betonářské výztuže
f_{yk}	charakteristická mez kluzu betonářské výztuže
$G_{k,j}$	charakteristická hodnota j -tého stálého zatížení
h	výška průřezu
h_0	náhradní rozměr prvku
I_c	moment setrvačnosti průřezu
L	teoretické rozpětí vazníku
MSP	mezní stav použitelnosti

$MSÚ$	mezní stav únosnosti
M_{Ed}	ohybový moment od návrhového zatížení
M_{Rd}	ohybový moment únosnosti průřezu
$M_{čas}$	ohybový moment od zatížení v kombinaci časté
M_{char}	ohybový moment od zatížení v kombinaci charakteristické
M_{kvaz}	ohybový moment od zatížení v kombinaci kvazistálé
M_{zat}	příslušný moment od vnějšího zatížení
N_p	normálová síla od předpětí
$N_{p,0}$	normálová síla od předpětí v okamžiku vnesení zatížení (předběžný výpočet)
$N_{p,\infty}$	normálová síla od předpětí na konci životnosti (předběžný výpočet)
$N_{p,dl}$	normálová síla od předpětí na konci životnosti
$N_{p,ok}$	normálová síla od předpětí v okamžiku vnesení předpětí
P	příslušná reprezentativní hodnota zatížení od předpětí
P_0	maximální předpínací síla v okamžiku vnesení předpětí
P_{max}	maximální předpínací síla pro předpínání
$Q_{k,1}$	charakteristická hodnota hlavního proměnného zatížení
$Q_{k,i}$	charakteristická hodnota vedlejšího i -tého proměnného zatížení
RH	relativní vlhkost vzduchu
r_d	velikost jádra od těžiště směrem k dolním vláknům
r_h	velikost jádra od těžiště směrem k horním vláknům
r_l	velikost jádra od těžiště směrem k bočním levým vláknům
r_p	velikost jádra od těžiště směrem k bočním pravým vláknům
s	součinitel vlivu druhu cementu
t_∞	stáří betonu na konci životnosti konstrukce
t_0	stáří betonu v okamžiku vnesení předpětí
t_d	časové období od okamžiku vnesení předpětí po konec doby životnosti konstrukce
t_s	stáří betonu při začátku smršťování
V_{ed}	návrhová vnitřní posouvající síla
W_{ep}	průřezový modul v působišti předpínací síly
W_d	průřezový modul k dolním krajním vláknům
W_h	průřezový modul k horním krajním vláknům
$\Sigma \varepsilon_p$	celkové přetvoření předpínací výztuže při mezním přetvoření v betonu
$\beta_{cc(t)}$	součinitel závisející na stáří betonu
$\beta_{ds(t_\infty, t_s)}$	součinitel vlivu začátku smršťování
ΔC_{dev}	přídavek krycí vrstvy na návrhovou odchylku
$\Delta C_{dur,add}$	redukce minimální krycí vrstvy při použití přídavné ochrany
$\Delta C_{dur,st}$	redukce minimální krycí vrstvy při použití nerezové oceli
$\Delta C_{dur,\gamma}$	přídavná bezpečnostní složka k minimální krycí vrstvě
$\Delta \varepsilon_p$	přetvoření předpínací výztuže při mezním přetvoření betonu v horních vláknech
$\Delta \sigma_{p,c}$	ztráta předpětí dotvarováním betonu na konci životnosti prvku

$\Delta\sigma_{p,cc}$	ztráta předpětí pružným přetvořením betonu
$\Delta\sigma_{p,r,t,k}$	ztráta předpětí krátkodobou relaxací
$\Delta\sigma_{p,r,t,\infty}$	ztráta předpětí dlouhodobou relaxací
$\Delta\sigma_{p,s}$	ztráta předpětí smršťováním betonu
$\Delta\sigma_{sl}$	ztráta předpětí pokluzem v kotevním bloku
ε_{ca}	poměrné autogenní smršťování
ε_{cd}	poměrné smršťování vysycháním
$\varepsilon_{cd,0}$	hodnota neomezeného poměrného smršťování vysycháním
ε_c^p	přetvoření betonu v působišti předpínací síly
ε_p	přetvoření předpínací výztuže od předpínání
ε_{pu}	mezní přetvoření při zplastizování předpínací výztuže
γ_c	součinitel spolehlivosti betonu
γ_G	dílní součinitel stálého zatížení
$\gamma_{G,j}$	dílní součinitel j-tého stálého zatížení
$\gamma_{Q,1}$	dílní součinitel hlavního proměnného zatížení
$\gamma_{Q,i}$	dílní součinitel i-tého proměnného zatížení
γ_P	dílní součinitel zatížení od předpětí
γ_s	součinitel spolehlivosti oceli
$\Psi_{0,1}$	kombinační součinitel Ψ_0 hlavního proměnného zatížení
$\Psi_{0,i}$	kombinační součinitel Ψ_0 i-tého proměnného zatížení
$\Psi_{2,i}$	kombinační součinitel Ψ_2 i-tého proměnného zatížení
$\Psi_{1,1}$	kombinační součinitel Ψ_1 hlavního proměnného zatížení
σ_c	napětí v krajních vláknech průřezu (obecně)
$\sigma_{c,lim}$	limitní tlakové napětí v betonu
$\sigma_{c,d}$	napětí v dolních vláknech průřezu
$\sigma_{c,h}$	napětí v horních vláknech průřezu
σ_c^p	napětí od předpínací síly v jejím působišti na konci doby životnosti
σ_c^t	napětí od předpínací síly na konci doby životnosti v těžišti průřezu
$\sigma_{p,in}$	napětí v předpínací výztuži při jejím předpínání
$\sigma_{p,ok}$	napětí v předpínací výztuži po zohlednění okamžitých ztrát
$\sigma_{p,max}$	maximální napětí na předpínaném konci při předpínání
$\sigma_{p0,max}$	maximální napětí v předpínací výztuži po vnesení předpětí
$\sigma_{p,dl}$	napětí v předpínací výztuži na konci životnosti
τ_{cp}	smykové napětí

1 Úvod

1.1 Představení

Beton se těší širokému záběru použitelnosti. Beton předpjatý je vídán nejčastěji jako materiál pro konstrukce dopravních a pozemních staveb. Díky vnesenému předpětí konstrukce z předpjatého betonu odolávají většímu zatížení, tedy mohou překonávat větší rozpětí, nebo může být zmenšena dimenze jejich průřezu. V návaznosti na mé oborové zaměření byla vybrána problematika návrhu předem předpjatého betonového vazníku halových staveb.

Nadcházející kapitoly se zabývají návrhem předem předpjatého betonového vazníku, počínaje stanovením materiálových charakteristik a rozměrů průřezu, přes výpočet velikosti předpínací síly a ztrát předpětí, konče posouzením mezních stavů. Popsáno bude i podrobné stanovení minimální krycí vrstvy nebo například výpočet součinitele dotvarování.

Teoretický základ v kapitolách 2–4 vychází zejména z publikací [2], [4], [5] a ze znalostí, které jsem nabyla v průběhu studia.

1.2 Motivace

Koncepce předpjatého betonu mi byla představena v průběhu studia. Jednalo se o návrh plného předpětí v plném rozsahu pomocí ručních výpočtů. Návrh předpětí ve mne vzbudil zájem. Rozhodla jsem se usilovat o nalezení způsobu, kterým by se eliminovaly časové prodlevy mezi změnou vstupu a finálním posouzením a o vytvoření podkladu popisující návrh předpětí pro zvolený, konkrétní prvek.

1.3 Cíl

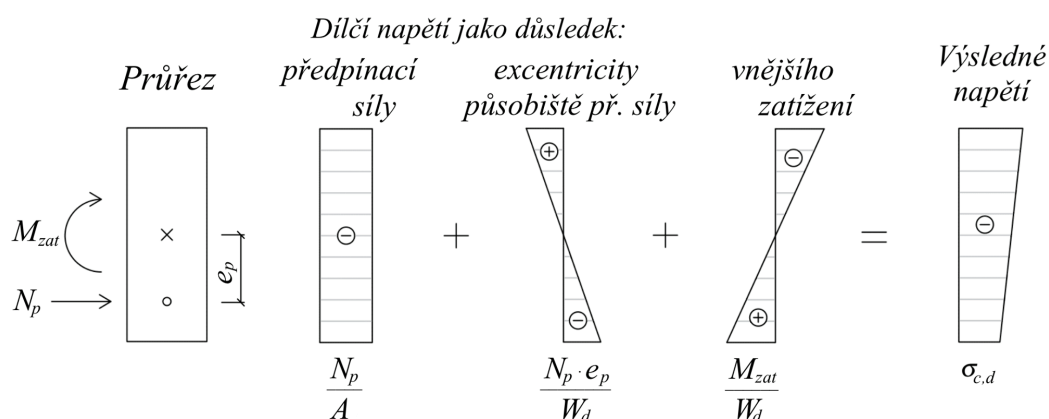
Z důvodů uvedených výše chci dosáhnout vytvoření funkční a přehledné výpočetní aplikace urychlující proces návrhu a posouzení předem předpjatého betonového vazníku s přímým vedením předpínací výztuže a obdélníkovým průřezem. Mým cílem je zároveň to, aby teoretická část této práce sloužila k popisu výpočtu, jako ucelený přehled postupu návrhu i jako zdroj informací při seznamování s touto problematikou během samostudia.

2 Návrh předpětí

2.1 Princip

Návrhem předpětí zaštitíme vyšší únosnost, oddalujeme dosažení kritického tahového napětí betonu doprovázené tahovými trhlinami. Ke zvýšení únosnosti prvku je zapotřebí optimální návrh velikosti předpínací síly a excentricity působíště této síly vůči těžišti průřezu. Při návrhu předpjatého betonu se obvykle vychází z mezního stavu použitelnosti (MSP) namísto mezního stavu únosnosti (MSÚ), jako tomu běžně je například u oceli či železobetonu.

V průřezu předpjatého prvku vznikají dílčí napětí pod nápoem působícího vnějšího zatížení a vneseného předpětí. Vnější zatížení vyvolává ohybový moment a vnesené předpětí ohybový moment a normálovou sílu. Složky výsledného napětí, jakožto důsledek působících sil je k nahlédnutí na Obr. 2.1.



2.2 Metody návrhu předpětí

Návrh předpětí kromě působícího zatížení ovlivňují také okrajové podmínky, požadavky projektanta a investora (stupeň předpětí, konstrukční řešení předpínaného prvku) atd. Stěžejní je zvolit takovou metodu návrhu, která by vedla k uspokojení požadavků a efektivnosti návrhu. Dle publikace [4] mezi přední metody patří metoda vyrovnání napětí a metoda vyrovnání zatížení, které jsou dále krátce charakterizovány.

2.2.1 Metoda vyrovnání napětí

Metoda vyrovnání napětí se soustředí na maximální tahová napětí vznikající v průřezu jakožto účinek působení provozního zatížení, tzn. stálého i proměnného. Tato napětí kompenzujeme vne-

sením předpětí, tedy napětím od předpínací síly. Předpínací síla musí být navržena tak, aby napětí po průřezu nepřekročilo stanovené meze po celou dobu životnosti prvku, aby způsobila vhodnou tlakovou rezervu. Jak velkému napětí dovolíme vznikat poté závisí na stupni předpětí.

Napětí v krajních vláknech kritických průřezů jsou vypočítávána dle vztahu (2.1).

$$\sigma_c = \frac{N_p}{A} + \frac{N_p \cdot e_p}{W} + \frac{M_{zat}}{W}, \quad (2.1)$$

kde W je průřezový modul ke zvoleným krajním vláknům;

M_{zat} je příslušný moment od vnějšího zatížení.

Excentricita předpínací výztuže při této metodě je jednotná po délce prvku, tzn. vedeme výztuž v přímé dráze. Nevyužíváme tak potenciálu předpínací dráhy, jak by tomu bylo při umožnění její variability. Jednoduchost metody se promítne v místy nelogické vedení předpínací výztuže vůči vznikajícímu tahovému namáhání.

2.2.2 Metoda vyrovnání zatížení

Charakteristické pro metodu vyrovnání zatížení je atypické vedení předpínací výztuže. Dráha předpínací výztuže sestává z parabol v místech nad podporou a v poli. Ty v poli vyvolávají přídatné zatížení, které při správném návrhu vykrývají stálá zatížení, tradičně v rozmezí 80–100%. Toto působení je nahrazováno náhradním rovnoměrným zatížením. Parabolická dráha předpínací výztuže nad podporou se nezapojuje, neboť radiální zatížení přenáší přímo do bodu teoretické podpory. Zbylá zatížení vykrývá vnesená tlaková rezerva.

Vstupem pro návrh je vzepětí paraboly předpínací dráhy a odvozená rovnice pro výpočet optimální excentricity e_p v bodě x je vyjádřena vztahem (2.2).

$$e_p(x) = -\frac{4f}{L^2}x^2 + \frac{4f}{L}x + e_{p,0}, \quad (2.2)$$

kde f je vzepětí paraboly předpínací výztuže;

x je vzdálenost od počátku vazníku;

$e_{p,0}$ je excentricita vyústění předpínací výztuže vůči těžišti průřezu (počáteční).

Návrh metodou vyrovnání zatížení je oproti metodě vyrovnání napětí technologicky náročnější, avšak přináší výhodu formou snížení potřebné předpínací síly.

3 Stupeň předpětí

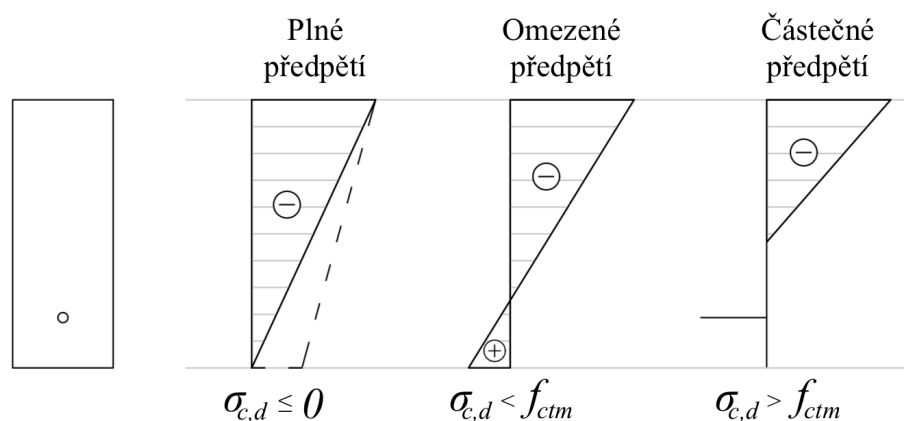
3.1 Využití a návrh

Stupně předpětí definují druhy předpětí dle přípustného tahového napětí po výšce průřezu a v délce prvku. Poslouží při vyhodnocování posouzení ve finálních výstupech výpočetní aplikace a poskytnou nadhled nad možnostmi návrhu, využití materiálových charakteristik či kombinacemi působících sil. Schémata napětí po průřezu typická pro jednotlivé stupně předpětí jsou k nahlédnutí na Obr. 3.1.

Nejvlivnějšími nástroji pro zvýšený stupeň předpětí jsou:

1. excentricita působíště předpínací síly vůči těžišti průřezu;
2. velikost předpínací síly.

Při užívání nástroje 1. je vhodné brát v potaz oblast průřezu, kde pokud se nachází působíště předpínací síly, tak vyvolá tlakové napětí po celém průřezu, tzv. jádro průřezu. Velikost předpínací síly, nástroj 2., významně ovlivňuje výskyt ztrát předpětí, které mohou nabývat i čtvrtinu její návrhové hodnoty.



Obr. 3.1: Stupně předpětí podle [5, Obr. 3-1]

3.2 Plné předpětí

Pro plné předpětí je zcela vyloučen vznik tahových napětí po výšce průřezu. Plnému předpětí odpovídá umístění působíště předpínací síly do oblasti jádra průřezu.

3.3 Omezené předpětí

U omezeného předpětí může vznikat tahové napětí po výšce průřezu, avšak je limitováno shora materiálovou vlastností betonu – hodnotou tahové pevnosti.

Nemusíme se tak omezovat hranicí jádra průřezu při umístění působivé předpínací síly, jako je tomu u plného předpětí, pouze musíme zahrnout posouzení vznikajících tahových napětí v krajních vláknech kritických průřezů.

3.4 Částečné předpětí

Při částečném předpětí maximální tahová napětí v krajních vláknech průřezu přesahují hodnotu pevnosti betonu v tahu. Betonové části průřezu s napětím přesahující tuto hranici vylučujeme ze spolupůsobení a neúčastní se přenosu zatížení.

Není tak vyloučen vznik tahových trhlin, proto místo maximálního napětí monitorujeme šířku vznikajících trhlin. Maximální šířku trhliny můžeme převzít např. z doporučených hodnot dle stupně vlivu prostředí z normy ČSN EN 1992-1-1 ed. 2 [10].

4 Změny předpětí

4.1 Princip

Od okamžiku předpínání až po konec doby životnosti konstrukce, jejíž předpínaný prvek je součástí, jsou obecně známy změny napětí v předpínací výztuži. Musíme tak upustit od myšlenky ideálního stavu s konstantním předpětím v plynoucím čase a zavést a vyčíslit jednotlivé druhy změn předpětí, abychom tuto skutečnost mohli zohlednit při návrhu předpětí. Ačkoliv změna napětí nemusí být vždy záporná, jsou tyto změny často nepřesně souhrnně nazývány ztrátami předpětí.

4.2 Role v návrhu předpětí

Zprvu se uchylujeme k odhadu ztrát předpětí jako procentuální části předpínací síly, obvykle mezi 15% a 25%, samozřejmě s tendencí nejvíce se přiblížit k reálné hodnotě. Na konci návrhu, před jeho posouzením, vyčíslujeme exaktní hodnoty, které nám slouží pro získání hodnot zbytkového napětí v důležitých milnících doby životnosti konstrukce.

4.3 Druhy změn předpětí

Změny předpětí dělíme na dlouhodobé a okamžité dle vlastního stěžejního vývoje v časovém horizontu. Prvotní okamžité, též zvané výrobní změny, se projevují ve fázi předpínání až po okamžik ukotvení výztuže. Dále dlouhodobé, nebo-li provozní změny předpětí, se uplatňují od okamžiku ukotvení po konec doby životnosti. Významnější druhy změn předpětí jsou převzaty z publikace [5] a uvedeny v Tab. 4.1.

Tab. 4.1: Změny předpětí dle [5]

Výrobní změny předpětí:	Provozní změny předpětí:
<ul style="list-style-type: none"> · krátkodobou relaxací předpínací výztuže; · otlačením betonu; · pokluzem v kotvě; · postupným předpínáním; · posunem napínacího zařízení; · pružným přetvořením betonu; · rozdílem teplot; · stlačením spár u příčně dělené konstrukce; · třením. 	<ul style="list-style-type: none"> · dlouhodobou relaxací předpínací výztuže; · dotvarováním betonu*; · pružným přetvořením betonu od působení proměnného zatížení; · smršťování betonu.
*Při působení cyklického zatížení sestává i ze složky v jeho důsledku.	

5 Návrh předpjatého betonového vazníku

5.1 Úvod a omezující podmínky

Po teoretické části následuje popis návrhu vazníku, jako je ho využito ve výpočetní aplikaci. Výpočetní aplikace je vytvořena tak, aby kryla široký záběr variant, a přesto budou definovány omezující podmínky a předpoklady pro návrh závazné.

Návrh předpětí se uskutečňuje metodou vyrovnání napětí na prostém nosníku, staticky určité konstrukci, jímž je vedena předpínací výztuž v přímé dráze. Průřez je omezen na obdélníkový tvar a vzhledem k výrobní technologii se jedná o předem předpjatou konstrukci. Pro beton je zvolen bilineární pracovní diagram a pro ocel vodorovný pracovní diagram s plastickou větví. Dále je zaveden požadavek na omezené předpětí pro stádium předpínání a plné předpětí po dobu provozu.

Na počátku návrhu je definována geometrie konstrukce, působící zatížení a kvality vybraného materiálu, z těchto informací jsou určeny podrobnější materiálové a průřezové charakteristiky předcházející určení krycí vrstvy. Poté následuje předběžná kontrola mezních stavů, která plynule navazuje na srdce aplikace – návrh předpětí. Po specifikaci předpětí se definují veličiny pro výpočet ztrát předpětí a na závěr proběhne posouzení MSP a MSÚ. Grafická podoba jednotlivých kroků a sekcí, jak je jich realizováno v aplikaci, bude řešena v kapitole 6 *Výpočetní aplikace*.

5.2 Geometrie průřezu

Pro návrh rozměrů průřezu může být využito empirických vztahů (5.1), (5.2), viz [4].

Výška průřezu:

$$h = \left(\frac{1}{10} \sim \frac{1}{8} \right) L. \quad (5.1)$$

Šířka průřezu:

$$b = \left(\frac{1}{4} \sim \frac{1}{3} \right) h. \quad (5.2)$$

5.3 Průřezové charakteristiky

Šířka a výška obdélníkového průřezu jsou klíčovými vstupy pro výpočet průřezových charakteristik. Jednotlivé vztahy jsou uvedeny v rovnicích (5.3)–(5.13), viz [4].

Plocha průřezu:

$$A = b \cdot h. \quad (5.3)$$

Náhradní rozměr prvku:

$$h_0 = \frac{2 \cdot A}{u_o}, \quad (5.4)$$

kde u_o je část obvodu průřezu vystavena účinkům okolního prostředí.

Poloha dolních krajních vláken od těžiště:

$$e_d = \frac{h}{2}. \quad (5.5)$$

Poloha horních krajních vláken od těžiště:

$$e_h = \frac{h}{2}. \quad (5.6)$$

Moment setrvačnosti průřezu:

$$I_c = \frac{1}{12} b \cdot h^3. \quad (5.7)$$

Průřezový modul k dolním krajním vláknům:

$$W_d = \frac{I_c}{e_d}. \quad (5.8)$$

Průřezový modul k horním krajním vláknům:

$$W_h = \frac{I_c}{e_h}. \quad (5.9)$$

Velikost jádra průřezu od těžiště ke spodní hraně:

$$r_d = \frac{W_h}{A}. \quad (5.10)$$

Velikost jádra průřezu od těžiště k horní hraně:

$$r_h = \frac{W_d}{A}. \quad (5.11)$$

Velikost jádra průřezu od těžiště k levé hraně:

$$r_l = \frac{b}{6}. \quad (5.12)$$

Velikost jádra průřezu od těžiště k pravé hraně:

$$r_p = \frac{b}{6}. \quad (5.13)$$

5.4 Materiálové charakteristiky

K prvotním výpočtům patří rovnice materiálových charakteristik, zde rozdělené dle materiálu a převzaté z ČSN EN 1992-1-1 ed. 2 [10]. Vztahující se k betonu jsou vztahy (5.14)–(5.27) a k výztuži vztahy (5.28)–(5.30).

Materiálové charakteristiky betonu

Návrhová válcová pevnost betonu v tlaku:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}. \quad (5.14)$$

Průměrná hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8, \quad (5.15)$$

kde f_{ck} je v jednotkách MPa.

Průměrná hodnota pevnosti betonu v dostředném tahu,

je-li $f_{ck} \leq 50$ MPa, zároveň $f_{ck,k} \leq 60$ MPa:

$$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{2/3}, \quad (5.16)$$

kde f_{ck} je v jednotkách MPa.

je-li $f_{ck} > 50$ MPa, zároveň $f_{ck,k} > 60$ MPa:

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{f_{cm}}{10} \right) \right), \quad (5.17)$$

kde f_{cm} je v jednotkách MPa.

Dolní kvantil pevnosti betonu v dostředném tahu:

$$f_{ctk;0,05} = 0,7 \cdot f_{ctm}. \quad (5.18)$$

Horní kvantil pevnosti betonu v dostředném tahu:

$$f_{ctk;0,95} = 1,3 \cdot f_{ctm}. \quad (5.19)$$

Návrhová pevnost betonu v dostředném tahu:

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk;0,05}}{\gamma_c}. \quad (5.20)$$

Průměrná hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku v čase t :

$$f_{cm(t)} = \beta_{cc(t)} \cdot f_{cm}, \quad (5.21)$$

$$\text{kde } \beta_{cc(t)} = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0,5} \right] \right\},$$

kde s viz Tab. 5.1;

t je stáří betonu ve dnech.

Tab. 5.1: Součinitel s dle druhu cementu podle [10]

Součinitel s dle druhu cementu		
Druh	Popis	s
S	Beton s pomalým vývojem pevnosti	0,38
N	Beton s normálním vývojem pevnosti	0,25
R	Beton s rychlým vývojem pevnosti	0,2

Charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku v čase t :

je-li $3 < t < 28$ dní:

$$f_{ck(t)} = f_{cm(t)} - 8, \quad (5.22)$$

kde $f_{cm(t)}$ je v jednotkách MPa;

je-li $t \geq 28$ dní:

$$f_{ck(t)} = f_{ck}. \quad (5.23)$$

Průměrná hodnota pevnosti betonu v dostředném tahu v čase t :

$$f_{ctm(t)} = \beta_{cc(t)}^{\alpha_t} \cdot f_{ctm}, \quad (5.24)$$

kde α_t je mocnitel zohledňující stáří betonu:

je-li $t < 28$ dní: $\alpha_t = 1$;

je-li $t \geq 28$ dní: $\alpha_t = \frac{2}{3}$.

Sečnový modul pružnosti betonu:

$$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}, \quad (5.25)$$

kde f_{cm} je v jednotkách MPa.

Sečnový modul pružnosti betonu v čase t :

$$E_{cm(t)} = \left(\frac{f_{cm(t)}}{f_{cm}} \right)^{0,3} \cdot E_{cm}. \quad (5.26)$$

Limitní tlakové napětí v betonu:

$$\sigma_{c,lim} = f_{cd} - 2\sqrt{f_{ctd} \cdot (f_{ctd} + f_{cd})}. \quad (5.27)$$

Materiálové charakteristiky předpínací a betonářské výztuže

Charakteristická smluvní mez kluzu 0,1% předpínací oceli:

$$f_{p0,1k} = 0,95 f_{p0,2k}. \quad (5.28)$$

Návrhová pevnost předpínací oceli v tahu:

$$f_{pd} = \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s}. \quad (5.29)$$

Návrhová mez kluzu betonářské výztuže:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}. \quad (5.30)$$

Stupeň vlivu prostředí

Jednotlivé stupně vlivu prostředí pro beton jsou vypsány v Tab. 5.2, vycházející z ČSN EN 206+A1 [11] s krátkou charakterizací.

Tab. 5.2: Stupně vlivu prostředí dle [11, Tabulka 1]

Stupně vlivu prostředí	
Stupeň	Popis
X0	Bez nebezpečí koroze nebo narušení
Nebezpečí koroze vlivem karbonatace	
XC1	Prostředí suché nebo stále mokré
XC2	Prostředí mokré, občas suché
XC3	Prostředí středně mokré, vlhké
XC4	Prostředí střídavě mokré a suché
Nebezpečí koroze vlivem chloridů vyjma z mořské vody	
XD1	Prostředí středně mokré, vlhké
XD2	Prostředí mokré, občas suché
XD3	Prostředí střídavě mokré a suché
Nebezpečí koroze vlivem chloridů z mořské vody	
XS1	Beton vystaven slanámu vzduchu, ale ne v přímém styku s mořskou vodou
XS2	Beton trvale ponořen ve vodě
XS3	Beton smáčený a ostříkovaný přílivem
Vystavení mrazu a rozmrazování	
XF1	Beton mírně nasycen vodou bez rozmrazovacích prostředků
XF2	Beton mírně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky
XF3	Beton značně nasycen vodou bez rozmrazovacích prostředků
XF4	Beton značně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky nebo mořskou vodou
Vystavení chemicky agresivnímu prostředí	
XA1	Prostředí chemické slabě agresivní
XA2	Prostředí chemické středně agresivní
XA3	Prostředí chemické vysoce agresivní
Působení pohyblivého mechanického zatížení	
XM1	Min. požadavky, pojezd vozidly opatřenými pneumatikami
XM2	Provoz vysokozdvíhových vozíků, proudění vody o nízké rychlosti
XM3	Častý pojezd pásových vozidel, proudění vody o vysoké rychlosti

5.5 Zatížení

5.5.1 Kombinace zatížení MSÚ

Návrhová hodnota liniového zatížení f_{Ed} je dle ČSN EN 1990 ed. 2 [9] pro mezní stavy STR a GEO méně příznivá kombinace ze vztahů (5.31) a (5.32).

$$A \quad \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}; \quad (5.31)$$

$$B \quad \sum_{j \geq 1} \xi_j \cdot \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}, \quad (5.32)$$

kde "+" značí "kombinovaný s";

\sum značí "kombinovaný účinek";

$\Psi_{0,i}$ jsou kombinační součinitelé dle Tab. 5.3;

ξ_j je redukční součinitel j-tého stálého zatížení o hodnotě 0,85.

A návrhová hodnota působícího vnitřního ohybového momentu je vyjádřena vztahem (5.33).

$$M_{Ed} = \frac{1}{8} f_{Ed} \cdot L^2. \quad (5.33)$$

Tab. 5.3: Doporučené hodnoty součinitelů Ψ pro pozemní stavby dle [9, Tabulka A1.1]

Kategorie užitných zatížení pro pozemní stavby a jejich součinitelé Ψ_i				
Kategorie	Popis	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
A	Obytné plochy	0,7	0,5	0,3
B	Kancelářské plochy	0,7	0,5	0,3
C	Shromažďovací plochy	0,7	0,7	0,6
D	Obchodní plochy	0,7	0,7	0,6
E	Skladovací plochy	1,0	0,9	0,8
F	Dopravní plochy, vozidla do 30 kN	0,7	0,7	0,6
G	Dopravní plochy, vozidla 30–160 kN	0,7	0,5	0,3
H	Střechy	0,7	0,2	0

5.5.2 Kombinace zatížení MSP

Při posuzování mezního stavu použitelnosti využíváme kombinací zatížení dle ČSN EN 1992-1-1 ed. 2 [10], viz vztahy (5.34), (5.36), (5.38). Výsledné ohybové momenty od příslušných kombinací zatížení jsou vyjádřeny vztahy (5.35), (5.37), (5.39).

Charakteristická kombinace pro nevratné mezní stavy použitelnosti:

$$f_{char} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}. \quad (5.34)$$

Působící vnitřní ohybový moment od charakteristické kombinace zatížení:

$$M_{char} = \frac{1}{8} f_{char} \cdot L^2. \quad (5.35)$$

Častá kombinace pro vratné mezní stavy použitelnosti:

$$f_{čas} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \Psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}. \quad (5.36)$$

Působící vnitřní ohybový moment od časté kombinace zatížení:

$$M_{čas} = \frac{1}{8} f_{čas} \cdot L^2. \quad (5.37)$$

Kvazistálá kombinace ve věci vzhledu konstrukce a důsledků dlouhodobých účinků:

$$f_{kvaz} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}. \quad (5.38)$$

Působící vnitřní ohybový moment od kvazistálé kombinace zatížení:

$$M_{kvaz} = \frac{1}{8} f_{kvaz} \cdot L^2. \quad (5.39)$$

5.6 Krycí vrstva

Nominální krycí vrstva

Nominální krycí vrstva je betonová vrstva zajišťující určitou dobu trvanlivosti a odolnosti – ochranu výztuže prvků proti korozi, požární odolnost a správné spolupůsobení, též její hodnota má pokrývat možnou odchylku od minimální nutné krycí vrstvy. Stanovuje se jako nejmenší vzdálenost mezi povrchem výztuže (předpínací; betonářské) a povrchem betonu, jež musí být dodržena ve všech místech.

I přes možnost vložení finálních hodnot krycí vrstvy ve výpočetní aplikaci, bude zde popsána varianta podrobného stanovení betonové krycí vrstvy dle ČSN EN 1992-1-1 ed. 2 [10], jak je tomu umožněno i v aplikaci.

Nominální krycí vrstva je dána vztahem (5.40).

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}. \quad (5.40)$$

Minimální krycí vrstva

Základní složkou nominální krycí vrstvy je minimální krycí vrstva, jejíž tloušťka je vyjádřena vztahem (5.41).

$$c_{min} = \max\{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm}\}, \quad (5.41)$$

kde $c_{min,b}$ se určí vzhledem k provedení výztuže dle Tab. 5.4;

$c_{min,dur}$ se určí vzhledem k třídě konstrukce a typu výztuže dle Tab. 5.5 a 5.6;

$\Delta c_{dur,\gamma}, \Delta c_{dur,st}, \Delta c_{dur,add}$ je doporučeno nahradit hodnotou 0 mm.

Při určování $c_{min,dur}$ se postupuje dle třídy konstrukce. Třída konstrukce při návrhové životnosti 50 let je S4 při současném dodržení minimální indikativní pevnostní třídy betonu dle stupně vlivu prostředí. Indikativní pevnostní třídy jsou uvedeny v Tab. 5.8. Dále je tuto třídu doporučeno upravit dle ČSN EN 1992-1-1 ed. 2 [10], viz Tab. 5.7.

Tab. 5.4: Minimální krycí vrstva $c_{min,b}$ z hlediska soudržnosti dle [10]

Minimální krycí vrstva $c_{min,b}$ z hlediska soudržnosti	
Předem napjaté předpínací vložky	
Popis	Minimální krycí vrstva $c_{min,b}$
Lana a hladké dráty	1,5 · průměr vložky
Drát s vtisky	2,5 · průměr vložky

Tab. 5.5: $c_{min,dur}$ z hlediska trvanlivosti dle [10, Tabulka 4.4N] pro betonářskou výztuž

$c_{min,dur}$ z hlediska trvanlivosti pro betonářskou výztuž							
Třída konstrukce ^{*)}	Stupeň vlivu prostředí dle Tab. 5.2						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

^{*)} doporučená třída při návrhové životnosti 50 let je S4, doporučeno upravit dle Tab. 5.7.

Tab. 5.6: $c_{min,dur}$ z hlediska trvanlivosti dle [10, Tabulka 4.5N] pro předpínací výztuž

$c_{min,dur}$ z hlediska trvanlivosti pro předpínací výztuž							
Třída konstrukce ^{*)}	Stupeň vlivu prostředí dle Tab. 5.2						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	15	20	25	30	35	40
S2	10	15	25	30	35	40	45
S3	10	20	30	35	40	45	50
S4	10	25	35	40	45	50	55
S5	15	30	40	45	50	55	60
S6	20	35	45	50	55	60	65

^{*)} doporučená třída při návrhové životnosti 50 let je S4, doporučeno upravit dle Tab. 5.7.

Poznámka: pro stupeň vlivu prostředí XF a XA se upouští od $c_{min,dur}$ s jeho přídatky při stanovení c_{min} . Zvláštní pozornost je věnována složení betonu. Pro stupeň vlivu prostředí XM se zvětšuje vrstva c_{min} , u XM1 o 5 mm, u XM2 o 10 mm, u XM3 o 15 mm a zvláštní pozornost je věnována kamenivu.

Tab. 5.7: Doporučená úprava třídy konstrukce dle [10, Tabulka 4.3N]

Úprava třídy konstrukce							
Kritérium	Stupeň vlivu prostředí dle Tab. 5.2						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1	XD2 / XS1	XD3 / XS2 / XS3
Návrhová živ. 100 let	zvětšit o 2 třídy	zvětšit o 2 třídy	zvětšit o 2 třídy	zvětšit o 2 třídy	zvětšit o 2 třídy	zvětšit o 2 třídy	zvětšit o 2 třídy
Pevnostní třída ^{*)}	$\geq C30/37$ zmenšit o 1 třídu	$\geq C30/37$ zmenšit o 1 třídu	$\geq C35/45$ zmenšit o 1 třídu	$\geq C40/50$ zmenšit o 1 třídu	$\geq C40/50$ zmenšit o 1 třídu	$\geq C40/50$ zmenšit o 1 třídu	$\geq C45/55$ zmenšit o 1 třídu
Desková konstrukce	zmenšit o 1 třídu	zmenšit o 1 třídu	zmenšit o 1 třídu	zmenšit o 1 třídu	zmenšit o 1 třídu	zmenšit o 1 třídu	zmenšit o 1 třídu
Zvl. kontrola kvality výroby betonu	zmenšit o 1 třídu	zmenšit o 1 třídu	zmenšit o 1 třídu	zmenšit o 1 třídu	zmenšit o 1 třídu	zmenšit o 1 třídu	zmenšit o 1 třídu

^{*)} stanovenou mez lze snížit o jednu pevnostní třídu při provzdušnění > 4 %.

Tab. 5.8: Minimální indikativní pevnostní třídy dle [10, Tabulka E.1N]

Minimální indikativní pevnostní třída dle stupně vlivu prostředí								
X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XF1	XF2	XF3	XF4
C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C25/30	C25/30 ^{*)}		C30/37 ^{*)}
XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3	XA1	XA2	XA3
C30/37		C35/45	C30/37	C35/45		C25/30	C30/37	C35/45
*) platí při provzdušnění betonu $\geq 4\%$, jinak pevnostní třída o jeden stupeň vyšší.								

Přídavek na návrhovou odchylku

Při návrhu tloušťky betonové krycí vrstvy musíme zahrnout vliv provádění betonáže, tedy zajistit, aby minimální krycí vrstva byla dodržena ve všech místech prvku a zároveň provádění betonáže bylo snadné a rychlé. Proto součástí nominální krycí vrstvy je přídavek na návrhovou odchylku.

Dle ČSN EN 1992-1-1 ed. 2 [10] doporučená hodnota pro přídavek na návrhovou odchylku Δc_{dev} je 10 mm, jež může být snížena při variantě:

1. zajištěná kvalita s měřením betonové krycí vrstvy, poté $10 \text{ mm} \geq \Delta c_{dev} \geq 5 \text{ mm}$;
2. velmi přesné přístroje pro měření krycí vrstvy s případnou selekcí nevyhovujících prvků, poté $5 \text{ mm} \geq \Delta c_{dev} \geq 0 \text{ mm}$.

5.7 Předběžná kontrola mezních stavů

5.7.1 MSP

Zde využijeme mezní stav omezení napětí MSP pro beton, jak je popsán v ČSN EN 1992-1-1 ed. 2 [10]. Ujistíme se o splnění podmínek pro zavedení určitých předpokladů a zabezpečení vyhnutí se nevyžadovaných trhlin.

Omezení tlakových napětí dle vztahu (5.42) pro beton třídy XD, XF, XS slouží proti vzniku podélných trhlin za využití charakteristické kombinace zatížení.

$$|\sigma_{c, char}| \leq k_1 \cdot f_{ck}, \quad (5.42)$$

kde $\sigma_{c, char}$ je tlakové napětí v krajních vláknech betonu za charakteristické kombinace zatížení;

k_1 je součinitel nabývající doporučené hodnoty 0,6.

Omezení tlakového napětí v betonu pro možnost uvažovat lineární dotvarování za využití kvazistálé kombinace zatížení je vyjádřeno nerovnicí (5.43).

$$|\sigma_{c,kv}| \leq k_2 \cdot f_{ck}, \quad (5.43)$$

kde $\sigma_{c,kv}$ je tlakové napětí v krajních vláknech betonu za kvazistálé kombinace;
 k_2 je součinitel nabývající doporučené hodnoty 0,45.

Při nesplnění některé z podmínek je vhodné zvýšit mocnost betonové krycí vrstvy.

5.7.2 MSÚ

Kontrolou mezního stavu únosnosti předběžně zjistíme, zda-li navržená výška průřezu vyhovuje. Při výpočtu momentu únosnosti využíváme značného zjednodušení, proto vypočtený limit by měl posloužit pouze k porovnání a navržená výška by jej měla převyšovat s vhodnou rezervou. Vycházíme ze vztahu (5.44).

$$M_{Rd} \geq M_{Ed}. \quad (5.44)$$

Výpočet ohybového momentu únosnosti průřezu postupně upravíme a zjednodušíme pro náš účel, viz rovnice (5.45).

$$M_{Rd} = F_c \cdot z = \alpha_h \cdot h \cdot b \cdot f_{cd} \cdot h, \quad (5.45)$$

kde F_c je síla od tlačené části betonového průřezu;
 z je rameno vnitřních sil, zjednodušením se nahradí výškou průřezu;
 $\alpha_h \cdot h$ je odhad tlačené výšky průřezu, α_h se nahradí hodnotou 0,15.

Následně získáváme finální omezující podmínku (5.46) pro výšku průřezu.

$$h \geq \sqrt{\frac{M_{Ed}}{\alpha_h \cdot b \cdot f_{cd}}}. \quad (5.46)$$

5.8 Návrh předpětí

5.8.1 Úvod

Pro návrh předpětí je užitá metoda vyrovnání napětí tak, jak je použita v publikaci [2]. Pro napětí vznikající v krajních vláknech průřezu uprostřed vazníku a v místě podpory se stanoví limitní hodnoty vycházející z MSP, stupně předpětí, okamžiku posuzování a omezujících podmínek převzatých z ČSN EN 1992-1-1 ed. 2 [10]. Tak jsou sestaveny čtyři nerovnice (5.54)–(5.59) pro průřez

uprostřed rozpětí a čtyři nerovnice (5.56)–(5.61) pro průřez v místě podpory, s jejichž pomocí hledáme onen návrh předpětí. Tím je myšlen návrh excentricity působíště předpínací síly vůči těžišti průřezu a velikosti předpínací síly vyhovující všem těmto nerovnicím.

5.8.2 Předpínací síla

Z pohledu ekonomické efektivity návrhu je snahou využít maximální předpínací síly možné v okamžiku vnesení předpětí pro zvolený materiál a plochu předpínací výztuže. Maximální napětí pro předpínací výztuž bezprostředně po vnesení předpětí je dle [10] vyjádřen vztahem (5.47), poté můžeme rovnicí (5.48) vyjádřit předpínací sílu v okamžiku vnesení zatížení při maximálním napětí na předpínaném konci dané výztuže.

$$\sigma_{p0,max} = \min(0,75f_{pk}; 0,85f_{p0,1k}); \quad (5.47)$$

$$P_0 = \sigma_{p0,max} \cdot A_p. \quad (5.48)$$

Ve fázi návrhu se normálová síla od předpětí vyjádří vztahem (5.49) pro okamžik vnesení předpětí a (5.50) pro konec doby životnosti.

$$N_{p,0} = r_0 \cdot P_0; \quad (5.49)$$

$$N_{p,\infty} = r_\infty \cdot x_z \cdot P_0, \quad (5.50)$$

kde $r_0; r_\infty$ jsou součinitelé předpínací síly a pro přímé předpětí lze uvažovat:

$$r_0 = 1,05; r_\infty = 0,95 \text{ viz } \check{\text{CSN EN 1992-1-1 ed. 2 [10]};$$

x_z je součinitel zohledňující ztráty předpětí, doporučena je hodnota 0,8.

V okamžiku, kdy je navržena excentricita působíště předpínací síly a její hodnota v okamžiku vnesení zatížení, vypočteme předpínací sílu pro předpínání rovnicí (5.51) a maximální působící napětí při předpínání rovnicí (5.52).

$$P_{max} = 1,05P_0; \quad (5.51)$$

$$\sigma_{p,in} = \frac{P_{max}}{A_p}. \quad (5.52)$$

Maximální napětí vznikající při předpínání na předpínaném konci musí splňovat nerovnici (5.53) vycházející z MSÚ.

$$\sigma_{p,in} \leq \min(0,8f_{pk}; 0,9f_{p0,1k}). \quad (5.53)$$

5.8.3 Omezující podmínky pro okamžik vnesení předpětí

Průřez uprostřed rozpětí vazníku

$$\sigma_{c,h,0} = \frac{N_{p,0}}{A} + \frac{N_{p,0} \cdot e_p + M_{g0k}}{I_c} \cdot e_h \geq -0,7f_{ck(t_0)}; \quad (5.54)$$

$$\sigma_{c,d,0} = \frac{N_{p,0}}{A} + \frac{N_{p,0} \cdot e_p + M_{g0k}}{I_c} \cdot e_d \leq f_{ctm(t_0)}, \quad (5.55)$$

kde $f_{ck(t_0)}$ je válcová pevnost betonu v tlaku v čase vnesení předpětí ($t = t_0$);

$f_{ctm(t_0)}$ průměrná pevnost betonu v tahu v čase vnesení předpětí ($t = t_0$);

M_{g0k} je vnitřní ohybový moment od zatížení vlastní tíhou;

$N_{p,0}$ viz vztah (5.49).

Průřez v místě podpory vazníku

$$\sigma_{c,h,0} = \frac{N_{p,0}}{A} + \frac{N_{p,0} \cdot e_p}{I_c} \cdot e_h \leq f_{ctm(t_0)}; \quad (5.56)$$

$$\sigma_{c,d,0} = \frac{N_{p,0}}{A} + \frac{N_{p,0} \cdot e_p}{I_c} \cdot e_d \geq -0,7f_{ck(t_0)}, \quad (5.57)$$

kde $f_{ck(t_0)}$ je válcová pevnost betonu v tlaku v čase vnesení předpětí ($t = t_0$);

$f_{ctm(t_0)}$ průměrná pevnost betonu v tahu v čase vnesení předpětí ($t = t_0$);

$N_{p,0}$ viz vztah (5.49).

5.8.4 Omezující podmínky na konci životnosti

Průřez uprostřed rozpětí vazníku

$$\sigma_{c,h,\infty} = \frac{N_{p,\infty}}{A} + \frac{N_{p,\infty} \cdot e_p + M_{char}}{I_c} \cdot e_h \geq -0,6f_{ck}; \quad (5.58)$$

$$\sigma_{c,d,\infty} = \frac{N_{p,\infty}}{A} + \frac{N_{p,\infty} \cdot e_p + M_{kvaz}}{I_c} \cdot e_d \leq 0, \quad (5.59)$$

kde $N_{p,\infty}$ viz vztah (5.50).

Průřez v místě podpory vazníku

$$\sigma_{c,h,\infty} = \frac{N_{p,\infty}}{A} + \frac{N_{p,\infty} \cdot e_p}{I_c} \cdot e_h \leq 0; \quad (5.60)$$

$$\sigma_{c,d,\infty} = \frac{N_{p,\infty}}{A} + \frac{N_{p,\infty} \cdot e_p}{I_c} \cdot e_d \geq -0,6f_{ck}, \quad (5.61)$$

kde $N_{p,\infty}$ viz vztah (5.50).

5.9 Ztráty předpětí

Ze ztrát uvedených v Tab. 4.1 budou zohledněny pouze ztráty významné pro případ předem předpjatého betonového vazníku a uvedenými výpočty se získá absolutní hodnota těchto ztrát. Užití vztahy se opírají o ČSN EN 1992-1-1 ed. 2 [10].

5.9.1 Okamžité

Z výrobních ztrát uvažujeme ztrátu pokluzem v kotevním bloku, krátkodobou relaxací a pružným přetvořením betonu vyjádřeny vztahy (5.62)–(5.64).

Pokluz v kotevním bloku:

$$\Delta\sigma_{sl} = \frac{\Delta sl}{L} \cdot E_p, \quad (5.62)$$

kde Δsl je celková délka pokluzu v kotvě.

Krátkodobá relaxace:

$$\Delta\sigma_{p,r,t,k} = \alpha_{r1} \cdot \rho_{1000} \cdot e^{\alpha_{r2} \cdot \mu} \cdot \left(\frac{t_0}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1-\mu)} \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_{p,1}, \quad (5.63)$$

kde α_{r1} je součinitel s hodnotou dle třídy relaxačního chování viz Tab. 5.9;

α_{r2} je mocněnec s hodnotou dle třídy relaxačního chování viz Tab. 5.9;

ρ_{1000} je hodnota relaxační ztráty v jednotkách % po 1000 h od napnutí při průměrné teplotě 20°C dle Tab. 5.9;

t_0 je staří betonu při vnesení předpětí v hodinách;

μ je menšitel závisející na napětí při předpínání a pevnosti výztuže:

$$\mu = \sigma_{p,in} / f_{pk};$$

$\sigma_{p,1}$ je napětí ve výztuži po zohlednění ztráty pokluzem:

$$\sigma_{p,1} = \sigma_{p,in} - \Delta\sigma_{sl}.$$

Tab. 5.9: Doporučené hodnoty α_{r1} , α_{r2} a ρ_{1000} dle [10]

Hodnoty α_{r1} , α_{r2} a ρ_{1000} dle třídy relaxačního chování předpínací výztuže				
Třída	Popis	α_{r1}	α_{r2}	ρ_{1000}
1	Dráty, nebo lana s normální relaxací	5,39	6,7	0,08
2	Dráty, nebo lana s nízkou relaxací	0,66	9,1	0,025
3	Za tepla válcované a upravené tyče	1,98	8	0,03

Pružné přetvoření betonu:

$$\Delta\sigma_{p,cc} = \sigma_{p,2} \cdot \frac{A_p \cdot E_p}{A_c \cdot E_{cm(t_0)} + A_p \cdot E_p}, \quad (5.64)$$

kde $\sigma_{p,2}$ je napětí ve výztuži po uvážení ztráty pokluzem a krátkodobou relaxací:

$$\sigma_{p,2} = \sigma_{p,in} - \Delta\sigma_{sl} - \Delta\sigma_{p,r,t,k};$$

A_c je plocha čistě betonové části průřezu;

$E_{cm(t_0)}$ je modul pružnosti betonu v čase vnesení předpětí $t = t_0$.

Posouzení zbytkového předpětí po okamžitých ztrátách: Napětí v předpínací výztuži po okamžitých ztrátách musí splňovat vztah (5.65), tzn. nesmí převyšovat limitní napětí pro předpínací výztuž v okamžiku vnesení předpětí.

$$\sigma_{p,ok} < \sigma_{p0,max}, \quad (5.65)$$

kde $\sigma_{p,ok}$ je napětí v předpínací výztuži po zohlednění okamžitých ztrát:

$$\sigma_{p,ok} = \sigma_{p,in} - \Delta\sigma_{sl} - \Delta\sigma_{p,r,t,k} - \Delta\sigma_{p,cc}.$$

5.9.2 Dlouhodobé

Z provozních ztrát v Tab. 4.1 zohledníme ztrátu dlouhodobou relaxací výztuže vyjádřenou pomocí vztahu (5.66), dotvarováním betonu dle vztahu (5.67) a ztrátu smrštění betonu, jejíž výpočet je uveden rovnicí (5.71).

Dlouhodobá relaxace výztuže: Jedná se o obdobný vztah jako pro výpočet krátkodobé relaxace, musíme však zohlednit rozdílný časový úsek.

$$\Delta\sigma_{p,r,t,\infty} = \alpha_{r1} \cdot \rho_{1000} \cdot \exp(\alpha_{r2} \cdot \mu) \cdot \left(\frac{t_d}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1-\mu)} \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_{p,ok}, \quad (5.66)$$

kde t_d je časové období od okamžiku vnesení předpětí do konce návrhové životnosti konstrukce v hodinách.

Dotvarování betonu:

$$\Delta\sigma_{p,c} = E_p \cdot \frac{\sigma_{cp}^{g+p}}{E_{cm(t_0)}} \cdot \varphi_{(t_\infty, t_0)}, \quad (5.67)$$

kde σ_{cp}^{g+p} je napětí v dolních krajních vláknech betonu od zatížení stálého a předpětí:

$$\sigma_{cp}^{g+p} = \frac{P}{A} + \frac{P \cdot e_p + M_{Gk}}{I_c} \cdot e_d,$$

kde M_{Gk} je vnitřní ohybový moment od stálého zatížení;

$E_{cm(t_0)}$ je sečnový modul pružnosti betonu v čase $t = t_0$;

$\varphi_{(t_\infty, t_0)}$ je součinitel dotvarování definující dotvarování mezi okamžiky t_∞, t_0 :

$$\varphi_{(t_\infty, t_0)} = \varphi_0 \cdot \beta_{c(t_\infty, t_0)},$$

kde φ_0 je základní součinitel dotvarování viz (5.68);

$\beta_{c(t_\infty, t_0)}$ je součinitel časového průběhu dotvarování viz (5.69).

Základní součinitel dotvarování:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta_{f_{cm}} \cdot \beta_{t_0}, \quad (5.68)$$

kde φ_{RH} je součinitel vlivu relativní vlhkosti,

pro $f_{cm} \leq 35$ MPa:

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH}{0,1 \cdot h_0^{1/3}};$$

pro $f_{cm} > 35$ MPa:

$$\varphi_{RH} = \left(1 + \frac{1 - RH}{0,1 \cdot h_0^{1/3}} \cdot \alpha_1 \right) \cdot \alpha_2,$$

kde $\alpha_1; \alpha_2$ jsou součinitelé vlivu pevnosti:

$$\alpha_1 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,7};$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,2},$$

kde f_{cm} je v jednotkách MPa;

$\beta_{f_{cm}}$ je součinitel vlivu pevnosti betonu:

$$\beta_{f_{cm}} = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}},$$

kde f_{cm} je v jednotkách MPa;

β_{t_0} je součinitel vlivu stáří betonu v okamžiku vnesení zatížení:

$$\beta_{t_0} = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,2}},$$

kde t_0 může být zde nahrazeno hodnotou $t_{0,c}$, viz (5.70).

Součinitel časového průběhu dotvarování:

$$\beta_{c(t_\infty, t_0)} = \left(\frac{t_d}{\beta_H + t_d} \right)^{0,3}, \quad (5.69)$$

kde t_d je ve dnech;

β_H je součinitel vlivu relativní vlhkosti (RH v %, h_0 v mm),

pro $f_{cm} \leq 35$ MPa:

$$\beta_H = 1,5 \left[1 + (0,012 \cdot RH)^{18} \right] h_0 + 250 \leq 1500;$$

pro $f_{cm} > 35$ MPa:

$$\beta_H = 1,5 \left[1 + (0,012 \cdot RH)^{18} \right] h_0 + 250 \cdot \alpha_3 \leq 1500 \cdot \alpha_3,$$

kde α_3 je součinitel vlivu pevnosti:

$$\alpha_3 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,5},$$

kde f_{cm} je v jednotkách MPa.

Stáří betonu v okamžiku vnesení zatížení t_0 ve vztahu (5.68) můžeme nahradit hodnotou $t_{0,c}$, pokud chceme zohlednit vliv druhu cementu na součinitel dotvarování betonu.

$$t_{0,c} = t_{0,T} \cdot \left(\frac{9}{2 + t_{0,T}^{1,2}} + 1 \right)^\alpha \geq 0,5, \quad (5.70)$$

kde α je mocnitel závisící na druhu cementu dle Tab. 5.10;

$t_{0,T}$ je stáří betonu ve dnech v okamžiku vnesení zatížení,

pro zohlednění i vlivu teplot v rozsahu 0°C až 80°C na zralost betonu:

$$t_{0,T} = \sum_{i=1}^n e^{-\frac{4000}{[273+T_{\Delta t_i}] - 13,65}} \cdot \Delta t_i,$$

kde $T_{\Delta t_i}$ je teplota ve °C během období Δt_i ;

Δt_i je počet dní, při převládající zvýšené či snížené teplotě T ;

pro zohlednění pouze vlivu druhu cementu:

$$t_{0,T} = t_0.$$

Tab. 5.10: Mocnitel α dle [10]

Mocnitel α dle druhu cementu		
Druh	Popis	α
S	Beton s pomalým vývojem pevnosti	-1
N	Beton s normálním vývojem pevnosti	0
R	Beton s rychlým vývojem pevnosti	1

Smršťování betonu:

$$\Delta\sigma_{p,s} = E_p \cdot (\varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}), \quad (5.71)$$

kde ϵ_{cd} je poměrné smrštění vysycháním v čase (t_∞, t_s) :

$$\epsilon_{cd} = \beta_{ds(t_\infty, t_s)} \cdot k_h \cdot \epsilon_{cd,0},$$

kde k_h je součinitel dle náhradního rozměru prvku, viz Tab. 5.11;

$\beta_{ds(t_\infty, t_s)}$ je součinitel vlivu začátku smrštění, viz (5.72);

$\epsilon_{cd,0}$ je hodnota neomezeného poměrného smrštění vysycháním, vztah pro výpočet viz (5.73);

ϵ_{ca} je poměrné autogenní smrštění:

$$\epsilon_{ca} = \beta_{as(t_\infty)} \cdot \epsilon_{ca(\infty)},$$

kde $\beta_{as(t_\infty)}$ je součinitel vlivu stáří betonového prvku:

$$\beta_{as(t_\infty)} = 1 - \exp(-0,2 \cdot t_\infty^{0,5});$$

$\epsilon_{ca(\infty)}$ je součinitel vlivu pevnosti betonu v tlaku:

$$\epsilon_{ca(\infty)} = 2,5(f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6},$$

kde f_{ck} v jednotkách MPa.

Tab. 5.11: Součinitel k_h dle [10, Tabulka 3.3]

Součinitel k_h dle náhradního rozměru h_0	
h_0	k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

Součinitel vlivu začátku smrštění:

$$\beta_{ds(t_\infty, t_s)} = \frac{t_\infty - t_s}{t_\infty - t_s + 0,04\sqrt{h_0^3}}, \quad (5.72)$$

kde t_s je stáří betonu při začátku smrštění ve dnech;

t_∞ je stáří betonu na konci životnosti prvku ve dnech.

Hodnota neomezeného poměrného smrštění vysycháním:

$$\epsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{10}) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}, \quad (5.73)$$

kde $\alpha_{ds1}; \alpha_{ds2}$ jsou součinitelé závisící na druhu cementu dle Tab. (5.12);

f_{cm} je v jednotkách MPa;

β_{RH} je součinitel vlivu relativní vlhkosti:

$$\beta_{RH} = 1,55 \left[1 - \left(\frac{RH}{1} \right)^3 \right].$$

Tab. 5.12: Součinitelé $\alpha_{ds1}; \alpha_{ds2}$ dle [10]

Součinitelé $\alpha_{ds1}; \alpha_{ds2}$ dle druhu cementu		
Druh	α_{ds1}	α_{ds2}
S	3	0,13
N	4	0,12
R	6	0,11

Hodnota předpětí na konci životnosti:

Pro účel posouzení návrhu je třeba vyjádřit předpětí na konci životnosti vztahem (5.74).

$$\sigma_{p,dl} = \sigma_{p,ok} - \Delta\sigma_{p,r,t,\infty} - \Delta\sigma_{p,c} - \Delta\sigma_{p,s}. \quad (5.74)$$

5.10 Posouzení MSP

5.10.1 Úvod

Posouzení MSP proběhne ve dvou okamžicích – v okamžiku vnesení předpětí a na konci životnosti, v krajních vláknech dvou kritických průřezů – v poli a v místě podpory. Z tohoto vyplývá, že se bude jednat o osm nerovnic, první čtyři (5.76–5.79) pro okamžik vnesení předpětí, další čtyři vztahy (5.81–5.84) pro okamžik na konci doby životnosti.

Limitující hodnoty jsou zavedeny dle požadavků na vznikající napětí či např. dle zvoleného stupně předpětí. Pro stádium předpínání je zvoleno omezené předpětí a v provozním stádiu varianta plného předpětí.

5.10.2 Okamžik vnesení předpětí

Jedná se o posouzení v okamžiku uvedení do provozu, a tedy stáří betonu je uvažováno hodnotou t_0 (okamžik vnesení předpětí) a ztráty předpětí jsou uvažovány pouze okamžité.

Hodnota normálové síly od předpětí v okamžiku vnesení zatížení se vypočte pomocí vztahu (5.75).

$$N_{p,ok} = A_p \cdot \sigma_{p,ok}. \quad (5.75)$$

Průřez v místě podpory

Horní krajní vlákna:

$$\frac{N_{p,ok}}{A} + \frac{N_{p,ok} \cdot e_p}{W_h} \leq f_{ctm(t_0)}. \quad (5.76)$$

Dolní krajní vlákna:

$$\frac{N_{p,ok}}{A} + \frac{N_{p,ok} \cdot e_p}{W_d} \geq -0,7f_{ck(t_0)}. \quad (5.77)$$

Průřez ve středu pole

Horní krajní vlákna:

$$\frac{N_{p,ok}}{A} + \frac{N_{p,ok} \cdot e_p}{W_h} + \frac{M_{g0k}}{W_h} \geq -0,7f_{ck(t_0)}. \quad (5.78)$$

Dolní krajní vlákna:

$$\frac{N_{p,ok}}{A} + \frac{N_{p,ok} \cdot e_p}{W_d} + \frac{M_{g0k}}{W_d} \leq f_{ctm(t_0)}. \quad (5.79)$$

5.10.3 Na konci životnosti

Tentokrát se jedná o posouzení v okamžiku na konci životnosti, a tedy stáří betonu je uvažováno hodnotou t_∞ a zahrnuty jsou jak okamžité, tak i dlouhodobé ztráty předpětí.

Hodnota normálové síly od předpětí na konci životnosti se vypočte pomocí vztahu (5.80).

$$N_{p,dl} = A_p \cdot \sigma_{p,dl}. \quad (5.80)$$

Průřez v místě podpory

Horní krajní vlákna:

$$\frac{N_{p,dl}}{A} + \frac{N_{p,dl} \cdot e_p}{W_h} \leq 0. \quad (5.81)$$

Dolní krajní vlákna:

$$\frac{N_{p,dl}}{A} + \frac{N_{p,dl} \cdot e_p}{W_d} \geq -0,6f_{ck}. \quad (5.82)$$

Průřez ve středu pole

Horní krajní vlákna:

$$\frac{N_{p,dl}}{A} + \frac{N_{p,dl} \cdot e_p}{W_h} + \frac{M_{char}}{W_h} \geq -0,6f_{ck}. \quad (5.83)$$

Dolní krajní vlákna:

$$\frac{N_{p,dl}}{A} + \frac{N_{p,dl} \cdot e_p}{W_d} + \frac{M_{kvaz}}{W_d} \leq 0. \quad (5.84)$$

5.11 Posouzení MSÚ

5.11.1 Ohyb a normálová síla

Základní podmínkou jest vztah (5.85), jedná se o posouzení návrhové hodnoty působícího vnitřního ohybového momentu vůči ohybovému momentu únosnosti. Posouzení a následné ověření zplastizování výztuže je uskutečněno stejným postupem, jako tomu je v publikaci [4].

$$M_{Ed} \leq M_{Rd}, \quad (5.85)$$

kde $M_{Rd} = F_{pd} \cdot z,$

kde F_{pd} je síla únosnosti předpínací výztuže:

$$F_{pd} = A_p \cdot f_{pd};$$

z je rameno vnitřních sil:

$$z = |e_h| + e_p - e_{\lambda \cdot x},$$

kde $e_{\lambda \cdot x}$ je vzdálenost těžiště tlačené oblasti od horních vláken.

Vztah (5.86) je odvozeným vztahem pro výpočet výšky tlačené oblasti, jenž je potřebný pro určení $e_{\lambda \cdot x}$.

$$x = \frac{F_{pd}}{b \cdot \lambda \cdot f_{cd}}, \quad (5.86)$$

kde λ je součinitel pro účinnou výšku tlačené oblasti s hodnotou 0,8 pro beton běžné pevnosti.

Pro výpočet momentu únosnosti zavádíme předpoklad zplastizování předpínací výztuže při dosažení mezního přetvoření betonu. Tento předpoklad je nyní nutné ověřit pomocí vztahu (5.87), a to porovnáním celkového přetvoření předpínací výztuže $\sum \varepsilon_p$ při dosažení mezního přetvoření betonu s mezním přetvořením předpínací výztuže ε_{pu} , kdy dochází k jejímu zplastizování, a tedy:

$$\sum \varepsilon_p \geq \varepsilon, \quad (5.87)$$

kde $\sum \varepsilon_p$ je celkové přetvoření předpínací výztuže při mezním přetvoření betonu, viz (5.88);

ε_{pu} je mezní přetvoření, kdy dochází ke zplastizování předpínací výztuže:

$$\varepsilon_{pu} = \frac{f_{pd}}{E_p}.$$

Vztah pro celkové přetvoření předpínací výztuže při mezním přetvořením betonu:

$$\sum \varepsilon_p = \varepsilon_c^p + \varepsilon_p + \Delta \varepsilon_p, \quad (5.88)$$

kde ε_c^p je přetvoření betonu v místě předpínací výztuže:

$$\varepsilon_c^p = \frac{\sigma_c^p}{E_{cm}},$$

kde σ_c^p je napětí od předpínací síly v jejím působišti na konci životnosti:

$$\sigma_c^p = \frac{N_{p,dl}}{A} + \frac{N_{p,dl} \cdot e_p}{W_{e_p}},$$

kde W_{e_p} je průřezový modul v působišti předp. síly:

$$W_{e_p} = \frac{I_c}{e_p};$$

ε_p je přetvoření předpínací výztuže od předpínání:

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_{p,dl}}{E_p};$$

$\Delta\varepsilon_p$ je přírůstek poměrného přetvoření výztuže na mezi únosnosti:

$$\Delta\varepsilon_p = \frac{\varepsilon_{cu}}{\lambda \cdot x} \cdot (d_p^h - x),$$

kde x je výška tlačené oblasti viz (5.86);

d_p^h je nejkratší vzdálenost mezi polohou předpínací výztuže a horních krajních vláken;

λ je součinitel s hodnotou 0,8;

ε_{cu} je absolutní mezní přetvoření betonu v tlaku roven 3,5 ‰.

5.11.2 Smyk

Nejdříve je třeba vztahu (5.89) pro vyjádření návrhové posouvající síly.

$$V_{Ed} = \frac{1}{2} \cdot f_{Ed} \cdot L. \quad (5.89)$$

Dále vztah pro výpočet napětí od předpínací síly na konci životnosti v těžišti průřezu viz (5.90).

$$\sigma_c^t = \frac{N_{p,dl}}{A}. \quad (5.90)$$

A posouzení návrhové posouvající síly skrze nerovnici (5.91) převzaté z publikace [4], pokud nebude této podmínce vyhověno, musí se navrhnout konkrétní smyková výztuž, nepostačí pouze konstrukční.

$$\tau_{cp} \leq f_{c,d}, \quad (5.91)$$

kde τ_{cp} je smykové napětí na konci životnosti:

$$\tau_{cp} = k \cdot \frac{V_{Ed}}{A},$$

kde k je součinitel zohledňující průměr předpínací výztuže:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_p}} \leq 2, \quad d_p \text{ je v jednotkách mm;}$$

f_{cvd} je návrhová smyková pevnost,

pro $\sigma_c^t \leq \sigma_{c,lim}$:

$$f_{cvd} = \sqrt{f_{ctd}^2 + \sigma_c^t \cdot f_{ctd}};$$

pro $\sigma_c^t > \sigma_{c,lim}$:

$$f_{cvd} = \sqrt{f_{ctd}^2 + \sigma_c^t \cdot f_{ctd} - \left(\frac{\sigma_c^t - \sigma_{c,lim}}{2} \right)^2}.$$

6 Výpočetní aplikace

6.1 Úvod

V této části je popsána vytvořená výpočetní aplikace a její grafická podoba ve fázích 0.–IV. tak, jak je postupně uživateli po spuštění odkrývána. Podoba aplikace po dokončení návrhu předem předpjatého betonového vazníku je k vidění na Obr. 6.1.

Nejnovější verze výpočetní aplikace je volně dostupná na internetové adrese [14].

6.2 Vývoj

Páteří výpočetní aplikace je zdrojový kód napsaný pomocí stále vyvíjeného programovacího jazyka Python [8] v distribuci Anaconda [1].

Při výběru programovacího prostředí bylo rozhodující: fakt, že se jedná o freeware, možnost využití konkrétních knihoven pro posunutí skriptu na vyšší úroveň, příjemné grafické uživatelské rozhraní poskytnuté skrze modul Tkinter. Mezi zmíněné, subjektivně shledané za obohacující, knihovny řadím: Math pro matematické funkce, NumPy pro práci s vícerozměrovými poli, Matplotlib, jakožto vykreslovací knihovna pro tvorbu grafů, a Python Imaging Library pro užití obrázkových souborů.

Získávání znalostí ve vývoji výpočetní aplikace, případné nalezení řešení problému a nacházení různých vylepšení umožňují naučná videa [3], nápomocné návody a popisy [7], též v mnoha případech webové poradny [12], [13] aj.

♡ Návrh předmět předpětého betonového vazníku Meziúspěchy

➤ Návrh předmět předpětého betonového vazníku

Kvalita použitého materiálu:

f_{ck} = 40 MPa ?
 $f_{ck,k}$ = 50 MPa ?
 f_{pk} = 1770 MPa ?
 $f_{p0,0k}$ = 1570 MPa ?
 f_{yk} = 500 MPa ?

Prozdutinost betonu $\leq 4\%$
 Třída cementu: N ?

Konstrukce:
 L = 12 m ?
 l = 4 m ?

Geometrie průřezu:
 $Výška h$ = 1000 mm
 $Šířka b$ = 300 mm

Nechat si napovídat dle empirie

Zatížení, vliv prostředí a konstrukce:
 Stupeň vlivu prostředí: XC1 B
 Kategorie zatížení: I II III

Objemová tíha betonu: 25 kN/m³
 Plošná tíha panelů: 1.5 kN/m²
 Ostatní stálé zatížení: 1.2 kN/m²
 Účinné zatížení: 2.5 kN/m²

Výztuž a kryté:
 Výztuž: Předpínací Betonářská
 Průměr: 15 12 mm
 Kryté: 35 20 mm
 Maximální průměr kameniva: 16 mm

Podrobně stanovit krytí

I. Vložen vstupních hodnot & k návrhu předpětí

Změnit na průřez v podpoře

Návrh předpětí:
 Stáří betonu v čase vnesení předpětí: 5 dny
 Zvolená excentricita: 160 mm
 Min. množství výztuže: 7 ks
 Zvolené množství: 7 ks
 Předpínací síla (1 ks): 235 kN
 Celkem pro 7 ks: 1646 kN

Ověření pevnostní třídy betonu:
 Indikativní pevnostní třída: C 16/20
 Požadavek je splněn!

Předběžná kontrola mezích stavů:
 Napětí při kvazistálé kombinaci: 7.7 MPa
 Hranici napětí pro uvažování lineárního dobruování: 18.0 MPa

Posouzení: [MPa]
 $7.7 < 18.0$

Můžeme uvažovat lineární dobruování
 Zvolená výška vyhovuje

Posouzení MSJ:
 Napětí ve výztuži při předpínání je v dovolených mezích
 Z hlediska ohybové únosnosti návrh vyhovuje
 Z hlediska smykové únosnosti postačí konstrukční smyková výztuž

Posouzení MSJ

III. Výpočet ztrát & posouzení

Ztráty předpětí:
 Modul pružnosti předpínací výztuže: 195 GPa
 Pokluz v kotvení bloku: 2.5 mm
 Relaxační ztráta po 1000 h od napnutí: 2.5 %
 Stáří betonu v čase vnesení předpětí: 5 dny
 Zohlednit vliv třídy cementu na součinitel dobruování?
 Zohlednit vliv extrémních teplot (0 - 80 °C) na ztrát betonu?

Teplota během období / Δt : °C
 Počet dní, v nichž převládá teplota T: dny
 Stáří betonu při začátku smíršťování: 5 let
 Návrhová životnost prvku: 50 let
 Relativní vlhkost okolního prostředí: 60 %
 Mezi přetvoření betonu v tlaku (abs): 0.35 %

Výsledný návrh:

Ztráty předpětí = 28 % předpínací síly

polož v kotvení bloku
 relaxační ztráta
 pružné přetvoření betonu
 vzhledem k časnému dobruování
 smíršťování betonu

Předpínací výztuž dosáhne zplstňování při umístění předpínací výztuže min. 360 mm od horních krajních vláken

Návrh z hlediska napětí v předpínací výztuži po laděcích ztrátách vyhovuje

Výhovuje z hlediska grafického řešení z diagramu

$oc.d.0 \geq -0.7 \cdot f_{ctk(0)}$
 $oc.d.0 \leq f_{ctm(0)}$
 $oc.h.0 \geq -0.6 \cdot f_{ck}$
 $oc.d.0 \leq 0$
 dolní hranice výstřednosti (e_d)
 horní hranice výstřednosti (e_s)
 $1/2P$ (e)
 zvolená excentricita
 finální návrh e_s a P_0
 nejnižší hodnota P_0 ve zvolené e_b
 oblast možných řešení

Obr. 6.1: Náhled aplikace po ukončeném návrhu

6.3 Fáze 0. Vstupní hodnoty

Po spuštění programu se uživateli zobrazí počáteční verze hlavního okna, viz Obr. 6.2, určená k zadání základních vstupů pro přechod k návrhu předpětí. Tyto základní vstupy jsou tématicky rozdělené do jednotlivých rámcových polí pro snazší orientaci, rámcová pole jsou dále popsána.

Návrh předem předpjatého betonového vazníku

Mezivýpočty

Návrh předem předpjatého betonového vazníku

Kvality použitého materiálu:

f_{ck} = MPa ?

$f_{ck,k}$ = MPa ?

f_{pk} = MPa ?

f_{p02k} = MPa ?

f_{yk} = MPa ?

Provozdušněnost betonu $\geq 4\%$

Třída cementu: ?

Konstrukce:

L = m ?

l = m ?

Geometrie průřezu:

Výška h = mm

Šířka b = mm

I. Vložení vstupních hodnot & k návrhu předpětí

Nechat si napovědět dle empirie

Zatížení, vliv prostředí a konstrukce:

Stupeň vlivu prostředí:

Kategorie zatížení:

Objemová tíha betonu: kN/m³

Plošná tíha panelů: kN/m²

Ostatní stálé zatížení: kN/m²

Užité zatížení: kN/m²

Návrh předpětí:

Stáří betonu v čase vnesení předpětí: dny

Výztuž a krytí:

Výztuž Předpinací Betonářská

Průměr: mm

Krytí: mm

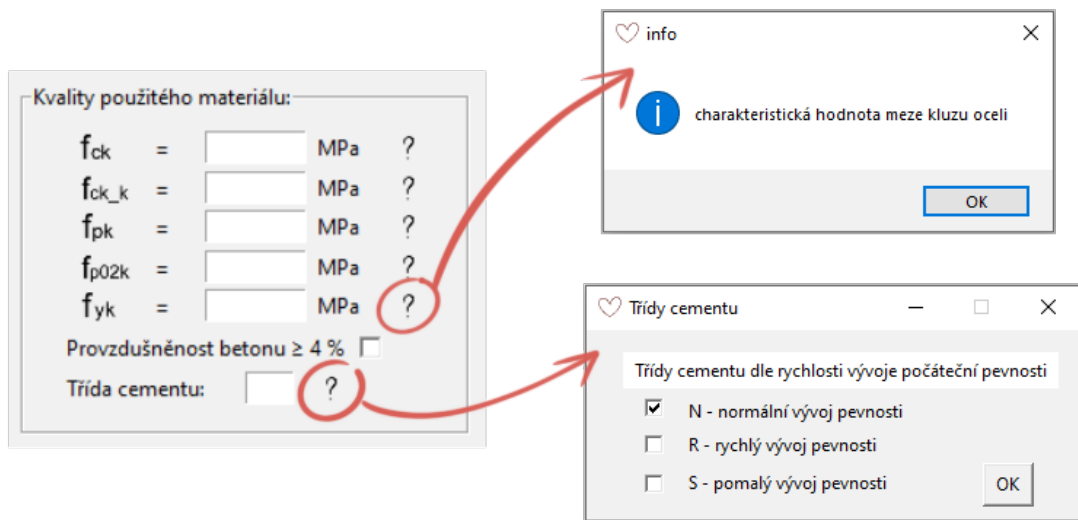
Maximální průměr kameniva: mm

Podrobně stanovit krytí

Obr. 6.2: Okno aplikace po spuštění

Kvality použitého materiálu

Rámcové pole *Kvality použitého materiálu* slouží pro definování materiálových charakteristik zvoleného materiálu, tj. betonu a oceli pro předpinací i betonářskou výztuž, mimo jiné i rozhodnutí o provozdušněnosti betonu. Požadovaný formát vstupu plyne z jednotek vedle polí. Je-li jinak, informaci získáme skrze kliknutí na ikonu otazníku poblíž. Zpravidla ikona "?" obsahuje popis veličiny, nebo např. u třídy cementu se nabízí její možné hodnoty pro zapsání. Popsané skutečnosti jsou k nahlédnutí na Obr. 6.3.

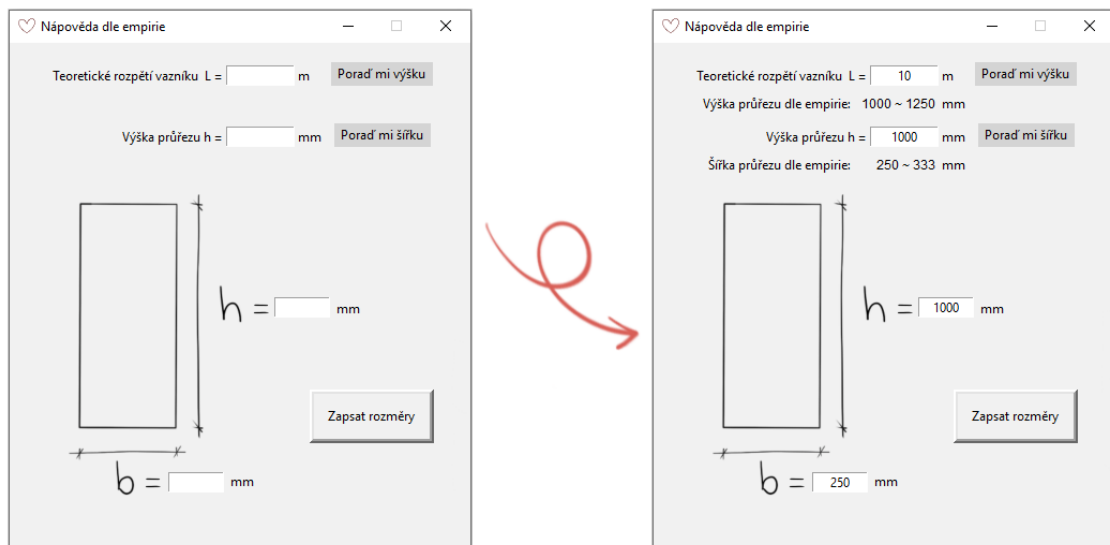
Obr. 6.3: Pole *Kvality použitého materiálu*

Geometrie průřezu a konstrukce

Geometrii průřezu a konstrukce určíme ve stejnojmenných polích (viz Obr. 6.4). I zde se nachází ikony otevírající okno s dovysvětlením veličiny.

Obr. 6.4: Pole *Konstrukce* a *Geometrie průřezu*

Při navrhování výšky a šířky průřezu může být využito možnosti uplatnění vztahů vycházející z empirie. Okno otevírající se skrze tlačítko "*Nechat si napovědět dle empirie*" je zobrazeno v nevyplněném i ve vyplněném stavu na Obr. 6.5.

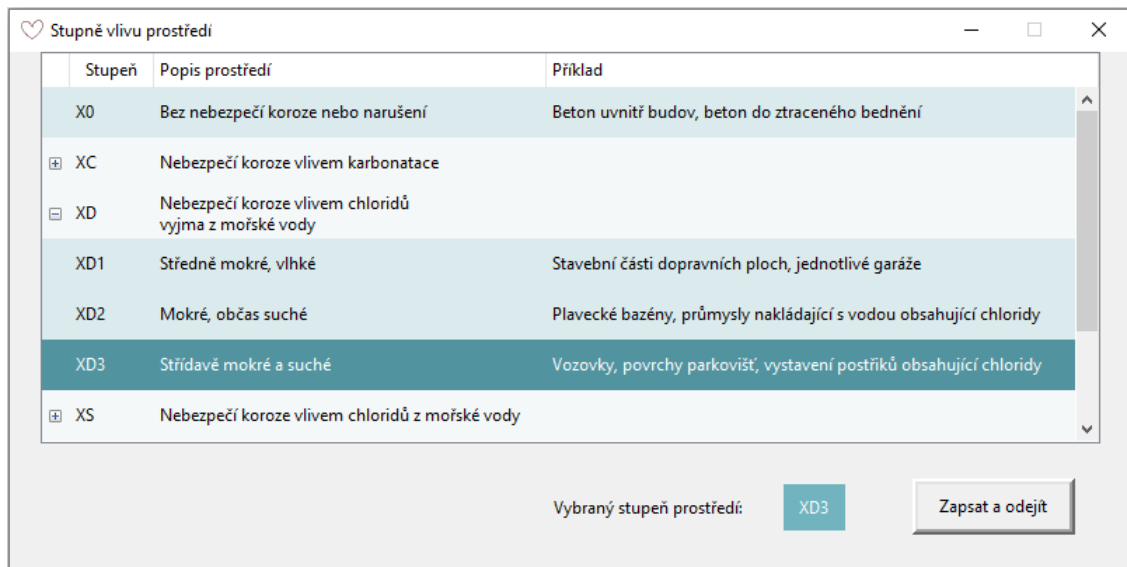
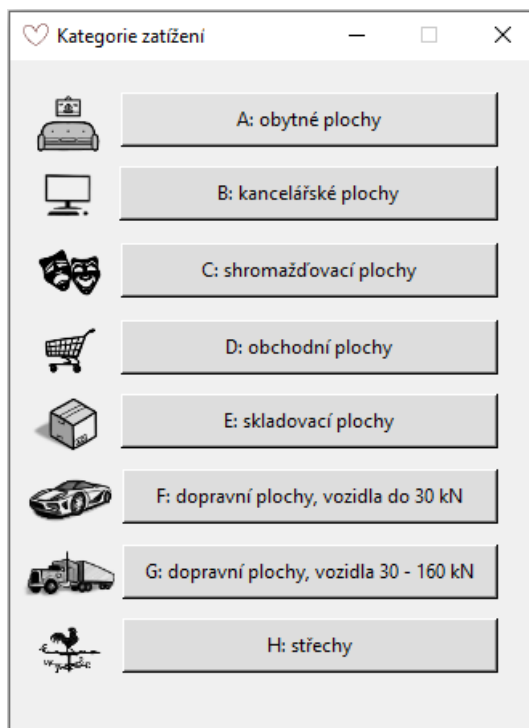
Obr. 6.5: Okno *Nápověda dle empirie*, nevyplněné vlevo, vyplněné vpravo

Zatížení, vliv prostředí a konstrukce

V rámcovém poli *Zatížení, vliv prostředí a konstrukce* se definuje stupeň vlivu prostředí a kategorie zatížení, objemová tíha betonu a dále zde může být, při zatržení příslušného potvrzovacího pole, zavedena i další zatížení než-li pouze zatížení vlastní tíhou vazníku. Vzhled pole viz Obr. 6.6.

Obr. 6.6: Pole *Zatížení, vliv prostředí a konstrukce*

Při zadávání stupně vlivu prostředí může být využito horního šrafovaného tlačítka, které otevře okno s výčtem stupňů vlivů prostředí dle platné normy a krátkých charakteristik ke každému z nich. Na ukázkou je zobrazen náhled okna při volbě stupně XD3 na Obr. 6.7. Totéž platí pro zadávání kategorie zatížení. Skrze šrafované tlačítko vedle pole pro vložení hodnoty se zpřístupní okno s výčtem kategorií zatížení, viz Obr. 6.8.

Obr. 6.7: Náhled okna *Stupně vlivu prostředí* při volbě XD3Obr. 6.8: Náhled okna *Kategorie zatížení*

Výztuž a krytí

Pro zavedení průměru a krytí výztuže, jak betonářské, tak i předpínací, slouží pole *Výztuž a krytí* (Obr. 6.9). Mimo jiné se zde uvádí hodnota maximálního průměru kameniva.

	Výztuž	Předpínací	Betonářská	
Průměr:	<input type="text"/>	<input type="text"/>		mm
Krytí:	<input type="text"/>	<input type="text"/>		mm
Maximální průměr kameniva:	<input type="text"/>			mm

Podrobně stanovit krytí

Obr. 6.9: Pole *Výztuž a krytí*

Výpočetní aplikace skýtá možnost podrobného stanovení betonové krycí vrstvy. Skrze tlačítko *Podrobně stanovit krytí*, viz Obr. 6.9, se otevře příslušné pomocné okno. Pomocné okno zprvu nezobrazí nic, než-li rozbalovací menu pro výběr výztuže, které se podrobné stanovení tloušťky krycí vrstvy týká. Tento okamžik je společně s náhledem okna po výběru varianty stanovení krytí pouze pro předpínací výztuž zobrazen na Obr. 6.10.

Obr. 6.10: Okno *Podrobné stanovení krytí*, vlevo při volbě varianty, vpravo po předpínací výztuž

V pomocném okně je vždy předvyplněná třída konstrukce. K vysvětlení slouží opět ikona otazníku sousedící. Zpřístupněné okno a posouzení související je zobrazeno na Obr. 6.11.

Obr. 6.11: Vysvětlující a doplňující okna *Podrobného stanovení krytí*

Při zatržení úpravy třídy konstrukce ve zpřístupněném okně dojde k rozšíření vyžadující další, podrobnější informace o konstrukci. Vyplněné a takto rozšířené okno s výslednou hodnotou krytí je zachyceno na Obr. 6.12.

Obr. 6.12: Okno *Podrobné stanovení krytí* s finálním návrhem

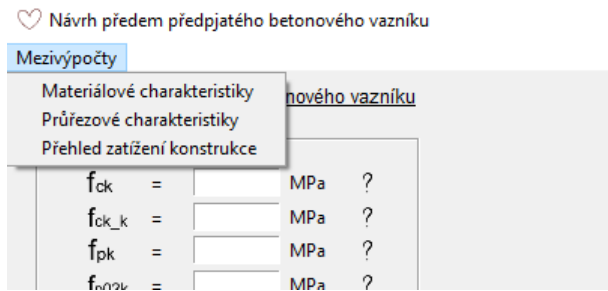
První údaj o předpětí

Pro postup v aplikaci k návrhu předpětí a vykreslení grafů (o nichž později) musí být zadána informace o čase vnesení předpětí vzhledem ke stáří betonu. Prostor pro zadání této informace se nachází v poli *Návrh předpětí* (Obr. 6.13). Pole je zatím nerozvinuté, v plné šíři bude zobrazeno v další kapitole.

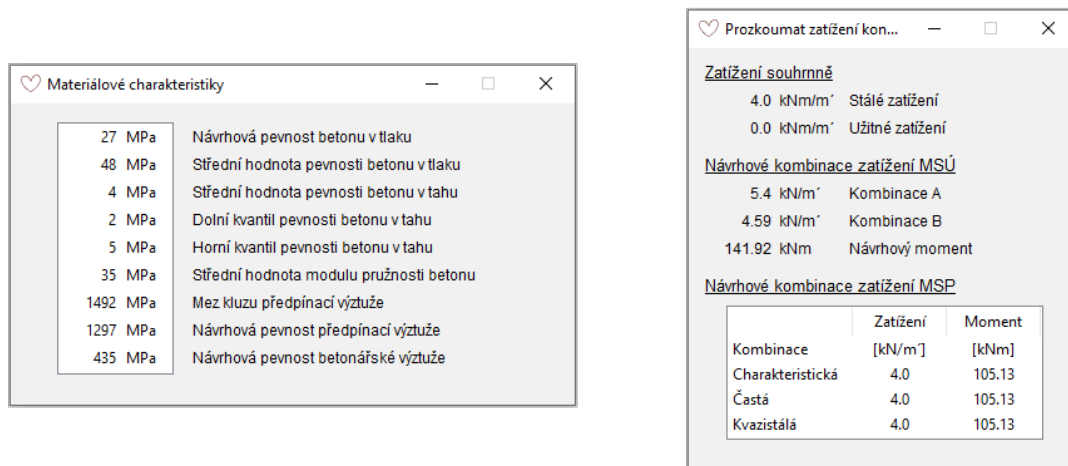
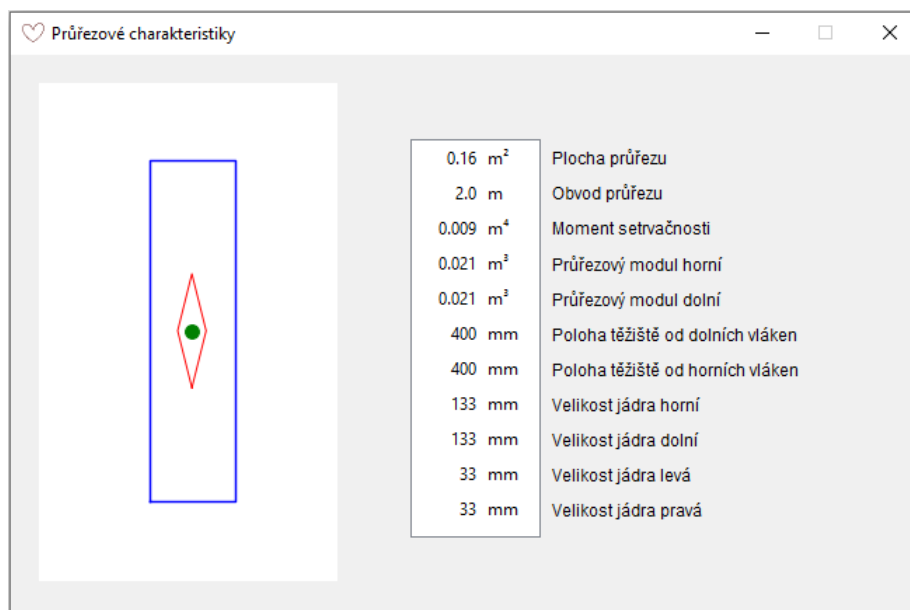
Obr. 6.13: Pole *Návrh předpětí* ve fázi I.

Mezivýpočty

Na konci fáze 0. jsou k dispozici mezivýpočty aplikace. Mohou posloužit jako forma kontroly či zpětné vazby zadaných vstupních hodnot. Nabídka mezivýpočtů k zobrazení je v rozbalovacím menu v liště hlavního okna viz Obr. 6.14. Na Obr. 6.15 jsou mezivýpočty týkající se materiálových charakteristik a zatížení konstrukce, na Obr. 6.16 týkající se průřezových charakteristik.



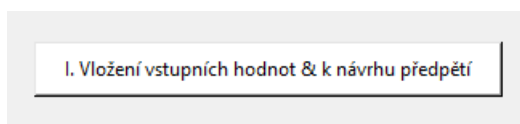
Obr. 6.14: Náhled na menu mezivýpočtů

Obr. 6.15: Vedlejší okno *Materiálové charakteristiky* vlevo a *Přehled zatížení*Obr. 6.16: Vedlejší okno *Průřezové charakteristiky*

6.4 Fáze I. Vložení vstupních hodnot & k návrhu předpětí

Vložení vstupních hodnot

Fáze I. začíná potvrzením fáze 0. *Vstupní hodnoty* pomocí tlačítka *I. Vložení vstupních hodnot & k návrhu předpětí* viz Obr. 6.17, tak dojde k zapsání hodnot do skriptu aplikace na pozadí a může být zahájena specifikace předpětí vazníku. Pokud některé zadávací pole zůstalo při stisknutí tlačítka prázdné, či pokud hodnota vložená byla špatného formátu, pozadí zadávacího pole mající tento problém zčervená, jak je vidno na Obr. 6.18. Za označením špatný formát se skrývá: malá písmena namísto velkých písmen, psaní desetinné čárky namísto desetinných teček, desetinná čísla pro hodnoty veličin typicky o číslech celých a záměna číslovek za slovní vyjádření. Tento mechanismus platí pro jakékoliv další zadávací pole.



Obr. 6.17: Tlačítko *I. Vložení vstupních hodnot & k návrhu předpětí*

Ukázkový příklad zadání špatného a správného formátu vstupu. Snímek zachycuje dva stavy okna 'Zatížení, vliv prostředí a konstrukce'. Červená šipka ukazuje na změny mezi oběma stavy.

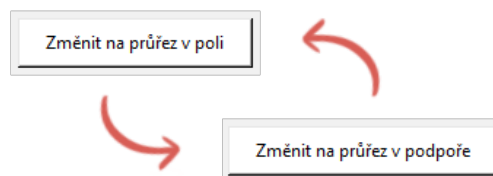
Zatížení, vliv prostředí a konstrukce:	
Stupeň vlivu prostředí:	XS2
Kategorie zatížení:	a
Objemová tíha betonu:	dvacet kN/m ³
<input checked="" type="checkbox"/> Plošná tíha panelů:	2 kN/m ²
<input checked="" type="checkbox"/> Ostatní stálé zatížení:	1,2 kN/m ²
<input checked="" type="checkbox"/> Užité zatížení:	2.5 kN/m ²

Zatížení, vliv prostředí a konstrukce:	
Stupeň vlivu prostředí:	XS2
Kategorie zatížení:	a
Objemová tíha betonu:	dvacet kN/m ³
<input checked="" type="checkbox"/> Plošná tíha panelů:	2 kN/m ²
<input checked="" type="checkbox"/> Ostatní stálé zatížení:	1,2 kN/m ²
<input checked="" type="checkbox"/> Užité zatížení:	2.5 kN/m ²

Obr. 6.18: Ukázkový příklad zadání špatného a správného formátu vstupu

Při úspěšném potvrzení fáze 0. se základní okno aplikace doplní, jak je zobrazeno na Obr. 6.19, o ověření pevnostní třídy betonu, předběžnou kontrolu mezních stavů a o velmi důležitý diagram. Diagram vychází z konkrétních požadavků na předpětí sloužící k návrhu parametrů předpětí. Tyto parametry se zadávají do rozšířeného rámcového pole *Návrh předpětí* a v průběhu fáze I. dochází k jejich grafickému posouzení zanesením do diagramu.

Obr. 6.19: Okno aplikace po potvrzení fáze 0.



Obr. 6.20: Tlačítka pro změnu náhledu diagramu

Předběžná kontrola vstupních hodnot

Rámcová pole *Ověření pevnostní třídy betonu* a *Předběžná kontrola mezních stavů* slouží jako prvotní zpětná vazba návrhu. Pole obsahují informace a hodnoty pro posouzení relevantní. Pokud by některá z posouzení nevyhovovala, musí se související vstupní hodnoty návrhu upravit. Při nesplnění indikativní pevnostní třídy se musí zvolit beton o vyšší pevnostní třídě. Trochu složitější je to u modifikace vstupních hodnot při nepříznivém výsledku předběžného posouzení mezních stavů, výsledné stanovisko ovlivňuje působící zatížení, délka vazníku, geometrie průřezu a pevnost betonu v tlaku. Níže je zachycen detail obou polí, tentokrát s kladným výsledkem posouzení, Obr. 6.21.

Ověření pevnostní třídy betonu:

Indikativní pevnostní třída: C 35 / 45

Požadavek je splněn!

Předběžná kontrola mezních stavů:

Napětí při kvazistálé kombinaci: 5.5 MPa

Napětí při charakteristické: 7.5 MPa

Napětí na mezi vzniku trhlin: 24.0 MPa

Hraniční napětí pro uvažování lineárního dotvarování: 18.0 MPa

Posouzení:	[MPa]
5.5 < 18.0	7.5 < 24.0

Nevznikají podélné trhliny
Můžeme uvažovat lineární dotvarování
Zvolená výška vyhovuje

Obr. 6.21: Rámcová pole *Ověření pevnostní třídy betonu* a *Předběžná kontrola mezních stavů*

Návrh předpětí

Při splnění podmínek ve věci předběžné kontroly vstupních hodnot následuje návrh předpětí. K tomu slouží nově rozvinuté stejnojmenné rámcové pole a nápomocné jsou též diagramy vycházející z metody návrhu předpětí. Prvně je při spuštění fáze I. zobrazen diagram platný pro průřez uprostřed rozpětí, jenž můžeme jednoduše pomocí stisknutí tlačítka *Změnit na průřez v místě podpory* vystřídat za diagram pro průřez v místě podpory a vice versa.

V rozvinutém poli *Návrh předpětí* se zadá hodnota excentricity působíště předpínací síly a množství předpínací výztuže. Intuitivně se zde postupně zadané hodnoty potvrzují sousedícími tlačítky. První tlačítko *vlož* zpřístupní informaci o minimálním množství výztuže a následně nabízené tlačítko *graf* po zadání množství výztuže zobrazí informace o předpínací síle a prvotní verzi rámcového pole *Posouzení MSÚ*. Dále doplní diagram o konkrétní návrh předpětí. Počáteční a výsledná, vyplněná konfigurace pole *Návrh předpětí* jsou zachyceny na Obr. 6.22. Pole *Posouzení MSÚ* bude popsáno až ve své finální podobě ve fázi III.

Návrh předpětí:

Stáří betonu v čase vnesení předpětí: dny

Zvolená excentricita: mm

Min. množství výztuže: ks

Zvolené množství: ks

Návrh předpětí:

Stáří betonu v čase vnesení předpětí: dny

Zvolená excentricita: mm

Min. množství výztuže: ks

Zvolené množství: ks

Předpínací síla (1 ks): kN

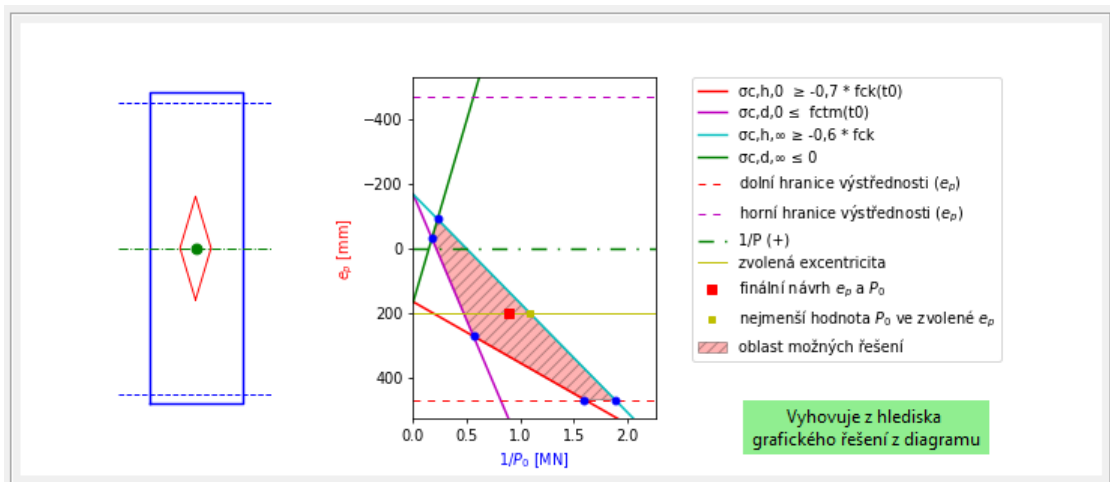
Celkem pro 3 ks: kN

Obr. 6.22: Pole *Návrh předpětí* před vyplněním vlevo, po vyplnění vpravo

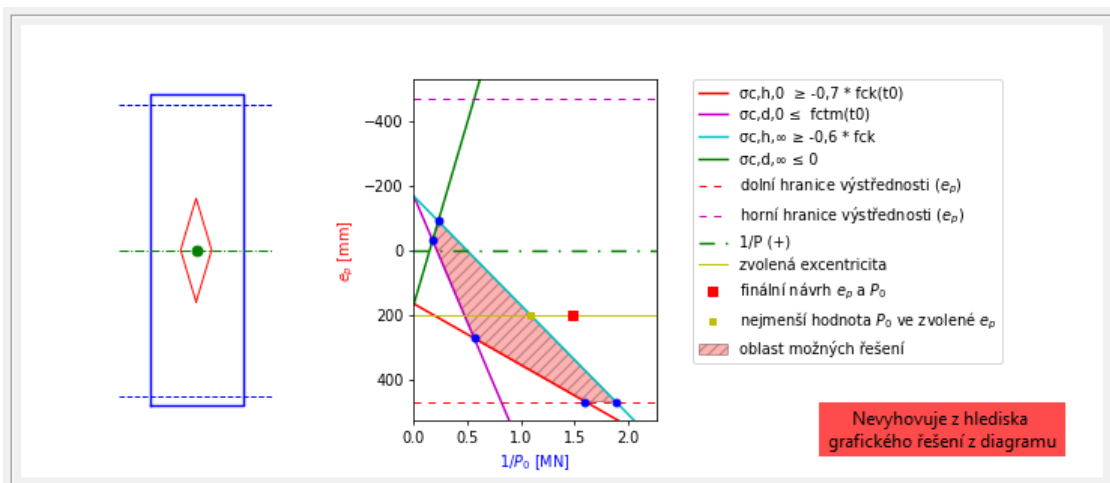
Zmíněné diagramy, každý s vysvětlující legendou, jsou součástí vykreslovacího pole zobrazeného v rámci fáze I. Pro kontext s dosavadním návrhem je nalevo od diagramu vykreslován průřez vazníku s těžištěm, jádrem průřezu a přímkami ohraničující největší možnou vertikální excentri-

citu předpínací výztuže vzhledem k příslušné krycí betonové vrstvě.

Vykreslovací pole s diagramem doplněným o vyhovující návrh předpětí je zobrazeno na Obr. 6.23 a o nevyhovující návrh předpětí na Obr. 6.24. Jelikož se pro koncové uživatele jedná pouze o grafické znázornění matematických rovnic, nerovnic a veličin, je zde doplněn výrok o vyhovění všem zavedeným podmínkám na konkrétní diagram se vztahující. Výrok je zobrazován po vložení návrhu tlačítkem *graf*. Kontrolu obou kritických míst musí proběhnout zvlášť.



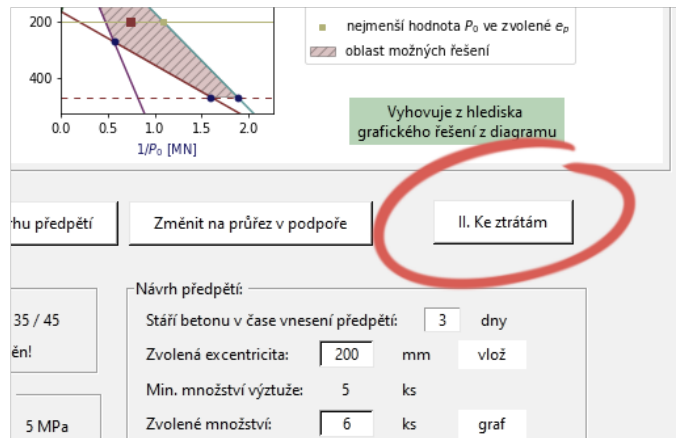
Obr. 6.23: Vykreslovací pole – průřez a diagram při vyhovujícím návrhu



Obr. 6.24: Vykreslovací pole – průřez a diagram při nevyhovujícím návrhu

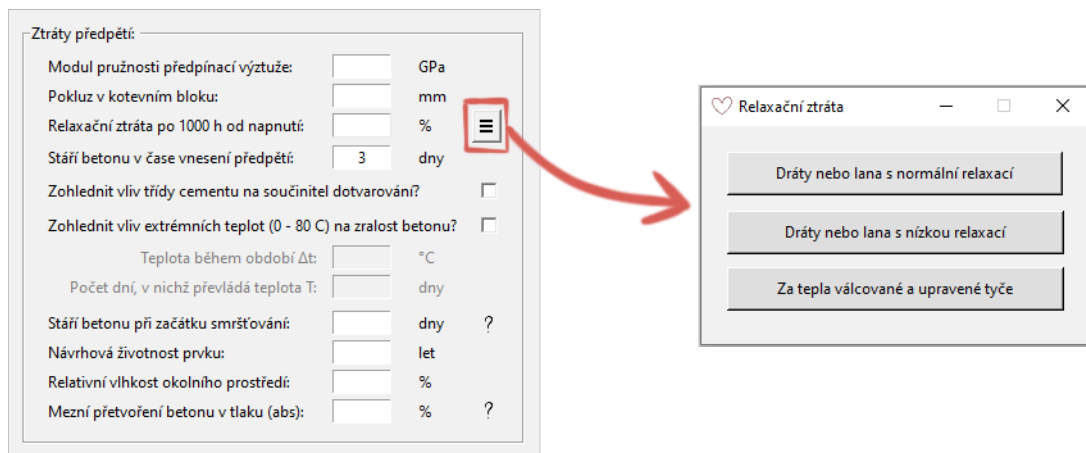
6.5 Fáze II. Ke ztrátám

Po úspěšném dokončení návrhu předpětí se zobrazí tlačítko *II. Ke ztrátám* vyznačeno na Obr. 6.25, pomocí něhož se opět hlavní okno aplikace rozšíří a tlačítko samotné zanikne.



Obr. 6.25: Označené tlačítko II. Ke ztrátám

Další rozšíření hlavního okna s sebou nese zobrazení nového rámcového pole *Ztráty předpětí* viz Obr. 6.26. Zde je naprogramováno převzetí hodnoty o stáří betonu v čase vnesení předpětí, která má zůstat neměnná. Šrafované pole tentokrát nabízí okno vyžadující výběr jedné z možností relaxačních tříd pro předpínací výztuž (Obr. 6.26).

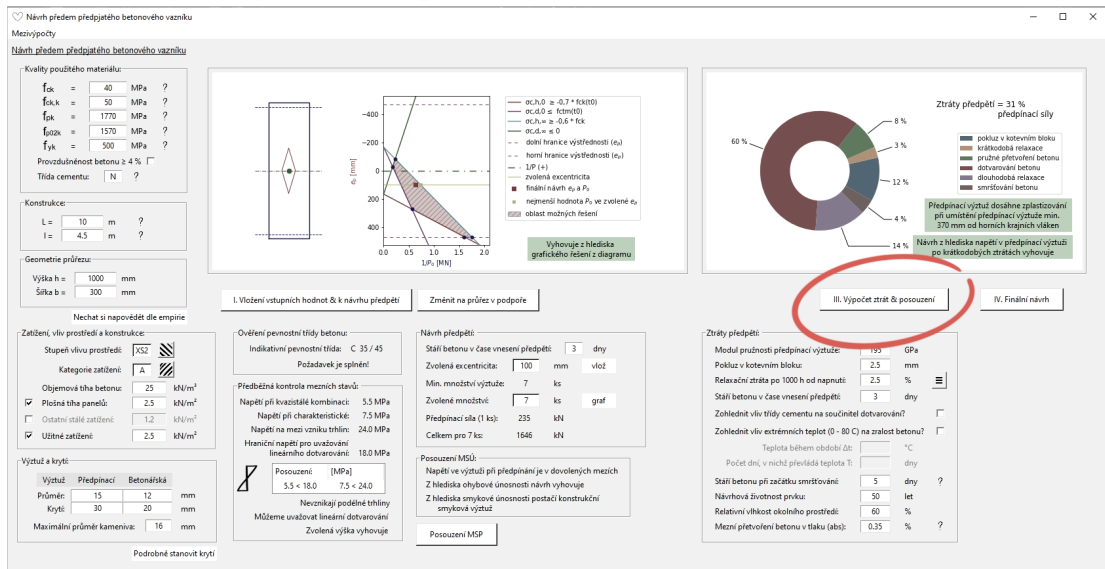
Obr. 6.26: Pole *Ztráty předpětí* a vyskakovací okno výběru relaxační třídy

6.6 Fáze III. Výpočet ztrát & posouzení

Výpočet ztrát

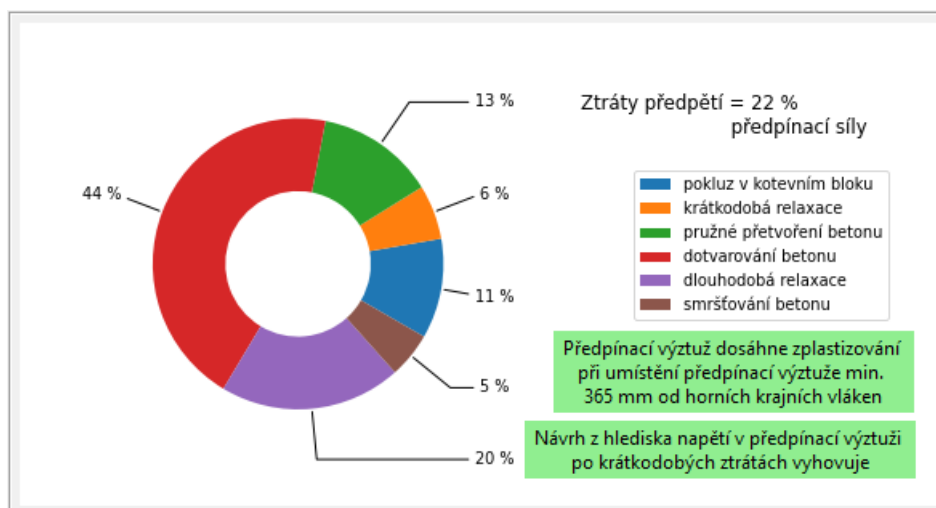
Před spuštěním fáze III. je ukončené definování veličin pro výpočet ztrát. K výpočtu a potvrzení hodnot slouží tlačítko III. *Výpočet ztrát & posouzení*, to provede několik úkonů. Zobrazí další, v pořadí druhé, vykreslovací pole, tentokrát s koláčovým grafem, dále doplní pole *Posouzení MSÚ*, zobrazí tlačítko na posouzení MSP a také tlačítko IV. *Finální návrh*. Vzhled takto obohaceného základního okna s vyznačeným tlačítkem III. *Výpočet ztrát & posouzení* je na Obr.

6.27.



Obr. 6.27: Hlavní okno po spuštění fáze III. s vyznačeným potvrzovacím tlačítkem

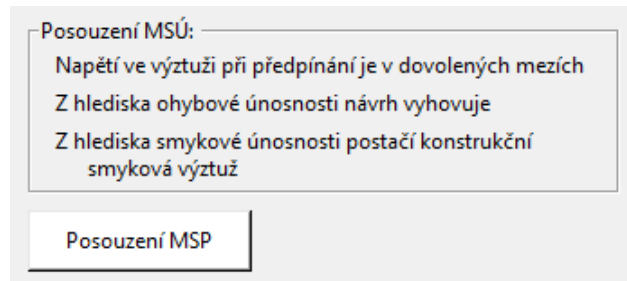
Nově zpřístupněné vykreslovací pole (Obr. 6.28) obsahuje koláčový graf, jenž zobrazuje procentuální zastoupení druhů ztrát předpětí od počátku předpínání až po konec doby životnosti, blíže popsány v kapitole 4 a 5.9. Součástí pole je též popisná legenda, vyčíslení podílu ztrát z předpínací síly, posouzení ohledně napětí po zohlednění krátkodobých ztrát a požadavek na umístění předpínací výztuže (vzhledem k posouzení MSÚ).



Obr. 6.28: Vykreslovací pole s grafem ztrát předpětí a posudky

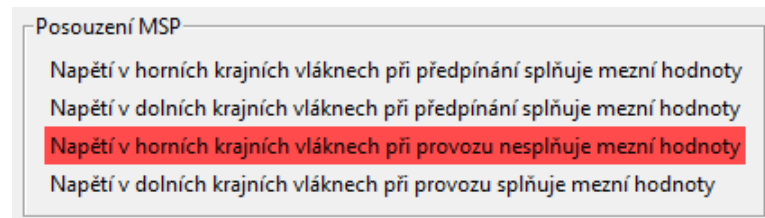
Posouzení

V rámcovém poli *Posouzení MSÚ* jsou nyní doplněny zbývající posudky a pod tímto polem je nově zobrazeno tlačítko *Posouzení MSP* viz Obr. 6.29.



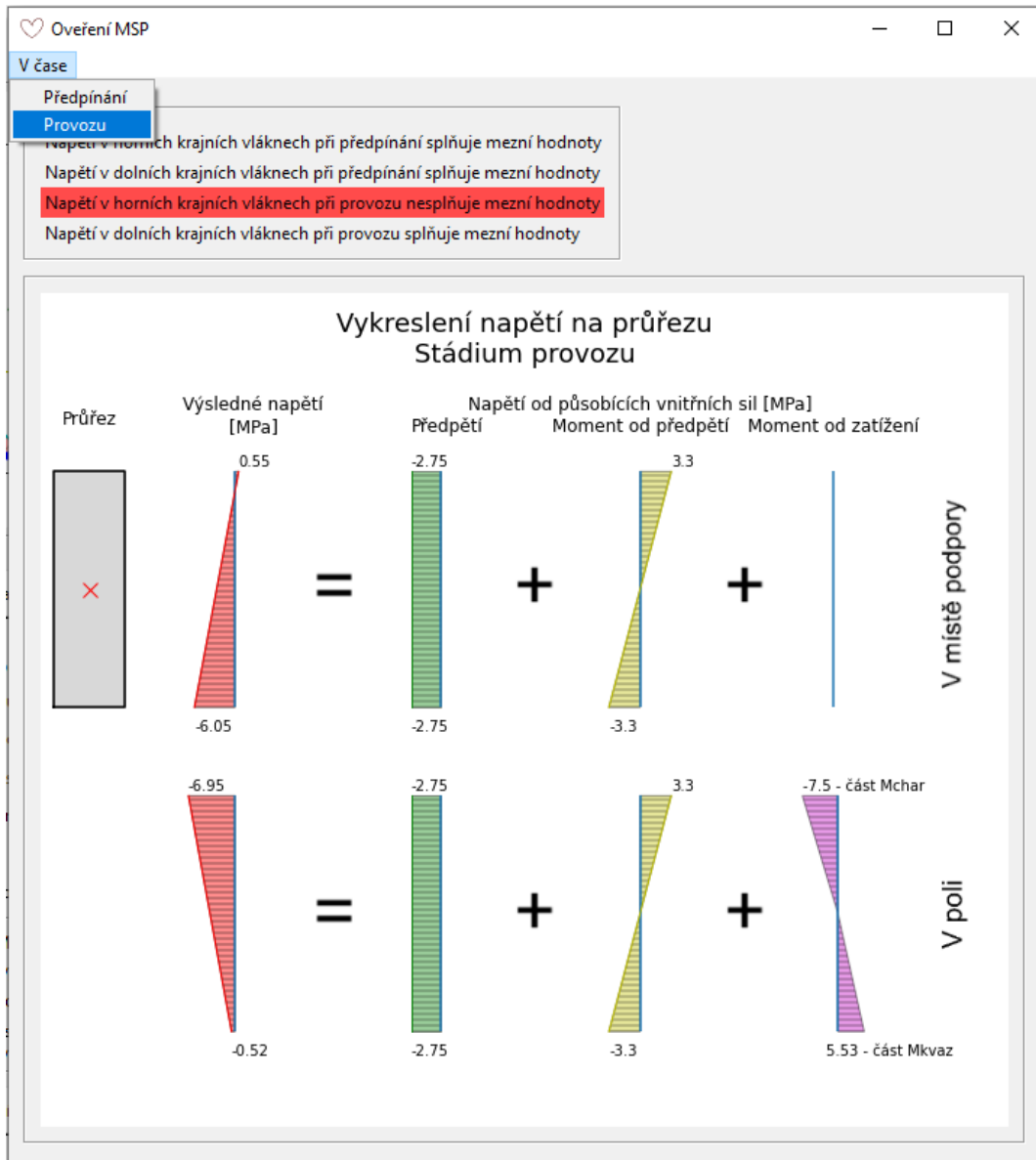
Obr. 6.29: Rámcové pole *Posouzení MSÚ* a tlačítko *Posouzení MSP*

Tlačítko *Posouzení MSP* otevírá nové okno s úvodním polem, kde jsou shrnuty posudky v rámci posouzení MSP. Nevyhovující posudky se zobrazí s červeně zbarveným pozadím, jak je tomu na Obr. 6.30 u třetího posudku. Pokud informace o splnění, či nesplnění limitních napětí není dostačující, může být využito rozbalovacího menu v liště okna pro výběr času posouzení a zobrazí se pole s vykreslením napětí po výšce průřezu. Celé podružné okno *Ověření MSP* s rozbaleným menu s volbou posouzení MSP v čase provozu je zobrazeno na Obr. 6.31.



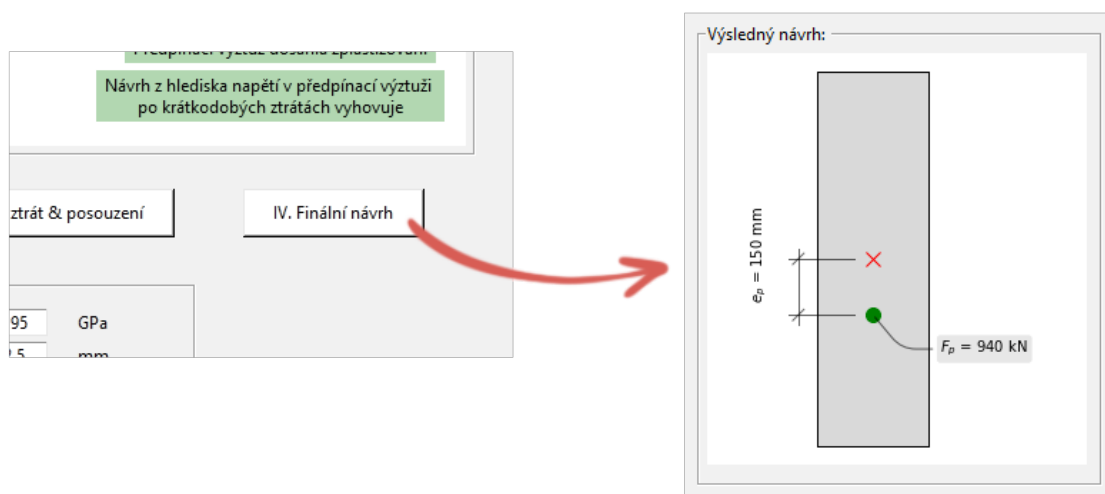
Obr. 6.30: Rámcové pole *Posouzení MSP*

Vykreslení dílčího napětí po výšce průřezu od působícího ohybového momentu od zatížení při provozu uprostřed rozpětí je zobrazováno tlakové napětí od zatížení v charakteristické kombinaci a tahové napětí od zatížení ve kvazistálé kombinaci z důvodu vyplývajícího z rovnic (5.83 a 5.84), tzn. daná krajní vlákna jsou posuzována za účinku pouze jedné a navzájem odlišné kombinace zatížení.

Obr. 6.31: Okno *Ověření MSP* s náhledem do menu

6.7 Fáze IV. Finální návrh

Pokud jsou podmínky posouzení splněny, návrh předem předpjatého betonového vazníku je hotov. Skrze tlačítko *IV. Finální návrh* se naposledy rozšíří hlavní okno a zobrazí se rámcové pole *Výsledný návrh* s vykreslovacím polem obsahující průřez vazníku se základními parametry navrženého předpětí, viz Obr. 6.32, tlačítko samotné zanikne.



Obr. 6.32: Tlačítko *IV. Finální návrh* a pole *Výsledný návrh*

7 Ověření výpočetní aplikace

7.1 Úvod

Vytvořená výpočetní aplikace bude ověřena pomocí řešeného příkladu z publikace [2], jelikož návrh předpětí je zde řešen za stejných předpokladů, stejnou metodou.

Příklad z publikace [2] je uveden tabulkou 7.1 s potřebnými vstupními hodnotami pro vykreslení diagramu. Jak diagram (Obr. 7.1), tak i body jej tvořící (viz Tab. 7.2) budou porovnány. Též chci zmínit, že diagram převzatý k porovnání je zhotoven pro průřez uprostřed pole.

Tab. 7.1: Vstupní hodnoty ověřovacího příkladu

Vstupní hodnoty ověřovacího příkladu			
A	0,325	m^2	plocha průřezu
e_d	0,511	m	vzdálenost dolních krajních vláken od těžiště průřezu
e_h	-0,229	m	poloha horních krajních vláken vzhledem k těžišti průřezu
e_p	0,451	m	excentricita působíště předpínací síly vůči těžišti průřezu
f_{ck}	40	MPa	charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku
$f_{ck(t_0)}$	25/0,7	MPa	char. válcová pevnost betonu v tlaku v čase vnesení předpětí
$f_{ctm(t_0)}$	3,1	MPa	průměrná pevnost betonu v tahu v čase vnesení předpětí
I_c	0,0173	m^4	moment setrvačnosti průřezu
M_{char}	0,565	MNm	ohybový moment od charakteristické kombinace zatížení
M_{kvaz}	0,413	MNm	ohybový moment od kvazistálé kombinace zatížení
M_{g0k}	0,329	MNm	ohybový moment od zatížení vlastní tíhou

7.2 Porovnání bodů tvořící diagram

Při tvorbě jediného diagramu je zapotřebí vynést čtyři dvojice bodů, které jsou následně propojeny přímkami, hraničními přímkami polorovin. Tyto body jsou průsečíky hlavních os. Zde si dovoluji odkázat na nerovnice (5.54)–(5.59) a (5.81)–(5.84), jelikož diagramy jsou jejich grafickým řešením a body z nich vychází.

Pro účel porovnání jsou nenulové souřadnice těchto bodů vypsány v Tab. 7.2 dle osy a nerovnice, které jsou součástí. A jak můžeme v tabulce spatřit, jednotlivé hodnoty jsou totožné, tedy docházím k závěru, že aplikace ve věci výpočtů na pozadí je funkční a funguje správně.

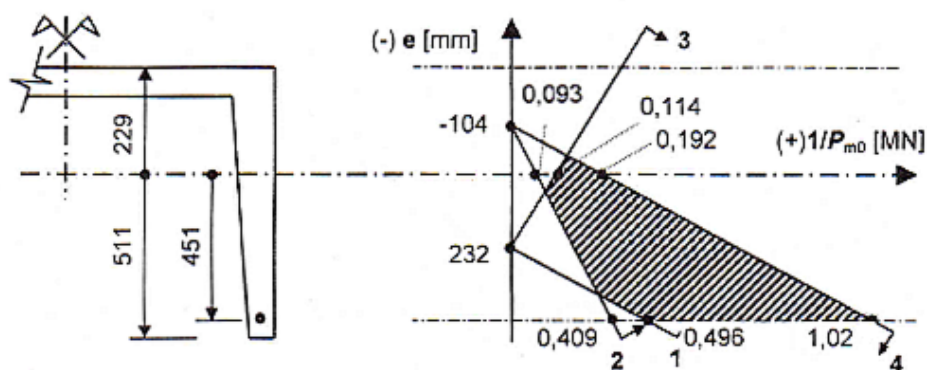
Tab. 7.2: Body tvořící diagramy

Nerovnice	(5.54)		(5.55)		(5.58)		(5.59)	
	$1/P_0$ [MN]	e_p [mm]	$1/P_0$ [MN]	e_p [mm]	$1/P_0$ [MN]	e_p [mm]	$1/P_0$ [MN]	e_p [mm]
Publikace	-0,433	232	0,093	-104	0,114	232	0,192	-104
Aplikace	-0,433	232	0,093	-104	0,114	232	0,192	-104

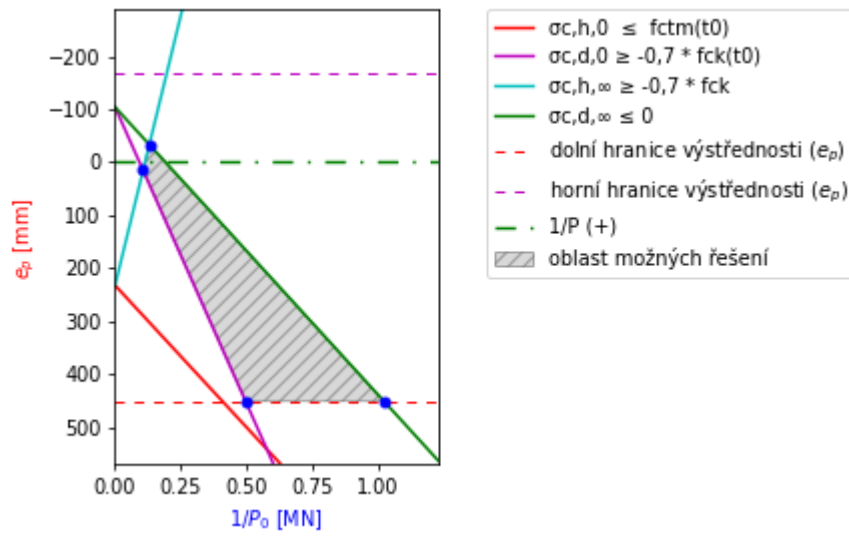
7.3 Porovnání výsledných diagramů

Nyní přistoupíme k porovnání diagramů. Diagramy jsou tedy tvořeny přímkami, které jsou tvořeny body z Tab. 7.2. Jako první je uveden diagram z publikace [2] na Obr. 7.1, dále je zobrazen diagram z výpočetní aplikace na Obr. 7.2.

Ačkoliv hodnoty pro tvorbu obou diagramů byly totožné, tak po delším prozkoumání si můžeme povšimnout rozdílnosti ve vzájemném protínání přímek 1 a 2 vůči excentricitě 451 mm (rozdíl ve vzájemném měřítku os neberu, jakožto irelevantní záležitost, v potaz). Po podrobnějším vyšetření zdárného problému jsem došla k závěru, že dva body diagramu jsou v publikaci při vykreslování zaměněny, a tak diagramy nemohou být zcela shodné, ačkoliv hodnoty jsou stejné. Vykreslování diagramů ve výpočetní aplikaci je správné.



Obr. 7.1: Diagram pro oblast možných řešení převzat z publikace [2, Obr. 5.10.10]



Obr. 7.2: Diagram pro oblast možných řešení z výpočetní aplikace

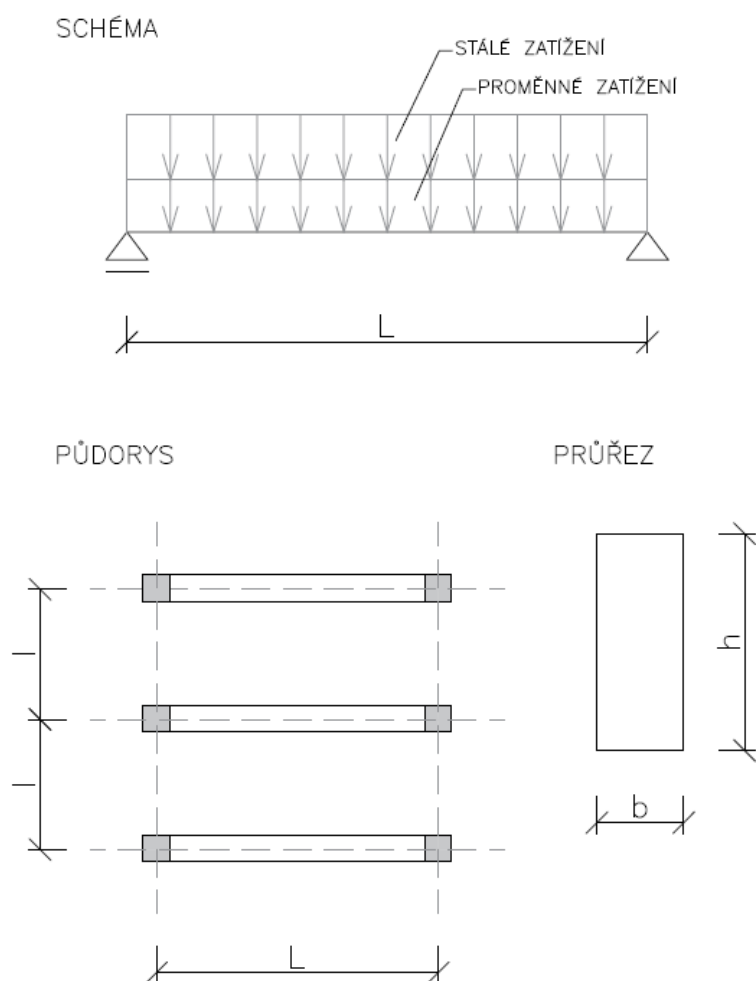
8 Vzorový příklad

8.1 Úvod

Nyní, po představení návrhu předem předpjatého betonového vazníku a výpočetní aplikace řešící tuto problematiku, včetně s ověřením správného fungování, bude proveden konkrétní návrh jako vzorový příklad. Jedná se o obdobný příklad, jaký byl řešen v rámci předmětu BK02.

Vzorový příklad je veden tak, jak je popsán v části 5 *Návrh předpjatého betonového vazníku* s úvodním výčtem vstupních hodnot pro fázi I. a II. viz Tab. 8.1 a ve správném okamžiku výčet doplňujících vstupních hodnot fáze III. v Tab. 8.3 později. Na Obr. 8.1 je zobrazen půdorys řešené konstrukce, příslušné schéma vazníku a jeho průřez.

Vzorový příklad je doplněn o výstupy z výpočetní aplikace, pokud je tak užitečné k nahlédnutí či porovnání.



Obr. 8.1: Půdorys konstrukce, schéma a průřez vazníku

8.2 Vstupní hodnoty

Tab. 8.1: Vstupní hodnoty fáze I. a II.

Vstupní hodnoty vzorového příkladu pro fázi I. a II.			
f_{ck}	40	MPa	Charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku
$f_{ck,k}$	50	MPa	Charakteristická krychelná pevnost betonu v tlaku
f_{pk}	1 770	MPa	Charakteristická pevnost předpínací oceli v tahu
$f_{p0,2k}$	1 570	MPa	Char. smluvní mez kluzu 0,2 % předpínací oceli
f_{yk}	500	MPa	Charakteristická mez kluzu betonářské výztuže
	< 4	%	Provzdušnění betonu
	N	–	Třída cementu
L	12	m	Teoretické rozpětí vazníku
l	4	m	Osová vzdálenost vazníků
h	1 000	mm	Výška průřezu
b	300	mm	Šířka průřezu
	XC1	–	Stupeň vlivu prostředí
	B	–	Kategorie zatížení
ρ_c	25	kN/m ³	Objemová tíha betonu
g_1	1,5	kN/m ²	Plošná tíha panelů na vaznících
g_2	1,2	kN/m ²	Ostatní stálé zatížení
q	2,5	kN/m ²	Užitné zatížení
d_p	15	mm	Průměr předpínací výztuže
d_b	12	mm	Průměr betonářské výztuže
$c_{nom,b}$	20	mm	Nominální krycí vrstva betonářské výztuže
d_g	16	mm	Maximální průměr kameniva
t_0	5	dní	Stáří betonu v čase vnesení předpětí
t_∞	50	let	Návrhová životnost
	lano	–	Typ předpínací vložky
d_p^h	610	mm	Nejkratší vzdálenost mezi předpínací výztuží a horními krajními vlákny

8.3 Průřezové charakteristiky

8.3.1 Výpočet

Plocha průřezu vazníku:

$$A = b \cdot h = 300 \cdot 1\,000 = 3 \cdot 10^5 \quad [\text{mm}^2]$$

Plocha průřezu 1 ks předpínací výztuže:

$$A_{p,1} = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} = \frac{\pi \cdot 15^2}{4} = 177 \quad [\text{mm}^2]$$

Náhradní rozměr prvku:

$$h_0 = \frac{2 \cdot A}{u_o} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^5}{2 \cdot 300} = 261 \quad [\text{mm}]$$

Poloha těžiště od dolních krajních vláken:

$$e_d = \frac{h}{2} = \frac{1 \ 000}{2} = 500 \quad [\text{mm}]$$

Poloha těžiště od horních krajních vláken:

$$e_h = \frac{h}{2} = \frac{1 \ 000}{2} = 500 \quad [\text{mm}]$$

Moment setrvačnosti:

$$I_c = \frac{1}{12} b \cdot h^3 = \frac{1}{12} \cdot 300 \cdot 1 \ 000^3 = 2,5 \cdot 10^{10} \quad [\text{mm}^4]$$

Průřezový modul k dolním krajním vláknům:

$$W_d = \frac{I_c}{e_d} = \frac{2,5 \cdot 10^{10}}{500} = 5 \cdot 10^7 \quad [\text{mm}^3]$$

Průřezový modul k horním krajním vláknům:

$$W_h = \frac{I_c}{e_h} = \frac{2,5 \cdot 10^{10}}{500} = 5 \cdot 10^7 \quad [\text{mm}^3]$$

Velikost jádra průřezu od těžiště ke spodní hraně:

$$r_d = \frac{W_h}{A} = \frac{5 \cdot 10^7}{3 \cdot 10^5} = 167 \quad [\text{mm}]$$

Velikost jádra průřezu od těžiště k horní hraně:

$$r_h = \frac{W_d}{A} = \frac{5 \cdot 10^7}{3 \cdot 10^5} = 167 \quad [\text{mm}]$$

Velikost jádra průřezu od těžiště k levé hraně:

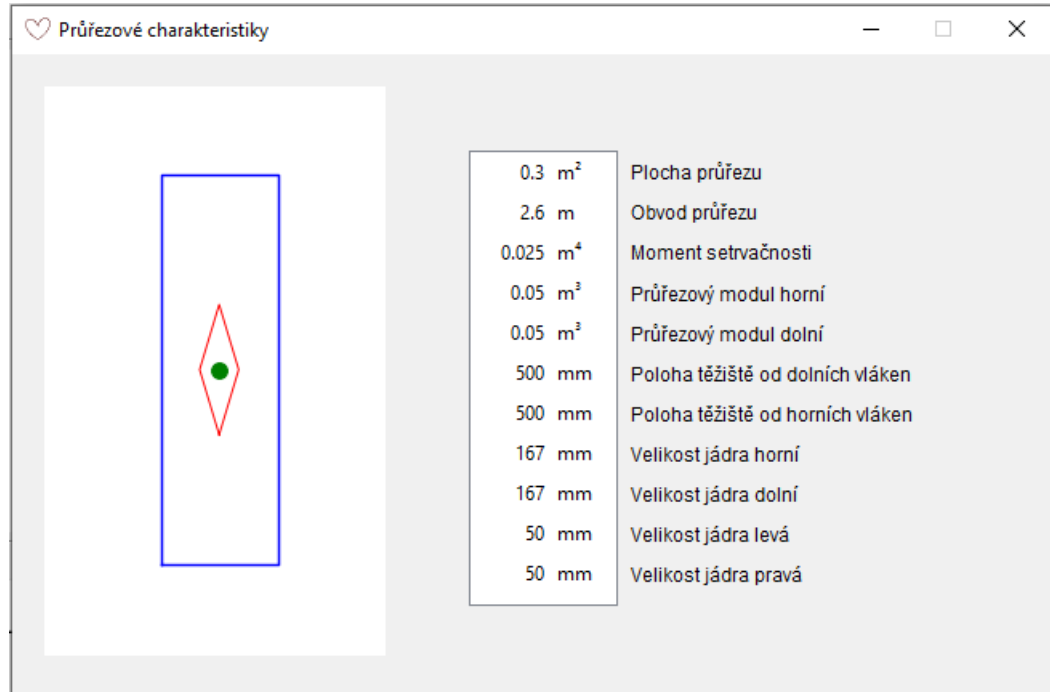
$$r_l = \frac{b}{6} = \frac{300}{6} = 50 \quad [\text{mm}]$$

Velikost jádra průřezu od těžiště k pravé hraně:

$$r_p = \frac{b}{6} = \frac{300}{6} = 50 \quad [\text{mm}]$$

8.3.2 Výpočetní aplikace

Část 8.3 jako výstup výpočetní aplikace viz Obr. 8.2.



Obr. 8.2: Průřezové charakteristiky vzorového příkladu z výpočetní aplikace

8.4 Materiálové charakteristiky

8.4.1 Materiálové charakteristiky betonu

Návrhová válcová pevnost betonu v tlaku:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{40}{1,5} = 27 \quad [\text{MPa}]$$

Průměrná hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 40 + 8 = 48 \quad [\text{MPa}]$$

Průměrná hodnota pevnosti betonu v dostředném tahu:

$$40 \leq 50 \text{ [MPa]}, \text{ zároveň } 50 \leq 60 \text{ [MPa]}:$$

$$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{2/3} = 0,3 \cdot 40^{2/3} = 3,5 \quad [\text{MPa}]$$

Dolní kvantil pevnosti betonu v dostředném tahu:

$$f_{ctk;0,05} = 0,7 \cdot f_{ctm} = 0,7 \cdot 3,5 = 2,5 \quad [\text{MPa}]$$

Horní kvantil pevnosti betonu v dostředném tahu:

$$f_{ctk;0,95} = 1,3 \cdot f_{ctm} = 1,3 \cdot 3,5 = 4,6 \quad [\text{MPa}]$$

Návrhová pevnost betonu v dostředném tahu:

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk;0,05}}{\gamma_c} = \frac{2,5}{1,5} = 1,7 \quad [\text{MPa}]$$

Průměrná hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku v čase t_0 :

$$f_{cm(t_0)} = \beta_{cc(t)} \cdot f_{cm} = 0,71 \cdot 48 = 34 \quad [\text{MPa}]$$

$$\text{kde} \quad \beta_{cc(t_0)} = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t_0} \right)^{0,5} \right] \right\} = \exp \left\{ 0,25 \left[1 - \left(\frac{28}{5} \right)^{0,5} \right] \right\} = 0,71 \quad [-]$$

Charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku v čase t_0 :

$$3 < 5 < 28 \text{ dní:}$$

$$f_{ck(t_0)} = f_{cm(t_0)} - 8 = 34 - 8 = 26 \quad [\text{MPa}]$$

Průměrná hodnota pevnosti betonu v dostředném tahu v čase t_0 :

$$f_{ctm(t_0)} = \beta_{cc(t_0)}^{\alpha_t} \cdot f_{ctm} = 0,71^1 \cdot 3,5 = 2,5 \quad [\text{MPa}]$$

Sečnový modul pružnosti betonu:

$$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} = 22 \cdot \left(\frac{48}{10} \right)^{0,3} = 35 \quad [\text{GPa}]$$

Sečnový modul pružnosti betonu v čase t_0 :

$$E_{cm(t_0)} = \left(\frac{f_{cm(t_0)}}{f_{cm}} \right)^{0,3} \cdot E_{cm} = \left(\frac{34}{48} \right)^{0,3} \cdot 35 = 32 \quad [\text{GPa}]$$

Limitní tlakové napětí v betonu:

$$\sigma_{c,lim} = f_{cd} - 2\sqrt{f_{ctd} \cdot (f_{ctd} + f_{cd})} = 27 - 2\sqrt{1,7 \cdot (1,7 + 27)} = 13 \quad [\text{MPa}]$$

8.4.2 Materiálové charakteristiky předpínací a betonářské výztuže

Charakteristická smluvní mez kluzu 0,1% předpínací oceli:

$$f_{p0,1k} = 0,95 f_{p0,2k} = 0,95 \cdot 1\,570 = 1\,492 \quad [\text{MPa}]$$

Návrhová pevnost předpínací oceli v tahu:

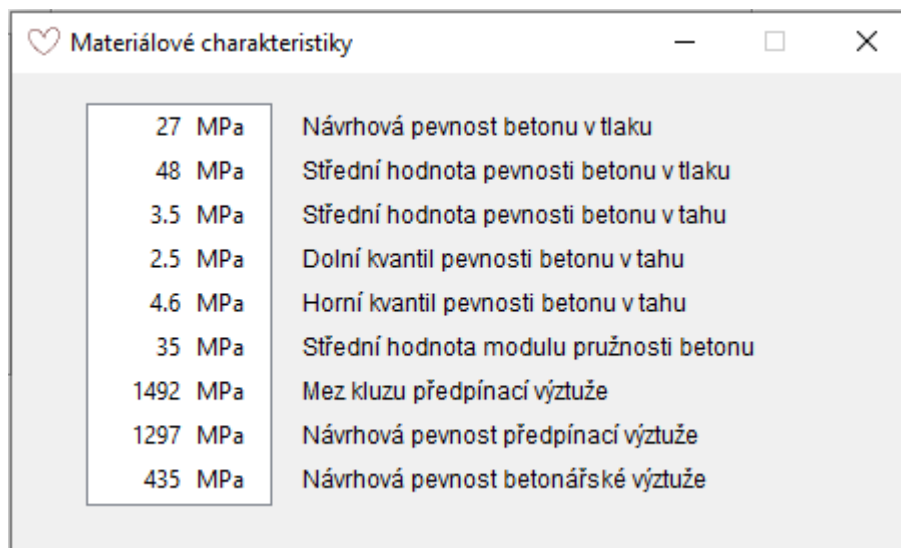
$$f_{pd} = \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s} = \frac{1\,492}{1,15} = 1\,297 \quad [\text{MPa}]$$

Návrhová mez kluzu betonářské výztuže:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \quad [\text{MPa}]$$

8.4.3 Materiálové charakteristiky – výpočetní aplikace

Část 8.4 jako výstup výpočetní aplikace viz Obr. 8.3.



Obr. 8.3: Materiálové charakteristiky vzorového příkladu z výpočetní aplikace

8.5 Zatížení

8.5.1 Tabulka zatížení

Liniové zatížení a jeho složky pro následné užití v dalších kapitolách je shrnuto v Tab. 8.2.

Tab. 8.2: Zatížení

Zatížení	zn.	plošné [kN/m ²]	zat. šíře [m]	liniové [kN/m]
Stálé				
vlastní tíha vazníku	g_0	25 · 0,3 · 1		7,5
tíha panelů na vaznicích	g_1	1,5	4	6,0
ostatní stálé	g_2	1,2	4	4,8
CELKEM	G_k			18,3
Užitné				
užitné	q	2,5	4	10,0
CELKEM	Q_k			10,0

8.5.2 Kombinace zatížení MSÚ

Kombinace zatížení A:

$$A \quad \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} =$$

$$1,35 \cdot 18,3 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 10,0 = 35,2 \quad [\text{kN/m}]$$

Kombinace zatížení B:

$$B \quad \sum_{j \geq 1} \xi_j \cdot \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} =$$

$$0,85 \cdot 1,35 \cdot 18,3 + 1,5 \cdot 10,0 = 36,0 \quad [\text{kN/m}]$$

Návrhová hodnota zatížení:

$$f_{Ed} = \min(\text{kombinace A; kombinace B}) = \min(35,2; 36,0) = 36,0 \quad [\text{kN/m}]$$

Návrhová hodnota působícího vnitřního ohybového momentu:

$$M_{Ed} = \frac{1}{8} f_{Ed} \cdot L^2 = \frac{1}{8} 36,0 \cdot 12^2 = 648 \quad [\text{kNm}]$$

8.5.3 Kombinace zatížení MSP

Charakteristická kombinace:

$$f_{char} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} = 18,3 + 10,0 = 28,3 \quad [\text{kN/m}]$$

Působící vnitřní ohybový moment od charakteristické kombinace zatížení:

$$M_{char} = \frac{1}{8} f_{char} \cdot L^2 = \frac{1}{8} 28,3 \cdot 12^2 = 509 \quad [\text{kNm}]$$

Častá kombinace:

$$f_{\check{c}as} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \Psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} = 18,3 + 0,5 \cdot 10,0 = 23,3 \quad [\text{kN/m}]$$

Působící vnitřní ohybový moment od časté kombinace zatížení:

$$M_{\check{c}as} = \frac{1}{8} 23,3 \cdot 12^2 = 419 \quad [\text{kNm}]$$

Kvazistálá kombinace:

$$f_{kvaz} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} = 18,3 + 0,3 \cdot 10,0 = 21,3 \quad [\text{kN/m}]$$

Působící vnitřní ohybový moment od kvazistálé kombinace zatížení:

$$M_{kvaz} = \frac{1}{8} f_{kvaz} \cdot L^2 = \frac{1}{8} 21,3 \cdot 12^2 = 383 \quad [\text{kNm}]$$

8.5.4 Zatížení – výpočetní aplikace

Část 8.5 jako výstup výpočetní aplikace viz Obr. 8.4.

Zatížení souhrnně		
18.3 kNm/m	Stálé zatížení	
10.0 kNm/m	Užitné zatížení	
Návrhové kombinace zatížení MSÚ		
35.2 kNm/m	Kombinace A	
36.0 kNm/m	Kombinace B	
648.0 kNm	Návrhový moment	
Návrhové kombinace zatížení MSP		
Kombinace	Zatížení [kN/m]	Moment [kNm]
Charakteristická	28.3	509.4
Častá	23.3	419.4
Kvazistálá	21.3	383.4

Obr. 8.4: Zatížení vzorového příkladu z výpočetní aplikace

8.6 Krycí vrstva

Pro betonářskou výztuž byla krycí vrstva definována v Tab. 8.1. Pro předpínací výztuž bude stanovena v následujících řádcích podrobně.

Minimální krycí vrstva

Minimální krycí vrstva předpínací výztuže:

$$c_{min,p} = \max\{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10\} =$$

$$\max\{1,5 \cdot 15; 15 + 0 - 0 - 0; 10\} = \max\{25; 15; 10\} = 25 \quad [\text{mm}]$$

Ověření dodržení minimální indikativní pevnostní třídy:

$$C40/50 > C16/20 \quad \text{Vyhovuje}$$

Úprava třídy konstrukce:

$$S4 \rightarrow S2$$

Poznámka: zmenšení třídy konstrukce díky splnění kritéria *pevnostní třída* a *zvl. kontrola kvality výroby betonu*.

Přídavek na návrhovou odchylku

Použití doporučené hodnoty dle ČSN EN 1992-1-1 ed. 2 [10]:

$$\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm}$$

Nominální krycí vrstva

Nominální krycí vrstva předpínací výztuže:

$$c_{nom,p} = c_{min,p} + \Delta c_{dev} = 25 + 10 = 35 \quad [\text{mm}] \quad (8.1)$$

8.7 Předběžná kontrola mezních stavů

8.7.1 MSP

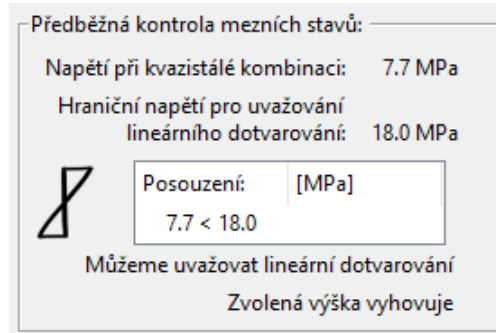
$$\begin{aligned} |\sigma_{c,kv}| &\leq k_2 \cdot f_{ck} \\ \frac{1}{8} \cdot \frac{f_{kvaz} \cdot L^2}{I_c} \cdot e_h &\leq k_2 \cdot f_{ck} \\ \frac{1}{8} \cdot \frac{21,3 \cdot 12\,000^2}{2,5 \cdot 10^{10}} \cdot 500 &\leq 0,45 \cdot 40 \quad [\text{MPa}] \\ 7,7 &\leq 18 \quad [\text{MPa}] \quad \text{vyhovuje} \end{aligned}$$

8.7.2 MSÚ

$$\begin{aligned} h &\geq \sqrt{\frac{M_{Ed}}{\alpha_h \cdot b \cdot f_{cd}}} \\ 1\,000 &\geq \sqrt{\frac{648 \cdot 10^6}{0,15 \cdot 300 \cdot 27}} = 731 \quad [\text{mm}] \quad \text{vyhovuje} \end{aligned}$$

8.7.3 Předběžná kontrola mezních stavů – výpočetní aplikace

Část 8.7 jako výstup výpočetní aplikace viz Obr. 8.5.



Obr. 8.5: Předběžná kontrola mezních stavů vzorového příkladu ve výpočetní aplikaci

8.8 Návrh předpětí

8.8.1 Parametry předpětí

Návrh excentricity:

$$e_p = 160 \quad [\text{mm}]$$

Návrh množství předpínací výztuže:

$$n = 7 \quad [\text{ks}]$$

Celková průřezová plocha předpínací výztuže:

$$A_p = n \cdot A_{p,1} = 7 \cdot 177 = 1\,239 \quad [\text{mm}^2]$$

Maximální napětí pro předpínací výztuž v okamžiku vnesení zatížení:

$$\sigma_{p0,max} = \min(0,75f_{pk}; 0,85f_{p0,1k}) =$$

$$\min(0,75 \cdot 1\,770; 0,85 \cdot 1\,492) = \min(1\,328; 1\,268) = 1\,268 \quad [\text{MPa}]$$

Předpínací síla pro předpínací výztuž v okamžiku vnesení zatížení (předběžný výpočet):

$$P_0 = \sigma_{p0,max} \cdot A_p = 1\,268 \cdot 1\,239 = 1\,571 \cdot 10^3 \quad [\text{N}]$$

Předpínací síla při předpínání pro celkové množství předpínací výztuže:

$$P_{max} = 1,05 \cdot P_0 = 1,05 \cdot 1\,571 \cdot 10^3 = 1\,650 \cdot 10^3 \quad [\text{N}]$$

Napětí pro předpínací výztuž při předpínání:

$$\sigma_{p,in} = \frac{P_{max}}{A_p} = \frac{1\,650 \cdot 10^3}{1\,239} = 1\,332 \quad [\text{MPa}]$$

Posouzení maximální napětí vznikající při předpínání:

$$\sigma_{p,in} \leq \min(0,8f_{pk}; 0,9f_{p0,1k})$$

$$1\,332 \leq \min(0,8 \cdot 1\,770; 0,9 \cdot 1\,492) = \min(1\,416; 1\,342) \quad [\text{MPa}]$$

$$1\,332 \leq 1\,342 \quad [\text{MPa}] \quad \text{vyhovuje}$$

Normálová síla od předpětí pro okamžik vnesení předpětí ve fázi návrhu:

$$N_{p,0} = r_0 \cdot P_0 = 1,05 \cdot 1\,571 \cdot 10^3 = 1\,650 \cdot 10^3 \quad [\text{N}]$$

Normálová síla od předpětí pro konec doby životnosti ve fázi návrhu:

$$N_{p,\infty} = r_\infty \cdot x_z \cdot P_0 = 0,95 \cdot 0,8 \cdot 1\,571 \cdot 10^3 = 1\,194 \cdot 10^3 \quad [\text{N}]$$

8.8.2 Předběžné posouzení v okamžiku vnesení předpětí

Průřez uprostřed rozpětí vazníku

Horní vlákna:

$$\frac{N_{p,0}}{A} + \frac{N_{p,0} \cdot e_p + M_{g0k}}{I_c} \cdot e_h \geq -0,7f_{ck(t_0)}$$

$$\frac{-1\,650 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} + \frac{-1\,650 \cdot 10^3 \cdot 160 + 135 \cdot 10^6}{2,5 \cdot 10^{10}} \cdot (-500) \geq -0,7 \cdot 26 \quad [\text{MPa}]$$

$$-2,9 \geq -18,2 \quad [\text{MPa}] \quad \text{vyhovuje}$$

Spodní vlákna:

$$\frac{N_{p,0}}{A} + \frac{N_{p,0} \cdot e_p + M_{g0k}}{I_c} \cdot e_d \leq f_{ctm(t_0)}$$

$$\frac{-1\,650 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} + \frac{-1\,650 \cdot 10^3 \cdot 160 + 135 \cdot 10^6}{2,5 \cdot 10^{10}} \cdot 500 \leq 2,5 \quad [\text{MPa}]$$

$$-8,1 \leq 2,5 \quad [\text{MPa}] \quad \text{vyhovuje}$$

$$\text{kde} \quad M_{g0k} = \frac{1}{8} \cdot g_0 \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 7,5 \cdot 12^2 = 135 \quad [\text{kNm}]$$

Průřez v místě podpory vazníku**Horní vlákna:**

$$\frac{N_{p,0}}{A} + \frac{N_{p,0} \cdot e_p}{I_c} \cdot e_h \leq f_{ctm(t_0)} \quad (8.2)$$

$$\frac{-1\,650 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} + \frac{-1\,650 \cdot 10^3 \cdot 160}{2,5 \cdot 10^{10}} \cdot (-500) \leq 2,5 \text{ [MPa]}$$

$$-0,2 \leq 2,5 \text{ [MPa]} \text{ vyhovuje}$$

Spodní vlákna:

$$\frac{N_{p,0}}{A} + \frac{N_{p,0} \cdot e_p}{I_c} \cdot e_d \geq -0,7f_{ck(t_0)} \quad (8.3)$$

$$\frac{-1\,650 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} + \frac{-1\,650 \cdot 10^3 \cdot 160}{2,5 \cdot 10^{10}} \cdot 500 \geq -0,7 \cdot 26 \text{ [MPa]}$$

$$-10,8 \geq -18,2 \text{ [MPa]} \text{ vyhovuje}$$

8.8.3 Předběžné posouzení na konci životnosti**Průřez uprostřed rozpětí vazníku****Horní vlákna:**

$$\frac{N_{p,\infty}}{A} + \frac{N_{p,\infty} \cdot e_p + M_{char}}{I_c} \cdot e_h \geq -0,6f_{ck}$$

$$\frac{-1\,194 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} + \frac{-1\,194 \cdot 10^3 \cdot 160 + 509 \cdot 10^6}{2,5 \cdot 10^{10}} \cdot (-500) \geq -0,6 \cdot 40 \text{ [MPa]}$$

$$-10,3 \geq -24 \text{ [MPa]} \text{ vyhovuje}$$

Spodní vlákna:

$$\frac{N_{p,\infty}}{A} + \frac{N_{p,\infty} \cdot e_p + M_{kvaz}}{I_c} \cdot e_d \leq 0$$

$$\frac{-1\,194 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} + \frac{-1\,194 \cdot 10^3 \cdot 160 + 383 \cdot 10^6}{2,5 \cdot 10^{10}} \cdot 500 \leq 0 \text{ [MPa]}$$

$$-0,1 \leq 0 \text{ [MPa]} \text{ vyhovuje}$$

Průřez v místě podpory vazníku**Horní vlákna:**

$$\frac{N_{p,\infty}}{A} + \frac{N_{p,\infty} \cdot e_p}{I_c} \cdot e_h \leq 0$$

$$\frac{-1\,194 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} + \frac{-1\,194 \cdot 10^3 \cdot 160}{2,5 \cdot 10^{10}} \cdot (-500) \leq 0 \text{ [MPa]}$$

$$-0,2 \leq 0 \text{ [MPa]} \text{ vyhovuje}$$

Spodní vlákna:

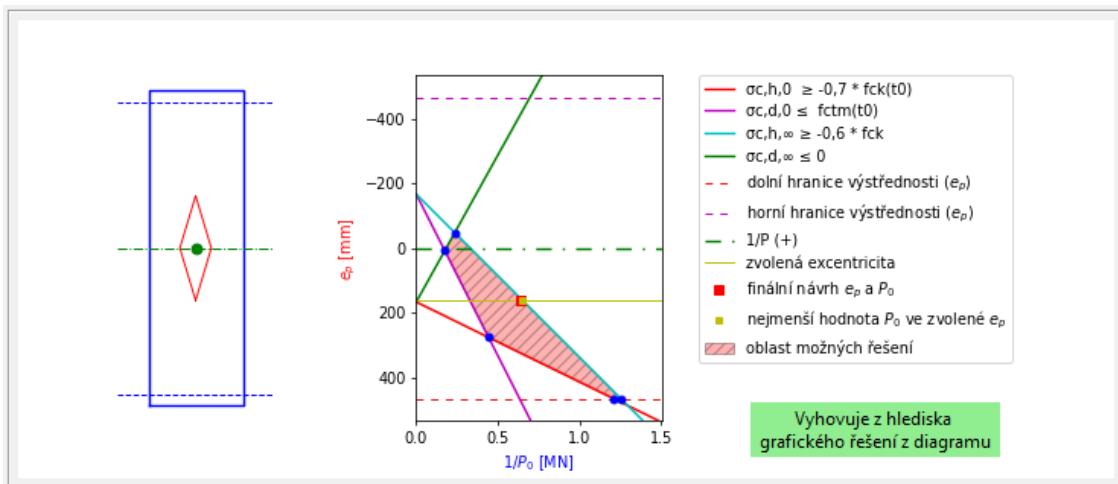
$$\frac{N_{p,\infty}}{A} + \frac{N_{p,\infty} \cdot e_p}{I_c} \cdot e_d \geq -0,6f_{ck}$$

$$\frac{-1\,194 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} + \frac{-1\,194 \cdot 10^3 \cdot 160}{2,5 \cdot 10^{10}} \cdot 500 \geq -0,6 \cdot 40 \text{ [MPa]}$$

$$-7,8 \geq -24 \text{ [MPa]} \text{ vyhovuje}$$

8.8.4 Návrh předpětí – výpočetní aplikace

Část 8.8 pro průřez v polovině rozpětí jako výstup výpočetní aplikace viz Obr. 8.6 společně s předběžným posouzením napětí.



Obr. 8.6: Návrh předpětí pro průřez v poli ze vzorového příkladu ve výpočetní aplikaci

8.9 Ztráty předpětí

8.9.1 Doplnující vstupní hodnoty

Podrobnější hodnoty potřebné k výpočtu jsou uvedeny v Tab. 8.3.

Tab. 8.3: Vstupní hodnoty fáze III.

Doplnující vstupní hodnoty vzorového příkladu pro fázi III.			
Δsl	2,5	mm	Celková délka pokluzu v kotvě
E_p	195	GPa	Modul pružnosti předpínací výztuže
RH	60	%	Relativní vlhkost okolního prostředí
t_s	5	dní	Stáří betonu při začátku smršťování
	2	–	Třída relaxačního chování

8.9.2 Okamžité

Pokluz v kotevním bloku:

$$\Delta\sigma_{sl} = \frac{\Delta s l}{L} \cdot E_p = \frac{2,5}{12 \cdot 10^3} \cdot 195 \cdot 10^3 = 40,6 \quad [\text{MPa}]$$

Krátkodobá relaxace:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{p,r,t,k} &= \alpha_{r1} \cdot \rho_{1000} \cdot \exp(\alpha_{r2} \cdot \mu) \cdot \left(\frac{t_0}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1-\mu)} \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_{p,1} = \\ &= 0,66 \cdot 2,5 \cdot \exp(9,1 \cdot 0,75) \cdot \left(\frac{120}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1-0,75)} \cdot 10^{-5} \cdot 1291,4 = 13,2 \quad [\text{MPa}] \end{aligned}$$

$$\text{kde} \quad \mu = \sigma_{p,in} / f_{pk} = 1332 / 1770 = 0,75 \quad [-]$$

$$\sigma_{p,1} = \sigma_{p,in} - \Delta\sigma_{sl} = 1332 - 40,6 = 1291,4 \quad [\text{MPa}]$$

Pružné přetvoření betonu:

$$\Delta\sigma_{p,cc} = \sigma_{p,2} \cdot \frac{A_p \cdot E_p}{A_c \cdot E_{cm(t_0)} + A_p \cdot E_p} = 1278,2 \cdot \frac{1239 \cdot 195 \cdot 10^3}{298761 \cdot 32 \cdot 10^3 + 1239 \cdot 195 \cdot 10^3} = 31,5 \quad [\text{MPa}]$$

$$\text{kde} \quad \sigma_{p,2} = \sigma_{p,in} - \Delta\sigma_{sl} - \Delta\sigma_{p,r,t,k} = 1332 - 40,6 - 13,2 = 1278,2 \quad [\text{MPa}]$$

$$A_c = A - A_p = 3 \cdot 10^5 - 1239 = 298761 \quad [\text{mm}^2]$$

Posouzení zbytkového předpětí po okamžitých ztrátách:

$$\sigma_{p,ok} < \sigma_{p0,max}$$

$$1246,7 < 1268,0 \quad [\text{MPa}] \quad \text{vyhovuje}$$

$$\begin{aligned} \text{kde} \quad \sigma_{p,ok} &= \sigma_{p,in} - \Delta\sigma_{sl} - \Delta\sigma_{p,r,t,k} - \Delta\sigma_{p,cc} = 1332 - 40,6 - 13,2 - 31,5 = \\ &= 1246,7 \quad [\text{MPa}] \end{aligned}$$

8.9.3 Dlouhodobé

Dlouhodobá relaxace výztuže:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{p,r,t,\infty} &= \alpha_{r1} \cdot \rho_{1000} \cdot \exp(\alpha_{r2} \cdot \mu) \cdot \left(\frac{t_d}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1-\mu)} \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_{p,ok} = \\ &= 0,66 \cdot 2,5 \cdot \exp(9,1 \cdot 0,75) \cdot \left(\frac{437880}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1-0,75)} \cdot 10^{-5} \cdot 1246,7 = 59,2 \quad [\text{MPa}] \end{aligned}$$

$$\text{kde} \quad t_d = 24 \cdot 365 \cdot t_\infty - 24 \cdot t_0 = 50 \cdot 365 \cdot 24 - 5 \cdot 24 = 437880 \quad [\text{h}]$$

Dotvarování betonu:**Základní součinitel dotvarování:**

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta_{f_{cm}} \cdot \beta_{t_0} = 1,41 \cdot 2,43 \cdot 0,68 = 2,33 \quad [-]$$

kde pro $48 > 35$ [MPa]:

$$\varphi_{RH} = \left(1 + \frac{1 - RH}{0,1 \cdot h_0^{1/3}} \cdot \alpha_1\right) \cdot \alpha_2 = \left(1 + \frac{1 - 0,6}{0,1 \cdot 261^{1/3}} \cdot 0,80\right) \cdot 0,94 = 1,41 \quad [-]$$

$$\text{kde } \alpha_1 = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,7} = \left(\frac{35}{48}\right)^{0,7} = 0,80 \quad [-]$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,2} = \left(\frac{35}{48}\right)^{0,2} = 0,94 \quad [-]$$

$$\beta_{f_{cm}} = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} = \frac{16,8}{\sqrt{48}} = 2,43 \quad [-]$$

$$\beta_{t_0} = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,2}} = \frac{1}{0,1 + t_{0,c}^{0,2}} = \frac{1}{0,1 + 5^{0,2}} = 0,68 \quad [-]$$

kde t_0 zde bude nahrazeno hodnotou $t_{0,c}$ pro zohlednění vlivu druhu cementu pouze, nikoliv i vliv teploty na zralost betonu:

$$t_{0,c} = t_0 \cdot \left(\frac{9}{2 + t_0^{1,2}} + 1\right)^\alpha = 5 \cdot \left(\frac{9}{2 + 5^{1,2}} + 1\right)^0 = 5 \geq 0,5 \quad [\text{dny}]$$

Součinitel časového průběhu dotvarování:

$$\beta_{c(t_\infty, t_0)} = \left(\frac{t_d}{\beta_H + t_d}\right)^{0,3} = \left(\frac{437\,880}{605 + 437\,880}\right)^{0,3} = 1 \quad [-]$$

kde pro $48 > 35$ MPa:

$$\beta_H = 1,5 \left[1 + (0,012 \cdot RH)^{18}\right] h_0 + 250 \cdot \alpha_3 \leq 1\,500 \cdot \alpha_3$$

$$1,5 \left[1 + (0,012 \cdot 60)^{18}\right] \cdot 261 + 250 \cdot 0,85 \leq 1\,500 \cdot 0,85 \quad [-]$$

$$605 \leq 1\,275 \quad [-]$$

$$\text{kde } \alpha_3 = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,5} = \left(\frac{35}{48}\right)^{0,5} = 0,85 \quad [-]$$

Ztráta předpětí dotvarováním betonu:

$$\Delta\sigma_{p,c} = E_p \cdot \frac{\sigma_{cp}^{g+p}}{E_{cm}(t_0)} \cdot \varphi_{(t_\infty, t_0)} = 195 \cdot 10^3 \cdot \frac{-3,5}{32 \cdot 10^3} \cdot 2,33 = -49,7 \quad [MPa]$$

$$\text{kde } \sigma_{cp}^{g+p} = \frac{M_{Gk}}{I_c} \cdot e_d + \frac{P_{ok}}{A} + \frac{P_{ok} \cdot e_p}{I_c} \cdot e_d = \frac{329 \cdot 10^6}{2,5 \cdot 10^{10}} \cdot 500 + \frac{-1\,545 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} + \frac{-1\,545 \cdot 10^3 \cdot 160}{2,5 \cdot 10^{10}} \cdot 500 = -3,5 \quad [\text{MPa}]$$

$$\text{kde } M_{Gk} = \frac{1}{8} \cdot G_k \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 18,3 \cdot 12^2 = 329 \quad [\text{kNm}]$$

$$P_{ok} = A_p \cdot \sigma_{p,ok} = 1\,239 \cdot 1\,246,7 = 1\,545 \cdot 10^3 \quad [\text{N}]$$

$$\varphi_{(t_\infty, t_0)} = \varphi_0 \cdot \beta_{c(t_\infty, t_0)} = 2,33 \cdot 1 = 2,33 \quad [-]$$

Smršťování betonu:

Součinitel vlivu začátku smršťování:

$$\beta_{ds(t_\infty, t_s)} = \frac{t_\infty - t_s}{t_\infty - t_s + 0,04 \sqrt{h_0^3}} = \frac{50 \cdot 365 - 5}{50 \cdot 365 - 5 + 0,04 \sqrt{261^3}} = 0,99 \quad [-]$$

Konečná hodnota poměrného smršťování

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{10}) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH} =$$

$$0,85 \left[(220 + 110 \cdot 4) \cdot \exp(-0,12 \cdot \frac{48}{10}) \right] \cdot 10^{-6} \cdot 1,22 = 3,85 \cdot 10^{-4} \quad [-]$$

$$\text{kde } \beta_{RH} = 1,55 \left[1 - \left(\frac{RH}{1} \right)^3 \right] = 1,55 \left[1 - \left(\frac{0,6}{1} \right)^3 \right] = 1,22 \quad [-]$$

Ztráta předpětí smršťováním betonu:

$$\Delta\sigma_{p,s} = E_p \cdot (\varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}) = 195 \cdot 10^3 \cdot (3,01 \cdot 10^{-4} + 7,5 \cdot 10^{-5}) = 73,3 \quad [\text{MPa}]$$

$$\text{kde } \varepsilon_{cd} = \beta_{ds(t_\infty, t_s)} \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} = 0,99 \cdot 0,79 \cdot 3,85 \cdot 10^{-4} = 3,01 \cdot 10^{-4} \quad [-]$$

$$\varepsilon_{ca} = \beta_{as(t_\infty)} \cdot \varepsilon_{ca(\infty)} = 1 \cdot 7,5 \cdot 10^{-5} = 7,5 \cdot 10^{-5} \quad [-]$$

$$\text{kde } \beta_{as(t_\infty)} = 1 - \exp(-0,2 \cdot t_\infty^{0,5}) = 1 - \exp(-0,2 \cdot (50 \cdot 365)^{0,5}) = 1 \quad [-]$$

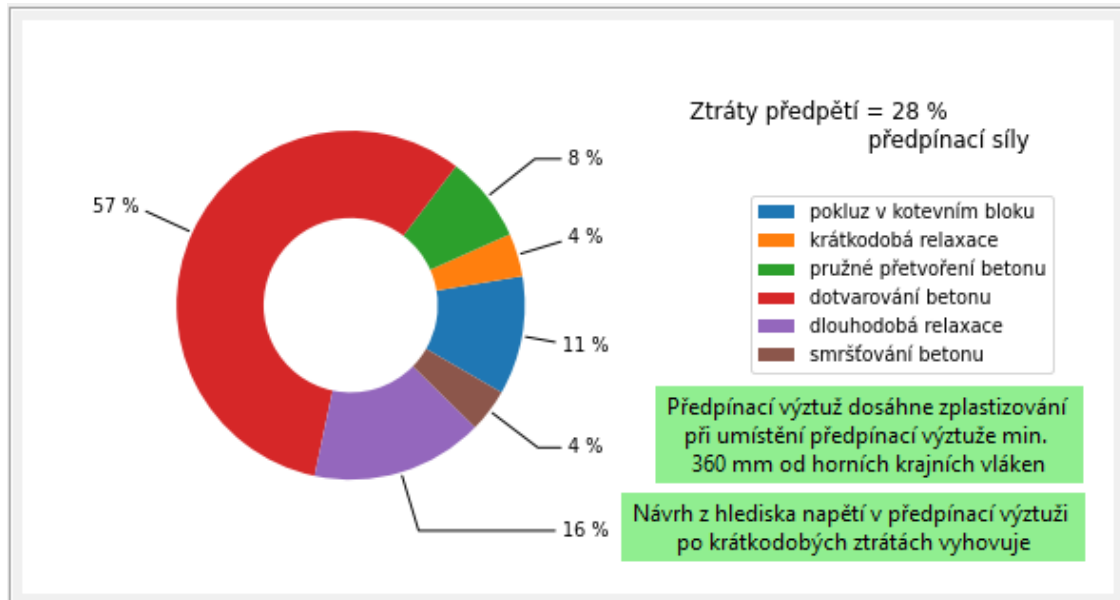
$$\varepsilon_{ca(\infty)} = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = 2,5 \cdot (40 - 10) \cdot 10^{-6} = 7,5 \cdot 10^{-5} \quad [-]$$

Hodnota předpětí na konci životnosti:

$$\sigma_{p,dl} = \sigma_{p,ok} - \Delta\sigma_{p,r,t,\infty} - \Delta\sigma_{p,c} - \Delta\sigma_{p,s} = 1\,246,7 - 59,2 - 49,7 - 73,3 = 1\,064,5 \quad [\text{MPa}]$$

8.9.4 Ztráty předpětí – výpočetní aplikace

Část 8.9 jako výstup výpočetní aplikace viz Obr. 8.7, zároveň je zde uveden požadavek na polohu výztuže a posouzení napětí po krátkodobých ztrátách.



Obr. 8.7: Ztráty předpětí vzorového příkladu z výpočetní aplikace

8.10 Posouzení MSP

8.10.1 Posouzení v okamžiku vnesení předpětí

Velikost normálové síly od předpětí v okamžiku vnesení zatížení:

$$N_{p,ok} = A_p \cdot \sigma_{p,ok} = 1\,239 \cdot 1\,246,7 = 1\,545 \cdot 10^3 \quad [\text{N}]$$

Průřez uprostřed rozpětí vazníku

Horní vlákna:

$$\frac{N_{p,ok}}{A} + \frac{N_{p,ok} \cdot e_p + M_{g0k}}{I_c} \cdot e_h \geq -0,7 f_{ck(t_0)}$$

$$\frac{-1\,545 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} + \frac{-1\,545 \cdot 10^3 \cdot 160 + 135 \cdot 10^6}{2,5 \cdot 10^{10}} \cdot (-500) \geq -0,7 \cdot 26 \quad [\text{MPa}]$$

$$-2,91 \geq -18,2 \quad [\text{MPa}] \quad \text{vyhovuje}$$

Spodní vlákna:

$$\frac{N_{p,ok}}{A} + \frac{N_{p,ok} \cdot e_p + M_{g0k}}{I_c} \cdot e_d \leq f_{ctm(t_0)}$$

$$\frac{-1\,545 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} + \frac{-1\,545 \cdot 10^3 \cdot 160 + 135 \cdot 10^6}{2,5 \cdot 10^{10}} \cdot 500 \leq 2,5 \text{ [MPa]}$$

$$-7,39 \leq 2,5 \text{ [MPa] vyhovuje}$$

Průřez v místě podpory vazníku**Horní vlákna:**

$$\frac{N_{p,ok}}{A} + \frac{N_{p,ok} \cdot e_p}{I_c} \cdot e_h \leq f_{ctm(t_0)}$$

$$\frac{-1\,545 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} + \frac{-1\,545 \cdot 10^3 \cdot 160}{2,5 \cdot 10^{10}} \cdot (-500) \leq 2,5 \text{ [MPa]}$$

$$-0,21 \leq 2,5 \text{ [MPa] vyhovuje}$$

Spodní vlákna:

$$\frac{N_{p,ok}}{A} + \frac{N_{p,ok} \cdot e_p}{I_c} \cdot e_d \geq -0,7 f_{ck(t_0)}$$

$$\frac{-1\,545 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} + \frac{-1\,545 \cdot 10^3 \cdot 160}{2,5 \cdot 10^{10}} \cdot 500 \geq -0,7 \cdot 26 \text{ [MPa]}$$

$$-10,09 \geq -18,2 \text{ [MPa] vyhovuje}$$

8.10.2 Posouzení na konci životnosti

Velikost normálové síly od předpětí na konci životnosti:

$$N_{p,dl} = A_p \cdot \sigma_{p,dl} = 1\,239 \cdot 1\,064,5 = 1\,319 \cdot 10^3 \text{ [N]}$$

Průřez uprostřed rozpětí vazníku**Horní vlákna:**

$$\frac{N_{p,dl}}{A} + \frac{N_{p,dl} \cdot e_p + M_{char}}{I_c} \cdot e_h \geq -0,6 f_{ck}$$

$$\frac{-1\,319 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} + \frac{-1\,319 \cdot 10^3 \cdot 160 + 509 \cdot 10^6}{2,5 \cdot 10^{10}} \cdot (-500) \geq -0,6 \cdot 40 \text{ [MPa]}$$

$$-10,36 \geq -24 \text{ [MPa] vyhovuje}$$

Spodní vlákna:

$$\frac{N_{p,dl}}{A} + \frac{N_{p,dl} \cdot e_p + M_{kvaz}}{I_c} \cdot e_d \leq 0$$

$$\frac{-1\,319 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} + \frac{-1\,319 \cdot 10^3 \cdot 160 + 383 \cdot 10^6}{2,5 \cdot 10^{10}} \cdot 500 \leq 0 \text{ [MPa]}$$

$$-0,96 \leq 0 \text{ [MPa] vyhovuje}$$

Průřez v místě podpory vazníku**Horní vlákna:**

$$\frac{N_{p,dI}}{A} + \frac{N_{p,dI} \cdot e_p}{I_c} \cdot e_h \leq 0$$

$$\frac{-1\,319 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} + \frac{-1\,319 \cdot 10^3 \cdot 160}{2,5 \cdot 10^{10}} \cdot (-500) \leq 0 \quad [\text{MPa}]$$

$$-0,18 \leq 0 \quad [\text{MPa}] \quad \text{vyhovuje}$$

Spodní vlákna:

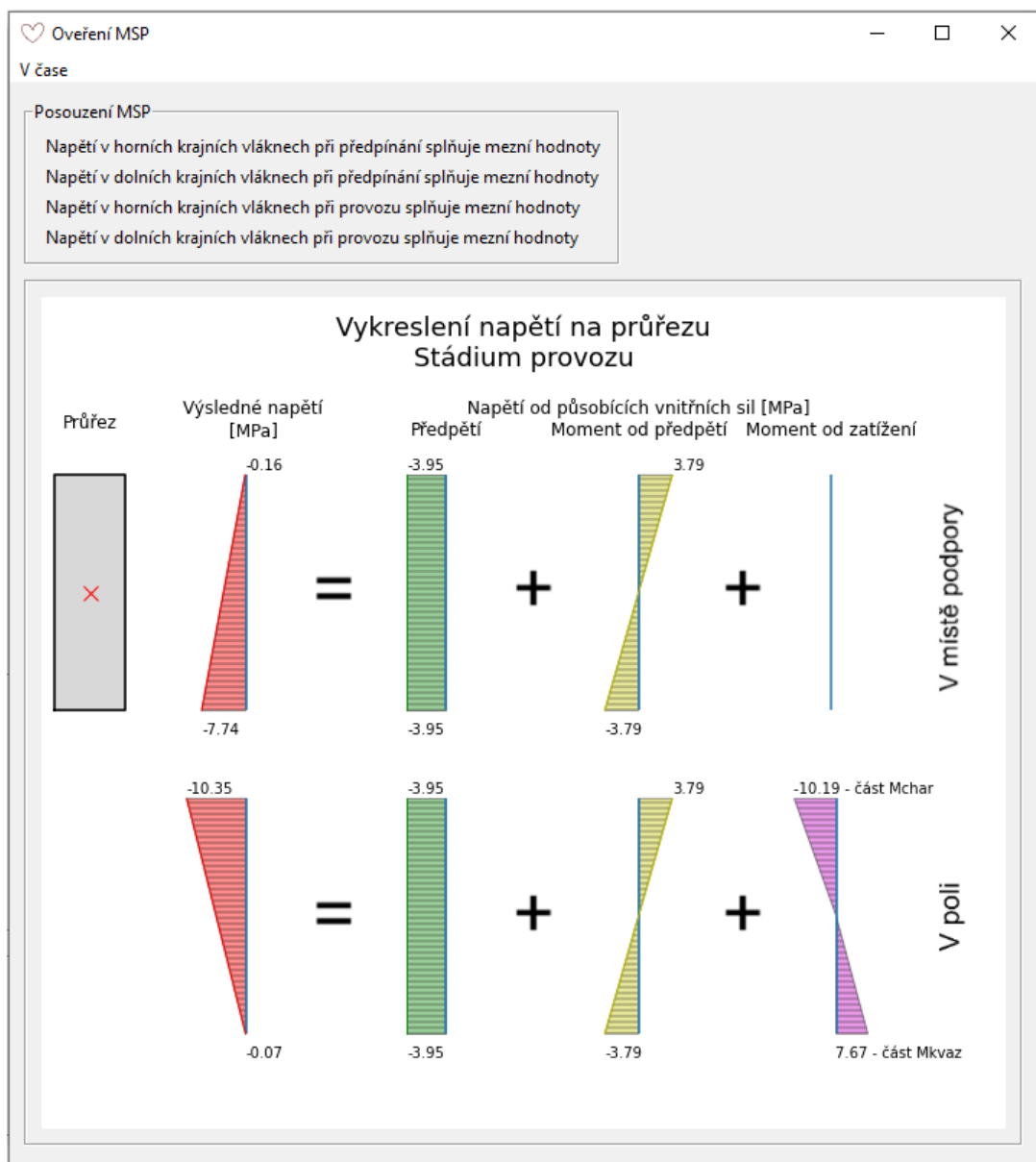
$$\frac{N_{p,dI}}{A} + \frac{N_{p,dI} \cdot e_p}{I_c} \cdot e_d \geq -0,6f_{ck}$$

$$\frac{-1\,319 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} + \frac{-1\,319 \cdot 10^3 \cdot 160}{2,5 \cdot 10^{10}} \cdot 500 \geq -0,6 \cdot 40 \quad [\text{MPa}]$$

$$-8,62 \geq -24 \quad [\text{MPa}] \quad \text{vyhovuje}$$

8.10.3 Posouzení MSP – výpočetní aplikace

Část 8.10 pro čas provozu jako výstup výpočetní aplikace viz Obr. 8.8.



Obr. 8.8: Posouzení MSP vzorového příkladu z výpočetní aplikace

8.11 Posouzení MSÚ

8.11.1 Ohyb a normálová síla

Posouzení ohybové únosnosti:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} \quad (8.4)$$

$$648 \leq 861 \text{ [kNm]} \text{ vyhovuje}$$

$$\text{kde } M_{Rd} = F_{pd} \cdot z = 1\,607 \cdot 10^3 \cdot 536 = 861 \cdot 10^6 \quad [\text{Nmm}]$$

$$\text{kde } F_{pd} = A_p \cdot f_{pd} = 1\,239 \cdot 1\,297 = 1\,607 \cdot 10^3 \quad [\text{N}]$$

$$z = |e_h| + e_p - e_{\lambda \cdot x} = |-500| + 160 - 124 = 536 \quad [\text{mm}]$$

Výška tlačené oblasti:

$$x = \frac{F_{pd}}{b \cdot \lambda \cdot f_{cd}} = \frac{1\,607 \cdot 10^3}{300 \cdot 0,8 \cdot 27} = 248 \quad [\text{mm}]$$

Ověření předpokladu zplastizování předpínací výztuže:

Mezní přetvoření při zplastizování:

$$\varepsilon_{pu} = \frac{f_{pd}}{E_p} = \frac{1\,297}{195 \cdot 10^3} = 6,65 \cdot 10^{-3} \quad [-]$$

Celkové přetvoření předpínací výztuže:

$$\sum \varepsilon_p = \varepsilon_c^p + \varepsilon_p + \Delta \varepsilon_p = -1,64 \cdot 10^{-4} + 5,46 \cdot 10^{-3} + 6,39 \cdot 10^{-3} = 11,69 \cdot 10^{-3} \quad [-]$$

$$\text{kde } \varepsilon_c^p = \frac{\sigma_c^p}{E_{cm}} = \frac{-5,75}{35 \cdot 10^3} = -1,64 \cdot 10^{-4} \quad [-]$$

$$\text{kde } \sigma_c^p = \frac{N_{p,dl}}{A} + \frac{N_{p,dl} \cdot e_p}{W_{e_p}} = -\frac{1\,319 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} - \frac{1\,319 \cdot 10^3 \cdot 160}{15,63 \cdot 10^7} = -5,75 \quad [\text{MPa}]$$

$$\text{kde } W_{e_p} = \frac{I_c}{e_p} = \frac{2,5 \cdot 10^{10}}{160} = 15,63 \cdot 10^7 \quad [\text{mm}^3]$$

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_{p,dl}}{E_p} = \frac{1\,064,5}{195 \cdot 10^3} = 5,46 \cdot 10^{-3} \quad [-]$$

$$\Delta \varepsilon_p = \frac{\varepsilon_{cu}}{\lambda \cdot x} \cdot (d_p^h - x) = \frac{0,0035}{0,8 \cdot 248} \cdot (610 - 248) = 6,39 \cdot 10^{-3} \quad [-]$$

Posouzení:

$$\sum \varepsilon_p \geq \varepsilon_{pu}$$

$$11,69 \cdot 10^{-3} \geq 6,65 \cdot 10^{-3} \quad [-] \quad \text{vyhovuje}$$

8.11.2 Smyk

Návrhová posouvající síla:

$$V_{Ed} = \frac{1}{2} \cdot f_{Ed} \cdot L = \frac{1}{2} \cdot 36,0 \cdot 12 \cdot 10^3 = 216 \cdot 10^3 \quad [\text{N}]$$

Napětí od předpětí na konci doby životnosti v těžišti průřezu:

$$\sigma_c^t = \frac{N_{p,dl}}{A} = \frac{1\,319 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} = 4,4 \leq 0,2 \cdot f_{cd} = 0,2 \cdot 27 = 5,4 \quad [\text{MPa}]$$

Smykové napětí na konci životnosti:

$$\tau_{cp} = k \cdot \frac{V_{Ed}}{A} = 2 \cdot \frac{216 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} = 1,44 \quad [\text{MPa}]$$

$$\text{kde } k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_p}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{15}} = 4,7 \leq 2$$

Návrhová smyková pevnost:

$$\text{pro } \sigma_c^t \leq \sigma_{c,lim} \quad (4,4 \leq 13 \quad [\text{MPa}]):$$

$$f_{cvd} = \sqrt{f_{ctd}^2 + \sigma_c^t \cdot f_{ctd}} = \sqrt{1,7^2 + 4,4 \cdot 1,7} = 3,22 \quad [\text{MPa}]$$

Posouzení:

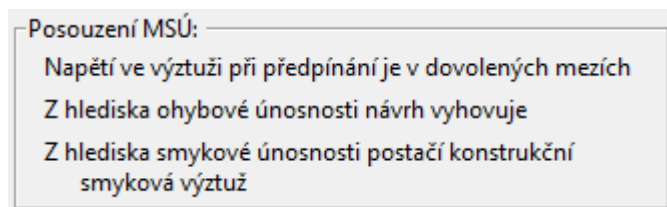
$$\tau_{cp} \leq f_{cvd}$$

$$1,44 \leq 3,22 \quad [\text{MPa}] \quad \text{vyhovuje}$$

Díky kladnému stanovisku, postačí z hlediska smykové únosnosti pouze konstrukční smyková výztuž.

8.11.3 Posouzení MSÚ – výpočetní aplikace

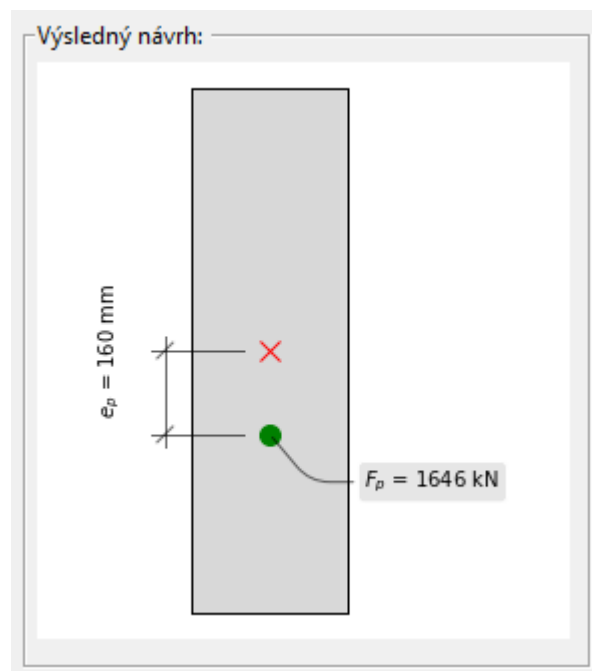
Část 8.11 společně s posouzením napětí vznikajícího při předpínání jako výstup výpočetní aplikace viz Obr. 8.9.



Obr. 8.9: Posouzení MSÚ vzorového příkladu z výpočetní aplikace

8.12 Finální návrh – výpočetní aplikace

Pro představu navrženého vazníku je na Obr. 8.10 zobrazeno schéma finálního návrhu z výpočetní aplikace.



Obr. 8.10: Schéma finálního návrhu z výpočetní aplikace

9 Závěr

Stanoveného cíle, vytvoření výpočetní aplikace, se podařilo dosáhnout. Slouží k pohodlnému návrhu předpjatého betonového vazníku pomocí metody vyrovnání napětí (popsána v kap. 2.2.1). Během návrhu nabízí podrobnější informace a cesty stanovení hodnot za současné tendence uplatňovat vztahy vycházející z českých technických norem.

Výpočetní aplikace je volně dostupná na internetové adrese [14] skrze ZIP soubor zde poskytnutý ke stažení. K samotnému spuštění aplikace je zapotřebí pouze ve staženém ZIP souboru najít výpočetní aplikaci *Navrh_predpeti* (soubor s příponou .exe) a tu spustit.

Vztahy, hodnoty a výpočty využívány aplikací, jsou společně s vizuální stránkou aplikace řádně popsány a vysvětleny v kapitolách 5 *Návrh předpjatého betonového vazníku* a 6 *Výpočetní aplikace*. Předcházející kapitoly 2 *Návrh předpětí*, 3 *Stupeň předpětí*, 4 *Ztráty předpětí*, zabývající se teorií spjatou s předpjatým betonem, mohou posloužit ke seznámení s problematikou návrhu předpětí.

Seznam obrázků

2.1	Napětí předpjatého průřezu podle [6, Obr. 3.3]	15
3.1	Stupně předpětí podle [5, Obr. 3-1]	17
6.1	Náhled aplikace po ukončeném návrhu	45
6.2	Okno aplikace po spuštění	46
6.3	Pole <i>Kvality použitého materiálu</i>	47
6.4	Pole <i>Konstrukce a Geometrie průřezu</i>	47
6.5	Okno <i>Nápověda dle empirie</i> , nevyplněné vlevo, vyplněné vpravo	48
6.6	Pole <i>Zatížení, vliv prostředí a konstrukce</i>	48
6.7	Náhled okna <i>Stupně vlivu prostředí</i> při volbě XD3	49
6.8	Náhled okna <i>Kategorie zatížení</i>	49
6.9	Pole <i>Výztuž a krytí</i>	50
6.10	Okno <i>Podrobné stanovení krytí</i> , vlevo při volbě varianty, vpravo po předpínací výztuž	50
6.11	Vysvětlující a doplňující okna <i>Podrobného stanovení krytí</i>	50
6.12	Okno <i>Podrobné stanovení krytí</i> s finálním návrhem	51
6.13	Pole <i>Návrh předpětí</i> ve fázi I.	51
6.14	Náhled na menu mezivýpočtů	52
6.15	Vedlejší okno <i>Materiálové charakteristiky</i> vlevo a <i>Přehled zatížení</i>	52
6.16	Vedlejší okno <i>Průřezové charakteristiky</i>	52
6.17	Tlačítko <i>I. Vložení vstupních hodnot & k návrhu předpětí</i>	53
6.18	Ukázkový příklad zadání špatného a správného formátu vstupu	53
6.19	Okno aplikace po potvrzení fáze 0.	54
6.20	Tlačítka pro změnu náhledu diagramu	54
6.21	Rámcová pole <i>Ověření pevnostní třídy betonu</i> a <i>Předběžná kontrola mezních stavů</i>	55
6.22	Pole <i>Návrh předpětí</i> před vyplněním vlevo, po vyplnění vpravo	55
6.23	Vykreslovací pole – průřez a diagram při vyhovujícím návrhu	56
6.24	Vykreslovací pole – průřez a diagram při nevyhovujícím návrhu	56
6.25	Označené tlačítko <i>II. Ke ztrátám</i>	57
6.26	Pole <i>Ztráty předpětí</i> a vyskakovací okno výběru relaxační třídy	57
6.27	Hlavní okno po spuštění fáze III. s vyznačeným potvrzovacím tlačítkem	58
6.28	Vykreslovací pole s grafem ztrát předpětí a posudky	58

6.29	Rámcové pole <i>Posouzení MSÚ</i> a tlačítko <i>Posouzení MSP</i>	59
6.30	Rámcové pole <i>Posouzení MSP</i>	59
6.31	Okno <i>Ověření MSP</i> s náhledem do menu	60
6.32	Tlačítko <i>IV. Finální návrh</i> a pole <i>Výsledný návrh</i>	61
7.1	Diagram pro oblast možných řešení převzat z publikace [2, Obr. 5.10.10]	63
7.2	Diagram pro oblast možných řešení z výpočetní aplikace	64
8.1	Půdorys konstrukce, schéma a průřez vazníku	65
8.2	Průřezové charakteristiky vzorového příkladu z výpočetní aplikace	68
8.3	Materiálové charakteristiky vzorového příkladu z výpočetní aplikace	70
8.4	Zatížení vzorového příkladu z výpočetní aplikace	72
8.5	Předběžná kontrola mezních stavů vzorového příkladu ve výpočetní aplikaci	74
8.6	Návrh předpětí pro průřez v poli ze vzorového příkladu ve výpočetní aplikaci	77
8.7	Ztráty předpětí vzorového příkladu z výpočetní aplikace	81
8.8	Posouzení MSP vzorového příkladu z výpočetní aplikace	84
8.9	Posouzení MSÚ vzorového příkladu z výpočetní aplikace	86
8.10	Schéma finálního návrhu z výpočetní aplikace	87

Seznam tabulek

4.1	Změny předpětí dle [5]	19
5.1	Součinitel s dle druhu cementu podle [10]	23
5.2	Stupně vlivu prostředí dle [11, Tabulka 1]	25
5.3	Doporučené hodnoty součinitelů Ψ pro pozemní stavby dle [9, Tabulka A1.1]	26
5.4	Minimální krycí vrstva $c_{min,b}$ z hlediska soudržnosti dle [10]	28
5.5	$c_{min,dur}$ z hlediska trvanlivosti dle [10, Tabulka 4.4N] pro betonářskou výztuž	28
5.6	$c_{min,dur}$ z hlediska trvanlivosti dle [10, Tabulka 4.5N] pro předpínací výztuž	29
5.7	Doporučená úprava třídy konstrukce dle [10, Tabulka 4.3N]	29
5.8	Minimální indikativní pevnostní třídy dle [10, Tabulka E.1N]	30
5.9	Doporučené hodnoty α_{r1}, α_{r2} a ρ_{1000} dle [10]	34
5.10	Mocnitel α dle [10]	37
5.11	Součinitel k_h dle [10, Tabulka 3.3]	38
5.12	Součinitelé $\alpha_{ds1}; \alpha_{ds2}$ dle [10]	39
7.1	Vstupní hodnoty ověřovacího příkladu	62
7.2	Body tvořící diagramy	63
8.1	Vstupní hodnoty fáze I. a II.	66
8.2	Zatížení	70
8.3	Vstupní hodnoty fáze III.	77

Reference

- [1] ANACONDA, INC.: Anaconda® [software]. Verze Anaconda 2020.11 pro Python 3.8. Austin (Texas): Anaconda, Inc., 19. listopadu 2020 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.anaconda.com/products/individual#windows>.
- [2] Bilčík, J.; Ludovít Fillo; Benko, V.; aj.: *Betónové konstrukce*. STU, 2008, ISBN 978-80-227-2940-6.
- [3] Codemy.com: Youtube [online]. 18. ledna 2016 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/channel/UCFB0dxMudkws1q8w5NJEAmw>.
- [4] Foglar, M.; Frantová, M.; Jiríček, P.: *Betonové konstrukce 3*. České vysoké učení technické v Praze, 2011, ISBN 978-80-01-04943-3.
- [5] Navrátil, J.: *Předpjaté betonové konstrukce*. CERM, 2008, ISBN 978-80-7204-561-7.
- [6] Navrátil, J.; Zich, M.: Předpjatý beton. [online]. 2006 [cit. 2021-04-19]. URL: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BL11-Predpjaty%20Beton/Predpjaty%20beton%20pruvodce.pdf>.
- [7] Overleaf: learn LaTeX: [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: https://cs.overleaf.com/learn/latex/Main_Page.
- [8] PYTHON SOFTWARE FOUNDATION: Python® [software]. Verze Python 3.8.5. Wilmington, Delaware (USA): Python Software Foundation, 20. července 2020 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.python.org/downloads/release/python-385/>.
- [9] ČSN EN 1990 ed. 2: *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. ÚNMZ, 2021.
- [10] ČSN EN 1992-1-1 ed. 2: *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. ÚNMZ, 2019.
- [11] ČSN EN 206+A1: *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. ÚNMZ, 2018.
- [12] Stack Exchange: [online]. New York City, New York (U.S.): Stack Exchange, Inc., září 2008 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://tex.stackexchange.com/>.
- [13] Stack Overflow: [online]. New York City, New York (U.S.): Stack Exchange, Inc., 15. září 2008 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://stackoverflow.com/>.

- [14] Štefan, R.: [online]. 2009 [cit. 2021-03-30]. URL: <http://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/software/naprd/naprd.cz.html>.