

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



**Analýza průhybů oboustranně vyztužených železobetonových nosníků
včetně vlivu dotvarování a smršťování betonu**

Analysis of Deflections of Doubly Reinforced Concrete Beams Including
the Effects of Creep and Shrinkage of Concrete

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Vedoucí práce: Ing. Jakub Holan

Zpracoval: Stanislav Voráček

Praha

2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Voráček</u>	Jméno: <u>Stanislav</u>	Osobní číslo: <u>477024</u>
Zadávací katedra: <u>Katedra betonových a zděných konstrukcí</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce pozemních staveb</u>		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Analýza průhybů oboustranně vyztužených železobetonových nosníků včetně vlivu dotvarování a smršťování betonu</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Analysis of Deflections of Doubly Reinforced Concrete Beams Including the Effects of Creep and Shrinkage of Concrete</u>	
Pokyny pro vypracování: <ul style="list-style-type: none">- rešerše literatury,- popis problému (ověření průhybu dle zjednodušeného postupu a přímého výpočtu),- vytvoření algoritmu pro výpočet a posouzení průhybu,- implementace algoritmu vytvořením programu s grafickým uživatelským rozhraním,- popis programu,- aplikace vytvořeného programu pro konkrétní úlohy.	
Seznam doporučené literatury: ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Praha: ČNI, 2006. PROCHÁZKA, Jaroslav a kol. Navrhování betonových konstrukcí 1. 2., upr. vyd. Praha: ČBS Servis, 2006. ISBN 80-903807-1-9. KOHOUTKOVÁ, Alena, Jaroslav PROCHÁZKA a Jitka VAŠKOVÁ. Navrhování železobetonových konstrukcí: Příklady a postupy. Praha: ČVUT, 2014. ISBN 978-80-01-05587-8.	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>Ing. Jakub Holan</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>15. 2. 2021</u>	Termín odevzdání bakalářské práce: <u>16. 5. 2021</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
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“.

Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)
-----------------------	---------------------

Čestné prohlášení

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

V Praze dne 14. května 2021

Vlastnoruční podpis:

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Jakobovi Holanovi za cenné rady, ochotný přístup, veškerý čas věnovaný konzultacím a zapůjčenou literaturu.

V Praze dne 14. května 2021

Stanislav Voráček

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou průhybů železobetonových konstrukcí. Cílem práce je podrobné teoretické prozkoumání problematiky průhybu. Dále, vytvoření programu, do kterého je implementován výpočtový postup pro posouzení průhybu a v neposlední řadě analýza průhybu pomocí vytvořeného programu.

Práce obsahuje podrobný popis a ukázkou postupu přímého výpočtu průhybu pro jednostranně a oboustranně vyztužené železobetonové nosníky obdélníkového průřezu se zohledněním vlivu dotvarování a smršťování betonu. Obsahem práce je též popis a ukázkou zjednodušeného posouzení průhybu dle podmínky ohybové štíhlosti. Tyto metody vychází z nejčastěji používaného postupu, který je popsán v normě ČSN EN 1992-1-1, v kapitole 7.4 [1].

V rámci této bakalářské práce byl vytvořen program MSPruhyb pro přímý výpočet průhybů jednostranně a oboustranně vyztužených železobetonových nosníků obdélníkového průřezu včetně vlivu dotvarování a smršťování betonu. Tento program je popsán v příloze této práce včetně ukázky grafického uživatelského rozhraní. Součástí práce jsou i parametrické studie, které slouží pro analýzu průhybu a též jako praktická ukázkou použití programu MSPruhyb.

Hlavním přínosem této práce je především vytvoření efektivně fungujícího programu, který uživateli poskytne možnost rychlého výpočtu průhybu na základě všech důležitých vstupních hodnot, a to včetně kontroly těchto hodnot, kontroly celého výpočtu, přehledného uvedení všech potřebných vzorců a uživatelského rozhraní, které umožňuje rychlou orientaci, uložení sad výsledků a jejich rychlé opětovné načtení. Výhodou je též snadné použití programu v systému Windows, bez nutnosti instalovat jakýkoliv další software zprostředkující otevření nebo používání této aplikace. Dalším přínosem je přehledné zpracování celého normového postupu, uvedení kompletního postupu a v neposlední řadě podrobný popis vlivu vstupních parametrů na průhyb konstrukce.

Klíčová slova

Průhyb, počítačový program, aplikace C#, MSPruhyb, mezní stav použitelnosti, oboustranně vyztužený nosník, železobetonový nosník, dotvarování a smršťování

Abstract

This bachelor thesis deals with the issues of deflections of the reinforced concrete structures. The aim of the work is detailed theoretical examination of the problem of deflections. Furthermore, the creation of the program in which it is implemented calculation procedure for deflection assessment and in last but not least the analysis of the deflection in created program.

The work contains a detailed description and an example of the procedure of direct deflection calculation for single and doubly reinforced concrete beams of rectangular cross section, taking into account the influence of creep and shrinkage of concrete. The content of the work is also a description and an example of simplified deflection assessment according to the condition of bending slenderness. These methods are based on the most commonly used procedure, which is described in the standard ČSN EN 1992-1-1, in chapter 7.4 [1].

As a part of this bachelor thesis a computer program named MSPruhyb for direct calculation of deflections of single and doubly reinforced concrete beams of rectangular cross section, taking into account the influence of creep and shrinkage of concrete was developed. This program is described in the appendix of this thesis, including an example of graphical user interface. The work includes parametric studies, which are used for analysis of deflection and also as a practical example of using the program MSPruhyb.

The main contribution of this work is the creation of an effective computer program, that provides the user an ability to quickly calculate the deflection based on all important input values, all that with including checking these values, control of the whole calculation, clear presentation of all necessary formulas and user interface, which allows quick orientation, saving results sets and their quick loading. The other advantage is easy to use program in Windows system, without the need to install any other software that mediates opening or using of this application. Another benefit of this work is the clear processing of the entire standard procedure, the introducing of the complete procedure and last but not least, a detailed description of the influence of the input parameters on the deflection of the structure.

Key words

Deflection, computer program, C# application, MSPruhyb, serviceability limit state, doubly reinforced beam, reinforced concrete beam, creep and shrinkage

Obsah

Popis použitých symbolů	10
1 Úvod	13
2 Teoretická část	14
2.1 Teoretické vysvětlení řešeného problému.....	15
2.1.1 Navrhování konstrukcí.....	15
2.1.2 Metody navrhování konstrukcí	16
2.1.3 Mezní stavy.....	17
2.1.4 Mezní stavy použitelnosti.....	18
2.1.5 Omezení průhybu.....	19
2.2 Teoretický postup pro zjednodušené posouzení prvku	20
2.2.1 Zjednodušené posouzení prvku dle ČSN EN 1992-1-1	20
2.2.2 Posouzení dle podmínky vymežující ohybové štíhlosti	21
2.3 Teoretický postup přímého výpočtu průhybu.....	23
2.3.1 Vstupní parametry do výpočtu	23
2.3.2 Výpočet součinitele dotvarování	25
2.3.3 Výpočet průřezových charakteristik pro průřez bez trhlin	29
2.3.4 Výpočet průřezových charakteristik pro průřez s plně rozvinutými trhlinami	32
2.3.5 Posouzení vzniku trhlin a omezující podmínky pro MSP	35
2.3.6 Výpočet průhybu od silového zatížení.....	38
2.3.7 Výpočet průhybu od smršťování	39
2.3.8 Výpočet celkového průhybu a omezující podmínky.....	42
3 Praktická část	43
3.1 Popis programu MSPruhyb	44
3.1.1 Zjednodušené posouzení dle podmínky ohybové štíhlosti	45
3.1.2 Přímý výpočet průhybu pro prostý nosník.....	46
3.2 Postup zjednodušeného posouzení prvku	47
3.3 Přímý výpočet průhybu dle normových vzorců	49

3.3.1	Vstupní parametry do výpočtu	49
3.3.2	Výpočet součinitele dotvarování	51
3.3.3	Výpočet průřezových charakteristik pro průřez bez trhlin	54
3.3.4	Výpočet průřezových charakteristik pro průřez s plně rozvinutými trhlinami	56
3.3.5	Posouzení vzniku trhlin a omezující podmínky pro MSP	59
3.3.6	Výpočet průhybu od silového zatížení.....	60
3.3.7	Výpočet průhybu od smršťování	60
3.3.8	Výpočet celkového průhybu a omezující podmínky.....	62
3.4	Výsledky výpočtu z programu MSPruhyb.....	63
3.5	Porovnání výsledků z programu vůči dalším postupům.....	67
3.5.1	Porovnání výsledků z programu a z ručního výpočtu	67
3.5.2	Porovnání součinitele dotvarování (MSPruhyb x FIN).....	68
3.5.3	Porovnání výpočtu průhybu (MSPruhyb x Výpočetní pomůcka)	70
3.6	Parametrické studie.....	72
3.6.1	Průhyb oboustranně vyztužené konstrukce v průběhu času.....	72
3.6.2	Průhyb konstrukce v závislosti na relativní vlhkosti.....	73
3.6.3	Průhyb konstrukce v závislosti na pevnostní třídě betonu.....	75
3.6.4	Průhyb konstrukce v závislosti na vyztužení taženou výztuží	77
3.6.5	Průhyb konstrukce v závislosti na rozpětí konstrukce	79
3.6.6	Průhyb jednostranně vyztužené konstrukce v průběhu času.....	81
4	Závěr.....	83
5	Seznam zdrojů.....	84
Příloha A	Manuál k programu MSPruhyb	86
A.1	Základní informace k programu MSPruhyb (verze 1.0).....	86
A.2	MSPruhyb – grafické uživatelské rozhraní	87
A.2.1	Zjednodušené posouzení dle podmínky ohybové štíhlosti	88
A.2.2	Přímý výpočet průhybu dle ČSN EN 1992-1-1	89
A.2.3	Nápovědy a informace o programu	90
A.2.4	Podrobné výpočty	93

A.2.5	Upozornění a informační oznámení	97
Příloha B	Tabulkové hodnoty vymežující ohybové štíhlosti.....	99
Příloha C	Vzorový příklad – jednostranně vyztužený průřez	100
C.1	MSPruhyb – jednostranně vyztužený průřez	100
C.2	Výpočetní pomůcka – jednostranně vyztužený průřez	103
Příloha D	Seznamy	107
D.1	Seznam obrázků.....	107
D.2	Seznam tabulek	109

Popis použitých symbolů

- α_e účinný poměr modulů pružnosti (tj. pracovní součinitel)
- β_{as} součinitel upravující poměrné autogenní smršťování v průběhu času
- $\beta_c(t, t_0)$ součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení
- $\beta_{cc}(t)$ součinitel závisící na stáří betonu „t“
- β_{ds} součinitel upravující poměrné smršťování vysycháním v průběhu času
- $\beta(f_{cm})$ součinitel vystihující vliv pevnosti betonu na základní součinitel dotvarování
- β_H součinitel závislý na relativní vlhkosti a na náhradním rozměru prvku
- β_{St} součinitel zohledňující vliv krátkodobé doby trvání zatížení na průměrnou hodnotu poměrného přetvoření
- β_{Lt} součinitel zohledňující vliv dlouhodobé doby trvání zatížení na průměrnou hodnotu poměrného přetvoření
- β_{RH} součinitel závislý na relativní vlhkosti
- $\beta(t_0)$ součinitel vystihující vliv stáří betonu v okamžiku vnesení zatížení na základní součinitel dotvarování
- γ_M dílčí součinitel spolehlivosti materiálu
- $\varepsilon_{ca}(\infty)$ konečná hodnota poměrného autogenního smršťování
- $\varepsilon_{ca}(t)$ poměrné autogenní smršťování v průběhu času
- $\varepsilon_{cd,0}$ základní poměrné smršťování vysycháním
- $\varepsilon_{cd}(t)$ poměrné smršťování vysycháním v průběhu času
- ε_{cs} celkové poměrné smršťování
- ζ míra spolupůsobení betonu mezi trhlinami (zohledňuje tahové zpevnění průřezu)
- λ ohybová štíhlost
- λ_d vymežující ohybová štíhlost
- $\lambda_{d,tab}$ tabulková hodnota vymežující ohybové štíhlosti
- ρ stupeň vyztužení (přesný význam viz jednotlivé vzorce)

σ_{cc}	napětí v tlačené části betonového průřezu
σ_{st}	napětí v tažené výztuži
$\varphi(t, t_0)$	součinitel dotvarování (vztažený k časovému intervalu)
φ_0	základní součinitel dotvarování
φ_{RH}	součinitel vystihující vliv relativní vlhkosti na základní součinitel dotvarování
a_c	polovina výšky průřezu
A_I	plocha ideálního průřezu
A_c	plocha betonového průřezu
A_{S1}	navržená plocha dolní tažené výztuže
A_{S2}	navržená plocha horní tlačené výztuže
b	šířka průřezu (šířka tlačené oblasti)
C_1	ohybová poddajnost průřezu bez trhlin
C_2	ohybová poddajnost průřezu s plně rozvinutými trhlinami
d	účinná výška průřezu (vzdálenost spodní výztuže od horních vláken průřezu)
d_2	vzdálenost horní výztuže od horních vláken průřezu
$E_{c,eff}$	účinný modul pružnosti betonu (zohledňuje vliv dotvarování)
E_{cm}	sečnový modul pružnosti betonu
E_s	návrhová hodnota modulu pružnosti betonářské oceli
EI_1	ohybová tuhost průřezu bez trhlin
EI_2	ohybová tuhost průřezu s plně rozvinutými trhlinami
f_{cm}	průměrná hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku v MPa ve stáří 28 dní
f_{cm0}	referenční pevnost betonu
f_{ck}	charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku v MPa ve stáří 28 dní
f_{ctm}	průměrná hodnota pevnosti betonu v dostředném tahu
f_{yk}	charakteristická mez kluzu betonářské výztuže
h_0	náhradní rozměr průřezu

I_1	moment setrvačnosti průřezu bez trhlin
I_2	moment setrvačnosti průřezu s plně rozvinutými trhlinami
k_b	součinitel závisící na náhradním rozměru průřezu
L	teoretická délka prvku (vzdálenost teoretických podpor)
M_E	ohybový moment od zatížení
M_{cr}	ohybový moment na mezi vzniku trhlin
M_{max}	ohybový moment na mezi mezního stavu použitelnosti
N_E	normálová síla od zatížení
$1/r$	křivost od smršťování
RH	relativní vlhkost okolního prostředí
RH_0	maximální relativní vlhkost prostředí
S_1	statický moment průřezové plochy výztuže k těžišti průřezu bez trhlin
S_2	statický moment průřezové plochy výztuže k těžišti průřezu s plně rozvinutými trhlinami
t	stáří betonu ve dnech v uvažovaném okamžiku; uvažovaná životnost konstrukce
$t_{i,CEMT}$	stáří betonu ve dnech v uvažovaném časovém intervalu „i“, upravené s přihlédnutím k vlivu teploty a cementu
$t_{i,T}$	stáří betonu ve dnech v uvažovaném časovém intervalu „i“, upravené s přihlédnutím k vlivu teploty
t_0	stáří betonu ve dnech v okamžiku vnesení zatížení
t_s	doba ošetřování betonu
T	průměrná teplota prostředí ve °C během období Δt_i
Δt_i	časový interval (přesný význam viz jednotlivé vzorce)
u	obvod prvku vystavený okolnímu prostředí
x_1	vzdálenost těžiště ideálního průřezu od horních vláken průřezu
x_2	výška tlačené oblasti pro průřez s plně rozvinutými trhlinami
w	průhyb prvku

1 Úvod

V rámci bakalářské práce se zaměřuji na problematiku průhybu železobetonových konstrukcí. Zkoumám teoretickou podstatu problému a různé možnosti řešení. Též se věnuji vytvoření výpočtového algoritmu pro posuzování průhybu u železobetonových konstrukcí. Tento algoritmus dále implementuji do programu s grafickým uživatelským rozhraním.

Hlavní téma této práce je přímý výpočet průhybu pro prosté nosníky s rovnoměrným spojitým zatížením, které jsou jednostranně či oboustranně vyztužené se zohledněním vlivu dotvarování a smršťování betonu dle metodiky Eurokódu 2 [1]. Přímý výpočet průhybu je však pro svou časovou náročnost často zjednodušován nebo je zcela nahrazen zjednodušeným posouzením dle podmínky ohybové štíhlosti. Tato úspora času však vede k nepřesnému určení výsledné hodnoty průhybu.

Dále je v této práci čtenáři přiblížena problematika průhybu s důrazem na vysvětlení výpočtového postupu. Součástí práce je i popis vytvořeného programu a jeho aplikace na konkrétní úlohy.

Cílem této práce je především vytvoření programu pro přímý výpočet průhybu, který umožní uživateli rychle, efektivně a na základě minimálního počtu vstupních hodnot vypočítat průhyb konstrukce zatížené ohybovým momentem se zohledněním všech relevantních proměnných. Program zároveň uživateli poskytne i přehledný náhled celého výpočtu včetně použitých vzorců.

2 Teoretická část

Teoretická část této práce je rozdělena na tři části.

První část popisuje řešenou problematiku z hlediska celku. Je zde uveden základní náhled, proč byl vybrán právě tento výpočtový postup a jaké jiné metody by se pro řešení tohoto problému daly použít. Tato část obsahuje i krátký přehled významu mezních stavů, jejich členění a velmi stručně definuje k čemu jaký mezní stav slouží.

Druhá část popisuje teoretický postup zjednodušeného posouzení prvku včetně všech použitých vzorců, proměnných a jejich komplexního vysvětlení.

Poslední podkapitola se věnuje taktéž teoretickému postupu, ale v tomto případě postupu přímého výpočtu průhybu včetně vlivu dotvarování a smršťování betonu. Opět se jedná o kompletní postup včetně všech použitých vzorců, proměnných a jejich vysvětlení.

2.1 Teoretické vysvětlení řešeného problému

Tato kapitola popisuje, proč problematiku průhybu konstrukcí vlastně řešíme a jak souvisí s navrhováním konstrukcí. Pro lepší pochopení je kapitola rozdělena na dílčí podkapitoly, přičemž se každá věnuje určité oblasti navrhování konstrukcí, a to od celistvého pohledu až po dílčí mezní stavy a jejich specifika. Níže popsany rozbor problému vychází jak z teoretických skript [2], tak i ze znalostí získaných absolvováním předmětů katedry betonových a zděných konstrukcí Fakulty stavební ČVUT.

2.1.1 Navrhování konstrukcí

Navrhování konstrukcí je proces navazujících činností, které nás provedou cestou od prvotní myšlenky až po realizaci finálního návrhu. Tento proces můžeme rozčlenit do několika částí.

První částí je koncepce návrhu, ve které si rozvrhneme, co vlastně chceme dělat, za jakým cílem a co k tomu budeme potřebovat. V našem případě se bude pravděpodobně jednat o údaje popisující konstrukční řešení daného objektu. Tedy volbu materiálu, tvar konstrukce a předběžné rozměry jednotlivých prvků konstrukce na základě našeho odhadu.

Druhou částí je samotná analýza konstrukce, zde se zpřesní náš odhad v oblasti fungování konstrukce. Určí se působící síly a zatížení, jakým musí konstrukce odolávat.

Ve třetí části pracujeme s námi odhadnutou konstrukcí a dimenzujeme jí vzhledem k působícím silám. Poté zkoumáme odezvu jednotlivých prvků konstrukce na účinky od těchto sil.

Nejdůležitější je však pochopení provázanosti jednotlivých částí. Můžeme navrhnout dimenzi konstrukce tak, že konstrukce nebude mít problém s přenesením veškerého zatížení, ale pokud bude tak neefektivní, že se nám nevyplatí realizovat, je vhodné zvážit, zda se nevrátit na úplný začátek procesu navrhování a nezvolit zcela jinou koncepci návrhu.

U stavebních konstrukcí je tedy velmi důležité zohlednit všechny aspekty, které do návrhu vstupují.

2.1.2 Metody navrhování konstrukcí

Pokud pomineme metody typu pokus-omyl, využívané v historii, můžeme metody navrhování rozdělit do dvou velkých skupin.

První skupinou jsou **deterministické metody** navrhování konstrukcí. Ty vyjadřují spolehlivost konstrukce pomocí empirických hodnot (hodnoty pevnosti materiálu a působícího zatížení). Mezi deterministické metody se řadí metoda dovolených namáhání a metoda stupně bezpečnosti [2]. Tyto metody v současnosti již nepoužíváme.

Metoda dovolených namáhání je nejstarší metodou. Princip metody spočívá v porovnání působícího napětí (stanoveného podle lineárně pružného chování materiálu) vyvolaného zatížením konstrukce a maximálního dovoleného namáhání. Přičemž maximální dovolené namáhání se stanoví jako podíl průměrné pevnosti materiálu a míry bezpečnosti (určené na základě zkušeností z obdobných konstrukcí).

$$\sigma_k \leq \frac{f_m}{k} \quad (2.1.1)$$

kde σ_k je působící napětí vyvolané zatížením

f_m je průměrná pevnost materiálu

k je míra bezpečnosti

$\frac{f_m}{k}$ vyjadřuje maximální dovolené namáhání

Metoda stupně bezpečnosti je velmi podobná. Zde se počítá odolnost prvku na základě průměrné pevnosti použitého materiálu, avšak zavádí se zde již pružně-plastické chování materiálů, což je bližší reálnému chování materiálů. Odolnost prvku se pak porovnává s účinkem od provozního zatížení. Tento účinek je ale vynásoben ještě stupněm bezpečnosti.

$$\gamma \cdot E_k \leq R_m \quad (2.1.2)$$

kde E_k je účinek od provozního zatížení (např. ohybový moment, normálová síla apod.)

R_m je odolnost prvku

γ je stupeň bezpečnosti ($\gamma \geq 1,0$)

Druhou skupinou jsou **pravděpodobnostní metody**, ty považují chování konstrukce za náhodně proměnný jev, který lze popsat za pomoci použití metod matematické statistiky. Konkrétně pomocí normálního rozdělení (Gaussova křivka). Mezi tyto

metody patří jak metody čistě pravděpodobnostní, tak i metody polo-pravděpodobnostní. V současné době používáme pro návrh konstrukce polo-pravděpodobnostní metodu **mezních stavů**. Ta zohledňuje jak stavy týkající se bezpečnosti konstrukce, tak i stavy popisující správnou funkci konstrukce během užívání stavby. Viz kapitola 2.1.3.

2.1.3 Mezní stavy

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, mezní stavy musí obsáhnout široké spektrum návrhových parametrů. Proto rozlišujeme dvě skupiny mezních stavů.

První skupinou jsou **mezní stavy únosnosti (MSÚ)**. Ty se týkají bezpečného provozování konstrukce po celou dobu její plánované životnosti. Zjednodušeně se dá říci, že popisují „mezní“ stav konstrukce, při kterém dojde k tak rozsáhlým poruchám, že následuje kolaps části nebo celé konstrukce. V MSÚ se sledují maximální napětí a přetvoření vyvolané účinkem sil od vnitřních a vnějších vlivů, které na konstrukci působí. Konkrétně se zabýváme působením momentů a sil, které způsobují namáhání konstrukce (ohyb, tah, tlak, smyk, kroucení apod.). Tyto namáhání se dají vyjádřit pomocí návrhové hodnoty účinku zatížení a musíme je posoudit s maximální přípustnou „mezní“ hodnotou pro takový účinek. Obecně se označují jako podmínky únosnosti a jsou vyjádřeny vzorcem (2.1.3).

$$E_d \leq R_d \quad (2.1.3)$$

kde E_d je návrhová hodnota účinku zatížení uvažovaného v mezních stavech únosnosti (např. M_{Ed} tj. návrhový ohybový moment od účinku zatížení)

R_d je návrhová přípustná hodnota tohoto účinku (např. M_{Rd} tj. návrhový moment únosnosti)

Druhou skupinou jsou **mezní stavy použitelnosti (MSP)**. Ty se týkají funkce konstrukce nebo její části během užívání stavby, vzhledu a pobytové pohody osob. Opět můžeme zjednodušeně říci, že se jedná o „mezní“ stav, kdy konstrukce přestává vyhovovat běžnému provozu. V MSP se sledují deformace, kmitání či nadměrné poškození konstrukce. Tyto nepříznivé vlivy je nutné porovnat s max. přípustnými hodnotami. Souhrnně můžeme tyto vlastnosti označit jako podmínky použitelnosti a splnění těchto podmínek vyjádřit ze vzorce (2.1.4).

$$E_d \leq C_d \quad (2.1.4)$$

kde E_d je návrhová hodnota účinku zatížení uvažovaného v mezních stavech použitelnosti

C_d je návrhová hodnota příslušného kritéria použitelnosti

V některé literatuře se můžeme u MSP setkat s pojmem **charakteristická** hodnota účinku zatížení. Pak návrhovou hodnotu získáme tak, že charakteristickou hodnotu vynásobíme součinitelem zatížení, který je pro MSP rovný jedné ($\gamma_{MSP} = 1,0$). Jinými slovy, u MSP je charakteristická a návrhová hodnota účinku zatížení jedno a totéž.

Jednotlivé mezní stavy použitelnosti jsou blíže popsány v kapitole 2.1.4.

2.1.4 Mezní stavy použitelnosti

V kapitole 2.1.3 jsme si představili význam obou skupin mezních stavů a jakou oblast návrhu popisují. V této kapitole se podíváme na nejčastější mezní stavy použitelnosti, s kterými se při výpočtech železobetonových konstrukcí můžeme setkat. Jsou to stavy omezující napětí, trhliny a průhyb.

Mezní stav omezení napětí udává maximální napětí, které by nemělo být přesaženo z hlediska trvalých deformací a s tím souvisejících nadměrných průhybů konstrukce. Omezujeme napětí betonu v tlaku, abychom zabránili rozvoji podélných trhlin, které by vedly k nadměrnému dotvarování konstrukce. Dále omezujeme napětí betonářské výztuže v tahu, abychom zabránili trvalé deformaci výztuže a tím i větším průhybům celé konstrukce. Na jaké maximální hodnoty napětí omezujeme je uvedeno v normě [1] v kapitole 7.2.

Mezní stav omezení trhlin udává maximální přípustnou šířku trhlin, která by neměla být přesažena z hlediska použitelnosti a trvanlivosti konstrukce. Na druhou stranu, vznik trhlin přispívá k aktivaci výztuže a zajišťuje tak správné spolupůsobení betonu a tažené výztuže. Obsáhlejší informace o této problematice a postup výpočtu šířky trhlin je uveden v normě [1] v kapitole 7.3.

Mezní stav omezení průhybu udává limitní hodnotu průhybu konstrukce, která by neměla být přesažena z hlediska funkčnosti, vzhledu a vztahu k okolním konstrukcím. Vzhledem k zaměření této práce, je meznímu stavu omezení průhybu věnována celá kapitola 2.1.5. Další informace o tomto mezním stavu jsou uvedeny v normě [1] v kapitole 7.4.

2.1.5 Omezení průhybu

Mezní stav omezení průhybu nám limituje průhyb konstrukce, a to na takovou hodnotu, která zajišťuje správnou funkčnost nosné konstrukce, neovlivňuje okolní nosné či výplňové konstrukce a nenarušuje pobytovou pohodu osob.

S nadměrným průhybem se může pojit mnoho problémů. Velké deformace nosných konstrukcí mohou poškodit přilehlé výplňové konstrukce. Trhliny, které nadměrný průhyb doprovází pak způsobují různé estetické vady povrchových úprav. Už malý průhyb může nepříznivě ovlivnit fungování strojního vybavení, které je s danou konstrukcí pevně spjato. I tento krátký, avšak neúplný výčet problémů, které může nadměrný průhyb způsobit, jistě stačí jako důvod k tomu, abychom se průhybem konstrukcí zabývali.

Průhyb konstrukce je na první pohled deformace od působícího zatížení. To ovšem není zdaleka jediné kritérium, které musíme při určení průhybu zohlednit. Proto existuje nepřehledné množství metod, jak průhyb stanovit. Hlavní odlišností jednotlivých metod je bezpochyby jejich preciznost. Zjednodušeně lze říci, že jsou postupy, které neberou v potaz všechny parametry, jejich výpočet je krátký, avšak ne úplně přesný a často i dost konzervativní. Na druhém konci jsou pak postupy, které zohledňují veškeré působící vlivy, mají přesnější výsledky, ale jejich nevýhodou je zpravidla dlouhý postup výpočtu.

Pokud se budeme striktně držet normového postupu [1], tak průhyb můžeme ověřit pomocí dvou metod. První metoda omezuje poměr rozpětí prvku ku účinné výšce průřezu. Jedná se o zjednodušenou metodu, která nám v krátkém čase dokáže přinést jasnou představu o tom, zda konstrukce na průhyb vyhoví či nikoliv. Tento **zjednodušený postup** je popsán v kapitole 2.2. Bližší informace lze nalézt též v normě [1] v podkapitole 7.4.2. Druhá metoda se zakládá na porovnání vypočteného průhybu (tj. průhybu, který je způsobený silovým či nesilovým zatížením a dotvarováním konstrukce) a limitního průhybu, daného mezní hodnotou. V tomto případě se jedná o komplexní **postup pomocí přímého výpočtu**, který zohledňuje mnohem více parametrů. Tento výpočtový postup je podrobně popsán v kapitole 2.3. Případně je nastíněn v normě [1] v podkapitole 7.4.3.

2.2 Teoretický postup pro zjednodušené posouzení prvku

V této kapitole je vysvětlen postup, při kterém nepočítáme přesnou hodnotu průhybu, ale pouze ověřujeme, zda vyhovuje mezní poměr rozpětí prvku k účinné výšce průřezu. Norma [1] udává, že v případě, kdy následující posouzení vyhoví, je možné upustit od přímého výpočtu průhybu. Obsahem této kapitoly jsou vzorce a jejich podrobný popis. Názorná ukázka výpočtu dle následujících vzorců je uvedena v části 3.2 této práce.

Následující podkapitoly ukazují dvě možné varianty zjednodušeného posouzení, které může uživatel použít. První vychází přímo z normy [1] a je blíže popsán v podkapitole 2.2.1. Druhý postup uvedený v podkapitole 2.2.2 vychází též z normových vzorců, ale pro zjednodušení výpočtu jsou z normových vzorců vytvořeny tabulkové hodnoty [7].

2.2.1 Zjednodušené posouzení prvku dle ČSN EN 1992-1-1

Tento zjednodušený postup vychází z podkapitoly 7.4.2 v normě [1] a udává nám, za jakých podmínek můžeme upustit od přímého výpočtu průhybu.

Následující vzorec, který posuzuje mezní poměr dle stupně vyztužení obsahuje na levé straně poměr délky prvku a jeho účinné výšky. Na straně pravé pak udává onen mezní poměr, který závisí na pevnosti použitého betonu a na procentuálním stupni vyztužení betonářskou výztuží.

$$\frac{l}{d} = K \cdot \left[11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \cdot \frac{\rho_0}{\rho} + 3,2\sqrt{f_{ck}} \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad \text{pro } \rho \leq \rho_0 \quad (2.2.1a)$$

$$\frac{l}{d} = K \cdot \left[11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \cdot \frac{\rho_0}{\rho - \rho'} + \frac{1}{12}\sqrt{f_{ck}} \cdot \sqrt{\frac{\rho'}{\rho_0}} \right] \quad \text{pro } \rho > \rho_0 \quad (2.2.1b)$$

kde l je rozpětí prvku

d je účinná výška prvku

K je součinitel, kterým se zohledňují různé nosné systémy

ρ_0 je referenční stupeň vyztužení, který se vypočte podle vzorce (2.2.2)

$$\rho_0 = 10^{-3} \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (2.2.2)$$

ρ je skutečný stupeň vyztužení tahovou výztuží ve středu rozpětí (u konzoly ve vetknutí) navržený na účinky ohyb. momentu vyvozeného návrhovým zatížením

ρ' je skutečný stupeň vyztužení tlakovou výztuží ve středu rozpětí (u konzoly ve vetknutí) navržený na účinky ohyb. momentu vyvozeného návrhovým zatížením

f_{ck} je charakteristická pevnost betonu v tlaku měřená na válci v MPa ve stáří 28 dní

Uvedený vzorec (2.2.1) byl odvozen za předpokladu, že napětí v tažené výztuži σ_s , odpovídá 310 MPa (to odpovídá přibližně $f_{yk} = 500$ MPa). Pokud tomu tak není, je nutné hodnoty získané ze vzorce (2.2.1) vynásobit poměrem $310/\sigma_s$. Dále je nutné zohlednit několik dalších parametrů jako je typ prvku, jeho tvar, rozpětí apod. pomocí celé řady koeficientů. Všechny potřebné informace jsou uvedeny v již zmíněné kapitole 7.4.2 v normě [1].

Pro zjednodušení výpočtu je často používán postup, který z tohoto vzorce (potažmo z této kapitoly) přímo vychází. Tento upravený postup popisuje kapitola 2.2.2.

2.2.2 Posouzení dle podmínky vymežující ohybové štíhlosti

Normový postup z kapitoly 2.2.1 je možné transformovat a na základě vzorců sestavit postup následující. Ten uživateli poskytne identické výsledky, ale je zde zmíněn pro úplnost a z důvodu využití tohoto postupu v praxi i při výuce.

Základní podmínka, která musí být splněna, abychom nemuseli posuzovat průhyb pomocí přímého výpočtu je následující:

$$\lambda \leq \lambda_d \quad (2.2.3)$$

kde λ je ohybová štíhlost kontrolovaného prvku

$$\lambda = \frac{L}{d} \quad (2.2.4)$$

kde L je rozpětí prvku (teoretická délka prvku)

d je účinná výška prvku

λ_d je vymežující ohybová štíhlost

Vymežující ohybová štíhlost se určí na základě vzorce (2.2.5).

$$\lambda_d = \kappa_{c1} \cdot \kappa_{c2} \cdot \kappa_{c3} \cdot \lambda_{d,tab} \quad (2.2.5)$$

kde κ_{c1} je součinitel tvaru průřezu

pro T-průřez s poměrem šířky příruby k šířce žebra větší než 3 je
 $\kappa_{c1} = 0,8$

pro ostatní průřezy je $\kappa_{c1} = 1,0$

κ_{c2} je součinitel rozpětí

pro rozpětí $L \leq 7$ m je $\kappa_{c2} = 1,0$

pro rozpětí $L > 7$ m je $\kappa_{c2} = 7/L$

kde L je rozpětí prvku v metrech

κ_{c3} je součinitel napětí tahové výztuže

$$\kappa_{c3} = \frac{500}{f_{yk}} \cdot \frac{A_{s,prov}}{A_{s,req}} \quad (2.2.6)$$

kde f_{yk} je charakteristická mez kluzu betonářské výztuže v MPa

$A_{s,prov}$ je navržená plocha tahové výztuže v mm²

$A_{s,req}$ je potřebná plocha tahové výztuže v mm², kterou zjistíme z následujícího vzorce:

$$A_{s,req} = \frac{b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_{Ed}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}} \right) \quad (2.2.7)$$

kde b je šířka průřezu

d je účinná výška průřezu

f_{cd} je návrhová pevnost betonu v tlaku

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_{M_{beton}}} \quad (2.2.8)$$

f_{yd} je návrhová mez kluzu betonářské výztuže

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M_{výztuž}}} \quad (2.2.9)$$

M_{Ed} je návrhový ohybový moment od zatížení

$\lambda_{d,tab}$ je tabulková hodnota vymezuující ohybové štíhlosti dle typu konstrukce, třídy betonu a stupně vyztužení (tabulky viz [Příloha B](#))

Stupeň vyztužení, který musíme znát pro interpolaci v tabulce, určíme z poměru navržené plochy výztuže a plochy betonu.

$$\rho = \frac{A_{s,prov}}{b \cdot h} \quad (2.2.10)$$

kde b a h je jsou rozměry průřezu (udávající plochu betonu)

2.3 Teoretický postup přímého výpočtu průhybu

V této kapitole je popsán chronologický postup přímého výpočtu průhybu pro oboustranně vyztužený obdélníkový železobetonový průřez. Statické působení odpovídá prostému nosníku s rovnoměrným spojitým zatížením. Obsahem této části jsou vzorce a jejich podrobný popis. Názorná ukázka výpočtu dle následujících vzorců je předmětem kapitoly 3.3.

Dále jsou zde vysvětleny souvislosti mezi jednotlivými částmi výpočtu. Jedná se o ucelený postup, podle kterého lze postupovat i u dalších výpočtových stavů. Cílem je ukázat, na čem závisí jednotlivé části výpočtu, a především v čem se liší.

Postup přímého výpočtu vychází z podkapitoly 7.4.3 v normě [1] a též z dalších oddílů normy na které se kapitola 7.4.3 odkazuje.

2.3.1 Vstupní parametry do výpočtu

Tato podkapitola obsahuje vysvětlení některých vstupních parametrů, jejichž stanovení není předmětem podrobného výpočtu. Případně jsou zde zmíněny vstupy, u kterých by nemuselo být na první pohled patrné, jak je správně určit.

2.3.1.1 Charakteristiky betonu

Všechny pevnostní a deformační charakteristiky betonu použité při výpočtu průhybu vychází z analytických vztahů uvedených v normě [1] v tabulce 3.1. Konkrétně se jedná o tyto vztahy.

Průměrná hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku v MPa ve stáří 28 dní:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (2.3.1)$$

kde f_{ck} je charakteristická pevnost betonu v tlaku měřená na válci v MPa ve stáří 28 dní

Průměrná hodnota pevnosti betonu v dostředném tahu v MPa:

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{(2/3)} \quad \text{pro } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (2.3.2a)$$

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10} \right) \right] \quad \text{pro } f_{cm} > 50 \text{ MPa} \quad (2.3.2b)$$

kde f_{ck} je charakteristická pevnost betonu v tlaku měřená na válci v MPa ve stáří 28 dní

f_{cm} je průměrná hodnota válcové pevnosti v tlaku v MPa, viz vztah (2.3.1)

Sečnový modul pružnosti betonu v GPa:

$$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \quad (2.3.3)$$

kde f_{cm} je průměrná hodnota válcové pevnosti v tlaku v MPa, viz vztah (2.3.1)

Charakteristiky betonu by bylo možné upravit součinitelem $\beta_{cc}(t)$, který upravuje pevnost betonu v závislosti na čase. Tato úprava však v této práci není uvažována z následujících důvodů.

Prvním z těchto důvodů je poznámka v normě [1] (v kapitole 3.1.2), která nám říká, že součinitel $\beta_{cc}(t)$ je stanovený pro průměrnou teplotu 20 °C. Vytvořený program pro výpočet průhybu však umožňuje uvažovat rozsah teplot od 0 °C do 80 °C (viz příloha B v normě [1]). Tento rozsah teplot je zohledněn vzorcem (2.3.16) v kapitole 2.3.2.3. Dá se tedy předpokládat, že použití součinitele $\beta_{cc}(t)$ při teplotě jiné než 20 °C nemusí poskytovat správné výsledky.

Dalším důvodem je skutečnost, že součinitel $\beta_{cc}(t)$ nabývá, pro dobu trvání zatížení větší než 28 dní, hodnot větších než 1,0 a tím zvyšuje pevnost betonu. Použitím tohoto součinitele tedy předpokládáme vyšší pevnost betonu v dlouhodobém časovém horizontu. Tento předpoklad je obecně správný, ale nemůžeme si být jisti, o kolik se pevnost betonu dlouhodobě zvýší, jelikož na každou konstrukci působí různé vlivy okolního prostředí. Z tohoto důvodu i při běžných výpočtech uvažujeme normovou hodnotu při 28 dnech a jsme tak na straně bezpečnosti.

2.3.1.2 Ostatní vstupní parametry

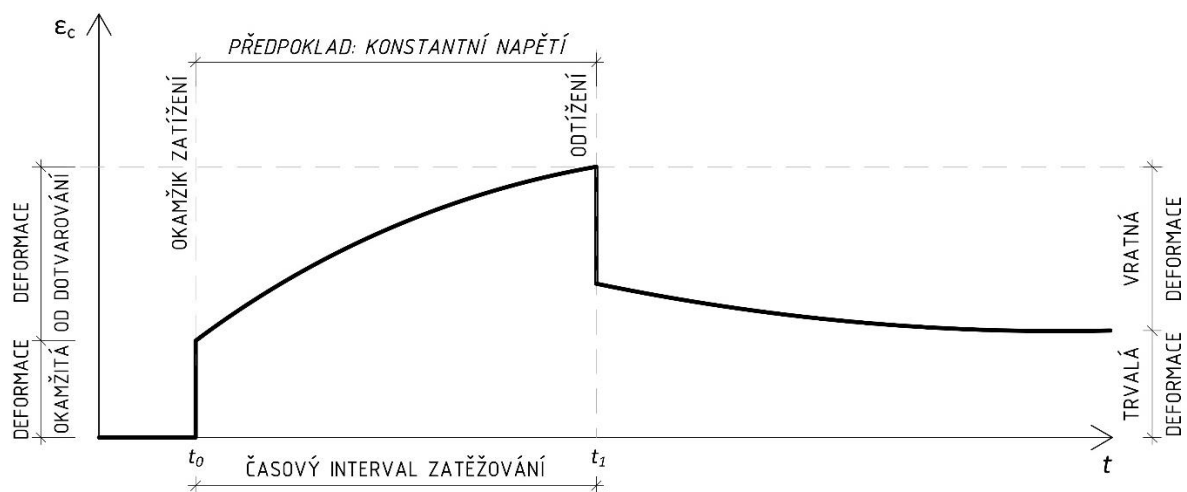
Vzdálenost výztuže od krajních vláken d_i je určena jako součet požadovaného krytí výztuže, šířky třmínků (pokud v konstrukci jsou) a poloviny výšky profilu hlavní nosné výztuže.

$$d_i = c_{NOM} + \phi_{TŘ} + \frac{\phi_{HNV}}{2} \quad (2.3.4)$$

Obvod prvku vystavený okolnímu prostředí u je suma délek jednotlivých částí prvku, které jsou v kontaktu s okolním prostředím. V případě samostatného nosníku je obvod u roven obvodu prvku. Pokud by se však jednalo o nosník, na kterém bude vybetonována ŽB deska, pak se u vypočítá jako suma spodní a bočních stran nosníku.

2.3.2 Výpočet součinitele dotvarování

Pokud při výpočtu uvažujeme, že je prvek zatížen (silově či nesilově) po nějaký stanovený časový interval, pak musíme tuto skutečnost zohlednit právě skrze součinitel dotvarování. Tím vezmeme v úvahu i deformace, které nejsou způsobené okamžitým zatížením konstrukce, ale až dlouhodobým působením tohoto zatížení. Názorněji si to lze představit pomocí Obr. 2.1, který popisuje přetvoření betonu v průběhu času. Obrázek je pouze ilustrační pro lepší pochopení významu deformace od dotvarování. Proporční měřítko deformací závisí na mnoha faktorech. Tato problematika je podrobněji popsána ve skriptech [2] v kapitole 3.



Obr. 2.1: Graf dotvarování – závislost deformace na čase zatěžování

Z grafu je na první pohled patrné, že zanedbáním deformace od dotvarování můžeme dostat zcela jiné výsledky. Tento rozdíl závisí především na čase, ale i na mnoha dalších faktorech jako je okolní teplota, vlhkost apod., proto v žádném případě nemůžeme vliv dotvarování zanedbat.

Součinitel dotvarování nám umožňuje upravit charakteristiky průřezu za pomoci redukce modulu pružnosti betonu. Tímto způsobem můžeme zohlednit změny, které probíhají ve struktuře betonu. Tyto změny jsou vyvolány účinkem dlouhotrvajícího napětí mezi jednotlivými složkami betonu na mikrostrukturální úrovni.

Nejdůležitější je, uvědomit si, že součinitel dotvarování závisí (krom mnoha dalších proměnných) především na čase. Přesněji na délce časového intervalu. Pro nulový časový interval (okamžik) platí, že součinitel dotvarování je roven nule a modul pružnosti se nijak nezmění. Naopak, ze vzorového příkladu (viz kapitoly 3.3.2.1 a 3.3.2.2) je patrné, že pro delší časový interval vychází vyšší hodnota součinitele dotvarování.

Následující vztahy popisují postup výpočtu součinitele dotvarování $\varphi(t, t_0)$ pro časový interval od okamžiku vnesení zatížení, tj. času „ t_0 “ až po finální stav, tedy čas „ t “, který reprezentuje čas, ve kterém chceme zjistit výsledný průhyb (např. průhyb na konci návrhové životnosti konstrukce).

Čas vnesení zatížení obecně označený jako „ t_0 “ se může týkat buď vnesení silového zatížení „ t_0 “ nebo zatížení od smršťování „ t_s “.

Výpočet vychází ze vztahů uvedených v normě [1] v příloze B.1. Tento normový postup je možné použít pouze pro výpočet lineárního dotvarování, kde platí, že napětí v betonu nepřesáhne 45 % charakteristické pevnosti betonu. Pro získání nelineárního součinitele dotvarování by bylo nutné vypočtenou hodnotu $\varphi(t, t_0)$ ještě upravit dle vzorců uvedených v kapitole 3.1.4 v normě [1]. Tento postup však v této práci není použit. V práci je uvažováno pouze lineární dotvarování.

Hodnota součinitele dotvarování $\varphi(t, t_0)$ je vypočtena ze vztahu:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0) \quad (2.3.5)$$

kde φ_0 je základní součinitel dotvarování

$\beta_c(t, t_0)$ je součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení

2.3.2.1 Základní součinitel dotvarování

Základní součinitel dotvarování φ_0 získáme ze vzorce:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad (2.3.6)$$

kde φ_{RH} je součinitel, vystihující vliv relativní vlhkosti na základní součinitel dotvarování

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \quad \text{pro } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa} \quad (2.3.7a)$$

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - RH/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 \quad \text{pro } f_{cm} > 35 \text{ MPa} \quad (2.3.7b)$$

kde RH je relativní vlhkost okolního prostředí v %

h_0 je náhradní rozměr prvku v mm

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u} \quad (2.3.8)$$

kde A_c je plocha průřezu v mm²

u je obvod prvku vystavený okolnímu prostředí v mm

α_1 a α_2 jsou součinitele zohledňující vliv pevnosti betonu

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,7} \quad \alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,2} \quad (2.3.9)$$

$\beta(f_{cm})$ je součinitel, vystihující vliv pevnosti betonu na základní součinitel dotvarování

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} \quad (2.3.10)$$

kde f_{cm} je průměrná hodnota pevnosti betonu v tlaku v MPa ve stáří 28 dní

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (2.3.11)$$

kde f_{ck} je charakteristická pevnost betonu v tlaku měřená na válci v MPa ve stáří 28 dní

$\beta(t_0)$ je součinitel, vystihující vliv stáří betonu v okamžiku vnesení zatížení na základní součinitel dotvarování

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0,1 + t_{0,CEMT})^{0,2}} \quad (2.3.12)$$

kde $t_{0,CEMT}$ je stáří betonu ve dnech v okamžiku vnesení zatížení upravené nejprve vlivem teploty a poté i vlivem použitého druhu cementu. Postup zjištění upraveného času $t_{0,CEMT}$ z času t_0 je popsán v kapitole 2.3.2.3.

2.3.2.2 Součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení

Součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení $\beta_c(t, t_0)$ vypočteme ze vztahu:

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{(\beta_H + t - t_0)} \right]^{0,3} \quad (2.3.13)$$

kde β_H je součinitel závislý na relativní vlhkosti RH v % a na náhradním rozměru prvku h_0 v mm, lze ho stanovit ze vztahu:

$$\beta_H = \min(1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot RH)^{18}] \cdot h_0 + 250; 1\,500) \quad \text{pro } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa} \quad (2.3.14a)$$

$$\beta_H = \min(1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot RH)^{18}] \cdot h_0 + 250 \cdot \alpha_3; 1\,500 \cdot \alpha_3) \quad \text{pro } f_{cm} > 35 \text{ MPa} \quad (2.3.14b)$$

kde α_3 je součinitel zohledňující vliv pevnosti betonu

$$\alpha_3 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,5} \quad (2.3.15)$$

h_0 je náhradní rozměr prvku v mm, viz vztah (2.3.8)

RH je relativní vlhkost okolního prostředí v %

$t - t_0$ je doba trvání zatížení ve dnech (uvažujeme skutečnou dobu trvání, nijak neupravujeme vzhledem k teplotě nebo cementu)

kde t je stáří ve dnech v uvažovaném okamžiku (např. životnost konstrukce)

t_0 je stáří betonu ve dnech v okamžiku vnesení zatížení (např. odbednění konstrukce)

2.3.2.3 Úprava stáří betonu v závislosti na teplotě a druhu cementu

Velmi zjednodušeně se dá říci, že v běžných podmínkách odpovídá uvažované stáří betonu v okamžiku vnesení zatížení t_0 skutečnému stáří betonu. Běžnými podmínkami je v tomto případě myšlena teplota okolo 20 °C a použití cementu třídy N. Pro komplexnější výpočty a dosažení vyšší přesnosti je však vhodné při výpočtu $\beta(t_0)$ uvážit vliv zvýšených či snížených teplot a druh použitého cementu. Pro tyto účely se použijí následující vzorce pro upravení základního času t_0 :

Nejprve úprava času na základě teploty v rozsahu od 0 °C do 80 °C.

$$t_{0,T} = e^{\left[-\left(\frac{4000}{[273+T(\Delta t_i)]} - 13,65 \right) \right]} \cdot \Delta t_i \quad (2.3.16)$$

kde $T(\Delta t_i)$ je průměrná teplota ve °C během období Δt_i

Δt_i je počet dní pro který úpravu provádíme, tj. v našem případě čas t_0

Dále pak úprava času vzhledem k použitému typu cementu.

$$t_{0,CEMT} = \max \left[t_{0,T} \cdot \left(\frac{9}{2 + (t_{0,T})^{1,2}} + 1 \right)^\alpha ; 0,5 \right] \quad (2.3.17)$$

kde $t_{0,T}$ je čas upravený vlivem teploty, viz vztah (2.3.16)

α je mocnitel vystihující vliv druhu cementu:

pro cementy třídy S je $\alpha = -1$

pro cementy třídy N je $\alpha = 0$

pro cementy třídy R je $\alpha = 1$

2.3.3 Výpočet průřezových charakteristik pro průřez bez trhlin

Po výpočtu součinitele dotvarování můžeme přejít k samotnému určení charakteristik průřezu. Prvním krokem je výpočet účinného modulu pružnosti betonu ze vztahu:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(t, t_0)} \quad (2.3.18)$$

kde E_{cm} je sečnový modul pružnosti betonu

$\varphi(t, t_0)$ je výše zmíněný součinitel dotvarování

Průřez železobetonového prvku, jehož průhyb stanovujeme, je heterogenní neboli uvažujeme betonový průřez, ve kterém se nachází určité množství výztuže. Jelikož však chceme určit jednotné charakteristiky průřezu, potřebujeme převést výztuž na ekvivalentní hmotu betonu. K tomu slouží účinný poměr modulů pružnosti (též známý jako pracovní součinitel), který nám udává poměr modulů pružnosti betonářské oceli a betonu. Tento součinitel vypočteme ze vztahu:

$$\alpha_e = E_S / E_{c,eff} \quad (2.3.19)$$

kde E_S je návrhová hodnota modulu pružnosti betonářské oceli

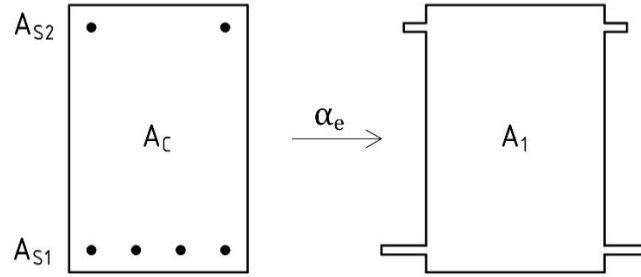
$E_{c,eff}$ je námi vypočtený účinný modul pružnosti betonu

Díky účinnému poměru modulů pružnosti můžeme snadno určit homogenní charakteristiky průřezu. Tyto charakteristiky jsou v normě [1] označovány jako efektivní charakteristiky průřezu značené indexem *eff*. Jelikož je celý výpočet proveden s efektivními charakteristikami, je od tohoto značení v této práci upuštěno.

Pro přehlednost a snazší orientaci ve výpočtu jsou všechny charakteristiky průřezu bez trhlin značeny malým indexem „1“.

Následující vzorce obsahují vždy obě výztuže, tj. dolní taženou i horní tlačенou výztuž. V případě jednostranně vyztuženého průřezu, který je vyztužen pouze dolní taženou výztuží jsou hodnoty A_{S2} a d_2 nulové.

První z charakteristik je plocha ideálního průřezu A_1 , tu získáme jako součet plochy betonu a ploch výztuže. Plochu výztuže však ještě vynásobíme výše zmíněným pracovním součinitelem a dostaneme tak ekvivalentní plochu betonu dle Obr. 2.2.



Obr. 2.2: Grafické vyjádření účinného poměru modulů pružnosti

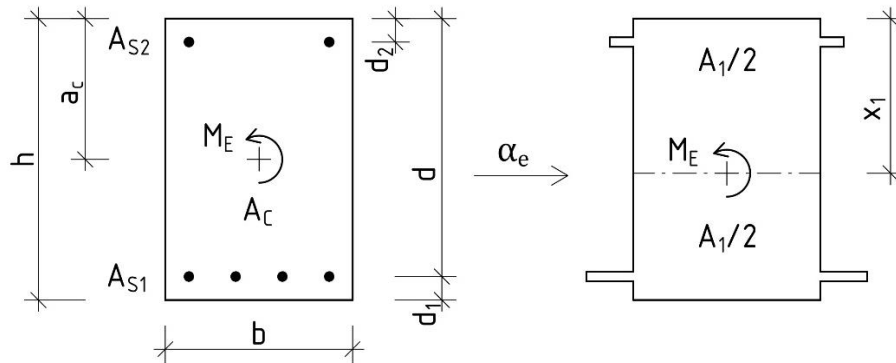
$$A_1 = A_c + \alpha_e \cdot (A_{S1} + A_{S2}) \quad (2.3.20)$$

kde A_c je plocha betonového průřezu

A_{S1} je navržená plocha dolní tažené výztuže

A_{S2} je navržená plocha horní tlačené výztuže

Dále můžeme přejít k výpočtu charakteristik pro průřez bez trhlin. V tomto stavu uvažujeme dokonalé spolupůsobení betonu a výztuže. Výšku tlačené oblasti ideálního průřezu tak určíme jako vzdálenost těžiště ideálního průřezu od horních vláken průřezu.



Obr. 2.3: Grafické určení těžiště ideálního průřezu (průřez bez trhlin)

V případě, kdyby plochy tažené i tlačené výztuže byly stejné ($A_{S1} = A_{S2}$) a zároveň by vzdálenosti od krajních vláken byly totožné ($d_1 = d_2$), pak by se těžiště ideálního průřezu nacházelo v polovině průřezu (tzn. $x_1 = a_c$). Ve všech dalších případech se vzdálenost těžiště určí ze vzorce (2.3.21).

$$x_1 = \frac{A_c \cdot a_c + \alpha_e \cdot (A_{S1} \cdot d + A_{S2} \cdot d_2)}{A_1} \quad (2.3.21)$$

kde A_c je plocha betonového průřezu

a_c je polovina výšky průřezu

α_e je pracovní součinitel

A_{S1} a A_{S2} jsou navržené plochy výztuží

A_1 je plocha ideálního průřezu z předešlého kroku výpočtu

d a d_2 jsou vzdálenosti příslušných výztuží od horních vláken

$$d = h - d_1$$

kde h je výška průřezu

d_1 je vzdálenost dolní výztuže od dolních vláken

Pomocí vzdálenosti těžiště ideálního průřezu x_1 už můžeme vypočítat moment setrvačnosti ideálního průřezu ze vztahu:

$$I_1 = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + A_c \cdot (x_1 - a_c)^2 + \alpha_e \cdot [A_{S1} \cdot (d - x_1)^2 + A_{S2} \cdot (d_2 - x_1)^2] \quad (2.3.22)$$

kde b je šířka průřezu

x_1 je námi vypočtená výška tlačené oblasti (průřez bez trhlin)

Přičemž první část vzorce je moment setrvačnosti základního obdélníkového průřezu. Následující část tvoří Steinerův doplněk pro betonový průřez a poslední část představuje Steinerův doplněk od obou výztuží.

Se znalostí vzdálenosti těžiště ideálního průřezu můžeme určit i statický moment průřezové plochy výztuže k těžišti průřezu bez trhlin, který závisí na ploše a vzdálenosti od těžiště každé z výztuží. Pozor, jedná se pouze o plochy výztuží, nikoliv o plochu celého průřezu (tj. do statického momentu se nezapočítává plocha betonu). Tento postup výpočtu statického momentu průřezové plochy výztuže k těžišti průřezu vychází z normy [1] a též je uveden ve skriptech [3].

$$S_1 = A_{S1} \cdot (d - x_1) + A_{S2} \cdot (d_2 - x_1) \quad (2.3.23)$$

Pomocí účinného modulu pružnosti betonu a momentu setrvačnosti vypočteme ohybovou tuhost ideálního průřezu bez trhlin.

$$EI_1 = E_{c,eff} \cdot I_1 \quad (2.3.24)$$

V některé literatuře se můžeme setkat též s pojmem ohybová poddajnost průřezu. Ta se vypočte jako převrácená hodnota ohybové tuhosti průřezu.

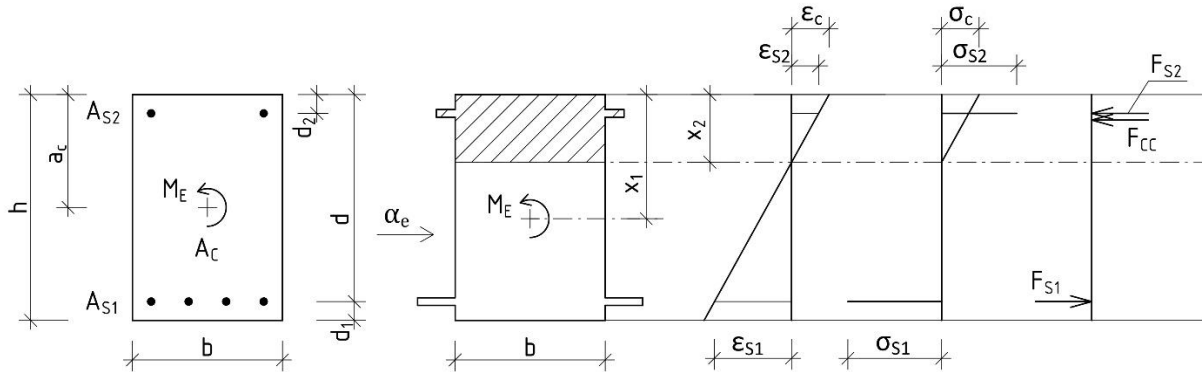
$$C_1 = 1/EI_1 \quad (2.3.25)$$

Jak již bylo zmíněno, do této chvíle jsme se zabývali výpočtem průřezových charakteristik pro průřez bez trhlin (charakteristiky s malým indexem „1“). V další části se budeme věnovat výpočtu charakteristik průřezu s plně rozvinutými trhlinami.

2.3.4 Výpočet průřezových charakteristik pro průřez s plně rozvinutými trhlinami

Tato část výpočtu se věnuje zjištění charakteristik pro průřez s plně rozvinutými trhlinami. Tyto charakteristiky jsou označeny malým indexem „2“.

V prvním kroku musíme zjistit výšku x_2 , což je výška tlačené oblasti pro průřez s plně rozvinutými trhlinami. Pro tento výpočet uvažujeme průřez namáhaný pouze ohybovým momentem, nikoliv normálovou silou (tj. $M_E \neq 0$ a $N_E = 0$).



Obr. 2.4: Grafické znázornění působících sil (průřez s plně rozvinutými trhlinami)

Z obrázku Obr. 2.4 je možné odvodit výslednice napětí pro jednotlivé části průřezu.

$$F_{CC} = b \cdot x_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_c \cdot E_{c,eff} \quad (2.3.26a)$$

$$F_{S1} = A_{S1} \cdot \varepsilon_{S1} \cdot E_S \quad (2.3.26b)$$

$$F_{S2} = A_{S2} \cdot \varepsilon_{S2} \cdot E_S \quad (2.3.26c)$$

Poměrná přetvoření ve výztužích můžeme odvodit z poměrného přetvoření betonu za pomoci podobnosti trojúhelníků viz Obr. 2.4.

$$\varepsilon_{S1} = \frac{\varepsilon_c \cdot (x_2 - d)}{x_2} \quad (2.3.27a)$$

$$\varepsilon_{S2} = \frac{\varepsilon_c \cdot (x_2 - d_2)}{x_2} \quad (2.3.27b)$$

Jelikož v průřezu nepůsobí normálová síla, můžeme výslednici sil položit rovnou nule.

$$F_{CC} + F_{S1} + F_{S2} = 0 \quad (2.3.28)$$

Po dosazení vzorců (2.3.26) do vzorce (2.3.28) pro výslednici sil získáme finální vztah pro výšku tlačené oblasti pro průřez s plně rozvinutými trhlinami při zatížení ohybovým momentem a nulovou normálovou silou. Kompletní matematické odvození není v této práci uvedeno. Úplné odvození od dosazení po finální rovnici je krok po kroku uvedeno v bakalářské práci [4] v příloze I.B.

$$x_2 = \frac{\alpha_e}{b} \cdot (A_{S1} + A_{S2}) + \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot b}{\alpha_e} \cdot \frac{(A_{S1} \cdot d + A_{S2} \cdot d_2)}{(A_{S1} + A_{S2})^2}} \right] \quad (2.3.29)$$

kde α_e je pracovní součinitel

b je šířka průřezu

A_{S1} a A_{S2} jsou navržené plochy výztuží

d a d_2 jsou vzdálenosti příslušných výztuží od horních vláken

Po zjištění výšky tlačené oblasti pro průřez s plně rozvinutými trhlinami můžeme přejít k výpočtu momentu setrvačnosti pro průřez s plně rozvinutými trhlinami. Ten se určí ze stejného vzorce jako u průřezu bez trhlin, avšak s předpokladem, že uvažujeme pouze tlačnou část betonového průřezu (v tomto případě $b \cdot x_2$). Tedy část, která zcela jistě není potrhána, a to z důvodu, že část průřezu s trhlinami neplní svoji funkci (odpor tělesa vůči nepříznivým vlivům). V tomto případě dostaneme vztah:

$$I_2 = \frac{1}{12} \cdot b \cdot x_2^3 + A_{C2} \cdot \left(x_2 - \frac{x_2}{2}\right)^2 + \alpha_e \cdot [A_{S1} \cdot (d - x_2)^2 + A_{S2} \cdot (d_2 - x_2)^2] \quad (2.3.30a)$$

Tento vztah se dá dále zjednodušit úpravou Steinerova doplňku pro betonovou část průřezu. Nejprve roznásobením plochy betonové části průřezu a úpravou závorky podle vzorce $(a - b)^2$.

$$I_2 = \frac{1}{12} \cdot b \cdot x_2^3 + b \cdot x_2 \cdot \left(x_2^2 - 2 \cdot \frac{x_2^2}{2} + \frac{x_2^2}{4}\right) + \alpha_e \cdot [A_{S1} \cdot (d - x_2)^2 + A_{S2} \cdot (d_2 - x_2)^2]$$

Poté vztah upravíme zkrácením členů v roznásobené závorce.

$$I_2 = \frac{1}{12} \cdot b \cdot x_2^3 + b \cdot x_2 \cdot \left(\frac{x_2^2}{4}\right) + \alpha_e \cdot [A_{S1} \cdot (d - x_2)^2 + A_{S2} \cdot (d_2 - x_2)^2]$$

Následně vytkneme $b \cdot x_2^3$ z prvních dvou členů rovnice.

$$I_2 = (b \cdot x_2^3) \cdot \left(\frac{1}{12} + \frac{1}{4}\right) + \alpha_e \cdot [A_{S1} \cdot (d - x_2)^2 + A_{S2} \cdot (d_2 - x_2)^2]$$

Po převedení zlomků na společný jmenovatel získáme zjednodušený vzorec pro výpočet momentu setrvačnosti pro průřez s plně rozvinutými trhlinami:

$$I_2 = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x_2^3 + \alpha_e \cdot [A_{S1} \cdot (d - x_2)^2 + A_{S2} \cdot (d_2 - x_2)^2] \quad (2.3.30b)$$

Když známe x_2 , můžeme též vypočítat statický moment průřezové plochy výztuže k těžišti průřezu s plně rozvinutými trhlinami, a to ze vztahu:

$$S_2 = A_{S1} \cdot (d - x_2) + A_{S2} \cdot (d_2 - x_2) \quad (2.3.31)$$

Pomocí účinného modulu pružnosti betonu a momentu setrvačnosti vypočteme ohybovou tuhost ideálního průřezu s plně rozvinutými trhlinami.

$$EI_2 = E_{c,eff} \cdot I_2 \quad (2.3.32)$$

V některé literatuře se však můžeme setkat též s pojmem ohybová poddajnost průřezu. Ta se vypočte jako převrácená hodnota ohybové tuhosti průřezu.

$$C_2 = 1/EI_2 \quad (2.3.33)$$

2.3.5 Posouzení vzniku trhlin a omezující podmínky pro MSP

Po vypočtení všech průřezových charakteristik můžeme přejít k dalšímu kroku. Tím je zjištění, v jakém výpočtovém stavu se nacházíme. Jinými slovy, potřebujeme zjistit, zda máme průřez bez trhlin, s plně rozvinutými trhlinami nebo jsme někdy mezi těmito stavy. V prvním kroku vypočítáme ohybový moment na mezi vzniku trhlin ze vzorce:

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot \frac{I_1}{h - x_1} \quad (2.3.34)$$

kde f_{ctm} je průměrná hodnota pevnosti betonu v dostředném tahu

I_1 je moment setrvačnosti neporušeného průřezu (tj. bez trhlin)

$h - x_1$ vyjadřuje max. rameno vnitřních sil pro průřez bez trhlin

Zda máme průřez s trhlinou či nikoliv zjistíme porovnáním momentu na vzniku trhlin s ohybovým momentem od působícího zatížení. Pokud je ohybový moment M_E od působícího zatížení menší, pak se pohybujeme v oblasti před vznikem trhlin a pro výpočet průhybu nadále použijeme pouze charakteristiky průřezu bez trhliny.

$$M_E \leq M_{cr} \quad (2.3.35a)$$

V opačném případě již trhliny vznikají a potřebujeme zjistit dvě věci. Zaprvé, jak moc se blížíme stavu s plně rozvinutými trhlinami a zadruhé, zda se pořád nacházíme v mezním stavu použitelnosti.

$$M_E > M_{cr} \quad (2.3.35b)$$

První podmínku nám udává součinitel ζ , známý jako míra spolupůsobení betonu mezi trhlinami. Pomocí tohoto součinitele dokážeme popsat celou škálu dalších výpočtových situací, při kterých už trhliny vznikly, ale současně ještě zdaleka nejde o zcela potrhaný průřez. Míra spolupůsobení betonu mezi trhlinami tak vystihuje poměr, v jakém budou tyto dva základní stavy (stav bez trhlin, stav s plně rozvinutými trhlinami) zastoupeny a vypočte se z následujícího vztahu:

$$\zeta = 1 - \beta_i \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_E}\right)^2 \quad \text{pro } M_E > M_{cr} \quad (2.3.36a)$$

$$\zeta = 0 \quad \text{pro } M_E \leq M_{cr} \quad (2.3.36b)$$

kde β_i je součinitel zohledňující dobu trvání zatížení na průměrnou hodnotu poměrného přetvoření a nabývá těchto hodnot:

$$\beta_{St} = 1,0 \text{ pro krátkodobě působící zatížení}$$

$$\beta_{Lt} = 0,5 \text{ pro dlouhodobě působící zatížení}$$

Druhou podmínku zjistíme z mezního stavu omezení napětí. Konkrétně pak z podmínek pro maximální napětí v betonu a maximální napětí ve výztuži. Tlakové napětí v betonu musí být omezeno z důvodu vzniku nadměrných trhlin a velkého dotvarování. Tahové napětí v betonářské výztuži je omezeno z důvodu zamezení vzniku velkého poměrného přetvoření výztuže, které má za následek nadměrné deformace.

Překročení maximálního napětí je problém především z dlouhodobého hlediska (prvek je dlouhodobě tzv. „na hraně“ použitelnosti). Z tohoto důvodu ověřujeme tuto podmínku u dlouhodobých výpočtových kombinací.

Omezující podmínka pro beton vychází z předpokladu, že napětí v betonu nesmí přesáhnout 45 % charakteristické pevnosti betonu v tlaku. To však platí pouze pro kvazi-stálou kombinaci zatížení. Pro charakteristickou kombinaci norma udává doporučenou omezující hodnotu jako 60 % z charakteristické pevnosti betonu v tlaku. Jelikož pro žádné další kombinace norma omezující podmínky neudává, je vhodné bezpečně uvažovat doporučenou hodnotu 45 % pro kvazi-stálou kombinaci i pro jiné kombinace vyjma charakteristické. Omezení napětí v betonu pro kvazi-stálou kombinaci získáme ze vztahu:

$$\sigma_{CC} = 0,45 \cdot f_{ck} \quad (2.3.37)$$

Pro charakteristickou kombinaci zatížení pak ze vztahu:

$$\sigma_{CC} = 0,6 \cdot f_{ck} \quad (2.3.38)$$

Omezující podmínka pro betonářskou výztuž vychází z předpokladu, že hodnota napětí v tažené výztuži nepřesáhne hodnotu 80 % z charakteristické meze kluzu betonářské výztuže.

$$\sigma_{S1} = 0,8 \cdot f_{yk} \quad (2.3.39)$$

Z maximálních napětí určíme ohybové momenty, které odpovídají maximálním namáháním betonu a výztuže dle podmínky omezení napětí pro mezní stav použitelnosti.

Ohybový moment při maximálním povoleném napětí v betonu:

$$M_{MAX,1} = \frac{(\sigma_{CC} \cdot I_2)}{x_2} \quad (2.3.40)$$

kde σ_{CC} je mezní napětí v tlačené části betonového průřezu

I_2 je moment setrvačnosti průřezu s plně rozvinutými trhlinami

x_2 je výška tlačené oblasti pro průřez s plně rozvinutými trhlinami

Ohybový moment při maximálním povoleném napětí ve výztuži:

$$M_{MAX,2} = \frac{(\sigma_{S1} \cdot I_2)}{\alpha_e \cdot (d - x_2)} \quad (2.3.41)$$

kde α_e je účinný poměr modulů pružnosti

d je účinná výška průřezu

Jelikož chceme určit minimální hodnotu při které překročíme stav omezení napětí, potřebujeme si určit menší z hodnot pro beton a pro výztuž. Tuto hodnotu nám udává následující vzorec.

$$M_{MAX} = \min(M_{MAX,1}; M_{MAX,2}) \quad (2.3.42)$$

Dále už stačí jen porovnat ohybový moment od zatížení s minimálním ohybovým momentem, který už neodpovídá stavu omezení napětí. Jinými slovy, s maximálním ohybovým momentem, pro který platí, že se ještě pohybujeme v mezním stavu použitelnosti.

$$M_E \leq M_{MAX} \quad (2.3.43)$$

V případě, že je M_E větší než M_{MAX} , pohybujeme se někde mezi mezním stavem použitelnosti a mezním stavem únosnosti. Pro tento stav už není postup výpočtu jednoznačně stanoven a nemusíme tedy získat validní výsledky. V případě, že je ohybový moment od zatížení M_E násobně větší než M_{MAX} , je možné, že je pohybujeme zcela v mezním stavu únosnosti. Tato práce se nezabývá problematikou MSÚ, a tudíž tento stav ani nijak neřeší. Potřebné informace k meznímu stavu únosnosti jsou dostupné v normě [1] v kapitole 6.

2.3.6 Výpočet průhybu od silového zatížení

V tuto chvíli už známe jak průřezové charakteristiky, tak přesně víme, v jakém stavu se nacházíme. Proto už můžeme přejít k výpočtu křivosti podle vztahu:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{zat} = M_E \cdot \left[(1 - \zeta) \cdot \frac{1}{EI_1} + \zeta \cdot \frac{1}{EI_2} \right] \quad \text{pro } M_E > M_{cr} \quad (2.3.44a)$$

nebo vztahu pro průřez bez trhlin, který po dosažení nulové hodnoty za míru spolupůsobení betonu mezi trhlinami a následné úpravě vypadá takto:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{zat} = M_E \cdot \frac{1}{EI_1} \quad \text{pro } M_E \leq M_{cr} \quad (2.3.44b)$$

kde M_E je ohybový moment od působícího zatížení

ζ je míra spolupůsobení betonu mezi trhlinami (viz kapitola 2.3.5)

EI_1 a EI_2 jsou ohybové tuhosti průřezu

Posledním krokem pro zjištění průhybu od silového zatížení, je dosažení křivosti do příslušného vzorce podle typu konstrukce, uložení konstrukce a rozložení zatížení. V tomto případě je uvažován prostý nosník s rovnoměrným spojitým zatížením, pro který je výpočtová konstanta 5/48.

$$w_{zat} = \frac{5}{48} \cdot \left(\frac{1}{r}\right)_{zat} \cdot L^2 \quad (2.3.45)$$

kde L je rozpětí konstrukce (tj. teoretická vzdálenost podpor)

$\left(\frac{1}{r}\right)_{zat}$ je křivost od silového zatížení

2.3.7 Výpočet průhybu od smršťování

Abychom mohli vypočítat průhyb od smršťování, potřebujeme nejdříve křivost od smršťování. Pro výpočet křivosti od smršťování potřebujeme znát mimo jiné i poměrné přetvoření od celkového smršťování, které zjistíme ze vztahu:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd}(t) + \varepsilon_{ca}(t) \quad (2.3.46)$$

kde $\varepsilon_{cd}(t)$ je poměrné smršťování vysycháním v průběhu času

$\varepsilon_{ca}(t)$ je poměrné autogenní smršťování v průběhu času

2.3.7.1 Výpočet poměrného smršťování vysycháním v průběhu času

Poměrné smršťování vysycháním v průběhu času vypočteme ze vztahu:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} \quad (2.3.47)$$

kde $\beta_{ds}(t, t_s)$ je součinitel upravující poměrné smršťování vysycháním v průběhu času a získáme ho ze vzorce:

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{t - t_s}{(t - t_s) + 0,04 \sqrt{h_0^3}} \quad (2.3.48)$$

kde t je stáří betonu v uvažovaném okamžiku ve dnech

t_s je doba ošetřování betonu ve dnech

h_0 je náhradní rozměr průřezu v mm

k_h je součinitel závisící na náhradním rozměru průřezu h_0 , určí se podle tabulky uvedené v normě [1] v kapitole 3.1.4, v tabulce lze lineárně interpolovat

Tab. 2.1: Tabulka pro určení součinitele k_h

h_0 (mm)	k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

$\varepsilon_{cd,0}$ je základní poměrné přetvoření od smršťování vysycháním, které se vypočte podle vzorců v normě [1] v příloze B.2.

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot e^{(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}})} \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH} \quad (2.3.49)$$

kde f_{cm} je průměrná hodnota pevnosti betonu v tlaku v MPa

f_{cm0} je referenční pevnost betonu, rovna 10 MPa

α_{ds1} je součinitel závislý na druhu cementu

pro cementy třídy S je $\alpha_{ds1} = 3$

pro cementy třídy N je $\alpha_{ds1} = 4$

pro cementy třídy R je $\alpha_{ds1} = 6$

α_{ds2} je součinitel závislý na druhu cementu

pro cementy třídy S je $\alpha_{ds2} = 0,13$

pro cementy třídy N je $\alpha_{ds2} = 0,12$

pro cementy třídy R je $\alpha_{ds2} = 0,11$

β_{RH} je součinitel závislý na relativní vlhkosti

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] \quad (2.3.50)$$

kde RH je relativní vlhkost okolního prostředí v %

RH_0 je max. relativní vlhkost prostředí, tj. 100 %

2.3.7.2 Výpočet poměrného autogenního vysychání v průběhu času

Poměrné autogenní vysychání v průběhu času vypočteme ze vztahu:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty) \quad (2.3.51)$$

kde $\beta_{as}(t)$ je součinitel upravující poměrné autogenní smršťování v průběhu času

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{(-0,2 \cdot t^{0,5})} \quad (2.3.52)$$

kde t je stáří betonu v uvažovaném okamžiku ve dnech

$\varepsilon_{ca}(\infty)$ je konečná hodnota poměrného autogenní smršťování

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad (2.3.53)$$

kde f_{ck} je charakteristická pevnost betonu v tlaku měřená na válci v MPa ve stáří 28 dní

2.3.7.3 Výpočet průhybu od smršťování

Pro určení průhybu potřebujeme nejdříve vypočítat křivost od smršťování z následujícího vztahu:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{cs} = \varepsilon_{cs} \cdot \alpha_e \cdot \left[(1 - \zeta) \cdot \frac{S_1}{I_1} + \zeta \cdot \frac{S_2}{I_2} \right] \quad \text{pro } M_E > M_{cr} \quad (2.3.54a)$$

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{cs} = \varepsilon_{cs} \cdot \alpha_e \cdot \frac{S_1}{I_1} \quad \text{pro } M_E \leq M_{cr} \quad (2.3.54b)$$

kde ε_{cs} je poměrné přetvoření od celkového smršťování

α_e je účinný poměr modulů pružnosti

ζ je míra spolupůsobení betonu mezi trhlinami (viz kapitola 2.3.5)

S_1 a S_2 jsou statické momenty průřezové plochy výztuže k těžišti průřezu

I_1 a I_2 jsou momenty setrvačnosti průřezu

Po určení křivosti pouze dosadíme do vzorce pro výsledný průhyb od smršťování. Výpočtová konstanta 1/8 platí, v případě, že se jedná o průhyb od smršťování na prostém nosníku. Viz příklad 9.2, kapitola 9 v příkladových skriptech [3].

$$w_{cs} = \frac{1}{8} \cdot \left(\frac{1}{r}\right)_{cs} \cdot L^2 \quad (2.3.55)$$

kde L je rozpětí konstrukce (tj. teoretická vzdálenost podpor)

$\left(\frac{1}{r}\right)_{cs}$ je křivost od zatížení smršťováním

2.3.8 Výpočet celkového průhybu a omezující podmínky

Pro zjištění celkového průhybu sečteme výsledný průhyb od silového zatížení z kapitoly 2.3.6 a výsledný průhyb od smršťování z kapitoly 2.3.7.

$$w = w_{zat} + w_{cs} \quad (2.3.56)$$

Posledním krokem výpočtu je ověření, zda je námi vypočtený průhyb menší než limitní průhyb daný normou.

$$w \leq w_{lim} \quad (2.3.57)$$

Limitní průhyb vychází z požadavků na použitelnost a vzhled konstrukce. Pro kvazi-stálou kombinaci zatížení je limitní podmínka stanovena vzorcem:

$$w_{lim} = \frac{1}{250} \cdot L \quad (2.3.58)$$

kde L je rozpětí konstrukce (tj. teoretická vzdálenost podpor)

Pro jiné kombinace není v normě podmínka uvedena. V programu MSPruhyb je pro jiné kombinace uvažována limitní hodnota průhybu jako $\frac{1}{200} \cdot L$, nejedná se však o závaznou hodnotu. Hodnota vychází z předpokladu, že uživatel bude zadávat charakteristickou kombinaci, u které je namáhání konstrukce větší než u kvazi-stálé kombinace, a tudíž je podmínka limitního průhybu mírnější.

Nejlépe si lze tuto podmínku představit jako Vaší limitní podmínku, kterou chcete splnit, např. z důvodu maximálního průhybu nosné konstrukce pod kterou je příčka, která by se při vyšší deformaci nosné konstrukce začala drtit. Jinými slovy, pokud je požadavek na maximální průhyb nosníku 5 mm při nějaké kombinaci zatížení, pak do druhé kombinace dosadíme příslušný ohybový moment, který reprezentuje zvolenou kombinaci zatížení a zjistíme průhyb w , ten pak posoudíme tak, že se podíváme, jestli je menší než 5 mm.

Je však nutné pamatovat na fakt, že vždy musíme splnit první podmínku, tedy normovou podmínku pro kvazi-stálou kombinaci. Pokud nesplníme tuto podmínku, pak je výsledek nevyhovující a je nutné návrh upravit.

3 Praktická část

Praktická část se věnuje jednak aplikování znalostí a postupů z teoretické části do samotného výpočtu, tak i využití těchto postupů při tvorbě výpočetní aplikace pro výpočet průhybu na prostém nosníku.

První kapitola praktické části se věnuje popisu fungování programu MSPruhyb. Především z hlediska implementace výpočtových vztahů, ale i z hlediska designu aplikace a využití interních funkcí programovacího jazyka C#.

Druhá kapitola této části se věnuje aplikaci zjednodušeného posouzení dle metody ohybové štíhlosti z kapitoly 2.2 na vzorový příklad konstrukce, u které chceme ověřit, zda vyhoví na průhyb.

Třetí kapitola praktické části se věnuje aplikaci teoretického postupu z kapitoly 2.3. Na vzorovém příkladu je ukázán celý postup stanovení výsledného průhybu zkoumané konstrukce pomocí přímého výpočtu. Tato část slouží jako praktická ukázka použitých vzorců a neobsahuje kompletní vysvětlení, které je uvedené v kapitole 2.3, ale pouze výpočtový postup formou: vzorec – dosazení – výsledek.

Ve čtvrté kapitole je vyřešen příklad ze třetí kapitoly praktické části, avšak tentokrát pomocí programu MSPruhyb. V této části nejsou ukázána všechna specifika programu MSPruhyb, pouze část nutná pro porovnání.

Pátá část praktické části přímo navazuje na výsledky ručního výpočtu a výsledky z programu MSPruhyb. V této podkapitole jsou výsledky z programu MSPruhyb porovnány nejprve s ručním výpočtem a poté i s dalšími programy, které provádí výpočet dle normy [1]. Tato část tak slouží pro ověření správnosti získaných výsledků a jako ukázka funkčnosti a přesnosti výpočtu.

Šestá a zároveň poslední kapitola obsahuje parametrické studie, které ukazují dopad změn jednotlivých vstupních parametrů na výslednou hodnotu průhybu. Tato kapitola slouží pro analýzu vlivu vstupních parametrů na výslednou hodnotu průhybu a jako praktická ukázka použití výpočetního programu.

3.1 Popis programu MSPrubyb

V rámci této bakalářské práce byl vytvořen program „MSPrubyb“, který slouží k výpočtu a ověření průhybu železobetonových konstrukcí. Program obsahuje dvě hlavní části. První částí je ověření průhybu dle zjednodušené metody ohybové štíhlosti, a to pro různé typy konstrukcí (viz kapitola 3.1.1). Druhou a zároveň nejrozsáhlejší částí je přímý výpočet průhybu pro železobetonový prostý nosník obdélníkového průřezu zatížený spojitým rovnoměrným zatížením (viz kapitola 3.3.2). Tato kapitola obsahuje pouze popis programu a informace ovlivňující výpočtový postup. Manuál k programu včetně popisu grafického uživatelského rozhraní je uveden v příloze této práce (viz Příloha A).

Program byl vytvořen ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2017 [9] a je napsán v programovacím jazyce C#. Jedná se o typ aplikace Windows Forms, která je určena primárně pro použití na zařízeních se systémem Windows.

Pro všechny výpočty je použit typ proměnné **double**. Proměnná je podobně jako v matematice nějaký jedinečný symbol, který zpravidla reprezentuje nějaké číslo. V našem případě (tj. v případě inženýrských výpočtů) jde často o čísla reálná, tedy čísla, která obsahují všechny hodnoty od mínus nekonečna do plus nekonečna. V jazyce C# lze tyto hodnoty zapisovat pomocí třech datových typů. Jsou to datové typy float, double a decimal. Přičemž se liší svým rozsahem, přesností a velikostí. Typ float se vyznačuje nejmenší přesností (max. 9 desetinných míst), ale zároveň nejmenší velikostí. Typ double má o něco větší velikost, ale též i větší přesnost (max. 17 desetinných míst). Typ decimal je z datových typů nejpřesnější (přesnost až 29 desetinných míst) a zároveň i největší.

Velikost datového typu ovlivňuje rychlost probíhajícího výpočtu. Není tedy žádoucí, aby byl použit typ přesnější, než je nezbytně nutné. Z tohoto hlediska byl použit právě výše zmíněný datový typ double. Ten má kromě vyvážené velikosti a přesnosti i tu výhodu, že disponuje největším rozsahem hodnot. Pro více informací viz oficiální dokumentace k jazyku C# [8].

3.1.1 Zjednodušené posouzení dle podmínky ohybové štíhlosti

V této kapitole je popsáno rozčlenění okna v programu MSPruhyb pro posouzení dle ohybové štíhlosti. Celý výpočtový postup funguje na základě vzorců uvedených v kapitole 2.2. Výpočet typového příkladu je uveden v kapitole 3.2.

Do okna pro zjednodušené posouzení (viz Obr. 3.1) se dostaneme tak, že spustíme program a vybereme v hlavním menu příslušnou možnost. Více informací o programu, včetně vysvětlení prvků uživatelského rozhraní je obsahem manuálu (viz Příloha A).

Obr. 3.1: Zjednodušené posouzení dle podmínky ohybové štíhlosti

Před zahájením výpočtu je nutné vyplnit všechny vstupní parametry (tj. žlutá pole a šedé rolovací nabídky). Po vyplnění a stisknutí tlačítka „VÝPOČÍTEJ“ se v pravé části okna objeví mezivýsledky a v dolní části posouzení. Pokud zkoumaný prvek vyhovuje, není nutné počítat průhyb pomocí přímého výpočtu. Pokud prvek nevyhovuje, je buď nutné návrh upravit nebo přejít do okna pro přímý výpočet průhybu, pomocí tlačítka „PŘÍMÝ VÝPOČET PRŮHYBU“, toto tlačítko se objeví v pravém dolním rohu v případě, že posouzení nevyhovuje. Pozor, přímý výpočet průhybu ve verzi programu 1.0 slouží pouze pro výpočet prostého nosník s obdélníkovým průřezem.

3.1.2 Přímý výpočet průhybu pro prostý nosník

V této kapitole je popsáno rozčlenění okna v programu MSPruhyb pro přímý výpočet průhybu. Celý výpočtový postup funguje na základě vzorců uvedených v kapitole 2.3. Výpočet typového příkladu je uveden v kapitole 3.3.

Stejně jako v předchozím případě se do okna (Obr. 3.2) pro přímý výpočet průhybu dle normy [1] dostaneme tak, že spustíme program a vybereme v hlavním menu příslušnou možnost. Více informací o programu, včetně vysvětlení prvků uživatelského rozhraní je obsahem manuálu (viz Příloha A).

Obr. 3.2: Přímý výpočet průhybu dle ČSN EN 1992-1-1

Obdobně jako u zjednodušeného posouzení je nutné před zahájením výpočtu vyplnit všechny vstupní parametry (tj. žlutá pole a šedou rolovací nabídku). Po vyplnění a stisknutí tlačítka „VYPOČÍTEJ“ se pravá část okna zaplní důležitými mezivýsledky a dole se zobrazí posudek. V případě potřeby si můžeme zobrazit podrobnější postupy pro jednotlivé části výpočtu.

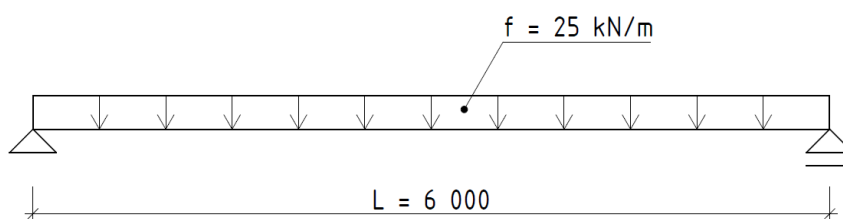
3.2 Postup zjednodušeného posouzení prvku

Tato kapitola obsahuje vzorový příklad pro zjednodušené posouzení prvku pomocí vztahů z kapitoly 2.2. Konkrétně pak využití varianty popsané v podkapitole 2.2.2.

Vycházíme z předpokladu, že známe působící zatížení, typ uložení a délku nosníku. Chceme ověřit, zda námi navržený prvek vyhoví.

Zadání je následující: Železobetonový nosník obdélníkového průřezu je prostě uložený na dvou rovnoběžných stěnách. Teoretická vzdálenost podpor činí 6 m, pro betonáž je použit beton C25/30 a výztuž B500B. Nosník je zatížený spojitým rovnoměrným zatížením o velikosti 25 kN/m.

Nejprve si nakreslíme statické schéma (Obr. 3.3) a určíme maximální působící moment od návrhového zatížení.



Obr. 3.3: Statické schéma konstrukce (zjednodušené posouzení prvku)

$$M_{Ed} = \frac{1}{8} \cdot f \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 25 \cdot 6^2 = 112,5 \text{ kNm}$$

Dále odhadneme rozměry nosníku na základě empirických vzorců.

$$h = \left(\frac{1}{10} \sim \frac{1}{17} \right) \cdot L = \left(\frac{1}{10} \sim \frac{1}{17} \right) \cdot 6000 = 600 \sim 353 = 500 \text{ mm}$$

$$b = \left(\frac{1}{3} \sim \frac{2}{3} \right) \cdot h = \left(\frac{1}{3} \sim \frac{2}{3} \right) \cdot 500 = 167 \sim 333 = 250 \text{ mm}$$

Pro tento zjednodušený vzorový příklad je poloha tažené výztuže odhadnuta ve vzdálenosti 40 mm od spodního líce nosníku. Přesná poloha výztuže by se určila jako suma krytí výztuže, průměru třmínku a poloviny průměru tažené výztuže ($d_1 = c_{NOM} + \phi_{TŘ} + \frac{\phi_{HNV}}{2}$). Na základě tohoto odhadu tedy dopočteme účinnou výšku průřezu z následujícího vzorce.

$$d = h - d_1 = 500 - 40 = 460 \text{ mm}$$

V tuto chvíli můžeme vypočítat ohybovou štíhlost zkoumaného prvku.

$$\lambda = \frac{L}{d} = \frac{6000}{460} = 13,04$$

Dále potřebujeme zjistit vymežující ohybovou štíhlost. Nejprve je však nutné určit součinitele tvaru, rozpětí a napětí tahové výztuže.

$$\kappa_{c1} = 1,0 \text{ (obdélníkový průřez)}$$

$$\kappa_{c2} = 1,0 \text{ (prvek kratší než 7 m)}$$

Pro zjištění součinitele κ_{c3} potřebujeme ještě dopočítat požadovanou plochu výztuže $A_{s,req}$ a navrhnout plochu výztuže $A_{s,prov}$ ($A_{s,prov}$ musí být větší než $A_{s,req}$).

$$A_{s,req} = \frac{b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_{Ed}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}} \right)$$

$$A_{s,req} = \frac{250 \cdot 460 \cdot \frac{25}{1,5}}{\frac{500}{1,15}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 112,5 \cdot 10^6}{250 \cdot 460^2 \cdot \frac{25}{1,5}}} \right) = 603,859 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,prov} = n \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 4 \cdot \frac{\pi \cdot 16^2}{4} = 804,248 \text{ mm}^2$$

$$\kappa_{c3} = \frac{500}{f_{yk}} \cdot \frac{A_{s,prov}}{A_{s,req}} = \frac{500}{500} \cdot \frac{804,248}{603,859} = 1,332$$

Poté si určíme tabulkovou hodnotu vymežující ohybové štíhlosti. K tomu potřebujeme znát krom typu konstrukce a třídy betonu ještě stupeň vyztužení.

$$\rho = \frac{A_{s,prov}}{b \cdot h} = \frac{804,248}{250 \cdot 500} = 0,00643 = 0,643 \%$$

Následně z tabulky (viz [Příloha B](#)) pro prosté nosníky a zadaný beton třídy C25/30 lineárně interpolujeme mezi hodnotami vyztužení 0,5 a 1,5 a zjistíme $\lambda_{d,tab}$ pro naši hodnotu vyztužení 0,643 %.

$$\lambda_{d,tab} = 18,5 + (0,643 - 0,5) \frac{13,5 - 18,5}{1,5 - 0,5} = 17,785$$

Po získání tabulkové hodnoty vymežující ohybové štíhlosti, můžeme zjistit vymežující ohybovou štíhlost.

$$\lambda_d = \kappa_{c1} \cdot \kappa_{c2} \cdot \kappa_{c3} \cdot \lambda_{d,tab} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,332 \cdot 17,785 = 23,690$$

Posledním krokem je posouzení.

$$\lambda \leq \lambda_d$$

$$13,04 \leq 23,69 \quad \gg \gg \text{ VYHOVUJE} = \text{Přímý výpočet průhybu není nutný}$$

3.3 Přímý výpočet průhybu dle normových vzorců

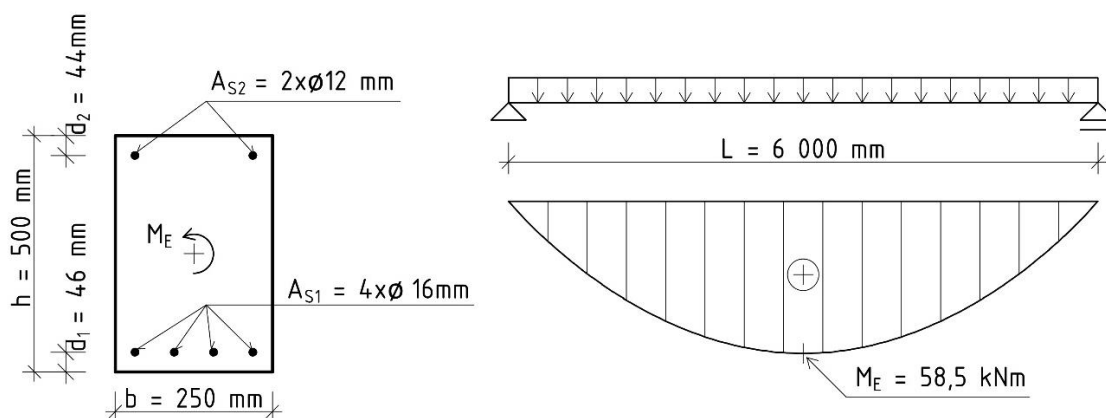
Tato kapitola obsahuje řešený příklad pro oboustranně vyztužený průřez pomocí vztahů z kapitoly 2.3. Zde uvedený postup slouží pro praktickou ukázkou použitých vztahů a jako kontrola funkčnosti realizovaného výpočtu. Též je použit pro ověření shodnosti normového postupu a postupu použitého při sestavení programu, toto ověření je náplní kapitoly 3.5.1.

Uvedený postup výpočtu ukazuje podrobný postup zjištění průhybu pro kvazi-stálou kombinaci při dlouhodobém působení zatížení. Tento vzor byl vybrán z následujících důvodů. Hlavním důvodem je, že pro tuto kombinaci norma stanovuje limitní průhyb. Dalším důvodem je, že pro jiné kombinace zatížení (častá, charakteristická) se výpočet liší pouze hodnotou působícího ohybového momentu a omezující podmínkou napětí v betonu. Při krátkodobém zatížení se pak mění časový horizont zatěžování u výpočtu součinitele dotvarování.

Celý příklad je vypočítán na vědecké kalkulačce (CASIO fx-991CE X). Výsledky jsou ve většině případů zaokrouhleny na tři platná desetinná místa.

3.3.1 Vstupní parametry do výpočtu

Vstupní parametry jsou zde pro lepší přehlednost uvedeny ve stejné formě a stejném pořadí jako v programu MSPruhyb.



Obr. 3.4: Grafické znázornění vybraných vstupních parametrů

Pro výpočet byly zvoleny následující vstupní parametry:

Charakteristická pevnost betonu v tlaku:

$$f_{ck} = 25 \text{ MPa}$$

Charakteristická mez kluzu betonářské výztuže:

$$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$$

Modul pružnosti oceli v tahu:

$$E_S = 200 \text{ GPa}$$

Délka prvku:	$L = 6 \text{ m}$
Šířka průřezu:	$b = 250 \text{ mm}$
Výška průřezu:	$h = 500 \text{ mm}$
Vzdálenost dolní výztuže od dolních vláken průřezu:	$d_1 = 46 \text{ mm}$
Vzdálenost horní výztuže od horních vláken průřezu:	$d_2 = 44 \text{ mm}$
Navržená plocha dolní tažené výztuže (4x $\varnothing 16 \text{ mm}$):	$A_{S1} = 804,248 \text{ mm}^2$
Navržená plocha horní tlačené výztuže (2x $\varnothing 12 \text{ mm}$):	$A_{S2} = 226,195 \text{ mm}^2$
Moment od kvazi-stálé kombinace:	$M_E = 58,5 \text{ kNm}$
Typ cementu:	třída N
Relativní vlhkost okolního prostředí:	$RH = 50 \%$
Teplota okolního prostředí:	$T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
Uvažovaná životnost konstrukce:	$t = 50 \text{ let}$
Čas vnesení zatížení:	$t_0 = 28 \text{ dní}$
Obvod prvku vystavený okolnímu prostředí:	$u = 1500 \text{ mm}$
Doba ošetřování betonu:	$t_s = 7 \text{ dní}$

Z těchto vstupních hodnot ještě dopočítáme další potřebné hodnoty do výpočtu.

Průměrná hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku v MPa:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 25 + 8 = 33 \text{ MPa}$$

Průměrná hodnota pevnosti betonu v dostředném tahu:

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{(2/3)} = 0,3 \cdot 25^{(2/3)} = 2,565 \text{ MPa}$$

Sečnový modul pružnosti betonu:

$$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} = 22 \cdot \left(\frac{33}{10}\right)^{0,3} = 31,476 \text{ GPa}$$

Plocha betonového průřezu:

$$A_c = b \cdot h = 250 \cdot 500 = 125\,000 \text{ mm}^2 = 0,125 \text{ m}^2$$

Účinná výška průřezu (vzdálenost tažené výztuže od horních vláken):

$$d = h - d_1 = 500 - 46 = 454 \text{ mm}$$

3.3.2 Výpočet součinitele dotvarování

Postup pro výpočet součinitele dotvarování je nutné provést dvakrát. Jednou pro dlouhodobé silové zatížení a podruhé pro dlouhodobé zatížení smršťováním. Oba tyto postupy vychází ze vzorců, které jsou uvedeny v kapitole 2.3.2 a liší se časovým intervalem.

3.3.2.1 Výpočet součinitele dotvarování pro dlouhodobé silové zatížení

Tento součinitel dotvarování je stanoven pro interval od $\langle t_0; t \rangle$, přičemž t_0 značí čas vnesení silového zatížení a t je námi stanovený teoretický konec zatěžování (návrhová životnost konstrukce).

Nejprve si upravíme čas v závislosti na teplotě a třídě cementu, který budeme potřebovat do vzorce pro výpočet $\beta(t_0)$.

$$t_{0,T} = e^{\left[-\left(\frac{4000}{[273+T(t_0)]} - 13,65\right)\right]} \cdot t_0 = e^{\left[-\left(\frac{4000}{[273+20]} - 13,65\right)\right]} \cdot 28 = 27,947 \text{ dne}$$

$$t_{0,CEMT} = t_{0,T} \cdot \left(\frac{9}{2 + (t_{0,T})^{1,2}} + 1\right)^\alpha = 27,947 \cdot \left(\frac{9}{2 + (27,947)^{1,2}} + 1\right)^0 = 27,947 \text{ dne}$$

Následně můžeme určit další potřebné hodnoty a součinitele.

Náhradní rozměr průřezu:

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u} = \frac{2 \cdot 125\,000}{1\,500} = 166,667 \text{ mm}$$

Součinitel závislý na relativní vlhkosti a na náhradním rozměru prvku:

$$\beta_H = \min (1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot RH)^{18}] \cdot h_0 + 250; 1\,500)$$

$$\beta_H = \min (1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot 50)^{18}] \cdot 166,67 + 250; 1\,500) = 500,026$$

Součinitel vystihující vliv stáří betonu v okamžiku vnesení zatížení na základní součinitel dotvarování:

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0,1 + t_{0,CEMT}^{0,2})} = \frac{1}{(0,1 + 27,947^{0,2})} = 0,489$$

Součinitel vystihující vliv pevnosti betonu na základní součinitel dotvarování:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} = \frac{16,8}{\sqrt{33}} = 2,924$$

Součinitel vystihující vliv relativní vlhkosti na základní součinitel dotvarování:

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} = 1 + \frac{1 - 50/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{166,667}} = 1,909$$

Následně určíme součinitel průběhu dotvarování po zatížení.

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{(\beta_H + t - t_0)} \right]^{0,3} = \left[\frac{(50 \cdot 365,25 - 28)}{(500,026 + 50 \cdot 365,25 - 28)} \right]^{0,3} = 0,992$$

V tuto chvíli můžeme vypočítat základní součinitel dotvarování.

$$\varphi_{0,f} = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) = 1,909 \cdot 2,924 \cdot 0,489 = 2,729$$

Následně vypočtené hodnoty dosadíme do vzorce pro $\varphi(t, t_0)$ a získáme součinitel dotvarování, který se vztahuje k dlouhodobému silovému zatížení po stanovený časový interval $\langle t_0; t \rangle$. Pro lepší orientaci v dalších částech výpočtu je tento součinitel dotvarování označen jako $\varphi_{f,LT}$.

$$\varphi_{f,LT} = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0) = 2,729 \cdot 0,992 = 2,707$$

3.3.2.2 Výpočet součinitele dotvarování pro dlouhodobé zatížení smršťováním

Tento součinitel dotvarování je stanoven pro interval od $\langle t_s; t \rangle$, přičemž t_s značí čas konce ošetřování betonu a t je námi stanovený teoretický konec zatěžování (návrhová životnost konstrukce).

Postup výpočtu je obdobný jako v případě určení $\varphi_{f,LT}$ v kapitole 3.3.2.1. Rozdílem je pouze jiný začátek časového intervalu pro výpočet dotvarování.

Úprava času v závislosti na teplotě a cementu:

$$t_{s,T} = e^{\left[-\left(\frac{4000}{[273+T(\Delta t_i)]} - 13,65 \right) \right]} \cdot \Delta t_i = e^{\left[-\left(\frac{4000}{[273+20]} - 13,65 \right) \right]} \cdot 7 = 6,987 \text{ dne}$$

$$t_{s,CEMT} = t_{s,T} \cdot \left(\frac{9}{2 + (t_{s,T})^{1,2}} + 1 \right)^\alpha = 6,987 \cdot \left(\frac{9}{2 + (6,987)^{1,2}} + 1 \right)^0 = 6,987 \text{ dne}$$

Náhradní rozměr průřezu:

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u} = \frac{2 \cdot 125\,000}{1\,500} = 166,667 \text{ mm}$$

Součinitel závislý na relativní vlhkosti a na náhradním rozměru prvku:

$$\beta_H = \min (1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot RH)^{18}] \cdot h_0 + 250; 1\,500)$$

$$\beta_H = \min (1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot 50)^{18}] \cdot 166,67 + 250; 1\,500) = 500,026$$

Součinitel vystihující vliv stáří betonu po konci ošetřování betonu na základní součinitel dotvarování:

$$\beta(t_s) = \frac{1}{(0,1 + t_{s,CEMT}^{0,2})} = \frac{1}{(0,1 + 6,987^{0,2})} = 0,635$$

Součinitel vystihující vliv pevnosti betonu na základní součinitel dotvarování:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} = \frac{16,8}{\sqrt{33}} = 2,924$$

Součinitel vystihující vliv relativní vlhkosti na základní součinitel dotvarování:

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} = 1 + \frac{1 - 50/100}{0,1 \cdot \sqrt[3]{166,667}} = 1,909$$

Součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení smršťováním:

$$\beta_c(t, t_s) = \left[\frac{(t - t_s)}{(\beta_H + t - t_s)} \right]^{0,3} = \left[\frac{(50 \cdot 365,25 - 7)}{(500,026 + 50 \cdot 365,25 - 7)} \right]^{0,3} = 0,992$$

Základní součinitel dotvarování:

$$\varphi_{0,cs} = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_s) = 1,909 \cdot 2,924 \cdot 0,635 = 3,545$$

V tuto chvíli máme připravené všechny proměnné, které potřebujeme pro výpočet součinitele dotvarování $\varphi(t, t_s)$. Tento součinitel dotvarování se vztahuje k časovému intervalu $\langle t_s; t \rangle$. Pro lepší orientaci v dalších částech výpočtu je tento součinitel dotvarování označen jako $\varphi_{cs,LT}$.

$$\varphi_{cs,LT} = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_s) = 3,545 \cdot 0,992 = 3,517$$

3.3.3 Výpočet průřezových charakteristik pro průřez bez trhlin

Stejně jako u součinitele dotvarování, tak i zde je nutné provést výpočet dvakrát, jednou s dosazením součinitele dotvarování pro silové zatížení ($\varphi_{f,LT}$) a podruhé se součinitelem pro zatížení smršťováním ($\varphi_{cs,LT}$). Výpočet je proveden dle vztahů uvedených v kapitole 2.3.3 této práce.

3.3.3.1 Charakteristiky pro průřez bez trhlin – dlouhodobé silové zatížení

Pro výpočet následujících průřezových charakteristik je použit součinitel dotvarování $\varphi_{f,LT}$ vypočtený v kapitole 3.3.2.1.

Účinný modul pružnosti betonu:

$$E_{c,eff,f} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi_{f,LT}} = \frac{31,476 \cdot 10^3}{1 + 2,707} = 8\,490,963 \text{ MPa}$$

Účinný poměr modulů pružnosti:

$$\alpha_{e,f} = \frac{E_S}{E_{c,eff,f}} = \frac{200\,000}{8\,490,963} = 23,554$$

V tomto bodu výpočtu je vhodné, vybrat si v jakých jednotkách budeme celý výpočet provádět. Zde jsou vzhledem k zaokrouhlování zvoleny milimetry (více platných číslic). U některých vzorců je doplněna i jiná jednotka, pokud je to vhodné.

Plocha ideálního průřezu:

$$A_{1,f} = A_c + \alpha_{e,f} \cdot (A_{S1} + A_{S2}) = 125\,000 + 23,554 \cdot (804,248 + 226,195)$$

$$A_{1,f} = 149\,271 \text{ mm}^2$$

Vzdálenost těžiště ideálního průřezu od horních vláken průřezu:

$$x_{1,f} = \frac{A_c \cdot a_c + \alpha_{e,f} \cdot (A_{S1} \cdot d + A_{S2} \cdot d_2)}{A_{1,f}}$$

$$x_{1,f} = \frac{125\,000 \cdot 250 + 23,554 \cdot (804,248 \cdot 454 + 226,195 \cdot 44)}{149\,271} = 268,536 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti průřezu bez trhlin:

$$I_{1,f} = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + A_c \cdot (x_{1,f} - a_c)^2 + \alpha_{e,f} \cdot [A_{S1} \cdot (d - x_{1,f})^2 + A_{S2} \cdot (d_2 - x_{1,f})^2]$$

$$I_{1,f} = \frac{1}{12} \cdot 250 \cdot 500^3 + 125\,000 \cdot (268,536 - 250)^2 +$$

$$+ 23,554 \cdot [804,248 \cdot (454 - 268,536)^2 + 226,195 \cdot (44 - 268,536)^2]$$

$$I_{1,f} = 3,567 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

Statický moment průřezové plochy výztuže k těžišti průřezu bez trhlin:

$$S_{1,f} = A_{S1} \cdot (d - x_{1,f}) + A_{S2} \cdot (d_2 - x_{1,f})$$

$$S_{1,f} = 804,248 \cdot (454 - 268,536) + 226,195 \cdot (44 - 268,536) = 98\,370,131 \text{ mm}^3$$

Ohybová tuhost průřezu bez trhlin:

$$EI_{1,f} = E_{c,eff} \cdot I_{1,f} = 8\,490,963 \cdot 3,567 \cdot 10^9 = 30\,287,265 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2$$

$$EI_{1,f} = 30\,287,265 \text{ kNm}^2$$

Ohybová poddajnost průřezu bez trhlin:

$$C_{1,f} = \frac{1}{EI_{1,f}} = \frac{1}{30\,287,265} = 33,017 \cdot 10^{-6} \text{ kN}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

3.3.3.2 Charakteristiky pro průřez bez trhlin – dlouhodobé zatížení smršťováním

Pro výpočet následujících průřezových charakteristik je použit součinitel dotvarování $\varphi_{cs,LT}$ vypočtený v kapitole 3.3.2.2. Výpočet je obdobný jako v kapitole 3.3.3.1, liší se pouze hodnotou součinitele dotvarování.

Účinný modul pružnosti betonu:

$$E_{c,eff,cs} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi_{cs,LT}} = \frac{31,476 \cdot 10^3}{1 + 3,517} = 6\,968,342 \text{ MPa}$$

Účinný poměr modulů pružnosti:

$$\alpha_{e,cs} = \frac{E_s}{E_{c,eff,cs}} = \frac{200\,000}{6\,968,342} = 28,701$$

V tomto bodu výpočtu je vhodné, vybrat si v jakých jednotkách budeme celý výpočet provádět. Zde jsou vzhledem k zaokrouhlování zvoleny milimetry (více platných čísel). U některých vzorců je doplněna i jiná jednotka, pokud je to vhodné.

Plocha ideálního průřezu:

$$A_{1,cs} = A_c + \alpha_{e,cs} \cdot (A_{S1} + A_{S2}) = 125\,000 + 28,701 \cdot (804,248 + 226,195)$$

$$A_{1,cs} = 154\,575 \text{ mm}^2$$

Vzdálenost těžiště ideálního průřezu od horních vláken průřezu:

$$x_{1,cs} = \frac{A_c \cdot a_c + \alpha_{e,cs} \cdot (A_{S1} \cdot d + A_{S2} \cdot d_2)}{A_{1,cs}}$$

$$x_{1,cs} = \frac{125\,000 \cdot 250 + 28,701 \cdot (804,248 \cdot 454 + 226,195 \cdot 44)}{154\,575} = 271,811 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti průřezu bez trhlin:

$$I_{1,cs} = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + A_C \cdot (x_{1,cs} - a_c)^2 + \alpha_{e,cs} \cdot [A_{S1} \cdot (d - x_{1,cs})^2 + A_{S2} \cdot (d_2 - x_{1,cs})^2]$$

$$I_{1,cs} = \frac{1}{12} \cdot 250 \cdot 500^3 + 125\,000 \cdot (271,811 - 250)^2 +$$

$$+ 28,701 \cdot [804,248 \cdot (454 - 271,811)^2 + 226,195 \cdot (44 - 271,811)^2]$$

$$I_{1,cs} = 3,766 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

Statický moment průřezové plochy výztuže k těžišti průřezu bez trhlin:

$$S_{1,cs} = A_{S1} \cdot (d - x_{1,cs}) + A_{S2} \cdot (d_2 - x_{1,cs})$$

$$S_{1,cs} = 804,248 \cdot (454 - 271,811) + 226,195 \cdot (44 - 271,811)$$

$$S_{1,cs} = 94\,995,430 \text{ mm}^3$$

Ohybová tuhost průřezu bez trhlin:

$$EI_{1,cs} = E_{c,eff,cs} \cdot I_{1,cs} = 6\,968,342 \cdot 3,766 \cdot 10^9$$

$$EI_{1,cs} = 26\,242,776 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2 = 26\,242,776 \text{ kNm}^2$$

Ohybová poddajnost průřezu bez trhlin:

$$C_{1,cs} = \frac{1}{EI_{1,cs}} = \frac{1}{26\,242,776} = 38,106 \cdot 10^{-6} \text{ kN}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

3.3.4 Výpočet průřezových charakteristik pro průřez s plně rozvinutými trhlinami

U charakteristik pro průřez s plně rozvinutými trhlinami je postup obdobný, též musíme vypočítat charakteristiky pro silové zatížení i zatížení od smršťování. Výpočet je proveden dle vztahů uvedených v kapitole 2.3.4 této práce.

3.3.4.1 Charakteristiky pro průřez s plně rozvinutými trhlinami – dlouhodobé silové zatížení

Tento výpočet charakteristik pro průřez s plně rozvinutými trhlinami navazuje na část výpočtu v kapitole 3.3.3.1.

Výška tlačené oblasti pro průřez s plně rozvinutými trhlinami:

$$x_{2,f} = \frac{\alpha_{e,f}}{b} \cdot (A_{S1} + A_{S2}) + \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot b}{\alpha_{e,f}} \cdot \frac{(A_{S1} \cdot d + A_{S2} \cdot d_2)}{(A_{S1} + A_{S2})^2}} \right]$$

$$x_{2,f} = \frac{23,554}{250} \cdot (804,248 + 226,195) \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot 250}{23,554} \cdot \frac{(804,248 \cdot 454 + 226,195 \cdot 44)}{(804,248 + 226,195)^2}} \right]$$

$$x_{2,f} = 185,940 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti průřezu s plně rozvinutými trhlinami:

$$I_{2,f} = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x_{2,f}^3 + \alpha_{e,f} \cdot [A_{S1} \cdot (d - x_{2,f})^2 + A_{S2} \cdot (d_2 - x_{2,f})^2]$$

$$I_{2,f} = \frac{1}{3} \cdot 250 \cdot 185,94^3 +$$

$$+ 23,554 \cdot [804,248 (454 - 185,94)^2 + 226,195 (44 - 185,94)^2]$$

$$I_{2,f} = 2,004 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

Statický moment průřezové plochy výztuže k těžišti průřezu s plně rozvinutými trhlinami:

$$S_{2,f} = A_{S1} \cdot (d - x_{2,f}) + A_{S2} \cdot (d_2 - x_{2,f})$$

$$S_{2,f} = 804,248 \cdot (454 - 185,94) + 226,195 \cdot (44 - 185,94) = 183\,932,991 \text{ mm}^3$$

Ohybová tuhost průřezu s plně rozvinutými trhlinami:

$$EI_{2,f} = E_{c,eff,f} \cdot I_{2,f} = 8\,490,963 \cdot 2,004 \cdot 10^9 = 17\,015,890 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2$$

$$EI_{2,f} = 17\,015,890 \text{ kNm}^2$$

Ohybová poddajnost průřezu s plně rozvinutými trhlinami:

$$C_{2,f} = \frac{1}{EI_{2,f}} = \frac{1}{17\,015,89} = 58,769 \cdot 10^{-6} \text{ kN}^{-1}\text{m}^{-2}$$

3.3.4.2 Charakteristiky pro průřez s plně rozvinutými trhlinami – dlouhodobé zatížení smršťováním

Tento výpočet charakteristik pro průřez s plně rozvinutými trhlinami navazuje na část výpočtu v kapitole 3.3.3.2.

Výška tlačené oblasti pro průřez s plně rozvinutými trhlinami:

$$x_{2,cs} = \frac{\alpha_{e,cs}}{b} \cdot (A_{S1} + A_{S2}) + \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot b}{\alpha_{e,cs}} \cdot \frac{(A_{S1} \cdot d + A_{S2} \cdot d_2)}{(A_{S1} + A_{S2})^2}} \right]$$

$$x_{2,cs} = \frac{28,701}{250} \cdot (804,248 + 226,195) \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot 250 (804,248 \cdot 454 + 226,195 \cdot 44)}{(804,248 + 226,195)^2}} \right]$$

$$x_{2,cs} = 198,113 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti průřezu s plně rozvinutými trhlinami:

$$I_{2,cs} = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x_{2,cs}^3 + \alpha_{e,cs} \cdot [A_{S1} \cdot (d - x_{2,cs})^2 + A_{S2} \cdot (d_2 - x_{2,cs})^2]$$

$$I_{2,cs} = \frac{1}{3} \cdot 250 \cdot 198,113^3 +$$

$$+ 28,701 \cdot [804,248 \cdot (454 - 198,113)^2 + 226,195 \cdot (44 - 198,113)^2]$$

$$I_{2,cs} = 2,314 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

Statický moment průřezové plochy výztuže k těžišti průřezu s plně rozvinutými trhlinami:

$$S_{2,cs} = A_{S1} \cdot (d - x_{2,cs}) + A_{S2} \cdot (d_2 - x_{2,cs})$$

$$S_{2,cs} = 804,248 \cdot (454 - 198,113) + 226,195 \cdot (46 - 198,113) = 171\,389,408 \text{ mm}^3$$

Ohybová tuhost průřezu s plně rozvinutými trhlinami:

$$EI_{2,cs} = E_{c,eff,cs} \cdot I_{2,cs} = 6\,968,342 \cdot 2,314 \cdot 10^9 = 16\,124,743 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2$$

$$EI_{2,cs} = 16\,124,743 \text{ kNm}^2$$

Ohybová poddajnost průřezu s plně rozvinutými trhlinami:

$$C_{2,cs} = \frac{1}{EI_{2,cs}} = \frac{1}{16\,124,743} = 32,016 \cdot 10^{-6} \text{ kN}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

3.3.5 Posouzení vzniku trhlin a omezující podmínky pro MSP

V této chvíli známe všechny potřebné charakteristiky průřezu (viz části 3.3.3 a 3.3.4), můžeme tak přejít k posouzení vzniku trhlin a zjištění omezujících podmínek dle vzorců z kapitoly 2.3.5.

Nejprve zjistíme, zda nám vznikají trhliny a spočítáme míru spolupůsobení betonu mezi trhlinami. Ohybový moment na mezi vzniku trhlin vypočítáme za použití charakteristik od silového zatížení, jelikož se jedná o dominantní formu zatížení.

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot \frac{I_{1,f}}{h - x_{1,f}} = 2,565 \cdot \frac{3,567 \cdot 10^9}{500 - 268,536} = 39,528 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 39,528 \text{ kNm}$$

$$M_E ? M_{cr}$$

$$58,5 \text{ kNm} > 39,528 \text{ kNm} \quad \gg \gg \text{ TRHLINY VZNIKAJÍ}$$

Míra spolupůsobení betonu mezi trhlinami:

$$\zeta = 1 - \beta_i \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_E} \right)^2 = 1 - 0,5 \cdot \left(\frac{39,528}{58,5} \right)^2 = 0,772$$

Poté si určíme omezující napětí v betonu a ve výztuži pro kvazi-stálou kombinaci zatížení.

$$\sigma_{cc} = 0,45 \cdot f_{ck} = 0,45 \cdot 25 = 11,25 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{s1} = 0,8 \cdot f_{yk} = 0,8 \cdot 500 = 400 \text{ MPa}$$

Z těchto napětí určíme maximální ohybové momenty, které mohou pro kvazi-stálou kombinaci dlouhodobě působit.

$$M_{MAX,1} = \frac{(\sigma_{cc} \cdot I_2)}{x_2} = \frac{(11,25 \cdot 2,004 \cdot 10^9)}{185,94} = 121,249 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$M_{MAX,1} = 121,249 \text{ kNm}$$

$$M_{MAX,2} = \frac{(\sigma_{s1} \cdot I_2)}{\alpha_e \cdot (d - x_2)} = \frac{(400 \cdot 2,004 \cdot 10^9)}{23,554 \cdot (454 - 185,94)} = 126,958 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$M_{MAX,2} = 126,958 \text{ kNm}$$

Určení ohybového momentu pro maximální povolené napětí při MSP:

$$M_{MAX} = \min(M_{MAX,1}; M_{MAX,2}) = \min(121,249; 126,958) = 121,249 \text{ kNm}$$

Závěrečné posouzení:

$$M_E \leq M_{MAX}$$

$$58,5 \text{ kNm} \leq 121,249 \text{ kNm} \quad \gg \gg \text{ VYHOVUJE} = \text{Jedná se o stav MSP}$$

3.3.6 Výpočet průhybu od silového zatížení

V této kapitole už přejdeme k výpočtu samotného průhybu. Konkrétně průhybu od silového zatížení podle vzorců z kapitoly 2.3.6.

Křivost od silového zatížení:

$$\begin{aligned}\left(\frac{1}{r}\right)_{zat} &= M_E \cdot \left[(1 - \zeta) \cdot \frac{1}{EI_{1,f}} + \zeta \cdot \frac{1}{EI_{2,f}} \right] \\ \left(\frac{1}{r}\right)_{zat} &= 58,5 \cdot \left[(1 - 0,772) \cdot \frac{1}{30\,287,265} + 0,772 \cdot \frac{1}{17\,015,89} \right] \\ \left(\frac{1}{r}\right)_{zat} &= 3,094 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}\end{aligned}$$

Průhyb od silového zatížení:

$$w_{zat} = \frac{5}{48} \cdot \left(\frac{1}{r}\right)_{zat} \cdot L^2 = \frac{5}{48} \cdot 3,094 \cdot 10^{-3} \cdot 6^2 = 11,603 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 11,603 \text{ mm}$$

3.3.7 Výpočet průhybu od smršťování

Tato kapitola popisuje výpočet průhybu od smršťování, a to včetně kompletního postupu pro stanovení celkového poměrného smršťování ε_{cs} . Celý postup je realizován dle vztahů uvedených v kapitole 2.3.7.

V prvním kroku si určíme poměrné autogenní smršťování v průběhu času $\varepsilon_{ca}(t)$ z následujících vztahů.

Součinitel upravující poměrné autogenní smršťování v průběhu času:

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{(-0,2 \cdot t^{0,5})} = 1 - e^{(-0,2 \cdot (50 \cdot 365,25)^{0,5})} = 1,0$$

Konečná hodnota poměrného autogenního smršťování:

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = 37,5 \cdot 10^{-6}$$

Poměrné autogenní smršťování v průběhu času:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty) = 1,0 \cdot 37,5 \cdot 10^{-6} = 37,5 \cdot 10^{-6}$$

Dále si z následujících vztahů vypočteme poměrné smršťování vysycháním v průběhu času $\varepsilon_{ca}(t)$.

Součinitel upravující poměrné smršťování vysycháním v průběhu času:

$$\beta_{as}(t, t_s) = \frac{t - t_s}{(t - t_s) + 0,04 \sqrt{h_0^3}} = \frac{50 \cdot 365,25 - 7}{(50 \cdot 365,25 - 7) + 0,04 \sqrt{166,667^3}} = 0,995$$

Součinitel závislý na relativní vlhkosti:

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{50}{100} \right)^3 \right] = 1,356$$

Základní poměrné smršťování vysycháním:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot e^{(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}})} \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}$$

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot 4) \cdot e^{(-0,12 \cdot \frac{33}{10})} \right] \cdot 10^{-6} \cdot 1,356 = 511,967 \cdot 10^{-6}$$

Před výpočtem $\varepsilon_{cd}(t)$ nám ještě chybí určit hodnotu součinitele k_h , tu získáme interpolací z tabulky (Tab. 2.1) dle náhradního rozměru prvku. Náhradní rozměr prvku h_0 jsme si stanovili v kapitole 3.3.2.1 ($h_0 = 166,667 \text{ mm}$).

$$k_h = 1,0 + (100 - 166,667) \frac{0,85 - 1,0}{100 - 200} = 0,9$$

Poměrné smršťování vysycháním v průběhu času:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} = 0,995 \cdot 0,9 \cdot 511,967 \cdot 10^{-6} = 458,466 \cdot 10^{-6}$$

Celkové poměrné smršťování:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd}(t) + \varepsilon_{ca}(t) = 458,466 \cdot 10^{-6} + 37,5 \cdot 10^{-6} = 495,966 \cdot 10^{-6}$$

Na závěr vypočteme křivost a průhyb od smršťování.

Křivost od smršťování:

$$\left(\frac{1}{r} \right)_{cs} = \varepsilon_{cs} \cdot \alpha_{e,cs} \cdot \left[(1 - \zeta) \cdot \frac{S_{1,cs}}{I_{1,cs}} + \zeta \cdot \frac{S_{2,cs}}{I_{2,cs}} \right]$$

$$\left(\frac{1}{r} \right)_{cs} = 495,966 \cdot 10^{-6} \cdot 28,701 \cdot \left[(1 - 0,772) \cdot \frac{94\,995,43}{3,766 \cdot 10^9} + 0,772 \cdot \frac{171\,389,408}{2,314 \cdot 10^9} \right]$$

$$\left(\frac{1}{r} \right)_{cs} = 895,796 \cdot 10^{-9} \text{ mm}^{-1} = 895,796 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$$

Průhyb od smršťování:

$$w_{cs} = \frac{1}{8} \cdot \left(\frac{1}{r} \right)_{cs} \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 895,796 \cdot 10^{-6} \cdot 6^2 = 4,031 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 4,031 \text{ mm}$$

3.3.8 Výpočet celkového průhybu a omezující podmínky

Nejprve sečteme dílčí průhyby vypočtené v předchozích částech výpočtu a určíme tak celkový průhyb zkoumané konstrukce.

$$w = w_{zat} + w_{cs} = 11,603 + 4,031 = 15,634 \text{ mm}$$

Poté si stanovíme limitní průhyb.

$$w_{lim} = \frac{1}{250} \cdot L = \frac{1}{250} \cdot 6000 = 24 \text{ mm}$$

A nakonec celkový průhyb porovnáme s limitní podmínkou.

$$w \leq w_{lim}$$

$$15,634 \text{ mm} \leq 24 \text{ mm}$$

>>> VYHOVUJE

3.4 Výsledky výpočtu z programu MSPruhyb

Tato kapitola obsahuje výsledky přímého výpočtu průhybu provedeného ve vytvořeném programu MSPruhyb. Interpretace výsledků je pro názornost ponechána v původní podobě (tj. v podobě, kterou uvidí uživatel při použití programu). Pro bližší seznámení s funkcemi programu slouží kapitola 3.1 a Příloha A.

Všechny vstupní hodnoty a výsledky, které jsou obsaženy na obrázcích v této kapitole slouží k prezentaci přímého výpočtu průhybu pro oboustranně vyztužený obdélníkový průřez.

První obrázek (Obr. 3.5) prezentuje vstupní parametry zadané do programu. Jedná se o stejné parametry jako v případě ručního výpočtu (viz 3.3.1).

Vstupní parametry:		?
Charakteristická pevnost betonu v tlaku:	$f_{ck} =$	25 MPa
Charakteristická mez kluzu oceli:	$f_{yk} =$	500 MPa
Modul pružnosti oceli v tahu:	$E_s =$	200 GPa
Délka prvku:	$L =$	6 m
Šířka průřezu (šířka tlačené oblasti):	$b =$	250 mm
Výška průřezu:	$h =$	500 mm
Vzdál. dolní výztuže od dolních vláken:	$d_1 =$	46 mm
Vzdál. horní výztuže od horních vláken:	$d_2 =$	44 mm
Navržená plocha dolní tažené výztuže:	$A_{S1} =$	804,248 mm ²
Navržená plocha horní tlačené výztuže:	$A_{S2} =$	226,195 mm ²
Moment od kvazistálé kombinace	$M_{qp} =$	58,5 kNm
Moment od charakteristické kombinace:	$M_f =$	70 kNm
Třída cementu:		N
Relativní vlhkost okolního prostředí:	$RH =$	50 %
Teplota prostředí:	$T =$	20 °C
Uvažovaná životnost konstrukce:	$t =$	50 let
Čas vnesení zatížení:	$t_0 =$	28 dní
Obvod prvku vystavený okolnímu prostředí	$u =$	1500 mm
Doba ošetřování betonu:	$t_s =$	7 dní

Obr. 3.5: Vstupní parametry pro přímý výpočet průhybu (MSPruhyb)

Další obrázek (Obr. 3.6) obsahuje hlavní okno výpočtu s posudkem a slouží zde jako ukázka uceleného pohledu na kompletní průběh výpočtu.

VÝPOČET PRŮHYBU DLE ČSN EN 1992-1-1 - Prostý nosník

Vstupní parametry:

Charakteristická pevnost betonu v tlaku: $f_{ck} = 25$ MPa
 Charakteristická mez kluzu oceli: $f_{yk} = 500$ MPa
 Modul pružnosti oceli v tahu: $E_s = 200$ GPa
 Délka prvku: $L = 6$ m
 Šířka průřezu (šířka tlačené oblasti): $b = 250$ mm
 Výška průřezu: $h = 500$ mm
 Vzdál. dolní výztuže od dolních vláken: $d_1 = 46$ mm
 Vzdál. horní výztuže od horních vláken: $d_2 = 44$ mm
 Navržená plocha dolní tažené výztuže: $A_{s1} = 804,248$ mm²
 Navržená plocha horní tažené výztuže: $A_{s2} = 226,195$ mm²
 Moment od kvazistálé kombinace: $M_{qp} = 58,5$ kNm
 Moment od charakteristické kombinace: $M_f = 70$ kNm
 Třída cementu: N
 Relativní vlhkost okolního prostředí: $RH = 50$ %
 Teplota prostředí: $T = 20$ °C
 Uvažovaná životnost konstrukce: $t = 50$ let
 Čas vnesení zatížení: $t_0 = 28$ dní
 Obvod prvku vystavený okolnímu prostředí: $u = 1500$ mm
 Doba ošetřování betonu: $t_s = 7$ dní

Posouzení:
 Kvazistálá kombinace: $w_{qp,Lt} \leq L/250$
 $15,62 \text{ mm} \leq 24 \text{ mm}$
 Charakteristická kombinace: $w_{f,Lt} \leq L/200$
 $18,58 \text{ mm} \leq 30 \text{ mm}$

Výpočet: část 1 - průřezové charakteristiky:

	1a) okamžité f.St ($\varphi = 0$):	1b) dlouhodobé f.Lt (φ pro $<t_0, t>$):	1c) krátkodobé cs.St (φ pro $<t_s, t_0>$):	1d) dlouhodobé cs.Lt (φ pro $<t_s, t>$):
$\varphi_i =$	0,00	2,71	1,35	3,51
$E_{c,eff,i} =$	31 475,81	8 494,91	13 381,71	6 971,75
$x_{1,i} =$	255,67	268,53	262,50	271,80
$x_{2,i} =$	114,35	185,91	158,95	198,08
$I_{1,i} =$	2 873 591 719,79	3 566 902 670,66	3 225 902 621,68	3 766 204 965,15
$I_{2,i} =$	721 246 444,13	2 003 594 283,89	1 425 732 260,33	2 312 779 351,95
$S_{1,i} =$			104 584,92	95 003,56
$S_{2,i} =$			211 296,21	170 968,12
$(EI)_{1,i} =$	90 448,62	30 300,51		
$(EI)_{2,i} =$	22 701,81	17 020,35		

Výpočet: část 2 - průhyb:

	Kvazistálá,St	Kvazistálá,Lt	Charakteristická,St	Charakteristická,Lt
$M_{cr} =$	30,17	39,53	30,17	39,53
$w_{zatížení} =$	7,74	11,60	9,95	14,35
$w_{cs} =$	0,91	4,02	0,98	4,24
$w_{celkem} =$	8,65	15,62	10,93	18,58

OK - Posuzovaný prvek vyhovuje

VYPOČÍTEJ **Návrat do menu**

Obr. 3.6: Hlavní okno přímého výpočtu průhybu (MSPruhyb)

Následující obrázky (Obr. 3.7 a Obr. 3.8) ukazují podrobné výpočty součinitele dotvarování a průřezových charakteristik při dlouhodobém působení zatížení.

Podrobný postup výpočtu - f.Lt

Výpočet (f.Lt) - průřezové charakteristiky pro dlouhodobé silové zatížení $<t_0, t>$

Součinitel dotvarování (smrštění):

Stáří betonu upravené podle vlivu teploty a cementu: $t_{0,CEMT} = 27,947490$ dne
 Náhradní rozměr prvku: $h_0 = 166,666667$ mm
 Součinitel závislý na relativní vlhkosti: $\beta_H = 500,025390$
 Součinitel vystihující vliv stáří betonu: $\beta_{t0} = 0,488624$
 Součinitel vystihující vliv pevnosti betonu: $\beta_{fcm} = 2,924505$
 Součinitel dotvarování vystihující vliv vlhkosti: $\varphi_{RH} = 1,908560$
 Součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení: $\beta_{ci(t,t_0)} = 0,991917$
 Základní součinitel dotvarování: $\varphi_0 = 2,727300$
Součinitel dotvarování - dlouhodobý: $\varphi_{f,Lt} = 2,705256$

Průřezové charakteristiky:

Dlouhodobý modul pružnosti betonu: $E_{c,eff,Lt} = 8 494,907762$ MPa
 Poměr modulů pružnosti: $\alpha_{e,Lt} = 23,543516$
 Plocha ideálního průřezu: $A_{1,Lt} = 0,149260$ m²
 Výška tlačené oblasti (průřez bez thlin): $x_{1,Lt} = 0,268529$ m
 Výška tlačené oblasti (průřez s plně rozvinutými thlinami): $x_{2,Lt} = 0,185913$ m
 Moment setrvačnosti (průřez bez thlin): $I_{1,Lt} = 0,003567$ m⁴
 Moment setrvačnosti (průřez s plně rozvinutými thlinami): $I_{2,Lt} = 0,002004$ m⁴
 Ohybová tuhost (průřez bez thlin): $(EI)_{1,Lt} = 30 300,509182$ kNm²
 Ohybová tuhost (průřez s plně rozvinutými thlinami): $(EI)_{2,Lt} = 17 020,348633$ kNm²
 Ohybová poddajnost (průřez bez thlin): $C_{1,Lt} = 33,002746$ 10⁻⁶/kNm²
 Ohybová poddajnost (průřez s plně rozvinutými thlinami): $C_{2,Lt} = 58,753203$ 10⁻⁶/kNm²

Výpis použitých vzorců **Zpět na hlavní stránku výpočtu**

Obr. 3.7: Podrobný postup výpočtu – dlouhodobé silové zatížení (MSPruhyb)

Podrobný postup výpočtu - cs,Lt

Výpočet (cs,Lt) - průřezové charakteristiky pro dlouhodobé zatížení smršťováním <ts,t>

Součinitel dotvarování (smršťování):

Stáří betonu "ts" upravené podle vlivu teploty a cementu: $t_{s,CEMT} = 6,986872$ dne

Náhradní rozměr prvku: $h_0 = 166,666667$ mm

Součinitel závislý na relativní vlhkosti: $\beta_H = 500,025390$

Součinitel vystihující vliv stáří betonu: $\beta_{ts} = 0,634832$

Součinitel vystihující vliv pevnosti betonu: $\beta_{fcm} = 2,924505$

Součinitel dotvarování vystihující vliv vlhkosti: $\varphi_{RH} = 1,908560$

Součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení: $\beta_{c(t,ts)} = 0,991926$

Základní součinitel dotvarování: $\varphi_0 = 3,543376$

Součinitel dotvarování pro smršťování - dlouhodobý: $\varphi_{cs,Lt} = 3,514767$

Charakteristiky průřezu pro smršťování:

Dlouhodobý modul pružnosti betonu: $E_{c,eff,cs} = 6\,971,745388$ MPa

Poměr modulů pružnosti: $\alpha_{e,cs} = 28,687221$

Plocha ideálního průřezu: $A_{1,cs} = 0,154561$ m²

Vzdálenost těžiště ideálního průřezu od horního okraje: $x_{1,cs} = 0,271803$ m

Vzdálenost neutrální osy od tláčeného okraje (průřez s trhlínami): $x_{2,cs} = 0,198083$ m

Statický moment průřezové plochy výztuže k těžišti průřezu: $S_{1,cs} = 0,000095$ m³

Statický moment průřezové plochy výztuže pro průřez s trhlínami: $S_{2,cs} = 0,000171$ m³

Moment setrvačnosti (průřez bez trhlín): $I_{1,cs} = 0,003766$ m⁴

Moment setrvačnosti (průřez s plně rozvinutými trhlínami): $I_{2,cs} = 0,002313$ m⁴

Výpis použitých vzorců Zpět na hlavní stránku výpočtu

Obr. 3.8: Podrobný postup výpočtu – dlouhodobé zatížení smršťováním (MSPrůhyb)

Na Obr. 3.9 je vidět podrobný výpočet dlouhodobého průhybu od kvazi-stále kombinace zatížení.

Podrobný postup výpočtu - kvazi,Lt

Výpočet dlouhodobého průhybu od kvazistálé kombinace zatížení (kvazi,Lt) a od smršťování (cs,Lt):

Charakteristiky pro výpočet průhybu:

Moment od kombinace zatížení: $M_e = 58,500000$ kNm

Moment na mezi vzniku trhlín: $M_{cr} = 39,525396$ kNm

Moment na mezi MSP: $M_{max} = 121,242050$ kNm

Poměrné autogenní smršťování v průběhu času: $\epsilon_{ca}(t) = 0,000037$

Poměrné smršťování vysycháním v průběhu času: $\epsilon_{cd}(t) = 0,000459$

Celkové poměrné smršťování: $\epsilon_{cs} = 0,000496$

Ohybová tuhost (průřez bez trhlín): $(EI)_{1,cs} = 30\,300,509182$ kNm²

Ohybová tuhost (průřez s plně rozvinutými trhlínami): $(EI)_{2,cs} = 17\,020,348633$ kNm²

Statický moment průřezové plochy výztuže k těžišti průřezu: $S_{1,cs} = 0,000095$ m³

Statický moment průřezové plochy výztuže pro průřez s trhlínami: $S_{2,cs} = 0,000171$ m³

Moment setrvačnosti (průřez bez trhlín): $I_{1,cs} = 0,003766$ m⁴

Moment setrvačnosti (průřez s plně rozvinutými trhlínami): $I_{2,cs} = 0,002313$ m⁴

Průhyb od silového zatížení:

Míra spolupůsobení betonu mezi trhlínami: $\zeta_{zatížení} = 0,771750$

Křivost od silového zatížení: $1/r_{zatížení} = 0,003093226$ m⁻¹

Průhyb od silového zatížení: $w_{zatížení} = 11,599598$ mm

Průhyb od smršťování:

Míra spolupůsobení betonu mezi trhlínami: $\zeta_{cs} = 0,771750$

Křivost od smršťování: $1/r_{cs} = 0,000894$ m⁻¹

Průhyb od smršťování: $w_{cs} = 4,023146$ mm

Celkový průhyb:

Celkový průhyb: $w_{celkem} = 15,622744$ mm

Výpis použitých vzorců Zpět na hlavní stránku výpočtu

Obr. 3.9: Podrobný postup výpočtu – dlouhodobý průhyb od kvazi-stálé kombinace (MSPrůhyb)

Na závěr jsou uvedeny ještě výřezy z hlavního okna výpočtu (Obr. 3.10 až Obr. 3.12), na nichž jsou lépe vidět detaily výpočtu pro zvolenou výpočtovou kombinaci a finální posouzení.

V náhledech jsou zobrazeny i krátkodobé kombinace, jednak z hlediska ukázky komplexnosti výpočtu, tak i z hlediska prezentace výsledků (tzn. je ukázáno, co uvidí uživatel při používání programu).

Výpočet: část 1 - průřezové charakteristiky: ?

	1a) okamžité f,St ($\varphi = 0$):	1b) dlouhodobé f,Lt (φ pro $<t_0, t>$):	1c) krátkodobé cs,St (φ pro $<ts, t_0>$):	1d) dlouhodobé cs,Lt (φ pro $<ts, t>$):	
$\varphi_i =$	0,00	2,71	1,35	3,51	
$E_{c,eff,i} =$	31 475,81	8 494,91	13 381,71	6 971,75	MPa
$x_{1,i} =$	255,67	268,53	262,50	271,80	mm
$x_{2,i} =$	114,35	185,91	158,95	198,08	mm
$I_{1,i} =$	2 873 591 719,79	3 566 902 670,66	3 225 902 621,68	3 766 204 965,15	mm ⁴
$I_{2,i} =$	721 246 444,13	2 003 594 283,89	1 425 732 260,33	2 312 779 351,95	mm ⁴
$S_{1,i} =$			104 584,92	95 003,56	mm ³
$S_{2,i} =$			211 296,21	170 968,12	mm ³
(El) $1,i =$	90 448,62	30 300,51			kNm ²
(El) $2,i =$	22 701,81	17 020,35			kNm ²
	f,St - Podrobný postup výpočtu	f,Lt - Podrobný postup výpočtu	cs,St - Podrobný postup výpočtu	cs,Lt - Podrobný postup výpočtu	

Obr. 3.10: Hlavní okno přímého výpočtu – detail průřezových charakteristik (MSPrubyb)

Výpočet: část 2 - průhyb:

	Kvazistálá,St	Kvazistálá,Lt
$M_{cr} =$	30,17	39,53
$w_{zatižení} =$	7,74	11,60
$w_{cs} =$	0,91	4,02
$w_{celkem} =$	8,65	15,62
	Kvazi,St - Podrobný postup výpočtu	Kvazi,Lt - Podrobný postup výpočtu

Obr. 3.11: Hlavní okno přímého výpočtu – detail průhybu (MSPrubyb)

Posouzení:

Kvazistálá kombinace: $w_{\varphi,Lt} \leq L/250$
 15,62 mm \leq 24 mm

Obr. 3.12: Hlavní okno přímého výpočtu – detail posouzení (MSPrubyb)

3.5 Porovnání výsledků z programu vůči dalším postupům

V této kapitole jsou prezentovány výsledky z programu MSPruhyb, a to formou porovnání s dalšími postupy. Porovnání slouží jako ukázka funkčnosti programu MSPruhyb. Veškeré odlišnosti ve výsledcích jsou vždy blíže okomentovány v jednotlivých podkapitolách.

3.5.1 Porovnání výsledků z programu a z ručního výpočtu

První podkapitola se věnuje porovnání výsledků z programu MSPruhyb (viz kapitola 3.4) a výsledků ručního výpočtu (viz kapitola 3.3). Oba postupy popisují výpočet průhybu pro oboustranně vyztužený obdélníkový průřez. Konkrétně pak porovnáваме kvazi-stálou kombinaci při dlouhodobém působení zatížení.

Tab. 3.1: Porovnání výpočtu průhybu – oboustranně vyztužený průřez (MSPruhyb x ruční výpočet)

Proměnná	Jednotka	Program MSPruhyb	Ruční výpočet	Odchylka
$\varphi_{f,LT}$	-	2,71	2,71	-0,06 %
$\varphi_{cs,LT}$	-	3,51	3,52	-0,06 %
$E_{c,eff,f}$	MPa	8 494,91	8 490,96	0,05 %
$\alpha_{e,f}$	-	23,54	23,55	-0,04 %
$x_{1,f}$	mm	268,53	268,54	0,00 %
$I_{1,f}$	mm ⁴	3 566 902 670,66	3 567 000 000,00	0,00 %
$S_{1,f}$	mm ³	98 377,18	98 370,13	0,01 %
$x_{1,cs}$	mm	271,80	271,81	0,00 %
$I_{1,cs}$	mm ⁴	3 766 204 965,15	3 766 000 000,00	0,01 %
$S_{1,cs}$	mm ³	95 003,56	94 995,43	0,01 %
$x_{2,f}$	mm	185,91	185,94	-0,01 %
$I_{2,f}$	mm ⁴	2 003 594 283,89	2 004 000 000,00	-0,02 %
$S_{2,f}$	mm ³	183 508,74	183 932,99	-0,23 %
$x_{2,cs}$	mm	198,08	198,11	-0,02 %
$I_{2,cs}$	mm ⁴	2 312 779 351,95	2 314 000 000,00	-0,05 %
$S_{2,cs}$	mm ³	170 968,12	171 389,41	-0,25 %
M_{cr}	kNm	39,53	39,53	-0,01 %
w_{zat}	mm	11,60	11,60	-0,03 %
w_{cs}	mm	4,02	4,03	-0,19 %
w	mm	15,62	15,63	-0,07 %

Odchylky v Tab. 3.1 ukazují, že program poskytuje stejné výsledky jako vzorce použité v této práci. Nepatrné rozdíly jsou způsobené zaokrouhlením ručního výpočtu.

3.5.2 Porovnání součinitele dotvarování (MSPruhyb x FIN)

Dalším srovnáním je ukázka výpočtu součinitele dotvarování prostřednictvím programu FIN EC – Beton [10].

Následující obrázek (Obr. 3.13) ukazuje postup výpočtu součinitele dotvarování pro časový interval silového zatížení (tedy interval $< t_0; t >$).

Dotvarování

Počátek zatěžování $t_0 = 28,0$ [dny]

Konec zatěžování $t = 18250,0$ [dny] $50,00$ [roky]

Relativní vlhkost prostředí $RH = 50,0$ [%]

Celý průřez obklopen prostředím

Obvod průřezu ve styku s prostředím $u = 1500,0$ [mm]

— Výsledky výpočtu

Součinitel dotvarování:

$h_0 = 2 \times A_s / u = 2 \times 125,103 / 1500 = 166,7$ mm

$\varphi_{RH} = 1 + (1 - RH / 100) / (0,1 \times \sqrt[3]{h_0}) = 1 + (1 - 50 / 100) / (0,1 \times \sqrt[3]{166,7}) = 1,909$

$\beta(f_{cm}) = 16,8 \cdot 10^6 / \sqrt[3]{f_{cm}} = 16,8 \cdot 10^6 / \sqrt[3]{33} = 2,925$

$\beta(t_0) = 1 / (0,1 + t_0^{0,2}) = 1 / (0,1 + 28,000^{0,2}) = 0,488$

$\varphi_0 = \varphi_{RH} \times \beta(f_{cm}) \times \beta(t_0) = 1,909 \times 2,925 \times 0,488 = 2,726$

$\beta_H = \min(1,5 \times [1 + (0,012 \times RH)^{18}] \times h_0 + 250; 1500) = \min(1,5 \times [1 + (0,012 \times 50)^{18}] \times 166,7 + 250; 1500) = \min(500; 1500) = 500$

$\beta(t/t_0) = [(t - t_0) / (\beta_H + t - t_0)]^{0,3} = [(18250 - 28,000) / (500 + 18250 - 28,000)]^{0,3} = 0,992$

$\phi = \varphi_0 \times \beta(t/t_0) = 2,726 \times 0,992 = 2,704$

Obr. 3.13: Součinitel dotvarování pro silové zatížení (FIN EC 2018)

Zde je uvedeno porovnání s vytvořeným programem MSPruhyb.

Tab. 3.2: Porovnání součinitele dotvarování MSPruhyb x FIN EC 2018

Proměnná	Jednotka	Program MSPruhyb	FIN EC Beton	Odchylka
h_0	mm	166,667	166,700	-0,02 %
φ_{RH}	-	1,909	1,909	-0,02 %
$\beta(f_{cm})$	-	2,925	2,925	-0,02 %
$\beta(t_0)$	-	0,489	0,488	0,13 %
φ_0	-	2,727	2,726	0,05 %
β_H	-	500,025	500,000	0,01 %
$\beta(t, t_0)$	-	0,992	0,992	-0,01 %
φ_{LT}	-	2,705	2,704	0,05 %

Z Tab. 3.2 je zřejmé, že se výsledky lehce liší. Nepatrné rozdíly jsou důsledkem zaokrouhlení hodnot. Výpočtově se postupy liší pouze v jednom bodě, tj. u součinitele $\beta(t_0)$. Rozdíl je způsoben tím, že program FIN neuvažuje vliv teploty a druh cementu na čas „ t_0 “ (tj. na počátek zatěžování) ve vzorci (2.3.12). Pro zadaný cement třídy N a teplotu 20 °C je tento rozdíl zanedbatelný, avšak pro jiné třídy cementů a odlišné teploty se může výsledný součinitel dotvarování výrazně lišit.

3.5.3 Porovnání výpočtu průhybu (MSPruhyb x Výpočetní pomůcka)

Poslední porovnání slouží jako ověření přímého výpočtu průhybu pomocí výpočetní pomůcky vytvořené v Excelu [6]. Výpočetní pomůcka používá postup, který též vychází z normy [1] a je součástí bakalářské práce [5], zaměřené rovněž na téma výpočtu průhybu. Součástí práce [5] je i ověření funkčnosti výpočetní pomůcky pomocí porovnání výpočtu se softwarem Scia Engineer. Lze tedy předpokládat, že výpočetní pomůcka funguje správně a můžeme jí použít pro porovnání s vytvořeným programem MSPruhyb.

Jelikož výpočetní pomůcka zohledňuje pouze spodní taženou výztuž, nemůže být pro porovnání využit příklad z kapitoly 3.4, který ukazuje výpočet pro oboustranně vyztužený průřez. Příklad pro jednostranně vyztužený průřez z programu MSPruhyb je obsahem přílohy C.1. Stejný příklad, avšak vypočtený ve výpočetní pomůcce je pak obsahem přílohy C.2.

Tab. 3.3: Porovnání výpočtu průhybu – jednostranně vyztužený průřez (MSPruhyb x výpočetní pomůcka)

Proměnná	Jednotka	Program MSPruhyb	Výpočetní pomůcka	Odchylka
$\varphi_{f,LT}$	-	2,71	2,73	0,74 %
$\varphi_{cs,LT}$	-	3,51	3,54	0,85 %
$E_{c,eff,f}$	MPa	8 494,91	8 450,00	-0,53 %
$\alpha_{e,f}$	-	23,54	23,67	0,55 %
$x_{1,f}$	mm	276,84	276,97	0,05 %
$I_{1,f}$	mm ⁴	3 288 496 980,61	3 262 000 000,00	-0,81 %
$S_{1,f}$	mm ³	142 483,40	-	-
$x_{1,cs}$	mm	281,79	281,95	0,06 %
$I_{1,cs}$	mm ⁴	3 414 711 288,35	3 419 000 000,00	0,13 %
$S_{1,cs}$	mm ³	138 502,71	138 000,00	-0,36 %
$x_{2,f}$	mm	197,22	198,00	0,40 %
$I_{2,f}$	mm ⁴	1 887 737 382,10	1 895 000 000,00	0,38 %
$S_{2,f}$	mm ³	206 513,40	-	-
$x_{2,cs}$	mm	211,54	212,00	0,22 %
$I_{2,cs}$	mm ⁴	2 145 162 390,94	2 153 000 000,00	0,37 %
$S_{2,cs}$	mm ³	194 994,76	195 000,00	0,00 %
M_{cr}	kNm	37,80	38,37	1,51 %
ε_{cs}	-	0,000496	0,000550	10,89 %
w_{zat}	mm	12,46	12,45	-0,08 %
w_{cs}	mm	5,15	5,68	10,29 %
w	mm	17,61	18,10	2,78 %

V [Tab. 3.3](#) vidíme porovnání vybraných hodnot získaných z programu MSPruhyb a hodnot z výpočetní pomůcky. Jsou zde vidět nepatrné odlišnosti téměř u všech hodnot. Je to způsobeno odlišným přístupem k určení charakteristik betonu. Výpočetní pomůcka využívá přibližně stanovených tabulkových hodnot, které jsou uvedené v levé části tabulky 3.1 v kapitole 3.1.3 normy [1]. Vytvořený program MSPruhyb čerpá pevnostní a deformační charakteristiky betonu ze stejné kapitoly, ale vychází z analytických vztahů (pravá část tabulky 3.1 v kapitole 3.1.3 v normě [1]), které se vážou k charakteristické válcové pevnosti betonu v tlaku. Charakteristiky betonu jsou tak určeny přesněji v programu MSPruhyb pomocí analytických vztahů.

Rozdíl zde můžeme demonstrovat pomocí vzorce (2.3.2) pro výpočet průměrné hodnoty pevnosti betonu v dostředném tahu (uvažován beton třídy C25/30).

Takto vychází hodnota f_{ctm} při dosazení do přesného analytického vztahu:

$$f_{ctm}(C25/30) = 0,3 \cdot f_{ck}^{(2/3)} = 0,3 \cdot 25^{(2/3)} = 2,565 \text{ MPa}$$

A tuto hodnotu uvádí norma jako přibližnou podle vybrané pevností třídy betonu:

$$f_{ctm}(C25/30) = 2,6 \text{ MPa}$$

Jelikož se charakteristiky betonu používají v mnoha výpočtových vztazích, může i tato drobná odlišnost způsobit větší odchylky u jednotlivých výsledků, a to řádově až v jednotkách procent. Na druhou stranu, z porovnání v [Tab. 3.3](#) lze vidět, že průhyb od silového zatížení je téměř identický.

Největší odchylka je však vidět u výpočtu průhybu od smršťování. Odchylka je způsobena opomenutím několika vzorců ve výpočetní pomůcce při výpočtu celkového poměrného smršťování ε_{cs} . Ve výpočetní pomůcce nejsou uvažovány vzorce, které stanovují poměrné autogenní smršťování v průběhu času $\varepsilon_{ca}(t)$ a poměrné smršťování vysycháním v průběhu času $\varepsilon_{cd}(t)$. Místo toho jsou do vzorce pro celkové poměrné smršťování rovnou dosazeny hodnoty $\varepsilon_{ca}(\infty)$ a $\varepsilon_{cd,0}$. Celý postup včetně všech vzorců je popsán v kapitole [2.3.7](#).

V [Tab. 3.3](#) nejsou dílčí hodnoty poměrného smršťování úmyslně uvedeny, jelikož si vzájemně neodpovídají (tzn. $\varepsilon_{ca}(t) \neq \varepsilon_{cd,0}$ a $\varepsilon_{ca}(t) \neq \varepsilon_{ca}(\infty)$).

3.6 Parametrické studie

Nespornou výhodou programu MSPruhyb je rychlost výpočtu. Tato kapitola tak slouží jako ukázka aplikace vytvořeného programu pro konkrétní úlohy. Každá z podkapitol popisuje změnu výsledného průhybu při změně vybraného vstupního parametru. Součástí je i graf, ze kterého je na první pohled patrné, jak moc změna vybraného vstupu ovlivňuje výsledný průhyb konstrukce.

Prvních pět parametrických studií vychází ze vzorového příkladu, který je uvedený v kapitole 3.4 (oboustranně vyztužený průřez). Poslední studie v kapitole 3.6.6 vychází ze vzorového příkladu uvedeného v příloze C.1 (jednostranně vyztužený průřez). Ve všech případech jsou ponechány stejné vstupní parametry jako u vzorových příkladů a je změněn vždy pouze jeden vybraný parametr dle dané podkapitoly.

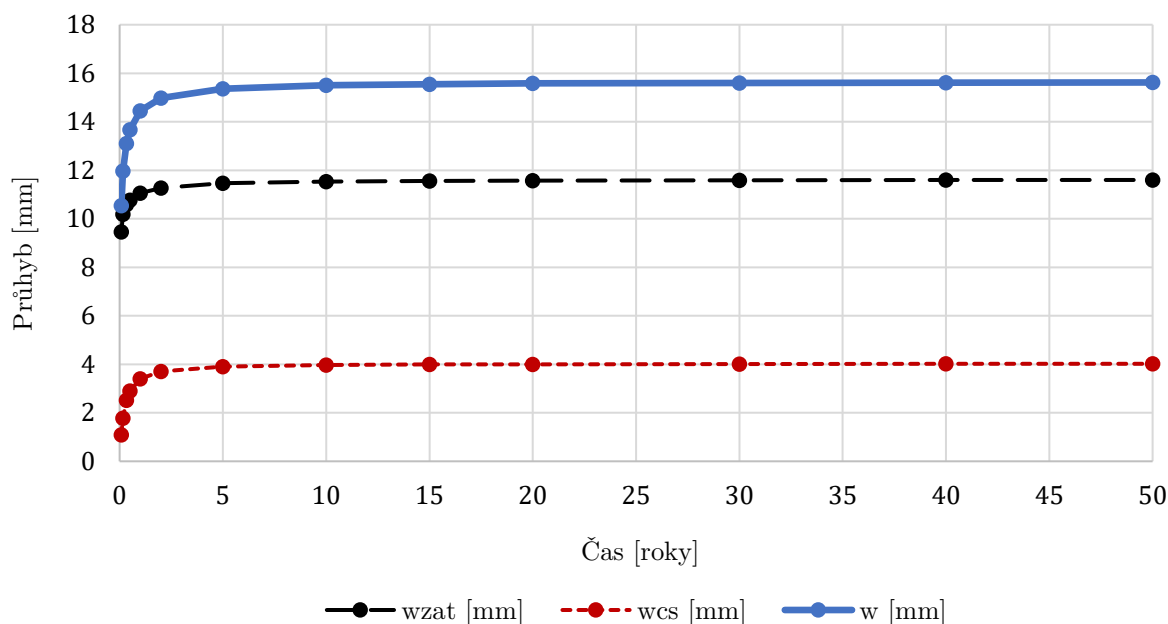
3.6.1 Průhyb oboustranně vyztužené konstrukce v průběhu času

První studie ukazuje, jak se mění celkový průhyb konstrukce „ w “ a jeho složky, tedy průhyb od zatížení „ w_{zat} “ a průhyb od smršťování „ w_{cs} “ v závislosti na době trvání zatížení „ t “. Za dobu trvání zatížení byly dosazeny hodnoty od jednoho měsíce až po 250 let. Všechny časové intervaly jsou převedeny na roky. Hodnoty průhybů od těchto časových intervalů jsou obsaženy v následující tabulce (Tab. 3.4).

Tab. 3.4: Průhyb konstrukce v závislosti na době trvání zatížení (oboustranně vyztužený průřez)

t [roky]	w_{zat} [mm]	w_{cs} [mm]	w [mm]
0,083	9,46	1,09	10,54
0,167	10,18	1,78	11,97
0,333	10,58	2,52	13,10
0,5	10,77	2,90	13,67
1	11,06	3,40	14,45
2	11,27	3,70	14,98
5	11,46	3,90	15,36
10	11,53	3,97	15,50
15	11,56	3,99	15,55
20	11,57	4,00	15,58
30	11,59	4,01	15,60
40	11,60	4,02	15,61
50	11,60	4,02	15,62
100	11,61	4,03	15,64
250	11,61	4,03	15,65

Grafické znázornění závislosti průhybu konstrukce na době trvání zatížení je zobrazeno na Obr. 3.14.



Obr. 3.14: Závislost průhybu konstrukce na době trvání zatížení (oboustranně vyztužený průřez)

Z Obr. 3.14 lze pozorovat rychlý nárůst průhybu v počáteční fázi zatěžování. Od druhého roku se průhyb zvyšuje pouze pozvolně a po více než deseti letech už je nárůst průhybu téměř nulový.

3.6.2 Průhyb konstrukce v závislosti na relativní vlhkosti

Druhá studie ukazuje, jak se mění celkový průhyb konstrukce „ w “ a jeho složky, tedy průhyb od zatížení „ w_{zat} “ a průhyb od smršťování „ w_{cs} “ v závislosti na relativní vlhkosti okolního prostředí „ RH “. Průhyb je určen při konstantní době trvání zatížení 50 let (tzn. $t = \text{konstantní}$).

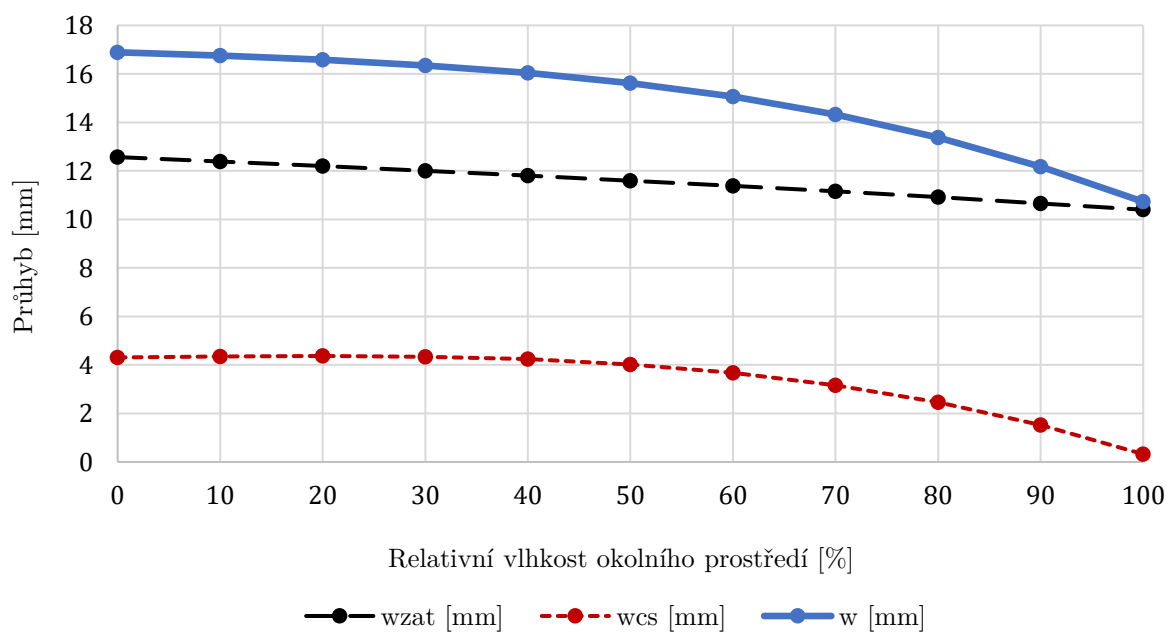
Hodnoty průhybů pro relativní vlhkost okolního prostředí jsou uvedeny v Tab. 3.5.

Z grafu na Obr. 3.15 můžeme pozorovat, že s rostoucí relativní vlhkostí průhyb konstrukce klesá. Ze zakřivení křivky celkového průhybu vidíme, že při nižších hodnotách relativní vlhkosti průhyb klesá velmi pozvolně a lineárně, zatímco u vyšších hodnot začíná klesat strměji. Je to způsobeno především vlivem relativní vlhkosti na průhyb od smršťování. Ač se relativní vlhkost vyskytuje ve více vzorcích a způsobuje např. lineární pokles průhybu od silového zatížení, největší změna se projeví u výpočtu součinitele β_{RH} . Ten je na relativní vlhkosti přímo závislý a používá se při výpočtu poměrného přetvoření od smršťování vysycháním – viz vztah (2.3.50).

Tab. 3.5: Průhyb konstrukce v závislosti na relativní vlhkosti okolního prostředí

RH [%]	w_{zat} [mm]	w_{cs} [mm]	w [mm]
0	12,57	4,31	16,89
10	12,39	4,35	16,75
20	12,20	4,37	16,58
30	12,01	4,34	16,35
40	11,81	4,24	16,04
50	11,60	4,02	15,62
60	11,38	3,68	15,06
70	11,16	3,16	14,32
80	10,92	2,46	13,38
90	10,66	1,52	12,18
100	10,40	0,32	10,73

Na Obr. 3.15 je zobrazeno grafické znázornění závislosti průhybu konstrukce na relativní vlhkosti okolního prostředí.



Obr. 3.15: Závislost průhybu konstrukce na relativní vlhkosti okolního prostředí

3.6.3 Průhyb konstrukce v závislosti na pevnostní třídě betonu

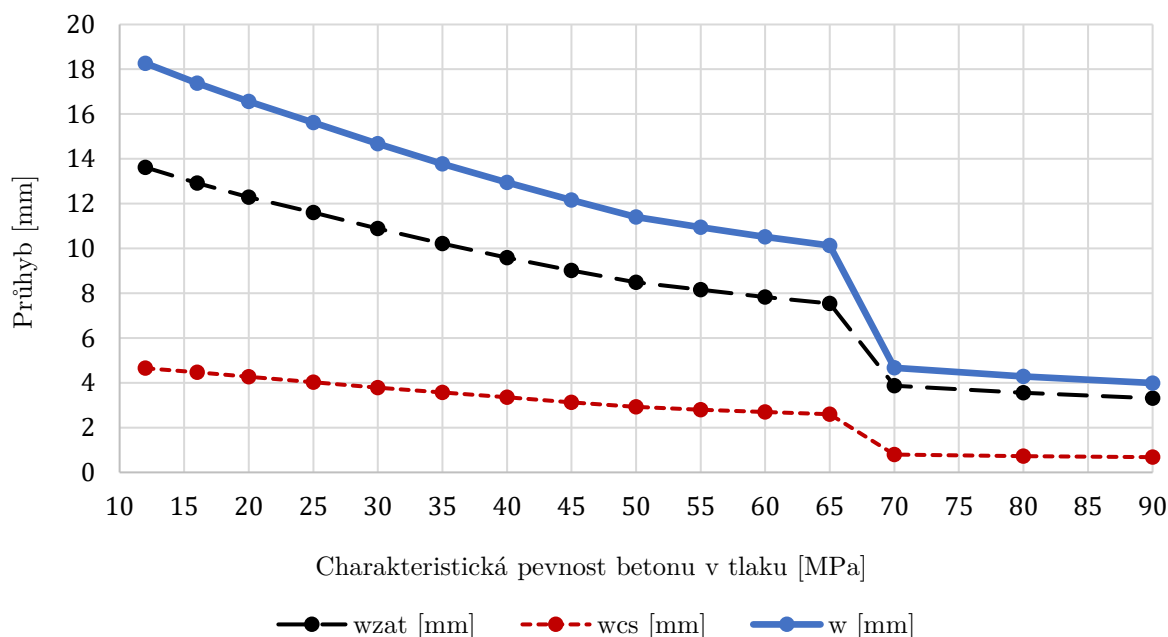
Třetí studie zaměřená na oboustranně vyztužený průřez ukazuje, jak se mění celkový průhyb konstrukce „ w “ a jeho složky, tedy průhyb od zatížení „ w_{zat} “ a průhyb od smršťování „ w_{cs} “ v závislosti na pevnostních charakteristikách betonu. Tyto změny jsou reprezentovány změnou charakteristické pevnosti betonu v tlaku „ f_{ck} “. Ostatní charakteristiky betonu se mění v závislosti na f_{ck} (viz kapitola 2.3.1.1). Průhyb je určen při konstantní době trvání zatížení 50 let (tzn. $t = \text{konstantní}$).

Hodnoty průhybů pro jednotlivé charakteristické pevnosti betonu v tlaku jsou uvedeny v [Tab. 3.6](#).

Tab. 3.6: Průhyb konstrukce v závislosti na charakteristické pevnosti betonu v tlaku

f_{ck} [MPa]	w_{zat} [mm]	w_{cs} [mm]	w [mm]
12	13,62	4,65	18,27
16	12,91	4,47	17,37
20	12,29	4,27	16,56
25	11,60	4,02	15,62
30	10,89	3,79	14,68
35	10,21	3,57	13,78
40	9,59	3,35	12,94
45	9,02	3,13	12,16
50	8,48	2,92	11,40
55	8,15	2,80	10,95
60	7,83	2,69	10,52
65	7,54	2,59	10,13
70	3,87	0,80	4,67
80	3,56	0,73	4,29
90	3,31	0,68	3,99

Grafické znázornění závislosti průhybu konstrukce na charakteristické pevnosti betonu v tlaku je zobrazeno na [Obr. 3.16](#).



Obr. 3.16: Závislost průhybu konstrukce na charakteristické pevnosti betonu v tlaku

Z grafu na Obr. 3.16 je na první pohled vidět, že za pomoci betonu vyšší pevnosti můžeme radikálně snížit průhyb zkoumané konstrukce.

Velmi zajímavý je pokles průhybu při přechodu charakteristické pevnosti betonu v tlaku z 65 MPa na 70 MPa. Tento pokles není důsledkem toho, že by betony od 70 MPa byly násobně pevnější, ale je způsobený nelinearitou použitého výpočtu. Z charakteristické pevnosti betonu v tlaku f_{ck} vypočítáme průměrnou hodnotu pevnosti betonu v dostředném tahu f_{ctm} (viz vzorec (2.3.2)), kterou pak používáme při výpočtu ohybového momentu na mezi vzniku trhlin M_{cr} (viz vzorec (2.3.34)). Tento ohybový moment charakterizuje hranici mezi průřezem bez trhlin a s trhlami, přičemž s rostoucím f_{ctm} roste M_{cr} .

Pro tento příklad platí, že pro $f_{ck} = 65 \text{ MPa}$ je ohybový moment od zatížení větší než ohybový moment na mezi vzniku trhlin, tedy že $M_E > M_{cr}$ a průřez je tak počítán jako průřez s trhlami. Při $f_{ck} = 70 \text{ MPa}$ se hodnota ohybového momentu M_{cr} o něco zvýší a pak platí, že $M_E < M_{cr}$ a tedy i to, že je průřez počítán jako průřez bez trhlin. To znamená, že pro výpočet křivosti (ze které počítáme průhyb) používáme pouze charakteristiky průřezu bez trhlin. Tedy charakteristiky, které nabývají příznivějších hodnot a průřez tak lépe odolává působení silového i nesilového zatížení.

Na tento pokles je nutné pohlížet, jako na jistou nelinearitu v konkrétním bodě výpočtu (přechod z $M_E > M_{cr}$ na $M_E < M_{cr}$). Obecně platí, že průřez bez trhlin vykazuje nižší průhyb, avšak růst průhybu se bude odvíjet podle toho, jak rychle budou trhliny ve zkoumaném prvku vznikat, což vzorec nemůže zcela přesně postihnout.

3.6.4 Průhyb konstrukce v závislosti na vyztužení taženou výztuží

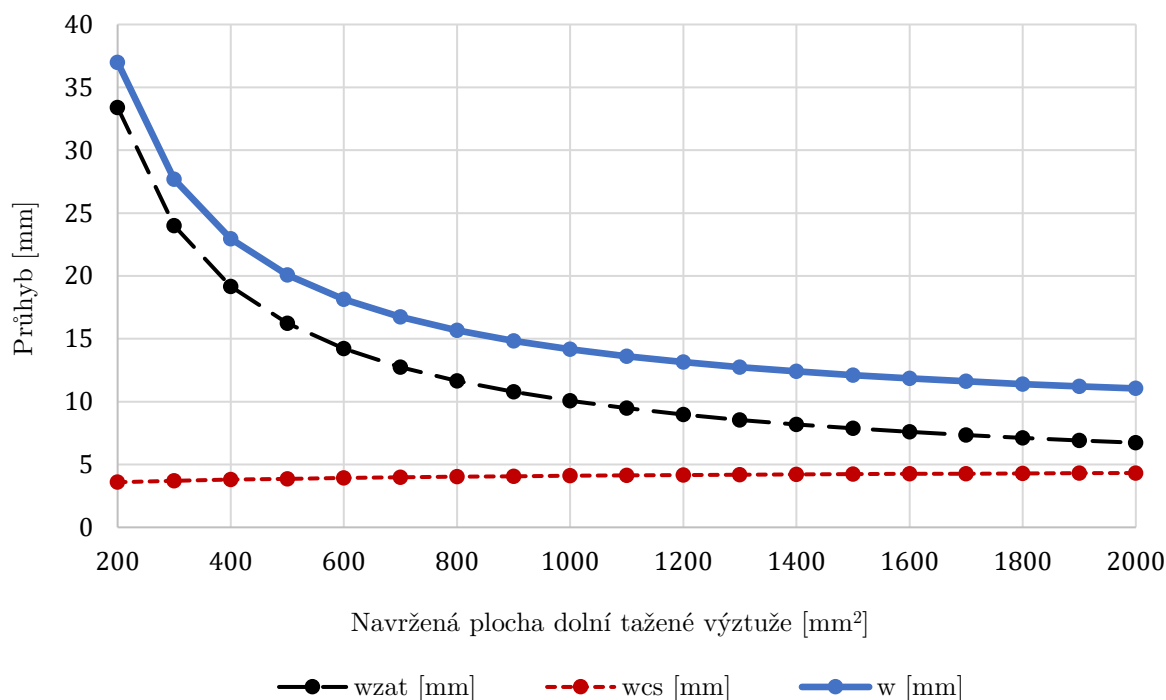
Další studie zaměřená na oboustranně vyztužený průřez ukazuje, jak se mění celkový průhyb konstrukce „ w “ a jeho složky, tedy průhyb od zatížení „ w_{zat} “ a průhyb od smršťování „ w_{cs} “ v závislosti na navržené ploše dolní tažené výztuže „ A_{S1} “. Průhyb je určen při konstantní době trvání zatížení 50 let (tzn. $t = \text{konstantní}$).

Hodnoty průhybů pro různé plochy dolní tažené výztuže jsou uvedeny v [Tab. 3.7](#). Jednotlivé hodnoty plochy vyztužení neudávají plochu určitého počtu profilů výztuže, slouží pouze pro teoretické znázornění průběhu průhybu.

Tab. 3.7: Průhyb konstrukce v závislosti na vyztužení taženou výztuží

A_{S1} [mm ²]	w_{zat} [mm]	w_{cs} [mm]	w [mm]
200	33,40	3,59	36,99
300	24,00	3,70	27,69
400	19,17	3,79	22,96
500	16,22	3,86	20,08
600	14,21	3,92	18,13
700	12,75	3,97	16,73
800	11,64	4,02	15,66
900	10,77	4,06	14,83
1 000	10,06	4,10	14,16
1 100	9,47	4,13	13,60
1 200	8,98	4,16	13,14
1 300	8,55	4,19	12,74
1 400	8,19	4,21	12,40
1 500	7,87	4,23	12,10
1 600	7,59	4,25	11,84
1 700	7,34	4,27	11,61
1 800	7,11	4,29	11,40
1 900	6,91	4,30	11,21
2 000	6,73	4,32	11,05

Grafické znázornění závislosti průhybu konstrukce na ploše dolní tažené výztuže je zobrazeno na [Obr. 3.17](#).



Obr. 3.17: Závislost průhybu konstrukce na navržené ploše tažené výztuže

Z grafu na Obr. 3.17 vidíme, jak nám zvyšující se plocha dolní tažené výztuže redukuje celkový průhyb zkoumané konstrukce.

Celkový průhyb konstrukce však klesá jen díky tomu, že klesá průhyb od silového zatížení. Vyšší plocha tažené výztuže má pozitivní vliv na charakteristiky průřezu (tzn. charakteristiky nabývají vyšších hodnot – průřez lépe odolává účinkům zatížení). Vzhledem k tomu klesá křivost od silového zatížení, což je veličina nepřímo úměrná ohybové tuhosti průřezu – viz vztah (2.3.44).

Za zdůraznění stojí fakt, že se i přes příznivější charakteristiky průřezu průhyb od smršťování nepatrně zvyšuje. Je to dáno tím, že křivost od smršťování závisí na poměru dvou průřezových charakteristik. Konkrétně na poměru statického momentu průřezové plochy výztuže a velikosti momentu setrvačnosti – viz vztah (2.3.54). Tento poměr je ovlivňován především ze strany statického momentu plochy. Statický moment závisí jak na ploše horní a dolní výztuže, tak především na rozložení ploch výztuží vzhledem k těžišti průřezu.

Dále můžeme z grafu na Obr. 3.17 pozorovat strmý pokles průhybu do plochy vyztužení přibližně 1 000 mm², pak průhyb klesá pozvolněji. Z tohoto hlediska můžeme říci, že je pro dosažení nižší hodnoty celkového průhybu vhodné upravit více parametrů návrhu (např. zvolit beton vyšší pevnostní třídy – viz kapitola 3.6.3) a nezvyšovat pouze plochu výztuže. Vzhledem k ceně betonářské výztuže, by se jednalo o neekonomické řešení (tzn. velká finanční investice na úrok malého snížení průhybu konstrukce).

3.6.5 Průhyb konstrukce v závislosti na rozpětí konstrukce

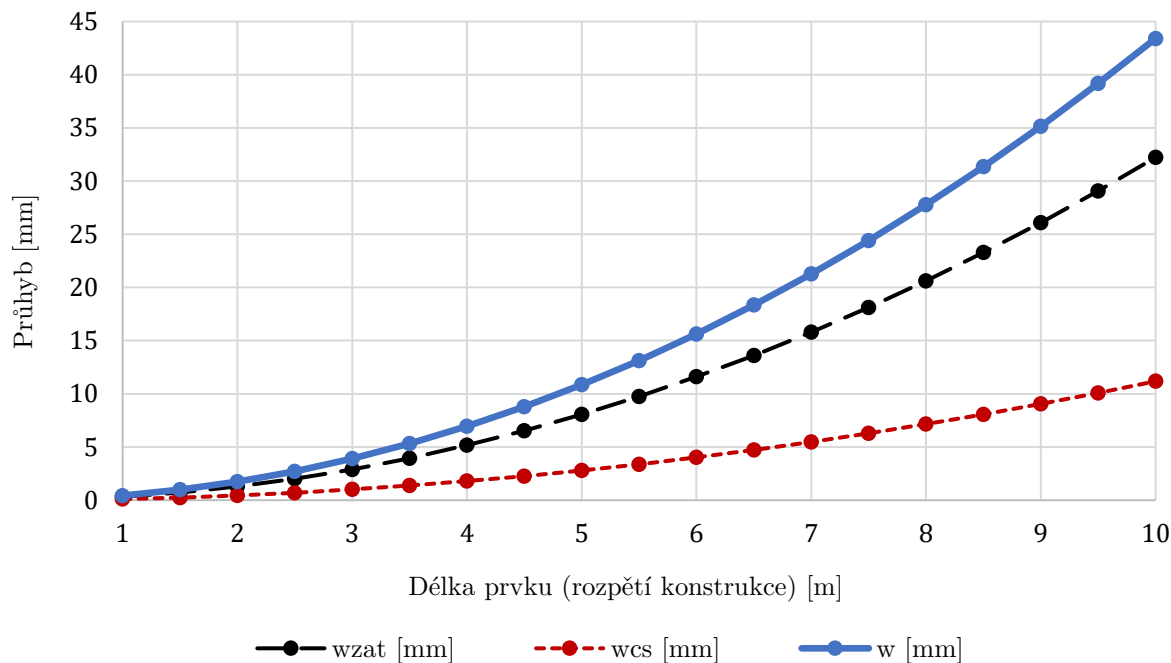
Tato studie zaměřená na oboustranně vyztužený průřez ukazuje, jak se mění celkový průhyb konstrukce „ w “ a jeho složky, tedy průhyb od zatížení „ w_{zat} “ a průhyb od smršťování „ w_{cs} “ v závislosti na rozpětí konstrukce „ L “. Průhyb je určen při konstantní době trvání zatížení 50 let (tzn. $t = \text{konstantní}$).

Průhyby pro jednotlivé hodnoty rozpětí konstrukce jsou uvedeny v [Tab. 3.8](#). Tabulka obsahuje i hodnoty limitních průhybu „ w_{LIM} “, které se odvíjí od podmínky pro kvazi-stálou kombinaci – viz vztah (2.3.58).

Tab. 3.8: Průhyb konstrukce v závislosti na rozpětí konstrukce

L [m]	w_{zat} [mm]	w_{cs} [mm]	w [mm]	w_{LIM} [mm]
1,0	0,32	0,11	0,43	4,00
1,5	0,72	0,25	0,98	6,00
2,0	1,29	0,45	1,74	8,00
2,5	2,01	0,70	2,71	10,00
3,0	2,90	1,01	3,91	12,00
3,5	3,95	1,37	5,32	14,00
4,0	5,16	1,79	6,94	16,00
4,5	6,52	2,26	8,79	18,00
5,0	8,06	2,79	10,85	20,00
5,5	9,75	3,38	13,13	22,00
6,0	11,60	4,02	15,62	24,00
6,5	13,61	4,72	18,34	26,00
7,0	15,79	5,48	21,26	28,00
7,5	18,12	6,29	24,41	30,00
8,0	20,62	7,15	27,77	32,00
8,5	23,28	8,07	31,35	34,00
9,0	26,10	9,05	35,15	36,00
9,5	29,08	10,09	39,17	38,00
10,0	32,22	11,18	43,40	40,00

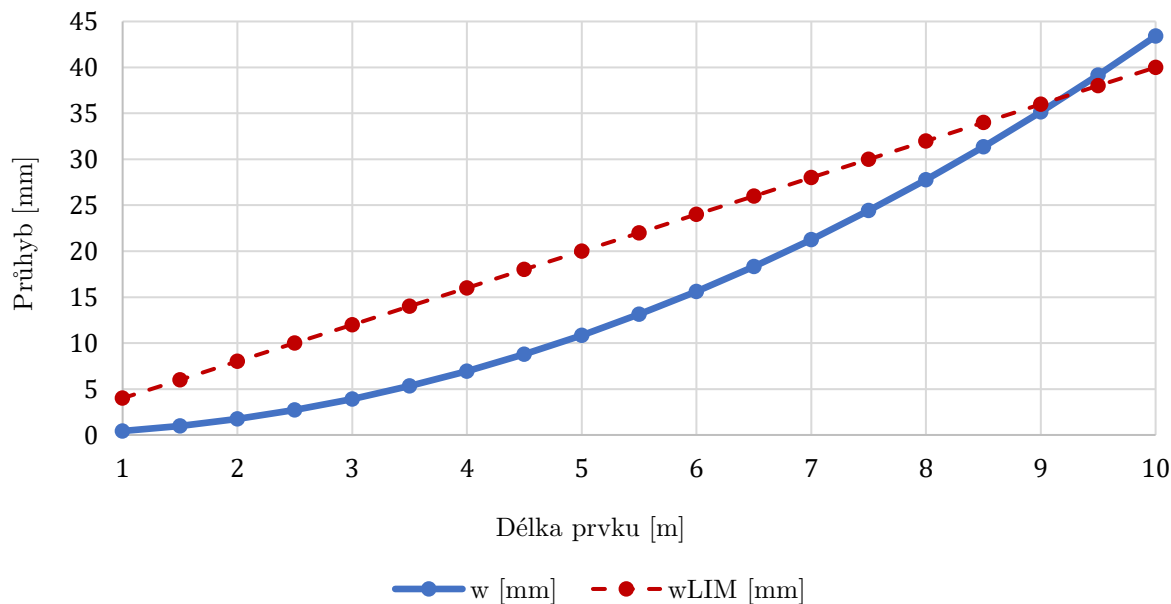
Grafické znázornění závislosti průhybu konstrukce na rozpětí je zobrazeno na [Obr. 3.18](#).



Obr. 3.18: Závislost průhybu na rozpětí konstrukce

Na Obr. 3.18 můžeme pozorovat exponenciální nárůst průhybu při lineárním přírůstku rozpětí. Tento průběh je dán druhou mocninou rozpětí konstrukce ve vztazích (2.3.45) a (2.3.55), pomocí kterých dílčí průhyby počítáme.

Pro tento konkrétní příklad je na Obr. 3.19 ukázán průběh celkového průhybu konstrukce a limitního průhybu pro kvazi-stálou kombinaci zatížení.



Obr. 3.19: Porovnání celkového a limitního průhybu zkoumané konstrukce

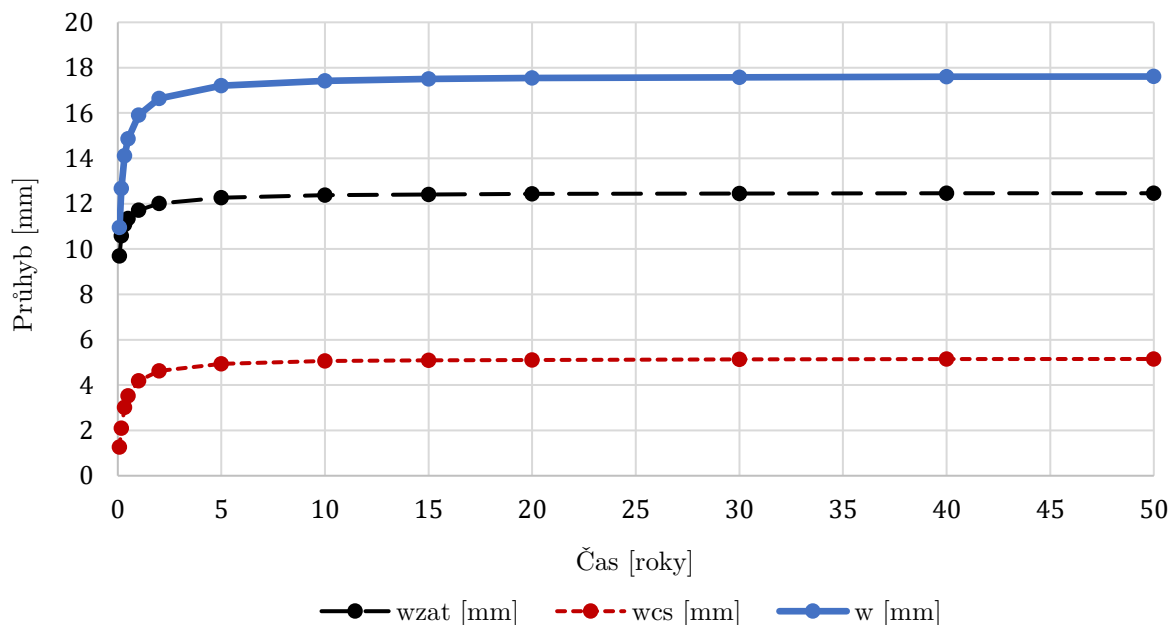
3.6.6 Průhyb jednostranně vyztužené konstrukce v průběhu času

Na úplný závěr je uvedena studie, která ukazuje, jak se mění celkový průhyb jednostranně vyztužené konstrukce „ w “ a jeho složky, tedy průhyb od zatížení „ w_{zat} “ a průhyb od smršťování „ w_{cs} “ v závislosti na době trvání zatížení „ t “. Za dobu trvání zatížení byly dosazeny hodnoty od jednoho měsíce až po 250 let. Všechny časové intervaly jsou převedeny na roky. Hodnoty průhybů od těchto časových intervalů jsou obsaženy v [Tab. 3.9](#).

Tab. 3.9: Průhyb konstrukce v závislosti na době trvání zatížení (jednostranně vyztužený průřez)

t [roky]	w_{zat} [mm]	w_{cs} [mm]	w [mm]
0,083	9,69	1,26	10,95
0,167	10,58	2,10	12,68
0,333	11,08	3,02	14,11
0,5	11,34	3,52	14,86
1	11,71	4,19	15,91
2	12,01	4,63	16,64
5	12,26	4,94	17,21
10	12,37	5,06	17,42
15	12,41	5,09	17,50
20	12,43	5,11	17,54
30	12,45	5,13	17,58
40	12,46	5,14	17,60
50	12,46	5,15	17,61
100	12,48	5,16	17,64
250	12,48	5,17	17,65

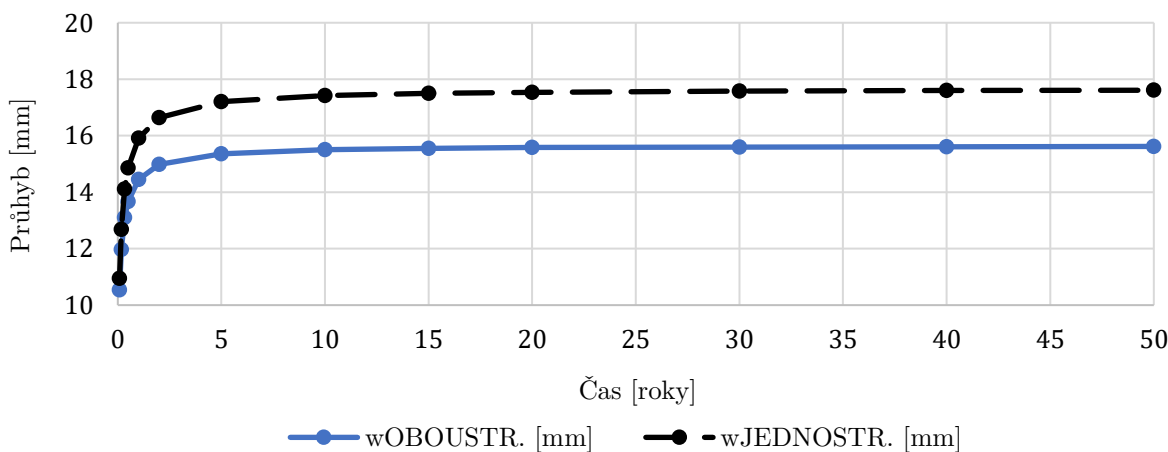
Grafické znázornění závislosti průhybu konstrukce na době trvání zatížení je zobrazeno na [Obr. 3.20](#).



Obr. 3.20: Závislost průhybu konstrukce na době trvání zatížení (jednostranně vyztužený průřez)

Z Obr. 3.20 lze pozorovat rychlý nárůst průhybu v počáteční fázi zatěžování. Od druhého roku se průhyb zvyšuje pouze velmi pozvolně a po více než deseti letech už je nárůst průhybu téměř nulový.

Lze si tedy povšimnout korelací mezi průběhem křivky průhybu pro oboustranně vyztužený průřez (Obr. 3.14) a pro jednostranně vyztužený průřez (Obr. 3.20). Jediným rozdílem je zde fakt, že horní výztuž přispívá ke snížení průhybu konstrukce po celou dobu životnosti konstrukce. Tj. průhyb oboustranně vyztužené konstrukce je nižší než průhyb jednostranně vyztužené konstrukce. Toto tvrzení lze podložit porovnáním příslušných hodnot v Tab. 3.4 pro oboustranně vyztužený průřez a Tab. 3.9 pro jednostranně vyztužený průřez. Pro ilustraci jsou výsledné hodnoty průhybů znázorněny ještě na Obr. 3.21.



Obr. 3.21: Závislost průhybu konstrukce na době trvání zatížení – porovnání průběhu průhybu pro jednostranně a oboustranně vyztužený průřez

4 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo vytvoření počítačového programu pro analýzu průhybů oboustranně vyztužených železobetonových nosníků. Program v sobě má implementovaný postup pro přímý výpočet průhybu. Dílčím cílem bylo popsat vytvořený program, ověřit jeho funkčnost, spolehlivost a využít ho pro konkrétní úlohy. Dalším cílem bylo podrobné popsání výpočtového postupu včetně všech teoretických souvislostí. Posledním cílem byla analýza vlivu vstupních parametrů na velikost průhybu. Všechny stanovené cíle byly splněny.

Hlavní cíl byl naplněn vytvořením programu **MSPruhyb** v programovacím jazyce C#. Vytvořený program je možné použít při přímém výpočtu průhybu pro jednostranně i oboustranně vyztužený prostý nosník obdélníkového průřezu zatížený spojitým rovnoměrným zatížením. Program též umožňuje posouzení průhybu zjednodušenou metodou dle ohybové štíhlosti. Při vypracování programu byl kladen důraz na přehledné uživatelské rozhraní, včetně podrobného popisu proměnných. V teoretické části práce byl zvolený výpočtový postup vysvětlen a podrobně popsán. V praktické části práce byl tento postup nejprve představen pomocí ručního výpočtu, poté byl prezentován ve vytvořeném programu. Dále byla ověřena funkčnost programu na základě porovnání s ručním výpočtem a dalšími programy s podobným zaměřením. V poslední kapitole praktické části pak byla za pomoci parametrických studií ukázána hlavní přednost programu MSPruhyb, a to rychlost a efektivnost výpočtů.

Největší přínos práce spočívá právě ve vytvořeném programu MSPruhyb. Program nevyžaduje nutnost instalace, nevyžaduje instalaci jakýchkoliv pomocných programů či knihoven a díky uživatelsky přívětivému rozhraní ho lze využít jak při výuce, tak při dalších akademických činnostech. Program MSPruhyb může být bezplatně používán za předpokladu nekomerčního využití.

Další přínos spočívá v podrobném popsání výpočtového postupu pro zjištění průhybu se zohledněním mnoha faktorů, které průhyb ovlivňují. Neopomenutelným přínosem je též přehledný popis vlivu vybraných vstupních parametrů na hodnotu průhybu pomocí tabulek a grafů.

Vzhledem k rozmanitosti stavebních konstrukcí existuje prostor pro další práci. V budoucí práci by bylo možné implementovat do programu další tvary průřezů, odlišná statická schémata konstrukcí a přidat možnost zadání kombinace vnitřních sil.

5 Seznam zdrojů

- [1] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [2] PROCHÁZKA, Jaroslav a kol. Navrhování betonových konstrukcí 1. 2., upravené vydání Praha: ČBS Servis, 2006. ISBN 80-903807-1-9.
- [3] KOHOUTKOVÁ, Alena, PROCHÁZKA, Jaroslav, VAŠKOVÁ Jitka. Navrhování železobetonových konstrukcí: Příklady a postupy. Praha: ČVUT, 2014. ISBN 978-80-01-05587-8.
- [4] HOLAN, Jakub. Numerická analýza trhlin železobetonových prvků namáhaných ohybovým momentem a normálovou silou: Bakalářská práce. Fakulta stavební ČVUT, Praha, 2016.
- [5] NEDOMOVÁ, Karolina. Numerická analýza průhybů železobetonových nosníků: Bakalářská práce. Fakulta stavební ČVUT, Praha, 2017.
- [6] NEDOMOVÁ, Karolina. Výpočet průhybu železobetonového nosníku dle ČSN EN 1992-1-1 [software]. Květen 2017 [vid. 30.04.2021]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/software/pruhyb_en/pruhyb_en.cz.html
- [7] TIPKA, Martin. Vymezuující ohybová štíhlost. Výuková pomůcka dostupná z webu katedry betonových a zděných konstrukcí [vid. 13.04.2021]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/~tipkamar/vyuka_soubory/NKPS/pomucky_NKPS_soubory/01_Ohybova_stihlost.pdf
- [8] Microsoft [online]. Dokumentace k jazyku C#: Číselné typy s plovoucí desetinnou čárkou (Referenční dokumentace jazyka C#). [vid. 14.04.2021]. Dostupné z: <https://docs.microsoft.com/cs-cz/dotnet/csharp/language-reference/builtin-types/floating-point-numeric-types>
- [9] Microsoft Corporation. Visual Studio 2017 Community [software]. Březen 2017 [vid. 17.04.2021]. Dostupné z: <https://visualstudio.microsoft.com/cs/vs/older-downloads/>
- [10] Fine spol. s.r.o. FIN EC 2018 Demo [software]. Listopad 2017 [vid. 17.04.2021]. Aktuální verze dostupná z: <https://www.fine.cz/ke-stazeni/demo/#tab-2>

- [11] Graphisoft SE. Graphisoft Archicad 23 EDU [software]. Červen 2019 [vid. 17.04.2021]. Aktuální verze dostupná z:
<https://graphisoft.com/downloads/archicad/updates/archicad-24-update>

Příloha A

Manuál k programu MSPruhyb

A.1 Základní informace k programu MSPruhyb (verze 1.0)

Tato kapitola slouží pro seznámení s funkcemi programu MSPruhyb a popisuje výhradně funkce a rozhraní ve verzi 1.0. Součástí manuálu není poskytnutí informací o kompletním postupu výpočtu. Tento postup je uveden v kapitole 2.2 a 2.3. Stejně tak manuál neobsahuje některá specifika řešení výpočtu v programovacím jazyce C#. Tyto údaje jsou obsaženy v kapitole 3.1.

Program MSPruhyb byl vytvořen ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2017 [9]. Jedná se o typ aplikace Windows Forms napsané v programovacím jazyce C#. Program byl vytvořen primárně pro použití na zařízeních se systémem Windows a byl odzkoušen na operačních systémech Windows 8.1 a Windows 10. Funkčnost na jiných platformách a operačních systémech není ověřena. Pro pohodlné používání programu MSPruhyb je vhodné mít zařízení s displejem o rozlišení alespoň 1920x1080 pixelů a velikostí minimálně 15,6“.

Pro spuštění programu potřebujete pouze spouštěcí soubor „**MSPruhyb_v1.exe**“, který je dostupný na webových stránkách katedry betonových a zděných konstrukcí, konkrétně na osobních stránkách Ing. Jakuba Holana (<https://people.fsv.cvut.cz/~holanjak/software/mspruhyb/>).

Program není potřeba nijak instalovat. Po stažení stačí dvojklikem na „exe“ soubor program otevřít a začít používat. Grafické uživatelské rozhraní je podrobně popsáno v příloze A.2.

A.2 MSPruhyb – grafické uživatelské rozhraní

Program MSPruhyb 1.0 se spustí dvojklikem na spouštěcí soubor „MSPruhyb_v1.exe“. Po spuštění se zobrazí úvodní okno programu MSPruhyb, viz [Obr. A.1](#).



Obr. A.1: Úvodní okno programu MSPruhyb

Úvodní okno obsahuje základní informace o programu a rozcestník. Při najetí myší na jednotlivá tlačítka se vždy zobrazí příslušná nápověda. Uživatel si stisknutím příslušného tlačítka vybere, zda chce pokračovat k zjednodušenému posouzení průhybu dle podmínky ohybové štíhlosti (viz [Obr. A.2](#)), k přímému výpočtu průhybu dle normy [1] (viz [Obr. A.3](#)), k základní nápovědě pro program MSPruhyb (viz [Obr. A.4](#)) nebo si chce zobrazit informace o aplikaci (viz [Obr. A.5](#)). Poslední možností je ukončení programu.

Dále je v horní části programu zobrazen aktuální čas a datum. Ve spodní části je pak vidět verze používaného programu spolu s datem vydání této verze.

A.2.1 Zjednodušené posouzení dle podmínky ohybové štíhlosti

V případě, že uživatel v úvodním okně programu (viz Obr. A.1) zvolí první možnost, tedy zjednodušené posouzení dle podmínky ohybové štíhlosti, zobrazí se mu okno na Obr. A.2.

The screenshot shows a software window titled "λ. Posouzení ohybové štíhlosti". The window has a menu bar with "Soubor", "Kalkulačka", and "Prohlížeč". The main content is titled "POSOUZENÍ OHYBOVÉ ŠTÍHLOSTI". It is divided into two main sections: "Vstupní parametry" (Input parameters) and "Výpočet" (Calculation). The input parameters section includes fields for concrete strength (C 12/15), steel yield strength ($f_{yk} = 500$ MPa), span ($L = 3.2$ m), width ($b = 200$ mm), height ($h = 200$ mm), effective height ($d = 86$ mm), required area ($A_{s,rd} = 300$ mm²), and design area ($A_{s,prov} = 800$ mm²). There are also dropdown menus for "Tvar průřezu" (Rectangular section) and "Typ konstrukce" (Simple beam). The calculation section includes fields for slenderness ratio (λ), shape coefficient (K_{c1}), span coefficient (K_{c2}), stress coefficient (K_{c3}), degree of utilization (ρ %), and limiting slenderness ($\lambda_{d,tab}$ and λ_d). A "VYPOČÍTEJ" button is located at the bottom right, along with a "Návrat do menu" button.

Obr. A.2: Zjednodušené posouzení dle podmínky ohybové štíhlosti

V levé části okna jsou vstupní parametry. Jedná se o žlutá pole, které je nutné vyplnit a o šedé rolovací nabídky, z nichž si vybíráme jednu z možností. V pravé části jsou jednotlivé body výpočtu. Do těchto polí nelze psát a vyplní se po stisknutí tlačítka „VYPOČÍTEJ“. Stejně tak se po stisknutí tohoto tlačítka zobrazí v dolní části posouzení. Pokud prvek nevyhoví, zobrazí se v pravém spodním rohu tlačítko „PŘÍMÝ VÝPOČET PRŮHYBU“, to slouží pro přechod do okna pro přímý výpočet průhybu dle normy [1] (viz Obr. A.3).

V horní části okna se nachází lišta se záložkami. První záložka „Soubor“ obsahuje tři možnosti. Uložení aktuálně vyplněného formuláře (uloží vyplněné hodnoty do textového souboru na místo v počítači, které si uživatel vybere), načtení dříve uloženého formuláře (načte textový soubor z vybraného místa v počítači) nebo vymazání hodnot (vymaže všechny vstupní parametry a výsledky v daném okně). Druhá záložka „Kalkulačka“ otevře kalkulačku systému Windows, ta uživateli umožňuje dopočítat potřebné hodnoty nebo si ověřit část výpočtu. Třetí záložka „Prohlížeč“ otevře výchozí internetový prohlížeč a slouží tak pro rychlé vyhledání potřebných informací.

A.2.2 Přímý výpočet průhybu dle ČSN EN 1992-1-1

Pokud uživatel v úvodním okně programu (viz Obr. A.1) zvolí druhou možnost, otevře se mu okno pro přímý výpočet průhybu dle ČSN EN 1992-1-1 (viz Obr. A.3). Konkrétně jde o postup výpočtu pro prostý nosník obdélníkového průřezu zatížení rovnoměrným spojitým zatížením.

VÝPOČET PRŮHYBU DLE ČSN EN 1992-1-1 - Prostý nosník

Vstupní parametry:

- Charakteristická pevnost betonu v tlaku: $f_{ck} = 25$ MPa
- Charakteristická mez kluzu oceli: $f_{yk} = 500$ MPa
- Modul pružnosti oceli v tahu: $E_s = 200$ GPa
- Délka prvku: $L = 6$ m
- Šířka průřezu (šířka tlačené oblasti): $b = 250$ mm
- Výška průřezu: $h = 500$ mm
- Vzdál. dolní výztuže od dolních vláken: $d_1 = 46$ mm
- Vzdál. horní výztuže od horních vláken: $d_2 = 44$ mm
- Navržená plocha dolní tažené výztuže: $A_{s1} = 804,248$ mm²
- Navržená plocha horní tlačené výztuže: $A_{s2} = 226,195$ mm²
- Moment od kvazistálé kombinace: $M_{qp} = 58,5$ kNm
- Moment od charakteristické kombinace: $M_f = 70$ kNm
- Třída cementu: N
- Relativní vlhkost okolního prostředí: $RH = 50$ %
- Teplota prostředí: $T = 20$ °C
- Uvažovaná životnost konstrukce: $t = 50$ let
- Čas vnesení zatížení: $t_0 = 28$ dní
- Obvod prvku vystavený okolnímu prostředí: $u = 1500$ mm
- Doba ošetřování betonu: $t_s = 7$ dní

Výpočet: část 1 - průřezové charakteristiky:

	1a) okamžité f.St ($\varphi = 0$):	1b) dlouhodobé f.Lt (φ pro $<t_0, t>$):	1c) krátkodobé cs.St (φ pro $<t_s, t_0>$):	1d) dlouhodobé cs.Lt (φ pro $<t_s, t>$):
$\varphi_i =$				
$E_{c,eff,i} =$				
$x_{1,i} =$				
$x_{2,i} =$				
$I_{1,i} =$				
$I_{2,i} =$				
$S_{1,i} =$				
$S_{2,i} =$				
$(EI)_{1,i} =$				
$(EI)_{2,i} =$				

Výpočet: část 2 - průhyb:

	Kvazistálá,St	Kvazistálá,Lt	Charakteristická,St	Charakteristická,Lt
$M_{cr} =$				
$w_{zatižení} =$				
$w_{cs} =$				
$w_{celkem} =$				

Posouzení:

Kvazistálá kombinace:

Charakteristická kombinace:

VYPOČÍTEJ **Návrat do menu**

Obr. A.3: Výpočet průhybu dle ČSN EN 1992-1-1

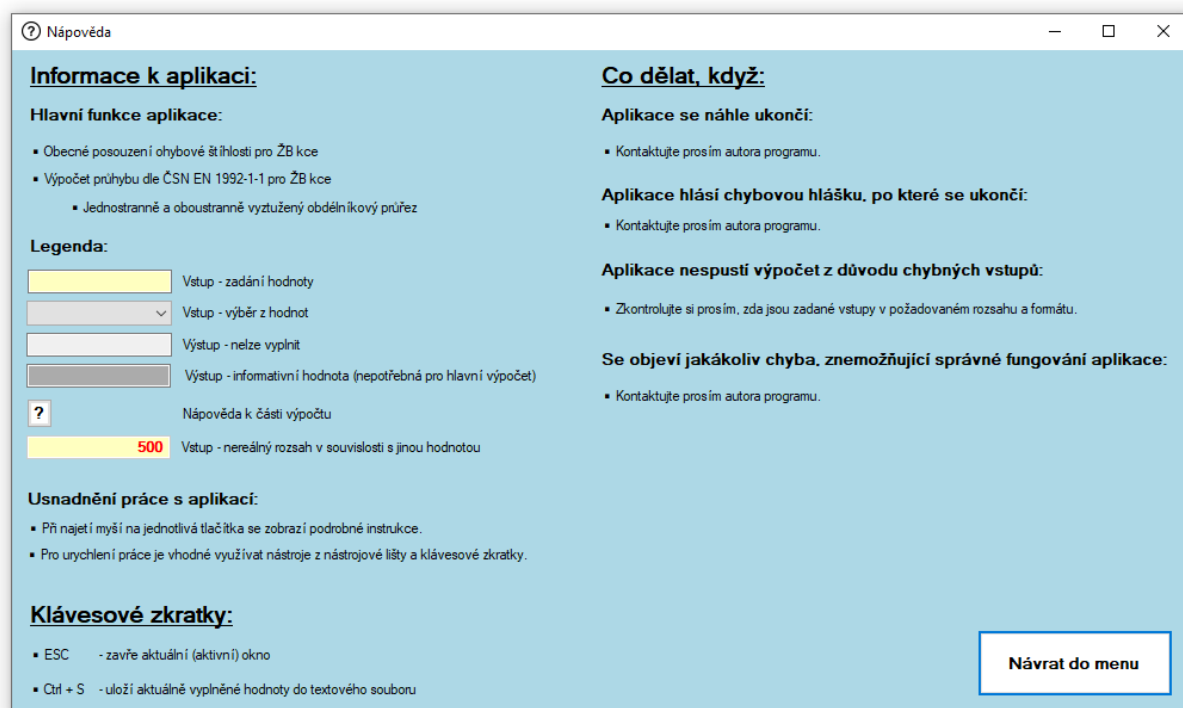
V levé části okna jsou vstupní parametry. Jedná se o žlutá pole, které je nutné vyplnit a o šedou rolovací nabídku, ze které si vybereme třídu cementu. V pravé části jsou jednotlivé body výpočtu. Do těchto polí nelze psát a vyplní se po stisknutí tlačítka „VYPOČÍTEJ“. Stejně tak se po stisknutí tohoto tlačítka zobrazí v dolní části posouzení pro obě zadané kombinace. Jak pro vstupní parametry, tak pro výpočet si můžeme zobrazit nápovědu, více viz příloha A.2.3.

Ke každé části výpočtu je dostupný podrobný postup výpočtu. Tento podrobný postup vždy obsahuje podrobnější popis vybrané části výpočtu, včetně výpisu použitých vzorců. Více o podrobných výpočtech viz příloha A.2.4.

V horní části okna se nachází lišta se záložkami. Tyto záložky jsou totožné se záložkami popsanými v příloze A.2.1.

A.2.3 Náповědy a informace o programu

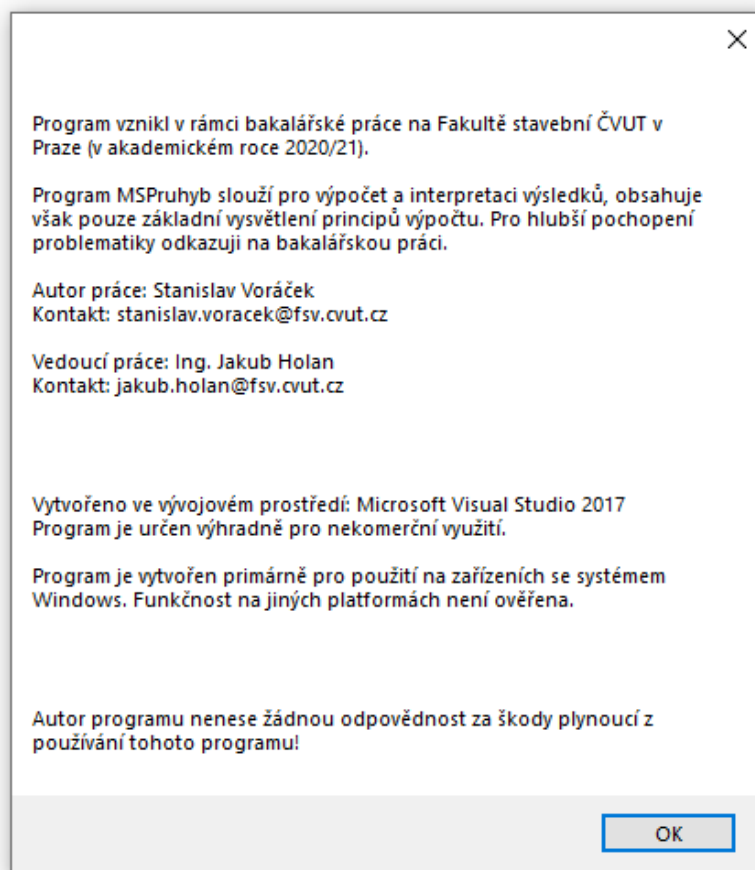
Třetí tlačítko z nabídky v úvodním okně otevře nápovědu, nejedná se však o nápovědu k výpočtu, ale jde o nápovědu k používání programu MSPruhyb, viz Obr. A.4.



Obr. A.4: Nápověda k celému programu MSPruhyb

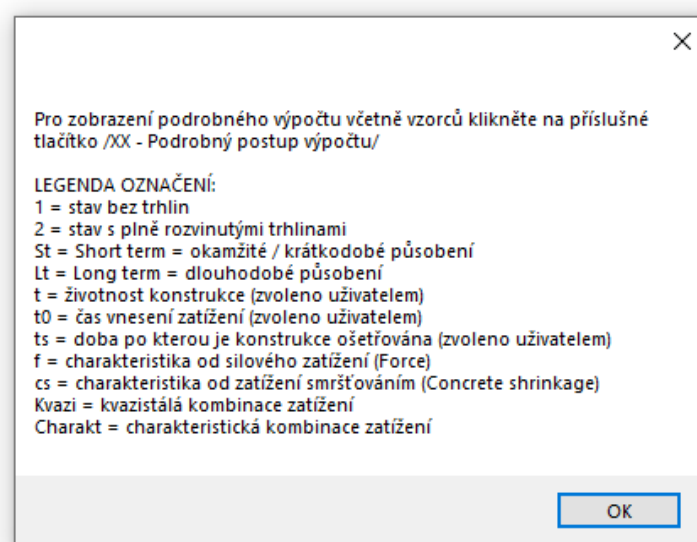
Nápověda obsahuje základní informace o funkcích programu, včetně legendy. Představuje klávesové zkratky, které usnadní ovládání programu. Též obsahuje krátký výčet možností, co dělat, pokud program z nějakého důvodu nefunguje správně.

Pod hlavní nabídkou se dále nachází tlačítko „O aplikaci“, po kliknutí se otevře okno se základními informacemi o programu. Tyto informace mimo jiné obsahují kontakt na autory programu (viz Obr. A.5).



Obr. A.5: Základní informace o programu MSPruhyb

Dále program obsahuje nápovědu pro vstupní parametry (viz Obr. A.7), zde jsou doplněny některé informace, které by na první pohled nemusely být zcela zřejmé. Přímý výpočet je doplněn o informační nápovědu k použitému značení proměnných (viz Obr. A.6).



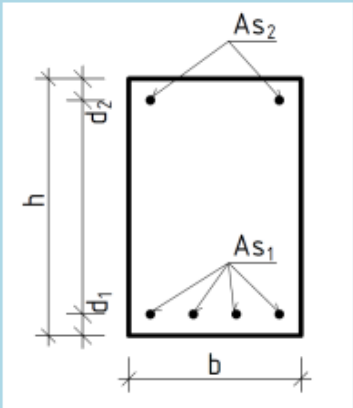
Obr. A.6: Nápověda – legenda značení pro přímý výpočet průhybu

Nápověda - vstupní parametry

Obecné informace pro zadání vstupů do výpočtu:

- Všechny hodnoty zadávejte s desetinnou čárkou, nikoliv s desetinnou tečkou.

Grafický význam vybraných vstupních parametrů:



Normová omezení vstupních hodnot u vybraných proměnných:

- Relativní vlhkost okolního prostředí
 - Lze zadávat hodnoty od 0 do 100%
- Teplota prostředí
 - Lze zadávat hodnoty od 0°C do 80°C (viz norma ČSN EN 1992-1-1, příloha B)
- Čas vnesení zatížení
 - Lze zadávat hodnoty od 0,5 dne (viz norma ČSN EN 1992-1-1, příloha B)

Dovysvětlení vybraných proměnných:

- Moment od charakteristické kombinace
 - Lze dosadit jakoukoliv hodnotu, pro kterou chceme zjistit průhyb a zároveň mít číselné porovnání výpočtu pro tento moment a pro moment od kvazistálé kombinace (normová podmínka).
- Uvažovaná životnost konstrukce
 - Ve výpočtu uvažována jako čas pro dlouhodobé působení zatížení

Zpět na hlavní stránku výpočtu

Obr. A.7: Nápověda – vstupní parametry pro přímý výpočet průhybu

Program obsahuje několik dalších nápověd, které se vážou například k zadaným hodnotám nebo poskytnutým výsledkům. Tyto nápovědy jsou často informačního charakteru a slouží pro upřesnění některých upozornění. Více viz příloha A.2.5.

A.2.4 Podrobné výpočty

V příloze A.2.2 jsme si představili okno hlavního výpočtu pro přímý výpočet průhybu dle normy [1]. V hlavním okně je na první pohled vidět celý výpočet, avšak jednotlivé proměnné zde nejsou blíže popsány a okno tak slouží jako rychlý přehled pro uživatele, kteří už jsou s programem seznámeni.

Tato kapitola popisuje vedlejší okna pro podrobné postupy výpočtu. Tyto zpřesňující okna slouží pro lepší pochopení jednotlivých částí výpočtu. Obsahují jmenovitý popis proměnných. Dále je možné si pomocí tlačítka „Výpis použitých vzorců“ zobrazit vzorce použité pro výpočet proměnných uvedených v daném okně (viz Obr. A.16).

Na Obr. A.8 až Obr. A.11 jsou vidět okna pro výpočet součinitelů dotvarování a průřezových charakteristik pro jednotlivé časové intervaly (viz popisy obrázků).

Na Obr. A.12 až Obr. A.15 jsou okna, která zobrazují charakteristiky potřebné pro výpočet průhybu a též i samotný výpočet průhybu pro jednotlivé kombinace zatížení a jejich délku trvání (viz popisy obrázků).

Podrobný postup výpočtu - f,St

Výpočet (f,St) - průřezové charakteristiky v okamžiku silového zatížení <t0>

Průřezové charakteristiky:

Součinitel dotvarování - okamžitý:	$\Phi_{f, St} =$ <input type="text"/>
Krátkodobý modul pružnosti betonu:	$E_{c, eff, St} =$ <input type="text"/> MPa
Poměr modulů pružnosti:	$\alpha_{e, St} =$ <input type="text"/>
Plocha ideálního průřezu:	$A_{1, St} =$ <input type="text"/> m ²
Výška tlačené oblasti (průřez bez trhlin):	$x_{1, St} =$ <input type="text"/> m
Výška tlačené oblasti (průřez s plně rozvinutými trhlinami):	$x_{2, St} =$ <input type="text"/> m
Moment setrvačnosti (průřez bez trhlin):	$I_{1, St} =$ <input type="text"/> m ⁴
Moment setrvačnosti (průřez s plně rozvinutými trhlinami):	$I_{2, St} =$ <input type="text"/> m ⁴
Ohybová tuhost (průřez bez trhlin):	$(EI)_{1, St} =$ <input type="text"/> kNm ²
Ohybová tuhost (průřez s plně rozvinutými trhlinami):	$(EI)_{2, St} =$ <input type="text"/> kNm ²
Ohybová poddajnost (průřez bez trhlin):	$C_{1, St} =$ <input type="text"/> 10 ⁻⁶ /kNm ²
Ohybová poddajnost (průřez s plně rozvinutými trhlinami):	$C_{2, St} =$ <input type="text"/> 10 ⁻⁶ /kNm ²

Obr. A.8: Podrobný výpočet – průřezové charakteristiky v okamžiku silového zatížení <t0>

Podrobný postup výpočtu - f,LT

Výpočet (f,LT) - průřezové charakteristiky pro dlouhodobé silové zatížení <t0,t>

Součinitel dotvarování (smrštění):

Stáří betonu upravené podle vlivu teploty a cementu: $t_{0,CEMT} =$ dne

Náhradní rozměr prvku: $h_0 =$ mm

Součinitel závislý na relativní vlhkosti: $\beta_H =$

Součinitel vystihující vliv stáří betonu: $\beta_{t0} =$

Součinitel vystihující vliv pevnosti betonu: $\beta_{fcm} =$

Součinitel dotvarování vystihující vliv vlhkosti: $\varphi_{RH} =$

Součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení: $\beta_{ci(t,t_0)} =$

Základní součinitel dotvarování: $\varphi_0 =$

Součinitel dotvarování - dlouhodobý: $\Psi_{f,LT} =$

Průřezové charakteristiky:

Dlouhodobý modul pružnosti betonu: $E_{c,eff,LT} =$ MPa

Poměr modulů pružnosti: $\alpha_{e,LT} =$

Plocha ideálního průřezu: $A_{1,LT} =$ m²

Výška tlačené oblasti (průřez bez trhlín): $x_{1,LT} =$ m

Výška tlačené oblasti (průřez s plně rozvinutými trhlínami): $x_{2,LT} =$ m

Moment setrvačnosti (průřez bez trhlín): $I_{1,LT} =$ m⁴

Moment setrvačnosti (průřez s plně rozvinutými trhlínami): $I_{2,LT} =$ m⁴

Ohybová tuhost (průřez bez trhlín): $(EI)_{1,LT} =$ kNm²

Ohybová tuhost (průřez s plně rozvinutými trhlínami): $(EI)_{2,LT} =$ kNm²

Ohybová poddajnost (průřez bez trhlín): $C_{1,LT} =$ 10⁻⁶/kNm²

Ohybová poddajnost (průřez s plně rozvinutými trhlínami): $C_{2,LT} =$ 10⁻⁶/kNm²

Výpis použitých vzorců Zpět na hlavní stránku výpočtu

Obr. A.9: Podrobný výpočet – průřezové charakteristiky pro dlouhodobé silové zatížení <t0,t>

Podrobný postup výpočtu - cs,ST

Výpočet (cs,St) - průřezové charakteristiky pro krátkodobé zatížení smršťováním <ts,t0>

Součinitel dotvarování (smršťování):

Stáří betonu "ts" upravené podle vlivu teploty a cementu: $t_{s,CEMT} =$ dne

Náhradní rozměr prvku: $h_0 =$ mm

Součinitel závislý na relativní vlhkosti: $\beta_H =$

Součinitel vystihující vliv stáří betonu: $\beta_{ts} =$

Součinitel vystihující vliv pevnosti betonu: $\beta_{fcm} =$

Součinitel dotvarování vystihující vliv vlhkosti: $\varphi_{RH} =$

Součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení: $\beta_{ci(t0,ts)} =$

Základní součinitel dotvarování: $\varphi_0 =$

Součinitel dotvarování pro smršťování - krátkodobý: $\Psi_{cs,St} =$

Charakteristiky průřezu pro smršťování:

Krátkodobý modul pružnosti betonu: $E_{c,eff,cs} =$ MPa

Poměr modulů pružnosti: $\alpha_{e,cs} =$

Plocha ideálního průřezu: $A_{1,cs} =$ m²

Vzdálenost těžiště ideálního průřezu od horního okraje: $x_{1,cs} =$ m

Vzdálenost neutrální osy od tlačeného okraje (průřez s trhlínami): $x_{2,cs} =$ m

Statický moment průřezové plochy výtzuže k těžišti průřezu: $S_{1,cs} =$ m³

Statický moment průřezové plochy výtzuže pro průřez s trhlínami: $S_{2,cs} =$ m³

Moment setrvačnosti (průřez bez trhlín): $I_{1,cs} =$ m⁴

Moment setrvačnosti (průřez s plně rozvinutými trhlínami): $I_{2,cs} =$ m⁴

Výpis použitých vzorců Zpět na hlavní stránku výpočtu

Obr. A.10: Podrobný výpočet – průřezové charakteristiky pro krátkodobé zatížení smršťováním <ts,t0>

Podrobný postup výpočtu - cs,LT

Výpočet (cs,LT) - průřezové charakteristiky pro dlouhodobé zatížení smršťováním <ts,t>

Součinitel dotvarování (smršťování):

Stáří betonu "ts" upravené podle vlivu teploty a cementu: $t_{s,CEMT} =$ dne

Náhradní rozměr prvku: $h_0 =$ mm

Součinitel závislý na relativní vlhkosti: $\beta_H =$

Součinitel vystihující vliv stáří betonu: $\beta_{ts} =$

Součinitel vystihující vliv pevnosti betonu: $\beta_{fcm} =$

Součinitel dotvarování vystihující vliv vlhkosti: $\varphi_{RH} =$

Součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení: $\beta_{ci(t,ts)} =$

Základní součinitel dotvarování: $\varphi_0 =$

Součinitel dotvarování pro smršťování - dlouhodobý: $\Psi_{cs,LT} =$

Charakteristiky průřezu pro smršťování:

Dlouhodobý modul pružnosti betonu: $E_{c,eff,cs} =$ MPa

Poměr modulů pružnosti: $\alpha_{e,cs} =$

Plocha ideálního průřezu: $A_{1,cs} =$ m²

Vzdálenost těžiště ideálního průřezu od horního okraje: $x_{1,cs} =$ m

Vzdálenost neutrální osy od tlačeného okraje (průřez s trhlínami): $x_{2,cs} =$ m

Statický moment průřezové plochy výtzuže k těžišti průřezu: $S_{1,cs} =$ m³

Statický moment průřezové plochy výtzuže pro průřez s trhlínami: $S_{2,cs} =$ m³

Moment setrvačnosti (průřez bez trhlín): $I_{1,cs} =$ m⁴

Moment setrvačnosti (průřez s plně rozvinutými trhlínami): $I_{2,cs} =$ m⁴

Výpis použitých vzorců Zpět na hlavní stránku výpočtu

Obr. A.11: Podrobný výpočet – průřezové charakteristiky pro dlouhodobé zatížení smršťováním <ts,t>

Podrobný postup výpočtu - kvazi,ST

Výpočet krátkodobého průhybu od kvazistálé kombinace zatížení (kvazi,St) a od smršťování (cs,St):

Charakteristiky pro výpočet průhybu:

Moment od kombinace zatížení: $M_e =$ kNm

Moment na mezi vzniku trhliny: $M_{cr} =$ kNm

Moment na mezi MSP: $M_{max} =$ kNm

Poměrné autogenní smršťování v průběhu času: $\epsilon_{ca}(t) =$

Poměrné smršťování vysycháním v průběhu času: $\epsilon_{cd}(t) =$

Celkové poměrné smršťování: $\epsilon_{cs} =$

Ohybová tuhost (průřez bez trhlín): $(EI)_{1,St} =$ kNm²

Ohybová tuhost (průřez s plně rozvinutými trhlínami): $(EI)_{2,St} =$ kNm²

Statický moment průřezové plochy výtuzže k těžišti průřezu: $S_{1,cs} =$ m³

Statický moment průřezové plochy výtuzže pro průřez s trhlínami: $S_{2,cs} =$ m³

Moment setrvačnosti (průřez bez trhlín): $I_{1,cs} =$ m⁴

Moment setrvačnosti (průřez s plně rozvinutými trhlínami): $I_{2,cs} =$ m⁴

Průhyb od silového zatížení:

Míra spolupůsobení betonu mezi trhlínami: $\zeta_{zatížení} =$

Křivost od silového zatížení: $1/r_{zatížení} =$ m⁻¹

Průhyb od silového zatížení: $w_{zatížení} =$ mm

Průhyb od smršťování:

Míra spolupůsobení betonu mezi trhlínami: $\zeta_{cs} =$

Křivost od smršťování: $1/r_{cs} =$ m⁻¹

Průhyb od smršťování: $w_{cs} =$ mm

Celkový průhyb:

Celkový průhyb: $w_{celkem} =$ mm

Zobrazit výpis použitých vzorců Zpět na hlavní stránku výpočtu

Obr. A.12: Podrobný výpočet – krátkodobý průhyb od kvazi-stálé kombinace zatížení a od smršťování

Podrobný postup výpočtu - kvazi,LT

Výpočet dlouhodobého průhybu od kvazistálé kombinace zatížení (kvazi,Lt) a od smršťování (cs,Lt):

Charakteristiky pro výpočet průhybu:

Moment od kombinace zatížení: $M_e =$ kNm

Moment na mezi vzniku trhliny: $M_{cr} =$ kNm

Moment na mezi MSP: $M_{max} =$ kNm

Poměrné autogenní smršťování v průběhu času: $\epsilon_{ca}(t) =$

Poměrné smršťování vysycháním v průběhu času: $\epsilon_{cd}(t) =$

Celkové poměrné smršťování: $\epsilon_{cs} =$

Ohybová tuhost (průřez bez trhlín): $(EI)_{1,St} =$ kNm²

Ohybová tuhost (průřez s plně rozvinutými trhlínami): $(EI)_{2,St} =$ kNm²

Statický moment průřezové plochy výtuzže k těžišti průřezu: $S_{1,cs} =$ m³

Statický moment průřezové plochy výtuzže pro průřez s trhlínami: $S_{2,cs} =$ m³

Moment setrvačnosti (průřez bez trhlín): $I_{1,cs} =$ m⁴

Moment setrvačnosti (průřez s plně rozvinutými trhlínami): $I_{2,cs} =$ m⁴

Průhyb od silového zatížení:

Míra spolupůsobení betonu mezi trhlínami: $\zeta_{zatížení} =$

Křivost od silového zatížení: $1/r_{zatížení} =$ m⁻¹

Průhyb od silového zatížení: $w_{zatížení} =$ mm

Průhyb od smršťování:

Míra spolupůsobení betonu mezi trhlínami: $\zeta_{cs} =$

Křivost od smršťování: $1/r_{cs} =$ m⁻¹

Průhyb od smršťování: $w_{cs} =$ mm

Celkový průhyb:

Celkový průhyb: $w_{celkem} =$ mm

Výpis použitých vzorců Zpět na hlavní stránku výpočtu

Obr. A.13: Podrobný výpočet – dlouhodobý průhyb od kvazi-stálé kombinace zatížení a od smršťování

Podrobný postup výpočtu - charakt,ST

Výpočet krátkodobého průhybu od charakteristické kombinace zatížení (charakt,St) a od smršťování (cs,St):

Charakteristiky pro výpočet průhybu:

Moment od kombinace zatížení: $M_e =$ kNm

Moment na mezi vzniku trhliny: $M_{cr} =$ kNm

Moment na mezi MSP: $M_{max} =$ kNm

Poměrné autogenní smršťování v průběhu času: $\epsilon_{ca}(t) =$

Poměrné smršťování vysycháním v průběhu času: $\epsilon_{cd}(t) =$

Celkové poměrné smršťování: $\epsilon_{cs} =$

Ohybová tuhost (průřez bez trhlín): $(EI)_{1,St} =$ kNm²

Ohybová tuhost (průřez s plně rozvinutými trhlínami): $(EI)_{2,St} =$ kNm²

Statický moment průřezové plochy výtuzže k těžišti průřezu: $S_{1,cs} =$ m³

Statický moment průřezové plochy výtuzže pro průřez s trhlínami: $S_{2,cs} =$ m³

Moment setrvačnosti (průřez bez trhlín): $I_{1,cs} =$ m⁴

Moment setrvačnosti (průřez s plně rozvinutými trhlínami): $I_{2,cs} =$ m⁴

Průhyb od silového zatížení:

Míra spolupůsobení betonu mezi trhlínami: $\zeta_{zatížení} =$

Křivost od silového zatížení: $1/r_{zatížení} =$ m⁻¹

Průhyb od silového zatížení: $w_{zatížení} =$ mm

Průhyb od smršťování:

Míra spolupůsobení betonu mezi trhlínami: $\zeta_{cs} =$

Křivost od smršťování: $1/r_{cs} =$ m⁻¹

Průhyb od smršťování: $w_{cs} =$ mm

Celkový průhyb:

Celkový průhyb: $w_{celkem} =$ mm

Výpis použitých vzorců Zpět na hlavní stránku výpočtu

Obr. A.14: Podrobný výpočet – krátkodobý průhyb od charakteristické kombinace zatížení a od smršťování

Podrobný postup výpočtu - charakt,LT

Výpočet dlouhodobého průhybu od charakteristické kombinace zatížení (charakt,LT) a od smršťování (cs,LT):

Charakteristiky pro výpočet průhybu:

Moment od kombinace zatížení: $M_e =$ kNm

Moment na mezi vzniku trhliny: $M_{cr} =$ kNm

Moment na mezi MSP: $M_{max} =$ kNm

Poměrné autogenní smršťování v průběhu času: $\epsilon_{ca}(t) =$

Poměrné smršťování vysycháním v průběhu času: $\epsilon_{cd}(t) =$

Celkové poměrné smršťování: $\epsilon_{cs} =$

Ohybová tuhost (průřez bez trhlín): $(EI)_{1, S} =$ kNm²

Ohybová tuhost (průřez s plně rozvinutými trhlínami): $(EI)_{2, S} =$ kNm²

Statický moment průřezové plochy výtuzě k těžišti průřezu: $S_{1, cs} =$ m³

Statický moment průřezové plochy výtuzě pro průřez s trhlínami: $S_{2, cs} =$ m³

Moment setrvačnosti (průřez bez trhlín): $I_{1, cs} =$ m⁴

Moment setrvačnosti (průřez s plně rozvinutými trhlínami): $I_{2, cs} =$ m⁴

Průhyb od silového zatížení:

Míra spolupůsobení betonu mezi trhlínami: $\zeta_{zatížení} =$

Křivost od silového zatížení: $1/r_{zatížení} =$ m⁻¹

Průhyb od silového zatížení: $w_{zatížení} =$ mm

Průhyb od smršťování:

Míra spolupůsobení betonu mezi trhlínami: $\zeta_{cs} =$

Křivost od smršťování: $1/r_{cs} =$ m⁻¹

Průhyb od smršťování: $w_{cs} =$ mm

Celkový průhyb:

Celkový průhyb: $w_{celkem} =$ mm

Výpis použitých vzorců Zpět na hlavní stránku výpočtu

Obr. A.15: Podrobný výpočet – dlouhodobý průhyb od charakteristické kombinace zatížení a od smršťování

Přehled použitých vzorců pro vybranou část výpočtu

Následující výpis obsahuje vzorce bez vysvětlení jednotlivých proměnných. Pro pochopení souvislostí viz bakalářská práce autora programu. V pravé části je vždy uvedeno číslo vzorce, pod kterým lze vzorec nalézt v bakalářské práci.

Účinný modul pružnosti betonu:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(t, t_0)} \quad (2.3.18)$$

Poměr modulů pružnosti:

$$\alpha_e = E_s / E_{c,eff} \quad (2.3.19)$$

Plocha ideálního průřezu:

$$A_1 = A_c + \alpha_e \cdot (A_{S1} + A_{S2}) \quad (2.3.20)$$

Vzdálenost tlačené oblasti ideálního průřezu:

$$x_1 = \frac{A_c \cdot a_c + \alpha_e \cdot (A_{S1} \cdot d + A_{S2} \cdot d_2)}{A_1} \quad (2.3.21)$$

Výška tlačené oblasti průřezu s plně rozvinutými trhlínami:

$$x_2 = \frac{\alpha_e}{b} \cdot (A_{S1} + A_{S2}) + \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot b}{\alpha_e} \cdot \frac{(A_{S1} \cdot d + A_{S2} \cdot d_2)}{(A_{S1} + A_{S2})^2}} \right] \quad (2.3.29)$$

Moment setrvačnosti průřezu bez trhlín:

$$I_1 = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + A_c \cdot (x_1 - a_c)^2 + \alpha_e \cdot [A_{S1} \cdot (d - x_1)^2 + A_{S2} \cdot (d_2 - x_1)^2] \quad (2.3.22)$$

Moment setrvačnosti průřezu s plně rozvinutými trhlínami:

$$I_2 = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x_2^3 + \alpha_e \cdot [A_{S1} \cdot (d - x_2)^2 + A_{S2} \cdot (d_2 - x_2)^2] \quad (2.3.30b)$$

Statický moment průřezové plochy výtuzě k těžišti průřezu:

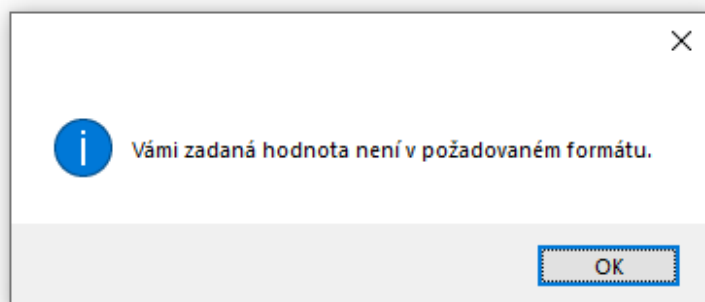
$$S = A_c \cdot (d - x_1) + A_{S1} \cdot (d - x_1) + A_{S2} \cdot (d_2 - x_1) \quad (2.3.23)$$

Zavřít náhled vzorců

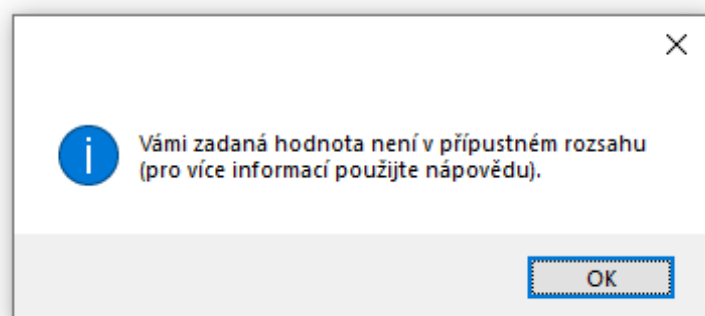
Obr. A.16: Podrobný výpočet „f,St“ – přehled použitých vzorců pro vybranou část výpočtu

A.2.5 Upozornění a informační oznámení

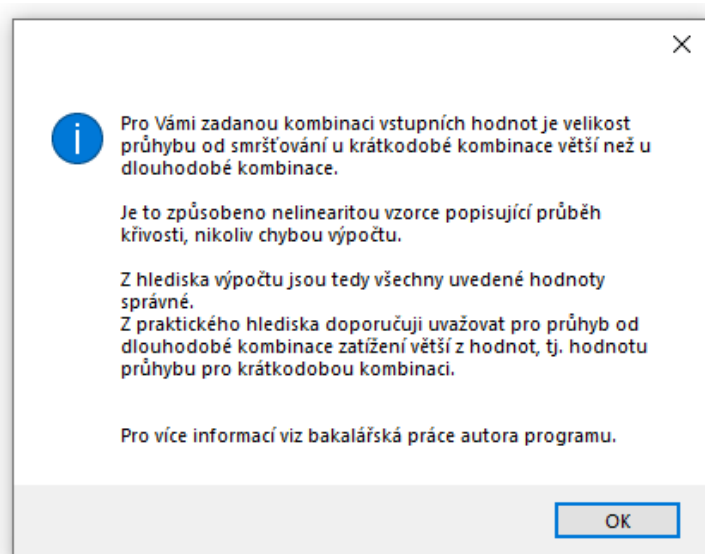
Program MSPruhyb obsahuje celou řadu kontrol, které zajišťují správný průběh výpočtu a případně informují uživatele programu o nastalých situacích. Tyto zprávy lze rozdělit do několika kategorií. První z nich je informační zpráva, která uživatele informuje např. o chybně zadaných vstupech (chybný formát, hodnota mimo rozsah apod.) nebo uživateli přibližuje část výpočtu pomocí dalších podrobností. Příklady těchto zpráv jsou uvedeny na Obr. A.17 až Obr. A.19.



Obr. A.17: Informační zpráva – chybně zadaný vstup

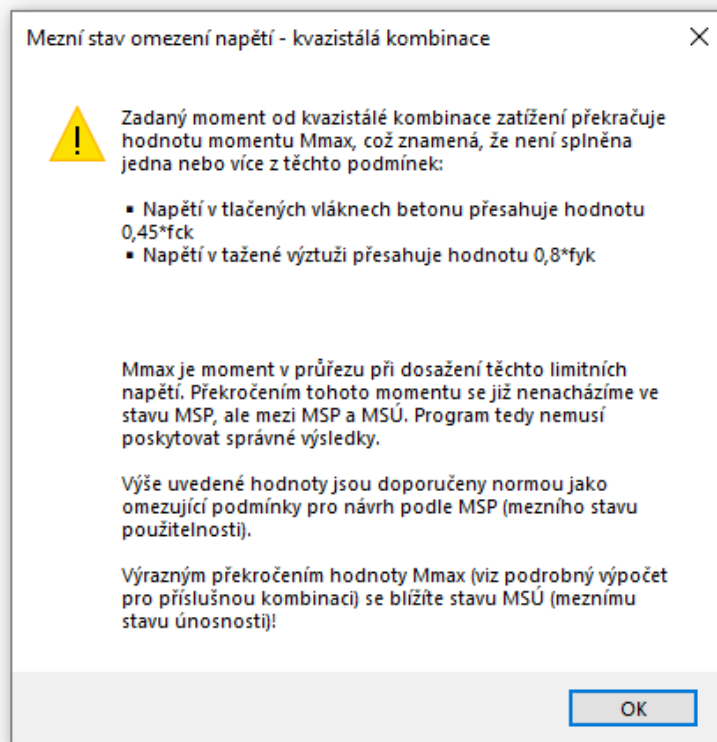


Obr. A.18: Informační zpráva – vstupní hodnota mimo přípustný rozsah



Obr. A.19: Informační zpráva – nelinearita ve výpočtu

Dalším typem jsou varovné zprávy, ty uživatele varují před možným problémem nebo ho upozorňují na překročení limitních hodnot. Pro ukázkou je vybrána varovná zpráva o překročení mezního stavu omezení napětí (viz Obr. A.20). Specifika tohoto problému jsou vysvětlena v kapitole 2.3.5.



Obr. A.20: Varovná zpráva – překročení mezního stavu omezení napětí u kvazi-stálé kombinace

V programu se objevují i další oznámení kromě názorně představených. Jedná se buď o obdobná oznámení nebo o oznámení, u kterých je na první pohled patrný jejich význam

Příloha B

Tabulkové hodnoty vymežující ohybové štíhlosti

Následující tabulky (viz Obr. B.1) jsou převzaty ze stránek katedry betonových a zděných konstrukcí [7] a slouží pro určení tabulkové hodnoty vymežující ohybové štíhlosti. Tabulky vychází ze vztahů uvedených v normě [1], konkrétně z postupu popsaného v kapitole normy 7.4.2.

$\lambda_{d,tab}$ pro prosté nosníky a různé třídy betonu

ρ [%]	Pevnostní třída betonu								
	C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60
0,5	14,6	15,8	17,0	18,5	20,5	23,0	25,8	28,8	32,0
1,5	12,2	12,6	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	15,5	16,0

$\lambda_{d,tab}$ pro krajní pole spojitého nosníku a různé třídy betonu

ρ [%]	Pevnostní třída betonu								
	C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60
0,5	19,0	20,5	22,1	24,1	26,7	29,9	33,5	37,4	41,6
1,5	15,9	16,4	16,9	17,6	18,2	18,9	19,5	20,2	20,8

$\lambda_{d,tab}$ pro vnitřní pole spojitého nosníku a různé třídy betonu

ρ [%]	Pevnostní třída betonu								
	C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60
0,5	21,9	23,7	25,5	27,8	30,8	34,5	38,6	43,2	48,0
1,5	18,3	18,9	19,5	20,3	21,0	21,8	22,5	23,3	24,0

$\lambda_{d,tab}$ pro lokálně podepřenou desku a různé třídy betonu

ρ [%]	Pevnostní třída betonu								
	C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60
0,5	17,5	19,0	20,4	22,2	24,6	27,6	30,9	34,5	38,4
1,5	14,6	15,1	15,6	16,2	16,8	17,4	18,0	18,6	19,2

$\lambda_{d,tab}$ pro konzoly a různé třídy betonu

ρ [%]	Pevnostní třída betonu								
	C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60
0,5	5,8	6,3	6,8	7,4	8,2	9,2	10,3	11,5	12,8
1,5	4,9	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4

Obr. B.1: Tabulkové hodnoty vymežující ohybové štíhlosti

Příloha C

Vzorový příklad – jednostranně vyztužený průřez

C.1 MSPruhyb – jednostranně vyztužený průřez

Tato kapitola obsahuje ukázkou přímého výpočtu průhybu pro jednostranně vyztužený průřez ve vytvořeném programu MSPruhyb. Ukázkou výpočtu slouží pro porovnání s příkladem z výpočetní pomůcky [6] (více viz 3.5.3).

Na Obr. C.1 jsou vidět vstupní parametry pro přímý výpočet průhybu.

Vstupní parametry: ?	
Charakteristická pevnost betonu v tlaku:	$f_{ck} =$ <input type="text" value="25"/> MPa
Charakteristická mez kluzu oceli:	$f_{yk} =$ <input type="text" value="500"/> MPa
Modul pružnosti oceli v tahu:	$E_s =$ <input type="text" value="200"/> GPa
Délka prvku:	$L =$ <input type="text" value="6"/> m
Šířka průřezu (šířka tlačené oblasti):	$b =$ <input type="text" value="250"/> mm
Výška průřezu:	$h =$ <input type="text" value="500"/> mm
Vzdál. dolní výztuže od dolních vláken:	$d_1 =$ <input type="text" value="46"/> mm
Vzdál. horní výztuže od horních vláken:	$d_2 =$ <input type="text" value="0"/> mm
Navržená plocha dolní tažené výztuže:	$A_{S1} =$ <input type="text" value="804,248"/> mm ²
Navržená plocha horní tlačené výztuže:	$A_{S2} =$ <input type="text" value="0"/> mm ²
Moment od kvazistálé kombinace	$M_{qp} =$ <input type="text" value="58,5"/> kNm
Moment od charakteristické kombinace:	$M_f =$ <input type="text" value="81"/> kNm
Třída cementu:	<input type="text" value="N"/> ▾
Relativní vlhkost okolního prostředí:	$RH =$ <input type="text" value="50"/> %
Teplota prostředí:	$T =$ <input type="text" value="20"/> °C
Uvažovaná životnost konstrukce:	$t =$ <input type="text" value="50"/> let
Čas vnesení zatížení:	$t_0 =$ <input type="text" value="28"/> dní
Obvod prvku vystavený okolnímu prostředí	$u =$ <input type="text" value="1500"/> mm
Doba ošetřování betonu:	$t_s =$ <input type="text" value="7"/> dní

Obr. C.1: Vstupní parametry – přímý výpočet průhybu pro jednostranně vyztužený průřez (MSPruhyb)

Na Obr. C.2 je vidět hlavní okno přímého výpočtu průhybu. Jak je patrné z posouzení ve spodní části okna, zkoumaný prvek vyhovuje.

W Výpočet průhybu dle ČSN EN 1992-1-1

Soubor Kalkulačka Prohlížeč

VÝPOČET PRŮHYBU DLE ČSN EN 1992-1-1 - Prostý nosník

Vstupní parametry: ?

Charakteristická pevnost betonu v tlaku: $f_{ck} = 25$ MPa
 Charakteristická mez kluzu oceli: $f_{yk} = 500$ MPa
 Modul pružnosti oceli v tahu: $E_s = 200$ GPa
 Délka prvku: $L = 6$ m
 Šířka průřezu (šířka tlačené oblasti): $b = 250$ mm
 Výška průřezu: $h = 500$ mm
 Vzdál. dolní výztuže od dolních vláken: $d_1 = 46$ mm
 Vzdál. horní výztuže od horních vláken: $d_2 = 0$ mm
 Navržená plocha dolní tažené výztuže: $A_{s1} = 804,248$ mm²
 Navržená plocha horní tlačené výztuže: $A_{s2} = 0$ mm²
 Moment od kvazistálé kombinace: $M_{qp} = 58,5$ kNm
 Moment od charakteristické kombinace: $M_f = 81$ kNm
 Třída cementu: N
 Relativní vlhkost okolního prostředí: $RH = 50$ %
 Teplota prostředí: $T = 20$ °C
 Uvažovaná životnost konstrukce: $t = 50$ let
 Čas vnesení zatížení: $t_0 = 28$ dní
 Obvod prvku vystavený okolnímu prostředí: $u = 1500$ mm
 Doba ošetřování betonu: $t_s = 7$ dní

Posouzení:
 Kvazistálá kombinace: $w_{qp,Lt} \leq L/250$
 $17,61 \text{ mm} \leq 24 \text{ mm}$
 Charakteristická kombinace: $w_{f,Lt} \leq L/200$
 $23,53 \text{ mm} \leq 30 \text{ mm}$

Výpočet: část 1 - průřezové charakteristiky: ?

	1a) okamžitě f.St ($\varphi = 0$):	1b) dlouhodobé f.Lt (φ pro $<t_0, t>$):	1c) krátkodobé cs.St (φ pro $<t_s, t_0>$):	1d) dlouhodobé cs.Lt (φ pro $<t_s, t>$):
$\varphi_i =$	0,00	2,71	1,35	3,51
$E_{c,eff,i} =$	31 475,81	8 494,91	13 381,71	6 971,75
$X_{1,i} =$	258,01	276,84	267,90	281,79
$X_{2,i} =$	117,32	197,22	166,32	211,54
$I_{1,i} =$	2 808 482 451,70	3 288 496 980,61	3 060 512 859,86	3 414 711 288,35
$I_{2,i} =$	713 831 495,93	1 887 737 382,10	1 378 181 637,63	2 145 162 390,94
$S_{1,i} =$			149 673,83	138 502,71
$S_{2,i} =$			231 363,78	194 994,76
(E) $I_{1,i} =$	88 399,25	27 935,48		
(E) $I_{2,i} =$	22 468,42	16 036,15		

Výpočet: část 2 - průhyb:

	Kvazistálá,St	Kvazistálá,Lt	Charakteristická,St	Charakteristická,Lt
$M_{cr} =$	29,77	37,80	29,77	37,80
$w_{zatižení} =$	7,88	12,46	12,16	18,06
$w_{cs} =$	1,06	5,15	1,17	5,47
$w_{celkem} =$	8,94	17,61	13,33	23,53

OK - Posuzovaný prvek vyhovuje

VYPOČÍTEJ **Návrat do menu**

Obr. C.2: Hlavní okno výpočtu – přímý výpočet průhybu pro jednostranně vyztužený průřez (MSPruhyb)

Na Obr. C.3 až Obr. C.5 jsou zobrazeny podrobné části výpočtu potřebné pro porovnání s výpočetní pomůckou.

Podrobný postup výpočtu - f,Lt

Výpočet (f,Lt) - průřezové charakteristiky pro dlouhodobé silové zatížení $<t_0, t>$

Součinitel dotvarování (smrštění):

Stáří betonu upravené podle vlivu teploty a cementu: $t_{0,CEMT} = 27,947490$ dne
 Náhradní rozměr prvku: $h_0 = 166,666667$ mm
 Součinitel závislý na relativní vlhkosti: $\beta_H = 500,025390$
 Součinitel vystihující vliv stáří betonu: $\beta_{t0} = 0,488624$
 Součinitel vystihující vliv pevnosti betonu: $\beta_{fcm} = 2,924505$
 Součinitel dotvarování vystihující vliv vlhkosti: $\varphi_{RH} = 1,908560$
 Součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení: $\beta_{ci(t,t_0)} = 0,991917$
 Základní součinitel dotvarování: $\varphi_0 = 2,727300$
Součinitel dotvarování - dlouhodobý: $\varphi_{f,Lt} = 2,705256$

Průřezové charakteristiky:

Dlouhodobý modul pružnosti betonu: $E_{c,eff,Lt} = 8 494,907762$ MPa
 Poměr modulů pružnosti: $\alpha_{e,Lt} = 23,543516$
 Plocha ideálního průřezu: $A_{1,Lt} = 0,143935$ m²
 Výška tlačené oblasti (průřez bez trhlín): $x_{1,Lt} = 0,276836$ m
 Výška tlačené oblasti (průřez s plně rozvinutými trhlínami): $x_{2,Lt} = 0,197222$ m
 Moment setrvačnosti (průřez bez trhlín): $I_{1,Lt} = 0,003288$ m⁴
 Moment setrvačnosti (průřez s plně rozvinutými trhlínami): $I_{2,Lt} = 0,001888$ m⁴
 Ohybová tuhost (průřez bez trhlín): (E) $I_{1,Lt} = 27 935,478525$ kNm²
 Ohybová tuhost (průřez s plně rozvinutými trhlínami): (E) $I_{2,Lt} = 16 036,154939$ kNm²
 Ohybová poddajnost (průřez bez trhlín): $C_{1,Lt} = 35,796774$ 10⁻⁶/kNm²
 Ohybová poddajnost (průřez s plně rozvinutými trhlínami): $C_{2,Lt} = 62,359088$ 10⁻⁶/kNm²

Výpis použitých vzorců **Zpět na hlavní stránku výpočtu**

Obr. C.3: Podrobný výpočet pro dlouhodobé silové zatížení – přímý výpočet průhybu pro jednostranně vyztužený průřez (MSPruhyb)

Podrobný postup výpočtu - cs,LT

Výpočet (cs,LT) - průřezové charakteristiky pro dlouhodobé zatížení smršťováním <ts,t>

Součinitel dotvarování (smršťování):

Stáří betonu "ts" upravené podle vlivu teploty a cementu: $t_{s,CEMT} = 6.986872$ dne

Náhradní rozměr prvku: $h_0 = 166.666667$ mm

Součinitel závislý na relativní vlhkosti: $\beta_{RH} = 500.025390$

Součinitel vystihující vliv stáří betonu: $\beta_{ts} = 0.634832$

Součinitel vystihující vliv pevnosti betonu: $\beta_{fcm} = 2.924505$

Součinitel dotvarování vystihující vliv vlhkosti: $\varphi_{RH} = 1.908560$

Součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení: $\beta_{c(t,ts)} = 0.991926$

Základní součinitel dotvarování: $\varphi_0 = 3.543376$

Součinitel dotvarování pro smršťování - dlouhodobý: $\varphi_{cs,LT} = 3.514767$

Charakteristiky průřezu pro smršťování:

Dlouhodobý modul pružnosti betonu: $E_{c,eff,cs} = 6971.745388$ MPa

Poměr modulů pružnosti: $\alpha_{e,cs} = 28.687221$

Plocha ideálního průřezu: $A_{1,cs} = 0.148072$ m²

Vzdálenost těžiště ideálního průřezu od horního okraje: $x_{1,cs} = 0.281786$ m

Vzdálenost neutrální osy od tláčeného okraje (průřez s tržlinami): $x_{2,cs} = 0.211544$ m

Statický moment průřezové plochy výztuže k těžišti průřezu: $S_{1,cs} = 0.000139$ m³

Statický moment průřezové plochy výztuže pro průřez s tržlinami: $S_{2,cs} = 0.000195$ m³

Moment setvačnosti (průřez bez tržlin): $I_{1,cs} = 0.003415$ m⁴

Moment setvačnosti (průřez s plně rozvinutými tržlinami): $I_{2,cs} = 0.002145$ m⁴

Výpis použitých vzorců Zpět na hlavní stránku výpočtu

Obr. C.4: Podrobný výpočet pro dlouhodobé zatížení smršťováním – přímý výpočet průhybu pro jednostranně vyztužený průřez (MSPruhyb)

Podrobný postup výpočtu - kvazi,LT

Výpočet dlouhodobého průhybu od kvazistálé kombinace zatížení (kvazi,LT) a od smršťování (cs,LT):

Charakteristiky pro výpočet průhybu:

Moment od kombinace zatížení: $M_e = 58.500000$ kNm

Moment na mezi vzniku tržliny: $M_{cr} = 37.796842$ kNm

Moment na mezi MSP: $M_{max} = 107.681059$ kNm

Poměrné autogenní smršťování v průběhu času: $\epsilon_{cs}(t) = 0.000037$

Poměrné smršťování vysycháním v průběhu času: $\epsilon_{cd}(t) = 0.000459$

Celkové poměrné smršťování: $\epsilon_{cs} = 0.000496$

Ohybová tuhost (průřez bez tržlin): $(EI)_{1,S} = 27.935.478525$ kNm²

Ohybová tuhost (průřez s plně rozvinutými tržlinami): $(EI)_{2,S} = 16.036.154939$ kNm²

Statický moment průřezové plochy výztuže k těžišti průřezu: $S_{1,cs} = 0.000139$ m³

Statický moment průřezové plochy výztuže pro průřez s tržlinami: $S_{2,cs} = 0.000195$ m³

Moment setvačnosti (průřez bez tržlin): $I_{1,cs} = 0.003415$ m⁴

Moment setvačnosti (průřez s plně rozvinutými tržlinami): $I_{2,cs} = 0.002145$ m⁴

Průhyb od silového zatížení:

Míra spolupůsobení betonu mezi tržlinami: $\zeta_{zatížení} = 0.791277$

Křivost od silového zatížení: $1/r_{zatížení} = 0.003323674$ m⁻¹

Průhyb od silového zatížení: $w_{zatížení} = 12.463776$ mm

Průhyb od smršťování:

Míra spolupůsobení betonu mezi tržlinami: $\zeta_{cs} = 0.791277$

Křivost od smršťování: $1/r_{cs} = 0.001144$ m⁻¹

Průhyb od smršťování: $w_{cs} = 5.149544$ mm

Celkový průhyb:

Celkový průhyb: $w_{celkem} = 17.613320$ mm

Výpis použitých vzorců Zpět na hlavní stránku výpočtu

Obr. C.5: Podrobný výpočet pro dlouhodobý průhyb od kvazi-stálé kombinace – přímý výpočet průhybu pro jednostranně vyztužený průřez (MSPruhyb)

C.2 Výpočetní pomůcka – jednostranně vyztužený průřez

Tato kapitola obsahuje ukázkou přímého výpočtu průhybu pro jednostranně vyztužený průřez z výpočetní pomůcky [6]. Ukázkou výpočtu slouží pro porovnání se stejným příkladem z vytvořeného programu MSPruhyb (více viz 3.5.3).

Na Obr. C.6 je vidět okno pro zadání vstupních hodnot do výpočetní pomůcky.

Numerická analýza průhybu na ŽB nosníku

Vstupní hodnoty pro výpočet průhybu dle ČSN EN 1992-1-1:

Pevnostní třída betonu: C25/30

Třída výztuže: B 500B

Modul pružnosti betonu: 31,48 GPa

Modul pružnosti oceli: 200 GPa

Délka nosníku: 6 m

Rozměry průřezu: h = 0,5 m
b = 0,25 m

Spojité zatížení: G(k): 10 kN/m
Q(k): 10 kN/m

Průměr hlavní ohybové výztuže: 16 mm

Počet prutů ohybové výztuže: 4 ks

Průměr třmínků: 8 mm

Krytí: 30 mm

Relativní vlhkost okolního prostředí RH: 50 %

Čas vnesení zatížení: 28 dní

Doba ošetřování betonu: 7 dní

Třída cementu: N

Teplota prostředí: 20 °C

Kategorie konstrukce: Kategorie B: kancelářské plochy, $\psi_1 = 0,5$, $\psi_2 = 0,3$

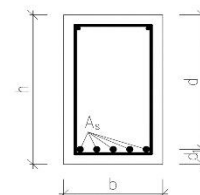
výsledky

ukončit

Obr. C.6: Vstupní hodnoty pro výpočet průhybu (Výpočetní pomůcka)

Na Obr. C.7 až Obr. C.10 je zobrazen celý protokol z výpočetní pomůcky, který obsahuje postup výpočtu průhybu dle normy [1].

str.1

Výpočet přetvoření od dotvarování a smršťování**1. Vstupní hodnoty:**

Třída betonu:		C25/30
Modul pružnosti betonu:	$E_c =$	31,48 GPa
Třída výztuže:		B 500B
Modul pružnosti výztuže:	$E_s =$	200 GPa
Třída cementu:		N
Délka nosníku:	$l =$	6 m
Výška průřezu:	$h =$	0,5 m
Šířka průřezu:	$b =$	0,25 m
Stálé charakteristické spojité zatížení:	$g_k =$	10 kN/m
Užité charakteristické spojité zatížení:	$q_k =$	10 kN/m
Průměr hlavní ohybové výztuže:	$\emptyset =$	16 mm
Počet prutů ohybové výztuže:	počet =	4 ks
Průměr třmínků:	$\emptyset_{tr} =$	8 mm
Krytí:	$c =$	30 mm
Teplota okolního prostředí:	$T =$	20 °C
Relativní vlhkost okolního prostředí:	$RH =$	50 %
Čas vnesení zatížení:	$t_0 =$	28 dní
Po vybetonování se beton ošetřuje po dobu ($0, t_{sh}$):	$t_{sh} =$	7 dní
Kategorie konstrukce dle zatížení:		Kategorie B: kancelářské plochy
Hodnoty součinitelů ψ :	$\psi_1 =$	0,5 -
	$\psi_2 =$	0,3 -

2. Výstupní hodnoty:**2.1. Materiálové a geometrické vlastnosti:**

Charakteristická pevnost betonu v tlaku:	$f_{ck} =$	25 MPa
Střední hodnota pevnosti betonu v tlaku:	$f_{cm} =$	33 MPa
Střední hodnota pevnosti betonu v tahu:	$f_{ctm} =$	2,6 MPa
Plocha betonového průřezu:	$A_c =$	0,125 m ²
Mez kluzu výztuže:	$f_{yk} =$	500 MPa
Plocha hlavní ohybové výztuže:	$A_s =$	804,25 mm ²
Vzdálenost spodní výztuže od dolních vláken:	$d_1 =$	46 mm
Vzdálenost spodní výztuže od horních vláken:	$d =$	0,454 m

Obr. C.7: Výpočet průhybu – strana 1 (Výpočetní pomůcka)

str.2

2.2. Zatížení:

Kvazistálá kombinace zatížení:	$f_{qp} =$	13 kN/m
Ohybový moment od kvazistálé kombinace:	$M_{E,qp} =$	58,5 kN.m
Častá kombinace zatížení:	$f_{fr} =$	15 kN/m
Ohybový moment od časté kombinace:	$M_{E,fr} =$	67,5 kN.m
Charakteristická kombinace zatížení:	$f_k =$	20 kN/m
Ohybový moment od charakteristické kombinace:	$M_{E,k} =$	90 kN.m

3. Výpočet přetvoření:**3.1. Kritéria průhybu:**

Limitní hodnota průhybu pro dlouhodobý účinek:	$w_{lim,lt,qp} =$	24,00 mm
--	-------------------	----------

3.2. Výpočet průhybu:

Zatížení začíná působit v čase:	$t_0 =$	28 dní
Po vybetonování se beton ošetřuje po dobu ($0, t_{sh}$):	$t_{sh} =$	7 dní
Náhradní tloušťka:	$h_0 =$	0,1667 m

3.2.1. Průhyb od kvazistálého zatížení:

Součinitel dotvarování pro čas vnesení zatížení:	$\varphi_c =$	2,73 -
Efektivní modul pružnosti pro dlouhodobě působící zatížení:	$E_{c,ef} =$	8,45 GPa
Pracovní součinitel (poměr $E_s/E_{c,ef}$):	$\alpha_{e,ef} =$	23,67 -

3.2.1.A. Geometrické charakteristiky průřezu bez trhliny:

Plocha ideálního průřezu:	$A_{i,ef} =$	0,14404 m ²
Vzdálenost těžiště ideálního průřezu od horního okraje:	$a_{i,ef} =$	0,27697 m
Moment setrvačnosti ideálního průřezu k jeho těžišti:	$I_{i,ef} =$	0,003292 m ⁴
Ohybová tuhost:	$E_{c,ef} \cdot I_{i,ef} =$	27,809 MN.m ²
Ohybová poddajnost:	$C_{i,ef} =$	0,03596 MN ⁻¹ .m ⁻²
Ohybový moment při vzniku trhlin:	$M_{cr} =$	38,37 kN.m
Ohybový moment od kvazistálé kombinace:	$M_{E,qp} =$	58,5 kN.m

Posouzení vzniku trhlin od zatížení:

	M [kN.m]:		M_{cr} [kN.m]:
Trhliny vzniknou při kvazistálé kombinaci zatížení.	58,500	>	38,37
Trhliny vzniknou při časté kombinaci zatížení.	67,500	>	38,37
Trhliny vzniknou při charakteristické kombinaci zatížení.	90,000	>	38,37

Obr. C.8: Výpočet průhybu – strana 2 (Výpočetní pomůcka)

str.3	<p>3.2.1.B. Geometrické charakteristiky průřezu s trhlinou:</p> <p>Vzdálenost neutrální osy od tlačného okraje: $x_{cr,ef} = 0,198 \text{ m}$</p> <p>Moment setrvačnosti průřezu s trhlinou k jeho těžišti: $I_{II,ef} = 0,001895 \text{ m}^4$</p> <p>Ohybová tuhost: $E_{c,ef} \cdot I_{II,ef} = 16,006 \text{ MN.m}^2$</p> <p>Ohybová poddajnost: $C_{II,ef} = 0,06248 \text{ MN}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$</p> <p>Hodnota udávající míru spolupůsobení betonu mezi trhlinami: $\zeta_{qp,ef} = 0,78 -$</p> <p>Výsledná křivost od kvazistálého zatížení: $(1/r)_{g,lt} = 0,003321 \text{ m}^{-1}$</p> <p>Průhyb od kvazistálého zatížení: $w_{g,lt} = 12,45 \text{ mm}$</p> <p>3.2.2. Průhyb od smršťování:</p> <p>Součinitel dotvarování pro smršťování: $\varphi_{c,sh} = 3,54 -$</p> <p>Autogenní smršťování: $\epsilon_{ca} = 0,000038 -$</p> <p>Poměrné dotvarování vysycháním: $\epsilon_{cd} = 0,000512 -$</p> <p>Celkové poměrné smršťování: $\epsilon_{cs} = 0,00055 -$</p> <p>Efektivní modul pružnosti pro dlouhodobě působící zatížení: $E_{c,ef,sh} = 6,93 \text{ GPa}$</p> <p>Pracovní součinitel (poměr $E_s/E_{c,ef,sh}$): $\alpha_{e,ef,sh} = 28,86 -$</p> <p>3.2.2.A. Geometrické charakteristiky průřezu bez trhliny:</p> <p>Plocha ideálního průřezu: $A_{I,ef,sh} = 0,148208 \text{ m}^2$</p> <p>Vzdálenost těžiště ideálního průřezu od horního okraje: $a_{I,ef,sh} = 0,281945 \text{ m}$</p> <p>Moment setrvačnosti ideálního průřezu k jeho těžišti: $I_{I,ef,sh} = 0,003419 \text{ m}^4$</p> <p>Statický moment průřezové plochy k těžišti výztuže: $S_{I,ef,sh} = 0,000138 \text{ m}^3$</p> <p>3.2.2.B. Geometrické charakteristiky průřezu s trhlinou:</p> <p>Vzdálenost neutrální osy od tlačného okraje: $x_{cr,ef,sh} = 0,212 \text{ m}$</p> <p>Moment setrvačnosti průřezu s trhlinou k jeho těžišti: $I_{II,ef,sh} = 0,002153 \text{ m}^4$</p> <p>Statický moment průřezové plochy k těžišti výztuže: $S_{II,ef,sh} = 0,000195 \text{ m}^3$</p> <p>Výsledná křivost od smršťování: $(1/r)_{cs} = 0,001263 \text{ m}^{-1}$</p> <p>Průhyb od smršťování: $w_{cs} = 5,68 \text{ mm}$</p> <p>4. Výsledky:</p> <p>Průhyb od kvazistálého zatížení: $w_{g,lt} = 12,45 \text{ mm}$</p> <p>Průhyb od smršťování: $w_{cs} = 5,68 \text{ mm}$</p> <p>Celkový průhyb ($w_{lt} = w_{g,lt} + w_{cs}$): $w_{lt} = 18,1 \text{ mm}$</p> <p>Limitní hodnota průhybu pro dlouhodobý účinek: $w_{lim,lt,qp} = 24,0 \text{ mm}$</p>
-------	---

Obr. C.9: Výpočet průhybu – strana 3 (Výpočetní pomůcka)

str.4	<p>5. Posouzení:</p> <p style="text-align: right;">$w_{lt} [\text{mm}] < w_{lim,lt} [\text{mm}]$</p> <p style="text-align: right;">18,1 < 24,0</p> <p style="text-align: center;">PRŮHYB VYHOVUJE</p>
-------	--

Obr. C.10: Výpočet průhybu – strana 4 (Výpočetní pomůcka)

Příloha D

Seznamy

D.1 Seznam obrázků

Obr. 2.1: Graf dotvarování – závislost deformace na čase zatěžování.....	25
Obr. 2.2: Grafické vyjádření účinného poměru modulů pružnosti.....	30
Obr. 2.3: Grafické určení těžiště ideálního průřezu (průřez bez trhlin).....	30
Obr. 2.4: Grafické znázornění působících sil (průřez s plně rozvinutými trhlinami) ..	32
Obr. 3.1: Zjednodušené posouzení dle podmínky ohybové štíhlosti.....	45
Obr. 3.2: Přímý výpočet průhybu dle ČSN EN 1992-1-1	46
Obr. 3.3: Statické schéma konstrukce (zjednodušené posouzení prvku).....	47
Obr. 3.4: Grafické znázornění vybraných vstupních parametrů.....	49
Obr. 3.5: Vstupní parametry pro přímý výpočet průhybu (MSPruhyb)	63
Obr. 3.6: Hlavní okno přímého výpočtu průhybu (MSPruhyb)	64
Obr. 3.7: Podrobný postup výpočtu – dlouhodobé silové zatížení (MSPruhyb).....	64
Obr. 3.8: Podrobný postup výpočtu – dlouhodobé zatížení smršťováním (MSPruhyb)	65
Obr. 3.9: Podrobný postup výpočtu – dlouhodobý průhyb od kvazi-stálé kombinace (MSPruhyb)	65
Obr. 3.10: Hlavní okno přímého výpočtu – detail průřezových charakteristik (MSPruhyb)	66
Obr. 3.11: Hlavní okno přímého výpočtu – detail průhybu (MSPruhyb).....	66
Obr. 3.12: Hlavní okno přímého výpočtu – detail posouzení (MSPruhyb).....	66
Obr. 3.13: Součinitel dotvarování pro silové zatížení (FIN EC 2018)	68
Obr. 3.14: Závislost průhybu konstrukce na době trvání zatížení (oboustranně vyztužený průřez)	73
Obr. 3.15: Závislost průhybu konstrukce na relativní vlhkosti okolního prostředí.....	74
Obr. 3.16: Závislost průhybu konstrukce na charakteristické pevnosti betonu v tlaku	76
Obr. 3.17: Závislost průhybu konstrukce na navržené ploše tažené výztuže.....	78
Obr. 3.18: Závislost průhybu na rozpětí konstrukce	80
Obr. 3.19: Porovnání celkového a limitního průhybu zkoumané konstrukce.....	80
Obr. 3.20: Závislost průhybu konstrukce na době trvání zatížení (jednostranně vyztužený průřez)	82

Obr. 3.21: Závislost průhybu konstrukce na době trvání zatížení – porovnání průběhu průhybu pro jednostranně a oboustranně vyztužený průřez	82
Obr. A.1: Úvodní okno programu MSPruhyb.....	87
Obr. A.2: Zjednodušené posouzení dle podmínky ohybové štíhlosti.....	88
Obr. A.3: Výpočet průhybu dle ČSN EN 1992-1-1	89
Obr. A.4: Náповěda k celému programu MSPruhyb	90
Obr. A.5: Základní informace o programu MSPruhyb.....	91
Obr. A.6: Náповěda – legenda značení pro přímý výpočet průhybu.....	91
Obr. A.7: Náповěda – vstupní parametry pro přímý výpočet průhybu	92
Obr. A.8: Podrobný výpočet – průřezové charakteristiky v okamžiku silového zatížení t_0	93
Obr. A.9: Podrobný výpočet – průřezové charakteristiky pro dlouhodobé silové zatížení t_0, t	94
Obr. A.10: Podrobný výpočet – průřezové charakteristiky pro krátkodobé zatížení smršťováním t_s, t_0	94
Obr. A.11: Podrobný výpočet – průřezové charakteristiky pro dlouhodobé zatížení smršťováním t_s, t	94
Obr. A.12: Podrobný výpočet – krátkodobý průhyb od kvazi-stálé kombinace zatížení a od smršťování	95
Obr. A.13: Podrobný výpočet – dlouhodobý průhyb od kvazi-stálé kombinace zatížení a od smršťování	95
Obr. A.14: Podrobný výpočet – krátkodobý průhyb od charakteristické kombinace zatížení a od smršťování	95
Obr. A.15: Podrobný výpočet – dlouhodobý průhyb od charakteristické kombinace zatížení a od smršťování	96
Obr. A.16: Podrobný výpočet „f,St“ – přehled použitých vzorců pro vybranou část výpočtu.....	96
Obr. A.17: Informační zpráva – chybně zadaný vstup.....	97
Obr. A.18: Informační zpráva – vstupní hodnota mimo přípustný rozsah	97
Obr. A.19: Informační zpráva – nelinearita ve výpočtu.....	97
Obr. A.20: Varovná zpráva – překročení mezního stavu omezení napětí u kvazi-stálé kombinace.....	98
Obr. B.1: Tabulkové hodnoty vymezující ohybové štíhlosti	99
Obr. C.1: Vstupní parametry – přímý výpočet průhybu pro jednostranně vyztužený průřez (MSPruhyb)	100

Obr. C.2: Hlavní okno výpočtu – přímý výpočet průhybu pro jednostranně vyztužený průřez (MSPrubyb)	101
Obr. C.3: Podrobný výpočet pro dlouhodobé silové zatížení – přímý výpočet průhybu pro jednostranně vyztužený průřez (MSPrubyb)	101
Obr. C.4: Podrobný výpočet pro dlouhodobé zatížení smršťováním – přímý výpočet průhybu pro jednostranně vyztužený průřez (MSPrubyb)	102
Obr. C.5: Podrobný výpočet pro dlouhodobý průhyb od kvazi-stálé kombinace – přímý výpočet průhybu pro jednostranně vyztužený průřez (MSPrubyb)	102
Obr. C.6: Vstupní hodnoty pro výpočet průhybu (Výpočetní pomůcka)	103
Obr. C.7: Výpočet průhybu – strana 1 (Výpočetní pomůcka)	104
Obr. C.8: Výpočet průhybu – strana 2 (Výpočetní pomůcka)	105
Obr. C.9: Výpočet průhybu – strana 3 (Výpočetní pomůcka)	106
Obr. C.10: Výpočet průhybu – strana 4 (Výpočetní pomůcka)	106

D.2 Seznam tabulek

Tab. 2.1: Tabulka pro určení součinitele k_h	39
Tab. 3.1: Porovnání výpočtu průhybu – oboustranně vyztužený průřez (MSPrubyb x ruční výpočet)	67
Tab. 3.2: Porovnání součinitele dotvarování MSPrubyb x FIN EC 2018	68
Tab. 3.3: Porovnání výpočtu průhybu – jednostranně vyztužený průřez (MSPrubyb x výpočetní pomůcka)	70
Tab. 3.4: Průhyb konstrukce v závislosti na době trvání zatížení (oboustranně vyztužený průřez)	72
Tab. 3.5: Průhyb konstrukce v závislosti na relativní vlhkosti okolního prostředí	74
Tab. 3.6: Průhyb konstrukce v závislosti na charakteristické pevnosti betonu v tlaku	75
Tab. 3.7: Průhyb konstrukce v závislosti na vyztužení taženou výztuží	77
Tab. 3.8: Průhyb konstrukce v závislosti na rozpětí konstrukce	79
Tab. 3.9: Průhyb konstrukce v závislosti na době trvání zatížení (jednostranně vyztužený průřez)	81