

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2018

Tereza Genserová

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí

Průhyby stropních konstrukcí od smršťování

Bakalářská práce

Vypracovala:

Terezi

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Bílý, Ph.D.

Studijní obor:

Konstrukce pozemních staveb

Praha 2018



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Genserová Jméno: Tereza Osobní číslo: 423098

Zadávací katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Průhyby stropních konstrukcí od smršťování

Název bakalářské práce anglicky: Shrinkage deflections of horizontal structures

Pokyny pro vypracování:

Průhyby stropních konstrukcí - dělení, popis, hlavní ovlivňující faktory

Smršťování - charakteristika jevu, druhy smršťování, hlavní ovlivňující faktory

Postup výpočtu průhybů - popis vybrané metody, zaměření na výpočet průhybů od smršťování

Stanovení vlivu smršťování na celkový průhyb na vybraných příkladech stropních konstrukcí

Seznam doporučené literatury:

Procházka, Šmejkal - Betonové stropní a schodišťové konstrukce, ČVUT 2017

Pytlík - Technologie betonu, VUTIUM 2000

Collepari - Moderní beton, ČKAIT 2009

Archiv časopisu BETON TKS

Samostatně vyhledejte další vhodnou literaturu

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Petr Bílý, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 23.2.2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 27.5.2017

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

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně 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“.

23.02.2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci napsala samostatně. Veškeré zdroje a informace jsou uvedeny na konci této práce v seznamu použité literatury.

Jsem si vědoma, že se na mojí práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., ve znění zákona č. 81/2005 Sb. (autorský zákon).

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním mojí práce v Ústřední knihovně Fakulty stavební a Fakulty architektury ČVUT.

V Praze dne

23.05.2018

.....
Tereza Genserová

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Petru Bílému, Ph.D. za pomoc při vypracování této bakalářské práce, dále za poskytnuté konzultace a užitečné rady.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na stanovení procentuálního podílu průhybu od smrštění na celkovém průhybu železobetonových stropních konstrukcí. Nejprve jsou popsány průhyby a smršťování. Dále jsou uvedeny výpočtové postupy, kterými jsou průhyby počítány, zvolené typy desek a vlastnosti konstrukcí. Další část tvoří citlivostní analýza čtyř druhů stropních konstrukcí, které jsou vždy spočteny v šesti variantách. Výsledky jsou porovnány v rámci jedné stropní konstrukce i mezi konstrukcemi navzájem.

Klíčová slova

Železobeton, stropní desky, mezní stav použitelnosti, průhyb, smršťování, průhyb od smrštění, ohybová štíhlost.

Abstract

This Bachelor thesis is focused on the determination of percentage part of shrinkage deflection on total deflection of reinforced concrete floor structures. Firstly, deflections and shrinkage are described. Next there are mentioned calculation procedures, whereby deflections are calculated, types of floor structures and properties of structures. Another part of this Bachelor thesis is sensitivity analysis of four types of floor structures, which are calculated in six variants. Results are compared to one type of floor structure and then they are compared to each other.

Key words

Reinforced concrete, floor structures, serviceability limit state, deflection, shrinkage, shrinkage deflection, span to depth ratio.

Obsah

Úvod	1
1 Přetvoření stropních konstrukcí	2
2 Smršťování	4
2.1 Faktory ovlivňující smršťování	4
2.2 Druhy smršťování	6
2.2.1 Autogenní smršťování	6
2.2.2 Smršťování od vysychání	7
2.2.3 Smršťování od karbonatace	7
2.2.4 Plastické smršťování	8
2.2.5 Samovysychání	8
3 Výpočetní postupy	9
3.1 Výpočet ohybové štíhlosti	9
3.2 Postup výpočtu průhybu	11
3.2.1 Krátkodobé působení bez trhlin	11
3.2.2 Krátkodobé působení s trhlinami	13
3.2.3 Dlouhodobé působení bez trhlin	14
3.2.4 Dlouhodobé působení s trhlinami	16
3.2.5 Poměrné smrštění	17
3.2.6 Křivost od smršťování	18
3.2.7 Stanovení celkového průhybu	20
3.3 Postup výpočtu vyztužení desky	23
3.3.1 Předběžný návrh desky	23
3.3.2 Výpočet zatížení	23
3.3.3 Výpočet vnitřních sil	25
3.3.4 Výpočet hlavní nosné výztuže desky (trámu)	26
3.3.5 Výpočet smykové výztuže trámu	28
3.3.6 Předběžné ověření na protlačení	29
4 Parametry pro výpočty konstrukcí	31
4.1 Typy desek	32
4.1.1 Deska jednosměrně pnutá - prostě uložená	32
4.1.2 Deska jednosměrně pnutá – vetknutá	32
4.1.3 Deska obousměrně pnutá – lokálně podepřená – 3x3 pole	32
4.1.4 Deska obousměrně pnutá – po obvodě nepoddajně podepřená – 3x3 pole	33
4.2 Zatížení desek	33
4.3 Ostatní vstupní parametry	33
4.4 Vyztužení stropních desek	34
4.4.1 Výztuž desky jednosměrně pnuté prostě podepřené	34
4.4.2 Výztuž desky jednosměrně pnuté vetknuté	34
4.4.3 Výztuž desky obousměrně pnuté lokálně podepřené	35

4.4.4	Výztuž desky obousměrně pnuté po obvodě podepřené	36
4.5	Citlivostní analýza.....	36
4.5.1	Deska jednosměrně pnutá – prostě uložená	37
4.5.2	Deska jednosměrně pnutá – vetknutá	37
4.5.3	Deska lokálně podepřená – 3x3 pole – krajní pole	37
4.5.4	Deska po obvodě podepřená – 3x3 pole – krajní pole.....	38
5	Výsledky	38
5.1	Deska jednosměrně pnutá prostě uložená.....	39
5.2	Deska jednosměrně pnutá vetknutá	40
5.3	Deska lokálně podepřená – 3x3 pole.....	41
5.4	Deska po obvodě podepřená – 3x3 pole	42
6	Závěr.....	45
	Seznam použité literatury	46
	Seznam použitých programů	46
	Příloha 1 – Podrobné výpočty pro desku č.1	47
	Příloha 2 – Podrobné výpočty pro desku č.2	62
	Příloha 3 – Podrobné výpočty pro desku č.3	77
	Příloha 4 – Podrobné výpočty pro desku č.4	107

Úvod

Železobeton je v současné době hojně využívaný ve stavebnictví jako materiál pro různorodé konstrukce. Díky svým vlastnostem umožňuje stavět konstrukce rozmanitých tvarů. Mezi jeho největší přednosti patří pevnost v tlaku, trvanlivost, ohnivzdornost a odolnost vůči mechanickému použití. Naopak mezi největší nevýhody betonových konstrukcí patří velká hmotnost, špatné tepelně technické a akustické vlastnosti a objemové změny. Právě díky výhodám, které převáží nevýhody, je železobeton často volený materiál pro stropní konstrukce.

Stropní konstrukce ze železobetonu mohou být monolitické nebo prefabrikované. Obě metody mají u stropních konstrukcí své zastoupení. Monolitické stropní konstrukce mají své uplatnění u velkorozponových objektů, u objektů s nepravidelným či nepravoúhlým tvarem.

Jak již bylo zmíněno v prvním odstavci, mezi velké nevýhody železobetonových stropních konstrukcí patří objemové změny, které způsobují deformace od dotvarování a smrštění. Tyto deformace jsou nežádoucí a je nutné je omezit. Při projektování železobetonových konstrukcí je nutno konstrukci navrhnout nejen na mezní stav únosnosti, ale zohlednit v návrhu i mezní stav použitelnosti, který je často řešen jen okrajově či zanedbán úplně.

Cílem této bakalářské práce je porovnání procentuálních podílů průhybu od smrštění k celkovým průhybům stropních konstrukcí. Průhyby budou posuzovány na vybraných typech stropních konstrukcí. Následně je provedena citlivostní analýza na každém z vybraných typů stropních desek a jsou porovnány výsledky z jednotlivých typů desek. Výsledkem je shrnutí, které parametry nejvíce či nejméně ovlivňují průhyby od smrštění.

Motivací pro zpracování práce byla skutečnost, že program SCIA Engineer [14] používaný pro statickou analýzu železobetonové konstrukce neumožňuje výpočet deformací od smrštění. Projektant tedy musí být schopen odhadnout, jak velkou část deformací jeho konstrukce budou deformace od smrštění tvořit, a zda vzhledem k velikosti rezervy mezi spočteným průhybem bez vlivu smrštění a limitní hodnotou průhybu nutný jejich podrobný výpočet.

1 Přetvoření stropních konstrukcí

Průhyb je jedna z deformací, které se objevují u stropních konstrukcí vedle posunu a pootočení. Průhyby jsou viditelnou deformací, která v lidech vzbuzuje neklid a nepohodlí. Průhyb je problémový i z hlediska určitých typů konstrukcí a provozů. Průhyb je nežádoucí např. ve výrobních halách, kde jsou na podlahách umístěny stroje nebo jeřábové dráhy, které jsou citlivé na změny v rovinnosti konstrukce. Navazující konstrukce na stropní desky (nesené příčky, obklady, opláštění, omítky, apod.) jsou do určité míry schopny přenášet deformace, při větších deformacích dochází k jejich poškození.

Mezi nejdůležitější příčiny průhybu patří zatížení konstrukce, dotvarování a smršťování betonu. Příčiny nadměrných průhybů mohou být způsobeny časným odbedněním konstrukce nebo nadměrným zatěžováním konstrukce.

Průhyb konstrukce se dělí na okamžitý a dlouhodobý. Příčinou okamžitého průhybu je zatížení konstrukce. Přetvoření dlouhodobé se dá pak dále dělit na přetvoření od dotvarování a od smršťování. Přetvoření od dotvarování je zapříčiněno napětím od stálého zatížení konstrukce na rozdíl od přetvoření od smršťování, které způsobuje vysychání a chemické procesy v betonové směsi.

Stejně jako příčiny vzniku průhybů lze rozdělit i faktory ovlivňující velikost průhybu. Okamžité přetvoření je ovlivněno velikostí zatížení a stářím betonu, ve kterém je konstrukce zatěžována. Přetvoření od dotvarování je ovlivněno pevnostní třídou betonové směsi – s rostoucí pevnostní třídou se většinou snižuje dotvarování. Dále je průhyb od dotvarování ovlivněn vodním součinitelem betonové směsi – s klesajícím vodním součinitelem se snižuje dotvarování, relativní vlhkostí – s klesající relativní vlhkostí roste dotvarování. Mezi další faktory patří geometrie prvku – závisí na ploše průřezu prvku a obvodu, který je v kontaktu se vzduchem – s rostoucím poměrem se zrychluje smršťování –, a dále pak na stejných faktorech jako okamžité přetvoření. Přetvoření od smršťování je ovlivněno mnoha faktory, které budou popsány v kapitole 2.1.

Dle normy ČSN EN 1992-1-1 Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby se mezní dovolená hodnota průhybu stropní konstrukce vypočte jako

$$L/250 \quad (1)$$

kde L je rozpětí. Spočtená hodnota se vztahuje k podporám. Hodnota průhybu se stanoví při kvazistálé kombinaci zatížení. Průhyb jako nežádoucí projev konstrukce lze částečně eliminovat např. nadvýšením, které nemá přesáhnout hodnotu L/250 [1].

Průhyb od zatížení při kvazistálé kombinaci po zabudování do konstrukce (tj. u monolitických konstrukcí celkový průhyb od vlastní tíhy konstrukce) - dle normy ČSN EN 1992-1-1 Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby neměl překročit hodnotu

$$L/500 \quad (2)$$

kde L je rozpětí. Pokud by nebyla takto dodatečně omezena hodnota dovoleného průhybu, mohlo by to způsobit poškození přilehlých konstrukcí po určité době od výstavby (vlivem dotvarování, smršťování a užitných zatížení) [1].

Deformace lze dle výše uvedené normy omezit pomocí vymezení ohybové štíhlosti. Pokud nosníky či desky splňují podmínku vymezení ohybové štíhlosti, lze upustit od přesného výpočtu průhybu. V tomto případě lze předpokládat, že průhyb nepřekročí mezní hodnoty stanovené dle rovnic (1) a (2). Posouzení vymezení ohybové štíhlosti se provede dle vzorce

$$l/d \leq \lambda_d \quad (3)$$

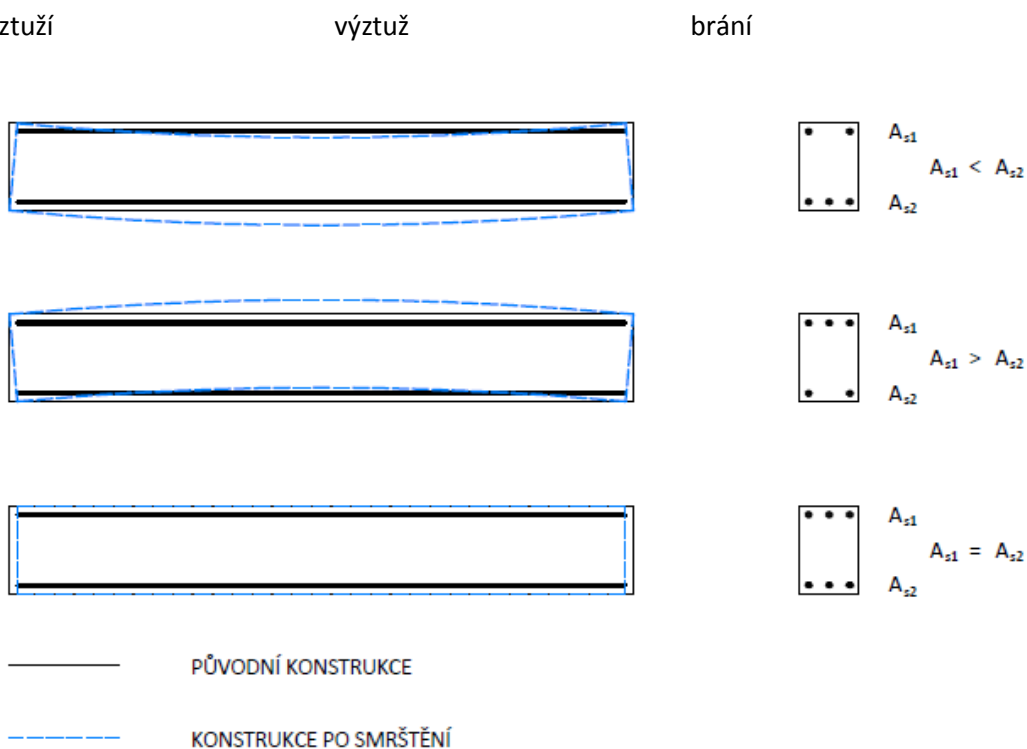
kde l je rozpětí prvku, d je účinná výška průřezu, λ_d je vymezení ohybová štíhlost. Výpočet této veličiny bude detailně popsán v kapitole 3.1. Je třeba zmínit, že tato metoda nezohledňuje řadu důležitých faktorů, které ovlivňují skutečnou velikost průhybu, je obvykle velmi konzervativní a nevede k nejefektivnějšímu návrhu konstrukce.

Pokud nevyjde podmínka vymezení ohybové štíhlosti, je nutné spočítat průhyb dle kapitoly 7.4.3 normy [1]. Tento postup bude detailně popsán v kapitole 3.2.

2 Smršťování

Jedná se o proces, při kterém se mění celkový objem betonové směsi nebo betonového prvku. Pokud se jedná o úbytek objemu, jde o smršťování.

Pokud je beton vyztužen, smršťování způsobuje tlakové napětí v podélné výztuži prvku. Pokud prvek není vyztužen u obou povrchů nebo se vyztužení jednotlivých povrchů liší, dochází k zakřivení a prohnutí prvku. Prvek se prohne vždy na stranu vyššího stupně vyztužení ohybovou výztuží



Obrázek 1 Schématické znázornění průhybů od smrštění.

2.1 Faktory ovlivňující smršťování

Velikost smrštění závisí na mnoha faktorech. Ovlivnit ji můžeme různými způsoby. Mezi nevýznamnější faktory patří:

- Složení a množství cementového tmelu
- Objem vypařené vody – souvisí s relativní vlhkostí prostředí
- Vodní součinitel betonové směsi – s rostoucím vodním součinitelem a klesající okolní vlhkostí se smrštění zvětšuje
- Jemnost mletí cementu – s rostoucí jemností mletí cementu se zvětšuje smrštění
- Přítomnost přísad – expanzivní přísada vyrovná účinek úbytku objemu cementového tmelu
- Modul pružnosti kameniva – s rostoucím modulem pružnosti kameniva klesá velikost smrštění

- Křivka zrnitosti kameniva – smršťuje se pouze cementový tmel, tudíž omezení jeho objemu zmenší velikost smršťování
- Koeficient $h_0=(2 \cdot A_c)/u$ (náhradní tloušťka), kde A_c je průřezová plocha prvku a u je obvod prvku, který je v kontaktu se vzduchem – ovlivňuje rychlost smršťování – čím menší, tím rychlejší smršťování

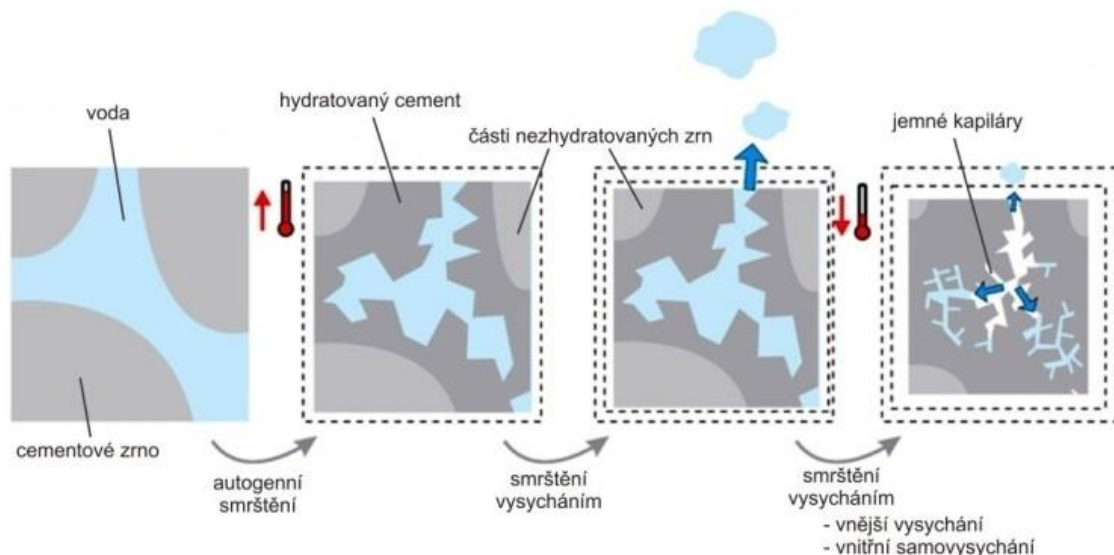
Smršťování lze i částečně zabránit:

- Dodatečné ošetřování betonu
 - ponechat konstrukci v bedněni po dobu ideálně 3 týdnů od betonáže
 - zakrýt parotěsnou fólií
 - vlhčení čerstvého betonu – ideálně mlžení nebo smáčení přes tkaninu
 - nástřik ošetřovacích hmot, které po čase sublimují
- Výztuž na obou površích konstrukce desky

Pokud by se jednalo o nárůst objemu, nazýváme tento jev bobtnání. Bobtnání se většinou objevuje u betonových směsí, které jsou trvale pod vodou. Molekuly vody působí proti kohezním silám, dostávají se mezi vrstvy C-S-H gelu a výsledkem je bobtnání. Kromě toho voda snižuje povrchové napětí na částicích C-S-H gelu, což také poněkud přispívá k expanzi [2]. V odborné literatuře [2] je hodnota bobtnání v mezích 0,2-0,3mm/m, což je hodnota, která nevede k porušení betonu. Dalším důvodem je, že tlakové napětí vyvolané působením vazeb mezi betonem a výztuží je mnohem menší než tlaková pevnost betonu.

2.2 Druhy smršťování

Smršťování lze rozdělit na dva základní druhy a to podle transportu vlhkosti mezi betonovou směsí a okolním prostředím. Pokud je vzorek izolován od okolního prostředí, jedná se o tzv. autogenní smršťování [3]. Když dochází k transportu vody mezi prvkem a okolím, jedná se o smršťování vysycháním. Kromě těchto dvou základních typů někteří autoři definují zvlášť ještě plastické smršťování, smršťování způsobené karbonatací a samovysycháním.



Obrázek 2 Nákres druhů smršťování [4]

2.2.1 Autogenní smršťování

Autogenní smršťování – nazývané také chemické smršťování – je následkem chemické reakce, která probíhá při hydrataci cementu. Hydratace cementu je soubor reakcí, při kterých slínkové minerály reagují s vodou a vzniká tzv. C-S-H gel (kalcium-silikát-hydrátový gel), který je určující pro pevnost i trvanlivost betonu. Při této reakci vznikne cementová pasta a teplo. Teplo je příčinou odpařování vody z betonu a tím pádem dochází k transportu vody do okolního prostředí. Čím jemněji mletý cement se do cementové pasty přidá, tím více vznikne tepla a tím větší bude následné smrštění betonové směsi.

Základním principem autogenního smršťování je, že objem vstupních surovin je větší, než objem následně vznikající směsi. Pro ukázkou bude uveden příklad. Pro úplnou hydrataci 1 kilogramu portlandského cementu je potřeba asi 250 ml vody. Výsledný hydratační produkt je pak menší o zhruba 60 ml (tj. o krychli o hraně 4,0 mm). Naštěstí se celé chemické smrštění nepromítne do změny vnějších rozměrů prvků, ale převážná část se realizuje vznikem nebo zvětšením vnitřních pórů [5].

Autogenní smršťování je u běžných betonů zanedbatelné. Jeho hodnoty bývají okolo 0,2 mm/m (200 microstrain). Naopak významných hodnot nabývá u betonu s vyšší pevností nebo vysokohodnotných betonů. V tomto případě dosahuje autogenní smršťování podobných hodnot

jako smršťování od vysychání a tím pádem musí být uvažováno. Jeho hodnoty mohou dosáhnout i 0,5mm/m.

Autogenní smršťování závisí dle výpočtu v Eurokódu [1] pouze na charakteristické pevnosti betonu. V jiných výpočetních modelech (např. B3) jsou hodnoty autogenního smršťování závislé i na parametrech specifikujících vlastnosti a složení betonu, tvar a rozměry dílce, vlhkosti prostředí a způsob a dobu ošetřování a dobu vnesení zatížení.

2.2.2 Smršťování od vysychání

Smršťování od vysychání je významnou složkou celkového smrštění betonové směsi. Smrštění od vysychání může dosáhnout hodnot až 2,5 mm/m. Jedná se o smršťování, při němž dochází k transportu vody mezi betonovou směsí a okolním prostředím. Beton se většinou nachází v prostředí, které má menší relativní vlhkost a tudíž se voda vypařuje do okolního prostředí. Při odpařování vody z betonové směsi do okolí se zvětšuje povrchové napětí v kapilárách, které se zužují a to má za následek makroskopické zmenšení.

Smršťování od vysychání dle Eurokódu závisí na:

- Relativní vlhkosti okolního prostředí
- Pevnostní třídě betonové směsi
- Průřezové ploše prvku a obvodu průřezu vystavenému vysychání – náhradní tloušťce h_0
- Stáří betonu na začátku smršťování
- Druhu cementu

2.2.3 Smršťování od karbonatace

Při smršťování způsobeném karbonatací dochází k reakci cementové pasy s oxidem uhličitým za přítomnosti vlhkosti. Chemická rovnice karbonatačního smršťování je



Ke karbonatačnímu smrštění dochází na povrchu betonu, kde je betonová směs v kontaktu s oxidem uhličitým, který je obsažen ve vzduchu. Časovým měřítkem jsou roky a nabývá hodnot 0,7 až 1,0 mm/m. Tento druh smrštění je ovlivněn velikostí kameniva a petrografickou podstatou kameniva [6].

2.2.4 Plastické smršťování

Plastické smršťování je zmenšování objemu betonové směsi v důsledku ztráty vody z ještě neztvrdlého betonu. Tento druh smršťování je úzce spojený s vodním součinitelem betonové směsi a množstvím cementové pasty.

2.2.5 Samovysychání

Samovysychání je jev, který se objevuje u vysokohodnotných betonů. Ztvrdlý cementový tmel má tak malou propustnost, že nelze dopravit dovnitř betonu vodu z jeho povrchu. Voda, která uvnitř betonu ještě zbývá, se spotřebovává při hydrataci zbytků cementových zrn. Protože je objem nově vznikajícího cementového tmelu menší než objem původních složek, dochází ke smršťování nazývanému samovysychání [7].

3 Výpočetní postupy

3.1 Výpočet ohybové štíhlosti

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1, výpočet ohybové štíhlosti slouží pro určení, zda je nutné ověřovat průhyb podrobným výpočtem.

Pokud výpočtem dle vzorce (3) prokážeme, že ohybová štíhlost prvku je menší nebo rovna, než vymezuující ohybová štíhlost spočtená dle následujících vzorců, pak nemusí být prováděn výpočet průhybu prvku. Vymezuující ohybová štíhlost závisí na charakteristické pevnosti betonu, stupni vyztužení prvku a referenčním vyztužení prvku. Ve výpočtu jsou dále zohledněny pomocí koeficientů tvar a rozpětí prvku a napětí tahové výztuže.

Výjimku z tohoto způsobu ověření tvoří málo vyztužené průřezy – např. deskové konstrukce. V těchto případech je nutné omezit použití posouzení dle vymezuující ohybové štíhlosti. Pokud stupeň vyztužení u deskových konstrukcí klesne pod 0,5%, je nutné ověřit průhyb konstrukce.

Pro $\rho \leq \rho_0$:

$$\lambda_{d,tab} = K \left[11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho} + 3,2\sqrt{f_{ck}} \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)^{3/2} \right] \quad (5)$$

Pro $\rho > \rho_0$:

$$\lambda_{d,tab} = K \left[11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho - \rho'} + \frac{1}{12} \sqrt{f_{ck}} \frac{\rho'}{\rho_0} \right] \quad (6)$$

$$\lambda_d = \kappa_{c1} \cdot \kappa_{c2} \cdot \kappa_{c3} \cdot \lambda_{d,tab} \quad (7)$$

Kde $\lambda_{d,tab}$ je tabulková vymezuující ohybová štíhlost [-]

κ_{c1} je součinitel závislý na tvaru průřezu:

$\kappa_{c1} = 0,8$ pro T průřezy u nichž je poměr šířky desky k šířce žebra větší než 3,

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

κ_{c2} je součinitel závislý na rozpětí :

pro nosníky a nosíkové desky $\kappa_{c2} = 7/l$ pro $l > 7,0\text{m}$, $\kappa_{c2} = 1,0$ pro $l \leq 7,0\text{m}$

κ_{c3} je součinitel napětí tahové výztuže σ_s v extrémně namáhaném průřezu při návrhové

kombinaci v mezním stavu použitelnosti $\kappa_{c3} = \frac{310}{\sigma_s} \cong \frac{500}{f_{yk}} \cdot \frac{A_{s,prov}}{A_{s,req}}$

$A_{s,prov}$ je navržená plocha výztuže v extrémně namáhaném průřezu

$A_{s,req}$ je průřezová plocha výztuže v průřezu potřebná k přenesení extrémního momentu

K je součinitel, kterým zohledňujeme různé nosné systémy viz tab. 2.2 na straně 25 [1]

ρ_0 referenční stupeň vyztužení $\rho_0 = 10^{-3} \sqrt{f_{ck}}$, kde f_{ck} je charakteristická pevnost betonu v tlaku v MPa

ρ je požadovaný stupeň vyztužení tahovou výztuží ve středu rozpětí (u konzoly ve vetknutí) na ohybový moment vyvozený navrhovaným zatížením

ρ' je požadovaný stupeň vyztužení tlakovou výztuží ve středu rozpětí (u konzoly ve vetknutí) na ohybový moment vyvozený návrhovým zatížením.

3.2 Postup výpočtu průhybu

V následujících výpočtech budou uváděny pro lepší orientaci indexy u jednotlivých veličin. Pro přehlednost budou uvedeny v následujícím odstavci.

Index	význam
st	krátkodobé působení (short time)
lt	dlouhodobé působení (long time)
I	uvažovaný průřez bez trhlin
II	uvažovaný průřez s trhlinami

3.2.1 Krátkodobé působení bez trhlin

Při výpočtu průhybu je uvažován efektivní modul pružnosti, pro krátkodobé působení je stejný, jako střední hodnota modulu pružnosti betonu.

$$E_{c,eff,st} = E_{cm} \quad (8)$$

Kde $E_{c,eff,st}$ je efektivní modul pružnosti betonu při krátkodobém působení zatížení [MPa]
 E_{cm} je střední hodnota modulu pružnosti betonu [MPa]

Pracovní součinitel $\alpha_{e,st}$ slouží pro převod modulu pružnosti oceli na modul pružnosti betonu při výpočtu průřezových charakteristik ideálního průřezu.

$$\alpha_{e,st} = \frac{E_s}{E_{c,eff,st}} \quad (9)$$

Kde $\alpha_{e,st}$ je pracovní součinitel vyjadřující poměr modulů pružnosti oceli a efektivního modulu pružnosti betonu při krátkodobém působení zatížení [-]
 E_s je modul pružnosti oceli [MPa]
 $E_{c,eff,st}$ je efektivní modul pružnosti betonu při krátkodobém působení zatížení [MPa]

Pro výpočet výšky tlačené části průřezu bude využita součtová podmínka rovnováhy v betonovém průřezu. V průřezu bez trhlin je uvažováno působení tlačného betonu, taženého betonu a tažené výztuže (pokud je v průřezu tlačná výztuž, je uvažována v podmínce na stejné straně jako tlačný beton).

$$F_{cc} = F_{ct} + F_s \quad (10)$$

$$\frac{1}{2}b \cdot x_{i,l,st} \cdot \sigma_{cc} = \frac{1}{2}b \cdot (h - x_{i,l,st}) \cdot \sigma_{ct} + A_s \cdot \sigma_s \quad (11)$$

Kde:

$$\sigma_{cc} = \sigma_{ct} \cdot \frac{x_{i,I,st}}{h-x_{i,I,st}} \quad (12)$$

$$\sigma_s = \sigma_{ct} \cdot \alpha_{e,st} \cdot \frac{d-x_{i,I,st}}{h-x_{i,I,st}} \quad (13)$$

Kde b je šířka průřezu [m]

$x_{i,I,st}$ je výška tlačené oblasti v průřezu bez trhlin při krátkodobém působení zatížení [m]

d je výška tlačené oblasti [m]

h je výška průřezu [m]

A_s je plocha tažené betonářské výztuže [m²]

Pro výpočet momentu setrvačnosti ideálního průřezu bez trhlin je důležitá vzdálenost neutrální osy od těžiště betonového průřezu $a_{i,I,st}$ [-].

$$a_{i,I,st} = x_{i,I,st} - \frac{h}{2} \quad (14)$$

Pro další výpočty je nutné určit moment setrvačnosti ideálního průřezu bez trhlin při krátkodobém působení k jeho těžišti $I_{y,I,st}$ [m⁴].

$$I_{y,I,st} = \frac{1}{12} b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot a_{i,I,st}^2 + \alpha_{e,st} \cdot A_s \cdot (d - x_{i,I,st})^2 \quad (15)$$

Ohybová poddajnost průřezu bez trhlin při krátkodobém působení zatížení $C_{I,st}$ [kN⁻¹m⁻²] se vypočte dle následujícího vzorce. Ohybová poddajnost (převrácená hodnota ohybové tuhosti) je důležitá pro výpočet výsledné křivosti.

$$C_{I,st} = \frac{1}{E_{c,eff,st} \cdot I_{y,I,st}} \quad (16)$$

Kritický moment slouží pro ověření, zda budou v určitých kombinacích vznikat trhliny. V tomto případě bude sloužit pro ověření, zda budou vznikat trhliny v časté kombinaci. Pokud je kritický moment menší, než moment od zatížení v dané kombinaci, v průřezu budou vznikat trhliny.

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq f_{ctm} \quad (17)$$

$$M_{cr,st} = f_{ctm} \cdot \frac{I_{y,I,st}}{h-x_{i,I,st}} \quad (18)$$

$$M_{fk} \geq M_{cr,st} \quad (19)$$

Kde f_{ctm} je střední hodnota pevnosti betonu v tahu [MPa]

M_{fk} je ohybový moment při časté kombinaci [kNm]

$M_{cr,st}$ je kritický ohybový moment při krátkodobém působení [kNm]

3.2.2 Krátkodobé působení s trhlinami

Pokud výpočtem zjistíme, že v průřezu vzniknou trhliny, musíme stanovit průřezové charakteristiky průřezu s trhlinami. Pro výpočet krátkodobého působení s trhlinami jsou materiálové charakteristiky jako modul pružnosti, pracovní součinitel α_e stejné jako v krátkodobém působení bez trhlín. Mění se součtová podmínka, ze které vyjadřujeme výšku tlačené oblasti betonového průřezu. Při působení průřezu s trhlinami se neuvažuje tažená část betonu. V podmínce jsou uvažovány pouze tlačená část betonu a tažená výztuž. Pokud je v průřezu tlačená výztuž, přičítá se na stranu tlačného betonu. Z podmínky vyjádříme výšku tlačené oblasti v průřezu s trhlinami při krátkodobém působení $x_{i,II,st}$ [m]:

$$x_{i,II,st} = \frac{\alpha_{e,st} \cdot A_s}{b} \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2b \cdot d}{\alpha_{e,st} \cdot A_s}} \right) \quad (20)$$

Pro působení s trhlinami se změní i moment setrvačnosti, ve kterém je uvažována pouze tlačená část betonu a tažená výztuž. Moment setrvačnosti ideálního průřezu s trhlinami při krátkodobém působení k jeho těžišti $I_{y,II,st}$ [m⁴]:

$$I_{y,II,st} = \frac{1}{3} b \cdot x_{i,II,st}^3 + \alpha_{e,st} \cdot A_s \cdot (d - x_{i,II,st})^2 \quad (21)$$

Pro výslednou křivost od zatížení je nutné spočítat ohybovou poddajnost průřezu s trhlinou při krátkodobém působení $C_{II,st}$ [kN⁻¹m⁻²]

$$C_{II,st} = \frac{1}{E_{c,eff,st} \cdot I_{y,II,st}} \quad (22)$$

Křivost krátkodobá od kvazistálé kombinace se spočte z momentu od kvazistálé kombinace, ohybových poddajností s a bez trhlín a součinitele vyjadřujícího tahové zpevnění. Součinitel je omezen zdola hodnotou 0,5 z důvodu, aby byla při výpočtu průhybu od kvazistálého zatížení zohledněna skutečnost, že průřez může být potrhán od vyšších kombinací zatížení.

$$\left(\frac{1}{r_m} \right)_{g,st} = M_{gk} [(1 - \zeta_{g,st}) \cdot C_{I,st} + \zeta_{g,st} \cdot C_{II,st}] \quad (23)$$

Kde $C_{I,st}$ je ohybová poddajnost průřezu bez trhlín při krátkodobém působení [kN⁻¹m⁻²]

$C_{II,st}$ je ohybová poddajnost průřezu s trhlinami při krátkodobém působení [kN⁻¹m⁻²]

$\zeta_{g,st}$ je součinitel vyjadřující tahové zpevnění [-]

M_{gk} je ohybový moment od kvazistálé kombinace zatížení [kNm]

$\left(\frac{1}{r_m} \right)_{g,st}$ je krátkodobá křivost od kvazistálé kombinace [m⁻¹]

Pro výpočet krátkodobé křivosti je nutné spočítat součinitel tahového zpevnění, závislý na kritickém momentu a momentu od zatížení v kvazistálé kombinaci.

$$\zeta_{g,st} = 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_{gk}} \right)^2 \geq 0,5 \quad (24)$$

Kde $\zeta_{g,st}$ je součinitel vyjadřující tahové zpevnění při kvazistálé kombinaci[-]

β je součinitel zohledňující krátkodobé či dlouhodobé zatížení, kdy $\beta=0,5$ pro dlouhodobé a $\beta=1,0$ pro krátkodobé působení [-]

M_{gk} je ohybový moment při kvazistálé kombinaci [kNm]

$M_{cr,st}$ je kritický ohybový moment [kNm]

Průhyb od kvazistálé kombinace s krátkodobým působením zatížení se spočte jako

$$f_{g,st} = k \cdot l^2 \cdot \left(\frac{1}{r_m} \right)_{g,st} \leq f_{g,lim} = \frac{L}{250} \quad (25)$$

Kde $\left(\frac{1}{r_m} \right)_{g,st}$ je krátkodobá křivost od kvazistálé kombinace [m^{-1}]

l je rozpětí prvku [m]

k je součinitel zohledňující průběh ohybového momentu a způsob podepření, str.42 [8]

$f_{g,st}$ je průhybu nosníku od krátkodobého zatížení při kvazistálé kombinaci [m]

3.2.3 Dlouhodobé působení bez trhlin

Pro dlouhodobé působení je nutné určit součinitel h_0 (nazývaný též náhradní tloušťka), který vyjadřuje poměr dvojnásobku plochy betonového průřezu k obvodu prvku, který je vystaven okolnímu prostředí.

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u} \quad (26)$$

Kde A_c je průřezová plocha [m^2]

u je obvod konstrukce v kontaktu se vzduchem [m]

h_0 je jmenovitý rozměr [m]

Stejně jako u krátkodobého působení zatížení je nutné spočítat efektivní modul pružnosti betonu, u kterého se na rozdíl od krátkodobého působení uvažuje součinitel dotvarování ϕ , kterým se zohledňují dlouhodobé účinky zatížení na konstrukci. Je odečten z tabulky anebo ho lze určit pomocí programu Creep 3000 [13]

$$E_{c,eff,lt} = \frac{E_{cm}}{1+\phi} \quad (27)$$

Kde $E_{c,eff,lt}$ je efektivní modul pružnosti betonu při dlouhodobém působení zatížení [MPa]
 Φ je součinitel dotvarování [-] – výpočet v programu Creep 3000 [13]

Pracovní součinitel pro dlouhodobé působení $\alpha_{e,lt}$ [-] slouží pro převod modulu pružnosti oceli na modul pružnosti betonu.

$$\alpha_{e,lt} = \frac{E_s}{E_{c,eff,lt}} \quad (28)$$

Pro výpočet výšky tlačené části průřezu bude využita součtová podmínka rovnováhy v betonovém průřezu. V průřezu bez trhlin je uvažováno působení tlačného betonu, taženého betonu a tažené výztuže (pokud je v průřezu tlačná výztuž, je uvažována v podmínce na stejné straně jako tlačný beton).

$$F_{cc} + (-F_{ct}) + (-F_{s1}) = 0 \quad (29)$$

$$\frac{1}{2}b \cdot x_{i,I,lt}^2 = \frac{1}{2}b \cdot (h - x_{i,I,lt})^2 + \alpha_e \cdot A_s \cdot (d - x_{i,I,lt}) \quad (30)$$

Kde $x_{i,I,lt}$ je výška tlačené oblasti v průřezu bez trhlin při dlouhodobém působení zatížení [m]
 Ostatní symboly byly definovány v předchozích kapitolách

Pro výpočet momentu setrvačnosti ideálního průřezu bez trhlin je důležitá vzdálenost neutrální osy od těžiště betonového průřezu $a_{i,I,st}$ [-]:

$$a_{i,I,lt} = x_{i,I,lt} - \frac{h}{2} \quad (31)$$

Pro další výpočty je nutné určit moment setrvačnosti ideálního průřezu bez trhlin při dlouhodobém působení k jeho těžišti $I_{y,I,lt}$ [m⁴]:

$$I_{y,I,lt} = \frac{1}{12}b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot a_{i,I,lt}^2 + \alpha_{e,lt} \cdot A_{s,prov} \cdot (d - x_{i,I,lt})^2 \quad (32)$$

Ohybová poddajnost průřezu bez trhlin při dlouhodobém působení $C_{I,lt}$ [kN⁻¹m⁻²] se vypočte dle následujícího vzorce.

$$C_{I,lt} = \frac{1}{E_{c,eff,lt} \cdot I_{y,I,lt}} \quad (33)$$

Kritický moment slouží pro ověření, zda budou v určitých kombinacích vznikat trhliny. V tomto případě bude sloužit pro ověření, zda budou vznikat trhliny v časté kombinaci. Pokud je kritický moment menší, než moment od zatížení v dané kombinaci, v průřezu budou vznikat trhliny.

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq f_{ctm} \quad (34)$$

$$M_{cr,lt} = f_{ctm} \cdot \frac{I_{y,lt}}{h - x_{i,lt}} \quad (35)$$

$$M_{fk} \geq M_{cr,lt} \quad (36)$$

Kde M_{fk} je ohybový moment při časté kombinaci [kNm]

$M_{cr,lt}$ je kritický ohybový moment při dlouhodobém působení [kNm]

3.2.4 Dlouhodobé působení s trhlinami

Pokud výpočtem zjistíme, že v průřezu vzniknou trhliny, musíme stanovit průřezové charakteristiky průřezu s trhlinami. Pro výpočet dlouhodobého působení s trhlinami jsou materiálové charakteristiky jako modul pružnosti, pracovní součinitel α_e stejné jako v dlouhodobém působení bez trhlín. Mění se součtová podmínka, ze které vyjadřujeme výšku tlačené oblasti betonového průřezu. Při působení průřezu s trhlinami se neuvažuje tažená část betonu. V podmínce jsou uvažovány pouze tlačená část betonu a tažená výztuž. Pokud je v průřezu tlačená výztuž, přičítá se na stranu tlačného betonu. Z podmínky vyjádříme výšku tlačené oblasti v průřezu s trhlinami při dlouhodobém působení zatížení $x_{i,lt}$ [m]:

$$x_{i,lt} = \frac{\alpha_{e,lt} \cdot A_s}{b} \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2b \cdot d}{\alpha_{e,lt} \cdot A_s}} \right) \quad (37)$$

Pro působení s trhlinami se změní i moment setrvačnosti, ve kterém je uvažována pouze tlačená část betonu a tažená výztuž. Moment setrvačnosti ideálního průřezu s trhlinami při dlouhodobém působení k jeho těžišti $I_{y,lt}$ [m⁴]:

$$I_{y,lt} = \frac{1}{3} b \cdot x_{i,lt}^3 + \alpha_{e,lt} \cdot A_s \cdot (d - x_{i,lt})^2 \quad (38)$$

Pro výslednou křivost od zatížení je nutné spočítat ohybovou poddajnost průřezu s trhlinou při dlouhodobém působení $C_{II,lt}$ [kN⁻¹m⁻²]

$$C_{II,lt} = \frac{1}{E_{c,eff,lt} \cdot I_{y,lt}} \quad (39)$$

Křivost dlouhodobá od kvazistálé kombinace se spočte z momentu od kvazistálé kombinace, ohybových poddajností s a bez trhlín a součinitele vyjadřujícího tahové zpevnění.

$$\left(\frac{1}{r_m} \right)_{g,lt} = M_{gk} [(1 - \zeta_{g,lt}) \cdot C_{I,lt} + \zeta_{g,lt} \cdot C_{II,lt}] \quad (40)$$

Kde $\zeta_{g,lt}$ je součinitel vyjadřující tahové zpevnění [-]

M_{gk} je ohybový moment od kvazistálé kombinace zatížení [kNm]

$\left(\frac{1}{r_m} \right)_{g,lt}$ je dlouhodobá křivost od kvazistálé kombinace [m⁻¹]

Pro výpočet dlouhodobé křivosti je nutné spočítat součinitel tahového zpevnění, závislý na kritickém momentu a momentu od zatížení v kvazistálé kombinaci.

$$\zeta_{g,lt} = 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr,lt}}{M_{gk}} \right)^2 \geq 0,5 \quad (41)$$

Kde $\zeta_{g,lt}$ je součinitel vyjadřující tahové zpevnění při kvazistálé kombinaci [-]

β je součinitel zohledňující krátkodobé či dlouhodobé zatížení, kdy $\beta=0,5$ pro dlouhodobé a $\beta=1,0$ pro krátkodobé působení [-]

M_{gk} je ohybový moment při kvazistálé kombinaci [kNm]

$M_{cr,lt}$ je kritický ohybový moment [kNm]

Průhyb se následně spočte dle vztahu (25), s uvážením dlouhodobé křivosti spočtené ze vztahu (41).

3.2.5 Poměrné smrštění

Poměrné smrštění od vysychání se spočte ze vztahu:

$$\varepsilon_{cd} = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} \quad (42)$$

Kde $\beta_{ds}(t, t_s)$ je součinitel trvání smršťování [-], viz vztah (44)

k_h je součinitel závisící na náhradní tloušťce h_0 – tabulka 3.3 na str. 36 [1]

$\varepsilon_{cd,0}$ je základní poměrné přetvoření vysycháním [-], viz vztah (45)

ε_{cd} je poměrné smršťování vysycháním [-]

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t-t_s)}{(t-t_s)+0,04\sqrt{(h_0)^3}} \quad (43)$$

Kde t je stáří betonu v uvažovaném okamžiku [dny]

t_s je stáří betonu na začátku vysychání [dny]

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) e^{\left(-\alpha_{ds2} \frac{f_{ctm}}{f_{cm0}} \right)} \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH} \quad (44)$$

Kde α_{ds1} je součinitel závislý na druhu cementu [-], hodnota na str. 181 [1],

α_{ds2} je součinitel závislý na druhu cementu [-], hodnota na str. 182 [1],

f_{ctm} je střední hodnota tahové pevnosti betonu [MPa]

f_{cm0} je referenční pevnost betonu [MPa], $f_{cm0} = 10$ MPa

β_{RH} je součinitel relativní vlhkosti prostředí [-], viz vztah (46)

$\varepsilon_{cd,0}$ je základní poměrné přetvoření vysycháním [-]

$$\beta_{RH} = 1,55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] \quad (45)$$

Kde RH je relativní vlhkost prostředí [%]
 RH₀ je prostředí plně nasycené vodní párou [%]

Poměrné autogenní smrštění se spočte dle vztahu

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty) \quad (46)$$

Kde $\varepsilon_{ca}(\infty)$ je poměrné smrštění na konci životnosti konstrukce [-]
 $\beta_{as}(t)$ je koeficient dle vztahu (49) [-]
 $\varepsilon_{ca}(t)$ je poměrné smrštění v čase t [-]

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad (47)$$

Kde $\varepsilon_{ca}(\infty)$ je poměrné smrštění na konci životnosti konstrukce [-]
 f_{ck} je charakteristická pevnost betonu [MPa]

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{(-0,2 \cdot t^{0,5})} \quad (48)$$

Kde $\beta_{as}(t)$ je koeficient pro výpočet hodnoty autogenního smrštění
 t je čas na konci životnosti konstrukce [dny]

Celkové poměrné smrštění se spočte jako součet poměrného smrštění od vysychání a autogenního smrštění.

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad (49)$$

Kde ε_{cd} je poměrné smrštění vysycháním [-]
 ε_{ca} je poměrné autogenní smrštění [-]
 ε_{cs} je celkové poměrné smrštění [-]

3.2.6 Křivost od smršťování

Pro výpočet křivosti od smršťování jsou důležité statické momenty betonářské výztuže S_{s0} [m³] a betonového průřezu bez trhliny S_{c0} [m³].

$$S_{s0} = A_{s1} \cdot d_1 + A_{s2} \cdot d_2 \quad (50)$$

$$S_{c0} = A_c \cdot \frac{h}{2} = b \cdot h \cdot \frac{h}{2} \quad (51)$$

Kde A_{s1} je plocha tažené výztuže [m²]

A_{s2} je plocha tlačené výztuže [m²]

d_1 je vzdálenost tažené výztuže od horní hrany průřezu [m]

d_2 je vzdálenost tlačené výztuže od horní hrany průřezu [m]

Vzdálenost neutrálné osy od horní hrany ideálního průřezu a_{gi} [m] bude vypočtena ze statických momentů a plochy ideálního průřezu.

$$a_{gi} = \frac{S_{c0} + \alpha_{e.lt} \cdot S_{s0}}{A_i} \quad (52)$$

Plocha ideálního průřezu A_i [m²] je plocha, která je složená z plochy betonu a plochy oceli, převedené pomocí součinitel α_e na plochu betonu.

$$A_i = A_c + \alpha_{e.lt} \cdot (A_{s1} + A_{s2}) \quad (53)$$

Kde A_c je průřezová plocha betonu [m²]

Křivost od smršťování na prvku bez trhlin [m⁻¹]

$$\left(\frac{1}{r_m}\right)_{cSI} = \varepsilon_{cs} \cdot \alpha_{e.lt} \cdot \frac{S_{s0} - (A_{s1} + A_{s2}) \cdot a_{gi}}{I_{y,II,lt}} \quad (54)$$

Křivost od smršťování na prvku s trhlinami [m⁻¹]

$$\left(\frac{1}{r_m}\right)_{cSII} = \varepsilon_{cs} \cdot \alpha_{e.lt} \cdot \frac{S_{s0} - (A_{s1} + A_{s2}) \cdot x_{i,II,lt}}{I_{y,II,lt}} \quad (55)$$

Celková křivost od smršťování [m⁻¹]

$$\left(\frac{1}{r_m}\right)_{cs} = (1 - \zeta_{cs}) \cdot \left(\frac{1}{r_m}\right)_{cSI} + \zeta_{cs} \cdot \left(\frac{1}{r_m}\right)_{cSII} \quad (56)$$

Kde ζ_{cs} je součinitel tahového zpevnění [-]

Součinitel tahového zpevnění se spočte ze vztahu:

$$\zeta_{cs} = 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr,lt}}{M_{gk}} \right)^2 \geq 0,5 \quad (57)$$

Kde β je součinitel zohledňující krátkodobé či dlouhodobé zatížení, kdy $\beta=0,5$ pro dlouhodobé a $\beta=1,0$ pro krátkodobé působení [-]

M_{gk} je ohybový moment při kvazistálé kombinaci [kNm]

$M_{cr,lt}$ je kritický ohybový moment [kNm]

3.2.7 Stanovení celkového průhybu

Dlouhodobý průhyb od kvazistálé kombinace se stanoví jako:

$$f_{g,lt} = k \cdot l^2 \cdot \left(\frac{1}{r_m} \right)_{g,lt} \quad (58)$$

Kde l je rozpětí prvku [m]

k je součinitel zohledňující průběh momentu a způsob podepření 2.9 str. 42 [8]

$\left(\frac{1}{r_m} \right)_{g,lt}$ je dlouhodobá křivost od kvazistálé kombinace [m^{-1}]

$f_{g,lt}$ je průhybu nosníku od dlouhodobého zatížení při kvazistálé kombinaci [m]

Dlouhodobý průhyb od smršťování se spočte jako:

$$f_{cs,lt} = k_{cs} \cdot l^2 \cdot \left(\frac{1}{r_m} \right)_{cs} \quad (59)$$

Kde l je rozpětí prvku [m]

k_{cs} je součinitel zohledňující působení zatížení, viz tabulka 1 převzatá z [8]

$\left(\frac{1}{r_m} \right)_{cs}$ je dlouhodobá křivost od smršťování [m^{-1}]

$f_{sc,lt}$ je průhybu nosníku od dlouhodobého smršťování [m]

Celkový dlouhodobý průhyb f_{lt} se spočte jako součet průhybu od zatížení a průhybu od smršťování

$$f_{lt} = f_{g,lt} + f_{cs,lt} \quad (60)$$

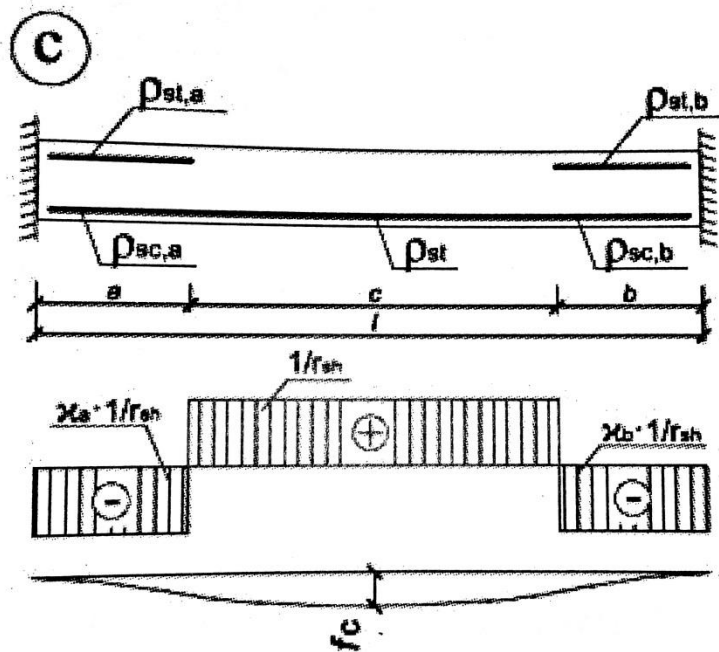
Následující tabulka slouží pro určení koeficientu k_{cs} , který je potřebný k výpočtu průhybu od smršťování. Koeficient k_{cs} se určí dle statického schématu prvku, dle poměru křivostí v rozhodujících průřezech (κ_a, κ_b), a dle délek oblastí, na kterých je křivost kladná nebo záporná ($a/l, b/l$).

Tabulka 1 Tabulka pro určení koeficientu k_{cs} [8].

$\frac{a}{l}, \left(\frac{b}{l}\right)$	$\kappa_a, (\kappa_b)$						
		$\frac{c}{l}$	$\frac{c}{l}$	$\frac{c}{l}$	$\frac{c}{l}$	$\frac{c}{l}, \frac{d}{l}$	
0,15	0,8	0,125	0,1048	0,1149	0,0473	0,0680	0,0700
	1,0		0,1025	0,1138	0,0525	0,0720	0,0739
	1,2		0,1003	0,1126	0,0578	0,0761	0,0778
0,20	0,8		0,0890	0,1070	0,0540	0,0740	0,0760
	1,0		0,0850	0,1050	0,0600	0,0788	0,0805
	1,2		0,0810	0,1030	0,0660	0,0835	0,0849
0,25	0,8		0,0688	0,0969	0,0563	0,0770	0,0790
	1,0		0,0625	0,0938	0,0625	0,0820	0,0837
	1,2		0,0563	0,0906	0,0688	0,0871	0,0884
0,30	0,8		0,0440	0,0845	0,0540	0,0768	0,0791
	1,0		0,0350	0,0800	0,0600	0,0819	0,0838
	1,2		0,0260	0,0755	0,0660	0,0869	0,0885
0,35	0,8	0,0148	0,0699	0,0473	0,0736	0,0767	
	1,0	0,0025	0,0638	0,0525	0,0819	0,0811	
	1,2	-0,0098	0,0576	0,0578	0,0869	0,0856	
0,40	0,8	-0,0190	0,0530	0,0360	0,0673	0,0721	
	1,0	-0,0350	0,0450	0,0400	0,0713	0,0761	
	1,2	-0,0510	0,0370	0,0440	0,0753	0,0800	

Poznámka:

Pokud je $a/l > 0,40$, je nutno součinitel dopočítat podle vztahů uvedených v [8]. Pro případy, kdy je výtěž horního povrchu shodná s výtěží spodního povrchu, platí $a/l = 0,5$ a $k_{cs} = 0$, jak ukazuje následující příklad výpočtu součinitele k_{cs} pro nosník o jednom poli oboustranně vetknutý – schéma viz následující obrázek.



Obrázek 3 Schéma nosníku pro výpočet příkladu když $a/l > 0$ [8]

$$k_{CS} = \frac{1}{8} \cdot \left[\frac{a}{l} \left(1 - \frac{2a}{l} \right) \cdot (1 + \kappa_a) + \frac{b}{l} \left(1 - \frac{2b}{l} \right) \cdot (1 + \kappa_b) \right] =$$

$$\frac{1}{8} \cdot [0,5(1 - 2 \cdot 0,5) \cdot (1 + \kappa_a) + 0,5(1 - 2 \cdot 0,5) \cdot (1 + \kappa_b)] = 0 \quad (61)$$

3.3 Postup výpočtu vyztužení desky

V práci budou analyzovány čtyři typy stropních desek definované v kapitole 4.1. Tato kapitola shrnuje obecné postupy použité pro jejich návrh.

3.3.1 Předběžný návrh desky

Pro předběžný návrh stropní konstrukce bude využito empirických vztahů pro výpočet tloušťky desky. Empirické vzorce zohledňují uložení stropní desky.

$$\text{Prosté uložení:} \quad h = \left(\frac{l}{25} \sim \frac{l}{20} \right) \quad (62)$$

$$\text{Vetknutí nebo spojitě desky:} \quad h = \left(\frac{l}{35} \sim \frac{l}{30} \right) \quad (63)$$

$$\text{Lokálně podepřená obousměrně pnutá deska:} \quad h = 1,1 \frac{l_{max}}{33} \quad (64)$$

Kde l znamená rozpětí desky [mm]

3.3.2 Výpočet zatížení

Výpočet zatížení je velice důležitý pro návrh a následné vyztužení desky. Do zatížení stropních desek bude započítáno zatížení od vlastní tíhy konstrukce, ostatní stálé zatížení (podlahy, příčky, atd.) a proměnné zatížení, které je definováno v normě ČSN EN 1991-1-1. Pro přehlednost bude výpočet zatížení uveden v tabulce. Jelikož se tato práce zabývá průhyby stropních desek, výsledné zatížení je uváděno v jednotkách kN/m². Pro návrhové hodnoty zatížení budou použity součinitele spolehlivosti pro stálé zatížení $\gamma_g=1,35$ a $\gamma_q=1,5$. Vzhledem k zanedbatelnosti příspěvku k zatížení jsou ve výpočtech zatížení vynechány tenké podlahové vrstvy např. hydroizolace.

Tabulka 2 Výpočet zatížení stropních konstrukcí

Popis	tloušťka konstrukce [mm]	objem. hmot- nost [kN/m ³]	char. zatížení [kN/m ²]	součinitel zatíže- ní [-]	návrh. zatížení [kN/m ²]
Vlastní tíha					
ŽB deska	200	25	5	1,35	6,750
Ostatní stálé zatížení					
Laminátová podlaha	8	9,4	0,075	1,35	0,102
Tlumící podložka	5	0,48	0,002	1,35	0,003
Roznášecí betonová mazanina	50	25	1,250	1,35	1,688
tepelná izolace	40	1,1	0,044	1,35	0,059
SDK příčky – náhr.plošné zat.			1,400	1,35	1,890
		$g_{0,k}+g_{ost,k}$ [kN/m ²]=	7,77	$g_{0,d}+g_{ost,d}$ [kN/m ²]=	10,492
		$g_{ost,k}$ [kN/m ²]=	2,77	$g_{ost,d}$ [kN/m ²]=	3,742
Nahodilé zatížení					
Kancelář. prostory-kat. B			2,5	1,5	3,75
		q_k [kN/m ²]=	2,50	q_d [kN/m ²]=	3,75

Pro další výpočty je důležité určit i kombinace zatížení [9]. Pro tento výpočet je důležitá kombinace kvazistálá. Tato kombinace zatížení se na konstrukci vyskytuje ze všech kombinací nejčastěji, je překročena v 50% referenční doby a užívá se pro ověření dlouhodobých účinků a vzhledu konstrukce – např. velikost průhybu, šířka trhlin.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{j \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (65)$$

Kde $G_{k,j}$ je charakteristická hodnota stálého zatížení

P je zatížení předpětím

$Q_{k,i}$ je charakteristická hodnota nahodilého zatížení

$\psi_{2,i}$ je kombinační součinitel pro určitý druh zatížení, uvedeno v normě ČSN EN 199-1-1

$\sum_{j \geq 1}$ je kombinovaný účinek zatížení, pokud je více než jedno zatížení

Další ověřovanou kombinací bude kombinace častá. Tato kombinace překročí hodnotu zatížení pouze v 1% referenční doby zatížení. V tomto případě bude použita pro zjištění, zda na konstrukci vzniknou trhliny. Kombinace se obecně užívá pro vratné mezní stavy.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + "\psi_{1,1} Q_{k,1}" + "\sum_{j \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (66)$$

- Kde $G_{k,j}$ je charakteristická hodnota stálého zatížení
 P je zatížení předpětím
 $Q_{k,1}$ je hlavní nahodilé zatížení v charakteristické hodnotě
 $Q_{k,i}$ je charakteristická hodnota nahodilého zatížení
 $\psi_{1,1}$ je kombinační součinitel pro určitý druh zatížení [9]
 $\psi_{2,i}$ je kombinační součinitel pro určitý druh zatížení [9]
 $\sum_{j \geq 1}$ je kombinovaný účinek zatížení, pokud je více než jedno zatížení

Poslední používanou kombinací je charakteristická kombinace. Tato kombinace se obecně používá pro nevratné mezní stavy. V této práci se nebude pro výpočty uvažovat.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + "Q_{k,1}" + "\sum_{j \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (67)$$

- Kde $G_{k,j}$ je charakteristická hodnota stálého zatížení
 P je zatížení předpětím
 $Q_{k,1}$ je hlavní nahodilé zatížení v charakteristické hodnotě
 $Q_{k,i}$ je charakteristická hodnota nahodilého zatížení
 $\psi_{0,1}$ je kombinační součinitel pro určitý druh zatížení [9]
 $\sum_{j \geq 1}$ je kombinovaný účinek zatížení, pokud je více než jedno zatížení

3.3.3 Výpočet vnitřních sil

Výpočet vnitřních sil pro desky o jednom poli bude určen ze vztahů uvedených níže.

Deska prostě uložená o jednom poli:

$$M_{Ed} = \frac{1}{8} \cdot f \cdot l^2 \quad (68)$$

Deska vetknutá o jednom poli:

$$\text{Moment nad podporou} \quad M_{Ed,sup} = \frac{1}{12} \cdot f \cdot l^2 \quad (69)$$

$$\text{Moment v poli} \quad M_{Ed,mid} = \frac{1}{24} \cdot f \cdot l^2 \quad (70)$$

Pro výpočet vnitřních sil na deskách o 3x3 polích bude použit program SCIA Engineer [14].
 Výsledky budou uvedeny v přílohách 3 a 4.

3.3.4 Výpočet hlavní nosné výztuže desky (trámu)

Vstupní parametry:

Profil hlavní nosné výztuže	\emptyset	10 mm	(Bude měněn dle okolností)
Profil rozdělovací výztuže	\emptyset_r	6 mm	(Bude měněn dle okolností)
Krytí	c	25 mm	
Pevnostní třída betonu	C30/37		
Ocel	B500B		

Pro výpočet výztuže je účinná výška průřezu důležitým parametrem, který určuje vzdálenost těžiště výztuže ke vzdálenější hraně průřezu.

$$d = h - c - \emptyset/2 \quad (71)$$

Kde h je výška desky [mm]

c je krytí výztuže [mm]

\emptyset je profil hlavní nosné výztuže [mm]

d je účinná výška průřezu [mm]

Součinitel μ slouží pro návrh ohybové výztuže. Součinitel μ je nutné určit pro získání hodnoty ζ z tabulky na str. 85 [10]

$$\mu = \frac{M_{Ed,max}}{b \cdot d^2 \cdot f_{c,d}} \quad (72)$$

Kde $M_{Ed,max}$ je maximální moment na konstrukci [Nmm]

$f_{c,d}$ je návrhová pevnost betonu [MPa]

Minimální požadovaná plocha ohybové výztuže je vypočtena z maximálního ohybového momentu, účinné výšky průřezu, charakteristické pevnosti betonářské výztuže a součinitele ζ .

$$A_{s,req} = \frac{M_{Ed,max}}{\zeta \cdot d \cdot f_{y,d}} \quad (73)$$

Kde ζ je poměr velikosti ramene vnitřních sil ku staticky účinné výšce průřezu (z/d)

Pro vyztužování desek jsou dány konstrukční zásady, které je nutno dodržovat. Omezují plochu výztuže a vzdálenost jednotlivých prutů výztuže. Konstrukční zásady vyplývají z požadavků na provádění betonových konstrukcí a ze základních vlastností betonu.

$$A_{s,min} = \max\left(\frac{0,26 \cdot f_{ctm} \cdot b \cdot d}{f_{y,d}}; 0,0013 \cdot d \cdot d\right) \quad (74)$$

Kde f_{ctm} je střední hodnota pevnosti v tahu [MPa]

$A_{s,min}$ je minimální průřezová plocha tažené výztuže [mm²]

$$A_{s,max} = 0,04 \cdot b \cdot d \quad (75)$$

Kde $A_{s,max}$ je maximální průřezová plocha výztuže [mm²]

$$s_{min} = \max(1,2 \cdot \varnothing; d_g + 5; 20) \quad (76)$$

Kde \varnothing je profil hlavní nosné výztuže [mm]

d_g je maximální velikost zrn použitého kameniva [mm]

s_{min} je minimální vzdálenost hlavní nosné výztuže [mm]

$$s_{max} = \min(2h; 300) \quad (77)$$

Kde s_{max} je maximální osová vzdálenost hlavní nosné výztuže [mm]

Výpočet výšky tlačené oblasti betonového průřezu vyplývá rovnováhy výsledných sil na průřezu.

$$x = \frac{A_{s,prov} \cdot f_{y,d}}{0,8 \cdot b \cdot f_{cd}} \quad (78)$$

Kde $A_{s,prov}$ je navržená průřezová plocha hlavní výztuže [mm²]

x je výška tlačené oblasti betonové průřezu [mm]

Rameno vnitřních sil je nutné spočítat pro následný výpočet momentu únosnosti. Jeho velikost je dána účinnou výškou průřezu a výškou tlačené oblasti.

$$z = d - 0,4 \cdot x \quad (79)$$

Kde z je rameno vnitřních sil [mm]

Výsledný moment únosnosti je dán plochou navržené výztuže, ramenem vnitřních sil a návrhovou hodnotou pevnosti oceli .

$$M_{R,d} = A_{s,prov} \cdot z \cdot f_{y,d} \quad (80)$$

Závěrem návrhu výztuže je posouzení, zda navržená výztuž vyhoví. Pokud je moment únosnosti větší $M_{R,d}$, než moment vyvolaný zatížením $M_{E,d}$, navržená výztuž vyhoví.

$$M_{E,d} \leq M_{R,d} \quad (81)$$

Pro další ověření, že je výztuž v mezím stavu únosnosti za mezí kluzu, slouží hodnota ξ .

$$\xi = \frac{x}{d} \leq \xi_{bal} = \min\left(\frac{700}{700+f_{y,d}}; 0,45\right) \quad (82)$$

Kde ξ je poměrná výška tlačené oblasti [-]

3.3.5 Výpočet smykové výztuže trámů

Pro jeden z typů zkoumaných stropních desek bude nutné stanovit vyztužení trámů podírajících desku, včetně vyztužení smykového. Vzájemná vzdálenost třmínků v podélném směru musí splňovat podmínku:

$$s \leq \frac{A_{sw} \cdot f_{yd} \cdot z \cdot \cot \theta}{V_{Ed}} \quad (83)$$

Kde s_1 je vzdálenost třmínků [mm]

z je rameno vnitřních sil [mm]

θ je úhel, který svírá hlavní tlaková diagonála betonu s vodorovnou osou [°]

A_{sw} je plocha smykové výztuže [mm²]

f_{yd} je návrhová pevnost oceli [MPa]

$V_{Ed,1}$ je posouvající síla [N]

Vzdálenost třmínků musí dále vyhovět konstrukční zásadě:

$$s \leq \min(0,75 \cdot d; 400\text{mm}) \quad (84)$$

Kde d je účinná výška průřezu [mm]

Smyková výztuž musí též splnit podmínky pro minimální a maximální stupeň smykového vyztužení průřezu:

$$\rho_{sw,min} = 0,8 \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \leq \rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b \cdot s} \leq \rho_{sw,max} = 0,5 \cdot \left(0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)\right) \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \quad (85)$$

Kde b je šířka trámu [mm]

f_{ck} je charakteristická pevnost betonu [MPa]

f_{cd} je návrhová pevnost betonu [MPa]

$\rho_{sw,min}$ je minimální stupeň vyztužení smykovou výztuží [-]

ρ_{sw} je skutečný stupeň vyztužení smykovou výztuží [-]

$\rho_{sw,max}$ je maximální stupeň vyztužení smykovou výztuží [-]

Konečná navržená výztuž musí splnit podmínku únosnosti:

$$V_{Rd,1} = \frac{A_{sw} \cdot f_{yd} \cdot z \cdot \cot \theta}{s_1} \quad (86)$$

Kde $V_{Rd,1}$ je návrhová hodnota únosnosti ve smyku posuzovaného průřezu [N]

3.3.6 Předběžné ověření na protlačení

U jednoho z posuzovaných typů desek bude předběžně posuzována konstrukce na protlačení z důvodu zachování realizovatelnosti konstrukce.

Z důvodu pnutí desky v obou směrech je nutné spočítat efektivní účinnou výšku:

$$d_{eff} = \frac{(d_x + d_y)}{2} \quad (87)$$

Kde d_x je účinná výška výztuže ve směru x [mm]

d_y je účinná výška výztuže ve směru y [mm]

d_{eff} je efektivní účinná výška výztuže [mm]

Pro protlačení je nutné stanovit kontrolované obvody, ve kterých se posuzuje napětí, kterým je daný obvod namáhaný. Standardně jsou posuzovány dva kontrolované obvody, pokud by nevyhověl vnější obvod, je nutno posuzovat i další kontrolovaný obvod.

$$u_0 = 2 \cdot (b_s + h_s) \quad (88)$$

Kde u_0 je základní kontrolovaný obvod, který je roven obvodu sloupu [mm]

b_s je rozměr sloupu ve směru x [mm]

h_s je rozměr sloupu ve směru y [mm]

$$u_1 = 2 \cdot (b_s + h_s) + 2 \cdot \pi \cdot (2 \cdot d_{eff}) = \quad (89)$$

Kde u_1 je základní kontrolovaný obvod ve vzdálenosti $2 \cdot d_{eff}$ od hran sloupu [mm]

$$v_{Ed,i} = \beta \cdot \frac{V_{Ed}}{u_i d_{eff}} \quad (90)$$

Kde $v_{Ed,i}$ je napětí, které je způsobeno namáháním průřezu posouvající silou v místě sloupu [MPa]

β je součinitel zohledňující rozdělení napětí podél kontrolovaného obvodu, který má doporučenou hodnotu 1,15 pro vnitřní sloup [-], uvedeno v [1]

V_{Ed} je posouvající síla rovná reakci v místě sloupu [Nmm]

u_i je kontrolovaný obvod [mm]

$$v_{Rd,max} = 0,4 \cdot \left(0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \right) \cdot f_{cd} \quad (91)$$

Kde $v_{Rd,max}$ je návrhová hodnota maximální únosnosti ve smyku při porušení tlačené diagonály [MPa]

f_{ck} je charakteristická pevnost betonu v tlaku [MPa]

f_{cd} je návrhová pevnost betonu v tlaku [MPa]

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d_{eff}}} \right) \cdot \sqrt[3]{100 \cdot \sqrt{\rho_{lx} \cdot \rho_{ly}} \cdot f_{ck}} \quad (92)$$

Kde $v_{Rd,c}$ je návrhová hodnota únosnosti ve smyku při protlačení desky bez smykové výztuže na protlačení v uvažovaném kontrolovaném průřezu [MPa]

$C_{Rd,c}$ je koeficient roven hodnotě $0,18/1,5=0,12$ [-]

ρ_{lx} je stupeň vyztužení ve směru x [-]

ρ_{ly} je stupeň vyztužení ve směru y [-]

Napětí v základním kontrolovaném obvodu se musí posoudit, zda vyhoví na maximální únosnost při porušení tlačené diagonály:

$$v_{Ed,0} \leq v_{Rd,max} \quad (93)$$

Napětí v dalším kontrolovaném obvodu musí být menší, než redukovaná návrhová hodnota únosnosti ve smyku při protlačení:

$$v_{Ed,1} \leq k_{max} \cdot v_{Rd,c} \quad (94)$$

Kde: k_{max} je redukční součinitel, který pro hodnotu $h=200$ mm je roven 1,45 a pro $h \geq 700$ mm je roven 1,7 [1]

Pokud jsou obě tyto podmínky splněny, konstrukce lze vyztužit smykovou výztuží na protlačení.

4 Parametry pro výpočty konstrukcí

V této kapitole budou popsány typy desek, které jsou zvoleny pro následující výpočty. Typy stropních desek jsou voleny s ohledem na nejčastější řešení zastropení různých typů provozů. Pro následující výpočty byly voleny parametry pro administrativní budovu.

Pro možnost porovnání výsledků jsou čtyři typy desek, které se dají rozdělit do dalších dvou podskupin. Podskupina má vždy stejný rozpon desky a liší se v uložení.

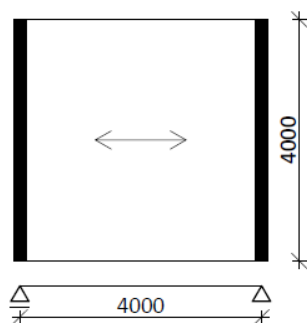
V prvních dvou případech se jedná o desky jednosměrně pnuté s rozponem 4 metry. Deska č.1 je prostě uložená, deska č.2 je na dvou okrajích vetknutá. Tloušťky desek jsou počítány z empirických vzorců [11]. U obou těchto desek jsou vnitřní síly spočteny dle jednoduchých vzorců, které jsou uvedeny v [12]. Pro vyztužení a výpočet průhybu je použit program Microsoft Excel [15]. Postup výpočtů je uveden v kapitole 3.

Druhou podskupinu tvoří desky č.3 a 4, které jsou obousměrně pnuté. Rozpon těchto desek je volen 7 metrů. Deska č.3 je lokálně podepřená. Podpory jsou uvažovány sloupové s rozměrem sloupu 400x400 mm. V tomto případě uložení je zohledněn předběžný výpočet na protlačení, který zajistí reálnou tloušťku desky. Deska č.4 je zvolena jako po obvodě podepřená průvlakou, které nejsou hlavní náplní této bakalářské práce. Rozměry průvlaků budou určeny dle empirických vzorců [11]. U těchto prvků bude spočtena a navržena hlavní nosná a smyková výztuž, která je nutná pro další výpočty v programu SCIA Engineer [14]. Podepření průvlaků je uvažováno sloupy o rozměrech 350x350 mm. Vyztužení jednotlivých prvků, předběžné posouzení na protlačení, posouzení ohybové štíhlosti a výpočty průhybu od smrštění budou provedeny v programu Microsoft Excel [15]. Vnitřní síly a průhyby bez započítání průhybu od smrštění budou počítány v programu SCIA Engineer [14].

Výsledky jednotlivých výpočtů budou uvedeny v přílohách. Čísla desek odpovídají číslům příloh. Součástí příloh budou i výstupy z programu SCIA Engineer [14].

4.1 Typy desek

4.1.1 Deska jednosměrně pnutá - prostě uložená



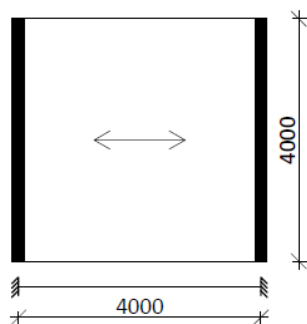
Rozpětí: 4000 mm

Tloušťka: viz vzorec (62) $h = \left(\frac{4000}{25} \sim \frac{4000}{20}\right) = (160 \sim 200)$
mm $\Rightarrow h = 200$ mm

Výpočet vnitřních sil: dle vzorce (68)

Obrázek 4 Schéma desky č.1

4.1.2 Deska jednosměrně pnutá - vetknutá



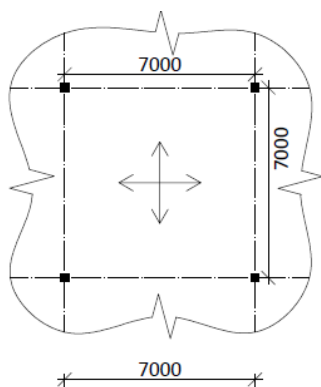
Rozpětí: 4000 mm

Tloušťka: viz vzorec (63) $h = \left(\frac{4000}{35} \sim \frac{4000}{30}\right) = (114 \sim 133)$
mm $\Rightarrow h = 120$ mm

Výpočet vnitřních sil: dle vzorců (69) a (70)

Obrázek 5 Schéma desky č.2

4.1.3 Deska obousměrně pnutá - lokálně podepřená - 3x3 pole



Rozpětí: 7000 mm

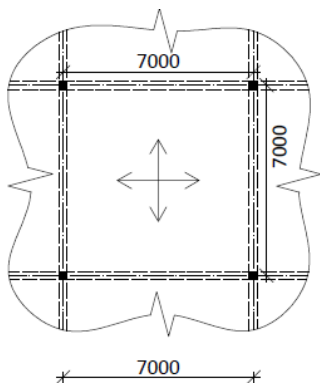
Tloušťka: viz vzorec (64) $h = 1,1 \frac{7000}{33} = 233$ mm $\Rightarrow h = 260$ mm \Rightarrow Tloušťka desky je upravena s ohledem na předběžný výpočet protlačení, který je uveden v příloze č.3.

Výpočet vnitřních sil: viz příloha č.3 - program SCIA Engineer

Obrázek 6 Schéma desky č.3

[14]

4.1.4 Deska obousměrně pnutá – po obvodě nepoddajně podepřená – 3x3 pole



Obrázek 7 Schéma desky č.4

Rozpětí: 7000 mm

Tloušťka: viz vzorec (63) $h = \left(\frac{7000}{35} \sim \frac{7000}{30}\right) = (200 \sim 233)$ mm $\Rightarrow h = 210$ mm

Výška průvzlaku: $h_p = \left(\frac{L}{12} \sim \frac{L}{10}\right) = \left(\frac{7000}{12} \sim \frac{7000}{10}\right) = (583 \sim 700)$ mm $\Rightarrow h = 210$ mm

Šířka průvzlaku: $b_p = \left(\frac{h_p}{3} \sim \frac{2 \cdot h_p}{3}\right) = \left(\frac{700}{3} \sim \frac{2 \cdot 700}{3}\right) = (233 \sim 467)$ mm $\Rightarrow b_t = 350$ mm

Výpočet vnitřních sil: viz příloha č.4 - program SCIA Engineer [14]

4.2 Zatížení desek

Zatížení vlastní tíhou bude záležet na tloušťce desky, která je proměnná ve čtyřech určitých případech desek, které jsou popsány v kapitole 4.1. Ostatní stálé zatížení a proměnné zatížení bude uvažováno vždy stejnou hodnotou stanovenou v kapitole 3.3.2 z důvodu srovnatelnosti výpočtů.

4.3 Ostatní vstupní parametry

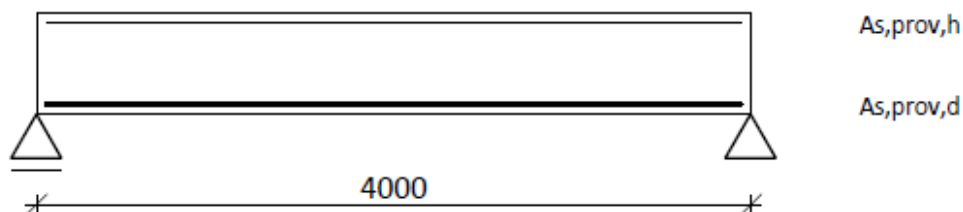
Pro výpočty jsou určující další parametry pro výpočty, které nebyly zmíněny v odstavcích výše. Jedná se o materiálové charakteristiky betonu. Pro přehlednost budou vypsány v následujícím odstavci.

Beton	C30/37	$f_{ck} = 30$ MPa, $f_{cd} = 30/1,5 = 20$ MPa $f_{ctm} = 2,9$ MPa $E_{cm} = 32$ GPa $d_g = \max 16$ mm $f_{cm} = 38$ MPa $f_{cm0} = 10$ MPa cement – typ R – 350 kg/m ³ $v/c = 0,40$
Ocel	B500B	$f_{yk} = 500$ MPa, $f_{yd} = 500/1,15 = 434,8$ MPa $E_s = 200$ GPa

4.4 Vyztužení stropních desek

Výpočet vyztužení stropních desek byl proveden dle postupu uvedeného v odstavci 3.3.4. K výpočtu byl použit program Microsoft Excel [15] a podrobné výsledky jsou uvedeny v přílohách 1-4. Na následujících schématech je uvedeno vyztužení sledovaných částí jednotlivých desek pro základní variantu definovanou v kapitole 4.5.

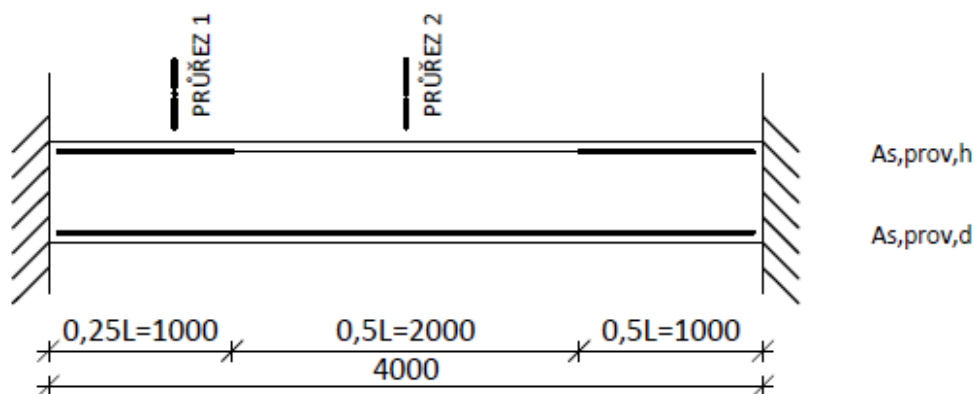
4.4.1 Výztuž desky jednosměrně pnuté prostě podepřené



Obrázek 8 Schéma vyztužení desky jednosměrně pnuté prostě podepřené v řezu

Schéma vyztužení je patrné z obrázku 8. Vyztužení je navrženo profily 10 mm po 100 mm při dolním povrchu ($A_{s,prov,d}$) a profily 8 mm po 150 mm při horním povrchu ($A_{s,prov,h}$). Výztuž při horním povrchu je pouze konstrukční.

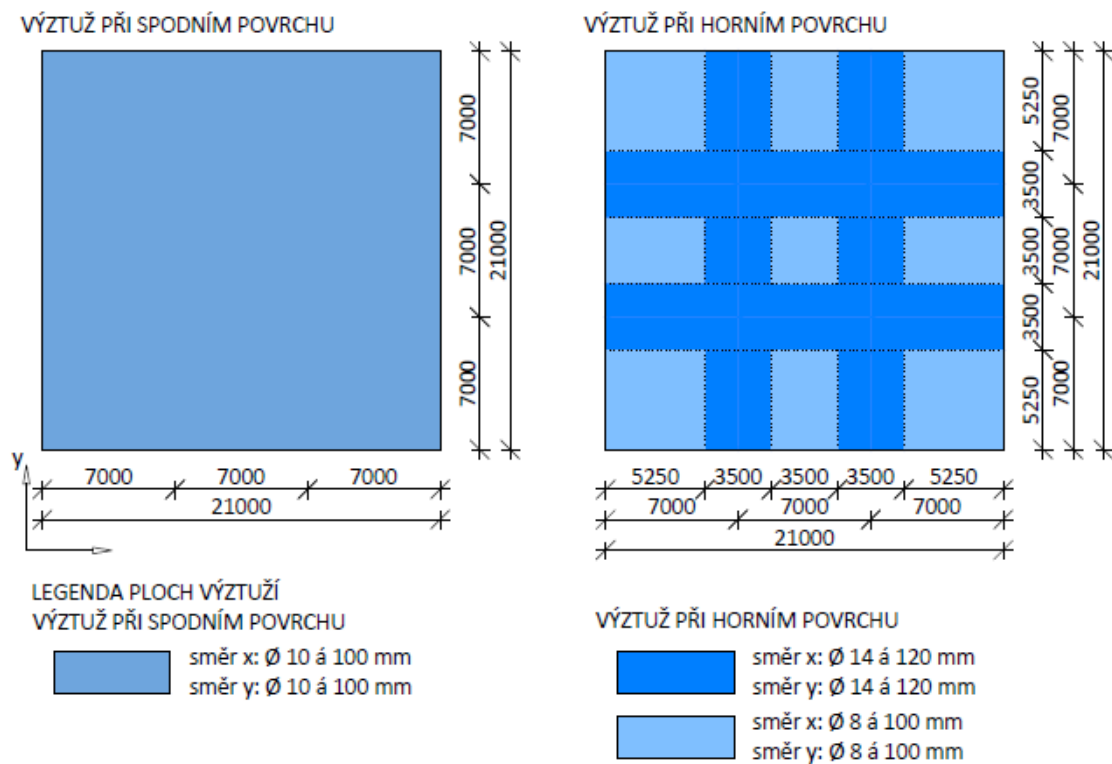
4.4.2 Výztuž desky jednosměrně pnuté vetknuté



Obrázek 9 Schéma vyztužení desky jednosměrně pnuté vetknuté v řezu

Schéma vyztužení je uvedeno na obrázku 9. V průřezu 1 jsou navrženy profily 8 mm po 100 mm při horním povrchu ($A_{s,prov,h}$) a v průřezu 2 jsou navrženy profily 6 mm po 150 mm při horním povrchu ($A_{s,prov,h}$). V průřezu 2 je horní vyztuž pouze konstrukční. Při spodním povrchu jsou v celé ploše desky navrženy profily 8 mm po 150 mm ($A_{s,prov,d}$).

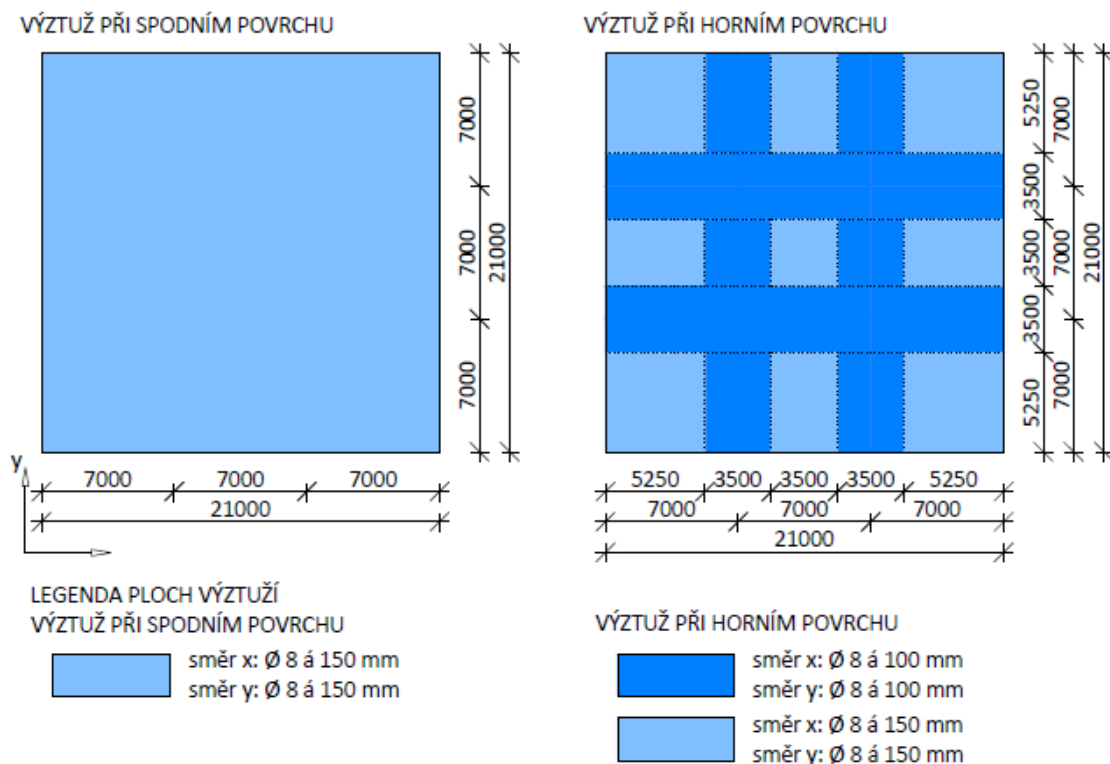
4.4.3 Výztuž desky obousměrně pnuté lokálně podepřené



Obrázek 10 Schéma vyztužení desky obousměrně pnuté lokálně podepřené v půdorysu

Navržená výztuž v desce č.3 je zřejmá z obrázku 10.

4.4.4 Výztuž desky obousměrně pnuté po obvodě podepřené



Obrázek 11 Schéma vyztužení desky obousměrně pnuté po obvodě podepřené v půdorysu

4.5 Citlivostní analýza

V rámci této práce byl zkoumán poměr průhybu od smršťování k celkovému průhybu konstrukce. Bude provedena citlivostní analýza, která bude zkoumat změny velikostí jednotlivých průhybů v závislosti na měněných parametrech. Měněné parametry jsou (hodnoty v základní variantě jsou podtrženy):

- Relativní vlhkost okolního prostředí
 - Vnitřní prostředí – RH 50%
 - Vnější prostředí – RH 80%
- tloušťka desky
 - dle empirie (splněná podmínka ohybové štíhlosti, ověření na protlačení desky)
 - ekonomičtější řešení
- Stáří betonu při vnesení zatížení
 - t = 21 dny
 - t = 28 dní
- vyztužení desky
 - staticky daná výztuž dle výpočtu
 - oboustranná symetrická výztuž

- pevnostní třída betonu
 - C 30/37
 - C 25/30

Další parametry ovlivňující smršťování – doba ošetřování betonové směsi a druh cementu – zůstanou zachovány z důvodu možnosti porovnání výsledků.

Všechny desky ve variantě 1 – základní výpočet – budou počítány s podtrženými hodnotami. V dalších variantách bude měněn vždy pouze jeden parametr.

4.5.1 Deska jednosměrně pnutá – prostě uložená

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.5, bude vždy pro každý typ desky spočteno několik

variant:

- Varianta 1 – spočtená se základními parametry.
- Ve variantě 2 bude měněna relativní vlhkost prostředí z 50 na 80%.
- Ve variantě 3 bude změněna tloušťka desky z 200 na 180 mm. S touto změnou souvisí změna výztuže, která je navržena tak, aby i tloušťka desky 180 mm vyhověla na podmínku limitního průhybu. V této variantě je navržena výztuž profilu 12 mm po 60 mm.
- Ve variantě 4 se změní stáří betonu při vnesení zatížení z 21 na 28 dní.
- Ve variantě 5 je navržena symetrická výztuž u obou povrchů desky (tj. na horním povrchu uprostřed rozpětí je použita stejná výztuž jako na dolním povrchu).
- Varianta 6 se liší druhem betonu, který je o jednu třídu nižší – C25/30.

4.5.2 Deska jednosměrně pnutá – vetknutá

V tomto případě budou varianty stejné jako u desky jednosměrně pnuté – prostě uložené. Rozdíl je v tloušťce desky, která má v základní variantě tloušťku 120 mm a ve variantě 3 je změněna na tloušťku 100 mm. Toto vede ke změně výztuže – při spodním povrchu jsou po celé délce desky navrženy pruty profilu 12 mm po 100 mm, při horním povrchu v krajních třetinách rozpětí jsou navrženy pruty profilu 10 mm po 100 mm a ve střední třetině rozpětí je navržena síť s profilem 6 mm a oky 150x150 mm.

4.5.3 Deska lokálně podepřená – 3x3 pole – krajní pole

U spojených desek ve variantě typu 3 jsou vždy uvažována krajní pole desky, která mají největší průhyb. Mění se parametry jsou stejné, jako u předešlých dvou typů desek. Tloušťka se u této desky mění z původní tloušťky 260 mm na 240 mm – výztuž se změní pouze u horního povrchu desky ve sloupových pruzích, kde jsou navrženy pruty profilu 18 mm ve vzdálenosti 100

mm. U této desky bylo voleno malé procento zmenšení tloušťky s ohledem na protlačení a zacho-
vání realizovatelnosti desky.

4.5.4 Deska po obvodě podepřená – 3x3 pole – krajní pole

Stejně jako u předchozího typu desky jsou i u tohoto typu desky uvažována krajní pole desky, která mají největší průhyb. Parametry citlivostní analýzy jsou shodné s předešlými deskami. Tloušťka desky se mění z původní tloušťky 210 mm na 170 mm. V tomto případě je výztuž shodná s variantou 1.

5 Výsledky

V této kapitole budou uvedeny výsledky jednotlivých typů desek.

Podrobné výpočty a výsledky budou vedeny v jednotlivých přílohách :

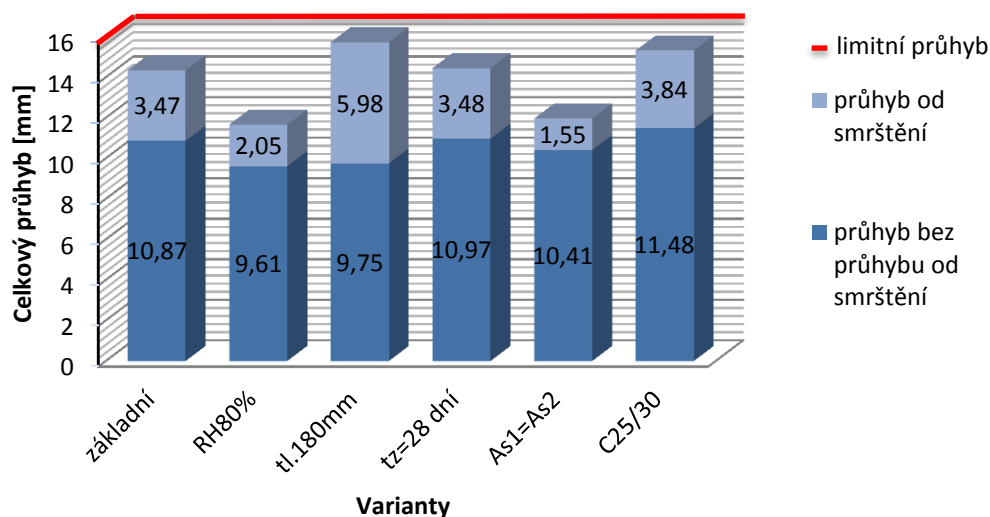
- Příloha 1 – výpočty a výsledky desky jednosměrně pnuté – prostě uložené
- Příloha 2 – výpočty a výsledky desky jednosměrně pnuté – vetknuté
- Příloha 3 – výpočty a výsledky desky lokálně podepřené – 3x3 pole
- Příloha 4 – výpočty a výsledky desky po obvodě podepřené – 3x3 pole

5.1 Deska jednosměrně pnutá prostě uložená

V následující tabulce jsou uvedeny výsledky průhybů, průhybů od smrštění a procentuálního podílu průhybu od smrštění jednotlivých variant.

Tabulka 3 Výsledky variant desky jednosměrně pnuté prostě uložené (hodnoty v mm)

varianta	celkový průhyb	průhyb od smrštění	procentuální podíl
1	14,34	3,47	24,20
2	11,66	2,05	17,58
3	15,6	5,98	38,33
4	14,45	3,48	24,08
5	11,96	1,55	12,96
6	15,32	3,84	25,07



Obrázek 12 Graf výsledků citlivostní analýzy pro desku č.1

Jak je vidět na obrázku 12, který obsahuje výsledky průhybů u jednotlivých variant, nejmenší průhyb od smrštění je ve variantě s oboustrannou symetrickou výztuží, což odpovídá předpokladům a známým faktům o smrštění. Průhyb od smrštění je v tomto případě pouze 1,55 mm (12,96 %) z celkového průhybu na desce.

Naopak k největšímu průhybu od smrštění dochází při snížení tloušťky desky o 20 %. V tomto případě je průhyb od smrštění 5,98 mm (38,02 %) z celkového průhybu. U této varianty je také největší celkový průhyb 15,73 mm, který vyhoví na limitní průhyb.

U desky prostě uložené se v rámci citlivostní analýzy ukázalo, že kromě případu s oboustrannou symetrickou výztuží a zmenšením tloušťky desky se průhyb od smrštění pohybuje

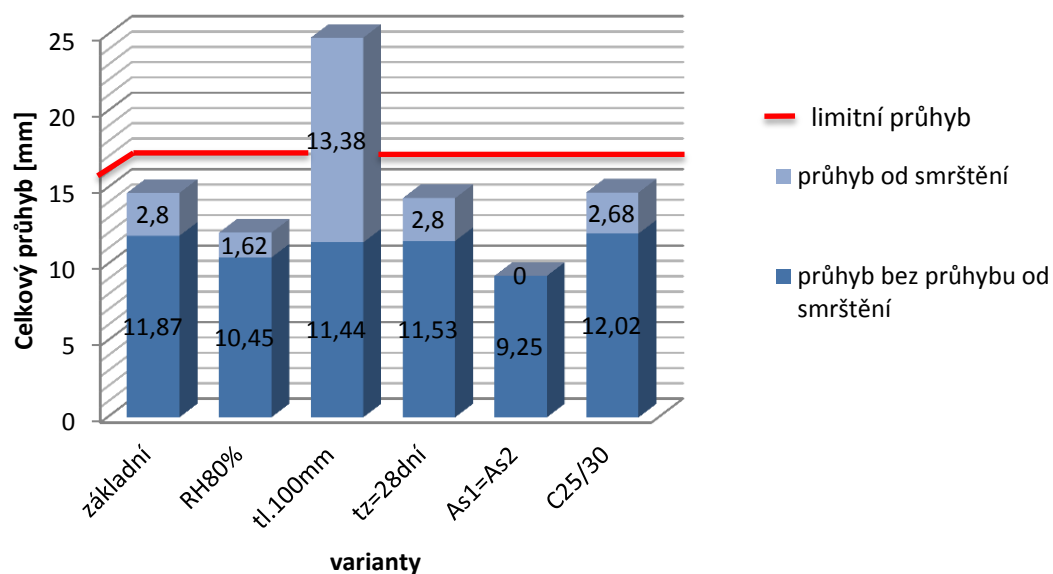
v rozmezí 18-24 % z celkového průhybu stropní desky. Všechny varianty desek vyhověly na limitní průhyb, který je v tomto případě 16 mm.

5.2 Deska jednosměrně pnutá vetknutá

V následující tabulce jsou uvedeny výsledky průhybů, průhybů od smrštění a procentuálního podílu průhybu od smrštění jednotlivých variant.

Tabulka 4 Výsledky variant desky jednosměrně pnuté vetknuté (hodnoty v mm)

Varianta	Celkový průhyb	Průhyb od smrštění	Procentuální podíl
1	14,67	2,8	19,09
2	12,07	1,62	13,42
4	24,82	13,38	53,91
5	14,33	2,8	19,54
6	9,25	0	0
5	14,7	2,68	18,23



Obrázek 13 Graf výsledků citlivostní analýzy pro desku č.2

Z obrázku 13, který obsahuje výsledky průhybů u jednotlivých variant, je patrné, že nulový průhyb od smrštění je v případě oboustranně symetricky vyztužené desky. V tomto případě je i celkový průhyb desky nejmenší. Druhý nejnižší průhyb od smrštění 1,62 mm (13,42 %) i celkový průhyb 13,42 mm má varianta, při které je relativní vlhkost rovna 80 %.

Největší celkový průhyb i průhyb od smrštění má deska se sníženou tloušťkou. V této variantě byla změněna nejen tloušťka desky, ale také vyztužení. Důvodem byla snaha o dodržení kritéria limitního průhybu. Plocha vyztuže se proto zvětšila skoro o 240 % (v základní variantě je plocha vyztuže 335,1 mm² při spodním povrchu, ve variantě 3 je plocha vyztuže 1130,97 mm²). Z důvodu velmi odlišného vyztužení horního a spodního povrchu desky však zároveň výrazně vzrostl průhyb od smrštění, a to na 13,38 mm (53,91%). Ve výsledku tak po započtení průhybu od smrštění tato varianta nevyhoví na limitní průhyb 16 mm o 8,82 mm. Tím se ukazuje, že snížení tloušťky desky nelze vždy kompenzovat zvýšením stupně vyztužení. Konstrukce po úpravě nemusí vyhovět na mezní stav použitelnosti. U této konkrétní varianty došlo ke změně průběhu křivostí na konstrukci, které má za následek několikanásobný nárůst průhybu od smrštění oproti základní variantě a celkově je podíl průhybu od smrštění větší než 50 %.

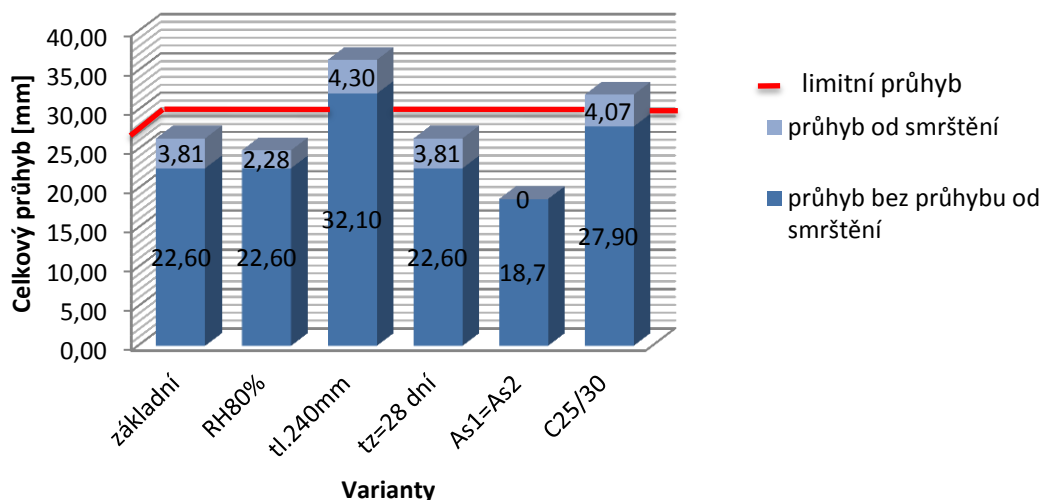
U ostatních variant citlivostní analýzy lze říci, že se průhyb od smrštění pohybuje v rozmezí 18-20% z celkového průhybu.

5.3 Deska lokálně podepřená – 3x3 pole

V následující tabulce jsou uvedeny výsledky průhybů, průhybů od smrštění a procentuálního podílu průhybu od smrštění jednotlivých variant. Průhyby od smrštění byly stanoveny jako průměrné hodnoty z hodnot průhybů od smrštění spočtených pro směry x a y v souladu s doporučením uvedeným v [8].

Tabulka 5 Výsledky variant desky obousměrně pnuté lokálně podepřené – 3x3 pole (hodnoty v mm)

Varianta	Celkový průhyb	Průhyb od smrštění	Procentuální podíl průhybu od smrštění
1	26,41	3,81	14,43
2	24,88	2,28	9,16
3	36,40	4,30	11,81
4	26,41	3,81	14,43
5	18,7	0	0
6	31,97	4,07	12,73



Obrázek 14 Graf výsledků citlivostní analýzy pro desku č.3

Z obrázku 14, který obsahuje výsledky jednotlivých variant, je patrné, že nulový průhyb od smrštění je ve variantě 5, kde je navrženo oboustranně symetrické vyztužení desky. Větší stupeň vyztužení způsobí zmenšení celkového průhybu oproti základní variantě. Druhý nejnižší průhyb od smrštění 2,28 mm (9,18 %) i celkový průhyb 24,88 mm má varianta, při které je relativní vlhkost rovna 80 %.

Největší celkový průhyb i průhyb od smrštění je ve variantě 3 – deska tl. 240 mm. V této variantě byla změněna tloušťka desky. Průhyb od smrštění je roven 4,30 mm (11,82 %). Tato varianta nevyhoví na limitní průhyb 28 mm o 8,4 mm, při navýšení vyztužení by bylo možné průhyb zredukovat pod limitní hodnotu.

Největší procentuální podíl průhybu od smrštění je ve variantě 1 a 4 a to 12,72 %. V těchto variantách jsou uvažovány základní hodnoty a v druhém případě doba vnesení zatížení 28 dní. Celkový průhyb je větší, než ve variantě 6, ale průhyb od smrštění je relativně stejný.

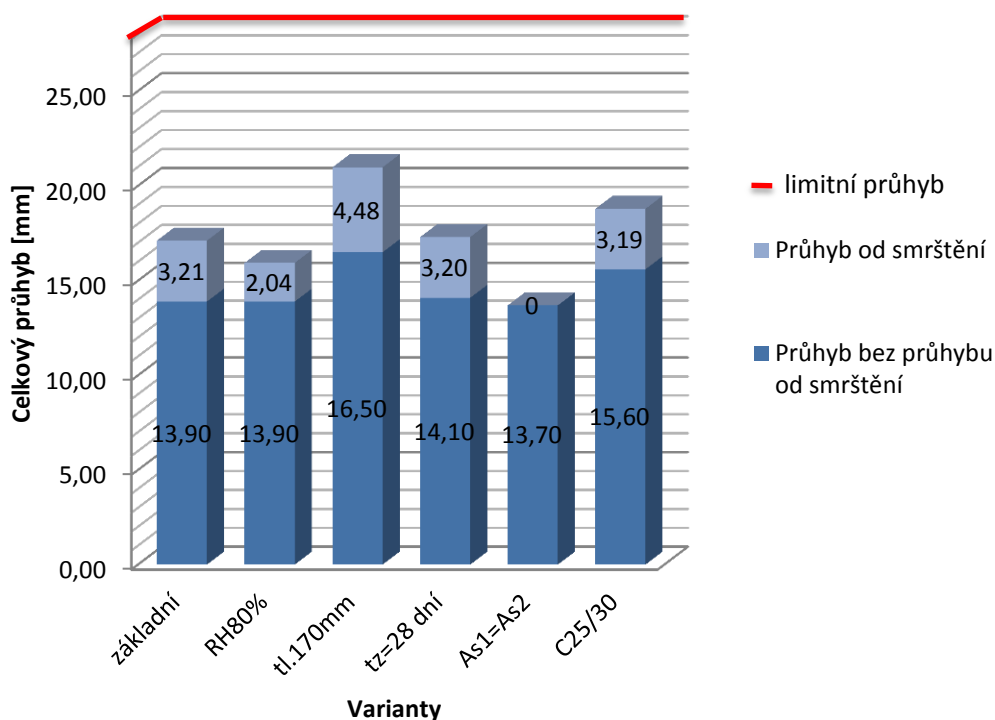
U varianty 6 je jen nepatrný rozdíl v průhybu od smrštění i v celkovém průhybu. U varianty 2 se sníží průhyb od smrštění zvýšením relativní vlhkosti na 80 %, ale zároveň se zvětší průhyb bez průhybu od smrštění.

5.4 Deska po obvodě podepřená – 3x3 pole

V následující tabulce jsou uvedeny výsledky průhybů, průhybů od smrštění a procentuálního podílu průhybu od smrštění jednotlivých variant. Průhyby od smrštění byly stanoveny jako průměrné hodnoty z hodnot průhybů od smrštění spočtených pro směry x a y v souladu s doporučením uvedeným v [8].

Tabulka 6 Výsledky variant desky obousměrně pnuté po obvodě podepřené 3x3 pole (hodnoty v mm)

Varianta	Celkový průhyb	Průhyb od smrštění	Procentuální podíl průhybu od smrštění
1	17,11	3,21	18,76
2	15,94	2,04	12,78
3	20,89	4,48	21,34
4	17,30	3,20	18,50
5	13,70	0	0
6	18,77	3,19	16,98



Obrázek 15 Graf výsledků citlivostní analýzy pro desku č.4

Výsledky jednotlivých variant, jsou shrnuty na Obrázku 15.

Nulový průhyb od smrštění je jako u předešlého typu desky v případě oboustranného symetrického vyztužení. Tato varianta má i celkově nejmenší průhyb, který je důsledkem uložení stropní desky na průvlaky po obvodě. Druhý nejmenší průhyb má varianta 2 s relativní vlhkostí 80 %.

Největší průhyb je u varianty 3, kde je zmenšená tloušťka desky na 170 mm. V tomto případě je průhyb od smrštění 4,48 mm (21,34 %), který je zároveň procentuálně největší ze všech variant. Celkový průhyb je 20,89 mm. U této varianty je navržena stejná výztuž, jako u ostatních variant kromě varianty 5.

U ostatních variant se procentuální podíl průhybu od smrštění pohybuje v rozmezí 3,19-3,21 mm (16,98-18,76 %).

6 Závěr

Tato práce ukázala, že průhyby od smrštění na stropních konstrukcích nejvíce pozitivně ovlivní vyztužení stropní konstrukce. Pokud je deska oboustranně symetricky vyztužená, jsou průhyby nulové. Výjimku tvoří deska prostě podepřená, na které při použitém postupu výpočtu i při oboustranně symetrickém vyztužení vychází malý nenulový průhyb od smrštění.

Největší negativní vliv na průhyb od smrštění má snížení tloušťky desky. Snížení tloušťky desky vedlo ke zvýšení potřebných ploch výztuží – výjimkou byla deska po obvodě podepřená – a k větším průhybům od smršťování i celkovým průhybům. V případě desky jednosměrně pnuté vetknuté a obousměrně pnuté lokálně podepřené byl po snížení tloušťky desky překročen limitní průhyb konstrukce. Snížení tloušťky desek se tedy jeví jako nevhodné pro návrh dané konstrukce. Deska jednosměrně pnutá prostě podepřená vyhověla na limitní průhyb, ale zvýšení stupně vyztužení nebylo vhodné řešení pro tento typ konstrukce. U desky jednosměrně pnuté vetknuté se ukázalo, že se toto řešení jeví jako velice nevhodné. Nejen že deska nevyhověla na limitní průhyb, ale průhyb od smrštění vzrostl pětkrát oproti základní variantě. Z výsledků u desky obousměrně pnuté po obvodě podepřené, kde byly při snížení tloušťky desky zachovány navržené plochy výztuže jako v základní variantě, vyplývá, že snížená tloušťka desky je vyhovující a potvrzuje se, že návrh tloušťky dle empirie pro tento typ desky vede k neefektivnímu návrhu konstrukce.

Varianty 2, ve kterých byla měněna relativní vlhkost z 50 na 80%, ukázaly, že se průhyb od smrštění zmenší oproti základní variantě o cca 40%. Parametr relativní vlhkosti však prakticky nelze ovlivnit, je dán prostředím, ve kterém je konstrukce umístěna.

U desek, u kterých byla změněna doba vnesení zatížení, je z výsledků zřejmé, že se průhyb od smrštění oproti základní variantě v podstatě nemění.

V poslední variantě, kde se měnila pevnostní třída betonu, se průhyb od smrštění oproti základní variantě v podstatě nezměnil. Výjimkou byla deska jednosměrně pnutá vetknutá, kde se průhyb od smrštění zmenšil o 15%.

V součtu lze konstatovat, že při základní variantě návrhu tvoří smrštění cca 20 – 25 % celkových průhybů. Při oboustranně stejném vyztužení lze dosáhnout prakticky nulového vlivu smršťování na průhyb, při snížení tloušťky desky naopak tento vliv výrazně stoupá. U zkoumaných typů desek tvořil až 45 % celkového průhybu a lze předpokládat, že u trémových konstrukcí, kde se výrazněji liší vyztužení spodního a horního povrchu, by podíl mohl dosáhnout ještě vyšších hodnot. Získané výsledky jsou tedy v souladu s hodnotami uváděnými v literatuře, kdy Procházka [8] uvádí, že deformace od smrštění obvykle tvoří 20 – 80 % celkového průhybu konstrukce.

Seznam použité literatury

- [1] ČSN EN 1992-1-1. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby*. Český normalizační institut, 2006.
- [2] Collepardi, M. *Moderní beton*, 1.st ed.; Informační centrum ČKAIT: Praha, 2009.
- [3] Havlásek, P. Modely pro dotvarování a smršťování betonu. [Online] **2009/2010**. http://mech.fsv.cvut.cz/wiki/images/1/15/Bazant_2010_havlasek.pdf
- [4] Veselý, V. Zásady správného ošetřování betonu. [Online] **2015**. <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyroby/beton/zasady-spravneho-oseetrovani-betonu>
- [5] Tůma, P. Smršťování betonu a platné normy. [Online] **2010**. https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/smrstovani-betonu-a-platne-normy_101348.html
- [6] Pytlík, P. *Technologie betonu*; Vysoké učení technické v Brně, 2000.
- [7] <http://www.ebeton.cz/pojmy/samovysychani>
- [8] Procházka, J.; Šmejkal, J. *Betonové stropní a schodišťové konstrukce*, 1st ed.; České vysoké učení technické v Praze, 2017.
- [9] ČSN EN 1990. Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí. Český normalizační institut, 2011
- [10] Procházka, J.; Kohoutková, A.; Vašková, J. *Příklady navrhování betonových konstrukcí 1*; ČVUT v Praze: Praha, 2007.
- [11] Vrátný, O.; Tipka, M.; Vašková, J. Základní typy betonových konstrukcí pozemních staveb se vzorovými příklady, 2015.
http://people.fsv.cvut.cz/~tipkamar/granty_soubory/FRVS_2012/zaklad_typy_bet_konstr.pdf (accessed Oct 05, 2018).
- [12] Hořejší, J.; Šafka, J.; a kol. *Statické tabulky*; SNTL - Nakladatelství technické literatury: Praha, 1987.

Seznam použitých programů

- [13] Creep 3000
- [14] SCIA Engineer - verze 17.1
- [15] Microsoft Excel – verze 2010
- [16] AutoCAD – verze 2010