



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

VÝPOČET PŘEDPJATÉHO BETONOVÉHO NOSNÍKU

CALCULATION OF PRESTRESSED CONCRETE BEAM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

FILIP VÍTEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ MALÁŠEK, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Filip Vitek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Stavba strojů a zařízení (2302R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výpočet předpjatého betonového nosníku

v anglickém jazyce:

Calculation of Prestressed Concrete Beam

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Dle zadané literatury analyzovat problematiku předpjatých betonových nosníků a provést výpočet navrženého nosníku.

Cíle bakalářské práce:

Sestavit stručný a přehledný popis problematiky výpočtů předepjatých betonových nosníků se vzorovým příkladem výpočtu.

Seznam odborné literatury:

Navrátil, J.: Předpjaté betonové konstrukce, CERM 2004,
ISBN 80-214-2649-7.

Bažant, Z., Šmířák, S.: Betonové konstrukce, 2002,
ISBN 80-2142 059-6.

Stráský, J.: Betonové mosty. Český svaz stav.inženýrů.
ISBN 80-86426-05-X.

Kolektiv: Plošné betonové konstrukce. ISBN 80-214-0975-4.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jiří Malášek, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 19.11.2012

L.S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na popis výpočtu předpjatých betonových nosníků. Úvodní kapitola pojednává o předpětí a rozdělení předpjatého betonu. V druhé kapitole jsou popsány materiály používané pro výrobu předpjatého betonu a jejich vlastnosti. Dále jsou popsány výpočty změn předpětí, jejich účinky na konstrukci, metody pro návrh předpětí a mezní stavy, ve kterých se předpjatý beton kontroluje. V poslední kapitole je sestaven vzorový příklad výpočtu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Výpočet předpjatého betonového nosníku, předpjatý beton, předem předpjatý beton, dodatečně předpjatý beton, předpětí, předpínací výztuž, změny předpětí.

ABSTRACT

This thesis is focused on the description of the calculation of prestressed concrete beams. The introductory chapter discusses the bias and distribution of prestressed concrete. The second chapter describes materials used for the production of prestressed concrete and its characteristics. The following chapters describe the calculation of changes of prestressing and their effects on the structure, prestressing methods and a limit state where the prestressed concrete is controlled. A model example of calculation is shown in the last chapter.

KEYWORDS

Calculation of prestressed concrete beam, prestressed concrete, pre-tensioned concrete, post-tensioned concrete, prestressing tendons, changes in prestressing.



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VÍTEK, F. *Výpočet předpjatého betonového nosníku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 63s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Malášek, Ph.D..



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Jiřího Maláška, Ph.D a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 23. května 2013

.....

Filip Vitek



OBSAH

1	Rozdělení předpjatého betonu	10
1.1.1	Předem předpjatý beton	10
1.1.2	Dodatečně předpjatý beton.....	11
2	Materiály.....	12
2.1	Beton	12
2.2	Výztuž	12
2.2.1	Předpínací výztuž	12
2.2.2	Betonářská výztuž.....	13
2.2.3	Krycí vrstva výztuže	13
2.3	Injektážní malta	14
3	Změny předpětí	15
3.1	Ztráta předpětí třením	15
3.2	Ztráta předpětí pokluzem v kotvě	17
3.3	Ztráta předpětí okamžitým pružným přetvořením betonu	19
3.4	Ztráta předpětí postupným předpínáním	20
3.5	Ztráta předpětí relaxací předpínací výztuže	20
3.6	Ztráta předpětí přetvořením opěrného zařízení	22
3.7	Ztráta předpětí způsobená rozdílem teplot předpínací výztuže a opěrného zařízení. 22	
3.8	Ztráta předpětí dotvarováním a smršťováním betonu.....	23
4	Účinky předpětí.....	25
4.1	Fáze působení předpjaté konstrukce	25
5	Návrh předpětí	26
5.1	Metoda vyrovnání zatížení	26
5.2	metoda dovolených namáhání	28
6	Mezní stavy.....	30
6.1	Mezní stavy použitelnosti (MSP)	30
6.1.1	Omezení normálových napětí.....	30
6.1.2	Odolnost proti vzniku trhlin	30
6.1.3	Omezení deformací.....	31
6.2	Mezní stavy únosnosti (MSÚ).....	31
6.2.1	Osová síla a moment.....	31
6.2.2	Smyk a krut	33
7	Vzorový příklad	35
7.1	Charakteristiky nosníku	35
7.1.1	Krytí.....	36

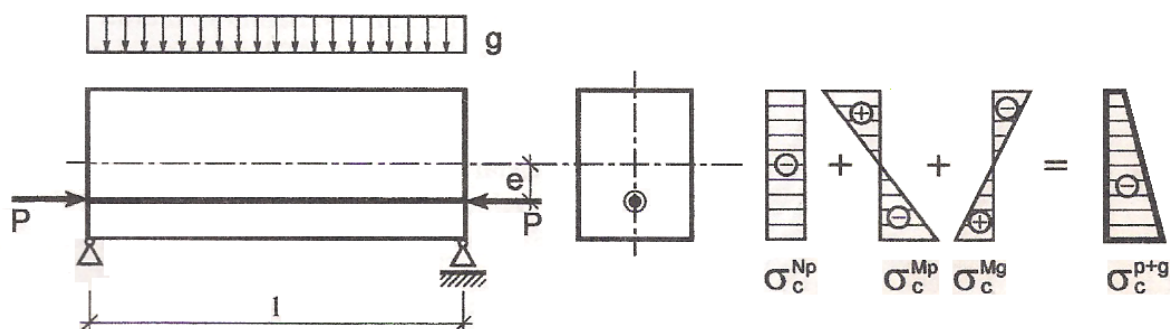


7.1.2	Zatížení.....	36
7.1.3	Výsledné vnitřní účinky (VVÚ)	37
7.1.4	Průřezové charakteristiky.....	38
7.1.5	Maximální přípustné napětí.....	39
7.2	Návrh předpětí.....	39
7.3	Výpočet ztrát předpětí.....	42
7.3.1	Ztráty okamžité.....	42
7.3.2	Ztráty dlouhodobé.....	45
7.4	Výpočet Mezních stavů.....	52
7.4.1	Mezní stav použitelnosti (MSP)	52
7.4.2	Mezní stav únosnosti (MSÚ).....	55
Závěr		59
Seznam použitých zkratek a symbolů.....		61



ÚVOD

Beton je dnes jedním z nejpoužívanějších stavebních materiálů. Je to směs cementového tmelu, vody, kameniva a přísad, která má schopnost přenášet poměrně vysoká tlaková napětí. Jeho nevýhodou je malá pevnost v tahu (cca 1/20 až 1/10 pevnosti v tlaku).[2] Aby se odstranila tato nevýhoda, je do betonu umístěna ocelová výztuž, která přenáší tahová napětí. V předpjatém betonu je navíc výztuž napnuta přes betonový prvek, čímž jsou do betonu záměrně vnesena přídatná tlaková napětí, která mohou tvořit tlakovou rezervu při přenosu zatížení.[1]

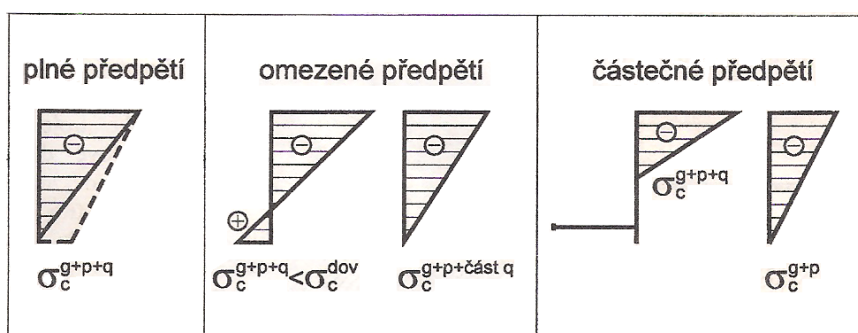


Rozložení napětí po mimostředně předpjatém průřezu [1]



1 ROZDĚLENÍ PŘEDPJATÉHO BETONU

Nejvýznamnější rozdělení předpjatého betonu je podle způsobu výroby na předem předpjatý a dodatečně předpjatý beton. Dalším možným kritériem pro klasifikaci předpjatého betonu je stupeň předpětí, viz Obr. 1-1. Plné předpětí je předpětí, kdy při působení běžného provozního zatížení (stálé, předpětí a proměnné) nevznikne v průřezu tah. Naopak při částečném předpětí mohou za působení běžného provozního zatížení v průřezu vznikat trhliny. Často je však kladen požadavek po odejmutí proměnných složek zatížení na jejich uzavření. To znamená, že při působení stálého provozního zatížení a předpětí nevznikne v průřezu tah. Při omezeném předpětí je předpětí navrženo tak, že v průřezu vznikne vlivem působení běžného provozního zatížení tah v stanovených mezích. Také v tomto případě je po odebrání části proměnného zatížení v průřezu zajištěn tlak.[1]



Obr. 1-1 Klasifikace předpjatého betonu podle stupně předpětí [1]

1.1.1 PŘEDEM PŘEDPJATÝ BETON

Předem předpjatý beton je vyráběn ve specializovaných výrobnách ve formě prefabrikovaných dílců. Po napnutí a zakotvení předpínací výztuže dochází k betonáži prvku do formy nebo na dlouhé dráze. Po zatvrdnutí betonu se uvolní výztuž, čímž je do betonu vnesena předpínací síla. Výztuž je kotvena soudržností s betonem.[1]



Obr. 1-2 Výroba předem předpjatého betonu Topos Tovačov [7] přednáška 6 strana 5



1.1.2 DODATEČNĚ PŘEDPJATÝ BETON

U dodatečně předpjatého betonu se po vybetonování a zatvrdnutí nosného prvku napne předpínací výztuž do připravených kabelových kanálků, kde se trvale zakotví pomocí kotevního zařízení. Výztuž je možné použít se soudržností nebo bez soudržnosti. Soudržnost je zajištěna vyplněním kabelových kanálků injektážní maltou. Volná předpínací výztuž (bez soudržnosti) může být vedena uvnitř, nebo vně betonového průřezu konstrukce.[1]



Obr. 1-3 Použití dodatečně předpjatého betonu na rychlostní komunikaci R3509.2 Slavonín - Přáslavice SO 202 [7] přednáška 3b strana 11



2 MATERIÁLY

V následujících podkapitolách jsou popsány materiály a jejich charakteristiky.

2.1 BETON

Pro výrobu předpjatého betonu se používají vysokopevnostní betony pevnostní třídy 40 až 60 MPa. Na směs jsou kladeny požadavky nejen na vysokou pevnost, ale i na zpracovatelnost, rychlost tuhnutí a reologické vlastnosti. Jako pojivo se používá kvalitní portlandský cement třídy 42,5 nebo 52,5 v množství přibližně 400 až 420 kg·m⁻³. Množství vody se udává relativně vůči obsahu cementu tzv. vodním součinitelem w/c . Dolní mez obsahu vody v betonu je přibližně $w/c = 0,25$, což reprezentuje množství vody chemicky nutné pro hydrataci. Kamenivo se použije inertní, tvrdé, neporézní, objemově stálé a zbavené nečistot s poměrem hrubé a jemné frakce přibližně 65:35. Kromě uvedených složek obsahuje vysokopevnostní beton i mikropřísadu. Většinou se používá křemičitý úlet. Vlastnosti směsi se dále ovlivňují přísadami, jako jsou plastifikátory a přísady urychlující tvrdnutí betonu.[1]

Betony jsou klasifikovány tzv. pevnostní třídou, označenou písmenem C (concrete) s udáním charakteristických 5% hodnot 28 denních pevností v tlaku, a to válcové f_{ck} ke krychelné $f_{ck,cube}$. [5]

Například: $C\ 50/60 \rightarrow C\ f_{ck}/f_{ck,cube}$

$f_{ck} = 50\ MPa; f_{ck,cube} = 60\ MPa$

2.2 VÝZTUŽ

V předpjaté betonové konstrukci je hlavní nosnou výztuží výztuž předpínací. Betonářská výztuž se používá jako konstrukční a často plní i funkci nosnou (třmínky a vyztužení kotevní oblasti). Předpínací výztuž se rozlišuje na soudržnou, kde musí být zajištěn přenos síly z výztuže do betonu po celé její délce, a nesoudržnou, která se kotví pomocí kotevního zařízení.[1]

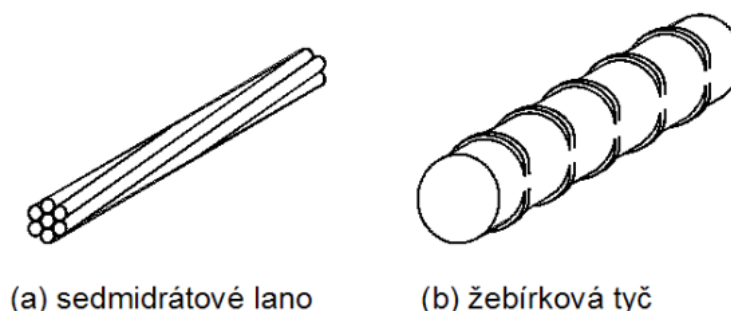
2.2.1 PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽ

Tradičně se používá výztuž z předpínací oceli. Její vlastnosti se dosahují chemickým složením (nelegovaná nebo nízkolegovaná) a speciálními postupy. Pevnost v tahu je oproti betonářské oceli zvýšena obsahem uhlíku (až 0,9%). Předpínací výztuž se dělí na patentový drát, předpínací drát, lana a tyče.[1]

- Patentový drát se vyrábí s hladkým povrchem.
- Předpínací drát se vyrábí hladký nebo s povrchovou úpravou (vtisky).
- Předpínací lana mohou být vytvořena ze tří drátů svinutých dohromady nebo častěji ze sedmi drátů, kde přímý drát tvoří jádro kolem kterého je svinuto šest drátů v jedné vrstvě. Uspořádání vnějších drátů do šroubovice zlepšuje soudržnost lana s injektážní maltou či betonem. Používají se pro předem i dodatečně předpjaté konstrukce.



- Předpínací tyče se vyrábí hladké nebo žebírkové, z ocelí válcovaných za tepla. Pro usnadnění napojování a kotvení vytvářejí žebírka závit.



Obr. 2-1 Předpínací výztuž [1]

2.2.2 BETONÁŘSKÁ VÝZTUŽ

Používá se výztuž z kvalitních ocelí, které jsou nízkouhlíkaté (obsah uhlíku pod 0,24%), legované a za tepla válcované. Dále jsou buď nezpracované, zpracované řízeným ochlazováním nebo tvářením za studena.[1]

2.2.3 KRYCÍ VRSTVA VÝZTUŽE

Jedná se o vrstvu betonu, která chrání výztuž před vlivy vnějšího prostředí. Nominální krycí vrstva, což je vzdálenost mezi povrchem výztuže nejbližším k povrchu betonu a nejbližším povrchem betonu, se dle [5] vypočítá:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

Kde:

$$\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm} \quad \text{přídavek na návrhovou odchylku}$$

$$c_{min} = \max(c_{min,b}; c_{min,dur}; 10 \text{ mm}) \quad \text{minimální krycí vrstva}$$

Kde:

$$c_{min,b} \quad [\text{mm}] \quad \text{minimální krycí vrstva z hlediska soudržnosti}$$

$$c_{min,dur} \quad [\text{mm}] \quad \text{minimální krycí vrstva z hlediska podmínek prostředí}$$

Tab. 2.1 Minimální krycí vrstva $c_{min,b}$ z hlediska soudržnosti [3]

Požadavky na soudržnost	
Uspořádání prutů	Minimální krycí vrstva $c_{min,b}^{*)}$
oddělené	průměr prutu
svazky	náhradní průměr (ϕ_n)
^{*)} Pokud je jmenovitý maximální rozměr kameniva větší než 32 mm, $c_{min,b}$ se má zvýšit o 5 mm.	



Doporučené hodnoty pro kanálky s dodatečně napjatými vložkami jsou:

- kruhové kanálky: $\emptyset$
- pravoúhelníkové kanálky: maximum (menší rozměr; polovina většího rozměru).

Doporučené hodnoty pro předem napjaté předpínací vložky dle [3] jsou:

- 1,5násobek průměru lana nebo hladkého drátu;
- 2,5násobek průměru drátu s vtisky.

Tab. 2.2 Minimální hodnota krycí vrstvy $c_{min,dur}$ požadované z hlediska trvanlivosti pro betonářskou výztuž [3]

Požadavek prostředí pro $c_{min,dur}$ (mm)							
Třída konstrukce	Stupeň vlivu prostředí						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Tab. 2.3 Minimální hodnota krycí vrstvy $c_{min,dur}$ požadované z hlediska trvanlivosti pro předpínací výztuž [3]

Požadavek prostředí pro $c_{min,dur}$ (mm)							
Třída konstrukce	Stupeň vlivu prostředí						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	15	20	25	30	35	40
S2	10	15	25	30	35	40	45
S3	10	20	30	35	40	45	50
S4	10	25	35	40	45	50	55
S5	15	30	40	45	50	55	60
S6	20	35	45	50	55	60	65

2.3 INJEKTÁŽNÍ MALTA

Injektážní malta se používá u dodatečně předpjatého betonu a slouží k vyplnění kabelových kanálků, kterými je vedena předpínací výztuž. Malta musí být dostatečně tekutá, aby se dostala do celého objemu kanálku. V průběhu tuhnutí nesmí docházet k odlučování vody, aby nedošlo k vytvoření dutin. Soudržností injektážní malty s předpínací výztuží se od okamžiku injektáže zabezpečí spolupůsobení betonu a výztuže, a tedy přenos změn předpětí do betonu. [1]



3 ZMĚNY PŘEDPĚTÍ

Předpínací síla se mění po délce kabelu v čase. Aby se dal zjistit její vliv na chování konstrukce, musí se vypočítat její hodnota v každém místě kabelu a ve všech rozhodujících časech výroby a provozu konstrukce.[1] Určí se z napětí $\sigma_{p0,max}$ vyvozeného předpínací pistolí, které je omezeno dle [3] na hodnotu:

$$\sigma_{p0,max} = \min\{0,8f_{pk}; 0,9f_{p0,1k}\} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

Kde:

f_{pk} [MPa] charakteristická hodnota pevnosti předpínací výztuže v tahu

$f_{p0,1k}$ [MPa] charakteristická hodnota meze 0,1 předpínací výztuže

V okamžiku předpínání a během zakotvení kabelu je toto napětí sníženo o okamžité (výrobní) ztráty předpětí. Jde především o ztráty předpětí třením, pokluzem v kotvě, okamžitým pružným přetvořením betonu, postupným předpínáním, relaxací výztuže, přetvořením opěrného zařízení a způsobené rozdílem teplot předpínací výztuže a opěrného zařízení.[1] Hodnota napětí, snížená o tyto ztráty, musí být menší než maximální přípustná hodnota napětí po zakotvení $\sigma_{pa,max}$. Tato hodnota se je opět dle [3] omezena:

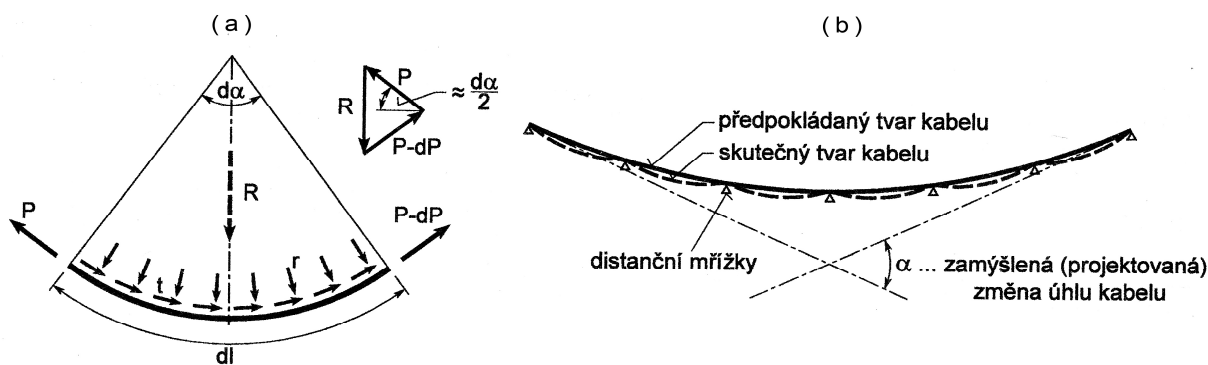
$$\sigma_{pa,max} = \min\{0,75f_{pk}; 0,85f_{p0,1k}\} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

Po zakotvení nebo po vnesení předpětí (předpínání dodatečně nebo předem) působí na konstrukci dlouhodobé změny předpětí. Ty pak ovlivňují po celou dobu životnosti konstrukce velikost předpínací síly. Jsou způsobeny relaxací oceli, smršťováním betonu, dotvarováním betonu, dotvarováním betonu od mnohokrát opakovaného cyklického zatížení a pružným přetvořením betonu způsobeným proměnným zatížením.[1]

3.1 ZTRÁTA PŘEDPĚTÍ TŘENÍM

U předem předpjatého betonu se ztráta třením většinou zanedbává. Pokud však dochází k vychýlení předpínací výztuže nebo výjimečně k tření kabelu o předpínací dráhu, uvažuje se tato ztráta procentem z počátečního napětí v předpínací výztuži.[4]

U dodatečně předpjatého betonu dochází ke ztrátě třením mezi kabelem a stěnami kabelového kanálku. Ta má dvě složky, a to ztrátu třením v oblouku, viz obr. 3-1(a), a ztrátu třením v důsledku nežádoucího zvlnění kabelu, obr. 3-1(b).[1]



Obr. 3-1 Ztráta třením [1]

Ztráta předpětí třením $\Delta\sigma_{p\mu}$ v daném bodě kabelu vyjádřená v napětí se vypočítá:

$$\Delta\sigma_{p\mu} = -\sigma_{p0,0} \left(1 - e^{-\mu(\alpha + kl)}\right) \text{ [MPa]} \quad (4)$$

Kde:

$\sigma_{p0,0}$ [MPa] napětí v kabelu vyvozené předpínací pistolí při předpínání (před zakotvením) v průřezu „0“ pod kotvou na napínaném konci (kotevní napětí)

μ [-] součinitel tření

α [rad] celková zamýšlená úhlová změna po délce kabelu od napínaného konce po vyšetřovaný bod kabelu

k [m⁻¹] nezamýšlená úhlová změna

l [m] celková délka kabelu od napínaného konce po vyšetřovaný bod kabelu

Na místo délky kabelu l lze použít délku x kolmého průmětu kabelu do vodorovné osy.

Součinitel tření μ dle [3] čl. 5.10.5.2 závisí na vlastnostech povrchu předpínacích vložek a kanálků, na přítomnosti rzi a na délce protažení předpínací výztuže a na průřezu předpínací vložky. Hodnoty lze uvažovat dle tabulky 3.1.

Nezamýšlená úhlová změna k závisí dle [3] čl. 5.10.5.2 na kvalitě provádění, vzdálenosti mezi podpěrami předpínací vložky, na typu kanálku nebo použitém obalu a na stupni vibrace při betonáži. Obvykle se pohybuje v rozmezí $0,005 < k < 0,01 \text{ m}^{-1}$. Hodnoty se v různých normách mohou lišit.[1]



Tab. 3.1 Součinitele tření μ dodatečně napínané vnitřní předpínací vložky a vnější nesoudržné předpínací vložky [3]

	Vnitřní předpínací vložky ¹⁾	Vnější nesoudržné předpínací vložky			
		Ocelové kanálky bez maziva	HDPE kanálky bez maziva	Ocelové kanálky s mazivem	HDPE kanálky s mazivem
Dráty tažené za studena	0,17	0,25	0,14	0,18	0,12
Lana	0,19	0,24	0,12	0,16	0,10
Žebírkové tyče	0,65	-	-	-	-
Hladké kruhové tyče	0,33	-	-	-	-

1) Pro předpínací vložky, které vyplní asi polovinu kanálku.

Protože se napětí snižuje s rostoucí délkou, je u velmi dlouhých kabelů vhodné napínat současně z obou konců. Tím se zajistí, že ztráta třením nebude dosahovat tak vysokých hodnot.

Nejprve se kabel předepe z jednoho konce. Horní index udává, ze kterého (v tomto případě konec A) a napětí ve vzdálenosti x od tohoto konce se vypočítá ze vzorce:

$$\sigma_{p0,x}^A = \sigma_{p0,A}^A e^{-\mu(\alpha_x + kx)} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

Poté se kabel předepe z druhého konce. Obecně ho lze napnout napětím různým od $\sigma_{p0,A}^A$ (napětí v bodě A při napínání z bodu A), avšak větším než $\sigma_{p0,B}^A$ (napětí v bodě B při napínání z bodu A) a menším než $\sigma_{p0,max}$. Napětí ve vzdálenosti x od konce A se pak určí:

$$\sigma_{p0,x}^B = \sigma_{p0,B}^B e^{-\mu(\alpha_B - \alpha_x + k(x_B - x))} \text{ [MPa]} \quad (6)$$

Pro zjištění bodu minimálního napětí, ve kterém je zleva i zprava stejné napětí, se dosadí za $x = x_\mu$ a $\alpha_x = \alpha_\mu$ a srovnají se rovnice (5) a (6). Kde x je vzdálenost, α_x zamýšlená úhlová změna vyšetřovaného bodu a x_μ vzdálenost, α_μ zamýšlená úhlová změna bodu minimálního napětí.[1]

3.2 ZTRÁTA PŘEDPĚTÍ POKLUZEM V KOTVĚ

Tato ztráta vzniká v důsledku pokluzu kotevního kuželíku a lana v kotevní objímce. Protože se u předem předpjatého betonu neprojevuje prakticky žádná ztráta třením, lze ztrátu prokluzem $\Delta\sigma_{pw}$ přímo vyjádřit:

$$\Delta\sigma_{pw} = -\frac{wE_p}{l_p} \text{ [MPa]} \quad (7)$$

Kde:

w [m] je pokluz v kotvě



E_p [MPa] modul pružnosti předpínací výztuže

l_p [m] délka předpínacích lan

U dodatečně předpjatého betonu je výpočet ztráty předpětí prokluzem komplikovaný třením kabelu o stěny kabelového kanálku. Napětí po délce kabelu se vypočítá z rovnice (5). Napětí na napínané straně $\sigma_{p0,A}$ poklesne při zakotvení v důsledku pokluzu na $\sigma_{pa,A}$. V tomto místě se kabel posune o pokluz w směrem k nenapínané kotvě, čímž se změní směr působení tření a napětí po délce kabelu monotónně roste od napínaného konce.

$$\sigma_{pa,x} = \sigma_{pa,A} e^{\mu(\alpha_x + kx)} \text{ [MPa]} \quad (8)$$

Absolutní velikost tření se však nezmění. Výpočet napětí $\sigma_{pa,A}$ na napínaném konci se liší podle toho, zda ztráta předpětí pokluzem vymizí (dostatečně malý pokluz), či nevymizí (velký pokluz). V obou případech se ztráta předpětí pokluzem vypočítá ze vzorce:

$$\Delta\sigma_{pw} = \sigma_{pa} - \sigma_{p0} \text{ [MPa]} \quad (9)$$

Po dosazení rovnice (5) a (8) do rovnice (9):

$$\Delta\sigma_{pw} = \sigma_{pa,A} e^{\mu(\alpha_x + kx)} - \sigma_{p0,A} e^{-\mu(\alpha_x + kx)} \text{ [MPa]} \quad (10)$$

V případě, že ztráta vymizí po délce kabelu, lze napětí $\sigma_{pa,A}$ vyjádřit pomocí kotevního napětí $\sigma_{p0,A}$:

$$\sigma_{pa,A} = \sigma_{p0,A} e^{-2\mu(\alpha_w + kx_w)} \text{ [MPa]} \quad (11)$$

Dosadíme-li rovnici (11) do rovnice (10):

$$\Delta\sigma_{pw} = \sigma_{p0,A} e^{-2\mu(\alpha_w + kx_w)} \cdot e^{\mu(\alpha_x + kx)} - \sigma_{p0,A} e^{-\mu(\alpha_x + kx)} \text{ [MPa]} \quad (12)$$

Dostaneme rovnici, ve které jsou dvě vzájemně závislé neznámé, a to celková zamýšlená úhlová změna α_w a dosah pokluzu x_w (l_w). Tyto neznámé se určí z podmínky, že pokluz w musí být roven celkovému zkrácení kabelu od poklesu napětí při pokluzu.

$$w = - \int_0^{l_w} \Delta\varepsilon_{pw} dl = - \frac{1}{E_p} \int_0^{l_w} \Delta\sigma_{pw} dl \text{ [m]} \quad (13)$$

Pokluz se uvažuje kladný, ztráta pokluzem nabývá záporných hodnot. Dosah pokluzu se zjistí, když do rovnice (13) dosadíme (12) a provedeme integraci postupně pro jednotlivé úseky kabelové dráhy. Vždy se testuje, zda platí (13). Zjištěný dosah pokluzu se dosadí do (12) a určí se ztráta pokluzem.[1]



3.3 ZTRÁTA PŘEDPĚTÍ OKAMŽITÝM PRUŽNÝM PŘETVOŘENÍM BETONU

U předem předpjatého betonu je lano v okamžiku vnesení předpětí součástí předpínaného prvku a vzdoruje zatížení, které samo vyvolá. Po uvolnění lan (např. přerezáním) se přenesou předpínací síly P z lan do betonového prvku, kde byla síla nulová. Tím dojde k jeho zkrácení. Z důvodu soudržnosti betonu s předpínacími lany se zkrátí i samotná lana a dojde v nich k poklesu předpínací síly o hodnotu ΔP . Přírůstek síly v betonovém prvku je označen ΔN_c . Síla v betonu v daném průřezu musí být po vnesení předpětí rovna síle v předpínací výztuži.[1]

$$\Delta N_c = P - \Delta P \text{ [kN]} \quad (14)$$

Kde:

P [N] předpínací síla

ΔP [N] pokles předpínací síly

V důsledku soudržnosti se přírůstky přetvoření v betonu $\Delta \varepsilon_c$ a výztuži $\Delta \varepsilon_p$ musí sobě rovnat.

$$\Delta \varepsilon_c = \frac{\Delta N_c}{A_c E_c} = \Delta \varepsilon_p = \frac{(P - \Delta N_c)}{A_p E_p} \text{ [-]} \quad (15)$$

Kde:

A_c [m²] plocha betonového průřezu

A_p [m²] plocha předpínací výztuže

E_c [MPa] modul pružnosti betonu

Zavede se označení:

$$\nu = \frac{A_p E_p}{A_c E_c} \text{ [-]} \quad (16)$$

Po úpravách získáme vztah pro výpočet přírůstku síly v betonovém prvku

$$\Delta N_c = \frac{P}{(1 + \nu)} \text{ [kN]} \quad (17)$$

Pro excentrické kabely se nahradí součinitel ν součinitelem ψ :

$$\psi = \nu \cdot \left(1 + \frac{A_c e_p^2}{I_c} \right) \text{ [-]} \quad (18)$$

Kde:

e_p [m] excentricita kabelu

I_c [m⁴] moment setrvačnosti betonu



3.4 ZTRÁTA PŘEDPĚTÍ POSTUPNÝM PŘEDPÍNÁNÍM

U dodatečně předpjatého kabelu se projevuje ztráta předpětí postupným předpínáním z důvodů postupného napínání dalších kabelů. Prvek délky l se po napnutí prvního kabelu zkrátí o $\Delta_1 l$, což je však vzápětí eliminováno zdvihem předpínací pistole. Změna síly v prvním kabelu je tedy nulová. Napínání druhého kabelu vyvolá v prvním kabelu změnu síly, přičemž změna síly v druhém je opět nulová. Předepnutím třetího kabelu dojde k poklesu síly v prvním a v druhém kabelu, ve třetím je opět nulová. Celková síla v prvním kabelu po předepnutí třetího kabelu je $P_1 = P - \Delta_2 P - \Delta_3 P$ a síla ve druhém kabelu je $P_2 = P - \Delta_3 P$. Pokud by bylo možné napnout a zakotvit všechna lana naráz, tato ztráta by se neprojevila, protože okamžitá deformace by byla eliminována zdvihem předpínací pistole. To však není reálné.[1]

Průměrná ztráta předpětí postupným předpínáním $\Delta\sigma_{pep}$ ve výztuži o celkové ploše A_p

$$\Delta\sigma_{pep} = \sigma_{pa} \frac{v}{m} \cdot \sum_{j=1}^{m-1} \frac{j}{m+j \cdot v} \quad [\text{MPa}] \quad (19)$$

Kde:

j [-]	j-tý kabel
m [-]	počet kabelů

U excentrických kabelů se opět součinitel v (16) nahradí součinitelem ψ (18).

3.5 ZTRÁTA PŘEDPĚTÍ RELAXACÍ PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽE

Tato ztráta patří jak mezi okamžité výrobní ztráty (krátkodobá relaxace oceli), tak mezi ztráty dlouhodobé. Obecně se určuje ihned po zakotvení, případně vnesení předpětí do betonu (t_a), po vnesení všech stálých zatížení včetně předpětí (t_g), v okamžiku vnesení proměnného zatížení (t_q) a v čase blížícím se nekonečnu (t_∞). Velikost relaxace závisí na úrovni vneseného napětí a na čase, proto se při výpočtu bere ohled na postup předpínání, kotvení a ztráty předpětí způsobené dalšími vlivy. Norma [3] čl. 3.3.2 (4) definuje tři třídy relaxačního chování.

Třída 1: Dráty nebo lana s normální relaxací

Třída 2: Dráty nebo lana s nízkou relaxací

Třída 3: Za tepla válcované a upravené tyče



Procentní poměr změny předpínacího napětí $\Delta\sigma_{pr}$ k počátečnímu předpínacímu napětí σ_{pi} se pro jednotlivé třídy relaxačního chování vypočítá ze vzorců:

$$\text{Třída 1} \quad \frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 5,39\rho_{1000}e^{6,7\mu}\left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)}10^{-5} \quad (20)$$

$$\text{Třída 2} \quad \frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66\rho_{1000}e^{9,1\mu}\left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)}10^{-5} \quad (21)$$

$$\text{Třída 3} \quad \frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 1,98\rho_{1000}e^{8\mu}\left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)}10^{-5} \quad (22)$$

Kde:

$\Delta\sigma_{pr}$ [MPa] Absolutní hodnota relaxačních ztrát předpětí

σ_{pi} [MPa] při dodatečném předpínání je σ_{pi} absolutní hodnota počátečního předpětí, při předpínání předem je σ_{pi} maximální tahové napětí působící v předpínací vložce zmenšené o okamžité ztráty vznikající v průběhu napínání.

t [hod] doba po napnutí

μ [-] = σ_{pi}/f_{pk}

ρ_{1000} [%] hodnota relaxační ztráty 1000 hodin po napnutí při průměrné teplotě 20 °C.
Lze předpokládat: 8 % pro třídu 1, 2,5 % pro třídu 2 a 4 % pro třídu 3.

Celková kapacita relaxace $\Delta\sigma_{pr}^{kapacita}$, tedy ztráta v čase nekonečno se vypočítá dosazením času 500 000 hodin do výše uvedených vzorců (20), (21) nebo (22). Velikost této ztráty se dá snížit použitím speciálních materiálů (lana s nízkou relaxací) a výrobním postupem (korekce relaxace podržením napětí). Korekce relaxace podržením napětí se provádí tak, že se podrží napětí σ_{p0} při předpínání po krátkou dobu (2 až 10 min) na konstantní hodnotě, přičemž se realizuje dotvarování předpínací výztuže. Jelikož je nárůst relaxace velmi výrazný na počátku zatěžování, dojde i za tak krátkou dobu k poměrně výrazné redukci kapacity relaxace $\Delta\sigma_{pr}^{kapacita}$.

Výpočet korekce relaxace podržením napětí $\Delta\sigma_{pr}^{cor}$ se provede dosazením času t_{cor} , po který byla korekce provedena, do příslušného vzorce. Zbývající kapacita relaxace, tedy ztráta napětí relaxací se potom vypočítá odečtením $\Delta\sigma_{pr}^{cor}$ od $\Delta\sigma_{pr}^{kapacita}$, přičemž se u obou uvažuje znaménko minus.[1]

Při výpočtu relaxačních ztrát v různých časových intervalech a při požadované větší přesnosti se postupuje podle [3] přílohy D, kde je použita metoda ekvivalentního času.



3.6 ZTRÁTA PŘEDPĚTÍ PŘETVOŘENÍM OPĚRNÉHO ZAŘÍZENÍ

U předem předpjatého betonu se tato ztráta projevuje v případě, kdy tuhost kotevních bloků (rozpěrného zařízení) vzdorujících tahu předpínacích lan je natolik nízká, že dochází v důsledku postupného předpínání k jejich deformaci. Předpínáním m stejných a stejně napjatých lan vyvodí na opěrné zařízení celkovou sílu P . Kdyby byla síla P vnesena naráz, došlo by ke zkrácení vzdálenosti kotevních bloků a zmenšení délky napjatých kabelů z hodnoty l_p o hodnotu Δl_p . Poměrné přetvoření ε_p se vypočítá ze vzorce (23).[1]

$$\varepsilon_p = -\frac{\Delta l_p}{l_p} \quad [-] \quad (23)$$

Poměrné přetvoření jednoho kabelu ε_{p1} :

$$\varepsilon_{p1} = \frac{\varepsilon_p}{m} \quad [-] \quad (24)$$

Při postupném napínání nastává stejný efekt jako u postupného předpínání u dodatečně předpjatého betonu. Při napínání j -tého lana se ve všech $j-1$ zakotvených lanech projeví ztráta

$$\Delta \sigma_{pA1} = E_p \cdot \varepsilon_{p1} = -E_p \frac{\Delta l_p}{l_p m} \quad [\text{MPa}] \quad (25)$$

Tato ztráta se v i -tém laně objeví vždy při napínání $i+1, i+2, i+3, \dots, m$ -tého lana. Celková ztráta v i -tém laně se potom získá součtem těchto ztrát

$$\Delta \sigma_{pA}^i = \sum_{j=i+1}^m \Delta \sigma_{pA1} = \sum_{j=i+1}^m -E_p \frac{\Delta l_p}{l_p m} = -E_p \frac{m-i}{2m} \frac{\Delta l_p}{l_p} \quad [\text{MPa}] \quad (26)$$

Průměrná ztráta předpětí přetvořením opěrného zařízení $\Delta \sigma_{pA}$ v každém laně po postupném předeptnutí všech m lan se určí:

$$\Delta \sigma_{pA} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(-E_p \frac{m-i}{m} \frac{\Delta l_p}{l_p} \right) = -E_p \frac{m-1}{2m} \frac{\Delta l_p}{l_p} \quad [\text{MPa}] \quad (27)$$

3.7 ZTRÁTA PŘEDPĚTÍ ZPŮSOBENÁ ROZDÍLEM TEPLOT PŘEDPÍNAČÍ VÝZTUŽE A OPĚRNÉHO ZAŘÍZENÍ

U předem předpjatého betonu může docházet k rozdílu teplot předpínací výztuže a opěrného zařízení. V důsledku této změny se změní délka mezi kotevními bloky opěrného zařízení l_A i délka předpínací výztuže l_p .

$$\Delta l_A = \alpha_A l_A (T_A - T_0); \quad \Delta l_p = \alpha_p l_p (T_p - T_0) \quad (28)$$

Kde:

α_A [K⁻¹] součinitel teplotní roztažnosti opěrného zařízení

α_p [K⁻¹] součinitel teplotní roztažnosti předpínací výztuže



T_A [°C] teplota opěrného zařízení

T_p [°C] teplota předpínací výztuže

T_0 [°C] teplota v okamžiku předpínání pro lana i opěrné zařízení

Zvýšením délky mezi kotevními bloky se napětí v předpínací výztuži zvyšuje, zvýšením délky předpínací výztuže se její napětí snižuje. Celková změna délky Δl předpínací výztuže je rozdíl obou hodnot.[1]

$$\Delta l = \Delta l_A - \Delta l_p \quad (29)$$

Celková ztráta předpětí:

$$\Delta \sigma_{pT} = \frac{E_p \Delta l}{l_p} = \frac{E_p}{l_p} \left(\alpha_A l_A (T_A - T_0) - \alpha_p l_p (T_p - T_0) \right) \quad (30)$$

3.8 ZTRÁTA PŘEDPĚTÍ DOTVAROVÁNÍM A SMRŠŤOVÁNÍM BETONU

Ztráta předpětí dotvarováním a smršťováním betonu spadá mezi ztráty dlouhodobé.

- Dotvarování: Cementový gel obsahuje vodu chemicky vázanou, vodu v mikropórech a kapilární. Dlouhodobým působením napětí je voda z mikropórů vytlačována do kapilár odkud se vypařuje. Napětí je tak postupně přenášeno z viskózního média na jeho pružný skelet, přičemž se realizuje přetvoření od dotvarování. Velikost přetvoření od dotvarování je závislá na dlouhodobě působícím napětí v betonu, čase zatížení, na vlastnostech cementu, plniva a množství záměsové vody, na rozměrech prvku a na vlhkostních a teplotních poměrech okolního prostředí.
- Ke smršťování dochází, když se vypařuje chemicky volná voda z kapilár cementového gelu. Smršťování nezávisí na zatížení, ale na vlhkostních a teplotních podmínkách v okolním prostředí, na stáří a složení betonu a na dimenzích konstrukčního prvku. Dále se projevuje smršťování sednutím čerstvého betonu, které nastává odvodem přebytečné vody, plastické smršťování, které je způsobeno ztrátou vody z povrchu betonu v důsledku jeho vysušení větrem či teplotou a smršťování autogenní.[1]

Základní vztah pro výpočet ztráty smršťováním $\Delta \sigma_{ps}$:

$$\Delta \sigma_{ps} = E_p \varepsilon_c^s \quad [\text{MPa}] \quad (31)$$

Kde:

ε_c^s [-] poměrné přetvoření od smršťování betonu



Celkové poměrné přetvoření od smršťování se skládá z poměrného přetvoření od smršťování vysycháním a poměrného přetvoření od autogenního smršťování. Výpočet ε_c^d a ε_c^a je popsán v [3] čl. 3.1.4 a v B.2.

$$\varepsilon_c^s = \varepsilon_c^d + \varepsilon_c^a [-] \quad (32)$$

Kde:

$\varepsilon_c^d [-]$ poměrné přetvoření od vysychání

$\varepsilon_c^a [-]$ poměrné přetvoření od autogenního smršťování

Vztah pro výpočet ztráty předpětí dotvarováním $\Delta\sigma_{pc}$:

$$\Delta\sigma_{pc} = E_p \frac{\sigma_{cp}^{g+p}}{E_c(\tau)} \cdot \varphi(t, \tau) \quad (33)$$

Kde:

$\sigma_{cp}^{g+p} [\text{MPa}]$ napětí od dlouhodobých zatížení (stálé + předpětí) ve vyšetřovaném řezu konstrukce v místě předpínací výztuže

$\varphi(t, \tau) [-]$ součinitel dotvarování

Součinitel dotvarování se vypočítá ze vztahu (34) a jeho podrobný výpočet je popsán v normě [3] B.1

$$\varphi(t, \tau) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0) [-] \quad (34)$$

Kde:

$\varphi_0 [-]$ Základní součinitel dotvarování

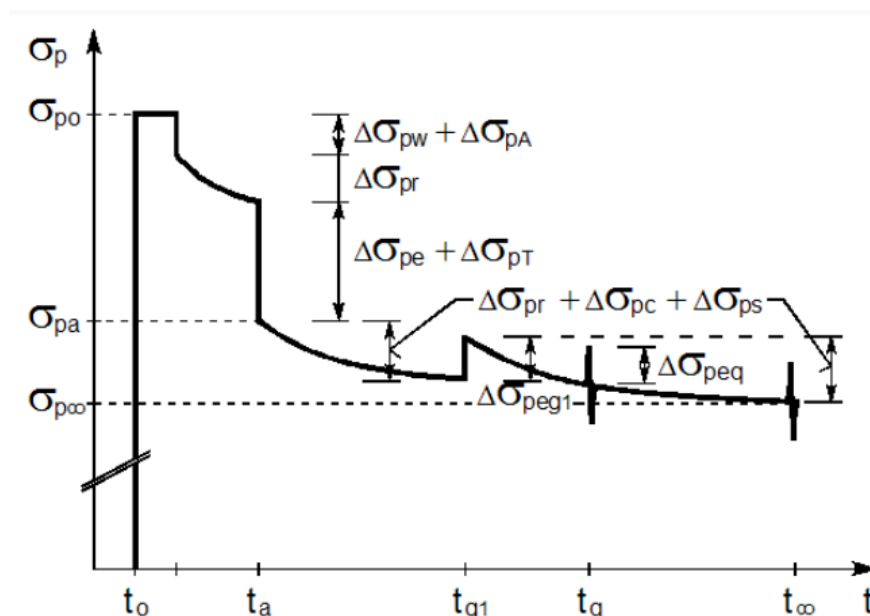
$\beta_c(t, t_0) [-]$ součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení

4 ÚČINKY PŘEDPĚTÍ

Pro předpjaté betonové konstrukce je charakteristická mnohočetnost montážních a provozních stavů, ve kterých se mění zatížení, předpětí či statické schéma konstrukce.

4.1 FÁZE PŮSOBNÍ PŘEDPJATÉ KONSTRUKCE

- Před vnesením předpětí. V této době má beton malou schopnost přenášet tahy. Aby nedocházelo k tvorbě trhlin, musí se správně ošetřovat (je nutné zabránit jeho vysychání a náhlým změnám teplot). Případné vzniklé trhliny by mohly zcela narušit schopnost betonu přenášet tahová napětí.
- V průběhu předpínání (čas t_0, t_{g0}). Zde dochází k největšímu namáhání předpjaté výztuže, která působí největším napětím pod kotvou a po délce kabelu napětím sníženým pouze o ztráty třením. V této době také bývá vzepětím prvku aktivována vlastní tíha g_0 , která působí proti němu.
- Po vnesení předpětí (čas t_a, t_{g0}). Na prvek působí vlastní tíha a předpětí, které je sníženo výrobními ztrátami. V této době může docházet u prefabrikovaných dílců k transportu, při kterém dochází ke změnám podpor.
- V průběhu výstavby konstrukce (čas t_{g1}). V tomto čase je vnášeno ostatní stálé zatížení. V některých případech se konstrukce dopíná a tím se mění její okrajové podmínky. Posloupnosti změn statických schémat, vkládání zatížení a dopínání musí být při výstavbě bezpodmínečně dodrženy.
- V provozních stavech (čas t_q, t_∞).



Obr. 4-1 Změny předpětí u předem předpjatého prvku [1]

Je nezbytné, aby se v každé z výše uvedených fází výstavby spolehlivě určila velikost aktuálně působící předpínací síly. Poté je možné určit v dané fázi (čase) účinky předpětí, superponovat je s účinky vnějších zatížení a posoudit.[1]

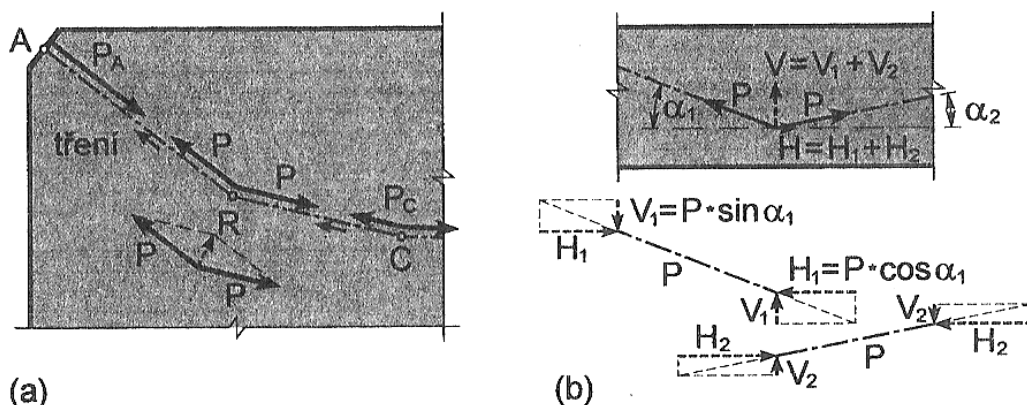
5 NÁVRH PŘEDPĚTÍ

Pro návrh předpětí se dá použít celá řada metod. Většinou se jedná o modifikace dvou základních principů a to metody vyrovnání zatížení a metody dovolených namáhání.

5.1 METODA VYROVNÁNÍ ZATÍŽENÍ

Metodou vyrovnání zatížení se zajistí vyšší trvanlivost a provozuschopnost konstrukce, vyžaduje však náročnější uspořádání a větší množství kabelů. Při této metodě se doporučuje v závislosti na požadovaném stupni předpětí (kap. 1.1) vyrovnat 80 až 100% stálých zatížení. Pro zjištění působení zatížení od předpětí, kterým se vyrovnává vnější zatížení od konstrukce, se sestaví ekvivalentní zatížení.[1]

Při sestavení ekvivalentního zatížení se vychází ze silového působení kabelu na beton, které je znázorněno na obr. 5-1.



Obr. 5-1 Síly od předpětí působící na beton [1]

Pro kabely, jejichž poměr vzepětí f ku délce paraboly L je menší než $1/15$, se uvažuje zjednodušující předpoklad, že průměrná hodnota předpínací síly je konstantní po délce kabelu.

Pro parabolické kabely se také předpokládá, že $H = P = konst$ a také, že excentricity $e_{pA} = e_{pB}$. Momentový účinek v daném řezu x se vyjádří:

$$M_p(x) = H \cdot e_p(x) \text{ [Nm]} \quad (35)$$

Kde

H [N] Normálová síla od předpětí (zde se uvažuje se záporným znaménkem)

Pro staticky určité konstrukce se nemusí určovat ekvivalentní zatížení a moment se dá vypočítat přímo z rovnice (35).



Excentricitu lze vyjádřit z rovnice paraboly:

$$e_p(x) = -\frac{4f}{L^2}x^2 + \frac{4f}{L}x + e_{pA} \quad [\text{m}] \quad (36)$$

Dosadí-li se rovnice (36) do (35), pak ze Schwedlerovy věty vyplívá vztah pro rovnoměrné zatížení p :

$$p = H \frac{8f}{L^2} \quad [\text{Nm}^{-1}] \quad (37)$$

Některé nosníky mohou mít proměnný průřez. U nich v místě zalomení střednice působí osamělá síla.

U staticky neurčitého předpětí brání vzepětí nosníku vnitřní podpora, ve které vzniká staticky neurčitá reakce R . V nosníku tak vzniká sekundární moment od předpětí M_{ps} , sekundární posouvající síly V_{ps} a sekundární normálové síly N_{ps} . Primární účinky od předpětí se určí podobně jako u staticky určitého předpětí. Celkové účinky od předpětí se vypočítají součtem primárních (M_{pp} , N_{pp} , V_{pp}) a sekundárních účinků, např. pro celkový moment platí:

$$M_p = M_{pp} + M_{ps} \quad [\text{Nm}] \quad (38)$$

Postup výpočtu vnitřních sil od předpětí:

- Tvorba statického modelu (tvar a poloha kabelu, excentricita, poloha střednice)
- Určení ekvivalentního zatížení
- Výpočet reakcí u staticky neurčitých konstrukcí
- Určení vnitřních sil od ekvivalentního zatížení a reakcí

Odečtením primárních účinků zjištěných na staticky určité soustavě se určí účinky sekundární.

Poloha kabelu

U staticky určitých konstrukcí je poloha působíště předpínací síly (tlaková čára) totožná s polohou těžiště kabelu.

U staticky neurčitých konstrukcí je tato poloha kvůli sekundárnímu momentu posunuta z těžiště kabelu o vzdálenost $v(x)$, která se vyjádří:

$$v(x) = \frac{M_{ps}}{M_{pp}} \quad [\text{m}] \quad (39)$$



Sekundární momenty jsou po délce jednoho pole spojitého nosníku lineární, tlaková čára je tedy lineárně transformována z polohy těžiště kabelu. Celkový moment od předpětí se vypočítá:

$$M_p = M_{pp} + M_{ps} = N_{pp}(e_p + v) \quad [\text{Nm}] \quad (40)$$

Čím více se poloha kabelu blíží poloze tlakové čáry, tím víc se zmenšují sekundární momenty od předpětí. Návrhem průběhu kabelu tlakovou čarou se odstraní sekundární momenty od předpětí. Kabel nevyvolá staticky neurčité reakce a jeho předepnutím se vyvolají takové deformace, že průhyb nad podporami bude nulový. Tento kabel se nazývá konkordantní.[1]

5.2 METODA DOVOLENÝCH NAMÁHÁNÍ

Metodou posouzení předpjaté betonové konstrukce je omezení normálových napětí od provozních účinků zatížení. Požadavky na úroveň normálových napětí se také často využívají při návrhu předpětí. Výpočet je založen na předpokladu lineárně-pružného chování betonu a využívá se při něm ideální (u předem předpjatého) nebo betonový průřez (u dodatečně předpjatého). Dalšími předpoklady je rovinnost průřezů po deformaci a dokonalá soudržnost mezi ocelí a betonem.

Napětí v betonu se posuzuje ve všech stádiích působení konstrukce. Průřez je zatížen v obecném případě vlastní tíhou, stálým zatížením, zatížením proměnným a sekundárními účinky předpětí. Proti těmto zatížením působí primární účinky od předpětí N_{pp} , M_{pp} , V_{pp} . Zatížení se kombinují tak, abychom v jednotlivých stádiích působení konstrukce docílili extrémní hodnoty napětí v krajních vláknech. Toto napětí se dá obecně vypočítat ze vzorců (38) pro dolní a (39) pro horní vlákna průřezu. Může se však jednat i o jiné kombinace zatížení vyvolující extrémní napětí.[1]

$$\sigma_{c1} = \frac{N+N_{pp}}{A_c} + \frac{M+N_{pp}e_p}{W_{c1}} \quad [\text{MPa}] \quad (41)$$

$$\sigma_{c2} = \frac{N+N_{pp}}{A_c} + \frac{M+N_{pp}e_p}{W_{c2}} \quad [\text{MPa}] \quad (42)$$

Kde:

$W_{c1}, W_{c2} \quad [\text{m}^3]$	moduly průřezu v ohybu
$N \quad [\text{N}]$	normálová síla od vnějšího zatížení
$M \quad [\text{kNm}]$	moment od vnějšího zatížení



Vypočítaná napětí se pak porovnávají v závislosti na požadované normě s dovolenými hodnotami. Dle [7] lze pro návrh předpětí touto metodou využít:

- Podmínku linearity dotvarování, kde pro kvazi-stálou kombinaci zatížení nesmí napětí v betonu přesáhnout hodnotu:

$$\sigma_c \leq 0,45 \cdot f_{ck}$$

- Napětí v betonu v tlaku pro charakteristickou kombinaci zatížení nesmí přesáhnout hodnotu:

$$\sigma_c \leq 0,6 \cdot f_{ck}$$

- Stav dekomprese, při jehož využití musí veškerá předpínací výztuž ležet v tlačené oblasti s rezervou min 25 mm.



6 MEZNÍ STAVY

Předpjaté betonové konstrukce se posuzují na mezní stav použitelnosti a mezní stav únosnosti.

6.1 MEZNÍ STAVY POUŽITELNOSTI (MSP)

Do mezního stavu použitelnosti patří:

- Omezení normálových napětí od provozních účinků.
- Požadavky na odolnost proti vzniku trhlin nebo omezení šířky trhlin.
- Omezení deformací konstrukce.

6.1.1 OMEZENÍ NORMÁLOVÝCH NAPĚTÍ

Obecně se posuzují tahová a tlaková napětí v betonu a tahová napětí v předpínací výztuži. Napětí v betonu se vypočítají ze vzorců (41) a (42).

Dle [3] musí být tlakové napětí omezeno, aby se zabránilo vzniku podélných trhlin, mikrotrhlin nebo velkému dotvarování, které mohou nepříjemně ovlivnit funkčnost konstrukce. Aby nedošlo ke vzniku podélných trhlin, doporučuje se omezit tlaková napětí na hodnotu $0,6 \cdot f_{ck}$ v oblastech vystavených stupňům vlivu prostředí XD, XF a XS. Pokud je napětí v betonu při kvazi-stálé kombinaci zatížení nepřekročí hodnotu $0,6 \cdot f_{ck}$, lze předpokládat lineární dotvarování. Pokud je větší, uvažuje se dotvarování nelineární. Střední hodnota napětí v předpínací výztuži nemá překročit $0,75 \cdot f_{pk}$.

6.1.2 ODOLNOST PROTI VZNIKU TRHLIN

Dle [3] musí být trhliny omezeny tak, aby nedošlo k narušení řádné funkce, trvanlivosti konstrukce nebo k nepříznivému ovlivnění jejího vzhledu. Trhliny obvykle vznikají u konstrukcí namáhaných ohybem, smykem, kroucením nebo tahem vyvozeným buď z přímého zatížení, nebo z omezení vynucených nebo vnesených přetvoření. Vznik trhlin lze připustit, aniž by se omezovala jejich šířka za předpokladu, že se nenaruší funkčnost konstrukce. Šířka trhliny w_k se vypočítá dle [3] čl. 7.3.4

$$w_k = S_{r,max}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \text{ [mm]} \quad (43)$$

Kde:

$S_{r,max}$ [mm]	maximální vzdálenost trhlin
ε_{sm} [-]	průměrná hodnota poměrného přetvoření výztuže při příslušné kombinaci zatížení, zahrnující účinek vnesených deformací a přihlížející k účinkům tahového ztužení
ε_{cm} [-]	průměrná hodnota poměrného přetvoření betonu mezi trhlínami

Vypočítaná šířky trhliny musí být menší než šířka w_{max} dle tab. 6.1 s ohledem na předpokládanou funkci a charakter konstrukce.

Tab. 6.1 Doporučené hodnoty w_{max} [mm] [3]

Stupeň vlivu prostředí	Železobetonové prvky a prvky předpjaté nesoudržnou výztuží	Prvky předpjaté soudržnou výztuží
	Kvazi-stálá kombinace zatížení	Častá kombinace zatížení
X0, XC1	0,4 ¹⁾	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ²⁾
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		Dekomprese
1) Pro stupně vlivu prostředí X0, XC1 nemá šířka trhliny vliv na trvanlivost a uvedená hodnota má zajistit přijatelný vzhled. Pokud nejsou kladeny požadavky na vzhled, lze uvedenou hodnotu zvětšit. 2) Pro tyto stupně vlivu prostředí má být kromě toho posouzena dekomprese při kvazi-stálé kombinaci zatížení.		

6.1.3 OMEZENÍ DEFORMACÍ

Deformace konstrukce nesmí nepříznivě ovlivnit její vzhled nebo funkčnost. U předpjatých konstrukcí dochází k menším průhybům než u obdobných konstrukcí ze železového betonu, protože kromě průhybu od příčných zatížení se zde uplatňuje vzepětí a stlačení od předpětí.[1] Kritéria pro omezení průhybů jsou normově závislá. Např. dle [3] může být vzhled a obecná použitelnost konstrukce ohrožena, pokud při kvazi-stálém zatížení průhyb nosníku překročí hodnotu 1/250 rozpětí. Aby nedocházelo k poškození přilehlých částí konstrukce (příčky, zasklení, obklady, atd.), je mezní hodnota průhybu po zabudování prvku od kvazi-stálé kombinace zatížení omezena na 1/500 rozpětí.

6.2 MEZNÍ STAVY ÚNOSNOSTI (MSÚ)

V mezním stavu únosnosti se konstrukce posuzuje na namáhání normálovou silou, ohybovým momentem, smykem a krutem.

6.2.1 OSOVÁ SÍLA A MOMENT

Při MSÚ prvků namáhaných osovou silou a momentem se uvažují tyto předpoklady.[1]

- Platí hypotéza o rovinnosti průřezů po deformaci
- V tažené části beton nepůsobí
- Mezní stav únosnosti nastane, je-li dosaženo mezní poměrné přetvoření betonu v tlaku nebo mezní poměrné přetvoření předpínací, případně betonářské výztuže.
- Obecně uvažujeme parabolicko-rektangulární nebo bilineární výpočtové pracovní diagramy betonu a bilineární výpočtové pracovní diagramy nepředpjaté a předpjaté výztuže.
- Existuje dokonalá soudržnost mezi ocelí a betonem.



Při výpočtu se zavádí tzv. stav dekomprese (odlišný od stavu dekomprese v kap. 5.2), kterým se převede výpočet únosnosti předpjatého průřezu na výpočet nepředpjatého železobetonového průřezu. Určí se základní napětí σ_p^0 , nebo vnější tahová síla N^0 v předpínací výztuži, při kterých je v přilehlých vláknech betonu nulové napětí.

Vnější tahová síla N^0 se určuje u prvků namáhaných osovou silou a vypočítá se:

$$N^0 = P^0 - N_{g0} = -N_p^0 - N_{g0} \quad [\text{N}] \quad (44)$$

Kde:

P^0 [N] základní předpínací síla

N_{g0} [N] normálová síla od vlastní tíhy

N_p^0 [N] normálová síla od předpětí

Celková kapacita prutu N_k :

$$N_k = N^0 + \Delta P = -N_p^0 - N_{g0} + \Delta P \quad [\text{N}] \quad (45)$$

Kde:

ΔP [N] zbytková únosnost předpínací výztuže

Podmínka spolehlivosti je obecně ve tvaru (46), kde na levé straně nerovnosti je vnější zatížení, na pravé straně únosnost (kapacita prutu).

$$N_z \leq N_k \quad (46)$$

Kde:

N_z [N] tahová síla od vnějšího zatížení (např. $N_q + N_{g1}$)

Dosazením (47) do podmínky spolehlivosti a upravením pak dostaneme:

$$N_q + N_{g1} + N_{g0} + N_p^0 \leq \Delta P \quad (47)$$

Kde:

N_q [N] normálová síla od proměnného zatížení

N_{g1} [N] normálová síla od ostatního stálého zatížení



Při namáhání ohybovým momentem se vypočítá napětí σ_p^0 v předpínací výztuži pro dodatečně předpjatý prvek dle (48) a pro předem předpjatý prvek dle (49).

$$\sigma_p^0 = \sigma_p - \frac{E_p}{E_c} \sigma_{cp} \text{ [MPa]} \quad (48)$$

$$\sigma_p^0 = \sigma_p \text{ [MPa]} \quad (49)$$

Kde:

σ_n [MPa] skutečné napětí v předpínací výztuži

Pro určení mezní únosnosti ohýbaného průřezu se používá metoda mezních přetvoření. Její princip spočívá v tom, že se úroveň působících napětí v každém vlákne počítá pro zjištěné poměrné přetvoření z pracovního diagramu daného materiálu. Zjednodušením je, že je tlakové napětí v betonu uvažováno konstantní hodnotou rovnou výpočtové hodnotě pevnosti betonu v tlaku a to po výšce 80 % výšky tlačené zóny od nejvíce tlačенého vlákna.[1]

Moment na mezi únosnosti

$$M_R = F_c z_c + \Delta F_p z_p \quad [\text{Nm}] \quad (50)$$

F_c [N] výslednice tlakových napětí v tlačené zóně průřezu

ΔF_p [N] výslednice tlakových napětí v předpínací výztuži

Podmínka spolehlivosti

$$M_E + N^0_{pp} e_p \leq M_R \quad (51)$$

 M_F [Nm] vnější moment

6.2.2 SMYK A KRUT

Kromě ohybových momentů je konstrukce také namáhána posouvající silou V , která vyvolává v průřezu smykové napětí τ . Odolnost prvku ve smyku je ovlivněna pevnostní třídou betonu, tvarem prvku a smykovým vyztužením. Při ověření únosnosti ve smyku se dle [3] zjistí, zda je, nebo není pro přenesení smykových napětí potřeba navrhnout smyková výtzuž.

Prvky nevyžadují návrh smykové výztuže, pokud platí (52). U těchto prvků by se mělo provést alespoň minimální smykové vyztužení. Pokud platí (53), navrhuje se dostatečné smykové vyztužení tak, aby platilo (54).

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c} \quad (52)$$

$$V_{Ed} > V_{Rd,c} \quad (53)$$

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} \quad (54)$$

Kde:

V_{Ed} [N] návrhová posouvající síla v uvažovaném průřezu od vnějšího zatížení a předpětí

$V_{Rd,c}$ [N] návrhová únosnost ve smyku prvku bez smykové výztuže

V_{Rd} [N] únosnost prvku se smykovou výztuží

Při návrhu smykové výztuže se vychází z modelu náhradní příhradoviny (obr. 6-1). Pro prvky se svislou smykovou výztuží se V_{Rd} uvažuje jako menší hodnota vypočítaná ze vzorců (55) a (56).

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \quad [\text{N}] \quad (55)$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd}}{(\cot \theta + \tan \theta)} \quad [\text{N}] \quad (56)$$

Kde:

A_{sw} [m²] průřezová plocha smykové výztuže

α_{cw} [-] součinitel zohledňující stav napětí v tlačném pásu

s [m] osová vzdálenost třmínků

f_{ywd} [MPa] návrhová mez kluzu smykové výztuže

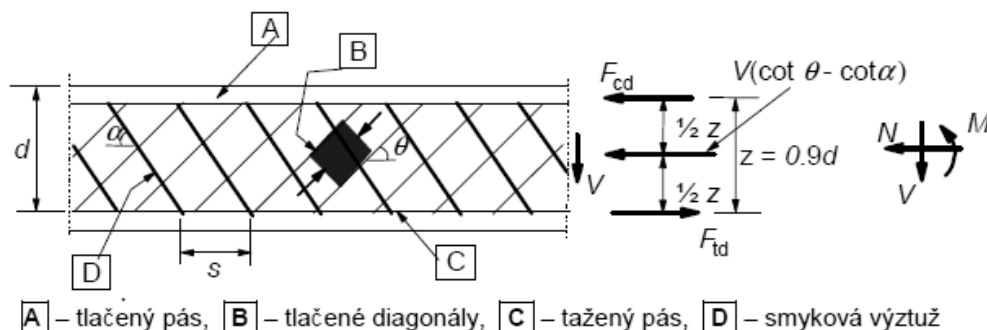
f_{cd} [MPa] návrhová pevnost smykové výztuže

z [m] rameno vnitřních sil v průřezu

b_w [m] minimální šířka průřezu mezi tlačným a taženým pásem

v_1 [-] redukční součinitel pevnosti betonu při porušení smykem

θ [°] úhel sklonu tlakových diagonál s podélnou osou prvku



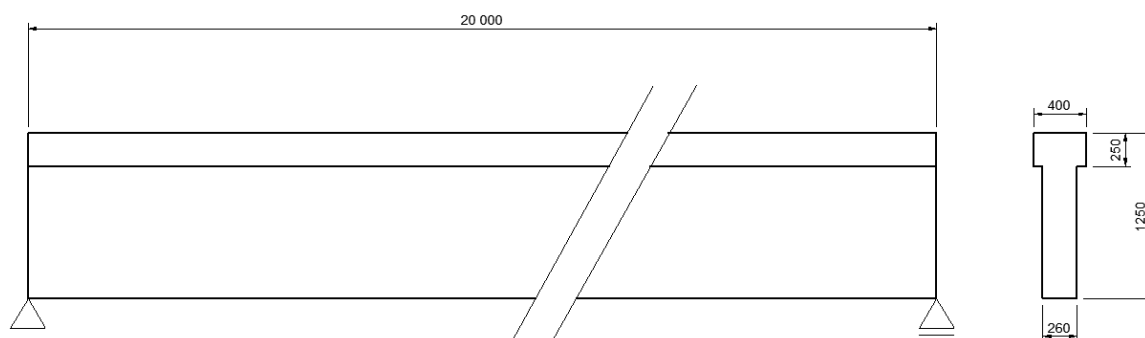
Obr. 6-1 Model náhradní příhradoviny[3]

Výztuž přenášející kroucení se navrhuje na celou hodnotu hlavního tahu způsobeného kroucením. Tato výztuž je tvořena uzavřenými třmínky a podélnou výztuží.[1]



7 VZOROVÝ PŘÍKLAD

Jako vzorový příklad je sestaven výpočet předem předpjatého betonového nosníku (vaznice) s rozměry dle obr. 7-1. Výpočet je proveden dle literatury [3] a [4].



Obr. 7-1 Rozměry nosníku

7.1 CHARAKTERISTIKY NOSNÍKU

Nosník je volen z betonu C55/67. Jako předpínací výztuž jsou volena lana Y1770S7-18,0-A. Materiálové charakteristiky jsou uvedeny v tab. (7.1) a (7.2).

Tab. 7.1 Materiálové charakteristiky betonu C55/67[5]

f_{ck}	55	MPa	Charakteristická pevnost betonu v tlaku válcová
$f_{ck,cube}$	67	MPa	Charakteristická pevnost betonu v tlaku krychelná
γ_c	1,5	-	Dílčí součinitel materiálu
$f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c$	36,667	MPa	Návrhová pevnost v tlaku
f_{ctm}	4,2	MPa	Střední hodnota pevnosti v tahu
E_{cm}	38	GPa	Modul pružnosti
ε_{cu3}	- 0,0031	-	Mezní přetvoření

Tab. 7.2 Materiálové charakteristiky předpínací výztuže Y1770S7-18,0-A [4]

f_{pk}	1770	MPa	Charakteristická pevnost
$f_{p,01k}$	1520	MPa	Smluvní mez kluzu
ϕ_p	18,0	mm	Průměr lana
γ_s	1,15	-	Dílčí součinitel materiálu
$f_{pd} = f_{p,01k}/\gamma_s$	1322	MPa	Návrhová pevnost
E_p	195	GPa	Modul pružnosti
A_{p1}	0,0002	m ²	Plocha jednoho lana
γ_p	1,0	-	Dílčí součinitel předpětí



7.1.1 KRYTÍ

Konstrukce se nachází v prostředí XC1, což je suché nebo stále mokré prostředí. Třída konstrukce je S4 (životnost 50 let). Výpočet je proveden dle kap. 2.3.2.

Nominální krycí vrstva:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = 27 + 10 = 37 \text{ mm}$$

Určení minimální krycí vrstvy:

$$c_{min} = \max(c_{min,b}; c_{min,dur}; 10 \text{ mm})$$

$$c_{min} = \max(27; 25; 10 \text{ mm})$$

$$c_{min,b} = 1,5 \cdot \varnothing = 1,5 \cdot 18 = 27 \text{ mm}$$

$$c_{min,dur} = 25 \text{ mm} \quad (\text{voleno z tab. 2.3})$$

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

7.1.2 ZATÍŽENÍ

Na nosník působí stálé zatížení vlastní tíhou a střešním pláštěm. Jako proměnné zatížení je pro ukázkou zvoleno zatížení sněhem. Výpočty jsou provedeny v následujících tabulkách (7.3) a (7.4).

Tab. 7.3 Stálé zatížení

	zatížení [kN/m ³]	plocha [m ²]	charakteristické zatížení [kN/m]
vlastní tíha g_{0k}	25	0,36	9
střešní plášť g_{1k}	12	1,8	21,6
Celkové g_k			30,6

Tab. 7.4 Proměnné + celkové zatížení

	zatížení [kN/m ²]	rozměr [m]	charakteristické zatížení [kN/m]
zatížení sněhem q_k sněhová oblast III	1,5	4,5	6,75
Celkem stálé + proměnné f_k			37,35

**Návrhové hodnoty zatížení**

- Od vlastní tíhy $g_{0d} = g_{0k} \cdot \gamma_F = 9 \cdot 1,35 = 12,15 \frac{kN}{m}$
- Od střešního pláště $g_{1d} = g_{1k} \cdot \gamma_F = 21,6 \cdot 1,35 = 29,16 \frac{kN}{m}$
- Od stálého zatížení $g_d = g_{0d} + g_{1d} = 12,15 + 29,16 = 41,31 \frac{kN}{m}$
- Proměnné $q_d = q_k \cdot \gamma_F = 6,75 \cdot 1,5 = 10,125 \frac{kN}{m}$
- Celkové $f_d = g_d + q_d = 41,31 + 10,125 = 54,435 \frac{kN}{m}$

7.1.3 VÝSLEDNÉ VNITŘNÍ ÚČINKY (VVÚ)**Od vlastní tíhy**

$$M_{E0k} = \frac{1}{8} g_{0k} l^2 = \frac{1}{8} \cdot 9 \cdot 20^2 = 450 \text{ kNm}$$

$$M_{E0d} = \frac{1}{8} g_{0d} l^2 = \frac{1}{8} \cdot 12,15 \cdot 20^2 = 607,5 \text{ kNm}$$

Od střešního pláště

$$M_{E1k} = \frac{1}{8} g_{1k} l^2 = \frac{1}{8} \cdot 21,6 \cdot 20^2 = 1080 \text{ kNm}$$

$$M_{E1d} = \frac{1}{8} g_{1d} l^2 = \frac{1}{8} \cdot 29,16 \cdot 20^2 = 1458 \text{ kNm}$$

Od proměnného zatížení

$$M_{EQk} = \frac{1}{8} q_k l^2 = \frac{1}{8} \cdot 6,75 \cdot 20^2 = 337,5 \text{ kNm}$$

$$M_{EQd} = \frac{1}{8} q_d l^2 = \frac{1}{8} \cdot 10,125 \cdot 20^2 = 506,25 \text{ kNm}$$

Od celkového zatížení

$$M_{Ek} = \frac{1}{8} f_k l^2 = \frac{1}{8} \cdot 37,35 \cdot 20^2 = 1867,5 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = \frac{1}{8} f_d l^2 = \frac{1}{8} \cdot 54,435 \cdot 20^2 = 2721,75 \text{ kNm}$$

**Moment od časté kombinace zatížení**

$$M_{E\psi_1} = M_{E0k} + M_{E1k} + \psi_1 M_{EQk} = 450 + 1080 + 0,2 \cdot 337,5 = 1597,5 \text{ kNm}$$

ψ_1 součinitel pro zatížení sněhem (= 0,2) dle [6]

Moment od kvazi-stálé kombinace zatížení

$$M_{E\psi_2} = M_{E0k} + M_{E1k} + \psi_2 M_{EQk} = 450 + 1080 + 0 \cdot 337,5 = 1530 \text{ kNm}$$

ψ_2 součinitel pro zatížení sněhem (= 0) dle [6]

Posouvající síly u podpory

$$V_{Ek} = 0,5 \cdot f_k l = 0,5 \cdot 37,35 \cdot 20 = 373,5 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 0,5 \cdot f_d l = 0,5 \cdot 54,435 \cdot 20 = 544,35 \text{ kN}$$

7.1.4 PRŮŘEZOVÉ CHARAKTERISTIKY**Plocha průřezu betonu**

$$A_c = 0,4 \cdot 0,25 + 0,26 \cdot 1 = 0,36 \text{ m}^2$$

Těžiště průřezu betonu

Od horních vláken

$$t_{c1} = \frac{0,4 \cdot 0,25 \cdot 0,125 + 0,26 \cdot 1 \cdot (0,5 + 0,25)}{0,36} = 0,5764 \text{ m}$$

Od spodních vláken

$$t_{c2} = 1,25 - 0,5764 = 0,6736 \text{ m}$$

Moment setrvačnosti

$$I_c = \frac{1}{12} \cdot 0,4 \cdot 0,25^3 + 0,4 \cdot 0,25 \cdot (0,5764 - 0,125)^2 + \frac{1}{12} \cdot 0,26 \cdot 1^3 + 0,26 \cdot 1 \cdot (0,6736 - 0,5)^2 = 0,0504 \text{ m}^4$$

Moduly průřezu

$$W_{c1} = \frac{I_c}{t_{c1}} = \frac{0,0504}{0,5764} = 0,08744 \text{ m}^3$$

$$W_{c2} = \frac{I_c}{t_{c2}} = \frac{0,0504}{0,6736} = 0,07482 \text{ m}^3$$



7.1.5 MAXIMÁLNÍ PŘÍPUSTNÉ NAPĚTÍ

Maximální přípustné napětí je počítáno dle kap. 3.

Napětí před zakotvením.

$$\sigma_{p0,max} = \min\{0,8f_{pk}; 0,9f_{p0,1k}\}$$

$$\sigma_{p0,max} = \min\{0,8 \cdot 1770; 0,9 \cdot 1520\}$$

$$\sigma_{p0,max} = \min\{1416; 1368\} = 1368 \text{ MPa}$$

Napětí po zakotvení

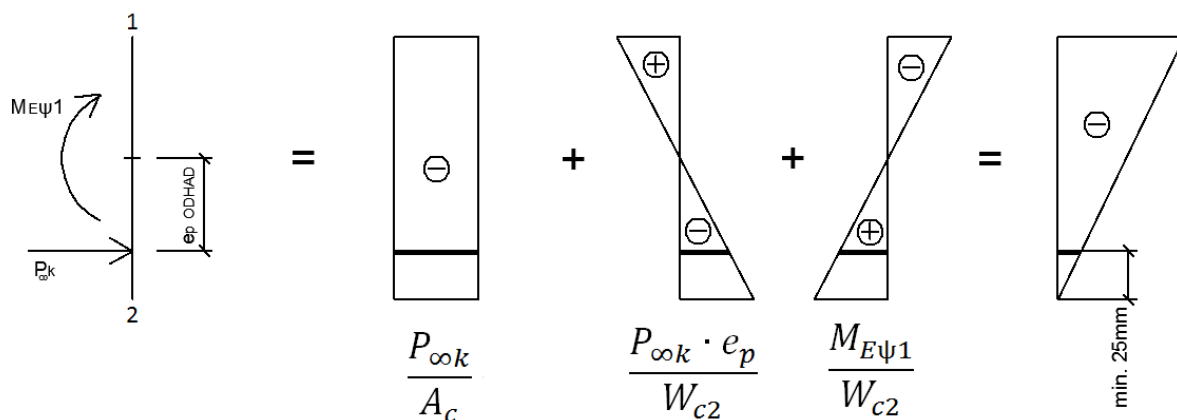
$$\sigma_{pa,max} = \min\{0,75f_{pk}; 0,85f_{p0,1k}\}$$

$$\sigma_{pa,max} = \min\{0,75 \cdot 1770; 0,85 \cdot 1520\}$$

$$\sigma_{pa,max} = \min\{1327,5; 1292\} = 1292 \text{ MPa}$$

7.2 NÁVRH PŘEDPĚTÍ

Návrh předpětí je proveden metodou dovolených namáhání pomocí stavu dekomprese. Dle [3] se při dekompresi požaduje, aby veškerá soudržná předpínací výztuž nebo hadice byly alespoň 25 mm uvnitř tlačného betonu.



Obr. 7-2 Návrh velikosti předpínací síly [1]

Normálové napětí uprostřed nosníku v horních vláknech

$$\sigma_1 = \left| -\frac{P_{\infty k}}{A_c} + \frac{P_{\infty k} \cdot e_p}{W_{c1}} - \frac{M_{E\psi 1}}{W_{c1}} \right| < f_{ck}$$



Normálové napětí uprostřed nosníku v dolních vláknech

$$\sigma_2 = -\frac{P_{\infty k}}{A_c} - \frac{P_{\infty k} \cdot e_p}{W_{c2}} + \frac{M_{E\psi 1}}{W_{c2}} \leq 0$$

Odhad velikosti excentricity předpínací síly $e_p = 0,36 \text{ m}$.

Z rovnice nulového napětí v dolních vláknech je vyjádřena síla v předpínací výztuži.

$$-\frac{P_{\infty k}}{A_c} - \frac{P_{\infty k} \cdot e_p}{W_{c2}} + \frac{M_{E\psi 1}}{W_{c2}} = 0 \rightarrow P_{\infty k} = \frac{\frac{M_{E\psi 1}}{W_{c2}}}{\frac{1}{A_c} + \frac{e_p}{W_{c2}}}$$

$$P_{\infty k} = \frac{\frac{1597,5}{0,07482}}{\frac{1}{0,36} + \frac{0,36}{0,07482}} = 2813 \text{ kN}$$

Odhad velikosti ztrát předpětí 15 % volen dle [4]

$$P_{mk} = \frac{P_{\infty k}}{(1 - 0,15)} = \frac{2813}{0,85} = 3309,4 \text{ kN}$$

Maximální napětí ve výztuži při vnesení předpětí do betonu

$$\sigma_{pa} = \sigma_{pa, \max} = 1292 \text{ MPa}$$

Počet lan

$$A_p = \frac{P_{mk}}{\sigma_{pa}} = \frac{3309,4}{1292 \cdot 10^3} = 0,002561 \text{ m}^2$$

$$n_p = \frac{A_p}{A_{p1}} = \frac{0,002561}{0,0002} = 12,8 \rightarrow \text{navrhuje se 13 lan}$$

Rozmístění lan v průřezu a charakteristiky ideálního průřezu [3] čl. 8.10.1.2

Těžiště lan od spodního povrchu

$$a_p = \frac{(3 \cdot 80 + 3 \cdot 150 + 3 \cdot 220 + 2 \cdot 390 + 2 \cdot 360)}{n_p} = \frac{2550}{13} = 196 \text{ mm} = 0,196 \text{ m}$$

Skutečná excentricita lan od těžiště betonového průřezu

$$e_p = t_{c2} - a_p = 0,6736 - 0,196 = 0,4776 \text{ m}$$

Vzdálenost těžiště lan od horního povrchu

$$d = h - a_p = 1,25 - 0,196 = 1,054 \text{ m}$$



Plocha ideálního průřezu

$$A_i = A_c + \alpha_p \cdot A_p = 0,36 + 5,132 \cdot 0,002561 = 0,3731 \text{ m}^2$$

$$\text{Kde: } \alpha_p = \frac{E_p}{E_{cm}} = \frac{195}{38} = 5,132$$

Vzdálenost těžiště ideálního průřezu od těžiště betonového průřezu

$$t_i = \frac{(\alpha_p \cdot A_p \cdot e_p)}{A_i} = \frac{5,132 \cdot 0,002561 \cdot 0,4776}{0,3731} = 0,01682 \text{ m}$$

Excentricita lan od těžiště ideálního průřezu

$$e_{pi} = e_p - t_i = 0,4776 - 0,01682 = 0,46 \text{ m}$$

Vzdálenost těžiště ideálního průřezu od horního okraje

$$z_{ci} = t_{c1} + t_i = 0,5464 + 0,01682 = 0,56322 \text{ m}$$

Vzdálenost těžiště ideálního průřezu od spodního okraje

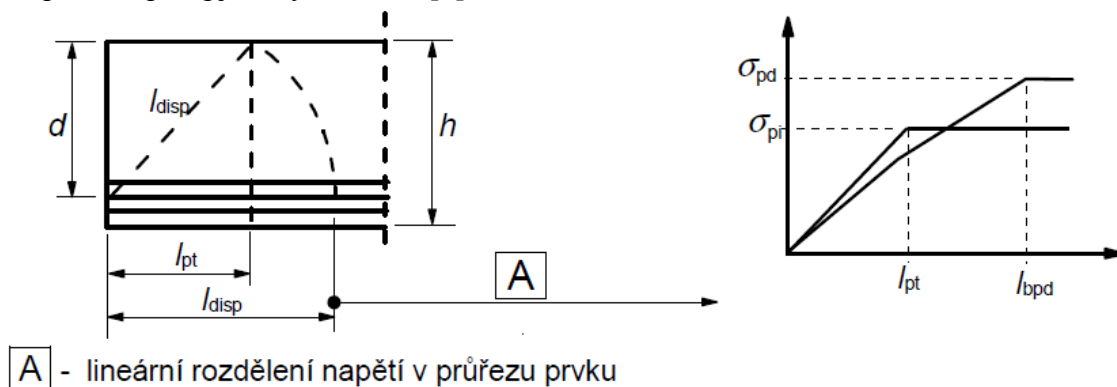
$$z_{ti} = t_{c2} - t_i = 0,6736 - 0,01682 = 0,65678 \text{ m}$$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu k těžišti

$$I_i = I_c + A_c \cdot t_i^2 + \alpha_p \cdot A_p \cdot e_{pi}^2 = 0,0504 + 0,36 \cdot 0,01682^2 + 5,132 \cdot 0,002561 \cdot 0,46^2$$

$$I_i = 0,05328 \text{ m}^4$$

Kotvení předem předpjaté výztuže dle [3] čl. 8.10.2



Obr. 7-3 Přenášení předpětí v předem napjatých prvcích - délkové parametry [3]

Napětí v soudržnosti:

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \eta_1 f_{cta} (t = 1 \text{ den}) = 3,2 \cdot 1,0 \cdot 1,47 = 4,704 \text{ MPa}$$

η_{p1} součinitel, kterým se zohledňuje druh předpínacích vložek a situace v soudržnosti při uvolňování. (Pro 7 drátová lana = 3,2)

η_1 pro dobré podmínky v soudržnosti (= 1,0)

$f_{cta}(t)$ návrhová hodnota pevnosti betonu v tahu v době uvolňování.



$$f_{cta}(t = 1den) = \frac{\alpha_{ct} \cdot 0,7 \cdot f_{ctm}(t)}{\gamma_c} = \frac{1,0 \cdot 0,7 \cdot 3,15}{1,5} = 1,47 \text{ MPa}$$

α_{ct} Součinitel dlouhodobých účinků na pevnost betonu (= 1,0) dle [3] čl. 3.1.6 (2)

Uvažuje se, že v 1 dnu je dosaženo 75% pevnosti betonu

$$f_{ctm}(t = 1den) = 0,75 \cdot f_{ctm} = 0,75 \cdot 4,2 = 3,15 \text{ MPa}$$

Napětí v předpínací výztuži po uvolnění

$$\sigma_{pa} = 1292 \text{ MPa}$$

Základní hodnota délky přenosu předpínací síly

$$l_{pt} = \frac{\alpha_1 \alpha_2 \sigma_{pa}}{f_{bpt}} = \frac{1 \cdot 0,19 \cdot 18 \cdot 1292}{4,704} = 939 \text{ mm}$$

α_1 pro postupné uvolňování (= 1,0) dle [3] čl. 8.10.2.2 (2)

α_2 pro 7 drátová lana (= 0,19) dle [3] 8.10.2.2 (2)

Návrhová hodnota délky přenosu předpínací síly [3] 8.10.2.2 (3)

$$l_{pt1} = 0,8 \cdot l_{pt} = 0,8 \cdot 939,2 = 751,2 \text{ mm}$$

Návrhová hodnota délky přenosu předpínací síly

$$l_{pt2} = 1,2 \cdot l_{pt} = 1,2 \cdot 939,2 = 1126,8 \text{ mm}$$

Vyrovňovací délka, za kterou lze předpokládat lineární rozdělení napětí

$$l_{dis} = \sqrt{l_{pt}^2 + d} = \sqrt{939^2 + 1054^2} = 1411,6 \text{ mm}$$

7.3 VÝPOČET ZTRÁT PŘEDPĚTÍ

7.3.1 ZTRÁTY OKAMŽITÉ

Počáteční napětí v předpínací výztuži vyvozené předpínací pistolí

$$\sigma_{p0} = 1368 \text{ MPa} \leq \sigma_{p0,max} = 1368 \text{ MPa}$$

Počáteční předpínací síla

$$P_{m0} = \sigma_{p0} A_p = 1368 \cdot 10^3 \cdot 0,0026 = 3556,8 \text{ kN}$$

Ztráta předpětí pokluzem v kotvě dle kap. 3.6.

$$\Delta\sigma_{pw} = -\frac{wE_p}{l_p} = -\frac{0,003 \cdot 195 \cdot 10^3}{28} = -20,9 \text{ MPa}$$

$$w = 3 \text{ mm}$$



$$l_p = 28 \text{ m}$$

Ztráta předpětí přetvořením opěrného zařízení dle kap. 3.6

$$\Delta\sigma_{pA} = -E_p \frac{m-1}{2m} \cdot \frac{\Delta l_A}{l_A} = -195 \cdot 10^3 \frac{13-1}{2 \cdot 13} \cdot \frac{0,004}{24} = -15 \text{ MPa}$$

$$m = 13, \Delta l_A = 4 \text{ mm}, l_A = 24 \text{ m}$$

Ztráta předpětí relaxací výztuže dle kap. 3.5

Třída relaxačního chování 2 (dráty nebo lana s nízkou relaxací) [3] čl. 3.3.2 (4). Vnesení předpětí se uvažuje v čase $t_a = 24 \text{ hodin}$. Maximální teplota se uvažuje 65°C

$$\sigma_{pi} = \sigma_{p0} = 1368 \text{ MPa}$$

$$\rho_{1000} \quad \text{pro třídu relaxačního chování 2 (= 2,5 %) dle [3] čl. 3.3.2 (5)}$$

$$t_{eq} = \frac{1,14^{T_{max}-20}}{T_{max}-20} \sum_{i=1}^n (T_{\Delta t_i} - 20) \Delta t_i$$

$$t_{eq} = \frac{1,14^{65-20}}{65-20} (65-20) \cdot 24 = 8728 \text{ hodin} = 363,7 \text{ dnů}$$

Zvětšená doba po napnutí

$$t_a^* = t_a + t_{eq} = 24 + 8728 = 8752 \text{ hod}$$

Tahové napětí v předpínací výztuži zmenšené o ztráty vznikající v průběhu napínání

$$\sigma_{pi}^+ = \sigma_{pi} + \Delta\sigma_{pw} + \Delta\sigma_{pA} = 1368 - 20,9 - 15 = 1332,1 \text{ MPa}$$

$$\mu = \frac{\sigma_{pi}^+}{f_{pk}} = \frac{1332,1}{1770} = 0,7525$$

Ztráta předpětí relaxací

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}^+} = -0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1\mu} \left(\frac{t_a^*}{1000} \right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}^+} = -0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,7525} \left(\frac{8728}{1000} \right)^{0,75(1-0,7525)} \cdot 10^{-5} = -0,02323$$

$$\Delta\sigma_{pr} = \sigma_{pi}^+ \cdot 0,02323 = 1332,1 \cdot (-0,02323) = -31 \text{ MPa}$$



Ztráta předpětí způsobená rozdílem teplot předpínací výztuže a opěrného zařízení dle kap. 3.7

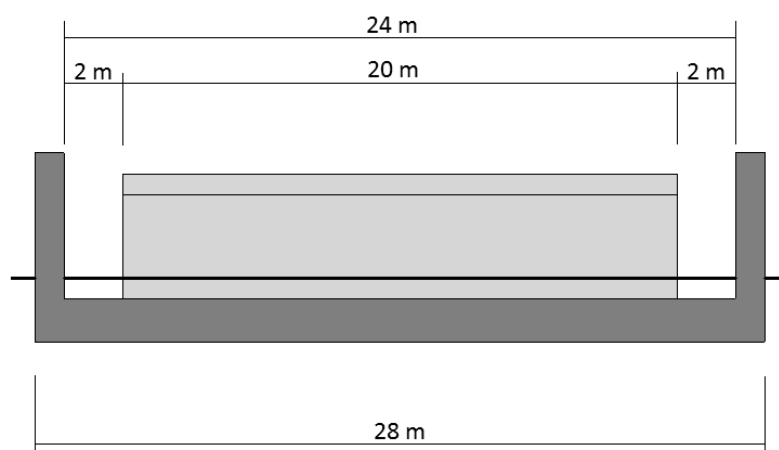
$$\Delta\sigma_{pT} = \frac{E_p}{l_p} \left(\alpha_A l_A (T_A - T_0) - \alpha_p l_p (T_p - T_0) \right) \quad (30)$$

$$\Delta\sigma_{pT} = \frac{195 \cdot 10^3}{28} (1 \cdot 10^{-5} \cdot 24(50 - 15) - 1 \cdot 10^{-5} \cdot 28(65 - 15))$$

$$\Delta\sigma_{pT} = -39 \text{ MPa}$$

$$\alpha_A = 1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}, \alpha_p = 1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1} \quad \text{dle [3] čl. 3.1.3.(5)}$$

$$l_A = 24 \text{ m}; l_p = 28 \text{ m}; T_A = 50^\circ\text{C}; T_p = 65^\circ\text{C}; T_0 = 15^\circ\text{C}$$



Obr. 7-4 Schéma předpínací dráhy

Ztráta předpětí okamžitým pružným přetvořením betonu při předpínání dle kap. 3.3

Okamžité ztráty celkem bezprostředně před vnesením předpětí do betonu

$$\sum \Delta\sigma_p = \Delta\sigma_{pw} + \Delta\sigma_{pA} + \Delta\sigma_{pr} + \Delta\sigma_{pT} = -20,9 - 15 - 31 - 39 = -105,9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_p = \sigma_{p0} + \sum \Delta\sigma_p = 1368 - 105,9 = 1262,1 \text{ MPa}$$

$$v = \frac{A_p E_p}{A_c E_{cm(t)}} = \frac{0,0026 \cdot 195}{0,36 \cdot 34,86} = 0,0404$$

$$\psi = v \cdot \left(1 + \frac{A_c e_p^2}{I_c} \right) = 0,0404 \cdot \left(1 + \frac{0,36 \cdot 0,4776^2}{0,0504} \right) = 0,1062$$



Modul pružnosti v čase vnesení předpětí [3] čl. 3.1.3 (2)

$$E_{cm(t)} = \left(\frac{f_{cm(t)}}{f_{cm}} \right)^{0,3} \cdot E_{cm} = (0,75)^{0,3} \cdot 38 = 34,86 \text{ GPa}$$

$$\Delta\sigma_{pe} = -\frac{\sigma_p \cdot \psi}{(1 + \psi)} = -\frac{1262,1 \cdot 0,1062}{(1 + 0,1062)} = -121,2 \text{ MPa}$$

Změna předpětí okamžitým pružným přetvořením betonu při předpínání od účinků vlastní tíhy (přírůstek napětí)

$$\Delta\sigma_{peg0} = \frac{M_{E0k}}{I_i} e_{pi} \frac{E_p}{E_{cm(t)}} = \frac{0,45}{0,05358} \cdot 0,4636 \cdot \frac{195}{34,86} = 21,8 \text{ MPa}$$

Okamžité ztráty celkem

$$\sum \Delta\sigma_p = \Delta\sigma_{pw} + \Delta\sigma_{pA} + \Delta\sigma_{pr} + \Delta\sigma_{pT} + \Delta\sigma_{pe} + \Delta\sigma_{peg0}$$

$$\sum \Delta\sigma_p = -20,9 - 15 - 31 - 39 - 121,2 + 21,8$$

$$\sum \Delta\sigma_p = -205,3 \text{ MPa}$$

Posouzení napětí ve výztuži v okamžiku bezprostředně po vnesení předpětí do betonu

$$\sigma_{pa} = \sigma_{p0} + \sum \Delta\sigma_p = 1368 - 205,3$$

$$\sigma_{pa} = 1162,7 \text{ MPa} < \sigma_{pa,max} = 1292 \text{ MPa} \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Síla ve výztuži těsně po vnesení předpětí do betonu

$$P_{ma} = \sigma_{pa} \cdot A_p = 1162,7 \cdot 10^3 \cdot 0,0026 = 3023 \text{ kN}$$

7.3.2 ZTRÁTY DLOUHODOBÉ

Pro výpočet časově závislých ztrát (relaxace, smršťování, dotvarování) je použit zjednodušený výpočet dle [3] čl.5.10.6 (2). Jsou počítány v polovině nosníku.

Změna předpětí okamžitým pružným přetvořením betonu

Změna napětí od účinků kvazi-stálé kombinace zatížení

$$\Delta\sigma_{peg1} = \frac{M_{E\psi2} - M_{E0k}}{I_i} e_{pi} \frac{E_p}{E_{cm}} = \frac{1530 - 450}{0,05328} \cdot 0,46 \cdot \frac{195}{38} = 47,8 \text{ MPa}$$



Změna předpínací síly

$$\Delta P_{peg1} = \Delta \sigma_{peg1} \cdot A_p = 47,8 \cdot 10^3 \cdot 0,0026 = 124,3 \text{ kN}$$

Ztráta předpětí dlouhodobou částí relaxace

Stanovuje se ztráta za časový interval, kde počátek intervalu je $t_a^* = 8752 \text{ hod}$ a konec $t_\infty = 50 \text{ let} = 438000 \text{ hod}$.

Tahové napětí v předpínací výztuži bezprostředně po okamžiku t_a^*

$$\sigma_{pi}^+ = \sigma_{pa} + \Delta \sigma_{peg1} = 1162,7 + 47,8 = 1210,5 \text{ MPa}$$

Relaxace již proběhla v intervalu 0 až 1 den

$$\sum_1^{i-1} \Delta \sigma_{pr,j} = \Delta \sigma_{pr} = -31 \text{ MPa}$$

Nové počáteční napětí pro účely výpočtu relaxace

$$\sigma_{pi}^+ - \sum_1^{i-1} \Delta \sigma_{pr,j} = 1210,5 + 31 = 1241,5 \text{ MPa}$$

Součinitel μ

$$\mu = \frac{\sigma_{pi}^+ - \sum_1^{i-1} \Delta \sigma_{pr,j}}{f_{pk}} = \frac{1241,5}{1770} = 0,7014$$

$$\frac{\sum_1^{i-1} \Delta \sigma_{pr,j}}{\sigma_{pi}^+ - \sum_1^{i-1} \Delta \sigma_{pr,j}} = -0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1\mu} \left(\frac{t_e}{1000} \right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{-31}{1241,5} = -0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,7014} \left(\frac{t_e}{1000} \right)^{0,75(1-0,7014)} \cdot 10^{-5}$$

$$t_e = 66310 \text{ hod}$$

Ztráta relaxací v daném intervalu

$$\Delta t_i = t_\infty - t_a^* = 438000 - 8752 = 429248 \text{ hod}$$

$$\Delta \sigma_{pr,i} = -0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1\mu} \left(\frac{t_e + \Delta t_i}{1000} \right)^{0,75(1-\mu)} \{ \sigma_{pi}^+ - \Delta \sigma_{pr} \} \cdot 10^{-5} - \Delta \sigma_{pr}$$

$$\Delta \sigma_{pr,i} = -0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,7014} \left(\frac{66310 + 429248}{1000} \right)^{0,75(1-0,7014)} \{ 1241,5 \} \cdot 10^{-5} + 31$$



$$\Delta\sigma_{pr,i} = -17,64 \text{ MPa}$$

Ztráta předpětí smršťováním dle kap. 3.8 a [3] čl. 3.1.4

Poměrné přetvoření od vysychání

$$\varepsilon_{cd(t)} = \beta_{ds(t,t_s)} \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} = 0,9915 \cdot 0,8017 \cdot 746 \cdot 10^{-6} = 593 \cdot 10^{-6}$$

$$t_s = 4,822 \text{ dny} \quad \text{náhradní stáří betonu na začátku vysychání}$$

$$t = 50 \text{ let} = 18250 \text{ dnů} \quad \text{stáří betonu v uvažovaném okamžiku}$$

Součinitel k_h se určí pomocí náhradního rozměru průřezu h_0 z normy [3] tabulka 3.6

$$h_0 = \frac{2A_c}{u} = \frac{2 \cdot 360000}{2900} = 248,3$$

$$A_c = 0,36 \text{ m}^2 = 360000 \text{ mm}^2$$

$$u = 2900 \text{ mm} \quad \text{Obvod části průřezu vystavený vysychání (bez horního povrchu)}$$

$$k_h = 0,8017$$

Časová funkce vývoje smršťování

$$\beta_{ds(t,t_s)} = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04 \sqrt{h_0^3}} = \frac{(18250 - 4,822)}{(18250 - 4,822) + 0,04 \sqrt{248,3^3}} = 0,9915$$

Základní poměrné přetvoření od smršťování vysycháním [3] příloha B.2

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

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \cdot 6) \cdot \exp \left(-0,11 \cdot \frac{63}{10} \right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot 1,356$$

$$\varepsilon_{cd,0} = 746 \cdot 10^{-6}$$

$$f_{cm} = 63 \text{ MPa} \quad \text{dle [5]}$$

$$f_{cmo} = 10 \text{ MPa} \quad \text{dle [3] B. 2 (1)}$$

$$\alpha_{ds1} = 6,00 \quad \text{cement třídy R}$$

$$\alpha_{ds2} = 0,11 \quad \text{cement třídy R}$$



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

$RH = 50\%$ relativní vlhkost okolního prostředí

$RH_0 = 100 \%$ dle [3] B. 2 (1)

Poměrné přetvoření od autogenního smršťování dle [3] čl. 3.1.4

$$\varepsilon_{ca(t)} = \beta_{as(t)} \cdot \varepsilon_{ca(\infty)} = 1,0 \cdot 112,5 \cdot 10^{-6} = 112,5 \cdot 10^{-6}$$

$$\varepsilon_{ca(\infty)} = 2,5(f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = 2,5(55 - 10) \cdot 10^{-6} = 112,5 \cdot 10^{-6}$$

$$\beta_{as(t)} = 1 - \exp(-0,2 \cdot t^{0,5}) = 1 - \exp(-0,2 \cdot 18250^{0,5}) = 1,0$$

Celkové poměrné přetvoření od smršťování

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} = 593 \cdot 10^{-6} + 112,5 \cdot 10^{-6} = 705,5 \cdot 10^{-6}$$

Ztráta smršťováním

$$\Delta\sigma_{ps} = -\varepsilon_{cs} E_p = -705,5 \cdot 10^{-6} \cdot 195 \cdot 10^3 = -137,57 \text{ MPa}$$

Ztráta dotvarováním betonu dle kap. 3.8 a[3] příloha B.1

Součinitel dotvarování

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0) = 1,71 \cdot 0,991 = 1,695$$

Součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_{0,T})}{(\beta_H + t - t_{0,T})} \right]^{0,3} = \left[\frac{(18250 - 4,822)}{(558,84 + 18250 - 4,822)} \right]^{0,3} = 0,991$$

Součinitel závislý na relativní vlhkosti (RH v %) a na náhradním rozměru prvku (h_0 v mm),
pro $f_{cm} > 35 \text{ MPa}$

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

$$\beta_H = 1,5[1 + (0,012 \cdot 50)^{18}] \cdot 248,3 + 250 \cdot 0,7454 = 558,84 \leq 1500 \cdot 0,7454 = 1118,1$$

Základní součinitel dotvarování

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) = 1,358 \cdot 2,117 \cdot 0,595 = 1,71$$



Součinitel, vystihující vliv relativní vlhkosti na základní součinitel dotvarování
pro $f_{cm} > 35 \text{ MPa}$

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 = \left[1 + \frac{1 - \frac{50}{100}}{0,1 \cdot \sqrt[3]{248,3}} \cdot 0,6627 \right] \cdot 0,8891 = 1,358$$

Součinitel vystihující vliv pevnosti betonu na základní součinitel dotvarování

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} = \frac{16,8}{\sqrt{63}} = 2,117$$

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

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0,1 + t_0^{0,20})} = \frac{1}{(0,1 + 9,87^{0,20})} = 0,595$$

Vliv druhu cementu na součinitel dotvarování betonu lze uvažovat úpravou stáří betonu v okamžiku vnesení zatížení t_0 podle následujícího vztahu:

$$t_0 = t_{0,T} \cdot \left(\frac{9}{2 + t_{0,T}^{1,2}} + 1 \right)^\alpha = 4,822 \cdot \left(\frac{9}{2 + 4,822^{1,2}} + 1 \right)^1 = 9,87 \geq 0,5$$

$\alpha = 1 \rightarrow$ *mocnitel vystihující vliv druhu cementu (cement třídy R)*

Stáří betonu ve dnech v okamžiku vnesení zatížení, upravené s přihlédnutím k vlivu teploty, je vypočítáno v tabulce X dle následujícího vzorce:

$$t_{0,T} = \sum_{i=1}^n e^{-\left(\frac{4000}{[273+T(\Delta t_i)]} - 13,65\right)} \cdot \Delta t_i = 4,822 \text{ dny}$$



Tab. 7.5 Úprava stáří betonu [4] tab. 3.5

Skutečný čas [hod]	Skutečný čas [dny]	Δt_i [dny]	Teplota T [°C]	$t_{0,T}$ [dny]
0	0,00000			0
2	0,08333	0,083333	15	0,066
1	0,12500	0,041667	40	0,165
1	0,16667	0,041667	60	0,379
16	0,83333	0,666667	65	4,476
1	0,87500	0,041667	50	4,624
1	0,91667	0,041667	40	4,724
1	0,95833	0,041667	30	4,789
1	1,00000	0,041667	15	4,822

Součinitele vlivu pevnosti betonu

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,7} = \left[\frac{35}{63} \right]^{0,7} = 0,6627$$

$$\alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,2} = \left[\frac{35}{63} \right]^{0,2} = 0,8891$$

$$\alpha_3 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,5} = \left[\frac{35}{63} \right]^{0,5} = 0,7454$$

Napětí v betonu v úrovni předpínací výztuže vyvozené vlastní tíhou, počátečním předpětím a dalším kvazi-stálými zatíženími

$$\sigma_{c,QP} = -\frac{P_{ma} + \Delta P_{peg1}}{A_c} - \frac{(P_{ma} + \Delta P_{peg1})e_p^2}{I_c} + \frac{M_{E\psi2}}{I_c} e_p$$

$$\sigma_{c,QP} = -\frac{3023 + 124,3}{0,36} - \frac{(3023 + 124,3) \cdot 0,4776^2}{0,0504} + \frac{1530}{0,0504} \cdot 0,4776$$

$$\sigma_{c,QP} = -8,5 \text{ MPa}$$

Ztráta dotvarováním:

$$\Delta\sigma_{pc} = \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \varphi(t, t_0) \cdot \sigma_{c,QP} = -\frac{195}{38} \cdot 1,695 \cdot 8,5 = -73,9 \text{ MPa}$$

Celková ztráta za interval 1 den až 50 let

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = \frac{\varepsilon_{cs} E_p + 0,8 \Delta\sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \Phi_{(t,t_0)} \sigma_{c,QP}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \frac{A_p}{A_c} \left(1 + \frac{A_c}{I_c} e_p^2 \right) [1 + 0,8 \Phi_{t,t_0}]}$$



$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = \frac{-137,57 - 0,8 \cdot 17,64 - 73,9}{1 + \frac{195}{38} \cdot \frac{0,0026}{0,36} \cdot \left(1 + \frac{0,36}{0,0504} \cdot 0,4776^2\right) \cdot [1 + 0,8 \cdot 1,695]}$$

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = -182,2 \text{ MPa}$$

Napětí ve výztuži po 50 letech

Po okamžitých i dlouhodobých ztrátách včetně ztrát okamžitým pružným přetvořením betonu od dlouhodobých zatížení

$$\sigma_{p\infty} = \sigma_{pa} + \Delta\sigma_{peg1} + \Delta\sigma_{p,c+s+r} = 1162,7 + 47,8 - 182,2 = 1028,3 \text{ MPa}$$

Po okamžitých i dlouhodobých ztrátách bez ztrát okamžitým pružným přetvořením betonu (pro výpočet s ideálním průřezem)

$$\sigma_{p\infty} = \sigma_{pa} + \Delta\sigma_{p,c+s+r} - \Delta\sigma_{pe} - \Delta\sigma_{peg0} = 1162,7 - 182,2 + 121,2 - 21,8 = 1080 \text{ MPa}$$

Síla ve výztuži po 50 letech

Po okamžitých i dlouhodobých ztrátách včetně ztrát okamžitým pružným přetvořením betonu od dlouhodobých zatížení

$$P_{m\infty} = \sigma_{p\infty} A_p = 1028,3 \cdot 10^3 \cdot 0,0026 = 2673,6 \text{ kN}$$

Po okamžitých i dlouhodobých ztrátách bez ztrát okamžitým pružným přetvořením betonu (pro výpočet s ideálním průřezem)

$$P_{m\infty} = \sigma_{p\infty} A_p = 1080 \cdot 10^3 \cdot 0,0026 = 2808 \text{ kN}$$

Změna předpětí okamžitým pružným přetvořením betonu

Uvažovaný moment od krátkodobého zatížení

$$M_{EQk}^* = (1 - \psi_2) \cdot M_{EQk} = (1 - 0) \cdot 337,5 = 337,5 \text{ kNm}$$

Změna napětí ve výztuži

$$\Delta\sigma_{peq} = \frac{M_{EQk}^*}{I_i} e_{pi} \frac{E_p}{E_{cm}} = \frac{337,5 \cdot 10^{-3}}{0,05328} \cdot 0,46 \cdot \frac{195}{38} = 14,95 \text{ MPa}$$



Změny předpětí

Tab. 7.6 Výčet změn předpětí

Ztráty		Průřez $l/2$	
Počáteční napětí	$\sigma_{p0} =$	1368	MPa
Ztráta pokluzem	$\Delta\sigma_{pw} =$	-20,9	MPa
Ztráta přetvořením opěrného zařízení	$\Delta\sigma_{pA} =$	-15	MPa
Ztráta relaxací – krátkodobá	$\Delta\sigma_{pr} =$	-31	MPa
Teplotní ztráty	$\Delta\sigma_{pT} =$	-39	MPa
Ztráty výrobní	$\sum \Delta\sigma_p =$	-105,9	MPa
Napětí po výrobních ztrátách bez ztrát pružným přetvořením betonu	$\sigma_p =$	1262,1	MPa
Ztráta pružným přetvořením betonu	$\Delta\sigma_{pe} =$	-121,2	MPa
Napětí ve výztuži po výrobních ztrátách a ztrátách pružným přetvořením betonu	$\sigma_{pa} =$	1162,7	MPa
Změna předpětí okamžitým pružným přetvořením betonu od dlouhodobého zatížení – mimo vlastní tíhu	$\Delta\sigma_{peg1} =$	47,8	MPa
Dlouhodobá část relaxace	$\Delta\sigma_{pr,i} =$	-17,64	MPa
Ztráta smršťováním	$\Delta\sigma_{ps} =$	-137,57	MPa
Ztráta dotvarováním	$\Delta\sigma_{pc} =$	-73,9	MPa
Napětí ve výztuži po 50 let., od dlouhodobých účinků a včetně ztrát pružným přetvořením betonu	$\sigma_{p\infty} =$	1028,3	MPa
Napětí ve výztuži po 50 let., od dlouhodobých účinků a bez ztrát pružným přetvořením betonu	$\sigma_{p\infty} =$	1080	MPa
Změna předpětí okamžitým pružným přetvořením betonu od krátkodobého zatížení	$\Delta\sigma_{peq} =$	14,95	MPa

7.4 VÝPOČET MEZNÍCH STAVŮ

Pro ukázkou jsou ve vzorovém příkladu spočítány mezní stavy omezení napětí pro MSP a MSÚ při porušení prvku normálovou silou a ohybovým momentem.

7.4.1 MEZNÍ STAV POUŽITELNOSTI (MSP)

Pro průřez v polovině rozpětí v čase $t = \infty$. [4][3] kap.7

Omezení napětí v předpínací výztuži

Dle [3] kap.7 nemá střední hodnota napětí v předpínací výztuži překročit hodnotu $k_5 f_{pk}$.



Omezení napětí na konci životnosti

$$\sigma_{p\infty} + \Delta\sigma_{peq} \leq k_5 f_{pk}$$

$$1028,3 + 14,95 = 1043,25 \text{ MPa} \leq 0,75 \cdot 1770 = 1327,5 \text{ MPa} \rightarrow \text{vyhovuje}$$

$$k_5 = 0,75 \quad \text{dle [3] čl. 7.2(5)}$$

Bezprostředně po instalaci ostatního stálého zatížení a proměnného zatížení, na stranu bezpečnou neuvažujeme celou hodnotu dlouhodobých ztrát

$$\sigma_{p\infty} - \Delta\sigma_{p,c+s+r} + \Delta\sigma_{peq} \leq k_5 f_{pk}$$

$$1028,3 + 182,2 + 14,95 = 1225,45 \leq 0,75 \cdot 1770 = 1327,5 \text{ MPa} \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Omezení napětí v betonu

Výpočet je proveden pro předpínací sílu po okamžitých i dlouhodobých ztrátách bez ztrát okamžitým pružným přetvořením betonu. Ve výpočtu se pracuje s charakteristikami ideálního průřezu. Dle normy [3] čl. 5.10.9 (1) musí být při výpočtech použitelnosti a únavy uvažovány odchylky možných změn předpětí. V mezním stavu použitelnosti se stanoví dvě charakteristické hodnoty předpínací síly.

Horní charakteristická hodnota předpínací síly

$$P_{k,sup} = r_{sup} \cdot P_{ma} = 1,05 \cdot 2808 = 2948,4 \text{ kN}$$

Dolní charakteristická hodnota předpínací síly

$$P_{k,inf} = r_{inf} \cdot P_{ma} = 0,95 \cdot 2808 = 2667,6 \text{ kN}$$

Posouzení vzniku podélných trhlin při charakteristické kombinaci zatížení

$$\sigma_1 = -\frac{P_{k,inf}}{A_i} + \frac{P_{k,inf} \cdot e_{pi}}{I_i} \cdot z_{ci} - \frac{M_{Ek}}{I_i} \cdot z_{ci} < 0,6 \cdot f_{ck}$$

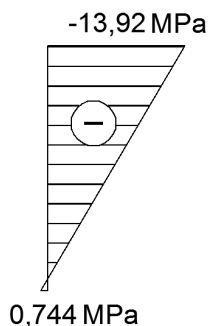
$$\sigma_1 = -\frac{2667,6}{0,3731} + \frac{2667,6 \cdot 0,46}{0,05328} \cdot 0,56322 - \frac{1867,5}{0,05328} \cdot 0,56322 < 0,6 \cdot 55$$

$$\sigma_1 = |-13,92 \text{ MPa}| < 33 \text{ MPa} \rightarrow \text{vyhovuje, nevzniknou podélné trhliny}$$

$$\sigma_2 = -\frac{P_{k,inf}}{A_i} - \frac{P_{k,inf} \cdot e_{pi}}{I_i} \cdot z_{ti} + \frac{M_{Ek}}{I_i} \cdot z_{ti} < f_{ctm}$$

$$\sigma_2 = -\frac{2667,6}{0,3731} - \frac{2667,6 \cdot 0,46}{0,05328} \cdot 0,65678 + \frac{1867,5}{0,05328} \cdot 0,65678 < 4,2$$

$$\sigma_2 = 0,744 \text{ MPa} < 4,2 \text{ MPa} \rightarrow \text{nevzniknou kolmé trhliny}$$



Obr. 7-5 Napětí od charakteristické kombinace

Posouzení lineárního dotvarování pro kvazi-stálou kombinaci zatížení

$$\sigma_1 = -\frac{P_{k,inf}}{A_i} + \frac{P_{k,inf} \cdot e_{pi}}{I_i} \cdot z_{ci} - \frac{M_{E\psi 2}}{I_i} \cdot z_{ci} < 0,45 \cdot f_{ck}$$

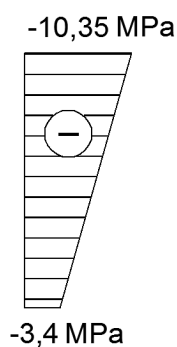
$$\sigma_1 = -\frac{2667,6}{0,3731} + \frac{2667,6 \cdot 0,46}{0,05328} \cdot 0,56322 - \frac{1530}{0,05328} \cdot 0,56322 < 0,45 \cdot 55$$

$$\sigma_1 = |-10,35 \text{ MPa}| < 24,75 \text{ MPa} \rightarrow \text{vyhovuje}$$

$$\sigma_2 = -\frac{P_{k,inf}}{A_i} - \frac{P_{k,inf} \cdot e_{pi}}{I_i} \cdot z_{ti} + \frac{M_{E\psi 2}}{I_i} \cdot z_{ti}$$

$$\sigma_2 = -\frac{2667,6}{0,3731} - \frac{2667,6 \cdot 0,46}{0,05328} \cdot 0,65678 + \frac{1530}{0,05328} \cdot 0,65678$$

$$\sigma_2 = -3,4 \text{ MPa} \rightarrow \text{tlak}$$



Obr. 7-6 Napětí od kvazi-stálé kombinace

Posouzení dekomprese pro častou kombinaci zatížení

$$\sigma_1 = -\frac{P_{k,inf}}{A_i} + \frac{P_{k,inf} \cdot e_{pi}}{I_i} \cdot z_{ci} - \frac{M_{E\psi 1}}{I_i} \cdot z_{ci}$$

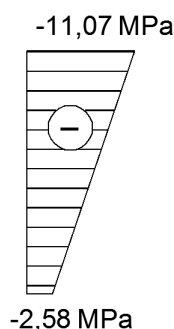
$$\sigma_1 = -\frac{2667,6}{0,3731} + \frac{2667,6 \cdot 0,46}{0,05328} \cdot 0,56322 - \frac{1597,5}{0,05328} \cdot 0,56322$$

$$\sigma_1 = -11,07 \text{ MPa} \rightarrow \text{tlak}$$

$$\sigma_2 = -\frac{P_{k,inf}}{A_i} - \frac{P_{k,inf} \cdot e_{pi}}{I_i} \cdot z_{ti} + \frac{M_{E\psi 1}}{I_i} \cdot z_{ti}$$

$$\sigma_2 = -\frac{2667,6}{0,3731} - \frac{2667,6 \cdot 0,46}{0,05328} \cdot 0,65678 + \frac{1597,5}{0,05328} \cdot 0,65678$$

$$\sigma_2 = -2,58 \text{ MPa} \rightarrow \text{tlak}$$



Obr. 7-7 Napětí od časté kombinace

V dolních vláknech průřezu působí tlak. Je splněn požadavek dekomprese, aby veškerá soudržná předpínací výztuž nebo hadice byly alespoň 25 mm uvnitř tlačného betonu.

7.4.2 MEZNÍ STAV ÚNOSNOSTI (MSÚ)

Porušení momentem a normálovou silou pro průřez v polovině rozpětí v čase $t = \infty$ [4]

Návrhová hodnota předpínací síly v čase $t = \infty$

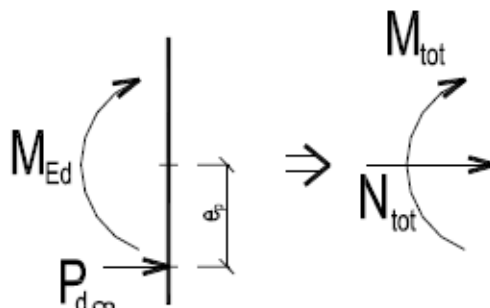
$$P_{d\infty} = \gamma_p \cdot P_{\infty} = 1,0 \cdot 2808 = 2808 \text{ kN}$$

$$\gamma_p = 1,0 \quad \text{dle [3] čl. 2.4.2.2 (1)}$$

Složení účinků svislého zatížení a předpínací síly

$$N_{tot} = P_{d\infty} = 2808 \text{ kN (tlak)}$$

$$M_{tot} = M_{Ed} + N_{tot} \cdot e_p = 2721,75 - 2808 \cdot 0,4776 = 1380,6 \text{ kNm}$$



Obr. 7-8 Složení účinků zatížení

Základní napětí v předpínací výztuži

$$\sigma_p^0 = \sigma_{p\infty} = 1080 \text{ MPa}$$

Přetvoření předpínací výztuže

$$\varepsilon_p^0 = \frac{\sigma_p^0}{E_p} = \frac{1080}{195 \cdot 10^3} = 0,005538$$

Platnost Hookova zákona je omezena přetvořením

$$\varepsilon_{py} = \frac{f_{pd}}{E_p} = \frac{1322}{195 \cdot 10^3} = 0,00678 > \varepsilon_p^0$$

Předpokládá se maximální možná změna napětí ve výztuži

$$\Delta\sigma_p = f_{pd} - \sigma_p^0 = 1322 - 1080 = 242 \text{ MPa}$$

Předpokládá se, že změna napětí bude stejná pro všechny vrstvy předpínací výztuže.

Změna velikosti předpínací síly

$$\Delta F_p = \Delta\sigma_p \cdot A_p = 242 \cdot 10^3 \cdot 0,0026 = 629,2 \text{ kN}$$

Silová podmínka rovnováhy

$$N_{tot} = F_c - \Delta F_p$$

Síla v tlačném betonu

$$F_c = N_{tot} + \Delta F_p = 2808 + 629,2 = 3437,2 \text{ kN}$$

$$f_{cd} = \frac{F_c}{A_{cc}} \rightarrow A_{cc} = \frac{F_c}{f_{cd}} = \frac{3437,2}{36,667 \cdot 10^3} = 0,0937 \text{ m}^2$$

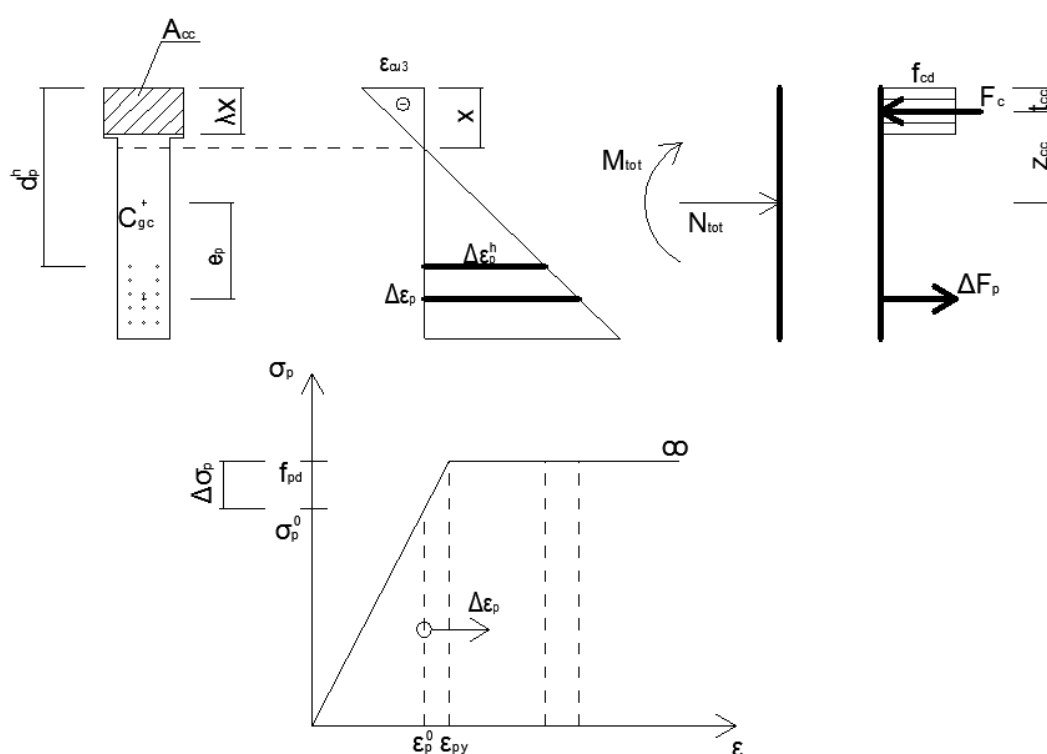
$$A_{cc} = b \cdot \lambda \cdot x \rightarrow \lambda \cdot x = \frac{A_{cc}}{b} = \frac{0,0937}{0,4} = 0,234 \text{ m}$$

Součinitel definující účinnou výšku tlačené oblasti [3] čl.3.7.1(3)

Pro $50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$

$$\lambda = 0,8 - \frac{(f_{ck} - 50)}{200} = 0,8 - \frac{(55 - 50)}{200} = 0,775$$

$$x = \frac{0,234}{\lambda} = \frac{0,234}{0,775} = 0,302 \text{ m}$$



Obr. 7-9 Mezní stav únosnosti M, N [4]

Poloha horní vrstvy výztuže

$$d_p^h = 0,89 \text{ m}$$

Ověření předpokladu plné využitelnosti všech vrstev výztuže

$$\frac{\Delta \varepsilon_p^h}{d_p^h - x} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{x} \rightarrow \Delta \varepsilon_p^h = \frac{\varepsilon_{cu3}}{x} \cdot (d_p^h - x) = \frac{0,0031}{0,302} \cdot (0,89 - 0,302) = 0,006036$$

$$\Delta \varepsilon_p^h + \varepsilon_p^0 = 0,006036 + 0,005538 = 0,01157 > \varepsilon_{py} = 0,00678$$

→ platí výše zavedený předpoklad



Těžiště tlačené plochy k hornímu okraji

$$t_{cc} = \frac{\lambda \cdot x}{2} = \frac{0,234}{2} = 0,117 \text{ m}$$

Působíště síly F_c vztažené k těžišti průřezu

$$z_{cc} = t_{c1} - t_{cc} = 0,5464 - 0,117 = 0,4294 \text{ m}$$

Působíště síly ΔF_p vztažené k těžišti průřezu

$$z_{pc} = e_p = 0,4776 \text{ m}$$

Moment na mezi únosnosti

$$M_{RD} = F_c \cdot z_{cc} + \Delta F_p \cdot z_{pc} = 3437,2 \cdot 0,4294 + 629,2 \cdot 0,4776$$

$$M_{RD} = 1776,4 \text{ kNm} > M_{tot} = 1380,6 \text{ MPa} \rightarrow \text{vyhovuje}$$



ZÁVĚR

V této bakalářské práci je sestaven stručný a přehledný popis výpočtu předpjatých betonových nosníků. Nejprve jsou popsány materiály, které se používají na výrobu předpjatého betonu. Poté je vytvořen popis výpočtu napětí v předpínací výztuži a jeho změn v důsledku výrobních a provozních ztrát. Ve čtvrté kapitole jsou uvedeny účinky předpětí v jednotlivých fázích výstavby a provozu konstrukce. Pátá kapitola je zaměřena na návrh předpětí a jsou zde popsány dvě základní metody návrhu. V předposlední kapitole jsou popsány mezní stavy použitelnosti a únosnosti, na které se předpjatá konstrukce posuzuje. Jako poslední je sestaven výpočet předem předpjatého betonového nosníku o délce 20 m. V příkladu je ukázán výpočet krytí, zatížení, návrhu předpětí, jednotlivých ztrát předpětí a mezních stavů. Výsledky výpočtu změn předpětí jsou shrnuty v tab. 7.6.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] NAVRÁTIL, Jaroslav. *Předpjaté betonové konstrukce*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 160 s. ISBN 80-214-2649-7.
- [2] PROCHÁZKA, Jaroslav. *Navrhování betonových konstrukcí 1*. 1. vyd. Praha: ČBS Servis, 2005, 307 s. ISBN 80-903-5020-8.
- [3] ČSN EN 1992-1-1 *Eurokód 2. Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby*. Český normalizační institut, 2005
- [4] NAVRÁTIL, Jaroslav a Miloš ZICH. *Předpjatý beton: Průvodcem předmětem BL11 modul P01*. Brno, 2006.
- [5] MOTYČKA, Ludvík. *Betonové konstrukce*. 2007.
- [6] ČSN EN 1990. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Český normalizační institut, 2003.
- [7] NAVRÁTIL, Jaroslav. WIKI IDEA RS, s.r.o. *Přednášky z předpjatého betonu: Předpjatý beton - BL11* [online]. 2010 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://wiki.idea-rs.cz/category/prednasky-z-predpjateho-betonu/>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

N_p^0	[N]	Normálová síla od předpětí
σ_p^0	[MPa]	Základní napětí
$\Delta\sigma_{p\mu}$	[MPa]	Ztráta předpětí třením
A_c	[m ²]	Plocha průřezu betonu
A_p	[m ²]	Plocha předpínací výztuže
A_{sw}	[m ²]	průřezová plocha smykové výztuže
E_c	[MPa]	Modul pružnosti betonu
E_p	[MPa]	Modul pružnosti předpínací výztuže
F_c	[N]	Výslednice tlakových napětí v tlačené zóně průřezu
I_c	[m ⁴]	Moment setrvačnosti betonu
M_E	[Nm]	Vnější moment
M_R	[Nm]	Moment na mezi únosnosti
M_p	[Nm]	Moment od předpětí
N^0	[N]	Vnější tahová síla
N_{g0}	[N]	Normálová síla od vlastní tíhy
N_{g1}	[N]	Normálová síla od ostatního stálého zatížení
N_k	[N]	Celková kapacita prutu
N_q	[N]	Normálová síla od proměnného zatížení
N_z	[N]	Tahová síla od vnějšího zatížení
P^0	[N]	Základní předpínací síla
T_0	[°C]	Teplota v okamžiku předpínání pro lana i opěrné zařízení
T_A	[°C]	Teplota opěrného zařízení
T_p	[°C]	Teplota předpínací výztuže
V_{Ed}	[N]	Návrhová posouvající síla od vnějšího zatížení a předpětí
$V_{Rd,c}$	[N]	Návrhová únosnost ve smyku prvku bez smykové výztuže
V_{Rd}	[N]	Únosnost prvku se smykovou výztuží
W_c	[m ³]	Modul průřezu
b_w	[m]	Minimální šířka průřezu mezi tlačeným a taženým pásem
$c_{min,b}$	[mm]	Minimální krycí vrstva z hlediska soudržnosti
$c_{min,dur}$	[mm]	Minimální krycí vrstva z hlediska podmínek prostředí
c_{min}	[mm]	Minimální krycí vrstva
c_{nom}	[mm]	Nominální krycí vrstva



e_p	[m]	Excentricita kabelu
f_{cd}	[MPa]	Návrhová pevnost smykové výztuže
$f_{ck,cube}$	[MPa]	Charakteristická pevnost betonu v tlaku krychelná
f_{ck}	[MPa]	Charakteristická pevnost betonu v tlaku válcová
$f_{p0,1k}$	[MPa]	Charakteristická hodnota meze 0,1 předpínací výztuže
f_{pk}	[MPa]	Charakteristická hodnota pevnosti předpínací výztuže
f_{ywd}	[MPa]	Návrhová mez kluzu smykové výztuže
l_A	[m]	Délka mezi kotevními bloky opěrného zařízení
l_p	[m]	Délka předpínacích lan
t_{cor}	[hod]	Doba podržení napětí při korekci relaxace
v_1	[-]	Redukční součinitel pevnosti betonu při porušení smykem
w_k	[mm]	Šířka trhliny
z_c	[m]	Vzdálenost působíště síly F_c od těžiště průřezu
z_p	[m]	Vzdálenost působíště síly ΔF_p od těžiště průřezu
α_A	[]	Součinitel teplotní roztažnosti opěrného zařízení
α_{cw}	[m ²]	Součinitel zohledňující stav napětí v tlačeném pásu
α_p	[]	Součinitel teplotní roztažnosti předpínací výztuže
$\beta_c(t, t_0)$	[-]	Součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení
ε_c	[-]	Poměrné přetvoření betonu
ε_c^a	[-]	Poměrné přetvoření od autogenního smršťování
ε_c^d	[-]	Poměrné přetvoření od vysychání
ε_{cm}	[-]	Průměrná hodnota poměrného přetvoření betonu mezi trhlínami
ε_c^s	[-]	Poměrné přetvoření od smršťování betonu
ε_p	[-]	Poměrné přetvoření předpínací výztuže
ε_{sm}	[-]	Průměrná hodnota poměrného přetvoření výztuže
ρ_{1000}	[%]	Hodnota relaxační ztráty 1000 hodin po napnutí při 20°C
σ_c	[MPa]	Napětí v betonu
σ_{cp}^{g+p}	[MPa]	Napětí od dlouhodobých zatížení
$\sigma_{p0,0}$	[MPa]	Napětí v kabelu vyvozené předpínací pistolí při předpínání
$\sigma_{p0,max}$	[MPa]	Napětí vyvozené předpínací pistolí
$\sigma_{pa,max}$	[MPa]	Maximální přípustná hodnota napětí po zakotvení
σ_{pi}	[MPa]	Hodnota počátečního předpětí
φ_0	[-]	Základní součinitel dotvarování



$\Delta\sigma_{pr}^{cor}$	[MPa]	Korekce relaxace podržením napětí
$\Delta\sigma_{pr}^{kapacita}$	[MPa]	Celková kapacita relaxace
ΔF_p	[N]	Výslednice tlakových napětí v předpínací výztuži
ΔN_c	[N]	Přírůstek síly v betonovém prvku
Δc_{dev}	[mm]	Přídavek na návrhovou odchylku
$\Delta\sigma_{pA}$	[MPa]	Ztráta předpětí přetvořením opěrného zařízení
$\Delta\sigma_{pT}$	[MPa]	Ztráta předpětí způsobená rozdílem teplot
$\Delta\sigma_{pc}$	[MPa]	Ztráta předpětí dotvarováním betonu
$\Delta\sigma_{pep}$	[MPa]	Ztráta předpětí postupným předpínáním
$\Delta\sigma_{pr}$	[MPa]	Absolutní hodnota relaxačních ztrát předpětí
$\Delta\sigma_{ps}$	[MPa]	Ztráta předpětí smršťováním betonu
$\Delta\sigma_{pw}$	[MPa]	Ztráta předpětí pokluzem v kotvě
ΔP	[N]	Zbytková únosnost předpínací výztuže
H	[kN]	Normálová síla od předpětí
L	[m]	Délka paraboly
M	[Nm]	Moment od vnějšího zatížení
N	[N]	Normálová síla od vnějšího zatížení
P	[N]	Předpínací síla
f	[m]	Vzepětí
k	[m ⁻¹]	Nezamýšlená úhlová změna
l	[m]	Délka kabelu
m	[-]	Počet kabelů
p	[Nm ⁻¹]	Rovnoměrné zatížení
s	[m]	Osová vzdálenost třmínků
t	[hod]	Doba po napnutí
v	[-]	Součinitel
w	[m]	Pokluz v kotvě
α	[rad]	Celková zamýšlená úhlová změna
θ	[°]	úhel sklonu tlakových diagonál s podélnou osou prvku
μ	[-]	Součinitel tření
$\varphi(t, \tau)$	[-]	Součinitel dotvarování
ψ	[-]	Součinitel pro excentrické kabely