

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



**POUŽITÍ ULTRA-VYSOKOHODNOTNÝCH
BETONŮ PRO KONSTRUKČNÍ PRVKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Zpracoval: Ondřej Daneš

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Iva Broukalová, Ph.D



2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Daneš	Jméno: Ondřej	Osobní číslo: 477390
Zadávatel katedra: K 133		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Použití ultra-vysokohodnotných betonů pro konstrukční prvky	
Název bakalářské práce anglicky: Application of ultra-high performance concrete for structural elements	
Pokyny pro vypracování: Shmůtl poznatků z odborné literatury o vývoji, vlastnostech a použití UHPC Použití UHPC pro prvek na velké rozpětí - vytýpování vhodného prvku, návrh, posouzení, výkresová dokumentace	
Seznam doporučené literatury: Vědecké knihy, články a časopisy	
Jméno vedoucího bakalářské práce: doc. Ing. Iva Broukalová, Ph.D.	
Datum zadání bakalářské práce: 8. 2. 2021	Termín odevzdání bakalářské práce: 16. 5. 2021 <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

<u>12.2.2021</u> Datum převzetí zadání	<u>Daneš</u> Podpis studenta(ky)
---	-------------------------------------

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá ultra-vysokohodnotnými betony. V teoretické části popisuje vývoj této technologie, která je stále poměrně nová, neustále se vyvíjí a návrhové principy této technologie nejsou ukotveny v české normě. Dále se práce zabývá jednotlivými vstupními surovinami, které jsou pro zhotovení UHPC potřeba. Jsou také popsány mechanické a trvanlivostní vlastnosti hotové směsi UHPC. Praktická část se zabývá konstrukčním návrhem předem předpjatého optimalizovaného vazníku haly s výpočtem a výkresovou dokumentací.

Klíčová slova

Ultra-vysokohodnotný beton, UHPC, předem předpjatý vazník

Anotation

This bachelor's thesis studies ultra high concrete. In theoretical part, there is described development of the technology, which is still quite new, it is constantly developing. Design procedures aren't anchored in Czech standard. The work also deals with individual raw materials, which are necessary for mixing the UHPC mixture. There are also described mechanical durability properties of finished mixture. Practical part deals with structural design of a prestressed optimized truss of the hall with calculation and design documentation.

Key words

Ultra-high performance concrete, UHPC, preloaded truss

Čestné prohlášení:

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

.....

Ondřej Daneš

Poděkování:

Děkuji doc. Ing. Ivě Broukalové Ph.D. za vstřícnou komunikaci i trpělivost v průběhu studia a odborné vedení při zpracování této bakalářské práce.

Obsah:

Teoretická část

1. Úvod.....	9
2. Vývoj od běžných betonů přes vysokohodnotné betony k ultra-vysokohodnotným betonům.....	10
3. Stručný popis základních vlastností ultra-vysokohodnotného betonu	12
4. Složení směsi UHPC.....	13
4.1 Kamenivo.....	13
4.2. Křemenná moučka.....	15
4.3. Cement.....	15
4.4. Příměsi.....	15
4.5. Přísady.....	17
4.6. Voda.....	18
4.7. Vlákenná výztuž.....	19
5. Výroba a zkoušení konzistence čerstvé směsi UHPC.....	20
5.1 Zpracování.....	20
5.2 Ošetřování.....	22
5.3 Zkoušení UHPC -Konzistence čerstvé směsi.....	22
5.4 Zkoušení UHPC-ostatní mechanicko-fyzikální vlastnosti čerstvé směsi.....	23
6. Vlastnosti ztvrdlé směsi UHPC	24
6.1 Smršťování.....	24
6.2 Dotvarování.....	24
6.3 Pevnost v tlaku.....	25
6.4. Pevnost v tahu.....	25
6.5. Odolnost proti rázu.....	26
6.6. Trvanlivost.	26
6.7. Ostatní vlastnosti.....	27
7. Použití UHPC betonů.....	28
7.1 Konstrukce mostu.....	28
7.2 Lávky.....	28
7.3 Opláštění.....	30
7.4. Nábytek, nádobí, umyvadla.....	31
7.5 Rekonstrukce.....	31
7.6. Fasády UHPC.....	31

7.7 Střecha.....	32
8. Závěr teoretické části.....	33
Praktická část	
Konstrukční návrh předem předpjatého vazníku z UHPC.....	35
1. Stručný popis návrhu.....	35
2. Zatížení.....	36
3. Návrh směsi a předpínací výztuže.....	43
3.1 Složení betonu s charakteristickou pevností 180 MPa.....	43
3.2 Základní vlastnosti výztuže.....	43
4. Vazník v poli.....	44
4.1 Návrh rozměrů.....	44
4.2 Výpočet průřezových charakteristik.....	45
4.3 Zatížení.....	46
4.4 Návrh předpínací síly, výztuže a krycí vrstvy.....	46
4.5 Ztráty předpětí (snížení napětí ve výztuži).....	47
5. Vazník nad podporou.....	51
5.1 Návrh rozměrů.....	51
5.2 Výpočet průřezových charakteristik.....	52
5.3 Zatížení.....	52
5.4 Návrh předpínací síly a výztuže a krycí vrstvy.....	52
5.5 Výpočet ztrát předpětí.....	52
6. Posouzení MSP.....	55
7. Posouzení MSÚ+smyk.....	57
8. Závěr praktické části.....	61

Teoretická část

1. Úvod

Beton je v současnosti nejpoužívanější a nejdůležitější stavební hmotou v současném stavebním průmyslu [1]. V České republice se v posledních letech podle údajů Svazu výrobců betonu ročně okolo 7 milionů m³ transportbetonu. [2] Roční celosvětová produkce betonu činí asi 4,4 miliard tun [3].

Často je používán jako konstrukční materiál díky výhodám, které tento materiál má. Mezi tyto výhody patří především: pevnost v tlaku, trvanlivost, možnost odlít specifických tvarů, možná produkce přímo na stavbě nebo vyšší požární odolnost oproti jiným často používaným konstrukčním materiálům jako dřevo či ocel.

Sledujeme-li historický vývoj materiálu na bázi hydraulických pojiv (pojiv, která tuhnou a tvrdnou pod vodou) nalézáme první stopy již ve starověku. Kolem roku 1000 př.n.l. stavěli Fénicičané v Jeruzalémě velké vodní cisterny a vodovodní přivaděče, a to s použitím částečně hydraulických malt získaných smísením vápna a rozdrčených cihel. [4]

Již ve starověku lze najít stavby, kde byl použit beton, například známý Pantheon v Římě.

K dalšímu významnému kroku vývoje betonu došlo ve 2. polovině 19. století, kdy došlo ke zhotovení železobetonu. Za vynálezce této technologie pokládáme Josepha Moniera [2].

Od poloviny 60. let 20. století dochází k rozvoji vysokohodnotného betonu [5]. Postupně bylo vysokohodnotným betonům věnováno čím dál více pozornosti ve výzkumu. Tato technologie umožnila realizaci štíhlejších prvků oproti běžným betonům při zachování schopnosti přenést potřebné zatížení. [5]

V současnosti se rozvíjí nejvíce ultra-vysokohodnotné betony (UHPC), které oproti vysokohodnotným (HPC) mají ještě vyšší pevnost a také trvanlivost.

Bakalářská práce se zabývá shrnutím poznatků o vlastnostech a použití technologie UHPC. Druhá část této bakalářské práce je věnována návrhu vazníku pro betonovou halu z této technologie.

2. Vývoj od běžných betonů přes vysokohodnotné betony k ultra-vysokohodnotným betonům

Před 60. lety 20. století měl běžný beton používaný ve stavebnictví pevnost v tlaku v rozmezí 15 až 30 MPa [5] a byl vyráběn poměrně jednoduše z kameniva, cementu a vody. U náročných předpjatých konstrukcí byla dosahováno pevnosti až 60 MPa díky použití velmi kvalitního hutného kameniva, nízkého vodního součinitele a dlouhou účinnou vibrací. [6] Vyšší pevnost nad 30 MPa měla také předválečná opevnění z 30. let minulého století. V 60. letech 20. století se významně začal používat popílek do betonu v Severní Americe. Od zavedení plastifikačních přísad se pevnost betonu neustále zvyšuje. Zlepšená zpracovatelnost a snížení vodního součinitele vedly k nárůstům pevnosti v tlaku do oblasti kolem 80 MPa. Hlavním kritériem pro velké zvýšení pevnosti betonu v tlaku bylo snížení vodního součinitele za použití účinných plastifikátorů. Pro jeho dosažení je stěžejní výběr druhu cementu, a tak v rámci vývoje vysokohodnotných betonů byla snaha vyrobit takovou modifikaci cementu, která má lepší reologické vlastnosti a malou ztrátu konzistence v průběhu první hodiny po zamíchání.

Kladl se důraz na vhodný výběr plastifikátoru, aby měl co nejmenší nežádoucí vedlejší účinky - zpomalení tuhnutí nebo provzdušnění. [5]

Nepřetržitý vývoj betonu byl zaměřen na řešení hlavních konkrétních problémů: 1. tíha; 2. nízký poměr pevnosti v tahu k pevnosti v tlaku; 3. vysoký poměr hmotnosti k pevnosti; 4. špatná objemová stabilita; 5. špatná houževnatost; 6. trvanlivost. [7] V 70. letech 20. století byly poprvé představeny superplastifikátory. Ve 80. letech 20. století H. H. Bache v laboratorních podmínkách došel k závěru, že při snížení vodního součinitele pod tehdejší „psychologickou“ hraniční hodnotu 0,3, vysoké dávce superplastifikátoru a použití speciálního mikrocementu a křemičitého úletu (tedy velmi jemné příměsi) je možné dosáhnout pevnosti v tlaku přes 250 MPa, což je hodnota charakteristická pro UHPC. Po objevení této skutečnosti se postupně vyvíjely betony s nízkými vodními součiniteli, které bylo možné dopravit na stavbu. [5] V 80. letech 20. století vědci zavedli celosvětově pojmy HSC (vysokopevnostní) a HPC (vysokohodnotný). Pojmem HSC se označoval beton, který měl pevnost v tlaku v rozmezí 50-120 MPa, zatímco HPC se používal pro betony se zvýšenou trvanlivostí. Termín ultra-vysokohodnotný beton (UHPC) byl poprvé použit v roce 1994 k označení materiálu s optimalizovaným výběrem jemných a ultrajemných částic, což vedlo k nízké pórovitosti, vysoké životnosti a samozhutnitelnosti. V USA se stal UHPC komerčně dostupným až v roce 2000, ale na mostě byl poprvé použit v kanadském Quebecu v roce 1997 [8]. Mezi vybrané typy UHPC, které byly uplatněny v praxi patří DSP (Densified Systems with Small Particles) beton, MDF (Macro Defekt Free) beton a RPC beton (Reactive Powder Concrete).

DSP beton dosáhl pevnosti 150 - 200 MPa aplikací mikrosiliky, použitím jemného kameniva typu žuly, diabasu nebo taveného bauxitu s maximální velikostí zrn 4 mm a také superplastifikátoru. MDF beton dosáhl zvýšené pevnosti v tahu za ohybu přísadou polymeru polyvinylalkoholu. U RPC betonu bylo dosaženo pevnosti v tlaku 800 MPa. Výroba tohoto typu byla založena na použití plniva s maximální velikostí zrn s optimální granulometrickou křivkou.[1] V devadesátých letech betony s pevností v tlaku přesahující 200 MPa se čím dál častěji začaly vyrábět a prakticky používat. [9]

První nosnou konstrukcí, kde byl použit UHPC v ČR je lávka v Čelákovcích, která byla vyrobena v roce 2014. [10] a [11]

3. Stručný popis základních vlastností ultra-vysokohodnotného betonu

UHPC je jemnozrnná směs s vysokou dávkou cementu, mikrosiliky a drátků. Vyznačuje se extrémně vysokou pevností a trvanlivostí, není ovšem žádná celosvětově uznávaná norma nebo předpis, který by stanovoval, jakých parametrů musí beton dosáhnout, aby se dal do kategorie UHPC zahrnout. [10] Často udávanou hranicí pro pevnost v tlaku na válcích mezi HPC a UHPC je hodnota 150 MPa [9] [12] [13] [14][15][16], ale dle některých zdrojů [7] [17] [18] je tato hranice 120 MPa. Eurokód 2 má v příslušných tabulkách hodnoty do pevnosti 90 MPa (třída C90/105). Evropská norma pro specifikaci a výrobu betonu definuje ještě beton o pevnosti 100 MPa (třída C100/115) [6]. Je zřejmé, že pevnosti UHPC jsou výrazně nad stanovenými pevnostními třídami v normě ČSN EN 206+A1. V této normě je nejvyšší pevnostní třídou třída C100/115, tzn. charakteristická válcová pevnost v tlaku 100 MPa. [12]. Pevnost v tahu dosahuje hodnot v rozmezí 7 – 40 MPa. Závisí na tom, zda-li se ve směsi UHPC nachází výztuž a jakým způsobem je ve směsi rozptýlená. [10] [12] [19]. Princip výrazně vyšší pevnosti spočívá v omezení vzduchových pórů a vyplnění těchto pórů pevným materiálem [6] Kompaktnost konstrukce má velký vliv na životnost konstrukce, jak můžeme vidět na již zmíněném příkladu římského Pantheonu.

Vlastnosti a dávkování jednotlivých složek, stabilita směsi vůči segregaci, technologie výroby a lidský faktor ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti Ultra-High Performance Concrete (UHPC).[20]

Ultra-vysokohodnotný beton je spojený s nízkou hodnotou vodního součinitele, která se pohybuje na úrovni 0,12 – 0,25 (nejčastěji 0,2-0,25). Vodním součinitelem je myšlen poměr vody ku cementu.[9]U latentně hydraulických příměsí se k hmotnosti cementu připočítává ještě hmotnost příměsí vynásobená součinitelem k (mikrosilika: $k=2,0$; popílek: $k=0,4$; struska: $k=0,6$).[21]

UHPC mají také vysokou charakteristickou pevnost v tlaku či tahu za ohybu po vzniku trhliny s vysokou lomovou energií a vysokou duktilitou. [22]

UHPC se také vyznačují kromě vyšší pevnosti vyznačují také vyšší trvanlivostí oproti běžným betonům.

Pro označení UHPC s vlákny se používá také označení UHPFRC (Ultra high performance fiber reinforced concrete) [23], protože vlákna jsou běžnou součástí UHPC směsi (1-3% objemu).[24]

4. Složení směsi UHPC

4.1 Kamenivo

Pro UHPC se používá nejčastěji jemnozrné kamenivo na bázi křemene s velikostí zrna 0,8 – 1 mm. [9] V případě reaktivního práškového betonu RPC (Reactive Powder Concrete) je maximální zrno kameniva menší než 0,6 mm. [25] Určitý obsah hrubších frakcí kameniva (nad 4 mm) nebrání zvyšování pevnosti betonu na cca 200 MPa.[6] Maximální zrno kameniva se pro většinu receptur UHPC volí spíše menší. Vyloučením hrubého kameniva je totiž možné snáze dosáhnout homogenní mikrostruktury, která je pro dosažení vysokých pevností důležitá.[25] Hrubé kamenivo může mít zrnitost až 16 mm, ovšem běžně má maximální zrno průměr do 8 mm. Celkově je směs UHPC velmi jemnozrná. [12] Typ a maximální velikost hrubého kameniva mají významný vliv na zpracovatelnost a mechanické vlastnosti UHPC. [26] Kamenivo by mělo být kompaktní, s minimem dislokací, jeho tvar by měl být kulovitý nebo kubický a tvarovým index blízky hodnotě 1. [27]. Pro kamenivo do UHPC jsou vhodné horniny s vysokou pevností, jako žula, syenit, diorit, čedič, diabas, křemenec nebo gabro.[21] Při potřebě extrémně vysoké pevnosti se používá umělé kamenivo (např. tavený bauxit). [1]

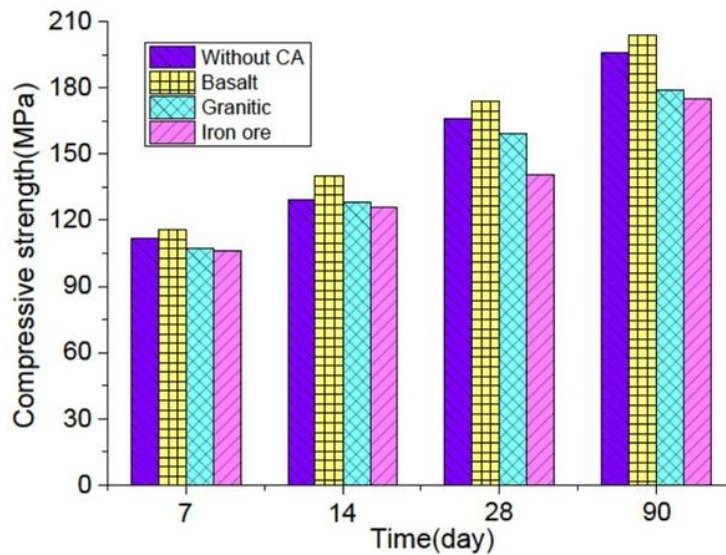
Při návrhu UHPC receptury je třeba používat kamenivo s optimalizovanou granulometrickou křivkou. [27] Pro optimalizaci můžeme využít Andreasenova a Andersenova modelu, který má tento tvar:

$$P(D) = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q}$$

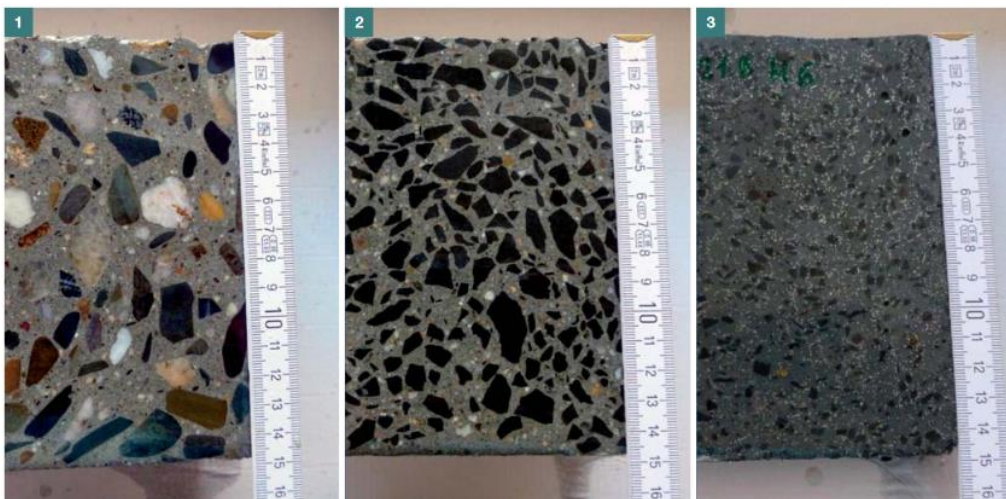
Kde P(D) je zlomek celkových pevných látek menší než velikost částic D (μm), D je velikost částic, D_{max} je maximální velikost částic (μm), D_{min} je minimální velikost částic (μm) a q je distribuční modul. [28]

Při použití vlhkého kameniva se zvyšuje riziko velkého kolísání konzistence betonu a tím i jeho pevnosti z důvodu vyšší pórovitosti tranzitní zóny. Díky tomu je vhodnější použití vysušeného kameniva.[6] Ve studii [26] byl zkoumán vliv maximální velikosti a typu hrubého kameniva na zpracovatelnost čerstvého UHPC a mechanické chování vytvrzeného UHPC. Výsledky ukazují, že typ a maximální velikost hrubého kameniva mají významný vliv na zpracovatelnost a mechanické vlastnosti C200 UHPC (označení směsi UHPC s charakteristickou pevností v tlaku přes 200 MPa). K přípravě C200 UHPC lze použít čedičové hrubé kamenivo o maximální velikosti 10 mm. Pevnost v tlaku C200 UHPC je 203 MPa, pevnost v ohybu pak 46 MPa za 90 dní. Vývoj pevnosti v tlaku u směsí UHPC bez použití hrubého kameniva a s použitím a s různých typů hrubého kameniva je uveden na obrázku č.1. Data na obrázku č.1 naznačují, že použití hrubého kameniva má zjevný vliv na pevnost v tlaku UHPC. Jak je znázorněno na obrázku č.1, pevnost v tlaku UHPC s čedičovým hrubým kamenivem je 203 MPa, což je

vyšší než 196 MPa u směsi UHPC bez použití hrubého kameniva. Pevnost v tlaku UHPC s granitickým a železným rudým kamenivem je 179 MPa, respektive 175 MPa. Lze tedy dojít k závěru, že čedičové hrubé kamenivo má pozitivní vliv na pevnost UHPC v tlaku. Tento jev se liší od betonu s normální pevností. U betonu s normální pevností není vliv typu hrubého kameniva na pevnost v tlaku významný. [26]



Obr.č.1 – porovnání různých typů pevnosti UHPC s použitím různých typů hrubého kameniva a také bez hrubého kameniva, žlutou barvou je znázorněn čedič, tyrkysovou granitické kamenivo, růžově kamenivo ze železné rudy a modrou směs bez použití hrubého kameniva [1]



Obr. č.2 - Porovnání běžného betonu (1), HPC (2) a UHPC (3), zdroj [2]

Na obr. č. 2 můžeme vidět rozdíly ve velikosti zrna mezi uvedenými druhy betonu z hlediska pevnosti. Při zvyšující se pevnosti je změna ve skladbě patrná.

4.2. Křemenná moučka

Jemně mletá křemenná moučka velikosti $0,1 \mu\text{m} - 400 \mu\text{m}$ má funkci fileru. Vzniká zachycením jemných podílů kameniva nebo po drcení a následném mletí křemenného písku na požadovanou hrubost. [29] Úlohou těchto jemných částic je co nejhustější vyplnění vzduchových mezer mezi zrny kameniva a tedy snížení pórovitosti. Protože vyplní vzduchové mezery pevným materiálem, je beton pevnější a kompaktnější. [9]

4.3. Cement

Typ a kvalita cementu jsou dalším důležitým parametrem pro dosažení velmi vysokých pevností. U UHPC je hmotnostní podíl cementu výrazně vyšší, než u běžného betonu. Vysoký obsah cementu ovlivňuje vývoj hydratačního tepla. [6] Většinou se pro UHPC používá čistý portlandský cement CEM I pevnostní třídy 52,5 R nebo 42,5 R. Je nutné volit optimální hodnotu, která umožní dosažení požadované pevnosti. Při použití třídy cementu 52,5 dosahujeme obvykle menšího ztekucení. [27] Obsah slínku takového cementu je větší, než 95 %. Dosahovat vysokých pevností je možné i se portlandským struskovým cementem CEM II, vysokopecními cementy CEM III, nárůst pevnosti je ale pomalejší. [6] Vysoká hustota uspořádání jemných zrn v UHPC způsobuje větší pevnost zatvrdnuté cementové matrice. Zvyšuje ale také její křehkost. [9] Při uplatnění cementů o velkém měrném povrchu jeho částic se zvyšuje stupeň hydratování cementu. [1] Ekonomické pro UHPC je použití pouze běžně vyráběných cementů. [30] Vhodné je použít cement s nižší reaktivitou, aby nedošlo k nadměrnému zvýšení teploty čerstvé směsi při míchání. [19] Velký vliv na vlastnosti čerstvých cementových past má čas přidání superplastifikátoru do směsi. [77]

4.4. Příměsi

Příměsi pomáhají zlepšovat některé vlastnosti betonu, což je u UHPC velmi významné. Jejich množství se pohybuje v rozmezí 10-30% hmotnostního poměru k dávce cementu. Rozlišujeme 2 základní druhy příměsí – inertní a latentně hydraulické. Liší se v tom, jestli vstupují do hydratace cementu či nikoli. [30] Latentně hydraulické příměsi se také označují jako pucolány a v přítomnosti vody a hydroxidu vápenatého Ca(OH)_2 se podílí na vzniku C-S-H gelu [27] (kalcium silikát hydrát). Při jejich použití se snižuje tloušťka tranzitní zóny, což je zóna mezi pojivem a plnivem, která obsahuje relativně velké vzduchové póry a velké krystaly hydratačních produktů. Ke zmenšení tloušťky této zóny používáme mikroplniva- především křemičité úlety zvané také jako mikrosilika. [1]

Mikrosilika (křemičitý úlet) vedlejší produkt výroby křemíku a ferosilicia v elektrické peci. [27] Obsahuje 80 – 98 % amorfního SiO_2 . Pomáhá vyplňovat póry, které jsou menší, než cementová zrna

[6]a vhodně doplňuje zrnitostní křivku. [1] Jemnost mletí u mikrosiliky má hodnotu v rozmezí 15000 – 30000 m²/kg (pro porovnání u cementu je tato hodnota 225 – 400 kg/m²). [1] [30]. Tato příměs zlepšuje zpracovatelnost. Nevýhodou mikrosiliky je snižování pH u betonu a zvyšování spotřeby vody. Maximální dávka této příměsi se v praxi pohybuje na 10% hmotnosti cementu. [30] Zvyšuje pevnost betonu v tlaku a odolnost proti chloridovým iontům. [31] Bylo zjištěno, že takový obsah výparů oxidu křemičitého má za následek nižší viskozitu a rovnoměrnější distribuci vláken. [32]

Elektrárenský popílek se také využívá jako mikroplnivo. Dle normy ČSN EN 450-1 se získává elektrostatickým nebo mechanickým odlučováním z plynů topenišť elektráren otápěných. Před jeho použitím se může upravovat například tříděním, výběrem, proséváním, sušením, smícháváním, mletím nebo snižováním uhlíku nebo kombinací těchto procesů ve vhodném výrobním zařízení. [33] V čerstvém betonu popílek zlepšuje čerpatelnost betonu a zvyšuje odolnost proti krvácení betonu [76](jedná se o nežádoucí jev, při kterém uniká cement s vodou z čerstvého betonu při jeho přepravě, ukládání nebo z bednění či formy [75]). Ve ztvrdlém betonu popílek zvyšuje pevnost betonu v tlaku a zlepšuje kvalitu povrchů, aby byly hladší. [76] Podle chemického složení popílku rozlišujeme 2 kategorie popílku: třídu F, která zahrnuje nízkovápenaté popílky a třídu C zahrnující popílky s vysokým obsahem vápníku.[5]

V normě ČSN EN 450-1 najdeme požadavky na chemické vlastnosti (ztráta žíháním, chloridy, obsah alkálií, oxid křemičitý, atd...), fyzikální vlastnosti (jemnost, index účinnosti, měrná hmotnost, objemová stálost, počátek tuhnutí a požadavek na množství vody), trvanlivost a další. [33]

Vysokopecní struska je latentně hydraulická příměs, která zpomaluje hydrataci cementu. Vzniká při tavení železné rudy ve vysoké peci. Používá se dávka do 30 % hmotnosti cementu [30]. Vysokopecní granulovaná struska musí splňovat složení podle normy ČSN EN 15167-1. V normě je uveden požadavek na chemické vlastnosti (maximální zastoupení (v %) oxidu hořečnatého, sulfidů, síranů, chloridů, vlhkosti a ztráty žíháním, opravenou na oxidaci sulfidů), fyzikální vlastnosti (objemová stálost, množství vody...), trvanlivost a další. [34] Rozhodnutí, zda použít strusku, závisí na její dostupnosti a ceně. [5]

Yazici připravil RPC s Portlandcementem, který byl nahrazen 20%, 40% a 60% granulované vysokopecní strusky. Pevnost v tlaku RPC s vyšším objemem vysokopecní granulované strusky byla po autoklávování (1 ze způsobů ošetřování) vyšší než 250 MPa [35].

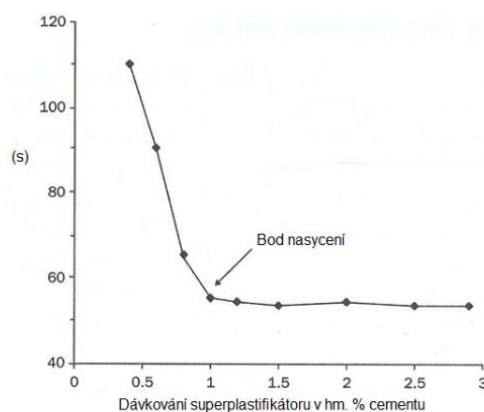
Metakaolin se vyrábí kalcinací přírodního jílu [35]. Je nejúčinnější latentně hydraulickou příměsí. Jedná se o cílový výrobek, nikoli o odpadní produkt. Také výrazně zpomaluje alkalicko – křemičitou reakci [30], která je pro vznikající beton nežádoucí, protože způsobuje alkaliové rozpínání, které se projeví trhlinami. [1] Použití metakaolinového prášku může snížit autogenní smrštění, zjemnit strukturu pórů a zlepšit časnou pevnost a trvanlivost betonu. Ve studii Tafraoui a další vědci zjistili, že při náhradě výparů oxidu křemičitého metakaolinem dojde k zanedbatelnému zvýšení pevnosti

v ohybu a mírnému snížení pevnosti v tlaku. Ke podobnému závěru došel i Zheng a Ma při stejném pokusu náhrady metakaolinu za křemičitý úlet. Hlavní nevýhodou metakaolinu je ovšem vysoká cena, výhodou naopak může být bílá barva, která vylepší estetický vzhled směsi [35].

Inertní příměsi nevstupují do hydratačního procesu. Jedná se o jemné kamenné prachy a slouží jako mikrofiller. Optimalizují křivku zrnitosti a mohou urychlovat nárůst pevnosti. Patří mezi ně již zmíněná křemenná moučka a dále mikromletý vápenec nebo čedičový prach. [30]

4.5. Přísady

U UHPC se běžně používá vysoké množství účinného superplastifikátoru, který zajistí dostatečnou zpracovatelnost čerstvého betonu při snížení vodního součinitele. Podporuje lepší rozptýlení cementových zrn. Pro účinnost superplastifikátorů je důležitá jejich kompatibilita s použitým druhem cementu a ostatními přísadami. Kompatibilitu je možné zjistit sledováním reologických charakteristik, odzkoušených na pastě, např. metodou minikužele, Marchova kužele a jiné. U UHPC může jejich dávka dosáhnout až 5% hmotnosti cementu. Pro stanovení optimální dávky je vhodné nalezení tzv. bodu nasycení – při překročení této hranice dávky superplastifikátoru již nenarůstá tekutost směsi (viz obr.č.3[1]) [1][27].

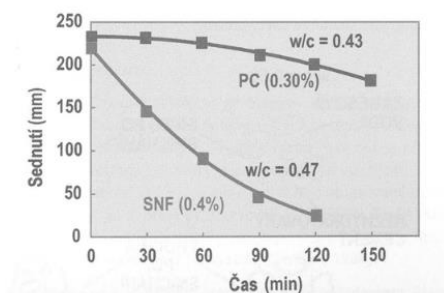


Obr. 6.33 Stupeň nasycení v závislosti na obsahu plastifikátoru vztaženého k hmotnostním procentům cementu.

Obr.č.3 – Stupeň nasycení v závislosti na obsahu plastifikátoru k hmotnostním procentům cementu. [3]

Výběr dobrého a účinného plastifikátoru je klíčovým aspektem při výrobě vysokohodnotného betonu. Superplastifikátory se dělí do čtyř skupin na melaminové, naftalenové, lignosulfonátové a polykarboxyláty. U melaminových, naftalenových a lignosulfonátových převažuje elektrostatické odpuzování. U polykarboxylátů je ještě navíc sférické odpuzování [21], které brání fyzickému kontaktu cementových zrn. Polykarboxaláty jsou pro UHPC neúčinnějším plastifikátorem. [35]

Pro optimální přínos superplastifikátoru k vlastnostem betonu je vhodné jeho dávkování přibližně 1 – 2 minuty po prvním kontaktu cementu se záměsovou vodou. Působení superplastifikátorů je časově limitováno, což může být v některých případech, jako např. při transportu na větší vzdálenost problematické. Tento problém se řeší smícháním retardéru hydratace společně se superplastifikátorem, přidáním superplastifikační přísady na staveništi před aplikací betonu případně opakovaným přidáním superplastifikačních přísad. Na obr.č. 4 je vidět rozdíl u ztráty zpracovatelnosti mezi polykarboxylátem a naftalensulfátem. [1]



Obr.č.4 Horní křivka ukazuje vývoj zpracovatelnosti polykarboxylátu, spodní křivka vývoj zpracovatelnosti naftalensulfátu. [4]

Pro snížení rychlosti hydratace se používají tzv. retardéry tuhnutí, které prodlouží dobu zpracovatelnosti a sníží vývin hydratačního tepla [74] (působí na trikalciumaluminát C_3A [1]).

Ve studii [36] bylo zkoumáno, jaký vliv má doba přidání superplastifikátoru na vlastnosti cementových past. ukazují, že prodloužení doby přidávání přísady snižuje smykové napětí, mez kluzu a plastickou viskozitu cementových past v raném věku (15 minut) i v pozdějších časných dobách (120 minut).[36] Optimální množství superplastifikátoru se pohybuje mezi 1,3% a 1,6 %. [37]

4.6. Voda

Voda je iniciátorem hydratačního procesu. Její množství má zásadní vliv na konzistenci a zpracovatelnost betonové směsi. [27] Čím méně vody je při dané dávce cementu do betonu přidáno, tím vyšších pevností betonu se dosáhne. Snížení vodního součinitele u UHPC oproti běžným betonům vede k nízké pórovitosti a tedy současně k vyšší pevnosti. Menší množství vody vede ke snížení tloušťky tranzitní zóny [1]. Obsah vody je snížen na minimální hodnotu, která je potřebná k hydrataci zrn. Veškeré množství vody, které se nespoteřebuje při hydrataci cementových zrn, se projeví na snížení výsledné pevnosti betonu. Důležité je dbát též na kvalitu vody, ideální je použít pitnou vodu. Je potřeba se vyvarovat vodě se sníženým i příliš vysokým obsahem iontů [27]. Hmotnostní podíl vody ve vztahu k celkové hmotnosti betonové směsi UHPC je stejný jako u běžného betonu. Výrazně jiný je však poměr vody ku cementu, kterého je u UHPC více. Nejčastěji je udáván vodní součinitel (poměr voda/cement) a pojivový součinitel (poměr voda/cement+mikrosilika). [6]

Bylo prokázáno, že teplota vody během jejího přidávání do míchacího zařízení hraje klíčovou roli při dosahování požadovaných vlastností čerstvé směsi. Chladná voda a / nebo led se běžně používají ke snížení teploty UHPC během míchání a ukládání. Toto snížení teploty usnadňuje zvýšení tekutosti směsi a snížení rychlosti odpařování volné vody z míchaného UHPC. [72]

4.7. Vláknohá výztuž

V UHPC se používá rozptýlená vláknohá výztuž. Tvoří 4-10 % hmotnosti směsi UHPC. [9] Mezi výhody vláken patří zvýšení tahové pevnosti, omezení smršťování, zvětšení duktility a omezení trhlin.[30] Snižují tedy křehkost cementové matrice. Rozhodující pro účinnost vláken je jejich pevnost, tvar, štíhlostní poměr (poměr délky a průměru vlákna) a objemové zastoupení v betonu (až 2%). [27] Pevnost ocelových drátků se pohybuje v rozmezí 1000 – 3000 MPa, aby při porušování nedocházelo k jejich přetržení, ale spíše porušení soudržnosti s betonem. Nejčastěji se používají ocelová vlákna s délkou cca 12 mm a průměrem cca 0,2 až 0,3 mm.[6] Ocelová vlákna vedou k výraznému nárůstu pevnosti v tahu a nepatrný nárůst pevnosti v tlaku UHPC. [21] Zvýšené množství vláken zvyšuje vzájemné působení vláken během míchání a snížilo zpracovatelnost směsi, a tím také mechanické vlastnosti. Značný vliv na mechanické vlastnosti UHPC má distribuce a orientace vláken. U vláken umístěných rovnoběžně s podélným směrem je pevnost v ohybu o více, než 50% vyšší oproti vláknům umístěným kolmo k podélnému směru[35]. Větší počet menších vláken poskytne vyšší pevnost, než menší počet větších vláken pro stejný objemový zlomek. Vysoký počet menších vláken je hustěji distribuovaných v cementové matrici a může účinně řídit vývoj mikrotrhlin, zatímco delší vlákna mohou zlepšit konečnou pevnost tím, že jsou schopny řídit šíření makrotrhlin. Vlákna také mohou být z jiných materiálů, např. syntetická či minerální. [73] Skleněná vlákna při přenosu napětí po vzniku trhliny nemusí poskytnout dobré výsledky s ohledem na svoji křehkost a porušení přetržením kvůli dobré soudržnosti s cementovou matricí. [49]

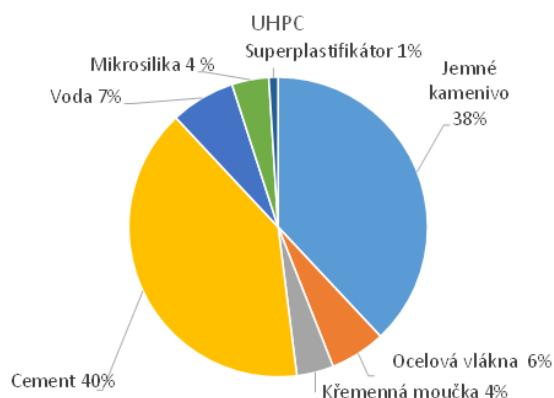
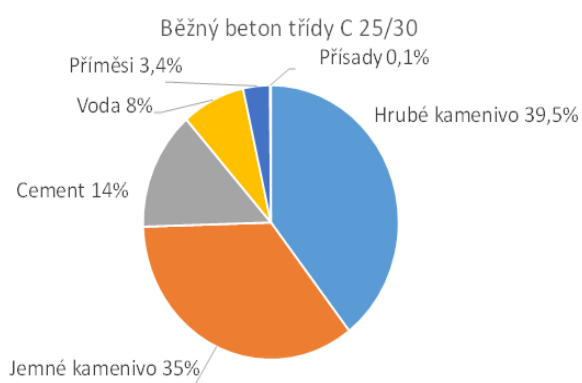
5. Výroba a zkoušení konzistence čerstvé směsi UHPC

5.1 Zpracování

Zde je uvedeno porovnání složení běžného betonu C 25/30 s betonem UHPC [38]. Jedná se o hmotnostní podíl.

Běžný beton C 25/30	kg/m ³	%
Hrubé kamenivo	987,5	39,5
Jemné kamenivo	875	35
Cement	350	14
Voda	200	8
Příměsi	85	3,4
Přísady	2,5	0,1

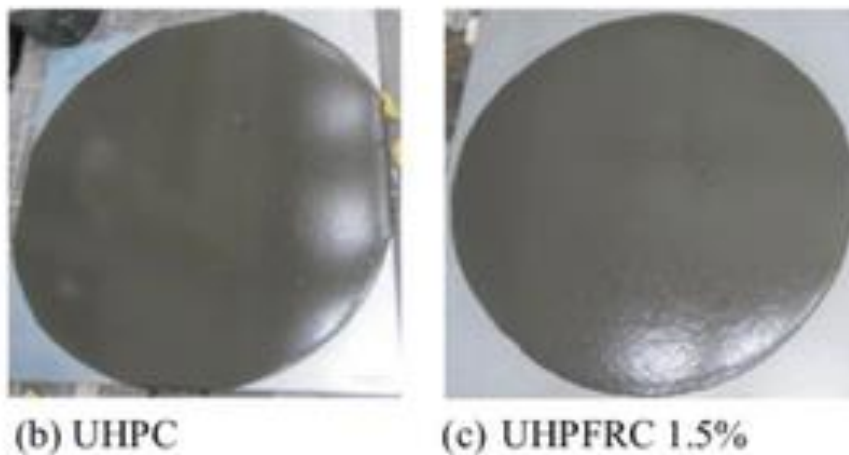
UHPC	kg/m ³	%
Jemné kamenivo	950	38
Ocelová vlákna	150	6
Křemenná moučka	100	4
Cement	1000	40
Voda	175	7
Mikrosilika	100	4
Superplastifikátor	25	1



Beton UHPC se vyrábí mícháním jednotlivých složek. Vzhledem ke svému složení je většinou navrhován jako vysoce tekutý až samozhutnitelný, který zatéká do formy a v určitých případech nevyžaduje mechanické zhutňování. Pokud beton není při ukládce vibrován, musí splnit požadavek na spolehlivý odvod vzduchu po celou dobu ukládky do forem. [6] Vnitřní vibrace UHPC se nedoporučují kvůli vyztužení vlákny, ale lze použít omezené vnější vibrace jako prostředek pro usnadnění uvolňování zachyceného vzduchu. [39] Během míchání by měly být pečlivě sledovány tyto parametry: rychlost míchání, teplota a způsob přidávání surovin. Při kontrole kvality směsi hraje také důležitou roli množství zachyceného vzduchu. Případná akumulace vzduchových bublin může mít nepříznivý vliv na pevnost spojení mezi výztuží a okolním betonem. Další možností, jak snížit množství vzduchových bublin, je míchání betonu za sníženého tlaku vzduchu. Sníženého tlaku se dosáhne vakuovou pumpou nebo vakuovým mixérem. [40] Významně to pomůže pro zvýšení pevnosti betonu – u betonu

s pevností v tlaku 175 MPa je možné dosáhnout použitím vakuového mixéru zvýšením na 250 MPa. [41]

Jednotlivé složky se připraví v požadované kvalitě. Především u kameniva je potřeba dbát na jeho dobrý tvar a správnou optimalizaci zrnitostní křivky. Nejdříve se míchá cement, písek a příměsi asi 40 sekund. Na počátku se tedy míchá suchá směs. Po 40 sekundách je přilita do směsi voda. Po čtyřech minutách vstupuje do směsi superplastifikátor, který reaguje s cementem po dobu 20 minut, kdy dosáhne požadované tekutosti. Směs se postupně mění na tekutinu. Poté se do betonu přidávají ocelová vlákna. Jedná se o jednu z možností přípravy. Doba míchání nesmí být příliš krátká, aby došlo k dostatečnému promísení složek. Nesmí být ani příliš dlouhá, protože by mohlo dojít k poruchám v zrnech o stěnu míchačky. [38] Minimální doba míchání je 7 minut, tedy mnohem delší, než u běžných betonů. Doba míchání lze zkrátit dělením procesu míchání do dvou fází. Například po vysokorychlostním míchání po dobu 40 sekund následuje nízkorychlostní míchání po dobu 70 sekund, po celkovou dobu přibližně 2 minut. [39] Při zpracování by se nemělo užívat vibrace, aby nedošlo k narušení rozptýlení výztuže z ocelových vláken a vznikla by místa s výrazně oslabenou pevností. Povrchové úpravy se provádí ihned po uložení směsi, protože směs UHPC může rychle vyschnout. Povrch se ochrání plastovými fóliemi, které zpomalí rozvoj smršťovacích trhlin. [38].



Obr. č.5 Ukázka rozlití směsi UHPC a UHPC s 1,5% výztuže (objemově) [5]

5.2 Ošetřování

Pro vývoj pevnosti, mechanických vlastností a mikrostruktury [39] je významný způsob ošetřování. Tepelné zpracování betonu významně ovlivňuje rychlost vývoje pevnosti a má též silný vliv na mechanické vlastnosti a mikrostrukturu UHPC. Ve srovnání s UHPC vytvrzovaným za podmínek okolního prostředí vykazují tepelně ošetřené vzorky UHPC obecně hustší mikrostrukturu, která může vést ke zvýšení pevnosti v tlaku, a tak může zlepšit celkové mechanické vlastnosti UHPC [28]. Ošetřit beton je důležité ihned po uložení, aby nedošlo ke vzniku „oschlé kůže“ [12]. Při klasickém způsobu ošetřování ve vlhkém prostředí se nedosahuje nejvyšších pevností. Zvýšení pevností lze dosáhnout tvrdnutím betonu za vyšší teploty. [6] Při dostatečném ošetřování povrchu betonového prvku v raném stáří je významně redukován následný vliv smršťování od vysychání a majoritní efekt má autogenní smršťování [42]) (jev, při kterém objem pojiva a vody před hydratací je větší než výsledný objem ztvrdlého cementového tmelu[43]).

Při ošetřování dochází ke zlepšení mechanismu tvorby UHPC. Tepelné zpracování se obvykle provádí při teplotě 90°C při stáří betonu 2 dny a vysoké relativní vlhkosti. Urychluje to reakci křemenného písku s Ca(OH)_2 . Aby se dosáhlo pevnosti v tlaku nad 200 MPa, UHPC se obvykle tepelně zpracovává v raném věku (2 dny) po dobu 24 až 48 hodin při 90 ° C. Bylo zpozorováno, že UHPC ve vysokém stáří, který nebyl podroben tepelnému zpracování dochází k výraznému zvýšení pevnosti v průběhu let, např. pevnost v tlaku byla 250 MPa ve stáří 6 let, což bylo o 58% více, než pevnost 160 MPa po 28 dnech [44].

Vytvrzování může probíhat různými režimy, ve studii [44] jsou uvedeny tyto 3:

1. vytvrzování v autoklávu při tlaku kolem 2,1 MPa a 215 °C po dobu 8 hodin,
2. vytvrzování párou při 90°C a relativní vlhkosti 100% po dobu 24 hodin, poté následuje standardní vytvrzování do stáří zkoušení po 28 dnech,
3. Standardní vytvrzování vodou do stáří testování (28 dnů). [28]

5.3 Zkoušení UHPC - Konzistence čerstvé směsi

Pro hodnocení konzistence dle ČSN EN 206 lze pro test zpracovatelnosti využít klasické metody měření zpracovatelnosti dle ČSN EN 12350-5 – zkoušku rozlitím. V souvislosti s rozlitím je vhodné měřit i čas t pro stanovení parametru T500. [49]

Index viskozity T500, tj. čas, za který směr dosáhne rozlití 500 mm. Viskozitu je možné také určit pomocí viskomatů. Princip viskomatu spočívá v tom, že míchací lopatka je osazena sondou pro měření kroutícího momentu. Vzorek se pak otáčí ve zkušební nádobě. Lze osadit i škrabkou pro čištění stěny nádoby.

Měřením můžeme získat tyto informace o vzorku: průtokové křivky a reologické parametry vzorku, závislost zpracovatelnosti na teplotě vzorku, tvrdnutí vzorku v závislosti na času a rychlosti míchání a účinky přísady do betonu na upravení zpracovatelnosti. [45]

Pokud víme, že konstrukci nebude možno vibrovat, musíme konzistenci směsi přizpůsobit a stejným způsobem jako beton v konstrukci bychom měli ukládat i beton do zkušebních vzorků. Zejména u směsí vyztužených drátky je vhodné skladbu ověřit rozlivem přes J-ring (obr. 3) a tím ověřit případné blokování drátků. [12]

5.4 Zkoušení UHPC-ostatní mechanicko-fyzikální vlastnosti čerstvé směsi

Na trámečcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm můžeme stanovit teplotu čerstvé směsi a objemovou hmotnost podle ČSN EN 12350-6. [49] Dle této normy podstata zkoušky spočívá v tom, že čerstvý beton je zhutněn v tuhé a vodotěsné nádobě známého objemu a hmotnosti a následně je zvážen.

6 Vlastnosti ztvrdlé směsi UHPC

Přesná specifikace vlastností UHPC není v normě pro výrobu betonu ČSN EN 206 +A1 (732403) dána. Specifikace vlastností jsou uvedeny v různých národních směrnících a dokumentech. [19]

6.1 Smršťování

UHPC je charakterizován velmi nízkým vodním součinitelem. Při použití superplastifikátoru se naprostá většina záměsové vody ve struktuře udrží a je hydratací vázána v cementovém kameni. [42] Vysoký podíl cementu má za následek velké smršťování, zejména autogenní smršťování. Toto smršťování je redukováno do určité míry spolupůsobením s vlákny [6]. Při dostatečném ošetřování povrchu betonového prvku v raném stáří je významně redukován následný vliv smršťování od vysychání a majoritní efekt má autogenní smršťování trhlin. Toto prokazují i zkoušky provedené v Německu (Burkart et al. 2008) při kterých bylo měřeno smršťování UHPC vzorků s průměrnou 28 denní pevností 166 MPa. Celkové hodnoty smršťování byly porovnávány na vzorcích různých velikostí průměru 75-150 mm. Smršťování vysycháním dosahuje výrazně nižších hodnot, než autogenní smršťování. Velmi výrazně se v případě smršťování od vysychání projevuje účinek ošetřování. [42] Autogenní smrštění lze značně snížit přidáním hrubého čedičového kameniva s velikostí zrn v rozmezí od 2 do 5 mm. [39]

6.2 Dotvarování

V případě predikce přetvoření od dotvarování se jedná o podobný problém jako v případě predikce smršťování. Ve francouzské studii (Francisco et al. 2012) autoři stejně jako pro model smršťování modifikovali parametry modelu v Eurokódu a aproximovali svůj experiment velmi přesně za použití modifikovaného modelu v Eurokódu (EN 1992-2). Bohužel se jedná o izolovaný experiment a není možné jeho zobecnění při použití dalších aspektů ovlivňujících míru a rychlost nárůstu přetvoření od dotvarování. [42] Je obvykle významně nižší, než u běžného betonu. Pro konkrétní typ UHPC lze doporučit ověření měřením dle ČSN 731320-Z1. [49] Podle této normy se dotvarování zkouší pomocí hranolu, který se pro zkoušku vyrobí. Zkušební tělesa se začínají zatěžovat ve stáří 28 dní, popř. v jiném stáří, které vyplývá z požadavků na konstrukci. Měří se hodnota poměrného stlačení při zatěžování. [48] Hodnota dotvarování je dána rozdílem poměrného celkového stlačení a smrštění betonu. Měření je dlouhodobé a poměrně náročné. [49]

6.3 Pevnost v tlaku

Minimální hodnota UHPC se udává 150 MPa (někdy 120 MPa) a je stanovena na válcích s poměrem průměru k výšce 1:2 s minimálním průměrem 100 mm. [22] Ke zkoušení pevnosti v tlaku betonu se používají dva typy standardních zkušebních vzorků, a to válec a krychle.

Ve studii [50] byly porovnány vztahy mezi výsledky zkoušky pevnosti v tlaku UHPC (bez ocelových vláken i s vlákny) získané ze vzorků válců a krychlí. Průměr vzorků válců je 100 mm a výška 200 mm. Vzorky krychle mají rozměr 100 x 100 x 100 mm. Před testováním byly formy vzorků odstraněny jeden den po odlití a vzorky byly ponechány vytvrdit při pokojové teplotě. Oba povrchy však byly řezány (broušeny), aby vytvořily ploché povrchy. U UHPC bez ocelových vláken byla naměřena střední pevnost v tlaku na krychlích 165,43 MPa a 186,03 MPa na válcích u UHPC s 2% (objemově) ocelových vláken byla naměřena pevnost na krychlích 182,27 MPa a na válcích 186 MPa. Při použití výztužných vláken je pevnost na krychlích jen o 2% větší oproti pevnosti na válcích. [50] U UHPC bez výztuže je pevnost na krychlích oproti pevnosti na válcích v poměru větší – 12,4 %, přesto zůstává patrně menší, než je tomu u běžného betonu, kde se tyto hodnoty liší o více než 20% (u třídy C20/25 o 25%, u C 30/37 o 23,3%, u C 35/45 o 28,6 %.

Výsledná hodnota pevnosti v tlaku závisí na několika parametrech. Jedná se především o velikost zkušebního tělesa (tato velikost zatím není mezinárodně ustálená). Mezi další parametry, které ovlivňují pevnost v tlaku patří rychlost zatěžování, koncová úprava tlačných ploch, ošetřování vzorku a proteplování směsi v počátečních fázích tuhnutí a tvrdnutí. [49]

6.4. Pevnost v tahu za ohybu

Tahové chování jemnozrnného kompozitního materiálu typu UHPFRC je v pružné oblasti obdobné jako u betonů běžných pevností. Pevnost v tahu se pohybuje v rozmezí 7-10 MPa UHPC bez výztužných vláken. Při vyztužení pevnost dosahuje k 15 MPa [19][51][12], při dobrém rozptýlení vláken a vhodném typu pevnost v tahu za ohybu může být dokonce přes 30 MPa [10] Do dosažení hodnoty meze pevnosti v tahu odpovídající tahové pevnosti matrice nevyztužené vlákny je závislost deformace a tahového napětí lineární.

U jemnozrnných UHPC kompozitních materiálů s výztužnými vlákny se aktivují vlákna po vzniku trhliny. Během šíření a rozevirání trhlin dochází nejen k aktivaci vláken, ale také k porušení soudržnosti mezi maticí a vlákny. U nekovových, ale i kovových vláken může také dojít k jejich přetržení. Charakter porušení soudržnosti vlákna s maticí nebo vlákna samotného závisí na materiálových a mechanických vlastnostech matrice, kontaktní zóně, kotevní oblasti a vláknech. Typ vláken, jejich množství, štíhlostní poměr a délka rozhodují o tom, jak se bude vyvíjet nelineární chování materiálu po vzniku trhliny. [49]

Čím je vyšší stupeň vyztužení, tím vyšší bude počet menších trhlin. Při malém stupni vyztužení naopak může vzniknout jedna velká trhlina, do které se poškození koncentruje. Vysoká účinnost vyztužných vláken výrazně zvýší pevnost UHPC v tahu a díky vyztužným vláknům také nedojde k porušení betonu při vzniku první trhliny.

Podle zkoušky v prostém tahu dle ČSN 73 1318 není pro UHPC aplikovatelná a je nutno vycházet z testů v tahu za ohybu. [49] Ta se nejčastěji zkouší na zkouší na trémkách délky 700 mm a průřezu 150x150 mm. Tu je možno zkoušet pevnost v tahu za ohybu je možno zkoušet pomocí trojbodového ohybu se zářezem (místo vzniku trhliny je pevně dané) nebo pomocí ohybu čtyřbodového (trhlina vznikne v nejslabším místě). U pevnosti v tahu za ohybu není důležitá pouze její absolutní hodnota, důležitý je i tvar grafu, zejména jeho sestupné části. Pokles by měl být co nejpozvolnější.[12]

6.5. Odolnost proti rázu

Podle normy ČSN EN 10045-1 se provádí zkouška Charpyho kladivem, která patří mezi dynamické zkoušky. Výsledkem této zkoušky je práce spotřebovaná na přeražení zkoušeného vzorku jako rozdíl potenciálních energií. Tento test může sloužit zejména jako prostředek pro rychlé a informativní zjištění funkce vláken z hlediska rázové odolnosti. Můžeme tak ověřit pro různé typy vláken a stejnou matici schopnost interakce matrice s nimi (soudržnost) pro absorpci rázové energie. [49]. Bylo zjištěno, že přísady ocelových vláken mají výrazný vliv na dynamickou pevnost betonu, avšak faktory dynamického zvýšení DIF(z anglického Dynamic Increase factor – jedná se o bezrozměrné číslo, které popisuje, kolikrát by se měly průhyby nebo napětí znásobit na průhyby nebo napětí způsobená statickým zatížením, když se na konstrukci aplikuje dynamické zatížení [53]) u UHPC vyztuženého ocelovými vlákny jsou nižší než u běžného betonového materiálu [52]) (nižší průhyby při dynamickém zatížení u UHPC).

6.6. Trvanlivost

Trvanlivost u UHPC je vyšší, než u běžného betonu. V zahraničí se udává životnost větší, než 200 let. Beton dobře odolává prostředí s vysokým namáháním chloridy, mrazovými cykly, nebo chemicky agresivními látkami. [13] Vysoké trvanlivosti se dosahuje díky tepelnému ošetřování (proteplování kolem 90 °C), které způsobí zmenšení pórové struktury. [49]. UHPC vykazuje mnohem vyšší odolnost vůči látkám, které napadají a poškozují beton nebo vyztuž, než je tomu u normálního nebo vysokopevnostního betonu díky své husté mikrostruktuře, což je dalším důvodem vysoké trvanlivosti. V důsledku velmi husté mikrostruktury UHPC je jeho odolnost vůči difúzi chloridových iontů pocházejících z rozmrazovacích solí nebo vyskytujících se v mořském prostředí výrazně vyšší než

u betonu s normální pevností. UHPC tedy zajišťuje výztuži mnohem lepší ochranu proti korozi. Je vhodný pro výrobu lehkých trubek se sníženou tloušťkou stěny nebo obložení se zvýšenou odolností proti průmyslovým odpadním vodám. Zejména tepelně zpracovaný UHPC neabsorbuje žádné významné množství vody a dlouhodobě prakticky netrpí karbonatací. [54] Zřídka se karbonatace může vyskytnout po standardním nebo tepelném vytvrzení 1-3 roky. UHPC má velmi nízkou propustnost pro vodu a chemické látky. Ke korozi ocelové výztuže nedochází v žádném režimu vytvrzování kvůli nízké propustnosti. [55] UHPC je také odolný vůči UV záření a znečištění. Je nenasákavý a odolný vůči zmrazovacím cyklům. [56] Lze jej použít pro všechny vlivy prostředí. [58]

6.7. Ostatní vlastnosti

Vodonepropustnost se provádí zkouškou podle ČSN EN 12390-8. U vhodně připraveného UHPC se předpokládá, že vykáže po působení tlakové vody průsaky do max 1 mm. Poissonovu konstantu uvažujeme $\nu = 0,2$, pokud není stanovena jiná hodnota měřením. Součinitel tepelné roztažnosti lze uvažovat $11 \cdot 10^{-6} \text{ m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$. [49]

7. Použití UHPC betonů

Aplikace UHPC by měla představovat výraznou výhodu, například ekonomickou nebo pokud je nemožné užití stávající technologie. [46] UHPC byl poprvé použit americkým armádním sborem inženýrů na konci 80. let a v USA byl k dispozici v roce 2000. Komerční dostupnost UHPC umožnila Federální správě silnic (FHWA) zahájit výzkum za účelem použití UHPC pro dálniční infrastrukturu. UHPC má nejčastější uplatnění u mostních konstrukcí, zejména u lávek pro pěší.[57]

7.1 Konstrukce mostu

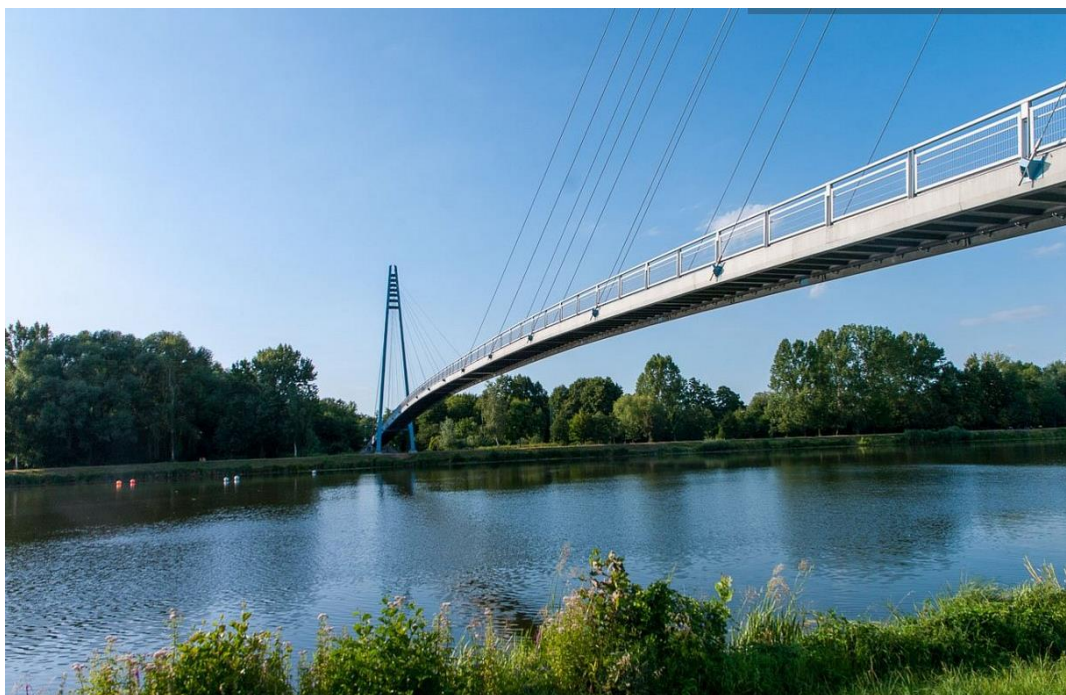
Desky ztraceného bednění u železničních mostů v Přerově

Na dvou mostech v Přerově patřící SŽDC byla kompletně nahrazena jejich nosná konstrukce. Nosnou konstrukci tvoří dva ocelové plnostěnné parapetní svařované nosníky spojené svařovanými příčníky, které byly zabetonovány do spřahující desky mostovky. Pro bednění spodního povrchu spřažené desky byly použity desky ztraceného bednění z UHPFRC (Ultra High Performance. Fiber Reinforced Concrete, tato zkratka se používá pro ultra – vysokohodnotný beton s rozptýlenou výztuží). Při zkoušce byla naměřena pevnost v tlaku ztraceného bednění na krychlích 156,6 MPa. [14]

7.2 Lávky

Lávka v Čelákovících

V roce 2014 byla otevřena zavěšená lávka přes Labe v Čelákovících, kde byl pro segmentovou mostovku použit ultra-vysokohodnotný beton UHPC. Lávka je zajímavá jak z pohledu návrhu a provedení, tak z pohledu prvního použití materiálu UHPC pro nosnou konstrukci v ČR. Výroba betonu UHPC pro segmenty lávky v Čelákovících probíhala na betonárně dodavatele betonu v Praze Troji. Dávkování suchých materiálů je pro tento typ betonu výhodné. Beton byl nakládán do autodomíchávačů a jako transportbeton byl přepravován do výroby segmentů v Brandýse nad Labem. [19] Délka hlavního pole je 156 m deska mostovky má tloušťku přes 60 mm. Průměrná pevnost betonu v tlaku je přes 150 MPa.[58]



Obr.č.6 Lávka v Čelákovících [6]

Lávka v Čeperce

Další stavbou, která byla provedena v České republice z UHPC byla lávka přes Opatovický kanál v Čeperce z předem předpjatého betonu třídy C 110/130-XF4. [59] Původní projekt monolitické jednotrámové konstrukce z betonu C35/45 s hmotností cca 36 tun byl přepracován na efektivnější nosník tvaru TT z materiálu UHPC s hmotností cca 10 tun. Nosník jako takový je osazen odporovými tenzometry pro kontinuální měření deformací během vnášení předpětí, v průběhu manipulace, dopravy i montáže a pro dlouhodobé sledování konstrukce. Nosník byl v říjnu 2015 osazen na místo určení, na předem připravené základové konstrukce a následně byl osazen zábradlím, ochráněn přímo pochozí izolací a uveden do provozu, kde spolehlivě slouží pěšímu provozu. [56]



Obr. 7 a 8 Lávka v Čeperce – vlastní foto, pořízeno 28.2.2020

7.3 Opláštění

Muzeum v Marseille

MuCEM (Musée des Civilisations de L'Europe et de la Méditerranée) je první budovou, ve které byl ultravysokopropustný beton (UHPC) použit v různých aplikacích, a to jako konstrukční prvek i jako opláštění, v širokém měřítku. [60] Byla zde z UHPC postavena lávka pro pěší, nosné sloupy, fasáda a střešní pergola. Fasáda je složená z panelů o rozměrech 6 x 3 m. Jejím účelem je ochrana před slunečním svitem na střešní terase i na ochozu. [58] Stavbu navrhl architekt Rudy Ricciotti. Hlavní nosnou konstrukci ve fasádě muzea tvoří 309 stromových UHPFRC polí. Stromové sloupy představují zajímavou kombinaci architektonického a konstrukčního řešení. [61]



Obr. č.9 MUCEM Marseille [7]

Národní muzeum Kataru

Francouzský architekt Jean Nouvel navrhl Národní muzeum Kataru v Dauhá, hlavním městě země. Budova se skládá z 539 dvojité zakřivených a do sebe zapadajících vláknobetonových panelů.

Nouvel se při vytváření svého designu inspiroval pouštními pískovými růžemi, minerálními strukturami vyskytujícími se při odpařovací krystalizaci sádrovcových písků. Rozložil listové struktury na dva shluky různých velikostí, které obklopily starý královský palác jako svorka. Konstrukce obvodového pláště se skládá z podélných a příčných rámu, které svým zakřiveným tvarem připomínají konstrukci letadla. [62]

7.4. Nábytek, nádobí, umyvadla

Z betonu UHPC je možné vyrobit tenké konstrukce složitých tvarů. Proto se (mimo jiné) v současné době vyrábí nábytek, který se hodí především na výrobu tenkých deskových prvků a menších výrobků, u kterých jsou velmi drobné detaily, například stolové desky, kuchyňské pracovní desky, obkladové panely s různými strukturami, schodišťové stupně, interiérové doplňky. Výhodou použití UHPC pro nábytek je vysoká pevnost a odolnost povrchu.[63] Výhodou tohoto materiálu spočívá v tom, že lze z něj vyrobit na míru libovolný tvar s barevnou pestrostí a povrchem příjemným na dotyk.

7.5 Rekonstrukce

Prvky UHPC se využívají při konzervování, rekonstrukci a obnově historických staveb. [64] S UHPC je možné vytvářet prvky s mnohem nižší hmotností oproti běžnému betonu.[65] Fasádní a balkonové prvky mohou být trvale nahrazeny použitím UHPC nebo mohou být nahrazeny v dokonalé kopii UHPC. S UHPC je možné velmi přesně kopírovat historické fasádní prvky a poskytnout jim moderní izolační vrstvu. Celý systém prvků je v rozměrech identických s originálem a očekávaná životnost je násobně vyšší než u historického originálu. Vápenné omítky, omítky a stavební malty lze replikovat historickými pojivovými systémy UHPC. Historické pojivové systémy UHPC jsou podobné vápencovým antibakteriálním látkám a nedochází k adhezi částic nečistot nebo plísní. [64] S UHPC lze zejména hmotnost stěny udržovat na minimu při zachování tuhosti, trvanlivosti a požární odolnosti potřebné pro podepření desky. [66]

Renovace Viaducts de Chillon

Chillonské viadukty, které se nacházejí ve Švýcarsku, jsou dva paralelní dálniční předpjaté betonové mosty postavené na konci 60. let. V rámci této rekonstrukce bylo rozhodnuto posílit desku přidáním vrstvy o tloušťce 40 mm z kompozitního materiálu UHPC. Vrstva je vyztužená ocelovými tyčemi. Vrstva UHPC má nízkou propustnost a chrání tak desky před vodou alkalicko-křemičitou reakcí. Tato volba (použití UHPC) se ukázala jako nejúčinnější z hlediska nákladů a dobu trvání zásahu.[67]

7.6. Fasády z UHPC

Fasády sestavené z panelů s otvory geometrických tvarů nebo rostlinnými motivy jsou velmi atraktivní a architekti je rádi používají pro zastínění budovy před dopadem ostrého slunečního světla, či přehřívání vnitřních prostor nebo ochránění před hlukem a ruchem obklopujícího městského prostředí. Díky vlastnostem UHPC je možné z něj navrhnout a vyrobit tenké prvky složitých tvarů

včetně zakřivených. Plošně zaoblené UHPC panely umožňují obložit zaoblená nároží budov panely vcelku beze spár. Celistvá plocha beze spár může být elegantnější i efektivnější. Není třeba řešit množství spojů ve spárách, jejich utěsnění, sníží se počet závěsných prvků pro jednotlivé panely, které by všechny bylo potřeba patřičně rektifikovat, aby výsledná plocha byla rovná. Jedná se o unifikovaný systém závěsných fasádních panelů, který je vhodný v případě, kdy by měl být co nejtenčí. Díky tenčí tloušťce může dojít ke snížení vlastní váhy konstrukce a redukci průřezů. Fasády sestavené z panelů s otvory geometrických tvarů nebo rostlinnými motivy jsou velmi atraktivní a architekti je rádi používají pro zastínění budovy před dopadem ostrého slunečního světla, či přehřívání vnitřních prostor nebo ochránění před hlukem a ruchem obklopujícího městského prostředí. Lehké samonosné fasádní systémy jsou tvořeny sendvičovými panely, kde nosný fasádní systém s dlouhodobou trvanlivostí je tvořen sendvičovými panely, kde je vrstva tepelné izolace kryta UHPC (cca 30 mm vrstva). Systém brání vzniku tepelných mostů na styku stropní konstrukce s fasádou, chrání fasádu proti pronikání srážkové vody a dává naprostou volnost v umísťování okenních otvorů, neboť panely neobsahují konvenční výztuž železobetonu. [68]

Iceberg Foundation Louis Vuitton art museum

Architekt Frank Gehry navrhl fasádní panely z bílého UHPC v tloušťce 14 – 26 mm poblíž Jardin d' Acclimatation [58] u severního vchodu do pařížského Bois de Boulogne. Fasáda je vytvořena z 19 000 unikátních panelů. Panely mají originální geometrické tvary a skládají se z „ledovců“. Pro jejich výrobu byl vyvinut jedinečný proces vakuového lití. Tato technologie kombinuje pružnou formu, která dokáže nabrat jakékoli zakřivení určené 3D modelem s hlavní polystyrénovou šablonou obrobenou na požadovanou geometrii panelu. [69] Tenká tloušťka panelů zaručuje maximální snížení hmotnosti skupiny panelů lemujících fasádu. [70]

7.7. Střechy

Stanice TGV Montpellier

Střecha stanice TGV na jihu Francie ve městě Montpellier byla obložena prefabrikovanými betonovými panely UHPC. Stavbu navrhnul architekt Marc Mimram. Střecha bude do stanice filtrovat přímé jižní světlo. Každá z prefabrikovaných jednotek má tloušťku pouhých 5 cm při rozpětí 18 metrů. Během výroby směsi UHPC se pečlivě kontrolovala orientace vláken, reologie směsi pro betonování a zajištění absence trhlin. [71]

8. Závěr teoretické části:

UHPC je dnes stále poměrně novým materiálem, který se intenzivně rozvíjí.

Pro jeho výrobu se používá především jemné kamenivo. I při určitém obsahu hrubého kameniva by směs měla zůstat z velké většiny jemnozrná. Díky jemnějším zrnům je směs méně heterogenní. UHPC je charakteristický vysokou pevností v tlaku, která několikanásobně přesahuje pevnosti běžného betonu. Při použití výztužných vláken je výrazně vyšší i pevnost v tahu. Dále je velkou výhodou vysoká trvanlivost tohoto materiálu, v zahraničí se předpokládá životnost tohoto materiálu 200 let.

Princip výrazně vyšší pevnosti spočívá v omezení vzduchových pórů a vyplnění tohoto prostoru pevným materiálem. Oproti běžnému betonu se do UHPC přidává více cementu.

Další výhodou je snadnější manipulace díky vylehčeným prvkům. UHPC je charakteristický menším smršťováním i dotvarováním.

Tento materiál získává oblibu u architekta díky možnosti realizace štíhlých, jedinečných a esteticky velmi zdařilých konstrukčních prvků, které navíc mají větší odolnost i menší potřebu na údržbu v porovnání s běžně používanými betony. Díky štíhlejším prvkům může použití UHPC znamenat velkou úsporu materiálu. UHPC klade vyšší nároky na pečlivost receptury a také kontroly míchání, ukládání a rozptýlení vláken ve směsi.

Z UHPC směsi je možné také zhotovit nádobí či nábytek, což ještě více rozšiřuje uplatnění UHPC. Potřebný tvar je možné zhotovit s velkou přesností, a tak je UHPC též vhodný pro rekonstrukce historických objektů.

PRAKTICKÁ ČÁST

Konstrukční návrh předem předpjatého vazníku z UHPC

1. Stručný popis návrhu:

Při návrhu zatížení vycházím z oblastí větru podle toho, jak jsou zatěžovány jednotlivé oblasti dle normy ČSN EN 1991-1-4 [1] a pomůcky ke cvičení z předmětu Ocelové konstrukce 1[2]. Při návrhu trapézového plechu a ocelových vaznic uvažuji únosnost uvedenou u výrobců. Pro stanovení užitečných zatížení vycházím z normy EN 1991-1-1 [3]. Pro stanovení návrhových kombinací pro MSÚ a návrhových hodnot součinitele ψ vycházím z normy ČSN EN 1990 [4]. Při návrhu uvažuji takovou směs UHPC, jejíž charakteristická pevnost je 180 MPa. [5] Při výpočtu ztrát předpětí a posouzení MSP a MÚ vycházím ze studijní pomůcky pro cvičení z předmětu BK02 [6], přednášky z předmětu Požární spolehlivost betonových a zděných konstrukcí a z normy ČSN EN 1992-1-1. [7] Ztráty smršťováním a dotvarováním jsou počítány s takovými součiniteli, které lépe zohledňují reálné chování UHPC. Zde jsem vycházel z metodiky pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky a z dalších poznatků o UHPC. [8] [9] [10].

Lokalita haly: Staré město u Uherského Hradiště

Poznámka: Hala není zateplená. Opláštění je z trapézového plechu. Při návrhu byly upraveny rozměry haly [11], aby vazník bylo možné na stavbu přepravit (délka do 34 m).

2. Zatížení

Zatížení sněhem [2]

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k$$

$$\mu_i = 0,8; C_e = 1,0; C_t = 1,0; s_k = 0,8$$

$$s = 0,64 \text{ kN/m}^2$$

Zatížení větrem [1] [2]

Větrná oblast II – $v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$

$$V_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot v_{b,0}$$

$$C_{dir} = 1,0; C_{season} = 1,0$$

$$V_b = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 25 = 25 \text{ m/s}$$

Základní tlak větru:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2; \rho = 1,25 \text{ kg/m} \cdot \text{s}^2$$

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 25^2 = 390,625 \text{ N/m}^2$$

Maximální dynamický tlak:

$$q_p = c_e \cdot q_b$$

Výška haly k okapu: 10,5 m

$$c_e = 2,4$$

$$q_p = 2,4 \cdot 0,391 = 0,938 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e = q_p \cdot c_{pe}$$

Sklon střechy 6°

Oblasti haly [2]

Směr větru $\theta = 0^\circ$

$$C_{pe,f} = -1,7; w_e = 0,938 \cdot -1,7 = -1,6 \text{ kN/m}^2$$

$$C_{pe,g} = -1,2; w_e = 0,938 \cdot -1,2 = -1,13 \text{ kN/m}^2$$

$$C_{pe,h} = -0,6; w_e = 0,938 \cdot -0,6 = -0,56 \text{ kN/m}^2$$

$$C_{pe,i} = -0,3; w_e = 0,938 \cdot -0,3 = -0,28 \text{ kN/m}^2$$

$$C_{pe,j} = -0,3; w_e = 0,938 \cdot -0,3 = -0,28 \text{ kN/m}^2$$

Směr větru $\theta = 90^\circ$

$$C_{pe,f} = -1,6; w_e = 0,938 \cdot -1,6 = -1,5 \text{ kN/m}^2$$

$$C_{pe,g} = -1,3; w_e = 0,938 \cdot -1,3 = -1,22 \text{ kN/m}^2$$

$$C_{pe,h} = -0,7; w_e = 0,938 \cdot -0,7 = -0,66 \text{ kN/m}^2$$

$$C_{pe,i} = -0,5; w_e = 0,938 \cdot -0,5 = -0,47 \text{ kN/m}^2$$

Střecha - oblasti

$\theta=0^\circ$

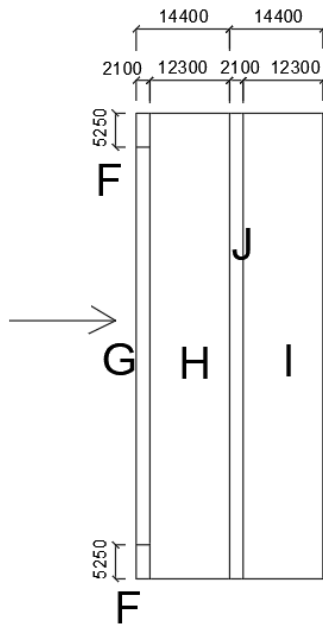


Schéma č.1a – oblasti střechy pro zatížení větrem

$\theta=90^\circ$

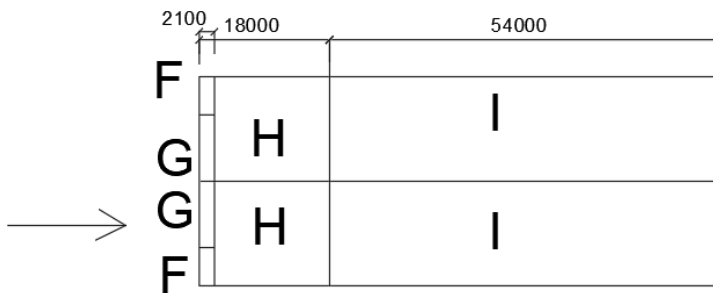


Schéma č.1b – oblasti střechy pro zatížení větrem

Zatížení trapézového plechu

Zatížení TR 35/207 pro tlak větru		k(kN/m ²)	γ	d(kN/m ²)
Stálé	Plech TR 35/207	0,073	1,35	0,09855
Proměnné	Užitné	0,75	1,5	1,125
	Sníh	0,64	1,5	0,96
	Vítr tlak F/H	1,15	1,5	1,725
	Vítr tlak G/H	0,99	1,5	1,485
Celkem		2,633		3,90855


Užitné zatížení – nepochozí střecha, kategorie H [6] [12]

$$Q_k = 0,75 \text{ kN/m}^2$$

Plech TR 35/207, tloušťka 0,75 mm => 0,073 kN/m² [13]

Únosnost TR 35/207 pro rozpětí pole 1,8 m: 3,91 kN/m² < 4,83 kN/m² => Vyhoví

Mezní q_k pro průhyb L/200 = 2,63 kN/m² < 3 kN/m² => Vyhoví

t _N [mm]	g [kg/m ²]								
			0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25
0,63	6,09	q _{d1}	17,46	11,03	7,62	5,58	4,27	3,37	
		q _{d2}	14,28	9,29	6,56	4,89	3,79	3,02	
		q _k	31,94	13,47	6,90	3,99	2,51	1,68	
0,75	7,25	q _{d1}	23,68	14,85	10,20	7,44	5,67	4,41	
		q _{d2}	19,41	12,55	8,81	6,54	5,05	4,02	
		q _k	40,77	17,20	8,81	5,10	3,21	2,15	
0,88	8,50	q _{d1}	31,15	19,41	13,26	9,64	7,26	5,57	
		q _{d2}	25,59	16,45	11,50	8,51	6,55	5,21	
		q _k	52,35	22,09	11,31	6,54	4,12	2,76	
1,00	9,66	q _{d1}	38,65	23,95	16,31	11,82	8,72	6,70	
		q _{d2}	31,79	20,34	14,17	10,45	8,04	6,37	
		q _k	63,81	26,92	13,78	7,98	5,02	3,36	
1,13	10,92	q _{d1}	47,34	29,18	19,80	14,04	10,36	7,96	
		q _{d2}	39,00	24,84	17,24	12,69	9,73	7,70	
		q _k	76,66	32,42	16,60	9,61	6,05	4,05	
1,25	12,08	q _{d1}	55,81	34,25	23,03	16,12	11,90	9,14	
		q _{d2}	46,04	29,20	20,21	14,84	11,36	8,98	
		q _k	89,38	37,71	19,31	11,17	7,04	4,71	

LEGENDA **Prostý nosník**

q_{d1} návrhová hodnota únosnosti : přesah TR plechu min. 53 mm

q_{d2} návrhová hodnota únosnosti : šířka podpory min. 40 mm

Obr.č.1 - Tabulka únosnosti pro TR 35/207 [1]

PROFIL	tl. [mm]	G [kg/m]	Tvar profilu								Průřezové charakteristiky				
			H [mm]	WF(b) [mm]	Wfo [mm]	D1 [mm]	φ [mm]	A [mm]	B [mm]	C [mm]	A [mm ²]	Aeff [mm ²]	Iy [mm ⁴] x10 ⁶	Iyeff [mm ⁴] x10 ⁶	Wyeff [mm ³] x 10 ³
Z 120	1.5	2.84	120	50	45	15	14	31	60	29	364	246	0.82	0.77	12.40
	2.0	3.78									484	375	1.08	1.05	17.16
Z 140	1.5	3.07	140	50	45	15	14	36	70	34	393	245	1.18	1.08	14.66
	2.0	4.10									523	377	1.55	1.50	21.08
Z 180	1.5	4.02	180	65	60	20	18	46	90	44	495	239	2.48	1.99	19.38
	2.0	5.35									661	299	3.29	2.97	31.20
Z 210	1.5	4.37	210	65	60	20	18	61	90	59	539	237	3.56	2.76	22.55
	2.0	5.82									719	396	4.72	4.15	36.57
	2.5	7.28									898	563	5.85	5.45	49.96
Z 240	2.0	6.61	240	75	70	20	18	46	150	44	817	393	7.03	5.72	42.29
	2.5	8.26									1021	576	8.73	7.74	60.16
	3.0	9.91									1222	767	10.40	9.64	77.68
Z 270	2.0	7.08	270	75	70	20	18	51	170	49	876	391	9.28	7.36	47.47
	2.5	8.85									1095	573	11.54	10.00	67.82
	3.0	10.62									1311	766	13.75	12.52	88.11
Z 300	2.0	7.55	300	75	70	20	18	61	180	59	935	389	11.93	9.22	52.61
	2.5	9.44									1169	571	14.84	12.57	75.39
	3.0	11.33									1400	765	17.70	15.79	98.39

Obr.č.2 - Tabulka Z profilů [2]

Zatížení trapézového plechu – sání větru

Zatížení TR 35/207 pro sání větru		k(kN/m ²)	γ	d(kN/m ²)
Stálé	Plech TR 35/207	0,072	1	0,072
Proměnné	Vítr sání F	-1,6	1,5	-2,4
Celkem		-1,528		-2,328

Únosnost TR 35/207 pro rozpětí pole 1,8 m: $2,328 \text{ kN/m}^2 < 4,85 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow$ Vyhoví

MSP

$1,528 \text{ kN/m}^2 < 2,34 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow \text{kN/m}^2 \Rightarrow$ Vyhoví

ocelové tenkostěnné vaznice Z po 1,8 m

Zatížení vaznice

Jedná se o nejnepříznivější zatížení pro tlak větru.

Zatížení	Vaznice Z 270/3	kN/m ²	Zat. šířka(n	k(kN/m)	γ	d(kN/m)
Stálé	Plech TR 35/207	0,073	1,8	0,1314	1,35	0,17739
	VL Tíha	0,106	1,8	0,1908	1,35	0,25758
Celkem stálé				0,3222		0,43497
Proměnné	Užitné	0,75	1,8	1,35	1,5	2,025
	Sníh	0,64	1,8	1,152	1,5	1,728
	Vítr tlak F/H	1,15	1,8	2,07	1,5	3,105
	Vítr tlak G/H	0,99	1,8	1,782	1,5	2,673
Celkem proměnné						6,858
Celkem						7,29297

$$(g+q)R_d = 7,61 \text{ kN/m}$$

$$(g+q)E_d = 7,29 \text{ kN/m}$$

$$7,29 \text{ kN/m} < 7,61 \text{ kN/m} \Rightarrow \text{Vyhoví}$$

Profil		Připustné rovnoměrné					
		5.00	5.50	6.00	6.25	6.50	6.75
krajní : Z 270/2,5 vnitřní : Z 270/2,0	1	8.16	6.84	5.83	5.32	4.88	4.49
	2	6.74	5.72	4.94	4.59	4.28	4.01
	3	-6.63	-5.33	-4.36	-3.99	-3.67	-3.39
	4	-4.79	-3.78	-3.04	-2.77	-2.53	-2.32
	5	12.8	9.65	7.43	6.58	5.85	5.22
	6	8.56	6.43	4.96	4.38	3.90	3.48
krajní : Z 270/3,0 vnitřní : Z 270/2,5	1	10.57	8.90	7.61	7.02	6.50	6.03
	2	9.38	7.99	6.91	6.41	5.97	5.57
	3	-8.44	-6.79	-5.55	-5.09	-4.68	-4.32
	4	-6.67	-5.30	-4.28	-3.91	-3.58	-3.29
	5	16.1	12.1	9.32	8.24	7.33	6.54
	6	10.7	8.07	6.21	5.50	4.88	4.36

Obr.č.3 Tabulka únosnosti Z profilů [2]

Nejnepříznivější zatížení pro **sání větru** bylo uvažováno na pomezí oblasti F a H.

Zatížení vaznice Z 270/3 – sání větru

Zatížení	Vaznice Z 270/3	kN/m ²	Zat. šířka(m)	k(kN/m)	γ	d(kN/m)
Stálé	Plech TR 35/207	0,073	1,8	0,1314	1	0,1314
	VI. Tíha	0,106	1,8	0,1908	1	0,1908
Celkem stálé				0,3222		0,3222
Proměnné	Vítr sání F	-1,6	1,1	-1,76	1,35	-2,376
	Vítr sání H	-0,56	0,7	-0,392	1,35	-0,5292
Celkem proměnné						-2,9052
Celkem						-2,583

$$(g+q)R_d = 3,04 \text{ kN/m}$$

$$(g+q)E_d = 2,58 \text{ kN/m} < 3,04 \text{ kN/m} \Rightarrow \text{Vyhoví}$$

Zatížení vazníku

Zatížení	Vazník	g_k (kN/m)	γ	g_d (kN/m)	Zat. Šířka (m)	G_k (kN)	γ	G_d (kN)
Stálé	VI. Tíha	Spočteno v softwaru SCIA						
	Ostatní stálé	0,3222	1,35	0,43497	6	1,9332	1,35	2,60982
Proměnné	Užitné	1,35	1,5	2,025	6	8,1	1,5	12,15
	sníh	1,152	1,5	1,728	6	6,912	1,5	10,368
	Vítr tlak F/H	2,07	1,5	3,105	6	12,42	1,5	18,63
	Vítr tlak G/H	1,782	1,5	2,673	6	10,692	1,5	16,038

Hodnoty sil byly zadány do statického softwaru SCIA do modelu zatížení. Zatížení větrem je modelováno pro nejzatíženější vaznici.

Schéma haly:

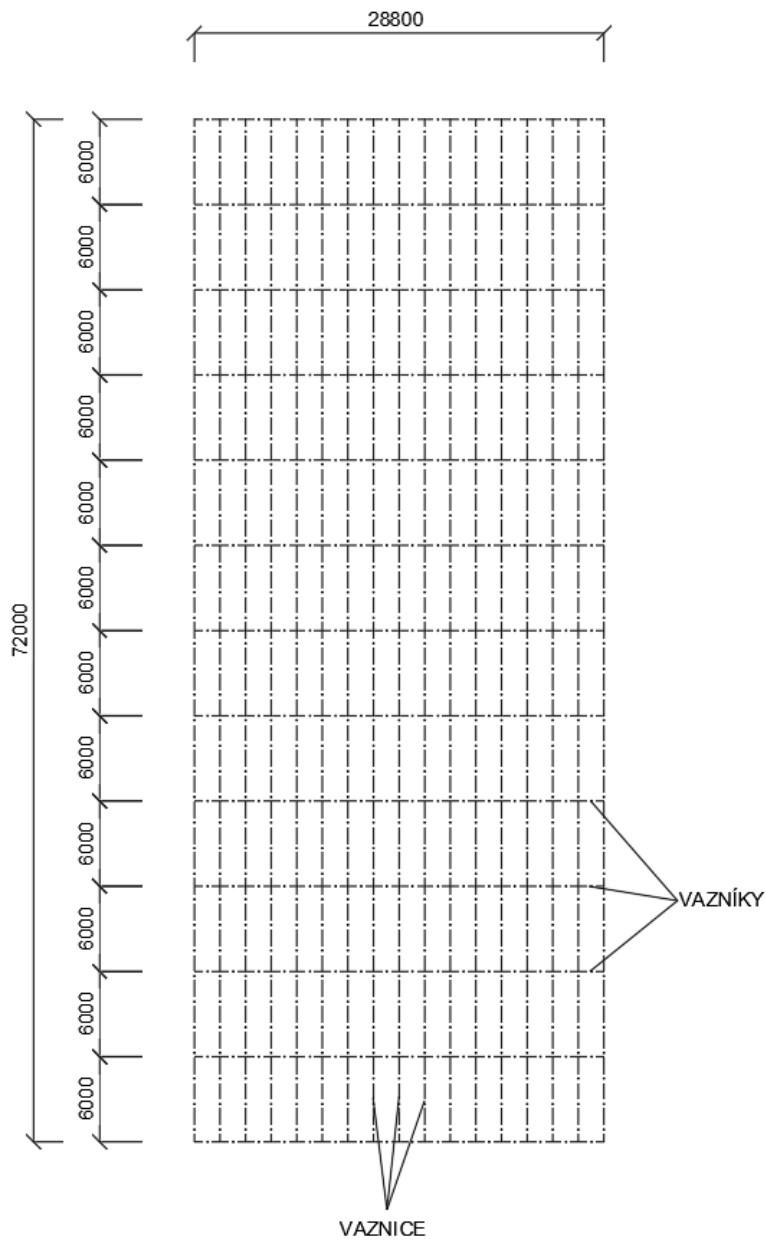


Schéma č.2 – půdorysné schéma haly

3. Návrh směsi a předpínací výztuže

3.1 Složení betonu s charakteristickou pevností 180 MPa: [5]

Obsah vody: 150 kg/m³ (6%)

Cement: 660 kg/m³ (26,4%)

Křemičitý úlet: 240 kg/m³ (9,6%)

Vysokopecní struska: 240 kg/m³ (9,6%)

Sádra: 60 kg/m³ (2,4%)

Poměr písku a celkového kameniva 0,35

Superplastifikátor (1,5%)

Poměr w/b = 0,125 => B (pojivo = cement+křemičitý úlet+vysokopecní struska+sádra) = 1200 kg/m³ (48%)

Jemné Kamenivo – 26 %; Písek 14%

Ocelová vlákna 4,5%

Procenta vyjadřují hmotnostní zlomek jednotlivých složek ve směsi UHPC.

3.2 Základní vlastnosti výztuže:

V návrhu počítám s předpínací výztuží Y1770S7 – 15,7

γ_c pro beton – trvalá a dočasná návrhová situace: $\gamma_c = 1,5$

γ_s pro předpínací ocel – trvalá a dočasná návrhová situace: $\gamma_c = 1,15$ [7] [17]

$$f_{p0,1,k} = 1560 \text{ MPa}; f_{ck} = 180 \text{ MPa}; f_{yk} = 500 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,5} = \frac{180}{1,5} = 120 \text{ MPa}; f_{yd} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ MPa}$$

$$f_{pd} = \frac{f_{p0,1,k}}{1,15} = \frac{1560}{1,15} = 1356,52 \text{ MPa}$$

4. Vazník v poli

4.1 Návrh rozměrů

Rozměry vazníku:

bw	=	360	mm
hf	=	200	mm
kt	=	80	mm
bw	=	200	mm
h	=	3000	mm
hg	=	300	mm
hh	=	2340	mm

Výpočet těžišových souřadnic a ploch jednotlivých částí průřezu

zc1	100	mm
zc2	226,6667	mm
zc3	240	mm
zc4	1450	mm
zc5	2660	mm
zc6	2646,667	mm
zc7	2850	mm

A1	72000	mm ²
A2	6400	mm ²
A3	16000	mm ²
A4	468000	mm ²
A5	16000	mm ²
A6	6400	mm ²
A7	108000	mm ²

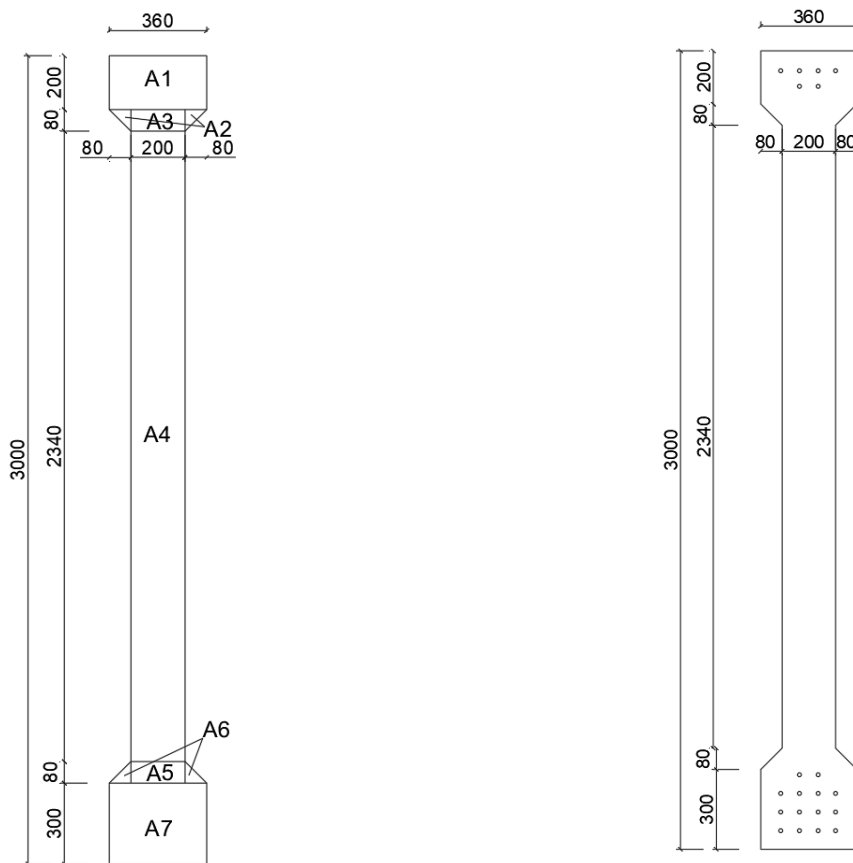


Schéma č. 3 – Vazník s návrhem rozměrů a výztuže vazníku v poli

Plocha průřezu $A_c = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 = 1\,114\,800\text{ mm}^2$

Poloha těžiště $T(x) = b/2 = 360/2 = 180\text{ mm}$

Poloha těžiště $T(z) = e_h = \frac{\sum z_{ci} \cdot A_i}{\sum A_i} = 1527,7\text{ mm}$

4.2 Výpočet průřezových charakteristik:

Poloha těžiště $e_d = h - e_h = 3000 - 1527,7 = 1472,3\text{ mm}$

Moment setrvačnosti: $I_c = 1,15 \cdot 10^{12}\text{ mm}^4$

Průřezový modul horní: $W_h = \frac{I_c}{e_h} = \frac{6,19 \cdot 10^{11}}{1527,7} = 4,05 \cdot 10^9\text{ mm}^3$

Průřezový modul dolní: $W_d = \frac{I_c}{e_d} = \frac{6,19 \cdot 10^{11}}{1472,3} = 4,2 \cdot 10^9\text{ mm}^3$

Velikost jádra horní: $r_h = \frac{W_h}{A_c} = \frac{405184734}{692800} = 606,856\text{ mm}$

Velikost jádra dolní: $r_d = \frac{W_d}{A_c} = \frac{420430113}{692800} = 584,851\text{ mm}$

4.3 Zatížení

K výpočtu vnitřních sil byl využit software SCIA Engineer. Výsledky jsou uvedeny v příloze č. 1

Zatěžovací kombinace MSÚ [4] [14]

$$6.10.a \quad \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,1} Q_{k,i}$$

$$6.10.b \quad \sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,1} Q_{k,i} \psi_0$$

Při posouzení MSÚ se bude vycházet z méně příznivé kombinace zatížení.

Uvažované součinitele bezpečnosti: $\gamma_G = 1,35$; $\gamma_Q = 1,5$

Uvažované hodnoty součinitele ψ :

Užitné zatížení kategorie H střechy: $\psi_{0,1} = 0$ pro 6.10 a; $\psi_{0,1} = 1,0$ pro 6.10 b

Zatížení sněhem pro stavby v nadmořské výšce $\psi_0 = 0,7$ [19]

Zatížení větrem: $\psi_0 = 0,6$

Součinitel $\xi_j = 0,85$

Zatěžovací kombinace MSP:

Charakteristická kombinace zatížení

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P_k + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} Q_{k,i} \cdot \psi_{0,i}$$

Kvazistálá kombinace zatížení

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P_k + \sum_{i > 1} Q_{k,i} \cdot \psi_{2,i}$$

$\psi_{2,i} = 0,0$ (pro užitné kategorie H, pro sníh, pro vítr) [19]

Nevětší moment ve vazníku charakteristické kombinace MSP: $M_{f,k} = 2718,68$ kNm

Hodnotu e_p uvažuji jako r_d

4.4 Návrh předpínací síly, výztuže a krycí vrstvy

MSP Charakteristická kombinace: $M_{f,k} = 2718,68$ kNm

$$\text{Návrh předpínací síly: } P_{p,\infty} = \frac{M_{f,k}}{W_d \left(\frac{1}{A_c} + \frac{e_p}{W_d} \right)} = \frac{2718\,680\,000}{420\,430\,113 \left(\frac{1}{692800} + \frac{584,85}{420430113} \right)} = 2281331,92 \text{ N} = 2281,33 \text{ kN}$$

Uvažuji, že $e_p = r_d$

Maximální napětí při napínání (co výztuž vydrží):

$$\sigma_{p,max} = \min(0,8 \cdot f_{pk}; 0,9 \cdot f_{p0,1k}) \rightarrow \sigma_{p,in} \\ \min(0,8 \cdot 1770; 0,9 \cdot 1560) \rightarrow 1404 \text{ MPa [7]}$$

Maximální napětí po vnesení předpětí:

$$\sigma_{pm0} = \min(0,75 \cdot f_{pk}; 0,85 \cdot f_{p0,1k}) = \min(0,75 \cdot 1770; 0,85 \cdot 1560) = 1326 \text{ MPa}$$

Předpokládám hodnotu ztráty předpětí na konci životnosti 25%:

$$\sigma_{p,\infty,est} = (1 - 0,25) \cdot \sigma_{p,in} = (1 - 0,25) \cdot \sigma_{p,in} = (1 - 0,25) \cdot 1404 = 1053 \text{ MPa}$$

$$A_{p,req} = \frac{P_{k,\infty}}{\sigma_{p,\infty,est}} = \frac{2281331,92}{1053} = 2166,507 \text{ mm}^2$$

$$A_p = 150 \text{ mm}^2$$

$$n = \frac{A_{p,req}}{A_p} = \frac{2166,507}{150} = 14,44 \Rightarrow \text{Navrhuji 20 prutů} \Rightarrow A_{s,prov} = 3000 \text{ mm}^2$$

Krytí výztuže

Třída konstrukce S5

Stupeň vlivu prostředí podle ČSN EN 206+A1: XC2 – mokré, občas suché [7]

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

$$c_{min} = \max \{8; 30 + 0 - 0 - 0; 10\text{mm}\}$$

$$c_{min} = 30 \text{ mm}$$

$$c_{min,b} = 8 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dur,add} = 0 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dur,st} = 0 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dur,\gamma} = 0 \text{ mm}$$

$$c = 10 \text{ mm}$$

$$c_{min,dur} = 30 \text{ mm}$$

$$c_{nomv} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

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

$$c_{nom} = 40 \text{ mm}$$

4.5 Ztráty předpětí (snížení napětí ve výztuži):

$$-\Delta\sigma = E \cdot (-\Delta\varepsilon)$$

Ztráta pokluzem v kotevním bloku (Při kotvení v třecích kotvách předpínací výztuž mírně proklouzne [18])

$$\Delta\sigma_{sl} = -\varepsilon \cdot E_p = -\frac{s_l}{L_v} \cdot E_p$$

Uvažuji pokluz v kotevním bloku $s_l = 7,5 \text{ mm}$; L_v uvažuji rozpětí vazníku + 1,2 m (30 m); $E_p = 195 \text{ GPa}$

$$\Delta\sigma_{sl} = -\varepsilon \cdot E_p = -\frac{7,5}{30000} \cdot 195000 = -48,75 \text{ MPa}$$

Ztráta krátkodobou relaxací

$$\Delta\sigma_{p,r,t=3} = -0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_{pi}$$

$$\sigma_{pi} = \sigma_{p,in} + \Delta\sigma_{sl}$$

$$\sigma_{pi} = 1404 - 48,75$$

t – doba po napnutí v hodinách (uvažuj t = 3 dny = 72 hodin)

$$\rho_{1000} = 2,5\%$$

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

$$\mu = \frac{1404}{1770} = 0,79$$

$$\Delta\sigma_{p,r,t=3} = -0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,79} \left(\frac{72}{1000}\right)^{0,75(1-0,79)} \cdot 10^{-5} \cdot 1355,25 = -20,28 \text{ MPa}$$

Podržení předpínací výztuže na 6 min (0,1 h) – snížení ztráty

$$\Delta\sigma_{p,r,t=3} = -21,74 + 0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,79} \left(\frac{0,1}{1000}\right)^{0,75(1-0,79)} \cdot 10^{-5} \cdot 1355,25 = -12,97 \text{ MPa}$$

Ztráta pružným přetvořením betonu

$$\Delta\sigma_{p,cc} = -\sigma_{pj} \cdot \frac{A_p \cdot E_p}{A_c \cdot E_{cm(t)} + A_p E_p} [6]$$

Střední hodnota pevnosti v tlaku betonu:

Pevnosti betonu v tlaku $f_{ck(t)}$ v okamžiku t pro vnesení předpětí

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ pro } 3 < t < 28 \text{ dní} [7][15] = 180 + 8 = 188 \text{ MPa}$$

Modul pružnosti: střední hodnota $E_{cm} = 9500 f_{cm}^{\frac{1}{3}} = 9500 \cdot 188^{\frac{1}{3}} = 54422 \text{ MPa}$

σ_{pj} hodnota maximálního tahového napětí působící v předpínací výztuži snižená o ztrátu zapříčiněnou pokluzem ($\sigma_{p,in} + \Delta\sigma_{sl} + \Delta\sigma_{p,r,t=3}$)

$$E_{cm(t)} = \left(\frac{f_{cm(t)}}{f_{cm}}\right)^{0,3} \cdot E_{cm} [5]$$

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

s – součinitel dle druhu cementu (uvažuj cement třídy R) = 0,2

t – uvažuj předepnutí v čase stáří betonu t = 3 dny

$\beta_{cc(t)}$ součinitel závisící na stáří betonu t

$$\beta_{cc(t)} = \exp \left\{ 0,2 \left[1 - \left(\frac{28}{3}\right)^{0,5} \right] \right\} = 0,6629$$

$$f_{cm(t)} = 0,6629 \cdot 188 = 124,63 \text{ MPa}$$

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

$$E_{cm(t)} = \left(\frac{124,63}{188}\right)^{0,3} \cdot 54422 = 48107,63 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{pj} = \sigma_{p,in} + \Delta\sigma_{sl} + \Delta\sigma_{p,r,t=3} = 1404 - 48,75 - 12,97 = 1342,28 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{p,cc} = -1342,28 \cdot \frac{3000 \cdot 195000}{692800 \cdot 48107,63 + 3000 \cdot 195000} = -23,15 \text{ MPa}$$

Napětí v předpínací výztuži po krátkodobých ztrátách

Ověření hodnoty v předpínací výztuži

$$\sigma_{p,0} = \sigma_{p,in} + \Delta\sigma_{sl} + \Delta\sigma_{p,r,t=3} + \Delta\sigma_{p,cc} \leq \sigma_{p,m0}$$

$$1404 - 48,75 - 12,97 - 23,15 = 1319,12 \text{ MPa} < 1326 \text{ MPa}$$

Dlouhodobé ztráty předpětí

Ztráta dlouhodobou relaxací

Uvažována třída 2: dráty nebo lana s nízkou relaxací [5]

$$\Delta\sigma_{p,r,t=\infty} = -0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_{pi}$$

t = 500 000 h (pro cca 50 let), opět uvažováno podržení výztuže po dobu 6 minut

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{p,r,t=\infty} &= -0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,793} \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75(1-0,79)} \cdot 10^{-5} \cdot 1355,25 + 0,66 \cdot 2,5 \\ &\cdot e^{9,1 \cdot 0,793} \left(\frac{0,1}{1000}\right)^{0,75(1-0,79)} \cdot 10^{-5} \cdot 1355,25 = -72,66 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Ztráta dotvarováním betonu

$$M_{g,k} = 1615,42 \text{ kNm (spočteno z programu Scia)}$$

$$\sigma_{cp}^{g+p} = \frac{M_{g,k}}{I_c} \cdot e_d - \frac{P_0}{A_c} - \frac{P_0 \cdot e_{p,skut}}{I_c} e_d$$

$$e_{p,skut} = 504,302 \text{ mm}$$

$$P_0 = A_p \cdot \sigma_{p,0} = 3000 \cdot 1319,124 = 3\,931\,510 \text{ N} = 3957,37 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cp}^{g+p} = \frac{1\,615\,320}{6,19 \cdot 10^{11}} \cdot 1472,302 - \frac{3\,957\,370}{692800} - \frac{3\,957\,370 \cdot 504,3}{1,15 \cdot 10^{12}} \cdot 1472,302 = -6,62 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{p,c} = E_p \cdot \varepsilon_{c(t_0)}^e \cdot \varphi(t, t_0)$$

$$\Delta\sigma_{p,c} = E_p \cdot \frac{\sigma_{cp}^{g+p}}{E_{c(t=3)}} \cdot \varphi_{(18250,3)}$$

Uvažuji $\varphi_{(18250,3)} = 0,8$ (bez tepelné úpravy) [8]

$$\Delta\sigma_{p,c} = 195000 \cdot \frac{-6,62}{48109} \cdot 0,8 = -21,46 \text{ MPa}$$

Ztráta smršťováním betonu

Celkové poměrné smršťování:

$$\varepsilon_{c(t)}^s = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad [6]$$

U UHPC nepočítáme se smršťováním od vysychání.

Vzhledem k tomu, že poměr vody k cementu je velmi nízký, nevykazuje UHPC smršťování při sušení.

[9]

$$\varepsilon_{cd} = 0$$

$$\alpha_{ds1} = 6; \alpha_{ds2} = 0,11 \text{ pro třídu cementu R [10]}$$

Poměrné autogenní smršťování

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

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

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

t – stáří betonu v uvažovaném okamžiku (50 let = 18260 dní)

t_s – stáří betonu při začátku smršťování (uvažuji 3 dny)

$$\beta_{as(t)} = 1 - \exp(-0,2 \cdot 18260^{0,5}) = 1,0$$

$$\varepsilon_{ca(\infty)} = 2,5 \cdot (180 - 10) \cdot 10^{-6} = 4,25 \cdot 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{ca(t)} = 1,0 \cdot 4,25 \cdot 10^{-4} = 4,25 \cdot 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{c(t)}^s = 0,000425$$

$$\Delta\sigma_{p,s} = E_p \cdot \varepsilon_{c(t)}^s = 195000 \cdot 0,000425 = -82,88 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{p,\infty} = \sigma_{p,in} + \Delta\sigma_{sl} + \Delta\sigma_{p,cc} + \Delta\sigma_{p,r,t=\infty} + \Delta\sigma_{p,c} + \Delta\sigma_{p,s}$$

$$= 1404 - 48,75 - 23,15 - 72,66 - 21,46 - 82,88$$

$$= 1155,1 \text{ MPa}$$

$$P_{\infty} = \sigma_{p,\infty} \cdot A_p = 1155,1 \cdot 3000 = 3465,3 \text{ kN}$$

Moment pro kvazistálou kombinaci: 1615,42 kNm

5 Vazník nad podporou

5.1 Návrh rozměrů

nad podporou

bw	=	360	mm
hf	=	200	mm
kt	=	80	mm
bw	=	200	mm
h	=	1500	mm
hg	=	300	mm
hh	=	840	mm

Výpočet těžiškových souřadnic a ploch jednotlivých částí průřezu

zc1	100	mm
zc2	226,6667	mm
zc3	240	mm
zc4	700	mm
zc5	1160	mm
zc6	1146,667	mm
zc7	1350	mm

A1	72000	mm ²
A2	6400	mm ²
A3	16000	mm ²
A4	168000	mm ²
A5	16000	mm ²
A6	6400	mm ²
A7	108000	mm ²

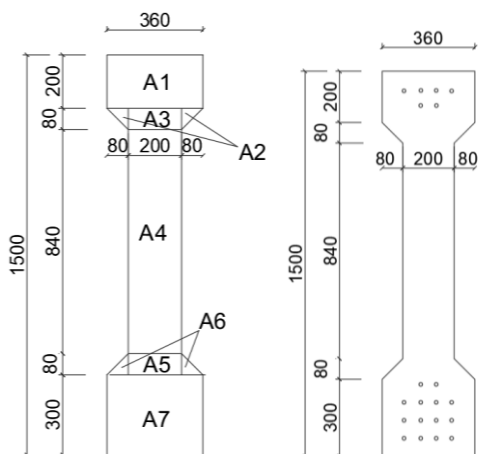


Schéma č. 4 – Vazník s návrhem rozměrů a výztuže průřezu nad podporou

5.2 Výpočet průřezových charakteristik:

Poloha těžiště $T(x) = b/2 = 360/2 = 180 \text{ mm}$

Poloha těžiště $T(z) = e_h = \frac{\sum z_{ci} \cdot A_i}{\sum A_i} = 768,303 \text{ mm}$

Poloha těžiště $e_d = h - e_h = 1500 - 768,303 = 731,697 \text{ mm}$

Moment setrvačnosti: $I_c = 9,03 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$

Průřezový modul horní: $W_h = \frac{I_c}{e_h} = \frac{9,03 \cdot 10^{10}}{768,303} = 117\,509\,661,5 \text{ mm}^3$

Průřezový modul dolní: $W_d = \frac{I_c}{e_d} = \frac{9,03 \cdot 10^{10}}{731,697} = 123\,388\,469,9 \text{ mm}^3$

Velikost jádra horní: $r_h = \frac{W_h}{A_c} = \frac{117\,509\,661,5}{392\,800} = 314,125 \text{ mm}$

Velikost jádra dolní: $r_d = \frac{W_d}{A_c} = \frac{123\,388\,469,9}{392\,800} = 299,159 \text{ mm}$

5.3 Zatížení

Stanovení zatěžovacích kombinací MSÚ a MSP včetně bezpečnostních součinitelů je uvedeno v odstavci 4.3. Viz příloha č.1.

5.4 Návrh předpínací síly a výztuže a krycí vrstvy

Největší moment ve vazníku na podporou charakteristické kombinace MSP: $M_{f,k} = 0 \text{ kNm}$

Hodnotu e_p uvažuji jako r_d .

Maximální napětí při napínání (co výztuž vydrží): $\sigma_{p,max} = \min(0,8 \cdot f_{pk}; 0,9 \cdot f_{p0,1k}) \rightarrow \sigma_{p,in}$
 $\min(0,8 \cdot 1770; 0,9 \cdot 1560) \rightarrow 1404 \text{ MPa}$

Maximální napětí po vnesení předpětí: $\sigma_{pm0} = \min(0,75 \cdot f_{pk}; 0,85 \cdot f_{p0,1k}) = \min(0,75 \cdot 1770; 0,85 \cdot 1560) = 1326 \text{ MPa}$

Předpokládám hodnotu ztráty předpětí na konci životnosti 25%: $\sigma_{p,\infty,est} = (1 - 0,25) \cdot \sigma_{p,in} = (1 - 0,25) \cdot 1404 = 1053 \text{ MPa}$

$$A_p = 150 \text{ mm}^2$$

$$\text{Navrženo 20 prutů} \Rightarrow A_{s,prov} = 3000 \text{ mm}^2$$

5.5 Výpočet ztrát předpětí

Ztráty předpětí (snížení napětí ve výztuži):

$$-\Delta\sigma = E \cdot (-\Delta\varepsilon)$$

Ztráta pokluzem v kotevním bloku

$$\Delta\sigma_{sl} = -\varepsilon \cdot E_p = -\frac{s_l}{L_v} \cdot E_p$$

Uvažují pokluz v kotevním bloku $s_l = 7,5$ mm; L_v uvažují rozpětí vazníku + 1,2 m (30 m); $E_p = 195$ GPa.

$$\Delta\sigma_{sl} = -\varepsilon \cdot E_p = -\frac{7,5}{30000} \cdot 195000 = -48,75 \text{ MPa}$$

Ztráta krátkodobou relaxací

$$\Delta\sigma_{p,r,t=3} = -0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_{pi}$$

$$\sigma_{pi} = \sigma_{p,i} + \Delta\sigma_{sl}$$

t – doba po napnutí v hodinách (uvažují t = 3 dny = 72 hodin), podržení předpínací výztuže 6 min

$$\rho_{1000} = 2,5\%$$

$$\mu = \frac{1404}{1770} = 0,79$$

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{p,r,t=3} &= -0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,79} \left(\frac{72}{1000}\right)^{0,75(1-0,79)} \cdot 10^{-5} \cdot 1355,25 + 0,66 \cdot 2,5 \\ &\cdot e^{9,1 \cdot 0,79} \left(\frac{0,1}{1000}\right)^{0,75(1-0,79)} \cdot 10^{-5} \cdot 1355,250 = -12,97 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\sigma_{pj} = \sigma_{p,in} + \Delta\sigma_{sl} + \Delta\sigma_{p,r,t=3} = 1404 - 48,75 - 12,97 = 1342,277 \text{ MPa}$$

Ztráta pružným přetvořením betonu

$$\Delta\sigma_{p,cc} = -\sigma_{pj} \cdot \frac{A_p \cdot E_p}{A_c \cdot E_{cm(t)} + A_p E_p} [6]$$

$$\Delta\sigma_{p,cc} = -1342,277 \cdot \frac{3000 \cdot 195000}{392800 \cdot 48107,63 + 3000 \cdot 195000} = -40,31 \text{ MPa}$$

Napětí v předpínací výztuži po krátkodobých ztrátách

Ověření hodnoty v předpínací výztuži

$$\sigma_{p,0} = \sigma_{p,in} + \Delta\sigma_{sl} + \Delta\sigma_{p,r,t=3} + \Delta\sigma_{p,cc} \leq \sigma_{p,m0}$$

$$1404 - 48,75 - 12,97 - 40,31 = 1301,97 \text{ MPa} < 1326 \text{ MPa}$$

Dlouhodobé ztráty předpětí

Ztráta dlouhodobou relaxací

$$\Delta\sigma_{p,r,t=\infty} = -0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_{pi}$$

t = 500 000 h (pro cca 50 let), podržení výztuže 6 min = 0,1 h

$$\Delta\sigma_{p,r,t=\infty} = -0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,793} \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75(1-0,79)} \cdot 10^{-5} \cdot 1355,25 + 0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,793} \left(\frac{0,1}{1000}\right)^{0,75(1-0,79)} \cdot 10^{-5} \cdot 1355,25 = -72,66 \text{ MPa}$$

Ztráta dotvarováním betonu

$$M_{g,k} = 2560 \text{ kNm (spočteno z programu Scia)}$$

$$\sigma_{cp}^{g+p} = \frac{M_{g,k}}{I_c} \cdot e_d - \frac{P_0}{A_c} - \frac{P_0 \cdot e_{p,skut}}{I_c} e_d$$

$$e_{p,skut} = 213,7 \text{ mm}$$

$$P_0 = A_p \cdot \sigma_{p,0} = 3000 \cdot 1301,97 = 3\,905\,910 \text{ N} = 3905,92 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cp}^{g+p} = 0 - \frac{3\,905\,920}{392800} - \frac{3\,905\,920 \cdot 213,7}{9,03 \cdot 10^{10}} \cdot 731,7 = -16,71 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{p,c} = E_p \cdot \frac{\sigma_{cp}^{g+p}}{E_{c(t=3)}} \cdot \varphi_{(18250,3)}$$

Uvažuji $\varphi_{(18250,3)} = 0,8$ (bez tepelné úpravy) [8]

$$\Delta\sigma_{p,c} = 195000 \cdot \frac{-16,71}{48109} \cdot 0,8 = -54,18 \text{ MPa}$$

Ztráta smršťováním betonu

Celkové poměrné smršťování:

$$\varepsilon_{c(t)}^s = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

$$\varepsilon_{c(t)}^s = 0,000425$$

$$\Delta\sigma_{p,s} = E_p \cdot \varepsilon_{c(t)}^s = 195000 \cdot 0,000425 = -82,88 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{p,\infty} = \sigma_{p,in} + \Delta\sigma_{sl} + \Delta\sigma_{p,cc} + \Delta\sigma_{p,r,t=\infty} + \Delta\sigma_{p,c} + \Delta\sigma_{p,s} = 1404 - 48,75 - 40,31 - 72,66 - 54,38 - 82,88 = 1105,021 \text{ MPa}$$

$$P_{\infty} = \sigma_{p,\infty} \cdot A_p = 1105,021 \cdot 3000 = 3315,68 \text{ kN}$$

6. Posouzení MSP [6]

Kvazistálá kombinace

$$|\sigma| \leq 0,45 f_{ck}$$

Nejvyšší hodnota kvazistálé kombinace: $\sigma = 16,71 \text{ MPa}$ (viz tabulka) $\leq 0,45 \cdot 120$

$$\sigma = 16,71 \text{ MPa} \leq 54 \text{ MPa} \Rightarrow \text{Vyhoví}$$

Charakteristická

$$|\sigma| \leq 0,6 f_{ck}$$

$$16,77 \text{ MPa} \leq 0,6 \cdot 180$$

$$16,77 \text{ MPa} \leq 72 \text{ MPa} \Rightarrow \text{Vyhoví}$$

$$P = A_c \cdot \sigma$$

$$\sigma_d = \frac{M}{I_c} \cdot e_d - \frac{P}{A_c} - \frac{P \cdot e_{p,skut}}{I_c} \cdot e_d$$

$$\sigma_h = \frac{M}{I_c} \cdot e_h - \frac{P}{A_c} - \frac{P \cdot e_{p,skut}}{I_c} \cdot e_h$$

$$\sigma_{Np} = \frac{P}{A_c}; \sigma_{Mp} = \frac{P \cdot e_{p,skut}}{I_c} \cdot e_h; \sigma_{M_{i,k}} = \frac{M}{I_c} \cdot e_h$$

Tabulka s hodnotami a posouzením

Průřez byl posuzován nad podporou, v poli, pro čas 3 dny a 50 po vnesení předpětí, pro kvazistálou a charakteristickou kombinaci, pro horní a dolní vlákna. Pro vyhovující posudek je potřeba, aby nedošlo ke vzniku tahových napětí, které by beton nedokázal přenést a aby tlaková napětí nepřekročila mezní hodnotu pro zatížení.

Napětí v posuzovaných vláknech									
Čas	Průřez	Kombinace	Vlákna	Napětí od působících vnitřních sil			Výsledné napětí	Posudek	
				Předpětí		Zatížení			
				σ_{Np}	σ_{Mp}	$\sigma_{Mi,k}$			
Vnesení předpětí (t=3 dny)	Nad podporou	Char	Horní	-9,94	7,10	0,00	-2,84	ok	
			Dolní	-9,94	-6,76	0,00	-16,71	ok	
		Kvaz	Horní	-9,94	7,10	0,00	-2,84	ok	
			Dolní	-9,94	-6,76	0,00	-16,71	ok	
	V poli	Char	Horní	-5,71	4,75	-6,47	-7,43	ok	
			Dolní	-5,71	-4,75	6,47	-3,99	ok	
		Kvaz	Horní	-5,71	4,75	-3,84	-4,81	ok	
			Dolní	-5,71	-4,75	3,84	-6,62	ok	
	Vnesení předpětí (t=50 let)	Nad podporou	Char	Horní	-8,44	6,03	0,00	-2,41	ok
				Dolní	-8,44	-5,74	0,00	-14,18	ok
			Kvaz	Horní	-8,44	6,03	0,00	-2,41	ok
				Dolní	-8,44	-5,74	0,00	-14,18	ok
V poli		Char	Horní	-5,00	4,16	-6,47	-7,31	ok	
			Dolní	-5,00	-4,16	6,47	-2,69	ok	
		Kvaz	Horní	-5,00	4,16	-3,84	-4,69	ok	
			Dolní	-5,00	-4,16	3,84	-5,32	ok	

Závěr

V softwaru MS Excel byly spočteny uvedené hodnoty v tabulce. Tahová napětí pro tento návrh nikde nevznikají a nejvyšší tlaková napětí vyhoví pro obě posuzované navrhované kombinace zatížení. Návrh předpínací výztuže tedy vyhoví.

7. Posouzení MSÚ

MSÚ v poli [6]

$$A_{s1} = 2100 \text{ m}^2$$

$$b = 360 \text{ mm}$$

$$f_{cd} = 120 \text{ MPa}$$

$$f_{pd} = 1356,52 \text{ MPa}$$

$$F_{cd} = b \cdot x \cdot 0,8 \cdot f_{cd}$$

$$F_{pd} = n \cdot A_{s,1} \cdot f_{pd}$$

$$F_{cd} = F_{pd}$$

$$b \cdot x \cdot 0,8 \cdot f_{cd} = n \cdot A_{s,1} \cdot f_{pd}$$

$$x = \frac{n \cdot A_{s,1} \cdot f_{pd}}{0,8 \cdot f_{cd} \cdot b} [6]$$

$$x = \frac{14 \cdot 150 \cdot 1356,52}{0,8 \cdot 120 \text{ MPa} \cdot 360} = 82,43 \text{ mm}$$

Počet předpínacích lan v tažené oblasti $n = 14$

$$F_{pd} = N_{p,t=\infty} = n \cdot A_{s,1} \cdot \sigma_{p,t=\infty}$$

$$\sigma_{p,t=\infty} = 1155,01 \text{ MPa}$$

$$F_{pd} = 14 \cdot 150 \cdot 1155,01 = 2425,71 \text{ kN}$$

$$M_p = N_p \cdot e_{p,skut} = 2\,425\,712 \cdot 504,3 = 1\,223,29 \text{ kNm}$$

$$W_c^p = \frac{I_c}{e_{p,skut}}$$

$$W_c^p = \frac{6,19 \cdot 10^{11}}{504,3} = 1\,227\,439\,672 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_c^p = -\frac{N_p}{A_c} - \frac{M_p}{W_c^p}$$

$$\sigma_c^p = -\frac{2\,425\,712}{692\,800} - \frac{1\,223\,291\,313}{1\,227\,439\,672} = -4,5 \text{ MPa}$$

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

$$\varepsilon_c^p = \frac{-4,5}{54422} = -0,0000826$$

$$\sigma_p = 1155,01 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p}$$

$$\varepsilon_p = \frac{1155,01}{195000} = -5,92 \cdot 10^{-3}$$

Mezní přetvoření betonu uvažují $\varepsilon_{cu} = 3,3 \text{ ‰}$ [18]

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

$$d_p = e_h + e_{p,skut} = 1527,7 + 504,3 = 2032 \text{ mm}$$

$$\Delta\varepsilon_p = \frac{0,0033}{82,428} \cdot (2032 - 82,428) = 0,078$$

$$\sum \varepsilon_p = \varepsilon_c^p + \varepsilon_p + \Delta\varepsilon_p \geq \frac{f_{pd}}{E_p}$$

$$0,0000826 + 5,92 \cdot 10^{-3} + 0,078 \geq \frac{1356,52}{195000}$$

$$0,084 \geq 0,00696 \Rightarrow \text{Vyhoví}$$

MSÚ nad podporou

$$A_{s1} = 2100 \text{ mm}^2$$

$$b = 360 \text{ mm}$$

$$f_{cd} = 120 \text{ MPa}$$

$$f_{pd} = 1356,52 \text{ MPa}$$

$$F_{cd} = b \cdot x \cdot 0,8 \cdot f_{cd}$$

$$F_{pd} = n \cdot A_{s,1} \cdot f_{pd}$$

$$F_{cd} = F_{pd}$$

$$b \cdot x \cdot 0,8 \cdot f_{cd} = n \cdot A_{s,1} \cdot f_{pd}$$

$$x = \frac{n \cdot A_{s,1} \cdot f_{pd}}{0,8 \cdot f_{cd} \cdot b}$$

$$x = \frac{14 \cdot 150 \cdot 1356,52}{0,8 \cdot 120 \cdot 360} = 82,43 \text{ mm}$$

Počet předpínacích lan v tažené oblasti $n = 14$

$$F_{pd} = N_{p,t=\infty} = n \cdot A_{s,1} \cdot \sigma_{p,t=\infty}$$

$$\sigma_{p,t=\infty} = 1105,23 \text{ MPa}$$

$$F_{pd} = 14 \cdot 150 \cdot 1105,23 = 2320,97 \text{ kN}$$

$$M_p = N_p \cdot e_{p,skut} = 2320,975 \cdot 213,7 = 495,99 \text{ kNm}$$

$$W_c^p = \frac{I_c}{e_{p,skut}}$$

$$W_c^p = \frac{9,03 \cdot 10^{10}}{213,7} = 422\,480\,936 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_c^p = -\frac{N_p}{A_c} - \frac{M_p}{W_c^p}$$

$$\sigma_c^p = -\frac{2\,320\,975}{392\,800} - \frac{495\,990\,000}{422\,480\,936} = -7,08 \text{ MPa}$$

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

$$\varepsilon_c^p = \frac{7,08}{54422} = 0,00013$$

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p}$$

$$\varepsilon_p = \frac{1105,23}{195000} = 0,00567$$

Mezní přetvoření betonu uvažují $\varepsilon_{cu} = 3,3 \text{ ‰}$ [18]

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

$$d_p = e_h + e_{p,skut} = 768,3 + 213,7 = 982 \text{ mm}$$

$$\Delta\varepsilon_p = \frac{0,0033}{82,428} \cdot (982 - 82,428) = 0,036$$

$$\sum \varepsilon_p = \varepsilon_c^p + \varepsilon_p + \Delta\varepsilon_p \geq \frac{f_{pd}}{E_p}$$

$$0,00013 + 0,00567 + 0,036 \geq \frac{1356,52}{195000}$$

$$0,043 \geq 0,00696 \Rightarrow \text{Vyhoví}$$

MSÚ posouzení na smyk

MSÚ posuzují v místě uložení vazníku, kde je nejvyšší hodnota posouvající síly.

$$V_{edx} - P_{dx} \sin \alpha_x \text{ [16]}$$

$$x = 82,43 \text{ mm}$$

$$z = e_{p,skut} + e_h - x$$

$$z = 213,7 + 768,303 - 82,43 = 899,57 \text{ mm}$$

$$\cot \theta \text{ uvažováno } 1,2$$

$$\Delta l = z \cdot \cot \theta = 899,57 \cdot 1,2 = 1079,48 \text{ mm}$$

$$\alpha_x = 4,17^\circ$$

$$V_{edx(1000)} = 487,47 \text{ kN (kombinace MSÚ 6.10.b)}$$

$$V_{Rd, \max} = \min(\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v \cdot f_{cd} / (\cot \theta + \tan \theta); \frac{A_{sw} f_{yd}}{s_1} z \cot \theta)$$

$$V_{Rd, \max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v \cdot f_{cd} / (\cot \theta + \tan \theta)$$

Průměrné napětí betonu v tlaku: 6,93 MPa

$$1 + \sigma_{cp} / f_{cd} = 1 + 6,93 / 120 = 1,058$$

$$V_{Rd, \max} = 1,058 \cdot 200 \cdot 899,57 \cdot 0,2 \cdot 120 / (0,8 + 1,2) = 2284,18 \text{ kN}$$

$$V_{Rd, \max} = v \cdot f_{cd} \cdot b \cdot z \cdot \frac{\cot \theta}{1 + \cot^2 \theta}$$

$$V_{edx(1000)} \leq V_{Rd, \max}$$

487,47 kN \leq 2284,19 kN \Rightarrow Únosnost tlačené diagonály vyhoví

Návrh třmínků $\phi_t = 12 \text{ mm}$

$$A_{sw} = \frac{n\pi\phi_t^2}{4}$$

$$A_{sw} = \frac{2\pi 12^2}{4} = 226,19 \text{ mm}^2$$

Požadovaná rozteč třmínků

$$s_{req} = \frac{A_{sw} \cdot f_{yd}}{V_{Ed,1}} \cdot z \cdot \cot \theta$$

$$s_{req} = \frac{226,19 \cdot 435}{455\,080} \cdot 899,57 \cdot 1,2 = 233,39 \text{ mm}$$

$$s = 180 \text{ mm}$$

$$V_{Rd,1} = \frac{A_{sw} \cdot f_{yd}}{s_{req}} \cdot z \cdot \cot \theta = \frac{226,19 \cdot 435}{180} \cdot 899,57 \cdot 1,2 = 590,07 \text{ kN}$$

$$V_{Rd, \max} = \min(590,07 \text{ kN}; 2239,19 \text{ kN})$$

$$V_{Rd, \max} = 590,07 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,1} \leq V_{Rd, \max}$$

$$487,47 \text{ kN} \leq 590,07 \text{ kN}$$

$$\rho_{sw} \leq \rho_{sw, \max} = \frac{0,5v f_{cd}}{f_{ywd}} = \frac{0,5 \cdot 0,2 \cdot 120}{435} = 0,028 [6]$$

$$\rho_{sw} \geq \rho_{sw, \min} = \frac{0,08 \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} = \frac{0,08 \sqrt{180}}{435} = 0,00247$$

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{bs_1} = \frac{226,19}{200 \cdot 180} = 0,00628$$

$$0,00247 \leq 0,00628 \leq 0,028 \Rightarrow \text{Únosnost na smyk vyhoví}$$

Závěr

Návrh předpínací i smykové výztuže na MSÚ vyhoví. Výkresová dokumentace je součástí přílohy č.2.

8. Závěr praktické části

Návrh předem předpjatého vazníku s rozponem 28,8 m s navrženou předpínací výztuží Y1770S7 – 15,7 a vyšel u obou posuzovaných průřezu (nad podporou, v poli), stáří (3 dny, 50 let), vláken (horní, dolní) a kombinací (kvazistálá, charakteristická) v MSP i v MSÚ. Nikde nevznikají tahová namáhání. U smyku byly navrženy návrhové třmínky s vyhovující roztečí a průměrem (počítáno MSÚ).

Seznam literatury a webových stránek-teoretická část:

[1] PAVLÍKOVÁ, Milena, PAVLÍK Zbyšek a Jiří HOŠEK. Materiálové inženýrství I. 2., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04932-7. str. 130 - 135

[2] HANZLOVÁ, Hana a Jiří ŠMEJKAL. Betonové a zděné konstrukce 1: základy navrhování betonových konstrukcí. 2. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-06-5082, str. 9-11

[3] The facades of the Fondation Louis Vuitton dressed with Ductal® concrete [online]. The Architect's Newspaper, 2019 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.archpaper.com/2019/01/concrete-production-eight-percent-co2-emissions>

[4] DOHNÁLEK, Jiří. Beton a betonové stavby v průběhu století (1. část). Tzbinfo [online]. 2017 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/historicke-stavby/16171-beton-a-betonove-stavby-v-prubehu-stoleti>

[5] AÏTCIN, Pierre-Claude. Vysokohodnotný beton. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 80-86769-39-9, str. 22-25

[6] VÍTEK, Jan L. a Robert COUFAL. VYSOKOPEVNOSTNÍ BETONY A UHPC | HIGH STRENGTH CONCRETE AND UHPC [online]. 2012, str. 2-8 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.betontks.cz/sites/default/files/2012-7-42.pdf>

[7] LÓPEZ, Juan Ángel. What is UHPC? – Part 1: Birth of UHPC. UHPC for people [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://rdconcrete.com/what-is-uhpc-part-1-birth-of-uhpc/>

[8] The Development of UHPC. UHPS Solutions [online]. 2018 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://www.uhpsolutions.com/blog/quick-guide-to-the-history-of-uhpc>

[9] HUDOBA, Igor. Vysokohodnotný betón: materiály, vlastnosti, výroba, využitie. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2008. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-2836-2., str. 117-122

[10] COUFAL, Robert. Unikátní lávka s nosnou konstrukcí z UHPC v Čelákovících. *IMateriály* [online]. 2015 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/technologie/unikatni-lavka-s-nosnou-konstrukci-z-uhpc-v-celakovicich_42526.html

[11] VÍTEK, Jan. Světové mosty: od antiky po současnost. Praha: Grada Publishing, 2019. ISBN 978-80-271-0770-4, str. 379

[12] COUFAL, Robert a Jan L. VÍTEK. První použití UHPC ve formě transportbetonu v ČR. *TBG Metrostav* [online]. 2012 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: http://www.tbg-metrostav.cz/fileadmin/user_upload/napsali_o_nas/clanky_ke_stazeni/057_059_MAT09.pdf

[13] *Ultra-vysokopevnostní betony – UHPC* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <http://www.tbg-metrostav.cz/produkty/ultra-vysokopevnostni-betony-uhpc/>

[14] ČÍTEK D., MAREK J, KOLÍSKO J., TEJ P.,., KOMANEC J. VRÁBLÍK, L. Unikátní lávky a mosty z UHPC, [online] [cit. 2021-02-26], <https://silnice-zeleznice.cz/silnicni-infrastruktura/unikatni-lavky-a-mosty-z-uhpc-37>

[15] TOPCRETE. Stavbaweb [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.stavbaweb.cz/topcrete-13057/clanek.html>

[16] Další prestižní ocenění pro Lávkou v Čelákovících z UHPC. Metrostav [online]. 2018 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.metrostav.cz/cs/pro-media/1687-dalsi-prestizni-oceneni-pro-lavku-v-celakovicich-z-uhpc>

[17] What is UHPC? *My UHPC* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.myuhpc.com/english/faq/what-is-uhpc/>

[18] PERRY, V.H. *What Really is Ultra-High Performance Concrete?* [online]. Fuzhou, China, 2018, str.1 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/340441896_What_Really_is_Ultra-High_Performance_Concrete_-_Towards_a_Global_Definition

[19] VÍTEK, Jan L., Robert COUFAL a Alena PROCHÁZKOVÁ. PRAKTICKÁ ZKUŠENOST S VÝROBOU A DOPRAVOU UHPC ■ PRACTICAL EXPERIENCE WITH PRODUCING AND TRANSPORT OF UHPC. *Materiály a technologie* [online]. 2015 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: http://www.tbg-metrostav.cz/fileadmin/user_upload/napsali_o_nas/clanky_ke_stazeni/BETON_2-15_COUFAL_UHPC.PDF

[20] KOLÍSKO, Jiří a Milan RYDVAL. OHYBOVÁ ÚNOSNOST DESEK ZTRACENÉHO BEDNĚNÍ VYROBENÝCH Z UHPFRC A VLIV DISTRIBUCE OCELOVÝCH VLÁKEN ■ INFLUENCE OF STEEL FIBRE DISTRIBUTION ON LOAD-BEARING CAPACITY OF UHPFRC LOST SHUTTERING SLABS. *MATERIÁLY A TECHNOLOGIE ■ MATERIALS AND TECHNOLOGY* [online]. 2015 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: https://www.betontks.cz/sites/default/files/2015-2-34_0.pdf

[21] FLÁDR J, *Technologie betonu – příměsi*

[22] KOLÍSKO, Jiří, Petr TEJ, Václav KVASNIČKA, Jan KOMANEC a Milan KALNÝ. *METODIKA 2: METODIKA PRO N A VRH OVÁNÍ PRVKŮ Z UHPC*. Praha, 2015, str. 3; 5

[23] UHPFRC – ULTRA HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CONCRETE. *KŠ PREFEA* [online]. 2020 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: https://ksprefa.cz/wp-content/uploads/2020/06/KSP_TL_UHPC_01_UHPFRC.pdf

[24] KOLÍSKO, Jiří. *Tenkostěnné a skořepinové konstrukce* [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.transportbeton.cz/uploads/sources/beton-university->

prezentace/df072686d555da69729da39ca2c9bb70_10-bu-skorepinove-a-tenkostenne-konstrukce-vhodne-betony-pro-jejich-zhotoveni-kolisko-ii-pdf.pdf

[25] ŽENÍŠEK, Michal, Lenka LAIBLOVÁ a Tomáš VLACH. Segregace kameniva ultra-vysokohodnotného betonu [online]. Skalský dvůr, 2017, , str. 26-31 [cit. 2021-04-19]

[26] YUJING, Lv, Zhang WENHUA, Wu FAN, Wu PEIPEI, Zeng WEIZHAO a Yang FENGHAO. Static mechanical properties and mechanism of C200 ultra-high performance concrete (UHPC) containing coarse aggregates [online]. 2020, 2020 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1515/secm-2020-0018>

[27] TIPKA, Martin. Složení, návrh a příprava vysokopevnostního a ultravysokopevnostního betonu [online]. Praha, 2011 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/~tipkamar/granty_soubory/SGS_2011/Slozeni_navrh_priprava_HSC_a_UHSC.pdf

[28] OJHA, P.N., ,, Piyush MITTAL, Abhishek SINGH, Brijesh SINGH a V.V. ARORA. *Optimization and evaluation of ultra high-performance concrete* [online]. Journal of Asian Concrete Federation, 2020 [cit. 2021-04-12]. ISSN 2465-7964/ eISSN 2465-7972. Dostupné z: <https://www.asianconcretefederation.org/ACF-Website/journal/year2020/Volume6-1/V6-1-3.pdf>

[29] Křemenné moučky. H-GLOST [online]. [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: https://www.h-glost.cz/progres/lib/files.php?id=103&table=files_catalog

[30] FLÁDR, Josef, Vysokohodnotný beton 1 (online) (cit. 2021-02-11), dostupné z <https://docplayer.cz/72338258-Vysokohodnotny-beton-1-josef-fladr-kancelar-b788-konzultace-pondeli-10-00-az-11-00.html>

[31] BARBHUIYAL, Alim a Muneeb QURESH. *Effects of Silica Fume on the Strength and Durability Properties of Concrete* [online]. 2016 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/327258417_Effects_of_Silica_Fume_on_the_Strength_and_Durability_Properties_of_Concrete

[32] SHI, Caijun a Kamal H. KHAYAT. *Changes in rheology and mechanical properties of ultra-high performance concrete with silica fume content* [online]. 2019 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/335532382_Changes_in_rheology_and_mechanical_properties_of_ultra-high_performance_concrete_with_silica_fume_content

[33] ČSN EN 450-1 *Popílek do betonu - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*. Praha, Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013

[34] ČSN EN 15167-1. *Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*. Praha, Česká republika: Český normalizační institut, 2007

[35] SHI, Caijun ,, Zemei WU, Jianfan XIAO, Dehui WANG, Zhengyu HUANG a Zhi FANG. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials* [online]. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, PR China: Elsevier, 2015, , str. 742-749 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <http://pdf-s3.xuebalib.com:1262/xuebalib.com.47579.pdf>

[36] EL-DIDAMONY, H., MOHAMED HEIKAL, S. AL-MASRY, Dehui WANG, Zhengyu HUANG a Zhi FANG. EFFECT OF DELAYING ADDITION TIME OF SMF SUPERPLASTICIZER ON HYDRATION CHARACTERISTICS OF BLENDED CEMENT PASTES. *Construction and Building Materials* [online]. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, PR China: Elsevier, 2012 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/258816575_Effect_of_delaying_addition_time_of_SMF_superplasticizer_on_hydration_characteristics_of_blended_cement_pastes

[37] OHSHIN, Hyun, Doo YEOLYOO, Joo HALEE, Seung HOONLEE a Young SOOYOON. *Optimized mix design for 180 MPa ultra-high-strength concrete* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S223878541930153X#!>

[38] LAWLER, John, NADELMAN Elizabeth, *Advances in Ultra-High-Performance Concrete*, [online přednáška], [cit 2021-02-16], dostupné z https://www.youtube.com/watch?v=kDs_IMyB-YM&t=1424s

[39] *Ultra-High Performance Concrete: A State-Of-The-Art Report for The Bridge Community*. Federal Highway Administration Research and Technology [online]. 2013 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/hpc/13060/003.cfm>

[40] G. DE SCHUTTER a J. DILS. Vacuum mixing technology to improve the mechanical properties of ultra-high performance concrete. *SpringerLink* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1617%2Fs11527-014-0416-2>

[41] G. DE SCHUTTER a J. DILS. Vacuum mixing technology to improve the mechanical properties of ultra-high performance concrete, str. 2. *SpringerLink* [online]. 2014 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/284780662_Vacuum_mixing_technology_to_improve_the_mechanical_properties_of_ultra-high_performance_concrete

[42] PŘÍBRAMSKÝ, Vladimír. VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ SMRŠŤOVÁNÍ A DOTVAROVÁNÍ PATENTOVANÉ SMĚSI UHPC OŠETŘOVANÉ TEPLOTOU [online]. Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika, 2020 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: https://concrete.fsv.cvut.cz/phdworkshop/proceedings/2020/pdf/Pribramsky_Vladimir.pdf

[43] *Slovník pojmů-Autogenní smršťování, EBETON*, [online] [cit. 2021-02-23], dostupné z

<https://www.ebeton.cz/pojmy/autogenni-smrstovani>

[44] Effect of Curing Temperature at an Early Age on the Long-Term Strength Development of UHPC, [online][cit. 2021-02-23], dostupné z <http://www.beton-team.de/img-int/Effect%20of%20Curing%20Temperature%20at%20an%20Early%20Age%20on%20the%20Long-Term%20Strength%20Development%20of%20UHPC.pdf>

[45] VISKOMAT NT - SCHLEIBINGER GERATE. Controls [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/viskomat-nt-rotacni-viskozimetr.html>

[46] Slovník pojmů Ultra vysokohodnotný beton, EBETON, [online] (cit. 2021-02-23), dostupné z <https://www.ebeton.cz/pojmy/ultra-vysokohodnotny-beton-uhpc>

[47] ČSN EN 12350- 6: Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost. Technická normalizační komise: TNK 36 Betonové konstrukce. Praha, 2020.

[48] ČSN 73 1320 ZMĚNA Z1: Stanovení objemových změn betonu. Praha: Český normalizační institut, 2003

[49] TICHÝ, Jan, Jiří KOLÍSKO, Miroslav VOKÁČ, David ČÍTEK, Vladislav TREFIL a Milan KALNÝ. Metodika 1: METODIKAPRO VÝROBU PRVKŮ ZUHPC A PRO KONTROLU JEJICH PROVEDENÍ. Praha, 2015

[50] FEHLINGB, Ekkehard, Yuliarti KUSUMAWARDANINGSIHA a Mohammed ISMAIL. UHPC compressive strength test specimens: Cylinder or cube? [online]. 2015 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.165>

[51] KOLÍSKO, Jiří, Milan RYDVAL, Petr HUNKA a Michaela KOSTELECKÁ. DEVELOPMENT OF UHPC FROM MATERIALS AVAILABLE IN CZECH REPUBLIC [online]. 2013, , str.1 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: http://cesb.cz/cesb13/proceedings/3_materials/CESB13_1414.pdf

[52] SU, Yu, Yun LI, Chenqing WU, Pengtao WU a Zhong-Xian LI. *Effects of steel fibres on dynamic strength of UHPC* [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181630544X>

[53] Dynamic amplification factor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2018 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic_amplification_factor

[54] Wiley Online Library, [online] [cit. 2021-02-24], dostupná z <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9783433604076.ch04>

[55] LI, Junquan, Zemei WU, Caijun SHI, Qiang YUAN a Zuhua ZHANG. Durability of ultra-high performance concrete – A review [online]. 2020 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119296>

[56] ULTRA-VYSOKO HODNOTNÉ BETONY (ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE). KŠ PREFA [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://ksprefa.cz/produkty/uhpc/>

[57] UHPC Defined. UHPC Solutions [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.uhpc-solutions.com/blog/what-is-ultra-high-performing-concrete>

[58] COUFAL, Robert. Ultra-vysokohodnotné betony a jejich uplatnění v architektuře: FASÁDY Z UHPC – BETONOVÉ „ZÁVOJE“ | UHPC FACADES – CONCRETE “VEILS” [online]. ,str. 2 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://doczz.cz/doc/346279/uplatn%C4%9Bn%C3%AD-uhpc---uhpfrc>

[59] TICHÝ, Jan, Jan KOMANEC, Jiří KOLÍSKO, Bohuslav SLÁNSKÝ ML. a Stanislav ŠEVČÍK. UNIKÁTNÍ LÁVKA PRO PĚŠÍ Z UHPC V OBCI ČEPERKA. Stavební konstrukce [online]. 2016 [cit. 2021-

[60] Detail inspiration [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://inspiration.detail.de/technology-museum-in-marseille-diaphanous-and-structural-applications-of-uhpc-107699.html>

[61] VERMEULEN, Brim. Ultra High Performance Concrete in Action: A study on the architectural and structural possibilities of Ultra High Performance Concrete (UHPC), 2013, str.9 [cit. 2021-04-19].

[62] BFT International: Desert rose made of concrete - National Museum of Qatar. BFT International [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: https://www.bft-international.com/en/artikel/bft_Desert_rose_made_of_concrete_-_National_Museum_of_Qatar_3478877.html

[63] Gravelli: Nábytek [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.gravelli.com/cs/kategorie/nabytek/>

[64] Hhbc-consulting: Restoration and conservation of historic buildings and constructions [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.hi-con.com/knowledge/renovating-with-uhpc-part-iii-how>

[65] BRÜHWILER,, Eugen, Malena BASTIEN-MASSE, Hartmut MÜHLBERG, et al. *Part I: Glued connectio* [online]. In: . s. 1 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.hi-con.com/knowledge/renovating-with-uhpc>

[66] *Hicon: Renovating with UHPC part III - How to use walls and struts and why...* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.hi-con.com/knowledge/renovating-with-uhpc-part-iii-how-to-use-walls-and-struts-and-why/>

[67] BRÜHWILER, Eugen, Maléna BASTIEN-MASSE, Hartmut MÜHLBERG'S a Marco MAURER. *Strengthening the Chillon viaducts deck slabs with reinforced UHPFRC* [online]. [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/299435401_Strengthening_the_Chillon_viaducts_deck_slabs_with_reinforced_UHPFRC

[68] MARGOLDOVÁ, Jana. *VYSOKOPEVNOSTNÍ BETONY A UHPC | HIGH PERFORMANCE CONCRETE AND UHPC: FASÁDY Z UHPC – BETONOVÉ „ZÁVOJE“ | UHPC FACADES – CONCRETE “VEILS”* [online]. , 2 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.betontks.cz/sites/default/files/2012-7-58.pdf>

[69] *Gehry's Louis Vuitton Foundation Facade* [online]. The Architect's Newspaper, 2011 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.archpaper.com/2011/10/gehrys-louis-vuitton-foundation-facade/>

[70] *The facades of the Fondation Louis Vuitton dressed with Ductal® concrete* [online]. Ductal, 2016 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.ductal.com/en/architecture/facades-fondation-louis-vuitton-dressed-ductalr-concrete>

[71] *The roofing of the Montpellier TGV Station – South of France*. Ductal [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.ductal.com/en/architecture/The-roofing-of-the-Montpellier-TGV-Station-South-of-France>

[72] *Design and Construction of Field-Cast UHPC Connections*. *TECHNOTE* [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/14084/14084.pdf>

[73] *The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete: A review*. *ScienceDirect* [online]. 2020 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820314641>

[74] *Vysokohodnotný beton 1* [online]. , str.45 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/43045430-Vysokohodnotny-beton-1-josef-fladr-kancelar-b788-konzultace-streda-12-00-13-00.html>

[75] *Slovník pojmů – Krvácení betonu*, (online) (cit. 2021-02-13), dostupné z <https://www.ebeton.cz/pojmy/krvaceni-betonu>

[76] *Slovník pojmů – Popílek*, (online) (cit. 2021-02-13), dostupné z <https://www.ebeton.cz/pojmy/popilek>

[77] ABDELRHMAN AIAD, Ismail. *Influence of time addition of superplasticizers on the rheological properties of fresh cement pastes* [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: [doi:10.1016/S0008-8846\(03\)00037-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00037-1)

Zdroje obrázků v teoretické části:

[1] YUJING, Lv, Zhang WENHUA, Wu FAN, Wu PEIPEI, Zeng WEIZHAO a Yang FENGHAO. Static mechanical properties and mechanism of C200 ultra-high performance concrete (UHPC) containing coarse aggregates [online]. 2020, 2020 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1515/secm-2020-0018>

[2] COUFAL, Robert. Ultra--vysokohodnotné betony a jejich uplatnění v architektuře. TBG Metrostav [online]. 2016, str.4 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: https://www.betonuniversity.cz/uploads/sources/prezentace/40cdd35830895bc39c6538c2258e1efd64ab25d2_uploaded_2016-03-bu-design-uhpc-kompr.pdf

[3] PAVLÍKOVÁ, Milena, PAVLÍK Zbyšek a Jiří HOŠEK. Materiálové inženýrství I. 2., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04932-7. str. 173

[4] PAVLÍKOVÁ, Milena, PAVLÍK Zbyšek a Jiří HOŠEK. Materiálové inženýrství I. 2., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04932-7. str. 172

[5] *Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra high performance concrete* [online]. [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.07.130

[6] Labe 872,7 km – Lávka Čelákovice. *Turistika.cz* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.turistika.cz/mista/labe-872-7-km-lavka-celakovice/detail>

[7] Provence-Alpes-Côte d'Azur. *Turistika.cz* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.turistika.cz/cestopisy/francie-provence-marseille/detail>

Seznam literatury a webových stránek -praktická část:

[1] ČSN EN 1991-1-4 73 0035. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1- 4: Obecná zatížení – Zatížení větrem*. Český normalizační institut, 2007, str. 35-40

[2] Jandera Michal 4. Ocelová hala, pomůcka ke cvičení předmětu Ocelové konstrukce 1

[3] EN 1991-1-1 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí –Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*, Český normalizační institut, 2004, str.25

[4] ČSN EN 1990, str.37, ČSN EN 1990 73 0002. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Český normalizační institut, 2004. str. 37 - 41

- [5] OHSHINA, Hyun, Doo YEOLYOO, Joo HALEEC, Seung HOONLEED a Young SOOYOONE. Optimized mix design for 180 MPa ultra-high-strength concrete [online]. [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S223878541930153X>
- [6] Pomůcka ke cvičení z předmětu BK02 – Předpjatý vazník
- [7] ČSN EN 1992-1-1 ED. 2 73 1201. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Technická normalizační komise: TNK 36 Navrhování betonových konstrukcí, 2019. str.29
- [8] TICHÝ, Jan, Jiří KOLÍSKO, Miroslav VOKÁČ, David ČÍTEK, Vladislav TREFIL a Milan KALNÝ. *Metodika 1: METODIKAPRO VÝROBU PRVKŮ ZUHPC A PRO KONTROLU JEJICH PROVEDENÍ*. Praha, 2015
- [9] Ductal® Ultra High Performance Concrete. *FINE Concrete* [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <http://www.fineconcrete.com/uhpc-1>
- [10] VÝPOČET DOTVAROVÁNÍ A SMRŠŤOVÁNÍ DLE ČSN EN 1992-1-1. *Beton KS* [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: https://www.betontks.cz/sites/default/files/2006-2-56_0.pdf
- [11] *Opláštění haly OTR Staré Město* [online]. 2014 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.unihal.cz/oplasteni-haly-otr-stare-mesto>
- [12] VŠB. *Stálá a užitná zatížení* [online]. [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: [http://fast10.vsb.cz/zatizeni/B\)%20TEORIE/Stale%20+%20Uzitie.pdf](http://fast10.vsb.cz/zatizeni/B)%20TEORIE/Stale%20+%20Uzitie.pdf)
- [13] WALD, František a Zdeněk SOKOL. *Ocelové konstrukce: Tabulky*. České vysoké učení technické, 2019. ISBN 978-80-01-06032-2.
- [14] Klasifikace zatížení, FSV ČVUT, [online].[cit-04-28-2021]., dostupné z <http://web.cvut.cz/ki/710/pdf/zatizeni.pdf>
- [15] Třídy a mechanické vlastnosti betonu, FSV ČVUT http://ecentrum.fsv.cvut.cz/download/obecne/tridy_betonu.pdf
- [16] Požární spolehlivost betonových a zděných konstrukcí, ČVUT v Praze, Fakulta stavební katedra betonových a zděných konstrukcí http://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/vyuka/133PSBZ/133PSBZ_Prednaska_B9.pdf
- [17] Vzorový příklad předběžného návrhu konstrukce z předpjatého betonu, dostupné z https://concrete.fsv.cvut.cz/projekty/pdf/4_3_Vzorovy_priklad_predbezneho_navru_konstrukce_z_predpjateho_betonu.pdf
- [18] FEHLING, E., M. SCHMIDT a S. STÜRWARD. *Ultra High Performance Concrete (UHPC): Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete March 05-07, 2008*. 2008, dostupné z: https://books.google.cz/books?id=OMsdSJ-LUBQC&pg=PA181&lpg=PA181&dq=UHPC+deformation+%CE%B5cu&source=bl&ots=kiVXqb78mL&sig=ACfU3U2R2UgQbf0TrOGg_uF5KPMXhXSkqA&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwi4583m7drvAhUH66QKHd6ZBNYQ6AEwBnoECAIQAw#v=onepage&q&f=false, str. 181

[19] Zatížení stavebních konstrukcí, VŠB, [online],[cit. 05-04-2021],
dostupné z: [http://fast10.vsb.cz/zatizeni/B\)%20TEORIE/Uvod.pdf](http://fast10.vsb.cz/zatizeni/B)%20TEORIE/Uvod.pdf)

Zdroje obrázků v praktické části:

[1] KOVOVÉ PROFILY. TR 35/207 [online]. 2013 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z:
<http://www.kovprof.cz/sortiment/statikaTR/TR035-207-poz-EN-2013.pdf>

[2] VÁCHA, Jaroslav. TENKOSTĚNNÉ PROFILY „Z“, „C“ a „Σ“ pro vaznice a paždíky. *Kovové profily* [online]. 2013 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: http://kovprof.cz/wp-content/uploads/2013/04/VaznicePazdiky_profilyZCS_prirucka.pdf, str. 5; str. 14

Seznam příloh

Příloha č.1.....Modelování zatížení a vnitřních sil
Příloha č.2.....Výkresová dokumentace

Software

AutoCad

SCIA Engineer

MS Excel

MS Word