



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Katedra betonových a zděných konstrukcí

Využití UHPC v konstrukcích pozemních staveb

UHPC Application in Buildings Structure

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb
Vedoucí práce: Ing. Martin Tipka, Ph.D.

Bc. Jan Kostka

Praha 2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kostka Jméno: Jan Osobní číslo: 458698
Zadávající katedra: K133 - Katedra betonových a zděných konstrukcí
Studijní program: (N3607) Stavební inženýrství
Studijní obor: (3608T008) Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Využití UHPC v konstrukcích pozemních staveb

Název diplomové práce anglicky: UHPC Application in Buildings Structure

Pokyny pro vypracování:

Souhrn poznatků z kritickým komentářem:

- současný stav využívání UHPC
- současné a budoucí návrhové normy a metodiky
- rozdíly v navrhování konstrukcí z "běžného" betonu a UHPC
- prvky a konstrukce pozemních staveb vhodné pro realizaci z UHPC

Statický návrh vybraných konstrukčních prvků s vyhodnocením volby využití UHPC

Seznam doporučené literatury:

fib Model Code 2010, fib Model Code 2020, ACI 239C – Structural Design of UHPC, NF P18-470 standard, NF P18-710 standard

Aitcin P.-C.: Vysokohodnotný beton. Informační centrum ČKAIT, Praha, 2005.

archiv časopisu Beton TKS

konferenční články se zaměřením na UHPC

další vhodná zejména zahraniční samostatně vyhledaná literatura

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Martin Tipka, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 21.9.2020 Termín odevzdání diplomové práce: 3.1.2021
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. Jan Kostka

Název diplomové práce: Využití UHPC v konstrukcích pozemních staveb

Základní část: Betonové konstrukce podíl: 100 %

Formulace úkolů: _____

Souhrn poznatků z kritickým komentářem:

- současný stav využívání UHPC
- současné a budoucí návrhové normy a metodiky
- rozdíly v navrhování konstrukcí z "běžného" betonu a UHPC
- prvky a konstrukce pozemních staveb vhodné pro realizaci z UHPC

Statický návrh vybraných konstrukčních prvků s vyhodnocením volby využití UHPC

Podpis vedoucího DP: Datum:

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta: Datum:

3. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta: Datum:

4. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta: Datum:

Poznámka:

Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci. (Vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1. stranou zadání již ve 2. týdnu semestru)

Čestné prohlášení:

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

V Praze dne: 03.01. 2021

.....
Bc. Jan Kostka

Poděkování:

Děkuji Ing. Martinu Típkovi, Ph.D., za trpělivost, cenné rady v průběhu studia a odborné vedení při zpracování této diplomové práce.

Dále děkuji mým rodičům za umožnění studia na vysoké škole a podporu v průběhu studia. V neposlední řadě patří poděkování mé přítelkyni, za neustálou podporu během celého období mého studia.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou ultra-vysokohodnotných betonů. Ultra-vysokohodnotné betony se v současnosti používají v omezené míře pro speciální aplikace, zejména v mostních konstrukcích. V České republice je v současnosti UHPC použit na několika lávkách a mostech. Tato práce si klade za cíl prověřit možnosti aplikace UHPC v prvcích a konstrukcích pozemního stavitelství. První část práce se věnuje historii vysokohodnotných betonů, materiálovému složení a základním mechanicko-fyzikální vlastnostem UHPC. Ve druhé části práce je popsán současný stav praktického využívání ultra-vysokohodnotných betonů a příklady konstrukčních prvků s perspektivním využitím v budoucnosti. V další části práce je popsán současný stav návrhových metodik a normativních dokumentů. Podrobněji je popsán francouzský národní dodatek k Eurokódu 2 pro návrh prvků z UHPC. Francouzský národní dodatek je následně použit v konstrukční části pro návrh dvou prefabrikovaných prvků z ultra-vysokohodnotného betonu.

KLÍČOVÁ SLOVA

beton, vysokohodnotný beton, ultra-vysokohodnotný beton, UHPC, UHPFRC, tahová pevnost, tlaková pevnost, reziduální pevnost, duktilita, vlákna

ABSTRACT

The diploma thesis is focused on ultra-high performance concrete. Ultra-high performance concrete is currently used for special applications, especially in bridge structures. In the Czech Republic, the UHPC is currently used in several footbridges and bridges. This aim of this thesis is to verify the possibilities of application UHPC in structural elements for buildings structures. The first part deals with the history of high-performance concrete, material composition and basic mechanical and physical properties of UHPC. The second part describes the current state of practical use of ultra-high performance concrete and examples of structural elements with a potential area of future application. The third part of the thesis describes the current state of design methodologies and normative documents. The French national addition to Eurocode 2 for the design of UHPC elements is described in more detail. The French national addition is also used for structure design of two prefabricated ultra-high performance concrete elements in the last part of this thesis.

KEYWORDS

concrete, high performance concrete, ultra-high performance concrete, UHPC, UHPFRC, tensile strength, compressive strength, residual strength, ductility, fibre reinforcement,

OBSAH

ZNAČKY	10
TERMINOLOGIE	12
1 Úvod	13
2 Ultra-vysokohodnotný beton (UHPC)	14
2.1 Historie vysokohodnotného betonu.....	16
2.2 Složky UHPC.....	18
2.3 Mechanicko-fyzikální vlastnosti UHPC.....	23
2.3.1 Pevnost v tlaku.....	23
2.3.2 Pevnost v tahu	25
2.3.3 Lomová energie	28
2.3.4 Youngův modul pružnosti, Poissonův součinitel	28
2.3.5 Smršťování a dotvarování.....	29
2.3.6 Odolnost proti rázu	32
2.3.7 Trvanlivost	33
2.3.8 Reakce na požár.....	35
2.3.9 Shrnutí	37
2.4 Příklady praktických aplikací.....	38
2.4.1 Realizované konstrukce	38
2.4.2 Perspektivní oblasti využití UHPC.....	50
3 Navrhování prvků z UHPC.....	60
3.1 Normy a metodiky	60
3.2 Navrhování dle Metodiky Kloknerova ústavu.....	62
3.3 Navrhování dle NF P18-710.....	65
3.4 Příklad návrhu prvku dle NF P18-710	70
3.4.1 Návrh s využitím tahové pevnosti UHPC, bez betonářské výztuže.....	72
3.4.2 Návrh s využitím betonářské výztuže.....	74
3.5 Kontrolní zkoušky při výrobě prvků z UHPC	78

4	Konstrukční návrh vybraných prvků z UHPC	81
4.1	Klenutý prefabrikovaný prvek zastřešení	81
4.1.1	Návrh a posouzení.....	85
4.1.2	Experimentální ověření prvku.....	104
4.1.3	Zhodnocení.....	105
4.2	Úhlová opěrná stěna	106
4.2.1	Návrh a posouzení opěrné stěny.....	107
4.2.2	Experimentální ověření prvku.....	121
4.2.3	Zhodnocení.....	122
5	Závěr	123
	LITERATURA	124
	SOFTWARE	128
PŘÍLOHA A	Konstrukční zásady dle NF P18-710	
PŘÍLOHA B	Opěrná stěna – stanovení zatížení a posouzení MSÚ GEO	
PŘÍLOHA C	Výkres tvaru klenutý prefabrikovaný prvek zastřešení	
PŘÍLOHA D	Výkres výztuže klenutý prefabrikovaný prvek zastřešení	

Značky

HPC	vysokohodnotný beton
UHPC	ultra-vysokohodnotný beton
UHPFRC	ultra-vysokohodnotný beton vyztužený vlákny
SCC	samozhutnitelný beton (Self Compacting Concrete)
FRC	vláknobeton (Fibre Reinforced Concrete)
w / c	vodní součinitel – jako poměr vody a cementu
w / b	vodní součinitel – jako poměr vody a pojiva (cementu a příměsí)
f_{ck}	charakteristická pevnost betonu v tlaku [Pa]
f_{cm}	střední hodnota pevnosti betonu v tlaku [Pa]
f_{ctk}	charakteristická pevnost betonu v tahu [Pa]
f_{ctm}	střední hodnota pevnosti betonu v tahu po vzniku makrotrhliny, tato pevnost nezahrnuje vliv orientace vláken (K faktor) [Pa]
$f_{ctk,el}$	charakteristická hodnota tahové pevnosti v pružné oblasti pracovního diagramu (před vznikem makrotrhliny) [Pa]
$f_{ctm,el}$	střední hodnota tahové pevnosti v pružné oblasti pracovního diagramu (před vznikem makrotrhliny) [Pa]
f_{ctfk}	charakteristická hodnota pevnosti betonu v tlaku po vzniku makrotrhliny, tato pevnost nezahrnuje vliv orientace vláken (K faktor) [Pa]
f_{ctfm}	střední hodnota pevnosti betonu v tlaku po vzniku makrotrhliny, tato pevnost nezahrnuje vliv orientace vláken (K faktor) [Pa]
f_{R1k}	charakteristická reziduální pevnost betonu význačná pro mezní stav použitelnosti, dle Metodiky 2 [Pa]
f_{R3k}	charakteristická reziduální pevnost betonu význačná pro mezní stav únosnosti, dle metodiky 2 [Pa]
E_{cm}	sečný modul pružnosti dle značení ČSN EN 1992 [Pa]
E_{ci}	sečný modul pružnosti dle značení Model Code 2010 [Pa]

K_{local}	faktor orientace vláken rozptýlené výztuže pro analýzu lokální oblasti prvku [-]
K_{global}	faktor orientace vláken rozptýlené výztuže pro globální analýzu prvku [-]
ϵ_{c0d}	mezní přetvoření betonu v tlaku v uvažované pružné oblasti návrhového diagramu betonu v tlaku [-]
ϵ_{cud}	limitní přetvoření betonu v tlaku [-]
$\epsilon_{u,el}$	mezní přetvoření betonu v tahu v pružné oblasti pracovního diagramu (před vznikem makrotrhliny) [-]
$\epsilon_{u,lim}$	limitní přetvoření betonu v tahu, po překročení nastává kolaps prvku [-]
ϵ_{pic}	ekvivalentní přetvoření při MSÚ odpovídající maximálnímu napětí po vzniku makrotrhliny a šířce trhliny $w=0,3$ mm v případě, že ze záznamu zkoušky není jednoznačně zřejmý vrchol napětí [-]
$\epsilon_{1\%}$	ekvivalentní přetvoření odpovídající šířce trhliny $0,01H$ (H je výška vzorku) spojený s rozměry navrhovaného prvku [-]
w	šířka trhliny [m]
w_{pic}	mezní limitní přetvoření betonu v tahu odpovídající
$w_{1\%}$	mezní limitní přetvoření betonu v tahu odpovídající
L_f	délka nejdelšího vlákna použitého ve směsi UHPC, které má vliv na zajištění zbytkové reziduální pevnosti materiálu [m]
L_c	charakteristická délka, která závisí na šířce trhliny ve vztahu k ekvivalentní deformaci zkoušeného vzorku [m]
δ	faktor vyjadřující redukci kotevní délky betonářské výztuže z důvodu přítomnosti rozptýlené výztuže [-]
D_{sup}	maximální frakce použitého kameniva v čerstvé směsi [m]
d	účinná výška betonářské výztuže v průřezu [m]
Z_{cc}	rameno vnitřní tlakové síly v betonu k neutrální ose průřezu [m]
Z_{ct}	rameno vnitřní tahové síly v betonu k neutrální ose průřezu [m]
Z_t	rameno vnitřní síly v betonářské výztuži k neutrální ose průřezu [m]
x	výška tlačené oblasti průřezu [m]

Terminologie

Pro účely této práce je používána **zkratka UHPC** pro nevyztužený i pro vlákny vyztužený ultra-vysokohodnotný beton. Ultra-vysokohodnotný beton obsahuje vlákna prakticky vždy a používání obou zkratek by tak mohlo být matoucí. Důvod pro existenci obou označení spočívá jen v rozdílné terminologii jednotlivých autorů. Například francouzský národní dodatek k Eurokódu NF P18-710 [2] používá označení UHPFRC. Česká metodika pro navrhování prvků z UHPC [5], publikovaná Kloknerovým ústavem používá označení UHPC a definuje jej krom jiného, jako beton vyztužený vlákny v dostatečném množství. V současnosti vznikající *fib* Model Code 2020 bude pravděpodobně také používat označení UHPC.

V práci je popisován vliv vodního součinitele na vlastnosti UHPC. **Vodní součinitel** je standardně popisován jako poměr vody a cementu. UHPC obsahují kromě cementu i velké množství latentně hydraulických příměsí, např. křemičitý úlet. Latentně hydraulické příměsi vstupují do procesu hydratace a jednoduchá definice vodního součinitele jako poměru vody a cementu již není zcela vhodná. Z tohoto důvodu je v práci uváděn vodní součinitel správnější zkratkou **w/b** z anglického water/binder (pojivo). Zároveň je v textu uváděna i zkratka **w/c**, protože latentně hydraulické příměsi se většinou podílejí až na tzv. sekundární hydrataci a v prvních okamžicích hydratace jsou veškeré vytvořené chemické vazby výsledkem pouze reakce vody a cementu.

1 Úvod

Beton je v současnosti celosvětově nejpoužívanějším stavebním materiálem. Ročně se na celém světě vyrobí přibližně 25 bilionů tun betonu. Za poslední století prošel beton výrazným vývojem v oblasti technologie výroby. Od počátku využívání betonu jako konstrukčního materiálu byla snaha o vývoj betonu a zlepšování jeho vlastností. S rozvojem stavební chemie v 70. letech 20. století, zejména v oblasti superplastifikátorů, bylo umožněno začít vyrábět beton s pevnostmi v tlaku přes 60 MPa. Hodnota pevnosti 60 MPa je technologicky odůvodnitelná a betony s pevností nad touto hranicí se začali nazývat vysokohodnotné.

Dalším vývojovým krokem vysokohodnotného betonu (HPC) jsou ultra-vysokohodnotné betony (UHPC). Jedná se o cementové kompozity vyznačující se vysokým obsahem cementu, malou frakcí kameniva (zpravidla jednotky milimetrů), extrémně nízkým vodním součinitelem, nízkoporézní cementovou maticí a všesměrně rozmístěnou vláknitou výztuží (nejčastěji ocelová vlákna).

Hranice mezi označeními HPC a UHPC není přesně určena. Některé publikace a normy udávají pomyslnou hranici kolem pevnosti 150 MPa, jiné připouštějí i nižší pevnosti UHPC s důrazem na kvalitu a trvanlivost. UHPC v této práci je uvažován jako beton s tlakovou pevností nad 150 MPa jemnozrnné struktury (do průměru kameniva 4 mm), velkým obsahem cementu, extrémně nízkým vodním součinitelem, masivním použitím superplastifikátorů a s všesměrně rozptýlenou vláknitou výztuží v dostatečném množství.

Vysokohodnotné betony jsou často označovány jako vysokopevnostní. Je pravdou, že vysokohodnotné betony mají výrazně vyšší pevnosti než betony v současnosti běžně používané, ale bylo by chybou zmiňovat pouze zlepšení této vlastnosti. Vysokohodnotné betony přináší mimo zvýšení pevnosti i zlepšení v oblasti vyšší odolnosti vůči vlivům prostředí, vyšší tahovou pevnost, vyšší duktilitu, vyšší modul pružnosti a další. Všechny tyto vlastnosti přinášejí v konečném důsledku snížení množství použitého materiálu (lepší poměr hmotnosti/pevnosti), zvýšení odolnosti konstrukcí vůči mimořádným zatížením a delší životnost oproti běžnému betonu (zejména v agresivním prostředí). Tyto faktory snižují ekologickou zátěž stavby na životní prostředí v průběhu výstavby i během celého životního cyklu konstrukce.

Vysokohodnotné a ultra-vysokohodnotné betony se v současnosti používají v omezené míře pro speciální aplikace, zejména v mostních konstrukcích. V České republice je v současnosti UHPC použit na několika lávkách a mostech. Tato práce si klade za cíl prověřit možnosti aplikace UHPC v konstrukcích pozemního stavitelství.

2 Ultra-vysokohodnotný beton (UHPC)

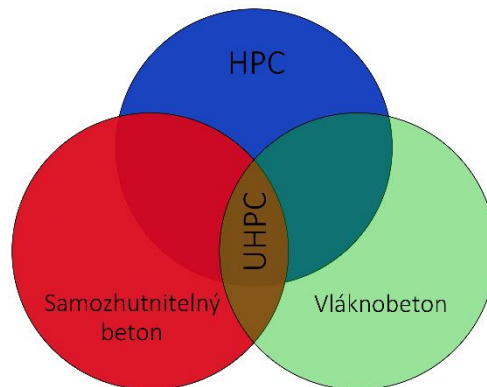
Názvem Ultra-vysokohodnotný beton (Ultra-High Performance Concrete) je všeobecně označován kompozitní materiál na bázi portlandského cementu s extrémně nízkou porozitou a vysokými užitnými vlastnostmi. UHPC se vyznačuje vysokým obsahem portlandského cementu, extrémně nízkým vodním součinitelem, masivním použitím superplastifikátorů, jemnozrnným kamenivem, mikroplnivem (příměsí) a všesměrně rozmístěnou vláknitou výztuží. Výsledkem je moderní materiál s velmi vysokou pevností v tlaku (běžně nad 200 MPa), tahovou pevností (vyšší než 10 MPa), vysokým modulem pružnosti, vysokou odolností proti obrusu, vysokou tekutostí, nízkou permeabilitou a vysokou trvanlivostí.

Základní myšlenka vysoké tlakové pevnosti betonu je založena na nízké porozitě cementové matrice. Vztah mezi pórovitostí a tlakovou pevností definoval T.C. Powers v roce 1958 [24] a je považován za základní poznatek umožňující vývoj betonů vysokých pevností. Pórovitost cementové matrice je zásadně ovlivněna množstvím vody v betonové směsi. Snahou výrobců betonu je tedy dosáhnout co nejnižšího vodního součinitele. Hodnota vodního součinitele se u dnes běžně vyráběných betonů pohybuje kolem hodnoty 0,4. Je velmi obtížné vyrobit beton s vodním součinitel pod touto hodnotou bez využití superplastifikátorů. A právě rozvoj v oblasti superplastifikátorů umožnil vývoj vysokohodnotných a později ultra-vysokohodnotných betonů. Za pomoci moderních superplastifikátorů lze vyrobit UHPC s hodnotou vodního součinitel pod 0,2.

Samotné použití superplastifikátorů ovšem nezaručí dosažení požadovaných vlastností. Při míchání a hutnění betonu vznikají největší vzduchové póry na rozhraní ztvrdlé cementové pasty a kameniva. Tato oblast nazývaná tranzitní zónou je široká 0,05 – 0,1 mm. Během tvrdnutí cementová pasta smršťuje a způsobuje tahová napětí v tranzitní zóně. V důsledku těchto napětí vznikají drobné mikrotrhlínky ve struktuře betonu. Pro omezení tohoto jevu se do betonu přidávají mikroplniva (příměsí). Mezi typické mikroplnivo patří křemičitý úlet. Zrna křemičitého úletu jsou přibližně 100x menší než zrna cementu. Při použití mikroplniva v kombinaci se správně zvoleným kamenivem a pečlivě optimalizovanou křivkou zrnitosti, dochází ke zmenšení velikost tranzitní zóny, zlepšuje se zpracovatelnost směsi a je možné další snížení vodního součinitele [21]. Pro další omezení vzduchových pórů během ukládání směsi do bednění, jsou UHPC navrhovány jako samozhutnitelné (SCC).

Takto vytvořený cementový kompozit dosahuje extrémních pevností a vnitřní strukturou se podobá spíše keramickým materiálům než běžnému betonu. S rostoucí pevností se ovšem cementová matrice stává křehkou. Pro odstranění této nežádoucí vlastnosti a zajištění duktilního chování UHPC, je do směsi přidávána rozptýlená výztuž.

Největším přínosem UHPC jsou bezesporu jeho vynikající mechanicko-fyzikální vlastnosti. UHPC v sobě s jistou nadsázkou propojuje vlastnosti vysokohodnotného betonu, vláknobetonů a samozhutnitelného betonu. Mechanicko-fyzikální vlastnosti UHPC jsou blíže popsány v kapitole 2.3.



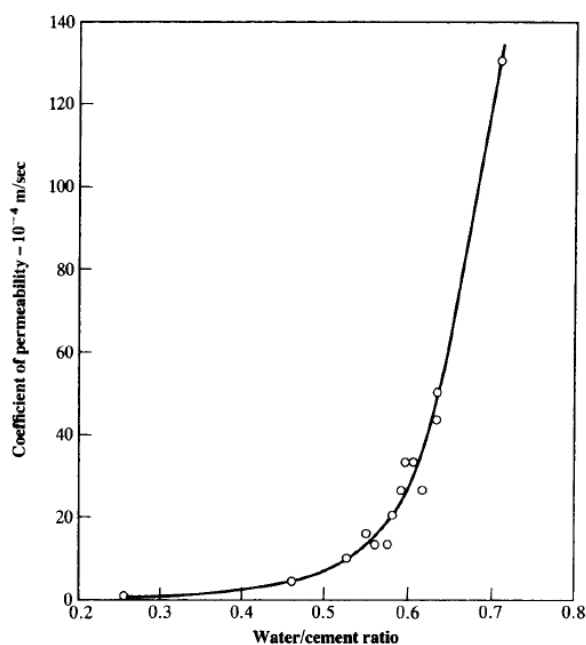
Obr. 1 Schéma UHPC v porovnaní s ostatnými typy betonů, vlastní zdroj

Na prínos UHPC lze nahlížet i z hlediska environmentálního. V současné době je jedno z důležitých témat i udržitelný rozvoj stavebnictví s ohledem na produkci emisí při výrobě stavebních materiálů. V případě betonu se jedná zejména o výrobu cementu. Výroba cementu je energeticky velmi náročná. Udává se, že emise CO₂ z výroby cementu dosahují ročně přibližně 7% celosvětové produkce oxidu uhličitého a v budoucnu se předpokládá další masivní zvyšování jeho celosvětové produkce [48]. Jednou z možností snížení těchto emisí je nahradit část cementu v betonu jinými hydraulickými pojivy (struska, zeolity, atd). Toto řešení je v současnosti předmětem mnoha výzkumů a je zde snaha o náhradu nejen části pojiva, ale i plniva a za pomoci stavební chemie dosahovat obdobných mechanicko-fyzikálních vlastností, jako v případě standardně vyráběného betonu. Pro většinu běžných konstrukcí výplňových, nebo např. podkladních betonů je toto řešení dostačující. Druhým způsobem je optimalizace geometrie betonových prvků, tak aby při použití výrazně menšího množství vysoce kvalitního betonu (HPC / UHPC) bylo dosaženo stejné, nebo vyšší únosnosti a trvanlivosti konstrukce. Tento způsob klade vysoké nároky na návrh konstrukce / prvku, technologii výroby betonu a vysokou technologickou kázeň při provádění.

Výraznějšímu rozšíření UHPC v běžné stavební praxi prozatím brání negativa tohoto materiálu. Nejzásadnějším negativem je vysoká technologická náročnost. Prakticky pro každou novou aplikaci UHPC je třeba vyvinout novou směs. Cenu UHPC tak netvoří jen cena surovin, doprava a marže výrobce, ale i náklady na náročný vývoj. Zatímco cena běžného betonu se pohybuje kolem 2000–4000 Kč/m³, cena UHPC může dosahovat 30 000 – 90 000 Kč/m³. Dá se však předpokládat, že s rostoucím množstvím praktických aplikací bude cena klesat. Již nyní přední výrobci betonu nabízejí odzkoušené receptury UHPC, podobně jako u běžných betonů. Z Evropských výrobců lze zmínit např. francouzskou společnost Ductal s UHPC se stejným názvem, nebo českou společnost TBG Metrostav s UHPC s obchodním názvem TOPCRETE.

2.1 Historie vysokohodnotného betonu

V roce 1955 publikoval T.C. Powers práci [20] zaměřenou na vliv vodního součinitele na permeabilitu (propustnost) ztvrdlé cementové pasty (matrice). T.C. Powers jako jeden z prvních dokázal, že permeabilita cementové pasty výrazně klesá se snižováním vodního součinitele (obr. 2). Permeabilita cementové pasty, vyjádřená koeficientem propustnosti K [m/sec], udává, jak je matrice porézní, resp. kompaktní. Pórovitost cementové matrice je v přímé vazbě na výslednou tlakovou pevnost betonu. Snižíme-li tedy množství vzduchových pórů v ztvrdlé cementové pastě na minimum, dosáhneme velmi vysoké pevnosti betonu v tlaku. Vztah mezi pórovitostí a tlakovou pevností definoval T.C. Powers v roce 1958 [24] a je považován za základní poznatek umožňující vývoj betonů vysokých pevností. Na jeho práci navázalo mnoho dalších výzkumníků (např.: Balhin, Schiller, Hasselman), kteří detailněji zkoumali vztah mezi pórovitostí a pevností cementové pasty.



Obr. 2 Závislost permeability ztvrdlé cementové pasty na vodním součiniteli w/c dle T.C. Powers [20]

Další výzkum se zaměřoval především na praktický způsob dosažení takto nízkých vodních součinitelů. Snižování vodního součinitele s použitím plastifikátorů na bázi lignosulfátů funguje spolehlivě do přibližné hodnoty $w/c = 0,35$. Této hodnotě přibližně odpovídá beton pevnosti 60 MPa. Pro další zvyšování pevnosti betonů napomohl až rozvoj účinnějších plastifikátorů a superplastifikátorů. [18]

Mezi výrobou cementové pasty v laboratorních podmínkách a betonem průmyslově vyráběným v betonárnách je ale podstatný rozdíl. Porozita cementové pasty \neq porozita betonu. Nejvíce vzduchových pórů se do směsi

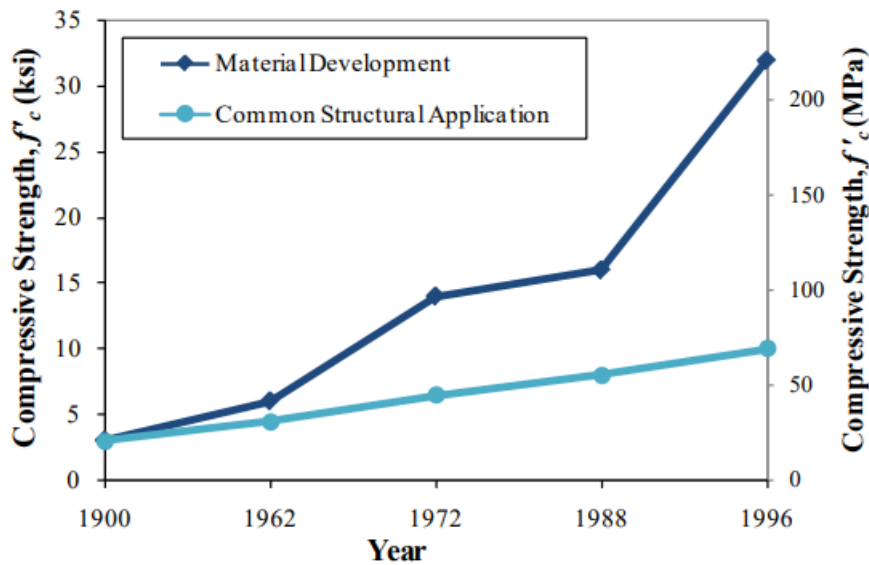
dostane během jejího míchání a zhutňování. Tyto negativní vlivy lze minimalizovat vhodně zvoleným typem kameniva, pečlivě optimalizovanou křivkou zrnitosti a správně provedeným technologickým postupem betonáže.

V roce 1981 vyrobil H. H. Bache beton o pevnosti v tlaku 280 MPa [21]. Vodní součinitel tohoto betonu dosahoval úctyhodného poměru $w/b = 0,16$. Tato hodnota šokovala betonářskou obec a Bache tak odstartoval éru vysokohodnotných a ultra-vysokohodnotných betonů. Takto nízkého vodního součinitele dosáhl díky použití speciálního mikrocementu s příměsí křemičitého úletu a vysokým dávkám plastifikátorů. V roce 1989 vyústil tento výzkum v praktickou aplikaci betonu s názvem **DSP beton** („Densified System with Small Particles“) o pevnosti 150 – 200 MPa. Pevnosti bylo

dosaženo za pomoci superplastifikátorů, mikrosiliky (křemičitý úlet) a použitím velmi pevného kameniva (žula a diabas) o velikosti zrn do frakce 4 mm. [21]

V roce 1994 dokázal P. Richard vyrobit beton o pevnosti v tlaku 800 MPa [21]. Beton dostal název **RPC beton** („Reactive Powder Concrete“). P. Richard použil plnivo s extrémně optimalizovanou křivkou zrnitosti. Čerstvá betonová směs byla tepelně ošetřována a zároveň tuhla pod tlakem. Byla také přidána ocelová vlákna, která zlepšila houževnatost výsledného betonového prvku. RPC beton byl použit při stavbě chladicí věže atomové elektrárny Cattenom (Francie) v roce 1995 [21], [22].

Od doby T.C. Powerse existovalo mnoho dalších vědců a stavebních inženýrů, kteří se zabývali zlepšováním nikoli jen tlakové pevnosti, ale i ostatních vlastností betonu. Výčet všech osobností a jejich inovací v oblasti vysokohodnotných betonů by vydal na několik knižních publikací. Tento stručný popis historie vysokohodnotného betonu se snaží zprostředkovat čtenáři náhled do této problematiky a velmi zjednodušeně objasnit vývoj některých principů výroby těchto betonů.



Obr. 3 Graf vývoje pevnosti betonu v tlaku v oblasti vývoje a běžného využití v praxi [29]

2.2 Složky UHPC

UHPC se stejně jako běžné betony skládá z pojiva, plniva, vody, příměsí a přísad. Dosažení velmi vysokých pevností vychází ze základního předpokladu extrémního snížení vodního součinitele, vhodné volbě plniva a masivního použití superplastifikátorů. Tato kapitola se věnuje odlišnostem mezi složkami běžného betonu a složkami pro výrobu UHPC.

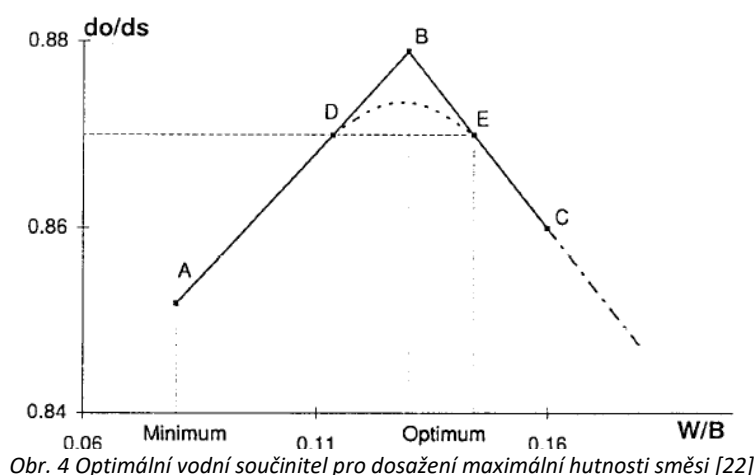
Cement

Cement pro výrobu UHPC je shodný se standartně používanými cementy. Preferují se portlandské cementy třídy 52,5 s vysokou jemností mletí. Výrazně se však doporučuje využívat cementy s nízkým obsahem C_3S a C_3A . Tedy cementy se sníženým vývojem hydratačního tepla pro omezení hydratačního tepla a smrštění [21].

Voda a vodní součinitel

Pro běžné betony se udává minimální dosažitelná hodnota vodního součinitele $w/b = 0,35 - 0,4$. Tato hodnota přibližně odpovídá množství vody, která je potřebná pro samotnou hydrataci všech cementových zrn v záměsi, a zároveň umožňuje přijatelnou zpracovatelnost čerstvé směsi. Pro přípravu UHPC je nutné jít s vodním součinitelem mnohem níže pod tuto hodnotu (dnes běžně $w/b < 0,2$). Již při použití vodního součinitele $w/b < 0,3$ (přibližně) všechna zrna ve směsi nezhydratují. Jemná zrna zhydratují, vnitřní část hrubších zrn a zrna cementu bohatá na C_2S tvoří funkci jemného fileru.

Teoretickou minimální hodnotou vodního součinitele je hodnota $w/b = 0,08$ [22]. Tato hodnota by měla ještě umožnit zpracování čerstvé cementové pasty. Použití takto nízkého vodního součinitele je ovšem kontraproduktivní. Účelem snižování vodního součinitele je vytvoření co nejvíce hutné ztvrdlé cementové pasty. Optimální hodnota minimálního vodního součinitele pro UHPC byla stanovena na hodnotě $w/b = 0,14$ (Richard a Cheyrezy 1995) [22]. Optimální vodní součinitel byl stanoven na základě měření výsledné hutnosti $(d_o/d_s)^1$ ztvrdlé cementové pasty. Bod A na obr.4



Obr. 4 Optimální vodní součinitel pro dosažení maximální hutnosti směsi [22]

znázorňuje minimální vodní součinitel (0,08). Když se vodní součinitel malinko zvýší, nadbytečná voda nahradí vzduchové bublinky ve směsi a současně objem směsi zůstane stejný. Vznikne tak cementová pasta s hutnější strukturou. Bod „B“ značí, že ve směsi nezůstali žádné vzduchové bublinky a je tak maximálně

¹ d_o/d_s – relativní hustota, d_o označuje hustotu betonu uloženého do bednění, d_s značí hustotu pevných složek směsi (kamenivo, cement) bez vody a vzduchu

hutná. Při dalším zvýšení vodního součinitele se zvýší i objem směsi a výsledná hutnost tak klesne (bod C). Bodu B odpovídá teoretické optimální minimum. Praktické optimální minimum se nachází na úsečce BE, kdy bodu E odpovídá $w/b = 0,14$. Stejně hutnosti jako v bodě E lze dosáhnout i v bodě D. Z důvodu reologických vlastností směsi je ale vhodnější využívat směs s vyšším vodním součinitelem. Vodní součinitel v průmyslově vyráběném UHPC je pak ještě vyšší z důvodu zachování reologických vlastností, ale výrobci se snaží této optimální hodnotě co nejvíce přiblížit [22].

Vzhledem k pevnosti je potřeba použít velmi nízký vodní součinitel a zároveň musí být beton dobře zpracovatelný. Zlepšení zpracovatelnosti se dosahuje použitím vhodného kameniva, vhodné křivky zrnitosti, superplastifikátorů a jemnozrnných příměsí.

Příměsí

Příměsí jako např. křemičitá moučka plní funkci mikrofileru, zvyšují tedy hutnost cementové matrice a způsobují lepší „ztekucení“ směsi. Jedním z možných vysvětlení příznivého působení křemičité moučky je skutečnost, že během prvních minut míchání vzniká ve směsi méně chemických vazeb mezi zrna cementu a směs je tak možné lépe promíchat [29]. Křemenná moučka patří do tzv. inertních příměsí. To znamená, že se nepodílí na hydrataci. Druhým typem příměsí jsou tzv. latentně hydraulické přísady, které vstupují do hydratace a jsou schopné ji méně, či více ovlivnit [5]. Mezi latentně hydraulické příměsí patří např. popílký, křemičité úlety, či vysokopecní struska. Velmi používané latentně hydraulické příměsí do UHPC jsou křemičité úlety. Křemičitý úlet je tvořen mikročásticemi s perfektně kulovým tvarem. Stejně jako křemičitá moučka plní funkci mikrofileru a díky svému kulovému tvaru zrn výrazně pomáhá ke ztekucení směsi. Křemičitý úlet navíc reaguje s produkty primární hydratace cementu a má pozitivní vliv na konečnou pevnost betonu.

Kamenivo

Kamenivo pro UHPC musí být dostatečně pevné, bez mechanických vad a s vhodným tvarovým součinitelem. Pro výrobu UHPC jsou vybírány jemnozrnné přírodní písky, přírodní štěrky, nebo drcené kamenivo. Drcené kamenivo by mělo obsahovat minimum defektů. Odstřel a drcení kameniva není z tohoto pohledu ideální. Proto v případě použití drceného kameniva záleží na petrografických vlastnostech matečné horniny. Vhodné pro odstřel a drcení jsou např. vápence, žula nebo syenit. Zcela nevhodné jsou zvětralé horniny a horniny snadno odlučné po vrstvách (vytvářejí plochá zrna). Pravidla pro vhodný tvarový index kameniva do UHPC jsou zpravidla odvozena od doporučení pro běžné betony. Platí tedy, že vhodná jsou zrna se sférickým, nebo kubickým tvarem a zcela nevhodná jsou zrna plochá a zrna s ostrými hranami. Je zcela nezbytné optimalizovat křivku zrnitosti kameniva. Běžně ji tvoří tzv. kostra, a ta je doplněna jemnějšími frakcemi kameniva, příměsemi, nezhydratovanými zrny cementu (s vysokým měrným povrchem), nebo jejich kombinace. Správně optimalizovaná křivka zrnitosti kameniva je podmínkou dobré zpracovatelnosti čerstvé betonové směsi.

Vlákna

Použití všesměrně rozmístěných vláken má pozitivní vliv na mechanické parametry (pevnosti v tlaku, tahu, duktilita). Vlákna omezují plastické smršťování a výrazně zlepšují odolnost proti požáru (polypropylenová), odolnost proti obrusu a v neposlední řadě snižují permeabilitu cementové matrice. Nejčastěji používaná jsou vlákna ocelová, ale lze použít prakticky všechny známé druhy vláken (mimo skleněných – vysoká křehkost vláken). Každý typ vláken se vyznačuje specifickými vlastnostmi a ovlivňuje tak nejenom výsledné vlastnosti UHPC, ale i zpracovatelnost čerstvé směsi. Např. polymerová vlákna nejsou příliš vhodná z hlediska nízkého modulu pružnosti, ale mohou být použita pro omezení smršťovacích trhlin v počátečním období tvrdnutí směsi. Plastová (polypropylenová) vlákna jsou používána poměrně často z důvodu vylepšení požární odolnosti UHPC. Ocelová vlákna musí být pro efektivní vliv v betonu zastoupena v dostatečném množství. Optimální množství ocelových vláken se udává okolo 2 % objemu směsi (odpovídá cca 160 kg/m³). Délka vláken je omezena požadavkem na dostatečnou tekutost a zpracovatelnost čerstvé směsi (běžná délka 10–20 mm). Rozptýlená výztuž má negativní vliv na konzistenci betonu [29]. Maximální délka vláken by neměla přesáhnout trojnásobek maximálního průměru kameniva [50].

Často se používá kombinace dvou, nebo více typů rozptýlené výztuže. Typickým příkladem je směs obsahující ocelová vlákna pro zlepšení mechanických vlastností (duktilita a tahová pevnost) a polypropylenová vlákna pro zajištění dostatečné požární odolnosti konstrukce. Přidání polypropylenových vláken do směsi s ocelovými vlákny může vést k redukci pevnosti UHPC v tahu a tlaku. Je třeba nalézt optimální množství ocelových a polypropylenových vláken pro zajištění požární odolnosti s minimálním dopadem na pevnostní charakteristiky materiálu.



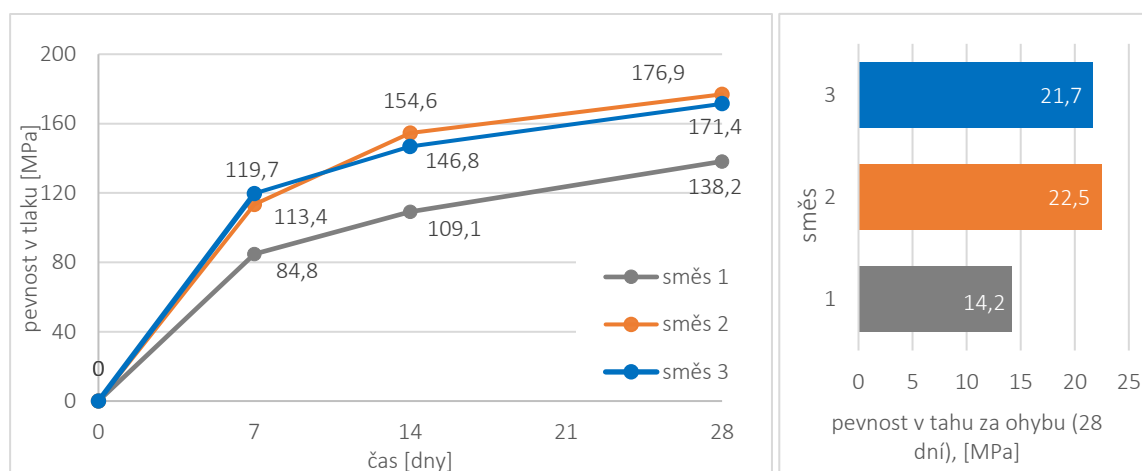
Obr. 5 Polymerová vlákna (PVA) po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu, zdroj: [51]

Ukázka vlivu použití mixu ocelových a polypropylenových vláken v UHPC na tlakovou pevnost a pevnost v tahu za ohybu [37]:

Tab. 1 Složení UHPC zkušebních vzorků, procenta vztahena k dávce cementu, data převzata z [37]

směs	cement	mikrosilika	písek	Super-plastifikátor	Ocelová vlákna	PP vlákna	voda
Směs 1 [%]	1.00	15 %	125 %	3 %	0 %	0 %	24 %
Směs 2 [%]	1.00	15 %	125 %	3 %	16 %	0.75 %	24 %
Směs 3 [%]	1.00	15 %	125 %	3 %	16 %	1.50 %	24 %

směs	cement	mikrosilika	písek	Super-plastifikátor	Ocelová vlákna	PP vlákna	voda
Směs 1 [kg]	874.5	131.2	1093.2	26.2	0.0	0.0	209.9
Směs 2 [kg]	835.9	125.4	1044.9	25.1	133.8	6.3	200.6
Směs 3 [kg]	824.3	123.6	1030.3	24.7	131.9	12.4	197.8



Obr. 6 Tlaková pevnost (vlevo) a pevnost v tahu za ohybu (vpravo) jednotlivých směsí, data převzata z [37]

Z grafu je patrné, že přidáním rozptýlené výztuže došlo k výraznému nárůstu tlakové i tahové pevnosti UHPC. Při použití většího množství polypropylenových vláken ale došlo k mírnému poklesu tlakové (3,1 %) i tahové pevnosti (3,6 %). Při dalším zvýšení množství polypropylenových vláken ve směsi by pravděpodobně obě pevnosti dále klesaly. Cena ocelových vláken je poměrně vysoká a při jejich dávkování kolem 2-3 % mohou tvořit 60–80 % ceny UHPC [50]. V případě požadavku na pohledovou kvalitu jsou navíc ocelová vlákna nahrazována vlákny z nerezové oceli a jejich cena tak dále stoupá. Polypropylenová vlákna jsou oproti ocelovým výrazně levnější a cenu UHPC zvyšují jen minimálně.

Superplastifikátory

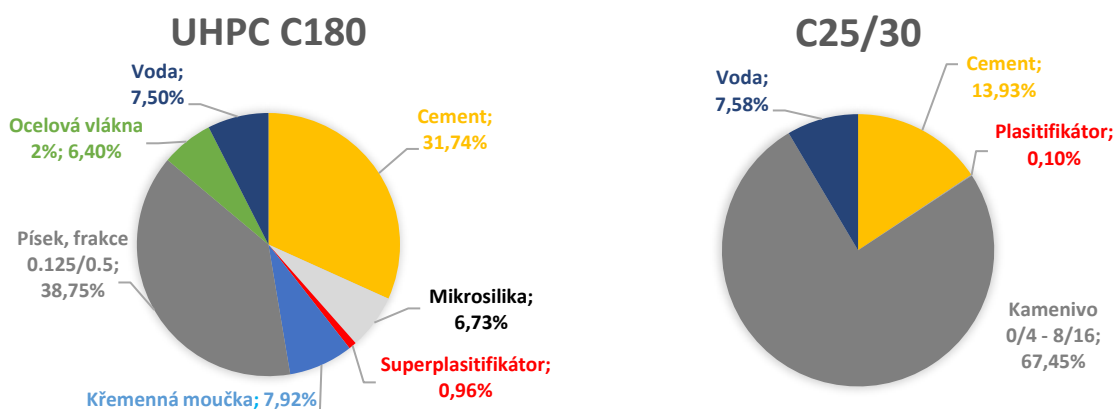
Superplastifikátory jsou chemické látky nejčastěji na bázi polymerů kyseliny karboxylové (polykarboxyláty, akrylové ethery,..). Superplastifikátory fungují na principu elektrostatičkého a sférického odpuzování (pomocí řetězců molekul vody) [21]. Dávkování superplastifikátorů do UHPC se pohybuje kolem 0,5– 1,6 % hmotnosti cementu. Účinnost superplastifikátorů je časově omezená (45–90 minut).

Dávkování jednotlivých složek

Pro základní představu rozdílů v dávkování jednotlivých složek pro UHPC a běžný beton, jsou vybrány dvě reprezentativní betonové směsi. V levé tabulce byla vybrána směs pro výrobu UHPC o válcové 28denní pevnosti v tlaku 180 MPa [26]. V pravé tabulce je základní složení směsi pro výrobu běžného betonu C25/30 dle technologické příručky jednoho z českých výrobců betonu [30].

Tab. 2 Porovnání reprezentativního složení UHPC a běžného betonu; [26], [30]

UHPC C180	kg/m ³	hm. %	C25/30	kg/m ³	hm. %
Cement	795.4	31.74%	Cement	349	13.93%
Mikrosilika	168.6	6.73%	Mikrosilika	0	0.00%
Superplastiřikátor	24.1	0.96%	Plastiřikátor	2.47	0.10%
Křemenná moučka	198.4	7.92%	Křemenná moučka	0	0.00%
Písek, frakce 0.125/0.5	971	38.75%	Kamenivo 0/4 - 8/16	1690	67.45%
Ocelová vlákna 2% obj.	160.25	6.40%	Ocelová vlákna	0	0.00%
Voda	187.98	7.50%	Voda	190	7.58%
Suma:	2506		Suma:	2231	
w/c =	0.236		w/c =	0.544	
w/b =	0.195		w/b =	0.544	



Obr. 7 Grafické znázornění dat z tabulky Tab.2

Za povšimnutí stojí téměř identické množství vody potřebné k přípravě obou betonů. Vzhledem k více jak dvojnásobné dávce cementu v UHPC, je na tomto srovnání patrné, jak důležité jsou pro výrobu ultra-vysokohodnotných betonů superplastiřikátory a vhodné příměsi.

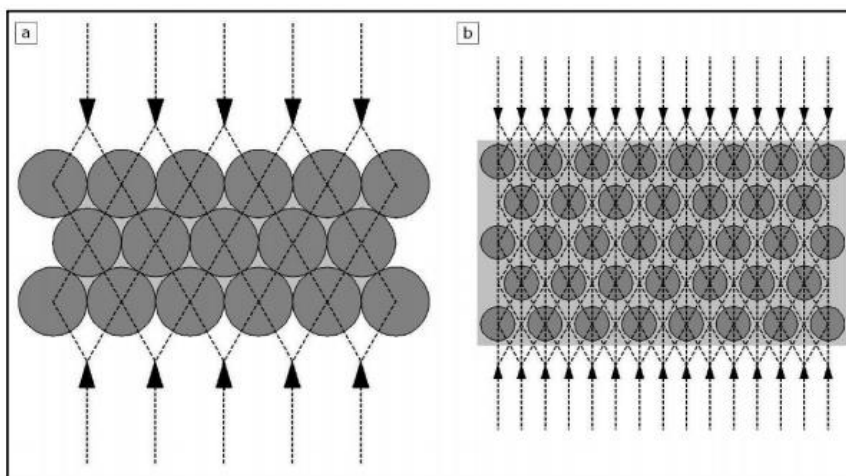
2.3 Mechanicko-fyzikální vlastnosti UHPC

2.3.1 Pevnost v tlaku

U betonů běžných pevností a HPC se na přenosu zatížení podílí zejména hrubé kamenivo. Modul pružnosti kameniva (např. žula 50 GPa) je většinou výrazně vyšší než modul pružnosti cementové matrice (přibližně kolem 10 GPa). Při zatížení betonu běžné pevnosti se jednotlivá zrna kameniva zaklesnou do sebe a přenášejí většinu zatížení. Zjednodušeně lze tedy tvrdit, že u běžných betonů je nositelem pevnosti v tlaku kamenivo a cementová matrice plní hlavně funkci „lepidla“. Vzhledem k nepravidelné struktuře kameniva, začnou při zatížení vzorku tlakovou silou vznikat ve struktuře příčné tahové síly a smykové síly. Tyto síly způsobují rozvoj trhlin zejména v tranzitní zóně, tedy v oblasti na styku kameniva a ztvrdlé cementové pasty. Udává se, že tyto trhliny dosahují přibližné délky odpovídající průměru nejvyšší frakce kameniva použité v betonu. Hrubé kamenivo také brání smršťování cementové pasty. Hydratující cementová pasta se snaží smršťovat, ale tím že jí je v tom bráněno kamenivem, vznikají v tranzitní zóně počáteční tahová napětí a zvyšuje se pórovitost betonu [29].

Na rozdíl od běžných betonů, využívá UHPC pouze jemnozrnného kameniva o průměru jednotek milimetrů. Zrna kameniva se ve směsi vzájemně nedotýkají. Vnesená tlaková síla je přenášena rovnoměrněji a na přenosu zatížení se výrazněji podílí i nízkoporézní cementová matrice (vliv permeability cementové matice je blíže popsán v úvodu kapitoly 2). Kamenivo zároveň nebrání smršťování cementové pasty. Toto řešení snižuje tahová napětí vznikající v tranzitní zóně. (Richard and Cheyrezy 1995 [22]) [29].

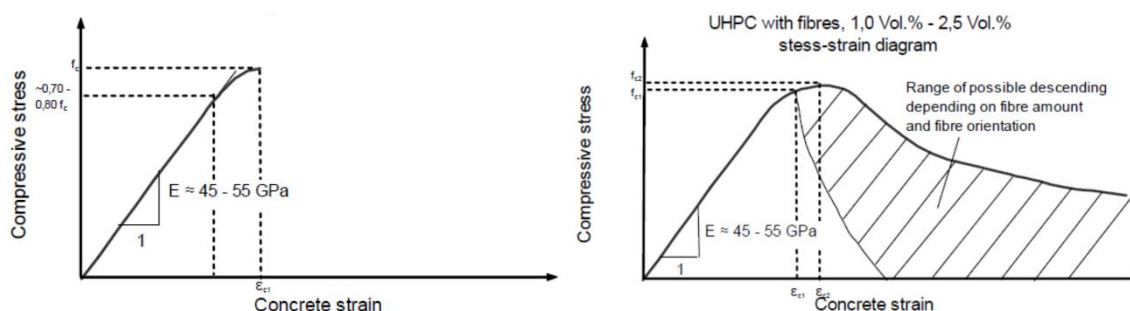
Z výše uvedeného textu by se mohlo zdát, že pokud bychom odebrali veškeré kamenivo z betonu, vytvořili bychom beton s ještě vyšší pevností. Tato úvaha je však mylná. Pokud je totiž vzdálenost mezi zrny kameniva velká, tlaková pevnost cementové pasty výrazně klesá (de Larrard and Sedran 1994) [29].



Obr. 8 Schématické znázornění přenosu tlakové síly a) v běžném betonu, b) v UHPC; [29]

Základní zkouškou jakéhokoliv betonu, je zkouška pevnosti v tlaku. Zkouška je normalizována mezinárodní normou ISO 1920-3. Běžně se provádí na krychlích o rozměru hrany 150 mm, nebo na válcích výšky 300 mm a průměru 150 mm. Obecně platí, že u běžných a vysokohodnotných betonů je zjištěná krychelná pevnost o 20-25% vyšší než pevnost válcová. UHPC (zejména pevností vyšších než 150 MPa) se takto nechovají a poměr mezi válcovou a krychlenou pevností je přibližně 0,90-0,96. Naměřená krychelná pevnost může být dokonce i nižší než pevnost válcová [26]. Obdobně jako u běžných betonů je charakteristická hodnota pevnosti v tlaku f_{ck} stanovována jako 5% spodní kvantil všech výsledků 28denní pevnosti. V souladu s Model Code 2010 [4] je doporučeno používat pro značení pevnosti pouze válcovou pevnost, např. C150. Při zkoušení UHPC je často přistupováno ke snižování rozměrů zkušebních vzorků z důvodu nedostatečného výkonu zkušebních lisů. Například Japonská norma JSCE [17] doporučuje průměr válce 100 mm, francouzská norma NF P18-470 [3] doporučuje rozměr $\varnothing 110/220$ mm. Vliv zmenšení rozměru vzorku na reálnost výsledků ve skutečné konstrukci (size efekt) je malý. V porovnání s betony běžných pevností je zkreslení způsobené „size effectem“ z důvodu jemnozrnné struktury UHPC nižší.

V případě UHPC bez rozptýlené výztuže dochází po překročení pevnosti v tlaku ke křehkému porušení. Z důvodu zabránění křehkému porušení prvku je do UHPC přidávána rozptýlená výztuž (typicky 2 % objemu). Použití rozptýlené výztuže mírně zvyšuje pevnost v tlaku, ale hlavně zajišťuje dostatečnou duktilitu (reziduální pevnost) prvku po jeho porušení. Úhel sestupné větve grafu závisí především na množství vláken, jejich geometrii, poměru délky k maximálnímu zrnů kameniva, pevnosti a jejich orientaci v prvku [37].

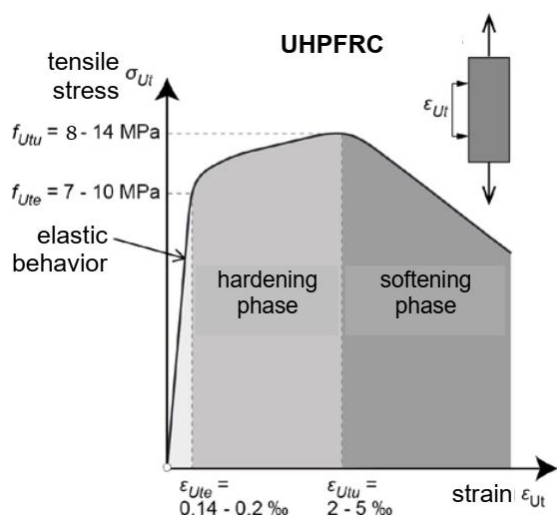


Obr. 9 Pracovní diagramy UHPC v tlaku bez rozptýlené výztuže a s rozptýlenou výztuží, převzato z [38]

2.3.2 Pevnost v tahu

Ve všeobecné inženýrské praxi podpořené normami pro běžný beton, nemá pevnost samotného betonu v tahu vliv na návrh konstrukce. Pevnost v tahu UHPC je již natolik významná, že její zanedbávání by bylo plýtvání materiálem. Nárůst pevnosti v tahu oproti běžným betonům je způsoben kompaktnější cementovou matricí a rozptýlenou vláknitou výztuží (zejména ocelová vlákna). Při nízkých hodnotách zatížení oddalují vlákna vznik mikrotrhlin. Menší množství mikrotrhlin se pozitivně projeví na zvýšení tahové i tlakové pevnosti [23]. Po zvýšení zatížení a vzniku makrotrhliny jsou vlákna plně aktivována. Výsledná tahová pevnost závisí nejen na množství vláken jdoucích přes makrotrhlinu, ale i na jejich orientaci. V ideálním případě jsou všechna vlákna orientována kolmo na trhlinu. V případě zkoušky v tahu za ohybu na zkušebním trámku je optimální orientace vláken rovnoběžně s delší stranou zkušebního trámečku (rovnoběžně s taženými vlákny). Dosáhnout v konstrukci optimální orientace drátků, je ale prakticky nemožné. Dávkování drátků v UHPC dosahuje přibližně 2-3 % objemu čerstvé směsi (odpovídá 160-240 kg/m³). Cílem takto vysokých dávek je dosažení rovnoměrného rozmístění vláken, orientovaných do všech směrů tak, aby byla zaručena přibližně shodná pevnost UHPC v tahu v jakémkoliv směru. Orientace a rozmístění vláken je u konstrukcí / prvků pečlivě sledována a blíže je popsána v kapitole 3.5.

Stejně jako vláknobeton, vyznačuje se UHPC „tahovým změkčením“, nebo „tahovým zpevněním“ po vzniku makrotrhliny. Při „tahovém změkčení“ dochází po vzniku makrotrhliny k poklesu tahové pevnosti prvku. Naopak při „tahovém zpevnění“ jsou vlákna schopna po vzniku trhliny zabránit jejímu dalšímu rozvíření a pevnost v tahu roste, až do vyčerpání pevnosti vláken v tahu [38]. Na obr. 10 je zobrazeno chování UHPC při zkoušce v prostém tahu.



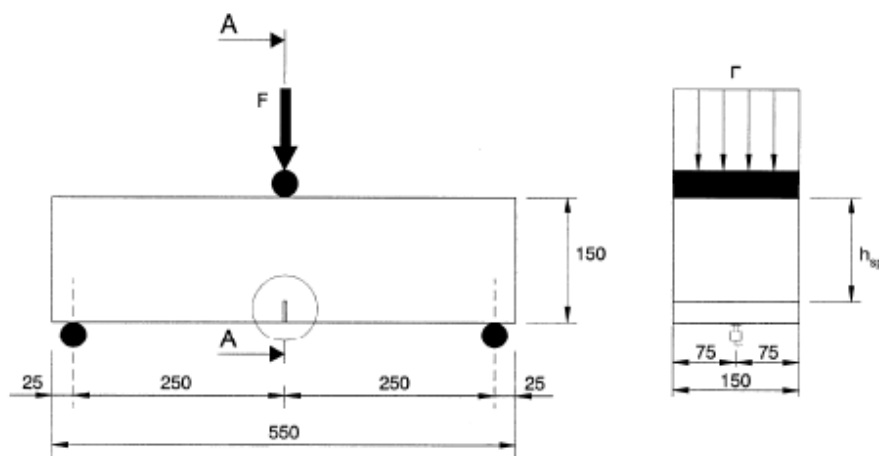
Obr. 10 Idealizovaný graf průběhu zkoušky jednoosým tahem s vyznačeným tahovým zpevněním a tahovým změkčením [42]

UHPC se chová pružně do hodnoty f_{Ute} , v tomto bodě dochází ke vzniku makrotrhliny, okamžité aktivaci vláken a pevnost v tahu již zajišťují pouze samotná vlákna. U dobře navrženého UHPC dochází po vzniku makrotrhliny k „tahovému zpevnění“ a pevnost v tahu dále narůstá až do hodnoty f_{Utu} . Po vyčerpání tahové pevnosti vláken dochází ke vzniku jedné velké makrotrhliny, do které se koncentruje veškeré napětí. Veškerá tahová pevnost je vyčerpána, vlákna jsou za mezí kluzu, nebo jsou vytahována z cementové matrice [42].

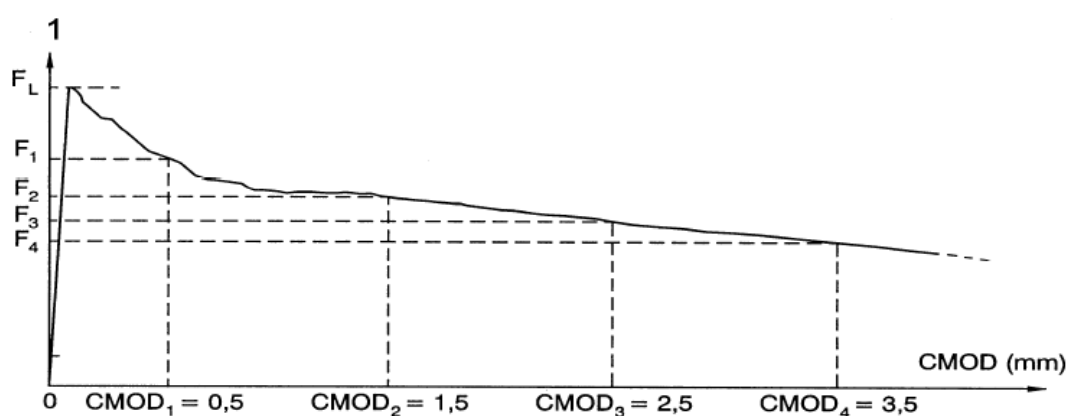
Zkoušení – pevnost v tahu za ohybu

Dle [5]: „Podstatné pro UHPC materiál vyztužený vlákny je, aby v rámci zkoušky kromě finální mechanické pevnosti byl zaznamenán průběh deformace, tj. průhyb nebo rozevírání trhliny (CMOD). Tomuto požadavku vyhovují prakticky pouze zkoušky dle:“

- ČSN EN 14488-3 – čtyřbodový ohyb na trámci 75x125 mm délky nejméně 500 mm při rozponu 450 mm, test řízen posunem břemene 0,25 mm/min., měří se průhyb.
- ČSN EN 14651+A1 (obr. 11) třibodový ohyb, na trámci 150x150x700 mm při rozponu podpor 500 mm s vrubem $h/6$ (25 mm) uprostřed, měří se rozevření trhliny případně průhyb, řízení testu rozevřením trhliny.
- ČSN P73245 - 4 bodový ohyb, na trámci 150x150x700 mm při rozponu podpor 600 mm bez vrubu, řízení testu posunem břemene 0,2 mm/min.
- Zkouška dle RILEM² (též dle MC2010) trámec 150x150x700 rozpětí 500 s vrubem.



Obr. 11 Uspořádání třibodové zkoušky v tahu za ohybu s vrubem, dle ČSN EN 14651+A1, [15]

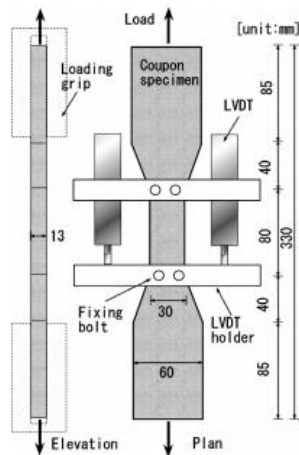


Obr. 12 Typický výsledek ohybové zkoušky vláknobetonů na tělese s vrubem dle ČSN EN 14651+A1, [15]

² RILEM – International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures

Zkoušení – pevnost v prostém tahu

Pro laboratorní zkoušení lze provést zkoušku na tělesech tvaru „kost“ dle doporučení JSCE [17]. Pevnost v prostém tahu, odvozená při jednoosé tahové zkoušce, je obvykle nižší než pevnost v tahu za ohybu. Pro praktické zkoušení tahové pevnosti UHPC se ale doporučuje právě zkouška v tahu za ohybu, neboť více odpovídá reálnému chování materiálu ve skutečném prvku [5].



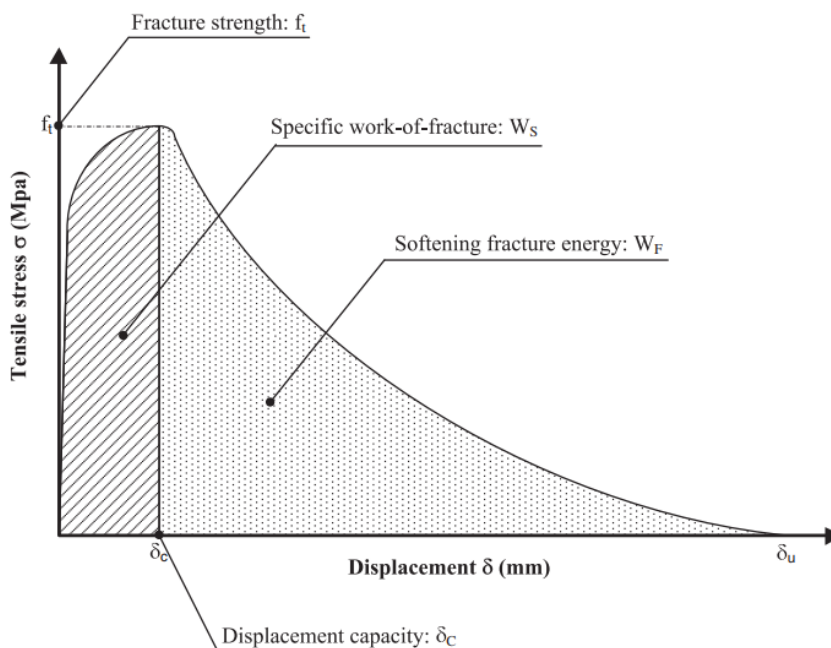
Obr. 13 Zkouška pevnosti betonu v prostém tahu na tělesu tvaru „kost“, převzato z [17]

Pevnost v příčném tahu

Zkouška pevnosti v příčném tahu nemá pro zkoušení UHPC velký význam a v zahraničních dokumentech není tato zkouška používána. Důvodem je zejména komplikované měření deformace vzorku, resp. rozevírání trhliny v závislosti na působícím zatížení.

2.3.3 Lomová energie

Energie nutná k rozvoji tahové trhliny na jednotkové ploše G_f [N/m]. Pro UHPC je třeba ji stanovit experimentem. Lomová energie by měla být ideálně stanovena ze zkoušky jednoosým tahem. Často je ale stanovována pomocí zkoušky tříbodového ohybu, která je jednodušší na provedení. U běžných betonů závisí lomová energie zejména na vodním součiniteli, velikosti zrn kameniva, „size efektu“ a na stáří betonu [4]. UHPC je ovlivněn shodnými parametry jako běžný beton, ale v jiném rozsahu jednotlivých veličin. Typické hodnoty lomové energie UHPC se pohybují mezi 20-30 kJ/m² [42].



Obr. 14 Typická odezva UHPC při zkoušce v prostém tahu se znázorněnými oblastmi lomové energie, převzato z: [25]

2.3.4 Youngův modul pružnosti, Poissonův součinitel

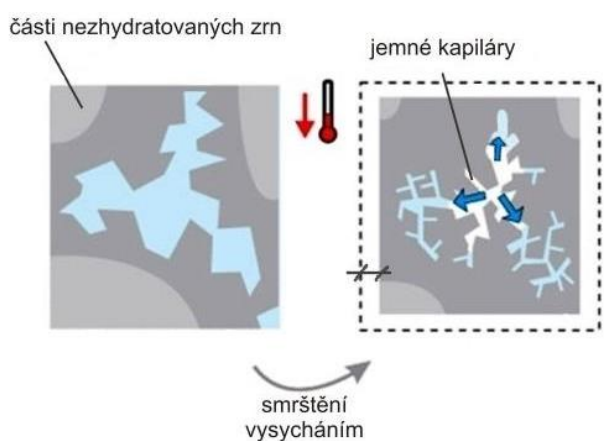
Oba parametry popisují deformační odezvu materiálu na zatížení. Modul pružnosti vyjadřuje závislost napětí na přetvoření, přičemž obvykle se používá jeho sečnová podoba. Youngův modul pružnosti dosahuje u UHPC hodnot mezi 45–65 GPa [2]. Modul pružnosti je pro návrh uvažován shodnou hodnotou pro tlak i pro tah. Dnes běžně používané betony od pevnostních tříd C20/25 až C50/60 dosahují modulu pružnosti 30–37 GPa [1]. Vyšší modul pružnosti má pozitivní vliv např. na průhyb ohýbaných konstrukcí. Dodatečné vrtání prostupů, nebo odběr zkušebních vzorků, je ale díky vysokému modulu pružnosti náročnější.

Poissonův součinitel představuje přetvoření materiálu ve směru kolmém na směr působícího zatížení. Hodnota poissonova součinitele se pohybuje v rozsahu 0,15 – 0,20. Pro návrh se může použít hodnota 0,2. [5] Hodnota 0,2 je doporučena také francouzským národním dodatkem [2].

2.3.5 Smršťování a dotvarování

Největší podíl na smršťování UHPC má autogenní smršťování. UHPC obsahuje vysoké množství cementu a výsledný objem reaktantů při hydrataci je nižší než počáteční objem. K velkému autogennímu smrštění napomáhá i použití malé frakce kameniva. Omezení autogenního smrštění je možné dosáhnout úpravou směsi (např. použití metakaolinu), nebo za pomoci proteplování (propařování) ve výrobě.

Plastické smršťování ani smršťování od vysychání není u UHPC vzhledem k velmi nízkému vodnímu součiniteli významné. Přesto se u UHPC projevuje efekt nazývaný samovysychání betonu [47]. Permeabilita cementové pasty, je již od počátečních fází hydratace velice nízká a do vnitřku směsi se obtížně dostává voda z povrchu betonovaného prvku (u běžného betonu zajištěno např. skrápěním vodou, kdy díky nižší



permeabilitě je voda schopná proniknout poměrně hluboko do tvrdnoucí cementové pasty).

Voda, která uvnitř UHPC zbývá se spotřebovává při hydrataci cementových zrn a výsledný objem reaktantů je nižší než objem původních složek. Samovysychání nelze tedy ovlivnit vnějším ošetřováním. Základní princip, jak minimalizovat samovysychání spočívá v postupném uvolňování

Obr. 15 Samovysychání betonu (Self-desiccation of concrete) [47]

vody přímo uvnitř betonové směsi. Jedním ze způsobů je nahrazení části záměsové vody ledovou tříští (přibližně 20 %). UHPC během hydratace postupně rozpouští ledovou tříšť a tím dochází k pozvolnému doplnění „ošetřovací“ vody. Přidáním ledu lze omezit samovysychání až o 22 % [39]. Další možností je použití lehkého pórovitého kameniva s předem definovanou vlhkostí, které dokáže vodu v sobě vázanou postupně uvolňovat [31]. Použití lehčeného kameniva má ovšem negativní vliv na výslednou pevnost UHPC. Náhradou pórovitého kameniva mohou být hydrokopické gely na bázi superabsorpčních polymerů [47], [39]. Superabsorpční polymery dokážou snížit přetvoření od samovysychání až o 75 % [47].

NF P 18-710 (příloha T) uvádí orientační hodnoty smrštění, za předpokladu uložení prvku v prostředí s průměrnou relativní vlhkostí 50–70 %:

Tab. 3 Orientační hodnoty smršťování dle [2][2]

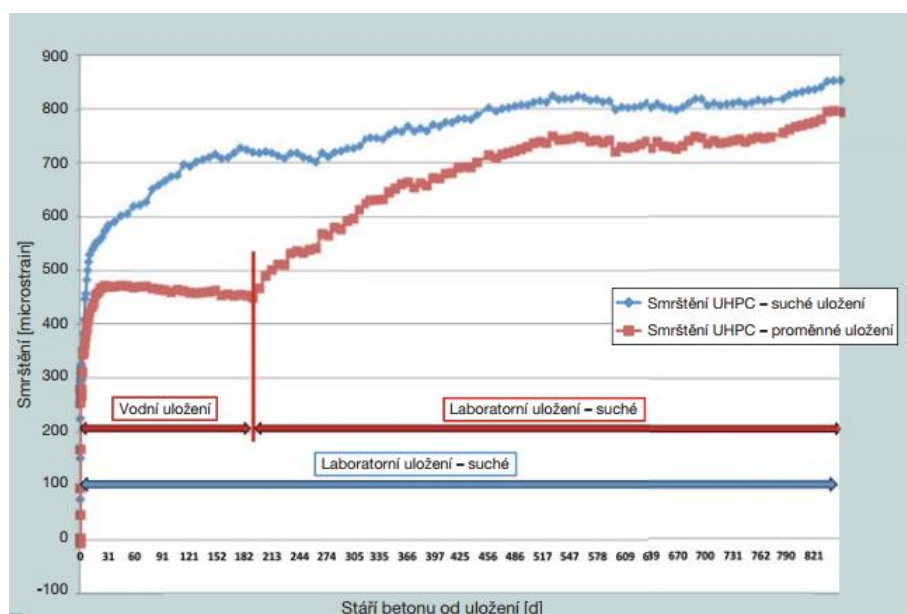
Způsob ošetřování	Celkové smrštění	Poznámka
STT	700 $\mu\text{m}/\text{m}$	z toho 550 autogenní a 150 vysychání (samovysychání)
TT1	550 $\mu\text{m}/\text{m}$	
TT2 / TT1+2	550 $\mu\text{m}/\text{m}$	po ukončení tepelného ošetřování dále nesmršťuje

kde jednotlivé způsoby ošetřování znamenají:

STT	bez tepelného ošetřování při okolní teplotě $20^{\circ} \pm 2$ po dobu 28 dní
TT1	tepelné ošetřování během hydratace, urychluje nárůst pevnosti, nižší teploty než u TT2
TT2	tepelné ošetřování aplikované po několika hodinách po betonáži za využití vysoké teploty (přibližně 90°) a vlhkosti
TT1+2	kombinace TT1 a TT2

Tyto hodnoty smrštění vycházejí z AFGC [8] a jsou převzaty NF P18-710 [2] i návrhovou Metodikou 1 [5].

V roce 2015 byl v časopisu Beton TKS publikován článek [27], popisující praktickou zkušenost s výrobou UHPC pro lávku v Čelákovících. Použitý UHPC dosahoval pevnosti 150-190 MPa (více v části 2.4.1). Část zkušebních vzorků byla proměně kondiciována (nejdříve ponořeny ve vodě, následně na suchu) a část vzorků byla ponechána pouze v suchém prostředí laboratoře. Celkové smrštění činilo přes $800 \mu\text{m}/\text{m}$ ve stáří 800 dnů a 70 % celkového smrštění proběhlo do 30 dnů od betonáže. Dle autorů bylo autogenní smrštění jednoznačně převládající, oproti smrštění způsobeném vysycháním [27].



Obr. 16 Graf vývoje smršťování v čase – UHPC pro lávku v Čelákovících, převzato z [27]

Pokud by bylo uplatněno tepelné ošetřování propařováním, pravděpodobně by konečné smrštění klesalo směrem k hodnotám uvedených v AFGC [8]. UHPC bez tepelného ošetřování tedy může smršťovat výrazně více než betony běžných pevností (např. C25/30: $600\text{-}700 \mu\text{m}/\text{m}$). V případě použití UHPC na výrobu nepředpjatých prefabrikovaných prvků menších rozměrů, nejsou objemové změny v důsledku smršťování významné. V případě použití UHPC do masivnějších prvků, nebo do předpjatých prvků, je třeba věnovat smršťování zvýšenou pozornost.

Dotvarování UHPC je obvykle nižší než dotvarování běžného betonu. Pozitivní vliv na dotvarování má tepelné ošetřování. Orientační hodnoty lze stejně jako u smršťování lze uvažovat dle NF P18-470:

Tab. 4 Orientační hodnoty součinitele dotvarování dle [2]

Způsob ošetřování	součinitel dotvarování	Poznámka
STT	0.8 - 1.0	
TT1	0.4	za předpokladu zatížení prvku až po tepelném ošetřování
TT2 / TT1+2	0.2	za předpokladu zatížení prvku až po tepelném ošetřování

Stanovení součinitele dotvarování je závislé na velkém množství parametrů materiálu a působení vnějších vlivů. Lze ale konstatovat, že součinitel dotvarování UHPC je výrazně nižší při porovnání s běžnými „normovými“ betony.

Ošetřování. Nejideálnějším způsobem ošetřování UHPC je propařování. Po odbednění je prvek po dobu několika desítek hodin (typicky 72 h) vystaven teplotám kolem 60-90o C a uložen v prostředí s cca 95 % vlhkostí. Propařování výrazně omezuje autogenní smrštění a má příznivý vliv na výslednou pevnost a trvanlivost UHPC. Zásadní nevýhodou je velká spotřeba energie a technologická náročnost. Proto se ošetřování propařováním využívá zejména u menších prvků (např. fasádní panely). Velké konstrukční prvky se zpravidla propařováním neošetřují a postačí jejich ošetřování běžným způsobem.

2.3.6 Odolnost proti rázu

Odolnost proti rázu je schopnost odolat náhlému dynamickému zatížení. Deskové prvky z UHPC mají často velmi malou tloušťku v řádu desítek milimetrů. Při zatížení rázem dochází ke značnému namáhání prvku na malé ploše. Obdobně jako vláknobetony mají UHPC díky vyztužení rozptýlenou vláknitou výztuží vysokou schopnost rozptýlení energie rázu. Vláknitá výztuž rozptýlí energii rázu na větší plochu a společně s vysokou pevností UHPC v tahu účinně brání rozvoji tahových trhlin. Odolnost vůči rázu závisí na množství rozptýlených vláken a na jejich velikosti. Se vzrůstajícím množstvím vláken vzrůstá i schopnost prvku absorbovat více energie rázu. Je vhodné použít více menších vláken než velká vlákna rozptýlené výztuže, i když jejich celková hmotnost ve směsi bude shodná [38]. Zde můžeme nalézt analogii s železobetonovými deskami z běžného betonu, kde je z důvodu omezení šířky trhlin doporučeno volit výztuž menších průměrů blíže u sebe než výztuž velkých průměrů po velkých vzdálenostech, i když celková plocha výztuže je ve výsledku shodná.

Výborné vlastnosti UHPC při zatížení rázem byli využity pro vývoj mobilních ochranných bariér s vysokou balistickou odolností. Bariéra je vysoce modulární, umožňuje zachycení střel ze střelných zbraní a poskytuje ochranu před nebezpečnými střepinami a úlomků z výbuchů. Tento systém byl vyvinut v experimentálním centru ČVUT Fakulty stavební v Praze. [33]



Obr. 17 Mobilní ochranná bariéra vyvinutá na Fsv ČVUT, zdroj: [33]

2.3.7 Trvanlivost

Vysoká hutnost cementové matrice má pozitivní vliv nejen na pevnost, ale i na trvanlivost. Trvanlivost je schopnost betonového prvku odolávat účinkům prostředí, ve kterém se nachází. Účinky prostředí lze rozdělit na fyzikální, fyzikálně-chemické a chemické. V porovnání s běžnými betony i s vysokohodnotnými betony (HPC) vykazuje UHPC výrazně lepší trvanlivost a odolnost prakticky ve všech oblastech. Výzkum provedený Graybelem [9] ukázal, že UHPC, který je tepelně ošetřován dále zlepšuje již tak výbornou odolnost UHPC proti agresivnímu prostředí.

Fyzikální procesy degradace

Mechanické porušení způsobené třením předmětů o povrch UHPC (např. kola automobilů, nebo proudění vody). Proti tomuto porušování vzdoruje UHPC svou pevností v tlaku a v tahu. Dle [9] má významný vliv na odolnost proti otěru způsob ošetřování a výsledný povrch betonu. Zkušební zařízení na zkoušku otěru dle amerických norem je zobrazeno na obr. 18. Vzorek UHPC je upevněn na rotační podložce a na jeho povrch působí dvojice ocelových kartáčů. Kartáče jsou přitlačovány silou 196 N a otáčejí se rychlostí 200 otáček za minutu. Zkouška trvá 3 x 2 minuty. Vzorky použitého UHPC vykázali na konci obrus v řádu jednotek gramů. Při použití vzorků ošetřovaných propařováním dosahoval obrus desetin gramu [9].



Obr. 18 Zkouška odolnosti proti obrusu, dle ASTM C944-99, [9]

Vysoké teploty působící na UHPC, především za požáru. Působení UHPC za požáru je popsáno v kapitole 2.3.8.

Působení mrazu. Obecně platí, že betony s uzavřenou povrchovou strukturou velmi dobře odolávají mrazu. Nízká permeabilita cementové matrice efektivně zabraňuje průsaku vody z vnějšího prostředí (nasákavá je pouze vnější vrstva v jednotkách milimetrů) a v pórech cementové matrice se nachází minimum volné vody, která by mohla zmrznout.

Fyzikálně-chemické procesy degradace

Mezi fyzikálně chemické procesy řadíme zejména solné roztoky, které jsou transportovány do vzduchových pórů, vlivem vysychání pak dochází ke krystalizaci solných roztoků. Krystalizační produkty vytváří tlak na vnitřní strukturu a způsobují jeho trhání. Typickým příkladem je působení chloridů. Při zkoušce odolnosti proti chloridům, kdy byli zkušební vzorky uloženy 90 dnů v 3% roztoku chloridu sodného, vykazovali vzorky méně než 0,05 kg chloridu sodného na 1 m³ UHPC. UHPC je tedy velmi odolný proti průniku chloridů [9].

Chemická degradace

Karbonatace UHPC. První praktické aplikace prvků z UHPC pocházejí z přelomu 20. a 21. století. Je tedy velmi obtížné určit míru dlouhodobé karbonatace UHPC. Lze předpokládat, že míra karbonatace UHPC bude vzhledem k uzavřené struktuře velmi nízká. Extrémně nízká pórovitost omezuje přístup vzduchu do struktury materiálu a karbonatace tak probíhá pouze na povrchu UHPC. V roce 2013 byla představena studie [34] zkoumající míru karbonatace UHPC za období 16-ti let. Zkušební vzorky vytvořené z UHPC o pevnosti 150-400 MPa byly vyztuženy ocelovými vlákny a betonářskou výztuží (krytí 10 mm). Vzorky byli zatíženy, tak aby v nich došlo ke vzniku mikrotrhlin a více reflektovali skutečné chování materiálu v konstrukci. Vzorky byly umístěny do venkovního i vnitřního prostředí (Madrid). Po 16-ti letech byla provedena zkouška hloubky karbonatace, pomocí roztoku fenolftaleinu. Naměřená hloubka karbonatace dosahovala u nejvíce exponovaných vzorků max 1 mm. Ocelová vlákna těsně pod povrchem prvku byla lehce zkorodovaná, ale jednalo se pouze o povrchovou korozi. Betonářská výztuž umístěná 10 mm pod povrchem byla bez jakékoliv známky koroze. Negativním důsledkem karbonatace tak byla pouze estetická vada způsobená povrchovou korozí ocelových vláken [34]. Další možností, jak stanovit hloubku karbonatace UHPC je použití zrychlených laboratorních metod. Dle [35], byli zkušební vzorky UHPC pro urychlení karbonatace uloženy v atmosféře s obsahem 1 % CO₂ (běžná koncentrace CO₂ v atmosféře je přibližně 0,04 %). Na základě výsledků této zkoušky byla odhadnuta hloubka karbonatace UHPC v horizontu 100 let na maximálně 5 mm. Běžný beton dosahuje po 100 letech hloubky karbonatace až 65 mm [35].

Síranová koroze (koroze III. typu) je způsobena chloridy, dusičnany a zejména sírany. Jedná se o agresivní látky, které za přítomnosti vody reagují se zhydratovaným cementem a vytváří nové krystaly (např. etringit). Zvětšený objem výsledných produktů způsobuje vnitřní krystalický tlak na strukturu betonu a jeho rozpad. Dle [35] má síranová koroze na UHPC žádný, nebo minimální vliv. Zkušební vzorky UHPC (40x40x160 mm) byli uloženy do roztoku síranu sodného a po dobu 500 dní byla měřena jejich délka. Změna délky by značila vývoj nových krystalů. Za dobu 500 dní se délka vzorků nezměnila [35]. Vysoká odolnost UHPC proti síranové korozi jej předurčuje k použití ve vysoce agresivním prostředí chemiček, čističek odpadních vod, nebo pro výrobu kanalizačních potrubí.

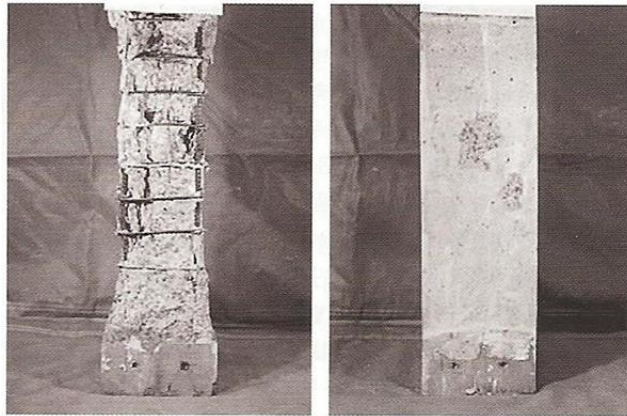
Alkalicko-křemičitá reakce

UHPC obsahuje velké množství cementu a mikrosiliky (křemičitý úlet). Existuje tak velké podezření na alkalicko-křemičitou reakci. Experimentálně bylo prokázáno, že ASR není v případě UHPC problémem [35].

2.3.8 Reakce na požár

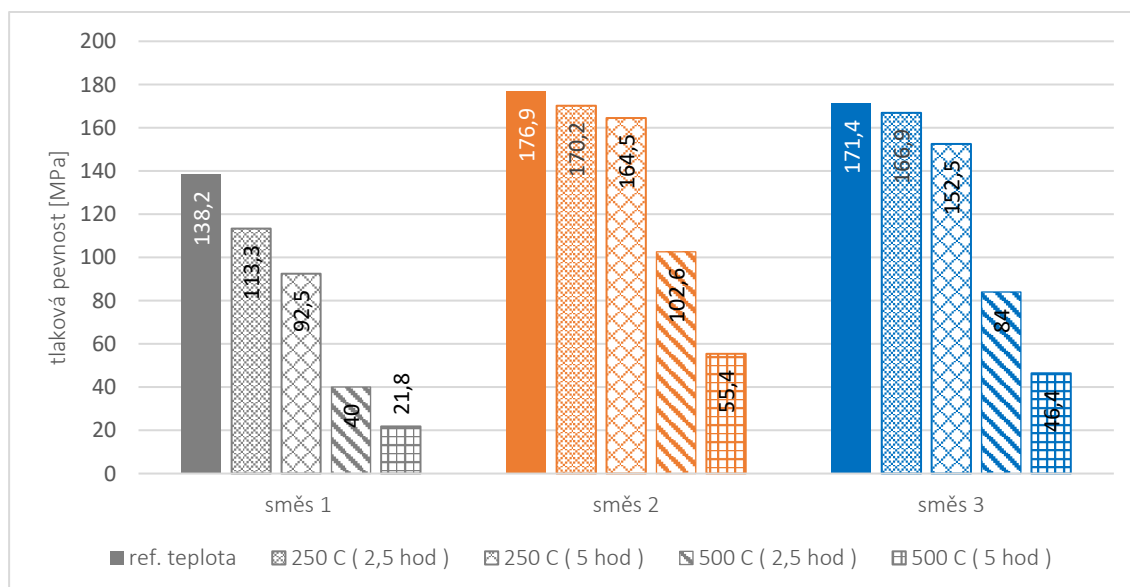
Reakce UHPC na požár je podobná běžnému betonu. UHPC má poměrně vysokou krátkodobou odolnost proti požáru z hlediska tlakové pevnosti. Pokud je vystaven požáru delší dobu, pak jeho tlaková pevnost klesá. Podobně to platí i pro pevnost UHPC v tahu. Zásadním problémem požární odolnosti není rychlá redukce pevnosti, ale přítomnost vody uzavřené v pórech. Oproti běžnému betonu je sice v UHPC podstatně méně volné vody v pórech (téměř žádná), ale i velikost pórů je mnohem menší.

Nízká pórovitost UHPC způsobuje v případě požáru vysoký tlak vodní páry v pórech. Během požáru tak může docházet k odstřelování krycí vrstvy (obr. 19 vlevo), nebo větších částí betonu. Vzniklé betonové střípiny se pohybují vysokou rychlostí a mohou zranit unikající osoby. Řešením tohoto problému je přidání polypropylenových vláken. Při teplotě cca 160 °C dochází k tání polypropylenových vláken, tím k vytvoření sítě kanálků mezi póry. Kanálky umožní odvod páry z betonu.



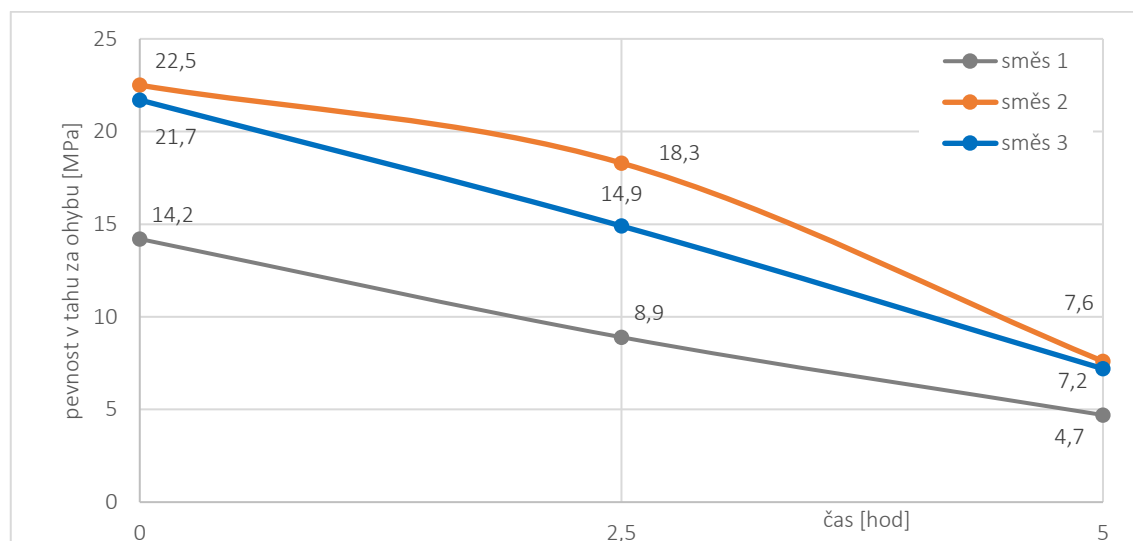
Obr. 19, (vlevo)- odstřelená krycí vrstva sloupu z HPC, (vpravo) – shodný HPC obsahoval polypropylenová vlákna, zdroj: [45]

Pevnost v tlaku po dlouhodobém vystavení UHPC vysokým teplotám může být poměrně výrazně redukována. V kapitole 2.2 – Vlákna, je uveden experiment s trojicí směsí, lišících se v obsahu vláken. Tyto zkušební vzorky byli vystaveny teplotnímu namáhání v prostředí 250 °C a 500 °C. Vzorky byli teplotám vystaveny vždy po dobu 2,5 a 5 hodin [37].



Obr. 20 Vliv vysoké teploty a tlakovou pevnost vzorků UHPC, data převzata z [37]

Z grafů je patrné, že UHPC vyztužený vlákny dosáhl výrazně nižšího poklesu tlakové pevnosti po vystavení teplotě 250 °C. Při krátkodobém vystavení vzorků teplotám 500 °C, je znát pozitivní vliv vláken na pevnost UHPC. Pokud, je ale UHPC vystaven vysokým teplotám kolem 500 °C po delší dobu (nad 2,5 hod), pokles pevnosti je již podobný jako u nevyztuženého vzorku. Podobně jako u tlakové pevnosti se přítomnost vláken pozitivně projeví v případech tahové pevnosti při požáru.



Obr. 21 Pokles pevnosti v tahu za ohybu v čase při vystavení teplotě 250 °C, převzato a upraveno z [37][37]

Studie [37] prokazuje, že použití polypropylenových vláken do UHPC je z hlediska požární bezpečnosti zásadní. V první řadě polypropylenová vlákna zabraňují odstřelování povrchových vrstev UHPC do volného prostoru, kde by mohlo dojít ke zranění evakuovaných osob. Nevyhořelá polypropylenová a ocelová vlákna dále zajistí v prvních hodinách požáru pomalý pokles tlakové a tahové pevnosti a umožní bezpečnou evakuaci osob. Na základě výsledků této studie se optimální množství polypropylenových vláken přidávaných do UHPC pro zvýšení požární odolnosti, při minimalizaci negativního vlivu na mechanické vlastnosti, pohybuje okolo 0,75 % celkového objemu směsi (6,3 kg) [37].

2.3.9 Shrnutí

U běžných „normových³“ betonů jsou pro usnadnění navrhování jednotlivé směsi zatříděny do pevnostních tříd a materiálové charakteristiky jsou odvozovány od tlakové pevnosti betonu. Tento postup nelze u UHPC použít. Při návrhu prvku z UHPC je třeba nejdříve stanovit a experimentálně ověřit vhodnost navržené receptury. Na zkušebních vzorcích z výsledné receptury UHPC se změří mechanicko-fyzikální parametry a s těmito hodnotami je proveden návrh prvku. Po zhotovení prvku je potřeba tyto parametry znovu ověřit. Provádění zkoušek je stanoveno příslušnými normami (např. NF P18-470).

Pro prvotní odhad vlastností UHPC nicméně NF P18-710 uvádí v příloze T orientační hodnoty mechanicko-fyzikálních parametrů:

Tab. 5 Orientační hodnoty parametrů dle NF P18-710 [2]

Youngův modul pružnosti	E_{cm}	45 - 65	GPa
charakteristická pevnost v tlaku	f_{ck}	150 - 200	MPa
střední hodnota pevnosti v tlaku	f_{ck}	160 - 230	MPa
charakteristická limitní pevnost v tahu - v pružné oblasti	$f_{ctk,el}$	7.0 - 10.0	MPa
střední hodnota limitní pevnost v tahu	$f_{ctk,el}$	8.0 - 12.0	MPa
charakteristická tahová pevnost po vzniku trhlin	f_{ctfk}	6.0 - 10.0	MPa
střední hodnota tahové pevnosti po vzniku trhlin	f_{ctfk}	7.0 - 12.0	MPa

³ třída betonu dle EC2, např.: C25/30

2.4 Příklady praktických aplikací

2.4.1 Realizované konstrukce

Zavěšená lávka přes Labe v Čelákovících (2014)

Ultra-vysokohodnotný beton je použit pro prefabrikovanou segmentovou mostovku třípólové lávky pro pěší o celkové délce 156 m. Jedná se o jednu z prvních aplikací UHPC v České republice. Jednotlivé segmenty mostovky byli vyrobeny mimo stavbu a na místo určení přivezeny po řece. Na mostovku byla použita betonová směs vykazující pevnost v tlaku 168 MPa na krychli o hraně 100 mm při zachování velké tekutosti (zkouška rozlítí 790 mm). Pevnost v tahu za ohybu činila 10,5 MPa. Modul pružnosti na válci výšky 300 mm činil 48,5 GPa. [27]



Obr. 22: zavěšená lávka přes Labe v Čelákovících, zdroj: [55]

Lávka přes řeku Lubinu v Příboře (2018)

Lávka o rozponu 35 m je zhotovena z 5-ti prefabrikovaných segmentů, každý o délce 7,8m spojovaných na stavbě pomocí předpětí. Předpětí typu monostrand je vedeno ve třech vnitřních stěnách v parabolických kabelových kanálcích. Segmenty jsou vybetonovány z UHPC specifikace C110/130 XC4+XD3+XF4. Pevnost v tahu za ohybu na zkušebních hranolech 150/150/700 mm činila průměrně 18 MPa (min. 15 MPa). Celkový objem použitého UHPC na tuto lávku dosahuje 32 m³. [53]



Obr. 23 Lávka přes řeku Lubinu v Příboře, zdroj: [54]

Lávka přes Dřetovický potok ve Vrapicích u Kladna (2018)

Lávka ve středočeské obci Vrapice u Kladna propojuje obec s pravým břehem potoka, kde se nachází hřbitov. Konstrukce o rozponu 10 m je vytvořena UHPC C110/130. Příčný profil lávky ve tvaru písmene „U“ má šířku 1,5 m s tloušťkou stěn pouhých 30 mm. Pro zajištění stability takto tenké konstrukce lávka vhodně využívá zakřivení geometrie ve vertikálním (nadvýšení o 0,4m) i horizontálním směru (vybočení o 0,55m). Samotný UHPC byl probarvován a pro získání patinového vzhledu naleptáván barvami na bázi minerálních solí. Objem spotřebovaného materiálu je přibližně 1,4 m³ a váha lávky je cca 3,5 t. [52]



Obr. 24 Lávka přes Dřetovický potok ve Vrapicích u Kladna, zdroj: fotoarchiv autora

Lávka v Lužci nad Vltavou (2020)

Lávka je tvořena dvojicí polí o rozponu 99 a 32 m. Předepnutá zavěšená mostovka je vytvořena z prefabrikovaných segmentů o rozměrech cca 4,5 x 5,6 m. Segmenty mají po okrajích ploché nosníky pro vedení montážních přepínacích tyčí a umístění ocelových závěsů nosných lan. Střední část segmentů je tvořena deskou tl. 60–75 mm. UHPC použitý na mostovce má zaručenou třídu C110/130 a mostovka je přímo pochozí, tj. bez dodatečné ochrany povrchu (např. ochranou stěrkou). [56]



Obr. 25 Lávka přes Vltavu v obci Lužec nad Vltavou, zdroj: fotoarchiv autora

Museum MuCEM v Marseille (2015)

Muzeum evropských a středomořských civilizací postavené v roce 2015 v přístavu francouzského města Marseille patří mezi 50 nejnavštěvovanějších muzeí na světě a získalo několik významných ocenění. Jedná se o první stavbu, kde byl použit UHPC v masivním měřítku. UHPC nalezneme v nosných sloupech obvodového pláště, velkoplošných panelech fasádního pláště a z UHPC je vytvořena i 150 m dlouhá přístupová lávka. UHPC byl zvolen nejen pro své mechanické vlastnosti, ale i s ohledem na agresivní mořské klima v místě stavby. Rozvětvující se sloupy připomínající kmeny stromů byly vytvořeny po částech a jednotlivé segmenty byly mezi sebou, se základovou deskou a s obvodovými nosníky spojovány pomocí předpětí. Všechna předpínací lana (se soudržností) začínají v základně sloupu a v jednotlivých větvích se rozdělují. Předpínací lana sloupů byla ukotvena v základové desce a napnuta se shora. Stromové sloupy podporují fasádu objektu (rovněž z UHPC). Pro snížení působení vodorovných sil na obvodové sloupy od zatížení větrem a teplotních deformací fasády, jsou obvodové nosníky v jednotlivých podlažích sepnuty předpětím. Výsledkem je velmi tuhá konstrukce obvodového pláště, která je tuze propojena s centrálním jádrem budovy. [60]



Obr. 26 Muzeum MuCEM, zdroj: [61]

Fasáda tvoří převážně funkci slunolamu. Jednotlivé panely o rozměrech 6 x 3 m vytvořené z propletených pramenců betonu jsou spojovány pomocí ocelových spon umožňujících dilataci, podobně jako je to běžné u fasád skleněných. UHPC byl pigmentován pro dosažení správného odstínu. Jelikož je fasáda přímo vystavena působení slaného mořského vzduchu a UV záření, je použití UHPC nanejvýš vhodné a navíc skvěle poslouží pro budoucí zhodnocení odolnosti UHPC vůči agresivnímu prostředí.



Obr. 27 Muzeum MeCEM, zdroj: [61]

Lávka spojující muzeum s pevností Saint Jean o celkové délce přes 130 m je vytvořena z 26 prefabrikovaných segmentů. Segmenty spojované předpětím mají průřez ve tvaru písmena U, jedná se tedy o konstrukci s nosným zábradlím [60].

Rámová konstrukce Willson Hall v Malajsii (2008)

Prefabrikovaná konstrukce rámu haly o délce 67 m a šířce 42,7 m. Jednalo se o experimentální nahrazení ocelové varianty. Rámy byly zhotoveny z betonu DURA® pevnosti 120–160 MPa válcové pevnosti. Pevnost v tahu za ohybu byla 8-12 MPa. Výrobce udává, že náklady na konstrukci z UHPC byly o 16 % nižší v porovnání s ocelovou variantou. [62]

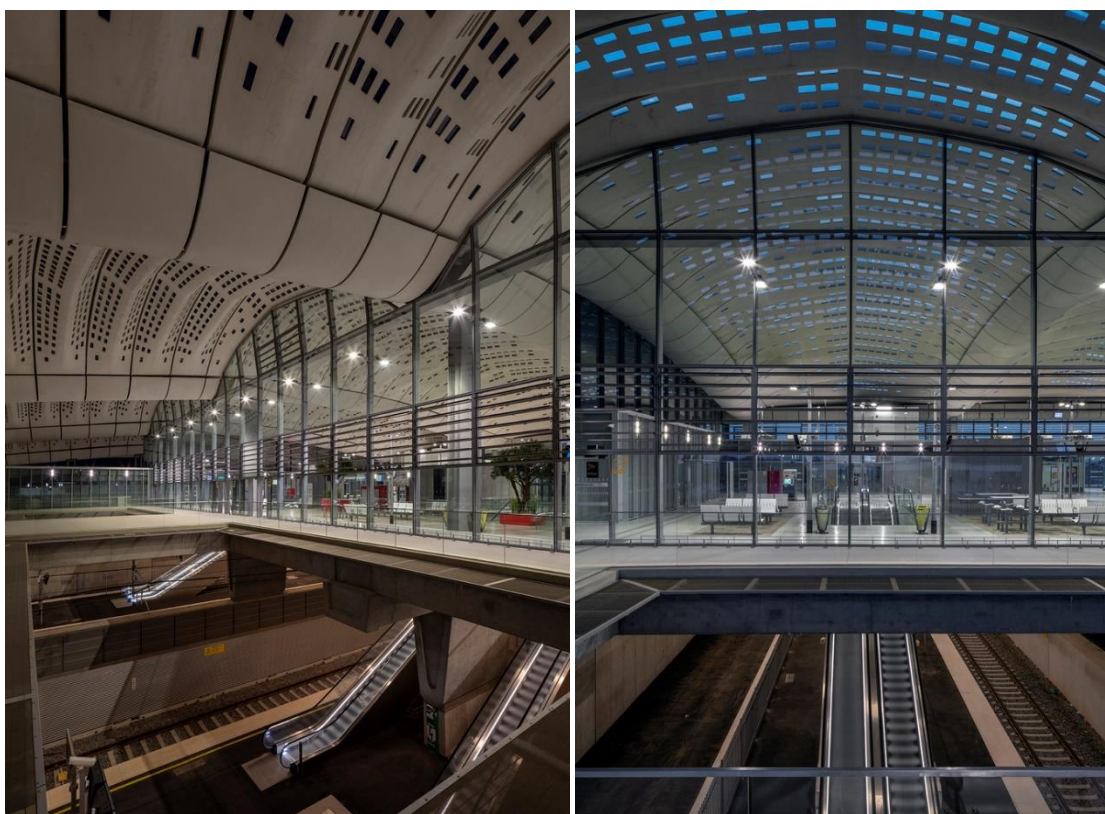


Obr. 28 Rámová hala Willson Hall, zdroj: [62]

Zastřešení stanice Montpellier ve Francii (2017)

Stanice se nachází na hlavním koridoru TGV z jihu Francie do Paříže u města Montpellier. Je zastřešena perforovanými prefabrikovanými střešními panely z UHPC. Celková plocha zastřešení je přes 10.000 m². Prefabrikované panely ve tvaru „palmových“ listů jsou 18,4 metru dlouhé, 2,4 m široké a 3 metry vysoké. Průměrná tloušťka panelů je 50 mm.

Prefabrikáty plní sdruženou funkci nosné konstrukce a funkci střešního pláště. Samotné UHPC zajišťuje ochranu před deštěm a sluncem. Panely jsou osazeny na „sraz“ s přesností 2 mm a spoje jsou vodotěsně zajištěny krycím plechem. Perforace v panelech je vytvořena nerovnoměrně pro dosažení dostatečného množství světla v dopoledních hodinách a efektivní odstínění letního poledního slunce. Severní strana panelů má perforaci až 25 % celkové plochy, zatímco jižní strana kolem 10 %. Prosvětlovací otvory v prefabrikátech jsou zaskleny. [57]

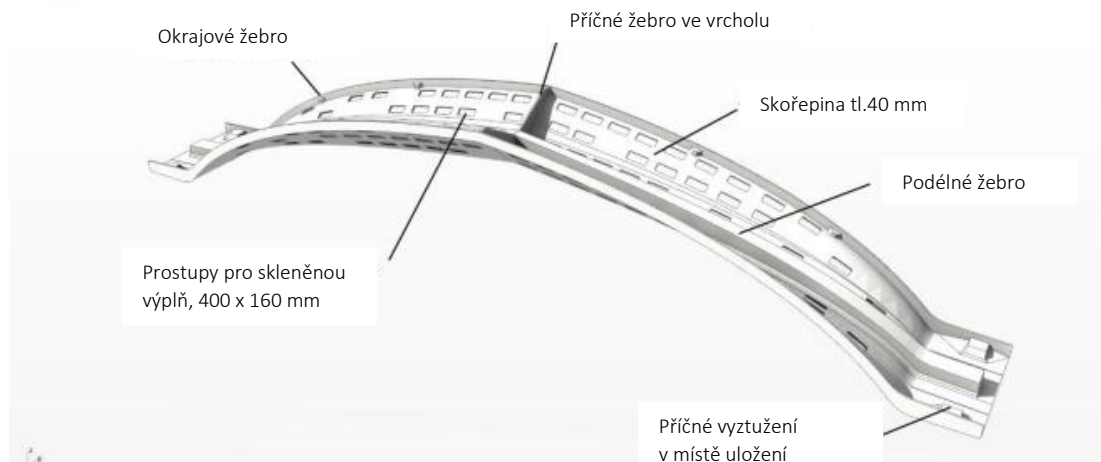


Obr. 29 Zastřešení stanice Montpellier, zdroj: [58]

Na celé střeše je použito pouze 5 různých tvarů segmentů. Díky tomu bylo možné snížit výslednou cenu konstrukce a zároveň zaručit její vysokou kvalitu. Rozměry střešních prefabrikátů vycházejí především z transportních možností. Všechny prefabrikáty byli vyrobeny během 4 měsíců a jejich osazení trvalo pouhé 2 týdny [57].

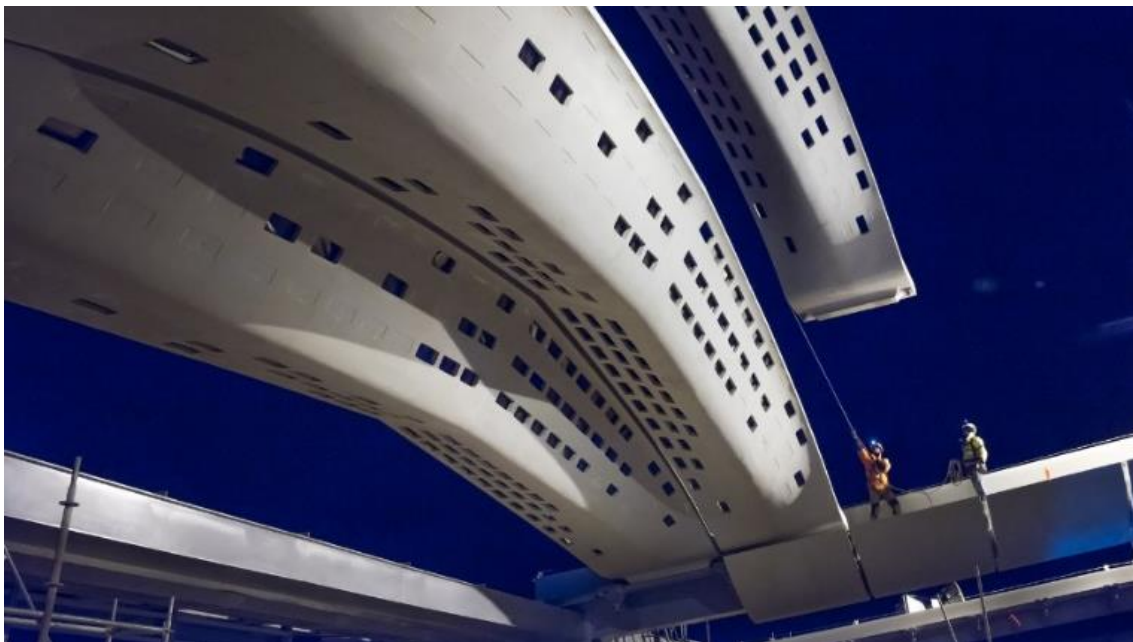
Tvar prefabrikátů připomíná palmové listy. Průřez ve tvaru písmene „V“ tvoří centrální podélné žebro o rozměrech 400 x 200 mm v oblasti podpor a 200 x 600 mm ve vrcholu. Na centrální žebro je napojena 40 mm tlustá skořepina. Skořepina je na koncích zakončena žebrem pro zvýšení tuhosti a umožnění provedení oplechování. Ve vrcholu

prefabrikátu je umístěno příčné žebro pro zvýšení tuhosti a stability tenké skořepiny. Centrální žebro je předepnuté. Statické schéma panelů je prostý nosník. Dvojitě zakřivení prvku zajišťuje jeho geometrickou stabilitu. Na koncích prvku působí centrální žebro jako klasický trám s normálním rozdělením napětí (nahore tlačena vlákna, dole tažená vlákna). Ve vrcholu funguje celý průřez „palmy“ – skořepina z UHPC je tlačena a centrální trám je namáhán tahem. [28]



Obr. 30 Axonometrie tvaru prefabrikátu. Převzato a upraveno z [28]. [28]

Zastřešení tvoří pět shodných polí o rozměrech 54 x 19,4 m. Každé pole tvoří 23 panelů. Na každé straně prefabrikátu jsou excentricky umístěny ocelové patky. Patky zapadají do protikusů umístěných na železobetonové rámové konstrukci [28]. Dle dostupných údajů dosahuje maximální namáhání prefabrikátů 60,4 MPa v tlaku a 4,6 MPa v tahu. Použitý UHPC dosahuje v 28 dnech těchto charakteristik: pevnost v tlaku 130 MPa, pevnost v tahu 7,5 MPa a modul pružnosti 52 GPa.



Obr. 31 Montáž prefabrikovaných střešních panelů, zdroj: [58]

Vzhledem k požadavku na vysokou pohledovou kvalitu prefabrikátů byla použita rozptýlená výztuž z nerezové oceli. Pokud by byli použity běžná ocelová vlákna, mohla by se na povrchu bílých prefabrikátů objevit povrchová koroze a znehodnotit tak výsledný vzhled. Vlákna byla dávkována v objemu 140 kg/m^3 . UHPC na stavbu dodávala francouzská společnost Ductal. Cena UHPC se pohybovala okolo 3000 €/m^3 . [28], [59]

Zastřešení čistírny odpadních vod, Francie (2013)

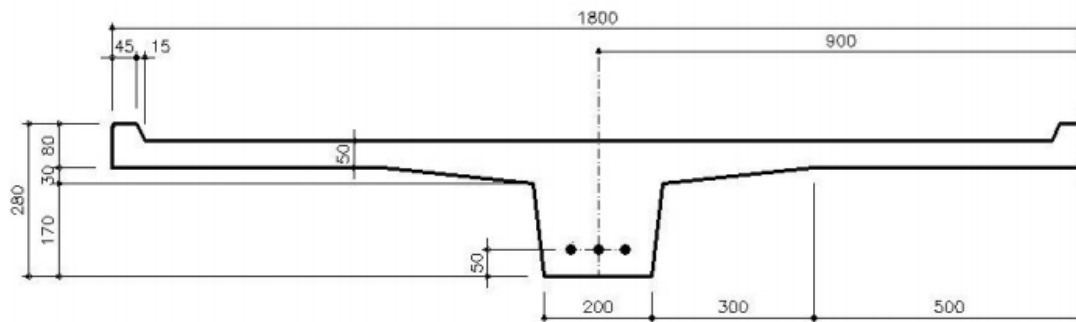
Čistírna odpadních vod se nachází na břehu řeky Seiny, severně od Paříže. UHPC byl použit na střešní prefabrikované panely, které zakrývají obdélníkovou nádrž na biologické čištění odpadní vody o rozloze 3500 m^2 . Zastřešení vytváří nad nádrží stín a zabraňuje tak nežádoucímu růstu řas na hladině odpadní vody. Tvar prefabrikátů ve „tvaru“ vlny, umožňuje efektivní odvětrání prostoru nádrže a zároveň umožňuje snadnou vizuální kontrolu. UHPC byl zvolen zejména kvůli své vysoké odolnosti proti agresivnímu prostředí. Páry unikající z procesu čištění odpadní vody obsahují vysoké koncentrace sirovodíku (H_2S) [36]. Sirovodík se za přítomnosti vody přeměňuje na kyselinu sulfanovou, při příznivých podmínkách se může dále přeměnit na kyselinu sírovou a ta způsobuje síranovou korozi betonu. Odolnost UHPC vůči síranové korozi je blíže popsána v kapitole 2.3.7.



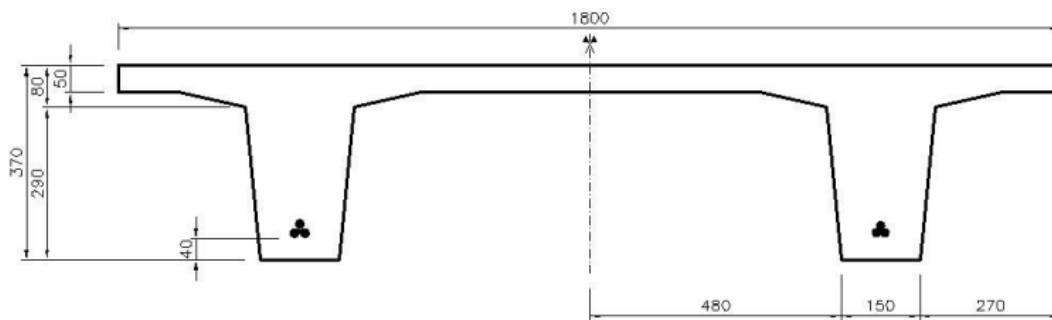
Obr. 32 Zastřešení nádrže biologického čištění odpadní vody, zdroj: [36]

Na zastřešení bylo použito 160 ks prefabrikátů ve tvaru „vlny“ a 20 plochých prefabrikátů. Prefabrikáty ve tvaru vlny jsou $1,8 \text{ m}$ široké, $11,8 \text{ m}$ dlouhé a převýšené o $2,8 \text{ m}$. Panel je tvořen žebrem o rozměrech $280 \times 200 \text{ mm}$ a konzolami o tloušťce $80\text{--}50 \text{ mm}$. V žebře prefabrikovaného panelu jsou umístěny tři předpínací kabely typu monostrand. Panely byly předepnuty při dosažení pevnosti 130 MPa na skládce prefabrikátů a osazovány již s aktivovaným předpětím. Na horním konci jsou prefabrikáty osazeny na sloupky (taktéž z UHPC) a na spodním konci na plochý prefabrikovaný panel (obr. 32), který je rovněž vytvořen z UHPC. Panel je již z výroby osazen protiskluznou texturou na horním povrchu pro usnadnění pohybu obsluhy čistírny odpadních vod [36].

Použitý UHPC dosahuje při objemové hmotnosti 2750 kg/m^3 pevnosti v tlaku 165 MPa a pevnosti v tahu 8 MPa . Směs byla ukládána do bednění bez použití vibrace a prvky nebyli tepelně ošetřovány. [36]



Obr. 33 Příčný řez střešním panelem ve tvaru "vlny", zdroj: [36]



Obr. 34 Příčný řez rovným střešním panelem, zdroj: [36]

Mýtná brána pro most Millau, Francie (2006)

Předepnutá skořepinová konstrukce je vytvořena z 53 segmentů z UHPC. Celková šířka skořepinové konstrukce zastřešení dosahuje 98 m, rozpětí 28 m a výška segmentů 200-850 mm, tloušťka 100 mm. Konstrukce je předpnutá 28 lany. [7]



Obr. 35 Zastřešení mýtné brány viaduktu Millau, Francie [7]

Betonové sloupy skladiště cementu Detroit

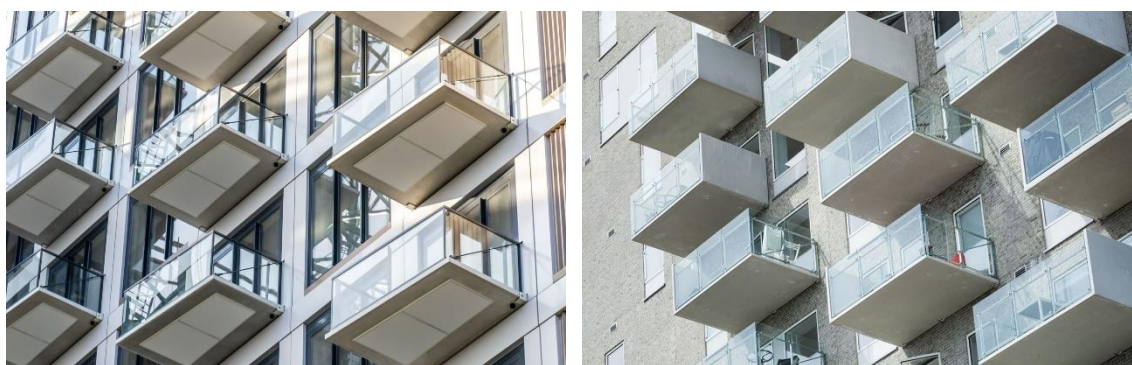
Štíhlé sloupy o rozměru 0,76 x 0,76 m mají na výšku 17 m. Sloupy jsou vyrobeny z UHPC a jsou vyztuženy pouze 4 ks předpínacích lan, každé o průměru 13 mm. Pokud by byli sloupy navrženy z běžného železobetonu, byl by jejich průřez přibližně 3x3 m [7]. Přibližná štíhlost sloupů dosahuje $\lambda = 77$ [-]. Dle klasifikace EC2 – NP31 se jedná o štíhlé sloupy⁴.



Obr. 36 Sloupy ve skladišti cementu Detroit, [7]

Balkonové předsazené konstrukce

Předsazené konstrukce z UHPC realizované na několik desítkách objektů v Dánsku. UHPC se hodí pro tento účel nejenom z hlediska svých mechanických vlastností, ale i s ohledem na svou vynikající trvanlivost. Balkonové konstrukce jsou nejčastěji navrženy jako tenká deska z UHPC tl. cca 100 mm doplněná ocelovými táhly v rovině zábradlí. U některých aplikací bylo ocelové táhlo nahrazeno nosným zábradlím. Tahovou sílu přenáší samotný UHPC v „zábradelní“ části, popř je doplněn betonářskou výztuží. V další variantě je využíváno spojení dvou balkonů v jednu tuhou „krabici“, která je zavěšena na nosnou konstrukci objektu [64].



Obr. 37 Předsazené konstrukce z UHPC, zdroj: [64]

⁴ $\lambda = 77 > \lambda_{lim} = 75$ – limitní hodnota štíhlosti určená dle české národní přílohy EC2-NP31

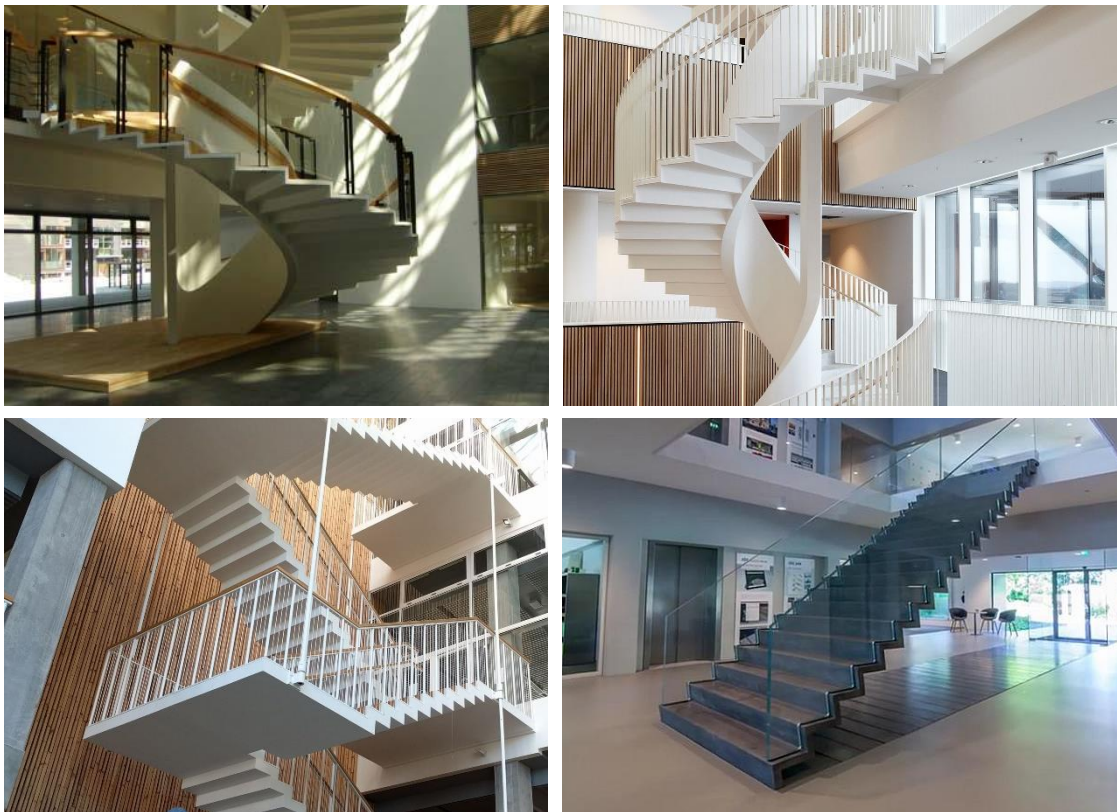
Štíhlost λ je definována jako poměr vzpěrné (účinné délky) a poloměr setrvačnosti betonového průřezu bez trhlín



Obr. 38 Předsazené konstrukce z UHPC, zdroj: [64]

Schodiště z UHPC

UHPC umožňuje vytvoření velice subtilních konstrukcí schodišť. Zásadní výhoda v porovnání se schodišti z běžného železobetonu, je tahová pevnost UHPC. Lze tak minimalizovat použití klasické betonářské výztuže na naprosté minimum, např. pouze v hlavním nosném žebříku a schodišťové stupně vytvořit pouze z UHPC.



Obr. 39 Příklad schodišť z UHPC, zdroje: [63], [64]

Využití UHPC jako architektonických prvků

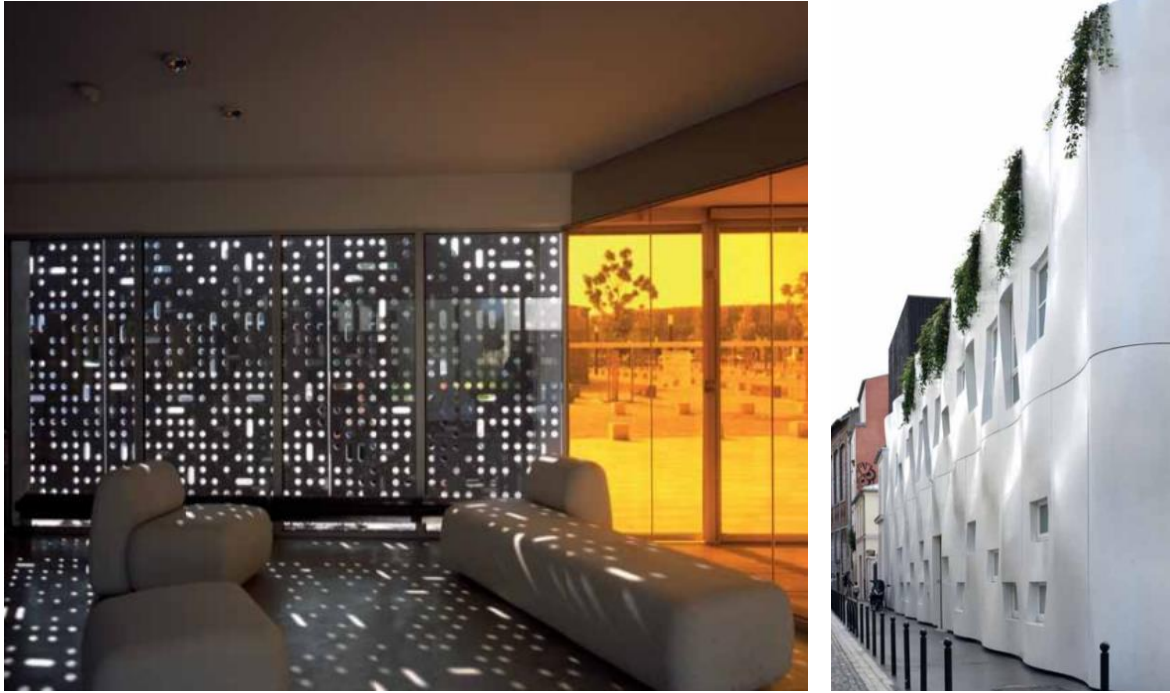
Vůbec nejčastěji se z UHPC v současnosti vytváří fasádní panely plnící zejména architektonickou funkci. V zásadě lze fasádní prvky rozdělit na prvky tvořící plnohodnotnou funkci fasády (ochrana před deštěm, větrem a v případě sendvičových panelů i s tepelně technickými vlastnosti) a fasádní panely předsazené hlavní fasádě. Druhý zmiňovaný typ nalezneme např. v muzeu MuCEM, kde chrání meziprostor mezi hlavní skleněnou fasádou před sluncem a větrem. Dalším příkladem je fasáda na budově Dánské univerzity (obr. 35), kde fasádní desky z UHPC vytváří osobitý architektonický vzhled. Fasádní desky mají rozměr 5x3 m a jsou 65 mm tlusté [64].



Obr. 40 Fasádní desky z UHPC, budova UNIVERSITY OF SOUTHERN DENMARK; zdroj: [64]



Obr. 41 Fasáda Autobusového nádraží RATP v Thiais, Paříž, převzata a upraveno z [31]



Obr. 42 dvojitá fasáda komunitního centra ve francouzském Sedanu (vlevo), samonosná sendvičová fasáda mateřské školy v Paříži (vpravo), převzato z [31]

Mezi první typ lze zařadit fasádu autobusového nádraží v Paříži (obr. 41). Tato fasáda obsahuje na svém povrchu výstupky, podobné nalezneme na kostičkách lego, které velmi dobře ilustrují vysokou tekutost UHPC (Ductal) během výroby [31].

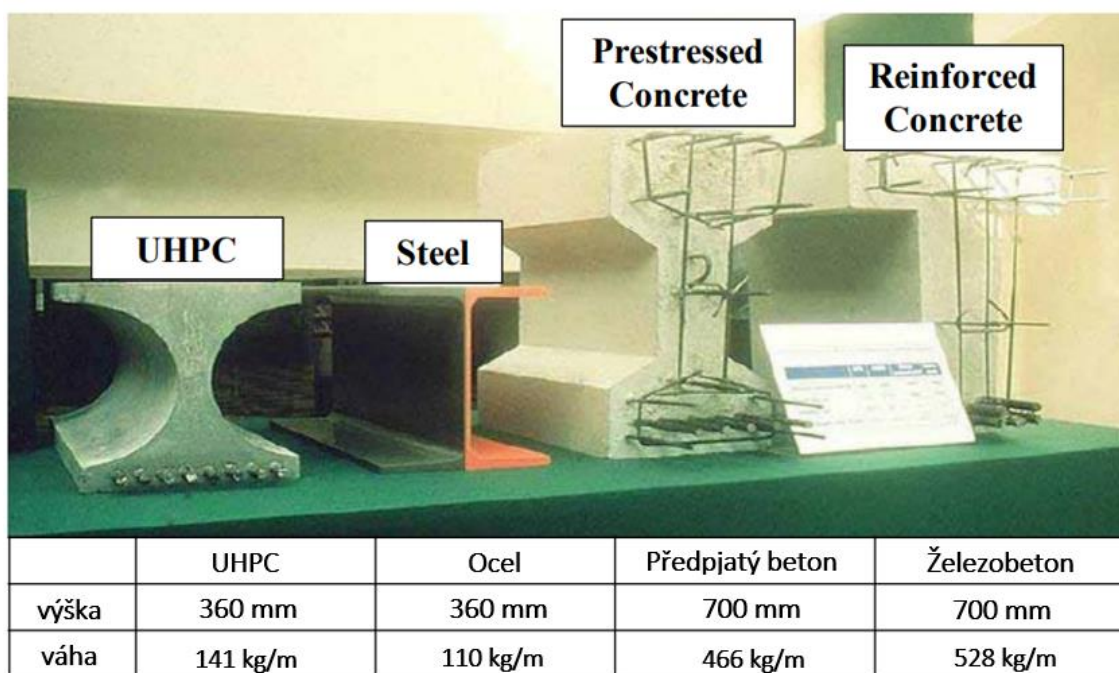
V roce 2012 byla v Paříži realizována mateřská školka se sendvičovými panely, kde svrchní část sendvičového panelu tvoří deska z UHPC tl. 30 mm. Nosný systém školky tvoří monolitický skelet z běžného betonu. Na skelet jsou zavěšeny fasádní sendvičové panely s tepelnou izolací tl. 200–300 mm a dvojitě zakřivenými deskami z UHPC [31].

Výhodou fasádních desek z UHPC je snížení množství spár oproti klasickým např. hliníkovým fasádním panelům. Fasády u UHPC vytvářejí větší bezespáré plochy a vypadají tak elegantněji. Další významnou výhodou je trvanlivost. Desky z UHPC netrpí vlivem UV záření, karbonatací, abrazí a jsou odolné i proti biologické korozi. Zejména jsou vhodné do velmi agresivního prostředí (průmyslové areály, přístavy) a jsou snadno čistitelné tlakovou vodou bez rizika poškození. Vysoká kvalita UHPC umožňuje výrobu fasádních panelů přibližně od tl. 20 mm [31].

2.4.2 Perspektivní oblasti využití UHPC

V této kapitole jsou popsány perspektivní oblasti použití UHPC v konstrukcích pozemních staveb. Snahou autora je porovnat běžně používané betonové prvky s jejich alternativami zhotovené z UHPC.

Jak již bylo zmíněno, zatím je UHPC celosvětově využíván pouze minimálně. Jeho rozšíření brání především vysoká technologická náročnost výroby a s tím související vysoká cena. S rostoucím množstvím praktických aplikací bude cena UHPC klesat. Cena za m^3 UHPC pravděpodobně nikdy nebude srovnatelná s cenou dnes běžně používaného betonu. Množství použitého UHPC k vytvoření srovnatelně únosného prvku (např. úhlové opěrné stěny) lze ale při optimalizaci geometrie prvku podstatně snížit. UHPC poskytuje výrazně vyšší trvanlivost, čímž se hodí pro použití v agresivním prostředí. Zároveň mohou být prvky z UHPC subtilnější než prvky z běžně používaného betonu při zachování shodné únosnosti (výrazná úspora použitého množství betonu). S masivnějším rozšířením konstrukcí z UHPC lze v budoucnu očekávat jeho lepší konkurenceschopnost v porovnání s prvky z běžného betonu.



Obr. 43 Porovnání průřezů z UHPC, oceli, předpjatého betonu a železobetonu. Všechny průřezy mají shodný momentem únosnosti. Převzato a upraveno z: [29]

Vzhledem k náročné technologii výroby konstrukcí z UHPC a značnému smršťování výsledné konstrukce bez tepelného ošetřování, je UHPC spíše předurčen pro použití v prefabrikovaných prvcích, avšak jeho použití pro monolitické aplikace na stavbě není vyloučeno.

Střešní prefabrikované panely

Inspirace vychází ze zastřešení železniční stanice Montpellier. Střešní panely z UHPC v sobě mohou kombinovat několik funkcí, kterými lze odůvodnit vysoká cena UHPC a lze tak přesvědčit investory o výhodách a smysluplnosti použití tohoto druhu zastřešení:

- nosná konstrukce (primární funkce)
- vodonepropustnost UHPC – není nutné realizovat hydroizolační plášť
- možnost perforace panelů pro zajištění osvětlení interiérů denním světlem
- subtilní konstrukce vytváří pěkný architektonický vzhled
- vysoká trvanlivost a odolnost proti agresivnímu prostředí
- nízká hmotnost panelů – jednodušší a rychlejší výstavba
- nižší ekologická zátěž díky použití menšího množství betonu

Mezi zásadní překážky rozšíření UHPC patří vysoké finanční náklady. Aby bylo použití UHPC efektivní, musí být průřezy prvků optimalizovány. Vysokou cenu prvku tvoří nejen cena samotného materiálu, ale i vyšší náklady na návrh těchto prvků a technologii jejich provádění (návrh směsi, ošetřování, tvar bednění atd.). Z hlediska stavební fyziky u většiny pozemních staveb vyvstává otázka tepelné izolace vnější obálky stavby. Přidáním vrstvy tepelné izolace (s tloušťkou násobně větší, než je tloušťka UHPC prvku) dojde ke snížení architektonických kvalit. I přesto lze použití prvků zastřešení vyrobených z UHPC doporučit.

Pro maximálně efektivní využití prefabrikovaných střešních panelů, je třeba vhodně navrhnout jejich geometrii. Vzhledem ke snaze dosažení co nejmenší tloušťky prvků, jsou preferovány prvky s „klenbovým“ působením, kdy je samotnou geometrií prvku sníženo namáhání ohybovým momentem za cenu zvýšení normálové síly v prvku. Podmínkou je dostatečně tuhé uložení, které zajistí přenos vodorovných reakcí v podporách na obou stranách a analýza vlivu zatížení teplotou na velikost vnitřních sil.

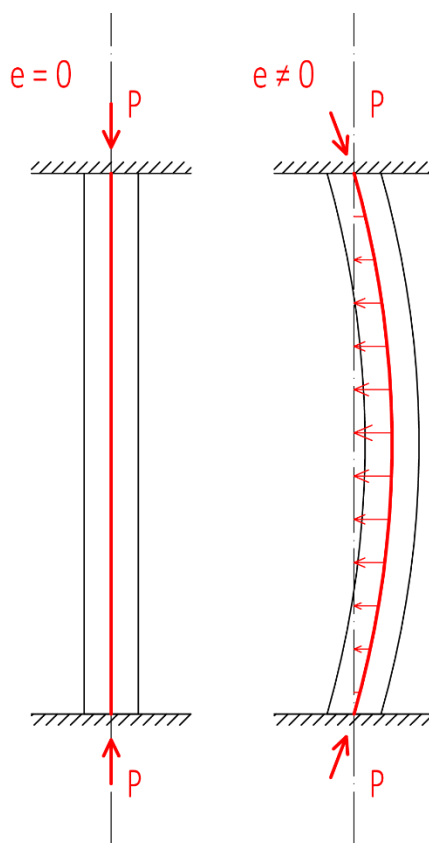


Obr. 44 Klenuté prvky zastřešení z UHPC – stanice TGV Montpellier [28]

Sloupy

V předchozí kapitole jsou na dvou příkladech uvedeny sloupy z UHPC. V muzeu MuCEM byl zvolen materiál UHPC zejména z důvodu složitého tvaru „stromových“ sloupů a agresivního prostředí mořského klima. Druhá popisovaná konstrukce je ve skladu cementu ve městě Detroit. V obou aplikacích jsou sloupy předepnuté. Předpětí má pozitivní vliv na stabilitu sloupů a volba UHPC je výhodná z hlediska velké tlakové rezervy v prvku. Pokud totiž sečteme napětí v betonu od předpětí a napětí v betonu od zatížení, pravděpodobně bychom se s běžným betonem dostali do oblasti nelineárního dotvarování betonu (v extrémním případě až za tlakovou pevnost v betonu). S ohledem na výpočet ztráty předpětí je vhodnější zůstat v oblasti lineárního dotvarování. Z tohoto důvodu je vhodné použít UHPC. Sloupy nejsou vyztuženy běžnou betonářskou výztuží (s výjimkou kotevních oblastí přepínacího systému).

Na obr. 45 je zobrazen princip pozitivního vlivu předpětí na stabilitu štíhlého sloupu. Předpětí je vedeno centricky (přímý kabel) a jedná se o předpětí se soudržností. Pokud dojde k vychýlení sloupu vlivem excentrického zatížení, dojde i k vychýlení předpínacích lan. Protože poloha kotevních oblastí se nemění (pata a hlava sloupu), dojde k protažení předpínacího kabelu. Dle Hookova zákona platí, že při protažení kabelu se v něm zvýší síla. Kabel má tedy snahu vrátit se do původní pozice a čím je výchylka sloupu větší, tím větší síla v předpínacím kabelu proti ní působí. Takováto konstrukce je nazývána jako samostabilizující.



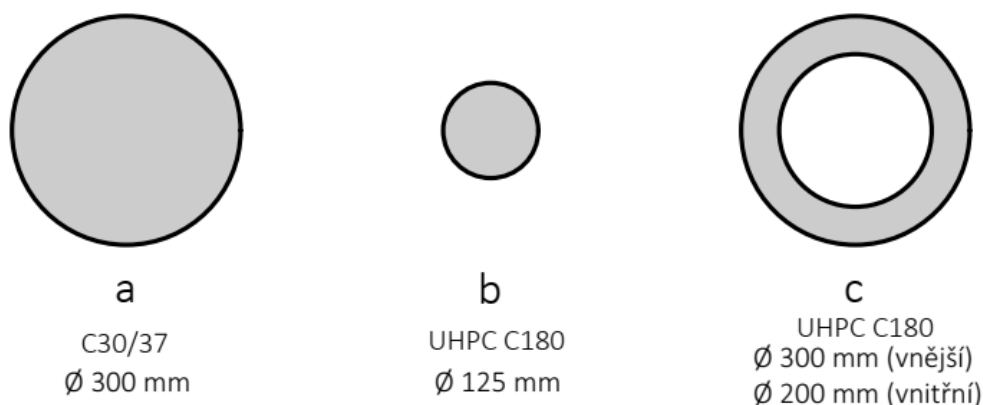
Obr. 45 Schéma principu "samostabilizující" konstrukce předpjatého betonového sloupu, vlastní zdroj

Duté sloupky z UHPC

Vysoká pevnost UHPC v tlaku přímo vybízí pro použití tohoto materiálu pro zmenšení rozměrů sloupů v porovnání s betony běžných pevností, popř. s HPC. Uvažujeme-li sloup zatížený normálovou silou $N_{xd} = 1400$ kN, pak potřebné rozměry sloupu jsou:

Tab. 6 Porovnání průřezů sloupu z běžného betonu a z UHPC při shodném zatížení

	Ø [mm]	Plocha [%]	N_x [kN]	σ_x [MPa]	Beton	f_{ck} [MPa]	f_{cd} [MPa]
průřez a	300	100%	1400	19.8	C30/37	30	20
průřez b	125	17%	1400	114.1	C180	180	120
průřez c	300; 200	56%	1400	35.7	C180	180	120



Obr. 46 Porovnání průřezů sloupu z běžného betonu a UHPC při shodném zatížení, vlastní zdroj

Dle tohoto příkladu lze redukovat průřez sloupů až o 83 % (*průřez b* vs *průřez a*). Zásadním problémem zmenšení průřezu je ale stabilita sloupů. Maximální únosnost sloupu z UHPC nebude závislá na tlakové pevnosti materiálu, ale na jeho stabilitě. Pro zachování stability a zároveň využití vysokých užitných vlastností UHPC je nutné průřezy optimalizovat. Zachováním vnějšího průměru a odebráním materiálu kolem středu neutrální osy průřezu získáme dutý průřez. Výhodou *průřezu c* je zmenšení momentu setrvačnosti pouze o 20 % oproti *průřezu a*, při snížení množství použitého materiálu o 44 %. Pro větší rozměry porovnávaných sloupů, bude výhoda dutých sloupů znatelnější. Navzdory odebrání materiálu ze středu průřezu má dutý betonový průřez dostatečnou tlakovou rezervu pro možnost předepnutí. Předpínání dutých ŽB sloupů se běžně používá pro betonové sloupky elektrického vedení, nebo osvětlovací stožáry. Pozitivní účinek předpětí na stabilitu sloupů je popsán na předchozí straně.

Výhody dutých sloupů z UHPC:

- využití výborných mechanicko-fyzikálních vlastností UHPC (pevnost, trvanlivost), při současném efektivním využití materiálu (snížení nákladů)
- snížení hmotnosti sloupů (klidně až o ½)
- možnost vedení instalací (např. dešťového svodu) středem sloupu z architektonických důvodů, např. v rozlehlých výstavních prostorech

Výroba dutých sloupů je primárně uvažovaná ve výrobních pomocí technologie odstředivě litého betonu. Betonáž dutých monolitických sloupů na stavbě je teoreticky také možná, např. s vložením ocelové trubky do bednění a její vytažení po zatuhnutí



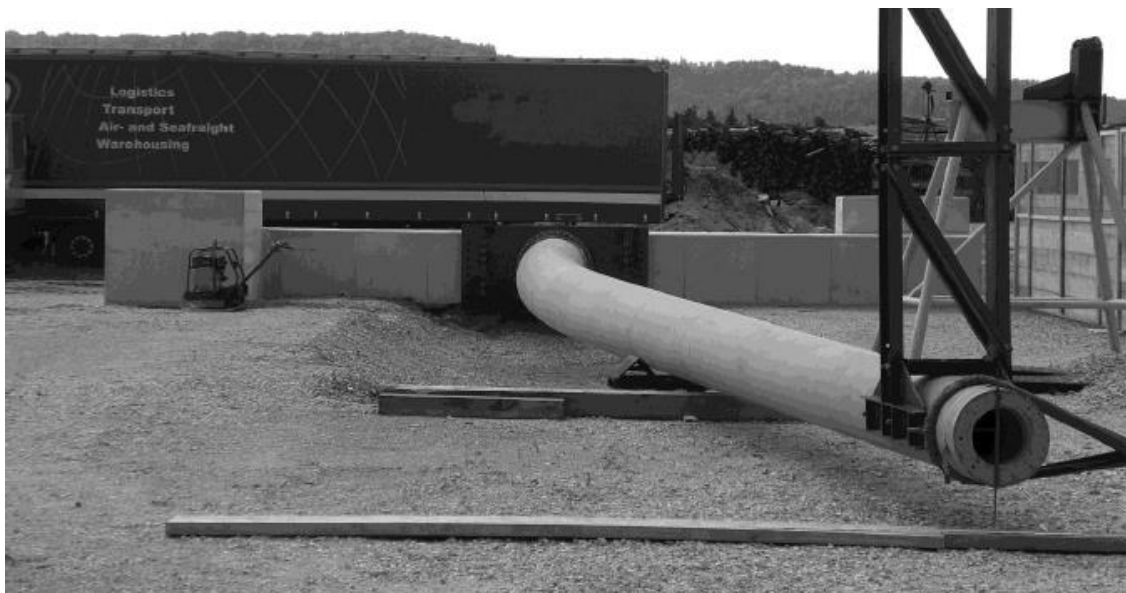
Obr. 47 Telekomunikační stožár vyrobený z UHPC výšky 22 m, zdroj: [40]

betonu, popř. ponechání trubky ve sloupu. Nicméně výroba dutých sloupů z UHPC na stavbě je ekonomicky velmi nákladná a vzhledem ke geometrii, špatným podmínkám ošetřování a ekonomické nákladnosti se nedoporučuje.

Na UHPC sympozium v roce 2012 byl představen materiálový výzkum UHPC pro výrobu dutých sloupů vytvořených technologií odstředivého lití [40]. Výzkum prokázal, že je možné průmyslově vyrábět duté kruhové sloupy z UHPC o pevnostech až 170 MPa vyztužené běžnou betonářskou výztuží, nebo i s výztuží předpínací. Využití těchto sloupů je dle autorů pro sloupy elektrického vedení, telekomunikační stožáry, nebo nosné sloupy v běžných konstrukcích. Způsob výroby

sloupů odstředivou technologií je poměrně specifický a je třeba mu uzpůsobit recepturu čerstvé směsi UHPC [40]. Pro navrhování dutých sloupů lze jako základní podklad využít⁵:

- ČSN EN 12843: Betonové prefabrikáty – stožáry a sloupy
- ČSN EN 40-4: Osvětlovací stožáry; část 4 – požadavky na osvětlovací stožáry ze železobetonu a předepjatého betonu.

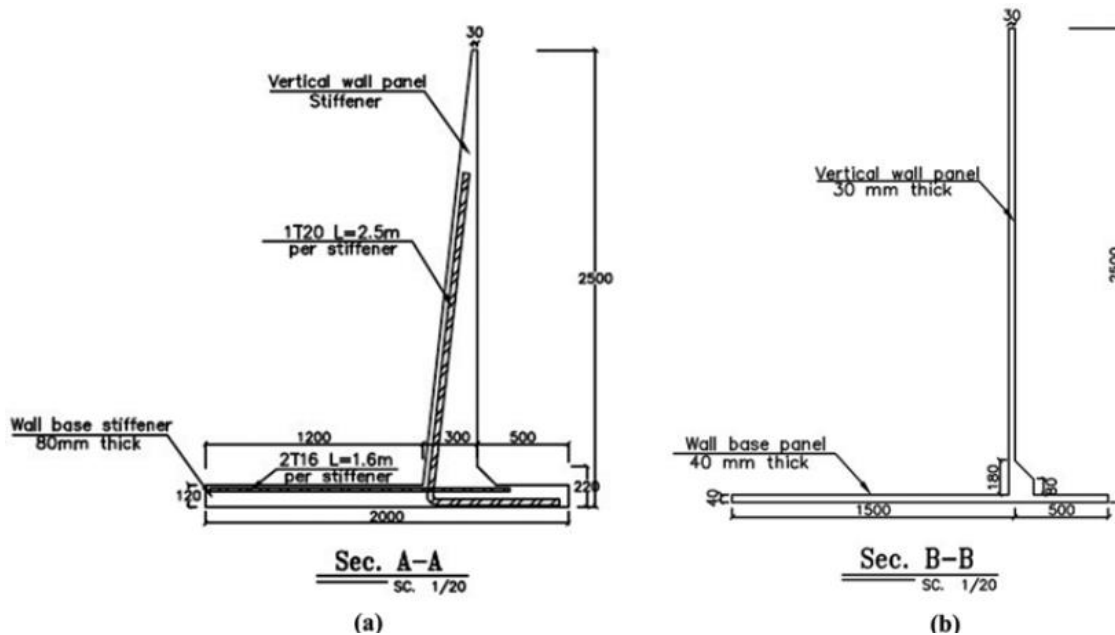


Obr. 48 Sloup z UHPC vedení vysokého napětí vysoký 26 m při ohybové zkoušce, zdroj: [40]

⁵ V těchto normách jsou popsány zejména zkušební postupy prefabrikovaných sloupů, včetně sloupů předpjatých. Rozsah norem odpovídá normovým třídám betonu dle EC2, při výrobě z UHPC je třeba vždy experimentálně ověřit

Opěrné stěny

Jako velmi perspektivní oblast využití se jeví použití v prefabrikovaných úhlových opěrných stěnách. Opěrné stěny z UHPC mohou být výrazně subtilnější než stěny z běžného železobetonu. Studie představená v roce 2016 [41] reprezentuje budoucí možnosti využití UHPC. Úhlová stěna má výšku 2,5 m a půdorysné rozměry 2 x 2 m. Stěna je tvořena dvojicí tenkých desek – základová deska tl. 40 mm a svislá deska tl. 30 mm. Desky jsou na sebe kolmé a jsou vyztuženy dvojicí žebér [41].



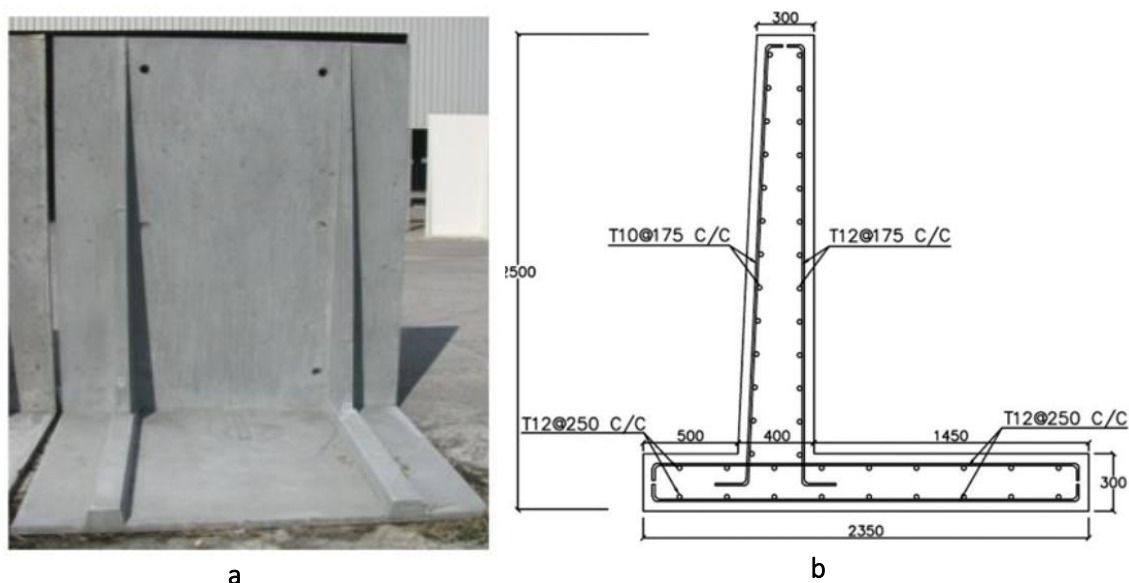
Obr. 49 Prefabrikovaná opěrná stěna z UHPC, řez žebrem (a) a řez mimo žebro (b), zdroj: [41]

Každé žebro je vyztuženo dvěma pruty betonářské výztuže. Ve srovnání se stejně vysokou prefabrikovanou stěnou z železobetonu dosahuje stěna z UHPC [41]:

- 86% menší spotřeby materiálu
- 60% menší emise CO₂ vzniklé při její výrobě
- 57% menší množství celkové energie potřebné na její výrobu
- výrazně vyšší životnosti, vzhledem k vysoké trvanlivosti UHPC
- vyšší kvality povrchu a udržení vzhledu po delší dobu
- 7x nižší hmotnost (503,5 kg/m vs 3525,3 kg/m)
- 5x nižší hmotnost použité betonářské výztuže

Díky nižší hmotnosti lze stěnu vyrábět širší, než je běžný 1 m v případě prefabrikovaných ŽB stěn. Nižší hmotnost také znamená využití slabších zvedacích prostředků. Výborná trvanlivost UHPC zaručuje dlouhou životnost konstrukce, a to i v silně agresivním prostředí. Všechny tyto faktory přispívají k rychlejší realizaci a návratnosti vyšší vstupní investice. Opěrná stěna z UHPC je po celou dobu životnosti prakticky bezúdržbová.

Použitý UHPC dosahoval tlakové pevnosti 150 MPa (28 dní), tahová pevnost byla zkoušena tříbodovou zkouškou tahu za ohybu a byla stanovena na 27 MPa. Opěrná stěna byla zhotovena v ocelové formě a hutněna příložnými vibrátory [41].

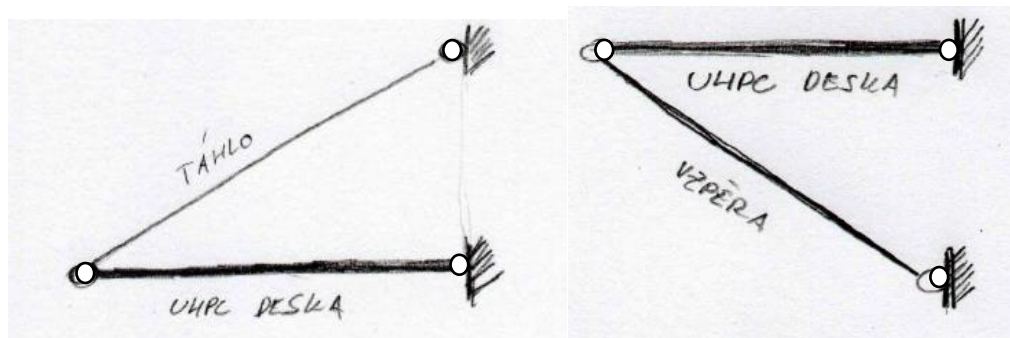


Obr. 50 Úhlová opěrná stěna z UHPC, zadní pohled (a) a srovnatelná varianta z ŽB (b), zdroj: [41]

Balkonové konstrukce

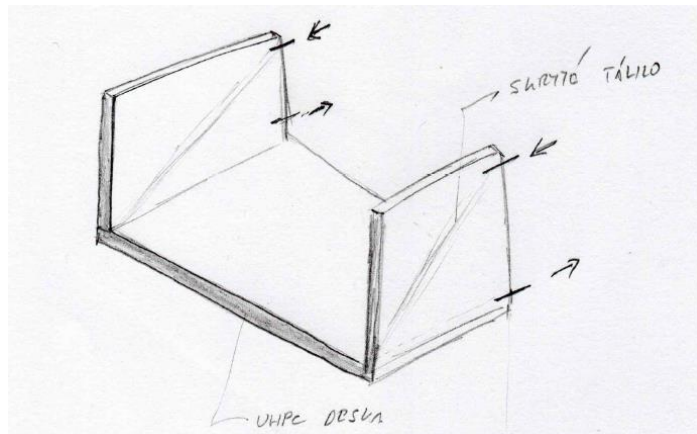
Z UHPC lze vytvořit velmi subtilní konstrukce balkonů. Subtilní balkonové konstrukce jsou v porovnání s běžnými betonovými balkony výrazně lehčí a umožňují tak dodatečnou instalaci i na již existující stavby, bez výrazného přitížení. Běžně jsou železobetonové balkonové konstrukce posuzovány jako konzolové desky. Balkony jsou typicky připojeny přes I-sonosníky s vhodně navrženou výztuží na tažené straně balkonové konzoly. Subtilní balkonová deska může dosahovat tloušťky okolo 40 mm. V takto malé tloušťce je rameno vnitřních sil velmi krátké a tahové síly ve vetknutí jsou tak extrémní. Proto je třeba balkonové konstrukce z UHPC navrhovat dle jiného statického schématu. V zásadě existují dvě základní možnosti:

- a) deska s táhlem, nebo se vzpěrou



Obr. 51 Statické schéma subtilních balkonových desek z UHPC

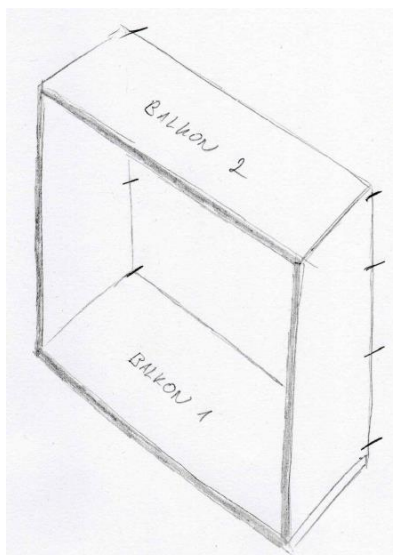
Táhlo může být přiznáno, nebo skryto v betonovém zábradlí. Kotvení do konstrukce může být provedeno lokálně přes ocelové šrouby, nebo v rovině stropní desky přes speciální Isonosník pro tenké balkonové desky z UHPC.



Obr. 52 Balkonová konstrukce z UHPC ve tvaru písmena "U"

b) sdužené balkonové konstrukce ve formě tuhých krabic

Architektonicky zajímavé je propojení dvou, nebo více balkonů, tuhými stěnami. Toto řešení vytvoří „tuhé krabice“. Tyto „tuhé krabice“ se následně zavěsí na fasádu objektu. Propojení s objektem je uvažováno lokálně. S výhodou lze toto řešení provést na starších zděných objektech, kdy mohou být „krabice“ kotveny pouze v úrovních jednotlivých pater do stropní desky.

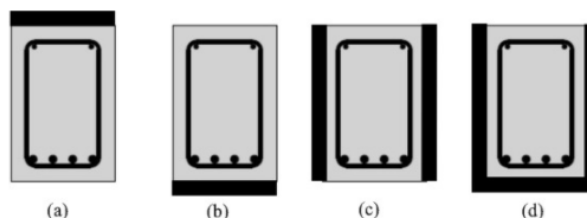


Obr. 53 Sdužené balkony do tuhé krabice

Vzhledem k vysoké trvanlivosti, nemusí být balkonové konstrukce z UHPC opatřovány žádnými dodatečnými ochrannými nátěry, je ale nutné upravit povrch UHPC tak, aby byl dostatečně protiskluzný. Praktické příklady balkonových konstrukcí obou typů jsou uvedeny v kapitole 2.4.1.

Zesilování stropních konstrukcí

V roce 2019 byl v časopise *Engineering structures* 205 publikován článek [43], který shrnuje několik let výzkumu v oblasti zesilování trámů pomocí UHPC pro zvýšení jejich únosnosti v ohybu. Článek vychází z 16ti vědeckých studií na toto téma. Dle [43] lze rozlišit čtyři základní možnosti umístění zesilující vrstvy z UHPC.



Obr. 54 Umístění zesilující vrstvy na ŽB trámu: tlačení (a), tažení (b), ze stran (c) a obetonování tažené části, včetně boků průřezu; zdroj: [43]

Dále je možná kombinace prvních dvou způsobů a nadbetonování vrstvy UHPC na tlačenu i na taženou stranu.

Varianta aplikace vrstvy UHPC ze stran trámu (obr. 54c) vykazuje dle [43] zvýšení únosnosti v ohybu přibližně od 35 do 45 % v závislosti na stavu a vlastnostech zesilovaného trámu. V případě aplikace UHPC ze 3 stran (obr. 54d) moment únosnosti může vzrůst až o 90 %, úpravou ale dojde ke snížení neutrální osy, přetvoření tlačných vláken zesilovaného prvku je vyšší a může tak dojít k jeho křehkému porušení (drcení).

Soudržnost s původním povrchem

Účinnost tohoto způsobu zesilování do značné míry závisí na dobré soudržnosti s povrchem zesilovaného prvku. Soudržnost lze zvýšit mechanicky, chemicky, nebo kombinací obou způsobů. Mechanicky lze zvýšit soudržnost např. otryskáním pískem, obnažením kameniva, popř. odstranění krycí vrstvy zesilovaného prvku. Chemicky se zvyšuje soudržnost vytvořením adhezních můstků s využitím epoxidových pryskyřic. Typická tloušťka adhezního můstku z epoxidové pryskyřice se přibližně pohybuje od 2 do 5 mm. [43]

Zesilovací vrstvy UHPC lze také připevňovat jako prefabrikáty. Soudržnosti se zesilovanou konstrukcí je poté dosaženo mechanickým kotvením skrz otvory vynechané v prefabrikovaném panelu zesilovací vrstvy v kombinaci s vytvořením epoxidových adhezních můstků. [43]

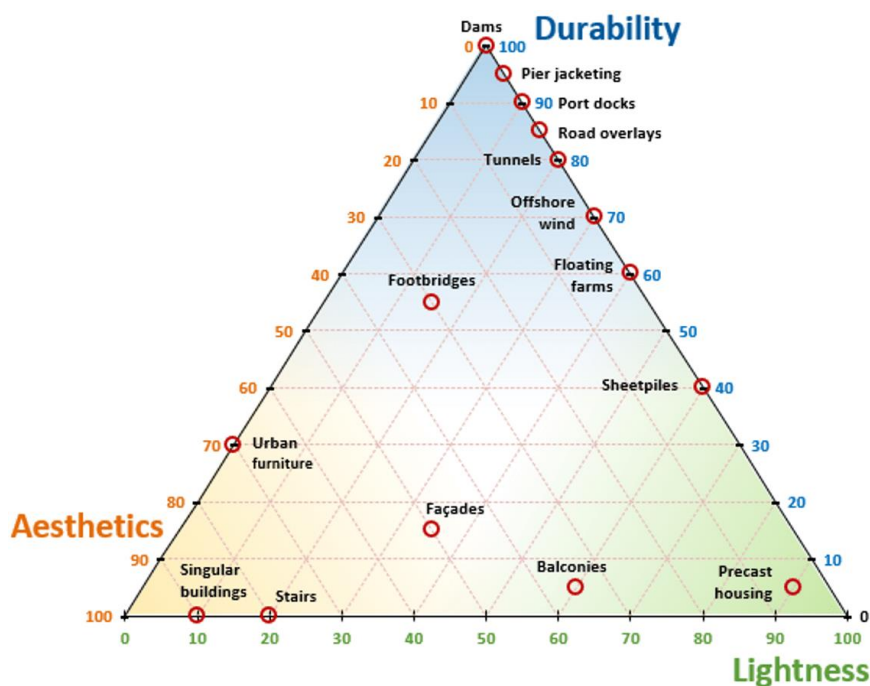
Nenosné prvky

Nenosné prvky vyrobené z UHPC jsou zde uvedeny pro doplnění perspektivních oblastí využití UHPC. V současnosti jsou již poměrně běžně využívány fasádní panely z UHPC (viz kapitola 2.4.1), veřejný mobiliář (lavičky, stoly, zábradlí, ...) a mnoho dalších nekonstrukčních prvků. Na tyto nenosné prvky jsou kladeny mnohonásobně nižší požadavky než na nosné prvky konstrukcí. Vyskytují se tedy v mnohem větší míře. Výrobci betonu díky nim získávají zkušenosti s tímto novým materiálem a tím „prošlapávají“ cestu k masivnějšímu rozšíření UHPC i v nosných konstrukcích pozemních staveb a dopravních staveb i inženýrských konstrukcí.

Typickou aplikací v inženýrských konstrukcích je výroba kanalizačních trub, kde se uplatní využití výborné chemické odolnosti UHPC. Kanalizační trouby z UHPC mohou být navíc výrazně tenčí, lehčí a díky tomu urychlují výstavbu (obnovu) kanalizačních sítí.



Obr. 55 Snížení tl. stěn kanalizační trouby v porovnání s běžným betonem [52]



Obr. 56 Diagram shrnující aktuální oblasti využití UHPC ve stavebnictví s rozlišením důležitosti jednotlivých vlastností, převzato z [50].

3 Navrhování prvků z UHPC

3.1 Normy a metodiky

V současnosti neexistuje v České republice normový dokument, podle kterého by se daly navrhovat konstrukce a prvky z UHPC. V roce 2015 vznikla pod vedením Kloknerova ústavu metodika s cílem připravit první podklad pro používání UHPC v České republice. Jedná se prozatím o nejdetailnější dokument k problematice návrhu UHPC v českém jazyce. Pro detailnější informace a normový přístup je nutné zvolit zahraniční dokumenty. Vhodným normovým podkladem je dvojice francouzských národních dodatků k Eurokódu 2. Eurokód 2 je v ČR masivně používán pro návrh běžných železobetonových konstrukcí a použití dodatků, které jsou s ním v souladu a pouze jej doplňují je snadné.

ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2 [1]

První generace Eurokódu 2 uvažuje maximální pevnostní třídu betonu C90/105. Pro návrh betonů vyšších tříd nelze použít, protože vztahy uvedené v normě již nemusí být platné. S touto normou souvisí i norma *ČSN EN 206 - Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda [14]*, která platí pro zkoušení betonu do třídy C100/115. V současnosti se připravuje druhá generace Eurokódu, kde by mělo dojít ke zvýšení použitelných pevností betonu.

***fib* Model Code 2010 [4]**

Mezinárodně uznávaný dokument vytvořený švýcarskou institucí *International Federation for Structural Concrete*. Slouží jako podklad pro budoucí normy a předpisy. Nově vytvářené normy mohou mít odlišný způsob navrhování a posuzování prvků, neměly by však být s Model Codem v rozporu. Model Code 2010 uvažuje maximální pevnost betonu C120 a uvádí postupy pro zkoušení, navrhování a posuzování prvků s rozptýlenou výztuží.

***fib* Model Code 2020**

Nová generace Model Codu. Základní myšlenkou je dlouhodobá udržitelnost betonových konstrukcí, založená na sociálních potřebách společnosti, přiměřených nákladů na životní cyklus konstrukce a dopadů na životní prostředí [32]. Pro naplnění této myšlenky bude zapotřebí využívat nové materiály (např. UHPC) a technologie. MC 2020 si klade za cíl vytvořit podklad pro správný a efektivní návrh betonových konstrukcí z nově vyvíjených materiálů (včetně UHPC) a zároveň přinést nové standardizované postupy pro posuzování stávajících konstrukcí. [49]

UHPC Standards NF P18-470 [3] a UHPC Standards NF P 18-710 [2]

Francouzské národní dodatky k Eurokódu 2 vydané v roce 2016. NF P18-470 stanovuje požadavky na návrh UHPC a materiálové zkoušky. NF P18-710 uvádí požadavky na navrhování prvků z UHPC. Dodatek počítá s charakteristickou pevností v tlaku 150 - 250 MPa, vysokou reziduální pevností v tahu dosaženou dávkou drátků v množství vyšším než 2 % objemu. Pevnost cementové matrice v tahu musí být vyšší než 6 MPa.

ACI PRC-239-18: UHPC: An Emerging Technology Report (2018)

Americká norma pro výrobu, zkoušení a navrhování prvků z UHPC. Norma není vytvořena direktivně, ale spíše jako výchozí podklad pro základní seznámení s UHPC.

AFGC / SETRA Recommendations (2013)

Nejedná se o normu, ale o doporučující dokument pro navrhování a výrobu UHPC. Toto doporučení vychází z předběžného dokumentu „AFGC/SETRA Interim recommendations“ vydaného v roce 2002. Z poznatků získaných z využíváním této dvojice doporučujících dokumentů byly v roce 2016 vytvořeny již zmiňované francouzské národní dodatky k EC 2, tedy již plnohodnotné normové dokumenty.

Metodika Kloknerova ústavu – Aplikovaný výzkum UHPC pro prefabrikované prvky

V rámci aplikovaného výzkumu UHPC pro prefabrikované prvky TA01010269 prováděném Kloknerovým ústavem vznikly tři na sebe navazující metodiky.

Metodika 1 [5] se zabývá návrhem směsi UHPC a materiálovým zkoušením.

Metodika 2 [6] se zabývá navrhováním prvků z UHPC a **Metodika 3 [7]** slouží pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení. Metodiky platí pro UHPC s válcovou pevností od 110 MPa do 180 MPa s minimálním množstvím rovnoměrně rozmístěných ocelových drátků délky $L_f = 8-20$ mm ve výši 1,5 % objemu (120 kg/m^3). Tyto parametry zajišťují dostatečnou duktilitu výsledného materiálu. Metodika požaduje, aby rozptýlená výztuž zaručila dostatečnou reziduální pevnost materiálu i po vzniku trhlin a zabránila křehkému porušení prvku.

3.2 Navrhování dle Metodiky Kloknerova ústavu

Klasifikace UHPC

Dle této metodiky je klasifikace UHPC stejně jako klasifikace vláknobetonu založena na reziduální (zbytkové) pevnosti materiálu po vzniku první trhliny. Lineární (pružné) chování může být uvažováno za předpokladu uvážení reziduální ohybové pevnosti pro stav použitelnosti (f_{R1k}) a únosnosti (f_{R3k}), kde:

f_{R1k} odpovídá pevnosti v tahu za ohybu $f_{R,j}$ při velikosti rozevření trhliny $CMOD_1^6 = 0,5$ mm
 f_{R3k} odpovídá pevnosti v tahu za ohybu $f_{R,j}$ při velikosti rozevření trhliny $CMOD_3 = 2,5$ mm

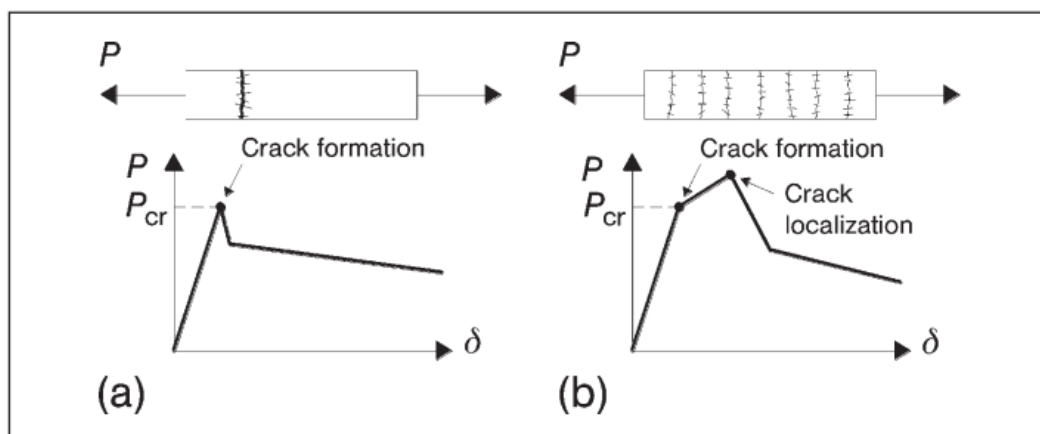
Třída reziduální pevnosti je učena poměrem f_{R3k} / f_{R1k} a vychází z definice uvedení v MC2010 [4]:

Tab. 7 Třídy reziduální pevnosti, převzato z [4], [6].

Třída reziduální pevnosti			
a	b	c	d
$0,5 < f_{R3k}/f_{R1k} < 0,7$	$0,7 < f_{R3k}/f_{R1k} < 0,9$	$0,9 < f_{R3k}/f_{R1k} < 1,1$	$1,1 < f_{R3k}/f_{R1k} < 1,3$

Podíl $f_{R3k} / f_{R1k} < 1,0$ popisuje změkčení betonu po vzniku trhliny. Naopak podíl $f_{R3k} / f_{R1k} > 1,0$ popisuje zpevnění betonu po vzniku trhliny. Během přechodného období se v ČR nesmí počítat s využitím větší pevnosti betonu v tahu než $f_{R3k} / f_{R1k} = 1,0$. Pro navrhování prvků bez betonářské výztuže musí vždy platit $0,5 < f_{R3k} / f_{R1k}$. Převzato z [5].

Toto hodnocení vychází z Model Code 2010 [4], který uvažuje pevnost betonu jen do hodnoty 120 MPa, ale připouští použití této klasifikace pro UHPC. Klasifikace je převzata Metodikou 2: Metodiky pro navrhování prvků z UHPC [6].



Obr. 57 Změkčení (a) a zpevnění (b) UHPC v tahu po vzniku trhliny. Převzato z [4].

⁶ CMOD – crack mouth opening displacement – rozevření trhliny

Dílčí součinitele spolehlivosti γ_c

Dílčí součinitele spolehlivosti γ_d doporučené Metodikou 2 s ohledem na úroveň kvality výroby pro mezní stav únosnosti [5]:

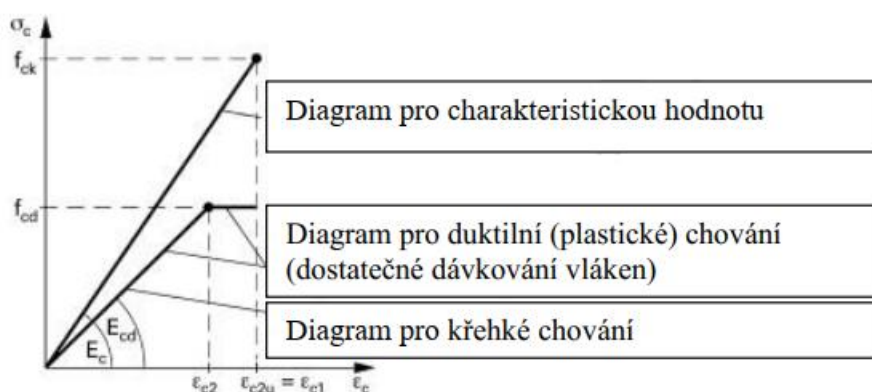
Tab. 8 *Dílčí součinitel spolehlivosti dle [6]*

Dle Metodiky 2	Návrhová situace	
	Trvalá a dočasná	Mimořádná
UHPC v tlaku		
Vysoká úroveň kvality	$\gamma_c = 1,35$	$\gamma_c = 1,15$
Normální úroveň kvality	$\gamma_c = 1,5$	$\gamma_c = 1,3$
Bez zaručené duktility	$\gamma_c = 1,20$	
UHPC v tahu (účinnost rozptýlené výztuže)		
(požaduje se vysoká úroveň kvality)		
Obecně	$\gamma_{cf} = 1,5$	$\gamma_{cf} = 1,3$
Pro lokální posouzení	$\gamma_{cf} = 2,1$	$\gamma_{cf} = 1,5$
Betonářská / předpínací výztuž	$\gamma_s = 1,15$	$\gamma_s = 1,0$

Vysoká úroveň kvality – výroba prefabrikovaných prvků ve výrobě s trvalou kontrolou betonové směsi a dodržení technologického postupu betonáže.

Zaručená duktilita – požadavek na splnění min. reziduální pevnosti (třída a) a minimálního množství rozptýlené výztuže 1,5 % objemu betonu (odpovídá 120 kg/m³).

Lokální posouzení – detaily betonových konstrukcí, jejichž selhání by mohlo ohrozit celkovou bezpečnost konstrukce. Jedná se například o kotevní oblasti předpínací výztuže.

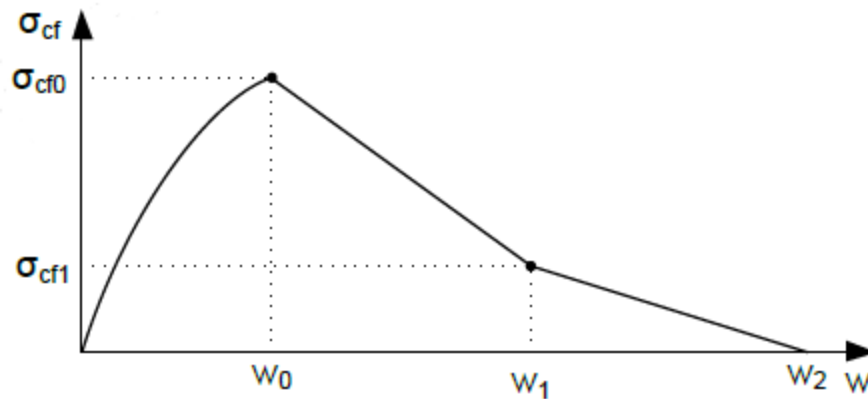
Pracovní diagram v tlaku

Obr. 58 *Pracovní diagram pro UHPC v tlaku, dle [6]*

Pracovní diagram v tahu

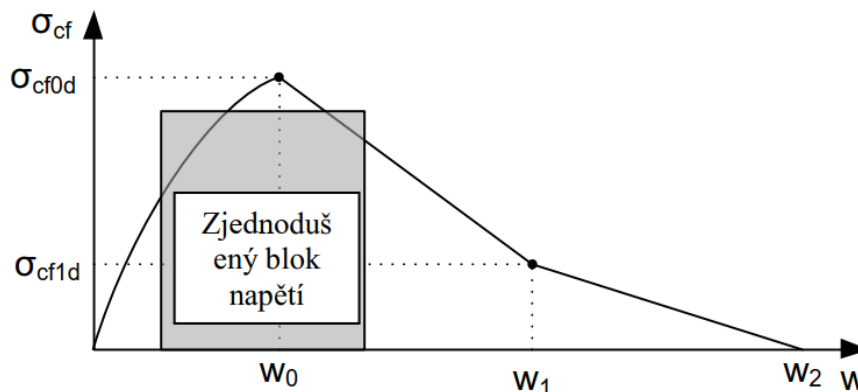
Dle metodiky 2 se v mezním stavu únosnosti uvažuje pouze s rozptýlenou výztuží. Tahová pevnost cementové matrice se zanedbává. Pro UHPC (a obecně vláknobeton), nelze použít klasický návrhový diagram se závislosti napětí (σ) na přetvoření (ϵ). Při použití klasického návrhového diagramu σ/ϵ by docházelo ke skreslení.

Návrhový diagram v tahu dle této metodiky je zobrazen na obrázku č.59.



Obr. 59 Návrhový diagram UHPC v tahu po vzniku trhlin, dle [6]

Návrhový pracovní diagram vyjadřuje závislost tahového napětí výztužných vláken na šířce trhliny je sestaven na základě zkoušky tříbodovým ohybem s vrubem. Referenční šířce trhliny $w_0 = 0,5$ mm odpovídá reprezentativní hodnota maximálního tahového napětí σ_{cf0} . Tento pracovní diagram lze dále zjednodušit na:



Obr. 60 Zjednodušený model návrhového diagramu působení UHPC v tahu, dle [6][5]

$w_0 = 0,5$ mm; $w_1 = 2,5$ mm; $w_2 = 0,5L_f$

;kde L_f je délka vláken

Orientace vláken v prvku – K faktor

Metodika 2 uvádí: „Příčinou velkého rozptylu změřených vlastností UHPC v tahu jsou technologické vlivy při výrobě a ukládání betonové směsi, především způsob míchání a lití do bednění. Některé systematické vlivy jsou zřejmé, např. v těsné blízkosti k bednění povrchů je většina drátků orientována paralelně s bedněním. Proto také mnoho zkoušených vlastností závisí na velikosti a geometrii zkušebního tělesa, u menších vzorků je větší pravděpodobnost stejnoměrnějšího rozptýlení drátků a jejich příznivější orientace vlivem blízkého povrchu bednění.“ [6]

3.3 Navrhování dle NF P18-710

Klasifikace UHPC

Klasifikace podle francouzského národního dodatku k EC2 je podobně jako metodika Kloknerova ústavu založena na chování materiálu v tahu po vzniku makrotrhliny.

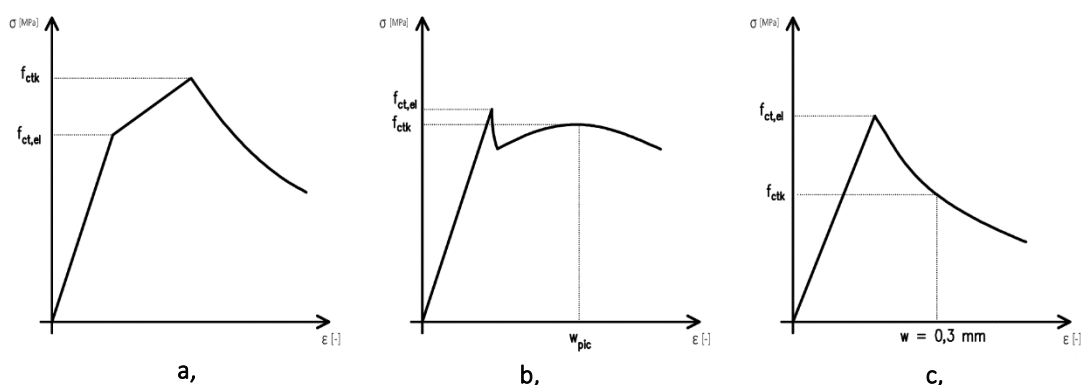
Tab. 9 Klasifikace UHPC dle [2]

Třída	1. podmínka	2. podmínka	Popis chování
T1*	$f_{ctfm}/K < f_{ctm,el}$	$f_{ctfk}/K < f_{ctk,el}$	tahové změkčení při prostém tahu
T2*	$f_{ctfm}/K \geq f_{ctm,el}$	$f_{ctfk}/K < f_{ctk,el}$	omezená schopnost tahového zpevnění
T3*	$f_{ctfm}/K \geq f_{ctm,el}$	$f_{ctfk}/K \geq f_{ctk,el}$	významné tahové zpevnění

pozn 1: pokud K faktor je roven 1.25, pak se třídy T1*, T2* a T3* shodují s označením tříd dle NF P18-470, T1, T2 a T3

pozn 2: tak jako je K faktor závislý na směru tahových napětí v prvku a může být odlišný v různých částech posuzovaného prvku, tak i návrhová třída může být v různých částech prvku odlišná

Pevnost UHPC v tahu po vzniku trhliny f_{ctfk} ⁷ (f_{ctfm})⁸ je stanovena na základě průběhu zkoušky. Zkouška může dopadnout 3-mi způsoby:



Obr. 61 Základní způsoby chování UHPC dle NF P18-710

Na obr.61 a, vykazuje materiál tahové zpevnění – lze klasifikovat jako T1*

Na obr.61 b, vykazuje materiál omezenou schopnost tahového zpevnění, po vzniku trhliny dojde k poklesu pevnosti, materiál ale dále vzdoruje a pevnost následně mírně narůstá, f_{ctk} se určí jako lokální maximum na křivce po vzniku trhliny – lze klasifikovat jako T2*

Na obr.61 c, vykazuje materiál tahové změkčení, na křivce není zřejmé lokální maximum, f_{ctk} se určí jako napětí odpovídající šířce rozevření trhliny $w = 0,3$ mm – lze klasifikovat jako T3*

⁷ f_{ctfk} – charakteristická pevnost v tahu získaná jako 5% spodní kvantil Gaussova rozdělení

⁸ f_{ctfm} – střední hodnota pevnosti v tahu stanovená z odpovídajícího množství zkušebních vzorků

Orientace vláken v prvku – K faktor

K faktor je součinitel zohledňující vliv rozmístění vláken v prvku a vychází z MC2010 [4]. Na orientaci vláken v prvku výrazně závisí tahová pevnost UHPC v tahu. Norma NF P18-710 stanovuje tento vliv pomocí lokálního a globálního K faktoru:

K_{local} – stanovuje se pro lokální oblasti, ve kterých je třeba podrobně zohlednit orientaci vláken. Jedná se např. o místa pod kotevními prvky předpětí, místa se změnou průřezu, místa namáhané velkými lokálními silami. EC2 tyto oblasti nazývá oblastmi diskontinuit (D oblasti).

K_{global} – slouží k zohlednění vlivu vláken v celém prvku, v místech, kde případná lokální imperfekce rozmístění vláken nezpůsobí náhlé porušení prvku.

K faktor zohledňuje orientaci vláken pro dané namáhání. Prvek může být namáhán z několika směrů, proto také K faktor může být různý pro odlišné směry a způsoby namáhání. Předpokládaný směr tlakového namáhání lze určit během zkoušky na základě rozvoje trhlin. Předpokládaný K faktor musí být vždy ověřen experimentem.

V případě příznivé vlivu vláken: $K < 1.0$

V případě nepříznivého vlivu vláken: $K > 1.0$

Pro předběžnou analýzu lze dle [2] použít hodnoty $K_{global} = 1,25$ a $K_{local} = 1,75$.

Dílčí součinitele spolehlivosti γ_c

Dílčí součinitele spolehlivosti γ_c uvedené v NF P18-710 [2] s ohledem na úroveň kvality pro mezní stav únosnosti:

Tab. 10 Dílčí součinitel spolehlivosti dle [2], převzato z [2].

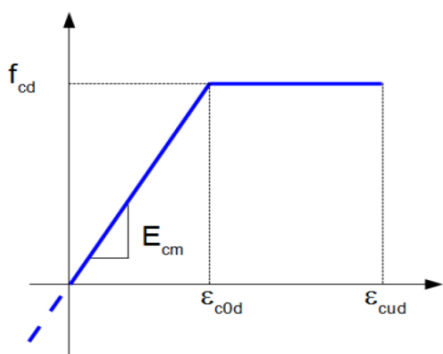
Dle NF P 18-710	Návrhová situace	
	Trvalá a dočasná	Mimořádná
UHPC v tlaku		
Vysoká úroveň kvality	$\gamma_c = 1,3$	$\gamma_c = 1,05$
Normální úroveň kvality	$\gamma_c = 1,5$	$\gamma_c = 1,2$
UHPC v tahu (účinnost rozptýlené výztuže)	$\gamma_{cf} = 1,3$	$\gamma_{cf} = 1,05$
Betonářská / předpínací výztuž	$\gamma_s = 1,15$	$\gamma_s = 1,0$

Vysoká úroveň kvality – snížení součinitele spolehlivosti za předpokladu dodržení parametrů směsí specifikovaných v NF P18-470. Dále je zohledněn vliv tepelného ošetřování (propařování) čerstvého betonu (ošetřování typu TT1, TT2 a TT1+2)⁹.

⁹ Ošetřování typu TT1, TT2 a TT1+2 je podrobněji popsáno v kapitole 2.3.5

Pracovní diagram UHPC v tlaku

Pro posouzení prvku v mezním stavu únosnosti se využije zjednodušený bilineární návrhový pracovní diagram.



$$\varepsilon_{c0d} = \frac{f_{cd}}{E_{cm}} \quad (3.01)$$

$$\varepsilon_{cud} = \left(1 + 14 \cdot \frac{f_{ctm}}{K_{global} \cdot f_{cm}} \right) \cdot \varepsilon_{c0d} \quad (3.02)$$

Obr. 62 Zjednodušený návrhový diagram pevnosti v tlaku dle [2]

Pro nelineární analýzu konstrukce poskytuje norma i přesnější pracovní diagram se zohledněním zvýšené duktility UHPC v tahu v důsledku použití rozptýlené výztuže. V případě tenkých prvků (3.03) je většinou požadována orientace vláken rovnoběžně s povrchem a vzhledem ke způsobu ukládání UHPC a nízké tloušťce forem tomu i tak bývá. Pokud jsou ale vlákna dominantně orientována jedním směrem, snižuje se pozitivní vliv na duktilitu. V případě tenkých prvků tedy norma nepřipouští zohlednění zvýšené duktility prvků z UHPC.

Pracovní diagram v tahu

Posuzování prvků s využitím tahové pevnosti závisí zejména na materiálových parametrech daného UHPC. NF P18-710 připouští dvě možné cesty stanovení pracovního diagramu.

- a) **Použití pracovního diagramu přímo z výsledků zkoušek.** Záznam průběhu zkoušky UHPC v tahu je popsán matematickou funkcí a s touto funkcí je pak v návrhu dopočítáváno hledané přetvoření (napětí).
- b) **Použití základních pracovních diagramů z NF P18-710.** Tyto pracovní diagramy jsou popsány dále. Jednotlivé mezní hodnoty jsou stanoveny, nebo dopočítány na základě výsledků materiálových zkoušek definovaných v NF P18-470. *Při absenci zkoušek, lze pro předběžné výpočty (studie, prvotní fáze návrhů) využít materiálové vlastnosti uvedené v příloze T francouzského dodatku.*

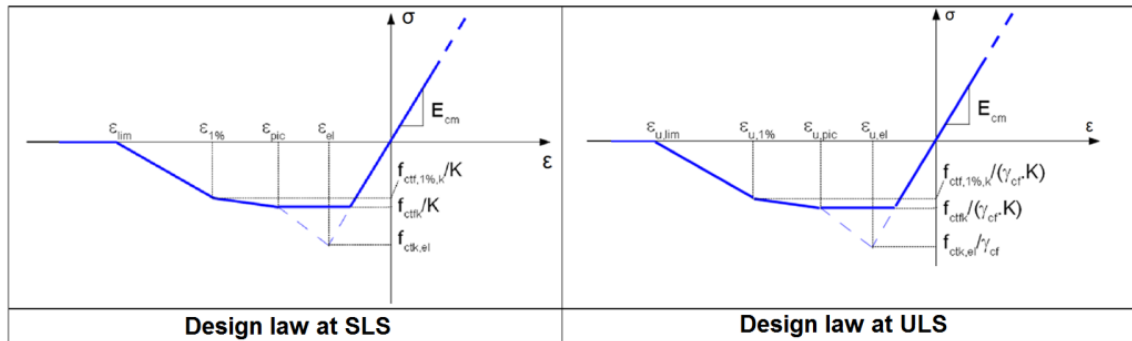
Zvolený návrhový diagram UHPC v tahu dle NF P18-710 se liší pro jednotlivé klasifikační třídy (T1*, T2* a T3*) a je také závislý na tloušťce prvku.

Tenký prvek je definován jako:

$$e \leq 3 L_f \quad , \text{ kde } L_f \text{ je délka nejdelších vláken použitých ve směsi} \quad (3.03)$$

Pracovní diagram UHPC v tahu pro prvky nesplňující podmínku 3.03, dle [2]

Pro klasifikační třídu T1* a T2*



Obr. 63 Pracovní diagramy pro prvky nesplňující podmínku pro tenké prvky, třídy T1* a T2*, zdroj: [2]

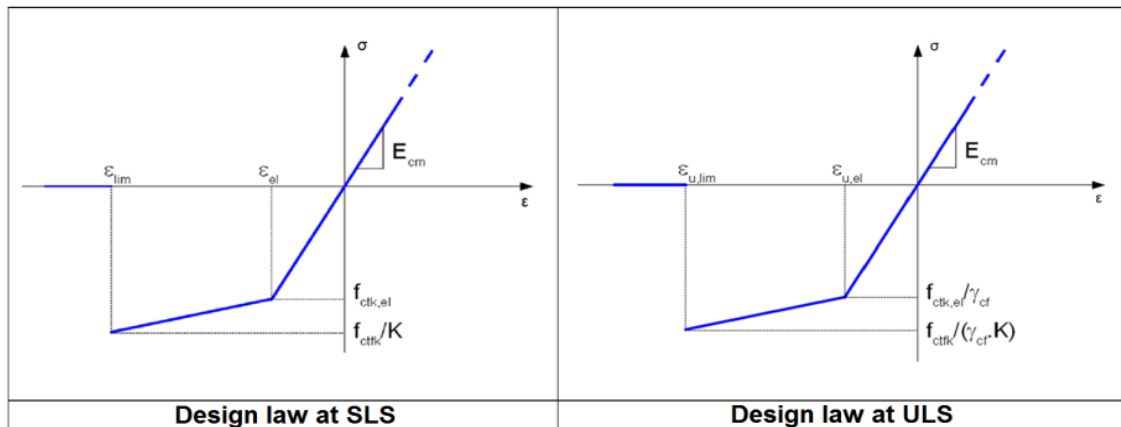
Pro klasifikační třídy T1* a T2* nelze napřímo ze zkoušek stanovit hodnoty mezních přetvoření (s výjimkou ϵ_{el} ($\epsilon_{u,el}$), ta samozřejmě lze). Namísto toho je během zkoušky měřena šířka rozevření trhliny (zkouška v tahu za ohybu s vrubem) a hodnoty přetvoření jsou následně dopočítány pomocí empirických vztahů uvedených v NF P18-710.

$$\epsilon_{pic} = \frac{w_{pic}}{L_c} + \frac{f_{ctk,el}}{E_{cm}}, \text{ respektive pro MSÚ: } \epsilon_{u,pic} = \frac{w_{pic}}{L_c} + \frac{f_{ctk,el}}{\gamma_{cf} \cdot E_{cm}} \quad (3.04)$$

$$\epsilon_{1\%} = \frac{w_{1\%}}{L_c} + \frac{f_{ctk,el}}{E_{cm}}, \text{ respektive pro MSÚ: } \epsilon_{u,1\%} = \frac{w_{1\%}}{L_c} + \frac{f_{ctk,el}}{\gamma_{cf} \cdot E_{cm}} \quad (3.05)$$

Pokud neexistuje lokální maximum a není možné spolehlivě určit w_{pic} , pak je $w_{pic} = 0,3 \text{ mm}$.
 $w_{1\%} = 0,01H$, kde H je výška zkušebního hranolu pro třibodový ohyb

Pro klasifikační třídu T3*



Obr. 64 Pracovní diagramy pro prvky nesplňující podmínku pro tenké prvky a spadající do klasifikační třídy T3*, [2]

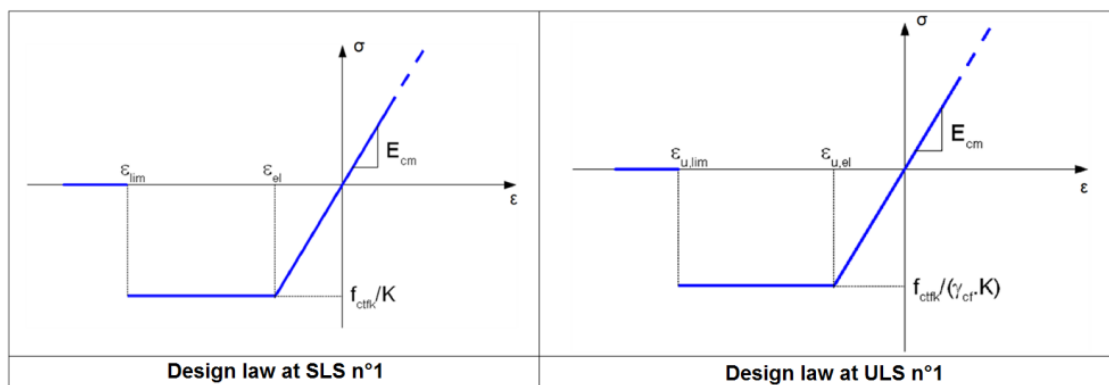
Mezní pružné přetvoření ϵ_{el} ($\epsilon_{u,el}$) a limitní tahové přetvoření ϵ_{lim} ($\epsilon_{u,lim}$) se stanoví takto:

$$\epsilon_{el} = \frac{f_{ctk}}{E_{cm}}, \quad \epsilon_{u,el} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_c \cdot E_{cm}} \quad (3.06)$$

$$\epsilon_{lim} = \epsilon_{u,lim} = \frac{L_f}{4 \cdot L_c} \quad ; \text{ kde } L_f \text{ je délka nejdelšího vlákna v UHPC} \quad (3.07)$$

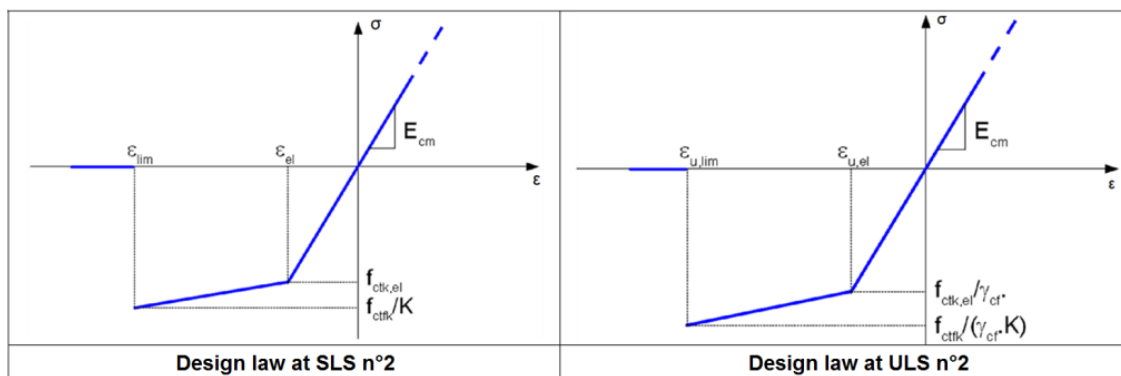
$$L_c = \frac{2}{3}h \quad ; \text{ kde } h \text{ je výška průřezu} \quad (3.08)$$

Pozn. Modul pružnosti v tahu (v pružné oblasti) je uvažován shodně jako modul pružnosti v tlaku.

Pracovní diagram UHPC v tahu pro tenké prvky, dle [2]

Obr. 65 Pracovní diagramy pro prvky splňující podmínku pro tenké prvky namáhané pouze prostým ohybem, [2]

Uvedené pracovní diagramy (n°1) lze použít pro prvky namáhané pouze prostým ohybem, popř. ohybem a tlakem. V ostatních případech namáhání musí být použito pracovních diagramů n°2 a použitý UHPC musí mít klasifikaci T3*.



Obr. 66 Pracovní diagramy pro prvky splňující podmínku pro tenké prvky, [2]

V případě posuzování mezního stavu použitelnosti (MSP) jsou v pracovních diagramech namísto charakteristických hodnot, používány střední hodnoty (týká se všech pracovních diagramů, nejenom diagramů splňujících podmínku pro tenké prvky). *Při absenci zkoušek, lze pro předběžné výpočty (studie, prvotní fáze návrhů) využít materiálové vlastnosti uvedené v příloze T francouzského dodatku [2].*

Dotvarování a smršťování

Předběžně lze použít hodnoty popisované v kapitole 2.3.5. Pro přesný výpočet u prvků, kde velikost konečného smršťování (dotvarování) významně ovlivňuje výsledné chování prvku (např. stanovení ztrát předpětí), je třeba stanovit smršťování (dotvarování) na zkušební tělese, odpovídajícím složení a způsobu budoucího ošetřování prvku.

3.4 Příklad návrhu prvku dle NF P18-710

Pro ukázání způsobu návrhu prvku dle NF P18-710 a porovnání rozdílů mezi navrhováním prvků z běžného betonu a prvku z UHPC je zvolen jednoduchý příklad prefabrikovaného nosníku obdélníkového průřezu. Cílem úlohy je navrhnout prvek s využitím tahové pevnosti UHPC (v tahu za ohybu) a porovnat jej s nosníkem z běžného betonu (železobetonu). Návrh je proveden pomocí lineárně pružné analýzy. *Pozn.: autor si je vědom, že praktický význam takovéto úlohy je minimální.*

Vstupní parametry návrhu

Rozpon:	L = 8 m	(teoretické rozpětí)
Průřez:	800 x 400 mm	
Zatížení:	$g_k = 20$ kN/m	(ostatní stálé)
	$q_k = 15$ kN/m	(užitné)
Prostředí:	XC1	
Materiál:	UHPC C150 (parametry dle NF P18-710)	
Ocel	B 500B	

Tab. 11 Materiálové parametry zvolené pro výpočet, dle přílohy T - NF P18-710

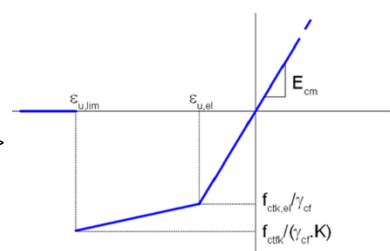
charakteristická pevnost v tlaku (28dní)	f_{ck}	150	MPa
Střední hodnota pevnosti v tlaku (28dní)	f_{cm}	160	MPa
Youngův modul pružnosti	E_{cm}	45	GPa
charakteristická lim. pevnost v tahu	$f_{ctk,el}$	7.0	MPa
střední hodnota lim. pevnosti v tahu	$f_{ctm,el}$	8.0	MPa
char. pevnost po vzniku trhliny	f_{ctk}	9.0	MPa
střední hod. pevnosti po vzniku trhliny	f_{ctm}	10.5	MPa
Globální faktor orientace vláken	K_{global}	1,25	-
Lokální faktor orientace vláken	K_{local}	1,75	-
Délka ocelových vláken	L_f	12	mm
Průměr největšího použitého kameniva	D_{sup}	4	mm

Klasifikace UHPC

$$\frac{f_{ctm}}{K} = \frac{10.5}{1.25} = 8.4 \text{ MPa} \geq f_{ctm,el} = 8.0 \text{ MPa}$$

$$\frac{f_{ctk}}{K} = \frac{9.0}{1.25} = 7.2 \text{ MPa} \geq f_{ctk,el} = 7.0 \text{ MPa}$$

Třída T3* ->



Návrhové hodnoty pevnosti a přetvoření:

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{0,85 \cdot 150}{1,5} = 85 \text{ MPa} \quad (3.09)$$

α_{cc} zohledňuje vliv dlouhotrvajícího zatížení a je dle [2] doporučeno volit hodnotu 0,85

$$f_{ctd,el} = \frac{f_{ctk,el}}{\gamma_c \cdot K} = \frac{7.0}{1.3 \cdot 1.25} = 4,30 \text{ MPa} \quad (3.10)$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_c \cdot K} = \frac{9.0}{1.3 \cdot 1.25} = 5,53 \text{ MPa} \quad (3.11)$$

$$\varepsilon_{u,el} = \frac{f_{ctk,el}}{\gamma_{cf} \cdot E_{cm}} = \frac{7.0}{1.3 \cdot 45000} = 0.012\% \quad (3.12)$$

$$\varepsilon_{u,lim} = \frac{L_f}{4 \cdot \frac{2}{3} h} = \frac{12}{\frac{8}{3} \cdot 800} = 0,5625\% \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_{c0d} = \frac{f_{cd}}{E_{cm}} = \frac{85}{45000} = 0,18\% \quad (3.14)$$

$$\varepsilon_{cud} = \left(1 + 14 \cdot \frac{f_{ctm}}{K_{global} \cdot f_{cm}}\right) \cdot \varepsilon_{c0d} = \left(1 + 14 \cdot \frac{10.5}{1.25 \cdot 160}\right) \cdot 0.0018 = 0.31\% \quad (3.15)$$

Zatížení

Tab. 12 Hodnoty zatížení nosníku

Zatížení	char. hodnota [kN/m]	γ_s [-]	návrhová hodnota
			[kN/m]
vlastní tíha g_o	8.32	1.35	11.23
ostatní stálé g_{ost}	20	1.35	27.00
užitné q	15	1.5	22.50
SUMA:	43.32		60.73

Vnitřní síly

$$V_{Ed} = \frac{1}{2} \cdot (g + q)_d \cdot l = \frac{1}{2} \cdot 60.73 \cdot 8 = 242,92 \text{ kN} \quad (3.14)$$

$$M_{Ed} = \frac{1}{8} \cdot (g + q)_d \cdot l^2 = \frac{1}{8} \cdot 60.73 \cdot 8^2 = 485,85 \text{ kNm} \quad (3.15)$$

Krytí výztuže

$$c_{min} = \{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; c_{min,p}; 10 \text{ mm}\} \quad (3.16)$$

kde:

- $c_{min,b} = 0$ aplikováno v případě použití předpínací výztuže se soudržností
- $c_{min,dur} = 10 \text{ mm}$ závisí na třídě konstrukce a stupni vlivu prostředí (obdobně jako v EC2)
- $c_{dur,\gamma} = 0 \text{ mm}$ bezpečnostní přídavek
- $c_{dur,st} = 0 \text{ mm}$ možnost redukce při použití nerezové výztuže
- $c_{dur,add} = 0 \text{ mm}$ možnost redukce při aplikaci dodatečné ochrany výztuže
- $c_{dur,add} = 0 \text{ mm}$ možnost redukce při aplikaci dodatečné ochrany výztuže
- $c_{min,p} = \max(1.5 L_f; 1.5 D_{sup}; \emptyset) = \max(1.5 \cdot 12; 1.5 \cdot 4; 20) = 18 \text{ mm}$

kde: L_f je délka nejdelších vláken ve směsi a D_{sup} je průměr největší použité frakce kameniva

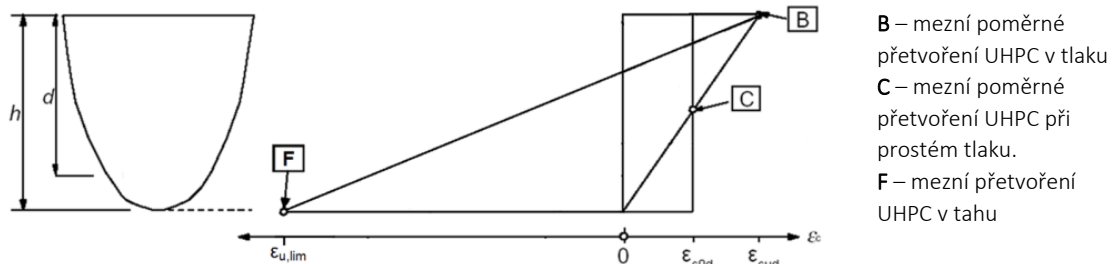
$$c_{min} = 18 \text{ mm}$$

Volba tloušťky krycí vrstvy: $c = 25 \text{ mm}$

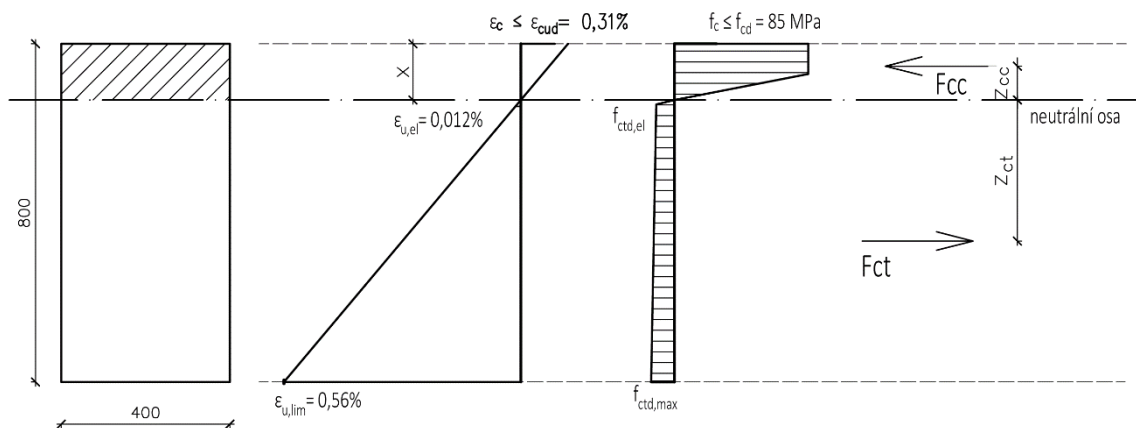
3.4.1 Návrh s využitím tahové pevnosti UHPC, bez betonářské výztuže

Ohybová únosnost

Při posouzení ohybaného prvku z UHPC se předpokládá porušení UHPC v tahu. Zásadním parametrem při návrhu je hodnota limitního přetvoření UHPC v tahu (ideálně stanovit zkouškou v tahu za ohybu). Pro limitní přetvoření $\epsilon_{u,lim}$ (3.13) je za dodržení níže uvedených podmínek (3.16 – 3.19) dopočítávána výška tlačené části průřezu. Moment únosnosti se stanoví momentovou podmínkou k neutrální ose průřezu. Výpočet byl proveden pomocí programu Excel [A].



Obr. 67 Možný rozsah průběhu poměrných přetvoření UHPC, dle [2]



Obr. 68 Schéma přetvoření a napětí pro nevyztužený (vyztužený vlákny) UHPC třídy T3*

Podmínky výpočtu:

$$1, F_{cc} + F_{ct} = 0 \quad (3.16)$$

$$2, \epsilon_{u,lim} = 0,5625\% \quad (3.17)$$

$$2, \frac{\epsilon_c}{x} = \frac{\epsilon_{u,lim}}{h-x} \quad (3.18)$$

$$3, \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} = 0,31\% \quad (3.19)$$

$$M_{Rd} = 507,64 \text{ kNm} > M_{Ed} = 485,86 \text{ kNm}$$

VYHOVÍ

Návrh vyhoví na ohyb. Teoreticky je tedy možné navrhnout nosník o rozponu 8 m s poměrně vysokým zatížením (3,5 t/m), ve kterém nebude použita žádná betonářská výztuž. Vzhledem k velkým rozměrům průřezu by pravděpodobně docházelo k segregaci

vláken a nebylo by možné zaručit jejich dostatečnou homogenitu, se kterou výpočet uvažuje (K faktor).

Smyková únosnost

Únosnost prvku ve smyku je provedena ve vzd. 100 mm od líce podpory. V tomto průřezu působí posouvající síla $V_{Ed} = 236$ kN. Prvek není vyztužen smykovou výztuží (třmínky).

$$V_{Ed} \leq \min(V_{Rd} ; V_{Rd,max}) \quad (3.20)$$

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f} \quad (3.21)$$

Stanovení V_{Rd} – nevyztužený průřez

$$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_{cf} \cdot \gamma_E} \cdot k \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} \cdot b_w \cdot h \quad (3.22)$$

kde:

$$k = 1 + 3 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{ck}} = 1 + 3 \cdot \frac{0}{150} = 1 \quad (3.23)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} = \frac{0}{320 \times 10^3} = 0 \text{ MPa} \quad (3.24)$$

$$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{1,3 \cdot 1,15} \cdot 1 \cdot 150^{\frac{1}{2}} \cdot 400 \cdot 800 = 471,88 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,s} = 0 \text{ kN} \quad (\text{příspěvek smykové výztuže}) \quad (3.25)$$

$$V_{Rd,f} = A_{fv} \cdot \sigma_{Rd,f} \cdot \cot \theta \quad (3.26)$$

kde:

$$A_{fv} = b_w \cdot z = b_w \cdot 0,9 \cdot d = b_w \cdot 0,9 \cdot \frac{7}{8} \cdot h = 400 \cdot 0,9 \cdot \frac{7}{8} \cdot 800 = 252 \times 10^3 \text{ mm}^2 \quad (3.27)$$

$$\sigma_{Rd,f} = \frac{1}{K \cdot \gamma_{cf}} \cdot \frac{1}{\varepsilon^* - \varepsilon_{el}} \cdot \int_{\varepsilon_{el}}^{\varepsilon^*} \sigma_f(\varepsilon) \cdot d\varepsilon = 3,95 \text{ MPa} \quad (3.28)$$

Pozn.: $\sigma_{Rd,f}$ je střední hodnota pevnosti v tahu po vzniku trhliny podél smykové trhliny

$$\varepsilon^* = \max(\varepsilon_u ; \varepsilon_{u,lim}) = 0,005625 \quad (3.29)$$

$$\theta = 30^\circ$$

$$V_{Rd,f} = 252\,000 \cdot 3,95 \cdot \cot 30 = 1692 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = 471,88 + 0 + 1692 = 2163,88 \text{ kN} \quad (3.21)$$

$V_{Rd,max}$ - únosnost tlakové diagonály pro nevyztužený průřez

$$V_{Rd,max} = 2,3 \cdot \frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z \cdot f_{ck}^{2/3} \cdot \tan \theta \quad (3.22)$$

$$V_{Rd,max} = 2,3 \cdot \frac{0,85}{1,5} \cdot 400 \cdot 0,9 \cdot \frac{7}{8} \cdot 800 \cdot 150^{2/3} \cdot \tan 30 = 5353,16 \text{ kN}$$

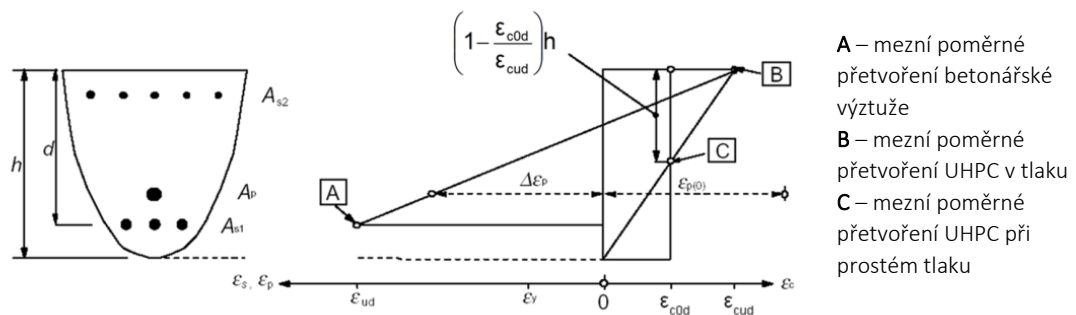
$$V_{Ed} = 236 \text{ kN} \leq V_{Rd} = \min(2163,88 \text{ kN}; 5353,16 \text{ kN})$$

VYHOVÍ

3.4.2 Návrh s využitím betonářské výztuže

Ohybová únosnost

Na rozdíl od „nevyztuženého“ prvku je výchozí podmínkou pro návrh prvku vyztuženého betonářskou výztuží podmínka, že výztuž bude v případě dosažení meze únosnosti za mezí kluzu, tedy $\varepsilon_s > \varepsilon_{yd}$. Za dodržení ostatních podmínek (3.23 – 3.28) se opět stanoví výška tlačené oblasti a dopočte se moment únosnosti.



Obr. 69 Možné rozsahy průběhu přetvoření pro UHPC s betonářskou výztuží, dle [2][2]

Podmínky výpočtu:

$$1, F_{cc} + F_{ct} + F_{st} = 0 \quad (3.23)$$

$$2, \varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = 0,31\% \quad (3.24)$$

$$3, \frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_{u,lim}}{h-x} \quad (3.25)$$

$$4, \varepsilon_{uk} > \varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd} \quad (3.26)$$

$$5, \varepsilon_{u,lim} = 0,5625\% \quad (3.27)$$

$$6, \xi = \frac{x}{d} \leq \xi_{bal} = 0,617 \quad (3.28)$$

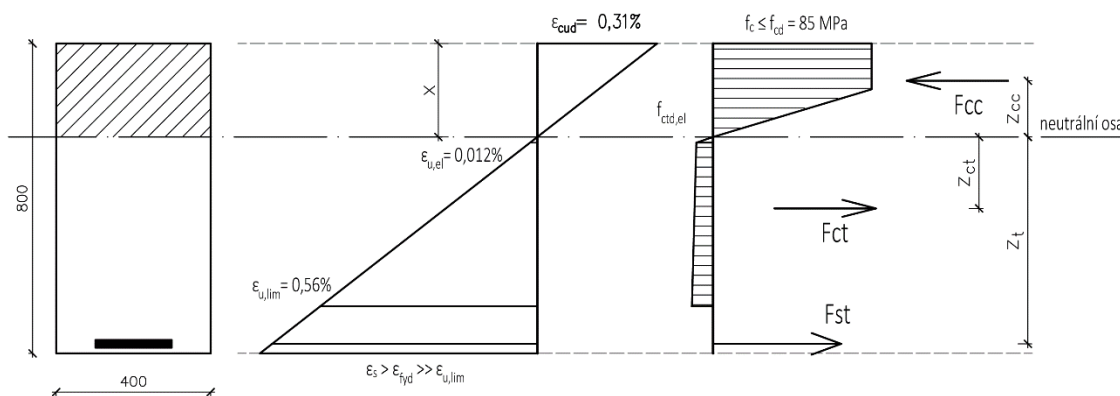
V kapitole 3.4.1 bylo prokázáno, že dané zatížení by teoreticky přenesl i nosník bez betonářské výztuže. Lze jednoznačně předpokládat, že přidáním betonářské výztuže dojde k navýšení únosnosti v ohybu.

V této kapitole je tedy pro porovnání proveden návrh průřezu s optimalizovanou výškou průřezu pro dosažení shodné únosností v ohybu. Výpočet byl proveden v programu Excel.

Výsledný optimalizovaný průřez má rozměry **350 x 310 mm** a je vyztužen sedmi pruty betonářské výztuže $\varnothing 20$ mm. Při shodné hodnotě momentové únosnosti dosahuje průřez o 68 % nižší hmotnosti oproti nevyztuženému prvku.

Pozn.: Příspěvek tahové pevnosti UHPC k celkovému ohybovému momentu únosnosti.

Pro běžně používanou ocel B 500B je přetvoření na mezi kluzu přibližně 0,24 %. Mezní přetvoření UHPC v pružné oblasti (těsně před vznikem makrotrhliny) je přibližně 0,012 – 0,020 %. V tažené oblasti prvku tedy dochází v MSÚ k rozvoji trhlin. V závislosti, zdali se jedná o UHPC klasifikace T1*, T2* nebo T3*, lze různou měrou zahrnout příspěvek tahové pevnosti do ohybové únosnosti prvku. V tomto konkrétním příkladě je použit UHPC s klasifikací T3* a mezním přetvořením $\epsilon_{u,lim} = 0,56\%$. V případě, že betonářská ocel při MSÚ přetvořena méně než je $\epsilon_{u,lim}$, přispívá tahová pevnost UHPC k momentu únosnosti v celé výšce tažené části průřezu. Při $\epsilon_s > \epsilon_{u,lim}$ přispívá tahová pevnost pouze v části průřezu, ve které je přetvoření nižší než $\epsilon_{u,lim}$ (obr. 70).



Obr. 70 Schéma přetvoření a napětí pro UHPC třídy T3* vyztužený betonářskou výztuží

Smyková únosnost

Optimalizované rozměry prvku jsou 350 x 310 mm. Únosnost prvku ve smyku je provedena ve vzd. 100 mm od líce podpory. V tomto průřezu působí posouvající síla $V_{Ed} = 236$ kN. Prvek není vyztužen smykovou výztuží (třmínky).

$$V_{Ed} \leq \min(V_{Rd} ; V_{Rd,max}) \quad (3.20)$$

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f} \quad (3.21)$$

Stanovení V_{Rd} – nevyztužený průřez

$$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_{cf} \cdot \gamma_E} \cdot k \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} \cdot b_w \cdot h \quad (3.22)$$

kde:

$$k = 1 + 3 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{ck}} = 1 + 3 \cdot \frac{0}{150} = 1 \quad (3.23)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} = \frac{0}{320 \times 10^3} = 0 \text{ MPa} \quad (3.24)$$

$$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{1,3 \cdot 1,15} \cdot 1 \cdot 150^{\frac{1}{2}} \cdot 310 \cdot 350 = 159,9 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,s} = 0 \text{ kN} \quad (\text{příspěvek smykové výztuže}) \quad (3.25)$$

$$V_{Rd,f} = A_{fv} \cdot \sigma_{Rd,f} \cdot \cot \theta \quad (\text{příspěvek rozptýlených vláken}) \quad (3.26)$$

kde:

$$A_{fv} = b_w \cdot z = b_w \cdot 0,9 \cdot d = b_w \cdot 0,9 \cdot \frac{7}{8} \cdot h = 310 \cdot 0,9 \cdot \frac{7}{8} \cdot 350 = 85443 \text{ mm}^2 \quad (3.27)$$

$$\sigma_{Rd,f} = \frac{1}{K \cdot \gamma_{cf}} \cdot \frac{1}{\varepsilon^* - \varepsilon_{el}} \cdot \int_{\varepsilon_{el}}^{\varepsilon^*} \sigma_f(\varepsilon) \cdot d\varepsilon = 3,95 \text{ MPa} \quad (3.28)$$

Pozn.: $\sigma_{Rd,f}$ je střední hodnota pevnosti v tahu po vzniku trhliny podél smykové trhliny

$$\varepsilon^* = \max(\varepsilon_u; \varepsilon_{u,lim}) = 0,005625 \quad (3.29)$$

$$\theta = 30^\circ$$

$$V_{Rd,f} = 85\,443 \cdot 3,8 \cdot \cot 30 = 583,55 \text{ kN}$$

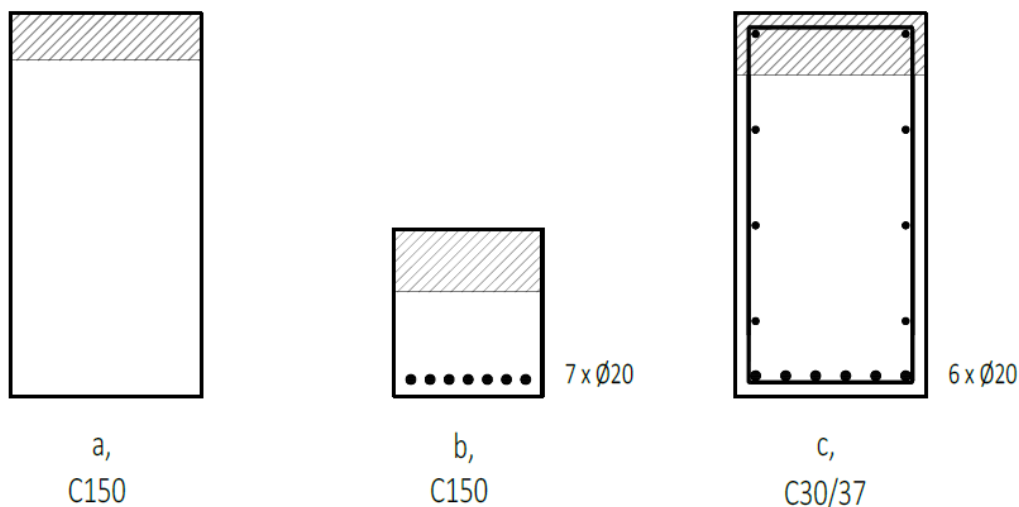
$$V_{Rd} = 159,9 + 0 + 583,55 = 743,45 \text{ kN} \quad (3.21)$$

$V_{Rd,max}$ - únosnost tlakové diagonály pro nevyztužený průřez

$$V_{Rd,max} = 2,3 \cdot \frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z \cdot f_{ck}^{2/3} \cdot \tan \theta \quad (3.22)$$

$$V_{Rd,max} = 2,3 \cdot \frac{0,85}{1,5} \cdot 310 \cdot 0,9 \cdot \frac{7}{8} \cdot 350 \cdot 150^{2/3} \cdot \tan 30 = 1815,1 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 236 \text{ kN} \leq V_{Rd} = \min(743,45 \text{ kN}; 1815,1 \text{ kN}) \quad \text{VYHOVÍ}$$

Zhodnocení

Obr. 71 Průřez bez betonářské výztuže (a,), optimalizovaný průřez z UHPC (b,), průřez z ŽB (c,)

Pro porovnání je navržen železobetonový nosník z dnes běžně používané třídy betonu C30/37 shodných rozměrů. Tlačená výztuž ŽB průvlaku byla zanedbána.

Tab. 13 Porovnání vybraných hodnot průřezů

	j.	a	b	c
M_{Rd}	kNm	561	581	578
V_{Rd}	kN	2163,9	743,5	348
výška	mm	800	350	800
šířka	mm	400	310	400
A_c	m ²	0.320	0.109	0.320
hmotnost	kg / m	832	282	800
Třmínky*	-	Ne	Ne	$\varnothing 10$ á 100 mm

* smyková výztuž v místě největšího namáhání posouvající silou

V úloze byl ukázán návrh ohýbaného nosníku dle metodiky NF P18-710. Optimalizovaný průřez (b) má v porovnání s železobetonovým (c) o 66% menší průřezovou plochu při shodné momentové únosnosti a dosahuje více než dvojnásobné únosnosti ve smyku. Vzhledem ke své malé výšce bude průřez b dosahovat poměrně významného průhybu.

Na základě výše uvedených výsledků lze usuzovat, že optimální průřez ohýbaného nosníku z UHPC se bude blížit průřezu tvaru „I“ (obr.72).

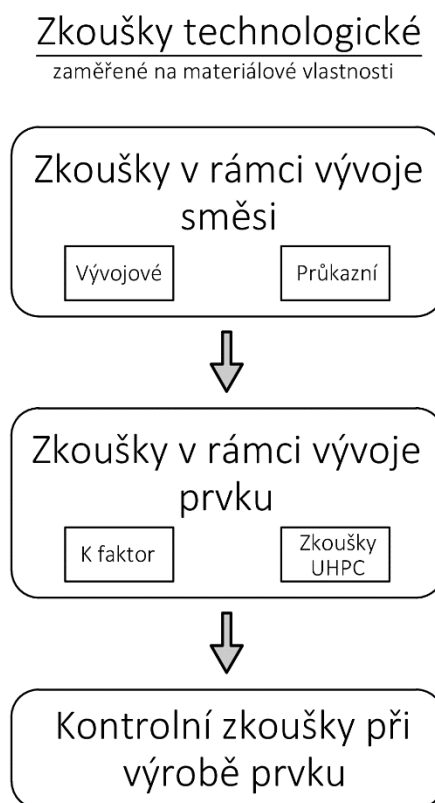


Obr. 72 Předpokládaný optimální tvar ohýbaného nosníku z UHPC

3.5 Kontrolní zkoušky při výrobě prvků z UHPC

Při návrhu a výrobě prvků z UHPC je třeba provádět sérii zkušebních postupů. Zkoušení dnes běžně používaných betonů je v zásadě omezeno na kontrolní zkoušky – ověření shody parametrů dodávaného materiálu s požadovanými parametry, dle specifikace uvedené v projektové dokumentaci. Vzhledem k povaze UHPC je receptura většinou upravena, nebo zcela nově vyvinuta, pro použití v konkrétním prvku. Pro návrh prvku je třeba vycházet z experimentálně zjištěných parametrů (pevnosti, modul pružnosti, chování na mezi porušení, rozmístění vláken, smršťování, atd). Zkoušky UHPC lze obecně rozdělit na zkoušky technologické a zkoušky statické a kvalitativní. [5]

Na následujícím schéma je zobrazena doporučená organizace zkoušek dle Metodiky Kloknerova Ústavu [5],[6],[7]:



Obr. 73 Schéma technologických zkoušek UHPC při vývoji prvku, převzato a upraveno z [5]

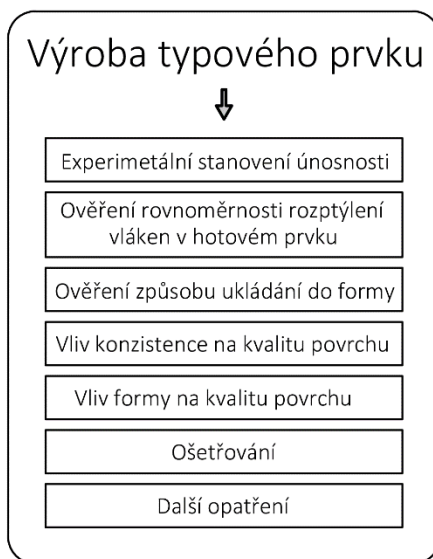
Technologické zkoušky začínají vývojem směsi. Zabývají se vlivem jednotlivých složek na výsledné chování materiálu a jejich cílem je vyvinout stabilní a vhodnou recepturu UHPC.

Průkazní zkoušky vychází z požadavků uvedených v ČSN EN 206+A1 [14] a ověřují dodržení materiálových parametrů získaných vývojovými zkouškami. Oproti běžným betonům je rozsah a četnost zkoušek přísnější. V případě nesrovnalostí mezi vývojovými zkouškami a průkazními zkouškami je nutné upravit technologii výroby, nebo aktualizovat materiálový model. Nesrovnalosti mohou být způsobeny např. změnou vstupních surovin. Tyto změny nelze většinou ovlivnit. [5]

Zkoušky v rámci vývoje prvku jsou podobné zkouškám průkazným, jen s rozdílem, že jsou prováděny mimo laboratorní prostředí. Složí zejména pro ověření technologické kázně při výrobě a ukládání směsi do bednění. Zkoušky se provádějí na vzorcích odebraných z míchacího zařízení během betonáže i na vzorcích odebraných z prototypů. Na základě těchto zkoušek je vypracován plán pro kontrolní zkoušky při výrobě finálních prvků. Tyto zkoušky se prolínají se zkouškami statickými a kvalitativními.

Zkoušky statické a kvalitativní

zaměřené na únosnost, použitelnost a kvalitu



Obr. 74 Schéma statických a kvalitativních zkoušek na prototypu prvku, převzato a upraveno z [7]

Zkoušky statické a kvalitativní slouží pro ověření a zpřesnění výpočetního modelu prvku a kontrolu kvality výroby. Velký důraz je kladen na stanovení skutečné orientace vláken v prvku (K faktor). Dle [5]: „Při sériové výrobě prvků lze z výpočetních modelů navrhnout jednoduché zkoušky, které budou ověřovat spolehlivost vyrobených dílců tak, aby je bylo možné po těchto testech využít i v konstrukcích. Po zabudování prvků z UHPC lze provést sérii zatěžovacích zkoušek, aby bylo možné provést nejen verifikaci modelu, ale také aby bylo možné předejít případné kolizi prvku či konstrukce. Ze získaných dat a měření se pro prvky vytvoří evidenční karty, aby bylo možno v případě nutnosti nahlédnout do „historie“ jednotlivých prvků. [5]

Kvalita povrchu prvku má významný vliv na trvanlivost prvku. Typickým příkladem je tvorba vzduchových bublin na horní straně prvku při betonáži samozhutnitelným UHPC v uzavřené formě [28]. Na kvalitu prvku má dále vliv povrch bednění, typ odbedňovacího prostředku, konzistence směsi a způsob ošetřování prvku.

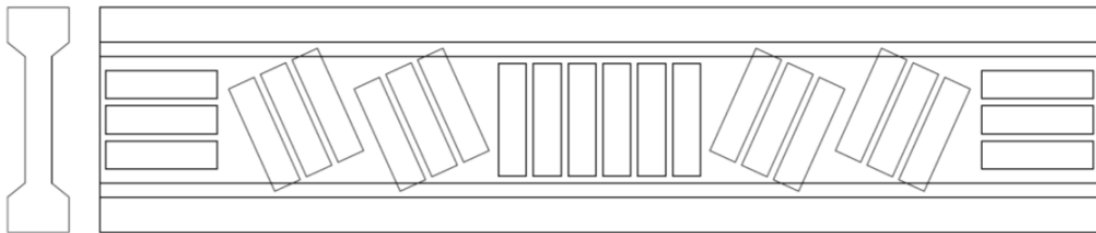
Experimentální zkoušky prototypů ve skutečné velikosti jsou nákladné a vyplatí se prakticky jen u prefabrikovaných sériově vyráběných prvků.

Vliv orientace vláken (K faktor)

Velmi důležitý parametr tahové pevnosti prvku. Metodika 3 [7] uvádí, že: *Zkušební ziskané v rámci projektu TA01010269 ukázaly, že výsledná pevnost prvku založeného pouze na únosnosti matrice vyztužené pouze vlákny, byla u materiálu s nevhodně rozptýlenými vlákny až o 50 % nižší než u prvku s vlákny správně rozptýlenými.* [7]

Homogenitu vláken ve směsi je vhodné sledovat již během vývojových zkoušek UHPC a ověřovat náchylnost navržené směsi na segregaci vláken. Segregace vláken je problémem zejména u masivnějších prvků. U tenkých prvků může mít naopak příznivý efekt.

Konečnou orientaci vláken lze nejpřesněji stanovit pouze odběrem zkušebních vzorků z prototypu prvku. Nedestruktivní zkoušky nejsou zatím vhodné. Vhodnou metodou na stanovení homogenity a orientace vláken je např. optická mikroskopická metoda kontroly homogenity distribuce vláken na řezné ploše vyvinutá v Kloknerově ústavu ČVUT v Praze. Další zkušební metody (převážně optické) lze nalézt v zahraničních dokumentech zabývajících se zkoušením vláknobetonů a UHPC.



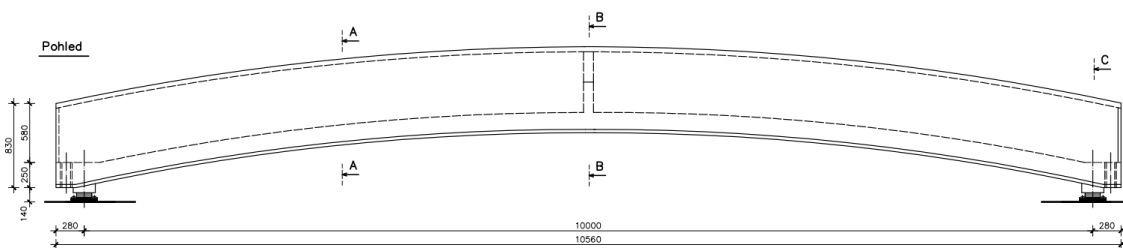
Obr. 75 Příklad odebraných zkušebních vzorků na prvku pro určení K faktoru, převzato z: [5]

4 Konstrukční návrh vybraných prvků z UHPC

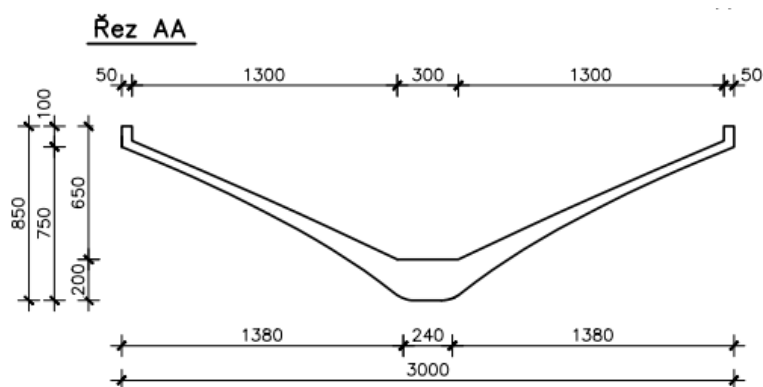
V této kapitole jsou uvedeny dva příklady návrhu prvků z UHPC. Vzhledem k absenci normových podkladů platných v České republice je jako výchozí normový dokument zvolen Francouzský národní dodatek pro EC2 NF P18-710 z roku 2016 [2].

4.1 Klenutý prefabrikovaný prvek zastřešení

V této kapitole je proveden návrh a posouzení prefabrikovaného střešního prvku délky 10,56 m a šířky 3 m. Inspirace vychází ze zastřešení stanice Montpellier (2.4). Předpokládané použití tohoto prvku je pro zastřešení větraných rozměrných prostor, jako jsou neizolované výrobní haly, skladovací haly nebo pro zastřešení autobusových a vlakových nádraží. Prvek kombinuje nosnou funkci a funkci střešního pláště. Spojení mezi prvky jsou chráněny proti zatékání (oplechováním) a každý prvek je vybaven dvojicí vpustí.

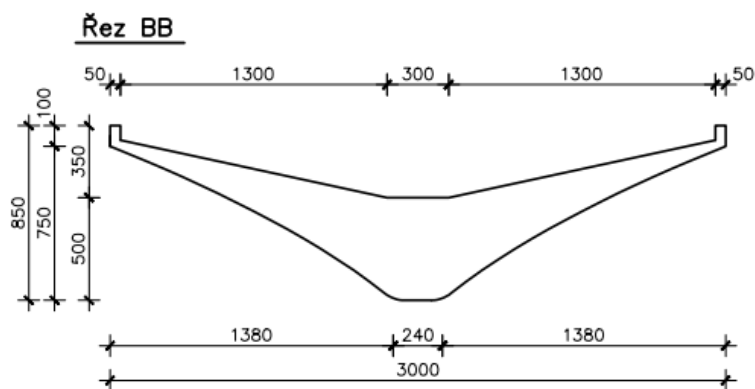


Obr. 76 Podélný pohled na prvek zastřešení



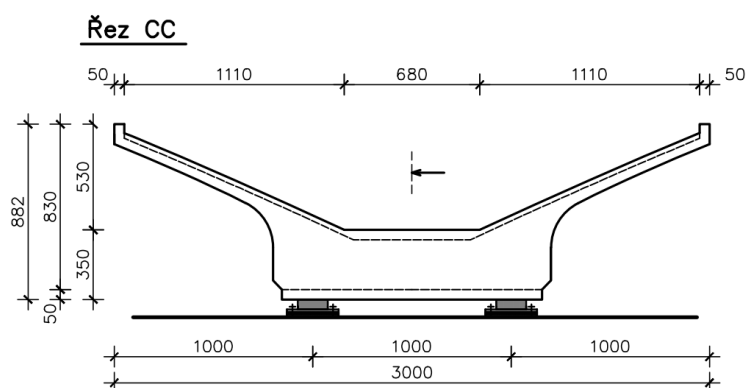
Obr. 77 Řez AA

Základní průřez prvku je zobrazen na obr. 77. Prvek je tvořen podélným žebrem o rozměru 200 x 240 mm. Žebro je pro lepší vzhled a snazší odbednění ve spodní části zaobleno. Z žebra vychází dvojice konzol („křídél“), každá o rozponu 1,380 m. Pro zajištění lepšího spolupůsobení obou konzol při kroucení prvku, je ve střední části prvku vytvořeno příčné žebro viz obr. 78.



Obr. 78 Řez BB – příčné žebro ve střední části prvku

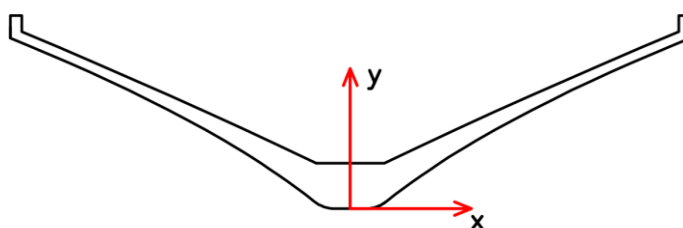
Na koncích v místech uložení je prvek rozšířen pro zajištění jeho stability. Toto řešení rovněž přispívá i k omezení kroucení celého prvku – viz obr. 79.



Obr. 79 Řez CC – koncový průřez prvku v místě uložení

Konzoly mají parabolický tvar. Spodní a horní hrana jsou definovány kvadratickou funkcí.

Souřadný systém



Obr. 80 Souřadný systém použitý pro matematický popis konzol

spodní hrana konzoly: $x = 0,85\bar{3}y^2 + 1,200y + 0,120$

horní hrana konzoly: $x = 0,181y^2 + 2,069y - 0,271$

Na koncích konzol jsou vytvořena žebra. Žebro o rozměrech 100 x 50 mm ztužuje okraj konzoly („křídla“) a pomáhá roznést případné lokální zatížení konce konzoly na větší plochu. Žebro zároveň brání zatékání a je na něj kotven krycí plech spoje.

Statické působení

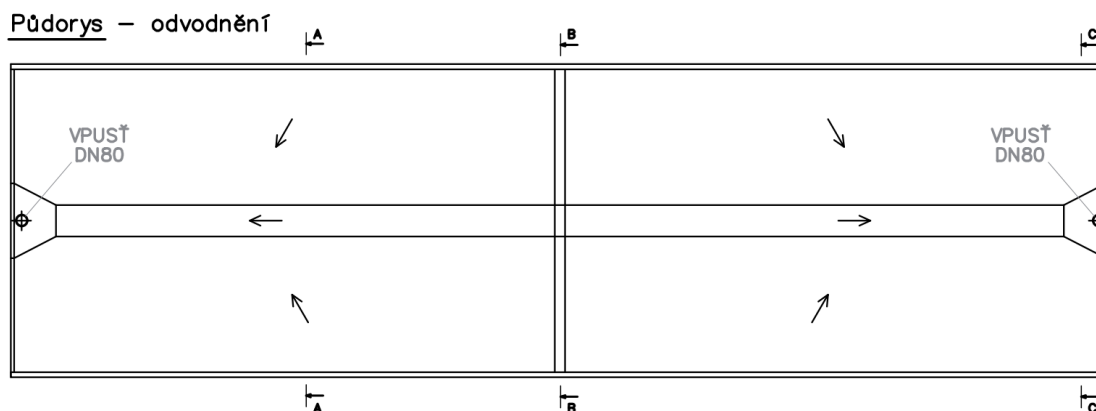
Prvek je navržen jako prostý nosník a je uložen na čtveřici deskových ložisek. Z hlediska využití průřezu od silového zatížení by bylo vhodnější navrhnout prvek jako staticky neurčitý dvojkolbový oblouk. Prvek je ale vystaven teplotnímu namáhání. Analýzou prvku bylo zjištěno, že namáhání od teploty na staticky neurčité konstrukci by vyvolalo výrazné vnitřní síly. Z tohoto důvodu je prvek navržen jako prostý nosník. První dvojice ložisek je navržena jako neposuvný kloub a druhé dvojici je dovolen vodorovný posun v podélném směru prvku.

Uložení prvku

Prvek je uložen na čtveřici deskových ložisek s vloženou mezivrstvou teflonu. Tento typ ložisek umožňuje vodorovný posun a malé pootočení (posuvný kloub). Neposuvné (kloubové) ložisko je vytvořeno vložením svislého čepu, procházejícím skrz obě desky.

Vzhledem k nízké hmotnosti prvku (8t) by mohlo při extrémních povětrnostních podmínkách docházet k jeho nadzvedávání. Každé deskové ložisko je proto vybaveno dvojicí šroubů, které nebrání pootočení (posunu), ale v případě potřeby zabrání prvku v nadzvedávání.

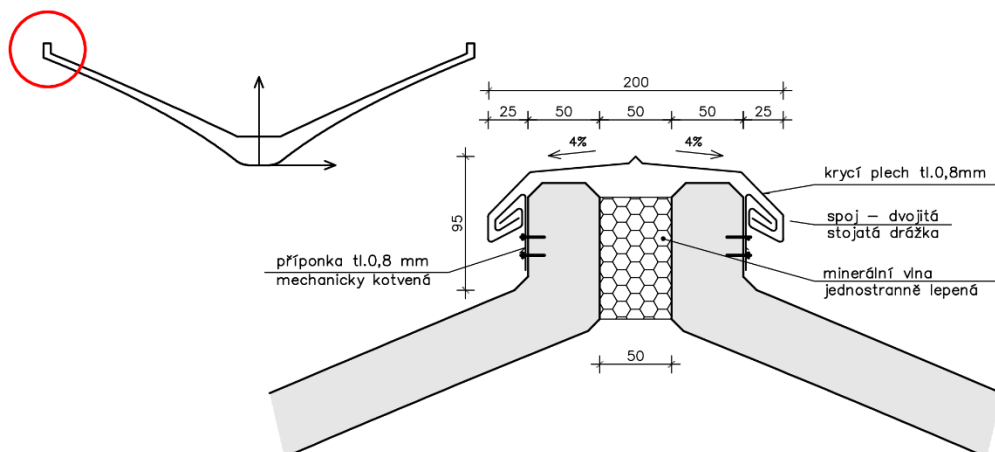
Odvodnění prvku



Obr. 81 Schéma odvodnění prvku.

Prvek obsahuje na obou svých koncích vpusť DN 80 mm. Do formy prvku je vložena ocelová chránička, do které se následně vystrojí vyhřívaná střešní vpusť. Mezi prvkem a konstrukcí, na které je prvek uložen je zachována mezera 140 mm (obr. 83). Do této mezery se umístí odvodňovací potrubí s kompenzátorem pro vyrovnání délkových změn. Potrubí je třeba izolovat a vybavit topným kabelem. V případě zablokování jedné ze střešních vpusť, se předpokládá přetečení vody na vedlejší prvek rovněž vybavený vpusť. Zatopení prvku do výše „přepadu“ nezpůsobí jeho kolaps a je součástí experimentálního ověření jeho únosnosti. U krajních prvku může být do středního příčného žebra přidán kruhový prostup umožňující vytvořit nouzový přepad do druhé vpusťi téhož prvku.

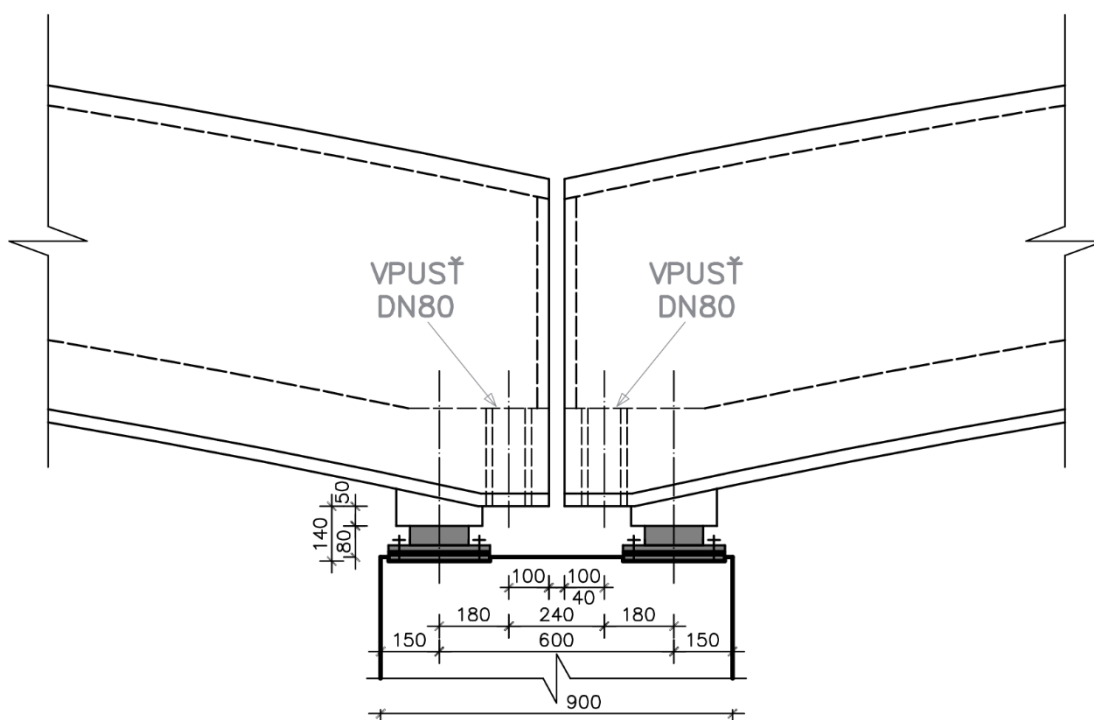
Detail podélného styku



Obr. 82 Schématický detail oplechování podélného styku dvou panelů

Mezera mezi dvěma prvky v podélném směru je 50 mm. Mezi prvky je vložena minerální vlna pro zamezení přímého kontaktu prvků vlivem jejich deformace. Minerální vlna má hydrofobní úpravu a je jednostranně lepena k jednomu z prvků. Krycí plech je kotven na příponky dvojitou stojatou drážkou. Příponky jsou umístěny bodově po vzdálenosti 0,3 m. V případě požadavku na odolnost proti tlakové vodě je nutné příponky umístit liniově a spoje těsnit vloženým těsněním. Hodnoty vodorovných pohybů konzol vlivem deformace od silového zatížení a teploty jsou předpokládány do 10 mm.

Schéma uložení prvků



Obr. 83 Schéma uložení dvojice prvků na podporující prvek

4.1.1 Návrh a posouzení

Zvolené vstupní parametry materiálů

Tab. 14 Materiálové parametry zvolené pro výpočet, dle přílohy T - NF P 18-710 [2]

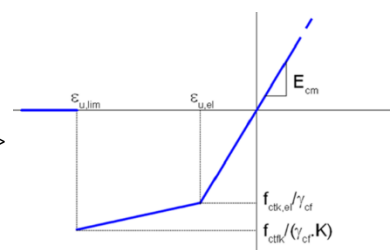
charakteristická pevnost v tlaku (28dní)	f_{ck}	150	MPa
Střední hodnota pevnosti v tlaku (28dní)	f_{cm}	160	MPa
Youngův modul pružnosti	E_{cm}	45	GPa
charakteristická lim. pevnost v tahu	$f_{ctk,el}$	7.0	MPa
střední hodnota lim. pevnosti v tahu	$f_{ctm,el}$	8.0	MPa
char. pevnost po vzniku trhliny	f_{ctk}	9.0	MPa
střední hod. pevnosti po vzniku trhliny	f_{ctm}	10.5	MPa
Globální faktor orientace vláken	K_{global}	1,25	-
Lokální faktor orientace vláken	K_{local}	1,75	-
Délka ocelových vláken	L_f	12	mm
Průměr největšího použitého kameniva	D_{sup}	4	mm
Krytí betonářské výztuže dle rovnice 3.16	c	25	mm

Klasifikace UHPC

$$\frac{f_{ctm}}{K} = \frac{10.5}{1.25} = 8.4 \text{ MPa} \geq f_{ctm,el} = 8.0 \text{ MPa}$$

$$\frac{f_{ctk}}{K} = \frac{9.0}{1.25} = 7.2 \text{ MPa} \geq f_{ctk,el} = 7.0 \text{ MPa}$$

Třída T3* ->

Návrhové hodnoty pevnosti a přetvoření:

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{0,85 \cdot 150}{1,5} = 85 \text{ MPa} \quad (4.01)$$

α_{cc} zohledňuje vliv dlouhotrvajícího zatížení a je dle [2] doporučeno volit hodnotu 0,85

$$f_{ctd,el} = \frac{f_{ctk,el}}{\gamma_c \cdot K} = \frac{7.0}{1.3 \cdot 1.25} = 4,30 \text{ MPa} \quad (4.02)$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_c \cdot K} = \frac{9.0}{1.3 \cdot 1.25} = 5,53 \text{ MPa} \quad (4.03)$$

$$\varepsilon_{u,el} = \frac{f_{ctk,el}}{\gamma_{cf} \cdot E_{cm}} = \frac{7.0}{1.3 \cdot 45000} = 0.012\% \quad (4.04)$$

$$\varepsilon_{u,lim} = \frac{L_f}{4 \cdot \frac{2}{3} h} = \frac{12}{\frac{8}{3} \cdot prom} = \text{proměnná hodnota} \quad (4.05)$$

$$\varepsilon_{c0d} = \frac{f_{cd}}{E_{cm}} = \frac{85}{45000} = 0,18\% \quad (4.06)$$

$$\varepsilon_{cud} = \left(1 + 14 \cdot \frac{f_{ctm}}{K_{global} \cdot f_{cm}}\right) \cdot \varepsilon_{c0d} = \left(1 + 14 \cdot \frac{10.5}{1.25 \cdot 160}\right) \cdot 0.0018 = 0.31\% \quad (4.07)$$

Užitné zatížení

Povrch střešních panelů je uvažován jako finální vrstva střešní konstrukce. Neuvažuje se s instalací dalších vrstev střešního pláště. Střecha je uvažována jako nepochozí a lze ji klasifikovat dle ČSN EN 1991-1-1 jako kategorii H s hodnotou užitného zatížením $0,4 \text{ kN/m}^2$. Vzhledem k experimentálnímu návrhu prefabrikovaného panelu z UHPC je zvolena hodnota $2,0 \text{ kN/m}^2$.

Zatížení sněhem

Stanoveno dle ČSN EN 1993-1-3 [10].

$s_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$ - dle mapy sněhových oblastí pro IV. sněhovou oblast

Zatížení nenavátý sněhem (i)

Součinitel tvaru střechy $\mu_1 = 0,8$

$$s_{(i)} = \mu_1 \cdot C_E \cdot C_I \cdot s_k = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 2,0 = \mathbf{1,6 \text{ kN/m}^2} \quad (4.08)$$

Zatížení navátým sněhem (ii-A)

Součinitel tvaru střechy $\mu_2 = 1,5$ pro sklon $\alpha = 24^\circ$

$$s_{(ii)} = \mu_2 \cdot C_E \cdot C_I \cdot s_k = 1,6 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 2,4 = \mathbf{3,84 \text{ kN/m}^2} \quad (4.09)$$

Zatížení navátým sněhem dle národní přílohy (ii – B.2)

Tvarový součinitel pro zatížení výjimečným navátým sněhu, který se má použít pro úžlabí střech vícelodních budov. Určí se jako nejmenší hodnota z:

$$\mu_1 = 2h/s_k = 2 \cdot 0,65/1,0 = \mathbf{1,3 [-]}$$

$$\mu_1 = 2b_3/(l_{s1} + l_{s2}) = 2 \cdot 4,5/(1,5 + 1,5) = \mathbf{3 [-]}$$

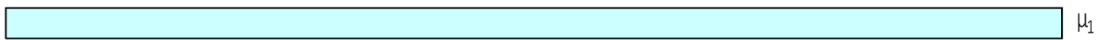
$$\mu_1 = \mathbf{5 [-]}$$

$$s_{(ii-B.2)} = \mu_1 \cdot C_E \cdot C_I \cdot s_k = 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 2,0 = \mathbf{2,6 \text{ kN/m}^2} \quad (4.10)$$

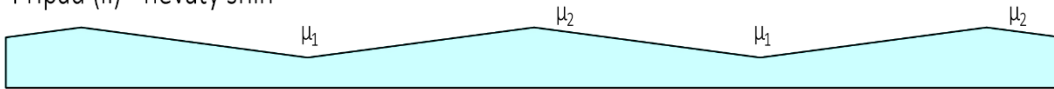
Zatížení navátým sněhem dle národní přílohy (iii) pro maximální kroucení

Stanoveno jako zatížení $s_{(ii)}$ působící pouze na $\frac{1}{2}$ půdorysné plochy

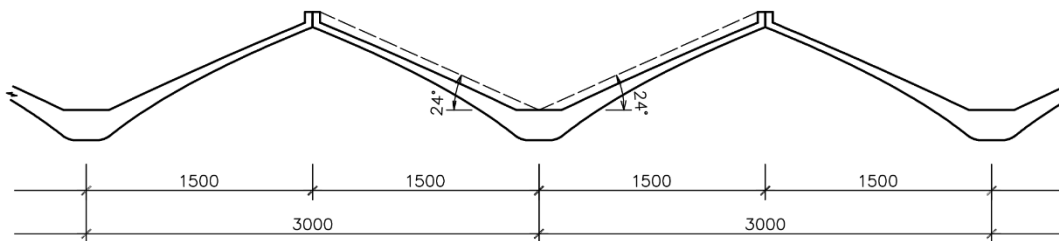
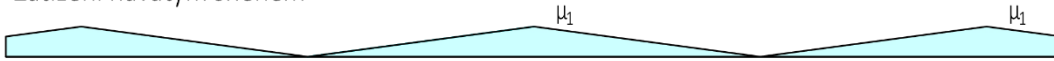
Případ (i) - nevátý sníh



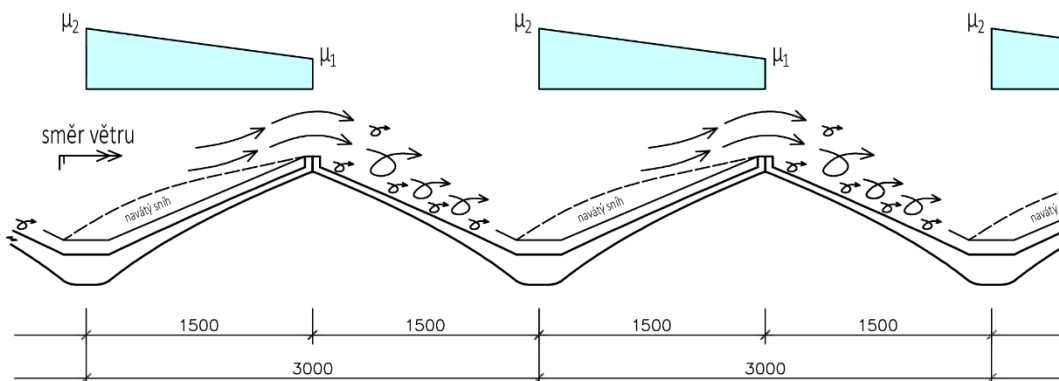
Případ (ii) - nevátý sníh



Zatížení navátým sněhem



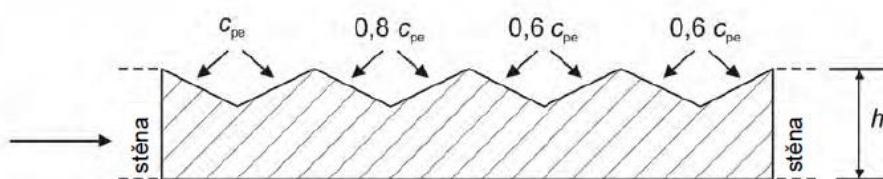
Zatížení vátým sněhem - maximální kroucení



Obr. 84 Schéma zatížení prvku sněhem dle ČSN EN 1991-1-3

Zatížení větrem

Pro stanovení zatížení větrem ve směru $\Theta = 0^\circ$ byl zvolen přístup pro vícelodní střechy dle ČSN EN 1991-1-4 [11]. c_{pe} je součinitel vnějšího tlaku pro sedlovou střechu [11]. Pro návrh prvku byl vybrán krajní panel s nejvýznamnějším součinitelem vnějšího tlaku.



Obr. 85 Součinitel vnějšího tlaku pro vícelodní haly dle ČSN EN 1991-1-4

$v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$ – dle mapy větrové oblasti – oblast III

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 27,5 = 27,5 \text{ m/s} \quad (4.11)$$

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2(z) = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 27,5^2 = 472,65 \text{ Pa} \quad (4.12)$$

$$C_e(z) = 2,8 [-] \quad \text{dle ČSN EN 1991-1-4}$$

$$q_p = C_e(z) \cdot q_b(z) = 2,8 \cdot 472,65 = 1323,42 \text{ Pa} \quad (4.13)$$

$C_{pe,10}$ byl určen globálně pro oblast G a úhel sklonu $\alpha = -24^\circ \rightarrow C_{pe,10} = \pm 1,94 [-]$

Pozn. oblast F se nachází v těsné blízkosti uložení prvku a navýšení oproti oblasti G je zanedbáno.

Ve směru $\Theta = 90^\circ$ je v důsledku tření větru střecha namáhána vodorovnou silou. Vodorovná síla se určí dle [11] jako:

$$H_V = 0,05 \cdot q_p \cdot A_{shed} = 0,05 \cdot 1323,42 \cdot 30 = 1,985 \text{ kN} \quad (4.14)$$

Pozn₁.: Vliv navýšení střešních panelů na zatížení větrem je zanedbán.

Pozn₂.: Zatížení podélným větrem lze zanedbat.

Zatížení teplotou

Prvek je staticky určitou konstrukcí. Při ideálním uložení prvku zatížení teplotou nevyvolá změnu vnitřních sil. Na jedné straně je prvek uložen kloubově a na druhé straně je podepřen posuvně. Posuvné podepření tvoří dvojice deskových ložisek s teflonovou mezivrstvou. Maximální hodnota svislé reakce dosahuje 80 kN. Součinitel tření rozhraní ocel – teflon je $\mu = 0,04 [-]$. Velikost třecí síly je přímo úměrné tlakové síle.

$$F_t = \mu \cdot F_n = 0,04 \cdot 80 = 3,2 \text{ kN}$$

Pro dosažení této hodnoty vodorovné reakce je třeba změna teploty prvku o $\pm 0,6^\circ\text{C}$. Zatížení teplotou tedy nemá vliv na vnitřní síly prvku.

Zatížení teplotou je využito pro návrh ložisek a je stanoveno dle ČSN EN 1993-1-5 [12]. Teplotní zatížení je uvažováno jako rovnoměrné ΔT_u .

$$\text{Teplota v létě}^{10}: \quad T_{out,L} = T_{max} + 18^\circ\text{C} = 40 + 18 = + 58^\circ\text{C}$$

$$\text{Teplota v zimě}^{11}: \quad T_{out,Z} = T_{min} = - 32^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{u,L} = T_{out,L} - T_0 = 58 - 20 = + 38^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{u,Z} = T_{out,Z} - T_0 = - 28 - 20 = - 48^\circ\text{C}$$

$$\Delta l_{l\acute{e}to} = \alpha_t \cdot l \cdot \Delta t = 11 \times 10^{-6} \cdot 10 \cdot 38 = 4,18 \text{ mm} \quad (4.16)$$

$$\Delta l_{zima} = \alpha_t \cdot l \cdot \Delta t = 11 \times 10^{-6} \cdot 10 \cdot (-48) = -5,28 \text{ mm} \quad (4.17)$$

¹⁰ Teplota v létě byla stanovena dle národní mapy izoterm NA.1 – mapa maximálních teplot vzduchu ve stínu

¹¹ Teplota v zimě byla stanovena dle národní mapy izoterm NA.2 – mapa maximálních teplot vzduchu

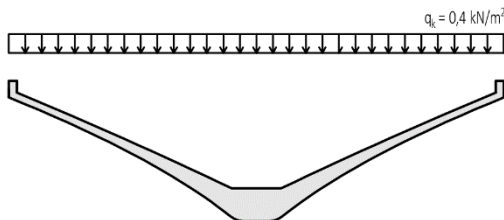
4. NÁVRH VYBRANÝCH PRVKŮ Z UHPC

Tab. 15 Tabulka zatěžovacích stavů

Zatěžovací stavy		
	ZS01	Vlastní tíha
	ZS02	Užitné zatížení
Sníh	ZS03	Zatížení nevátým sněhem (i) - dle hlavní stati EC 1
	ZS04	Zatížení nevátým sněhem (ii) - dle hlavní stati EC 1
	ZS05	Zatížení vátým sněhem - střechy vícelodních budov dle národní přílohy (ii-B.2)
	ZS06	Zatížení vátým sněhem - pro vyvolání maximálního kroucení (iii)
Větr	ZS07	Zatížení větr příčný - sání
	ZS08	Zatížení větr příčný - tlak
	ZS09	Zatížení větr příčný - sání + tlak

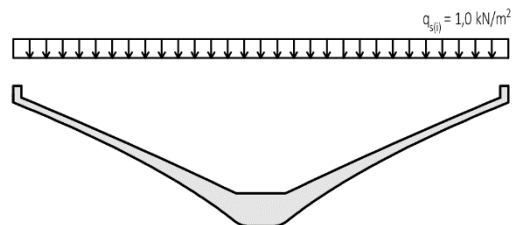
ZS02 - Užitné zatížení

dle ČSN EN 1991-1-1 - kategorie střechy H



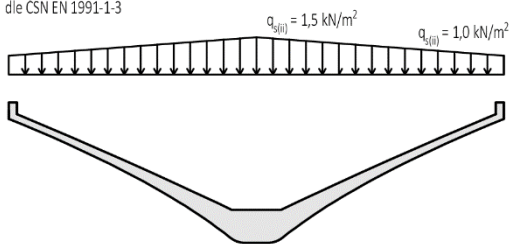
ZS03 - Zatížení nevátým sněhem (i)

dle ČSN EN 1991-1-3



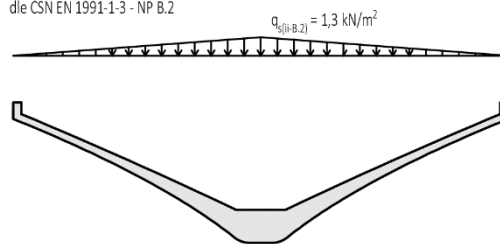
ZS04 - Zatížení nevátým sněhem (ii)

dle ČSN EN 1991-1-3



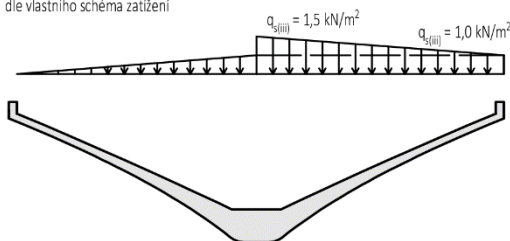
ZS05 - Zatížení vátým sněhem dle NP (ii - B.2)

dle ČSN EN 1991-1-3 - NP B.2

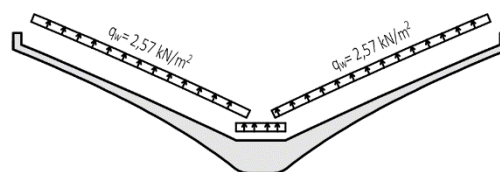


ZS06 - Zatížení vátým sněhem (iii) - kroucení

dle vlastního schéma zatížení

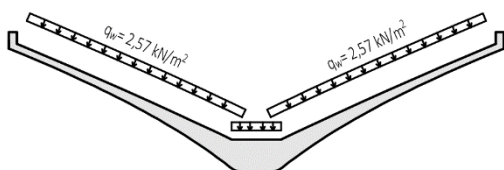


ZS07 - Zatížení větrem



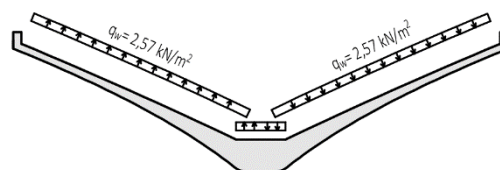
ZS08 - Zatížení větrem

q_{st} = 2 kN/m²



ZS09 - Zatížení větrem

q_w = 2 kN/m²



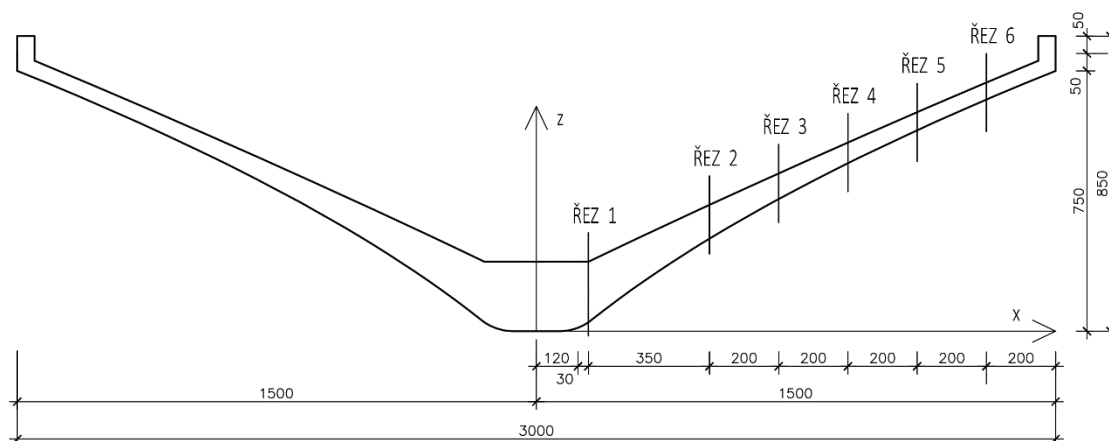
Obr. 86 Schéma jednotlivých zatěžovacích stavů

Kombinace zatěžovacích stavů

Kombinace zat. stavů je stanovena podle kombinačního vzorce 6.10. dle ČSN EN 1991.

Tab. 16 Kombinace zatěžovacích stavů

	VI. Tíha		Dominantní proměnné		Užitné zat.		red. zat. větrem
C01	1.4 x ZS01	+	1.5 x ZS03	+	1.4 x 0.6 ZS02	+	1.5 x 0.6 ZS07
C02	1.4 x ZS01	+	1.5 x ZS03	+	1.4 x 0.6 ZS02	+	1.5 x 0.6 ZS08
C03	1.4 x ZS01	+	1.5 x ZS03	+	1.4 x 0.6 ZS02	+	1.5 x 0.6 ZS09
C04	1.4 x ZS01	+	1.5 x ZS04	+	1.4 x 0.6 ZS02	+	1.5 x 0.6 ZS07
C05	1.4 x ZS01	+	1.5 x ZS04	+	1.4 x 0.6 ZS02	+	1.5 x 0.6 ZS08
C06	1.4 x ZS01	+	1.5 x ZS04	+	1.4 x 0.6 ZS02	+	1.5 x 0.6 ZS09
C07	1.4 x ZS01	+	1.5 x ZS05	+	1.4 x 0.6 ZS02	+	1.5 x 0.6 ZS07
C08	1.4 x ZS01	+	1.5 x ZS05	+	1.4 x 0.6 ZS02	+	1.5 x 0.6 ZS08
C09	1.4 x ZS01	+	1.5 x ZS05	+	1.4 x 0.6 ZS02	+	1.5 x 0.6 ZS09
C10	1.4 x ZS01	+	1.5 x ZS06	+	1.4 x 0.6 ZS02	+	1.5 x 0.6 ZS07
C11	1.4 x ZS01	+	1.5 x ZS06	+	1.4 x 0.6 ZS02	+	1.5 x 0.6 ZS08
C12	1.4 x ZS01	+	1.5 x ZS06	+	1.4 x 0.6 ZS02	+	1.5 x 0.6 ZS09
	VI. Tíha		Dominantní proměnné		Užitné zat.		red. zat. sněhem
C13	1.00 x ZS01	+	1.5 x ZS07	+	0 x 0.6 ZS02	+	1.00 x 0.5 ZS03
C14	1.00 x ZS01	+	1.5 x ZS07	+	0 x 0.6 ZS02	+	1.00 x 0.5 ZS04
C15	1.00 x ZS01	+	1.5 x ZS07	+	0 x 0.6 ZS02	+	1.00 x 0.5 ZS05
C16	1.00 x ZS01	+	1.5 x ZS07	+	0 x 0.6 ZS02	+	1.00 x 0.5 ZS06
C17	1.4 x ZS01	+	1.5 x ZS08	+	1.4 x 0.6 ZS02	+	1.5 x 0.5 ZS03
C18	1.4 x ZS01	+	1.5 x ZS08	+	1.4 x 0.6 ZS02	+	1.5 x 0.5 ZS04
C19	1.4 x ZS01	+	1.5 x ZS08	+	1.4 x 0.6 ZS02	+	1.5 x 0.5 ZS05
C20	1.4 x ZS01	+	1.5 x ZS08	+	1.4 x 0.6 ZS02	+	1.5 x 0.5 ZS06
C21	1.00 x ZS01	+	1.5 x ZS0	+	0 x 0.6 ZS02	+	1.00 x 0.5 ZS03
C22	1.00 x ZS01	+	1.5 x ZS09	+	0 x 0.6 ZS02	+	1.00 x 0.5 ZS04
C23	1.00 x ZS01	+	1.5 x ZS09	+	0 x 0.6 ZS02	+	1.00 x 0.5 ZS05
C24	1.00 x ZS01	+	1.5 x ZS09	+	0 x 0.6 ZS02	+	1.00 x 0.5 ZS06
	VI. Tíha		Dominantní proměnné		Užitné zat.		red. zat. sněhem
C25	1.00 x ZS01	+	1.5 x ZS07	+	0 x 0.6 ZS02	+	0.00 x 0.00 -
C26	1.00 x ZS01	+	1.5 x ZS08	+	0 x 0.6 ZS02	+	0.00 x 0.00 -
C27	1.00 x ZS01	+	1.5 x ZS09	+	0 x 0.6 ZS02	+	0.00 x 0.00 -

Vnitřní síly – konzola

Obr. 87 Schéma význačných řezů na konzole

Vnitřní síly na konzole byly stanoveny pro jednotlivé kombinace zatěžovacích stavů (dle tab. 16) v programu Excel. Následně byli ověřeny v programu Scia Engineer [B]. V tabulce 17 jsou uvedeny návrhové vnitřní síly vycházející z obálky ohybových momentů a posouvajících sil.

Tab. 17 Hodnoty obálky vnitřních sil ve význačných řezech

	$M_{ed,max}$	$M_{ed,min}$	$V_{Ed,max}$	$V_{Ed,min}$
	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]
Řez 1	8.932	-2.482	11.820	-0.690
Řez 2	8.104	-2.403	8.236	-1.625
Řez 3A	7.161	-2.220	6.333	-1.828
Řez 3B	7.083	-2.202	6.206	-1.831
Řez 4	5.732	-1.851	4.411	-1.727
Řez 5	4.074	-1.348	2.791	-1.356
Řez 6	2.253	-0.752	1.398	-0.799

Do řezu č.3 je konzola vyztužena betonářskou výztuží. Od řezu č.3 již není s betonářskou výztuží uvažováno a veškerému zatížení vzdoruje samotný ÚHPC.

Viz výkres výztuže prvku – PŘÍLOHA D.

MSÚ – ohyb – konzola

Posudek je proveden ve všech uvedených řezech. Návrhové hodnoty jednotlivých mezí pracovního diagramu jsou určeny dle rovnic uvedených v kapitole 3.3. Výpočet těchto hodnot je třeba provést pro každý posuzovaný průřez s odlišnou geometrií, nebo s jiným koeficientem orientace vláken. Na obr. 87 jsou schématicky označeny jednotlivé posuzované řezy konzoly. Řezy jsou posouzeny pomocí programu Excel [A].

Řez 1

$E_{cm} =$	45	GPa	$f_{ctk} =$	9.0	MPa	$e_{cod} =$	0.00189	[-]
$f_{ck} =$	150	MPa	$f_{ctk,el} =$	7.0	MPa	$e_{cud} =$	0.00317	[-]
$f_{cm} =$	160	MPa	$K_{global} =$	1.25	[-]	$\epsilon_{u,el} =$	0.00012	[-]
$f_{yd} =$	434.78	MPa	$f_{ctd} =$	5.54	MPa	$\epsilon_{u,lim} =$	0.02842	[-]
$\epsilon_{sy} =$	0.0024	[-]	$f_{ctd,el} =$	4.31	MPa	$E_1 =$	36.00	GPa
$E_s =$	200	GPa	$L_f =$	12	mm	$E_2 =$	0.043	GPa

$h =$	158	mm	\emptyset výztuže	10	mm	$d =$	128.3	mm
$b =$	1000	mm	rozteč	200	mm á 1 m			
$c =$	25	mm	$A_{sy,prov} =$	393	mm ²			

x [mm]	F_{cc} [kN]	$\sum M_{cci}$ [kNm]	F_{st} [kN]	ϵ_s [%]	F_{ct} [kN]	$\sum M_{fci}$ [kNm]	$\sum F_i = 0$	M_{Rd} [kNm]
66.893	1251.31	42.33	853.69	0.0029	397.61	18.51	0.00	113.301
	50%		34%		16%			

Řez 2

$E_{cm} =$	45	GPa	$f_{ctk} =$	9.0	MPa	$e_{cod} =$	0.00189	[-]
$f_{ck} =$	150	MPa	$f_{ctk,el} =$	7.0	MPa	$e_{cud} =$	0.00317	[-]
$f_{cm} =$	160	MPa	$K_{global} =$	1.25	[-]	$\epsilon_{u,el} =$	0.00012	[-]
$f_{yd} =$	434.78	MPa	$f_{ctd} =$	5.54	MPa	$\epsilon_{u,lim} =$	0.04745	[-]
$\epsilon_{sy} =$	0.0024	[-]	$f_{ctd,el} =$	4.31	MPa	$E_1 =$	36.00	GPa
$E_s =$	200	GPa	$L_f =$	12	mm	$E_2 =$	0.026	GPa

$h =$	95	mm	\emptyset výztuže	10	mm	$d =$	57.83	mm
$b =$	1000	mm	rozteč	200	mm á 1 m			
$c =$	32	mm	$A_{sy,prov} =$	393	mm ²			

x [mm]	F_{cc} [kN]	$\sum M_{cci}$ [kNm]	F_{st} [kN]	ϵ_s [%]	F_{ct} [kN]	$\sum M_{fci}$ [kNm]	$\sum F_i = 0$	M_{Rd} [kNm]
40.647	760.36	15.63	526.98	0.0013	233.38	6.42	0.00	31.108
	50%		35%		15%			

4. NÁVRH VYBRANÝCH PRVKŮ Z UHPC

Řez 3A

$E_{cm} =$	45	GPa	$f_{ctk} =$	9.0	MPa	$e_{c0d} =$	0.00189	[-]
$f_{ck} =$	150	MPa	$f_{ctk,el} =$	7.0	MPa	$e_{cud} =$	0.00317	[-]
$f_{cm} =$	160	MPa	$K_{global} =$	1.25	[-]	$\epsilon_{u,el} =$	0.00012	[-]
$f_{yd} =$	434.78	MPa	$f_{ctd} =$	5.54	MPa	$\epsilon_{u,lim} =$	0.06250	[-]
$\epsilon_{sy} =$	0.0024	[-]	$f_{ctd,el} =$	4.31	MPa	$E_1 =$	36.00	GPa
$E_s =$	200	GPa	$L_f =$	12	mm	$E_2 =$	0.020	GPa

$h =$	72	mm	\varnothing výztuže	10	mm	$d =$	42	mm
$b =$	1000	mm	rozteč	200	mm á 1 m			
$c =$	25	mm	$A_{sy,prov} =$	393	mm ²			

x [mm]	F_{cc} [kN]	$\sum M_{cci}$ [kNm]	F_{st} [kN]	ϵ_s [%]	F_{ct} [kN]	$\sum M_{fci}$ [kNm]	$\sum F_i = 0$	M_{Rd} [kNm]
31.500	589.25	9.39	415.50	0.0011	173.75	3.57	0.00	17.322
	50%		35%		15%			

Řez 3B

$E_{cm} =$	45	GPa	$f_{ctk} =$	9.0	MPa	$e_{c0d} =$	0.00189	[-]
$f_{ck} =$	150	MPa	$f_{ctk,el} =$	7.0	MPa	$e_{cud} =$	0.00317	[-]
$f_{cm} =$	160	MPa	$K_{global} =$	1.25	[-]	$\epsilon_{u,el} =$	0.00012	[-]
$f_{yd} =$	434.78	MPa	$f_{ctd} =$	5.54	MPa	$\epsilon_{u,lim} =$	0.06362	[-]
$\epsilon_{sy} =$	0.0024	[-]	$f_{ctd,el} =$	4.31	MPa	$E_1 =$	36.00	GPa
$E_s =$	200	GPa	$L_f =$	12	mm	$E_2 =$	0.019	GPa

$h =$	71	mm
$b =$	1000	mm

x [mm]	F_{cc} [kN]	$\sum M_{cci}$ [kNm]	F_{ct} [kN]	$\sum M_{fci}$ [kNm]	$\sum F_i = 0$	M_{Rd} [kNm]	M_{Ed} [kNm]	Využití
8.206	306.72	1.39	306.72	9.67	0.00	11.058	7.083	64%

Řez 4

$E_{cm} =$	45	GPa	$f_{ctk} =$	9.0	MPa	$e_{c0d} =$	0.00189	[-]
$f_{ck} =$	150	MPa	$f_{ctk,el} =$	7.0	MPa	$e_{cud} =$	0.00317	[-]
$f_{cm} =$	160	MPa	$K_{global} =$	1.25	[-]	$\epsilon_{u,el} =$	0.00012	[-]
$f_{yd} =$	434.78	MPa	$f_{ctd} =$	5.54	MPa	$\epsilon_{u,lim} =$	0.07970	[-]
$\epsilon_{sy} =$	0.0024	[-]	$f_{ctd,el} =$	4.31	MPa	$E_1 =$	36.00	GPa
$E_s =$	200	GPa	$L_f =$	12	mm	$E_2 =$	0.015	GPa

$h =$	56	mm
$b =$	1000	mm

x [mm]	F_{cc} [kN]	$\sum M_{cci}$ [kNm]	F_{ct} [kN]	$\sum M_{fci}$ [kNm]	$\sum F_i = 0$	M_{Rd} [kNm]	M_{Ed} [kNm]	Využití
6.405	245.56	0.85	245.56	6.20	0.00	7.055	5.732	81%

Řez č.5

$E_{cm} =$	45	GPa	$f_{ctk} =$	9.0	MPa	$e_{c0d} =$	0.00189	[-]
$f_{ck} =$	150	MPa	$f_{ctk,el} =$	7.0	MPa	$e_{cud} =$	0.00317	[-]
$f_{cm} =$	160	MPa	$K_{global} =$	1.25	[-]	$\epsilon_{u,el} =$	0.00012	[-]
$f_{yd} =$	434.78	MPa	$f_{ctd} =$	5.54	MPa	$\epsilon_{u,lim} =$	0.09119	[-]
$\epsilon_{sy} =$	0.0024	[-]	$f_{ctd,el} =$	4.31	MPa	$E_1 =$	36.00	GPa
$E_s =$	200	GPa	$L_f =$	12	mm	$E_2 =$	0.014	GPa

$h =$	49	mm
$b =$	1000	mm

x [mm]	F_{cc} [kN]	$\sum M_{cci}$ [kNm]	F_{ct} [kN]	$\sum M_{fci}$ [kNm]	$\sum F_i = 0$	M_{Rd} [kNm]	M_{Ed} [kNm]	Využití
5.534	214.94	0.64	214.94	4.75	0.00	5.393	4.074	76%

Řez č.6

$E_{cm} =$	45	GPa	$f_{ctk} =$	9.0	MPa	$e_{c0d} =$	0.00189	[-]
$f_{ck} =$	150	MPa	$f_{ctk,el} =$	7.0	MPa	$e_{cud} =$	0.00317	[-]
$f_{cm} =$	160	MPa	$K_{global} =$	1.25	[-]	$\epsilon_{u,el} =$	0.00012	[-]
$f_{yd} =$	434.78	MPa	$f_{ctd} =$	5.54	MPa	$\epsilon_{u,lim} =$	0.09444	[-]
$\epsilon_{sy} =$	0.0024	[-]	$f_{ctd,el} =$	4.31	MPa	$E_1 =$	36.00	GPa
$E_s =$	200	GPa	$L_f =$	12	mm	$E_2 =$	0.013	GPa

$h =$	48	mm
$b =$	1000	mm

x [mm]	F_{cc} [kN]	$\sum M_{cci}$ [kNm]	F_{ct} [kN]	$\sum M_{fci}$ [kNm]	$\sum F_i = 0$	M_{Rd} [kNm]	M_{Ed} [kNm]	Využití
5.329	207.61	0.59	207.61	4.44	0.00	5.029	2.253	45%

MSŮ – ohyb – konzola – shrnutí

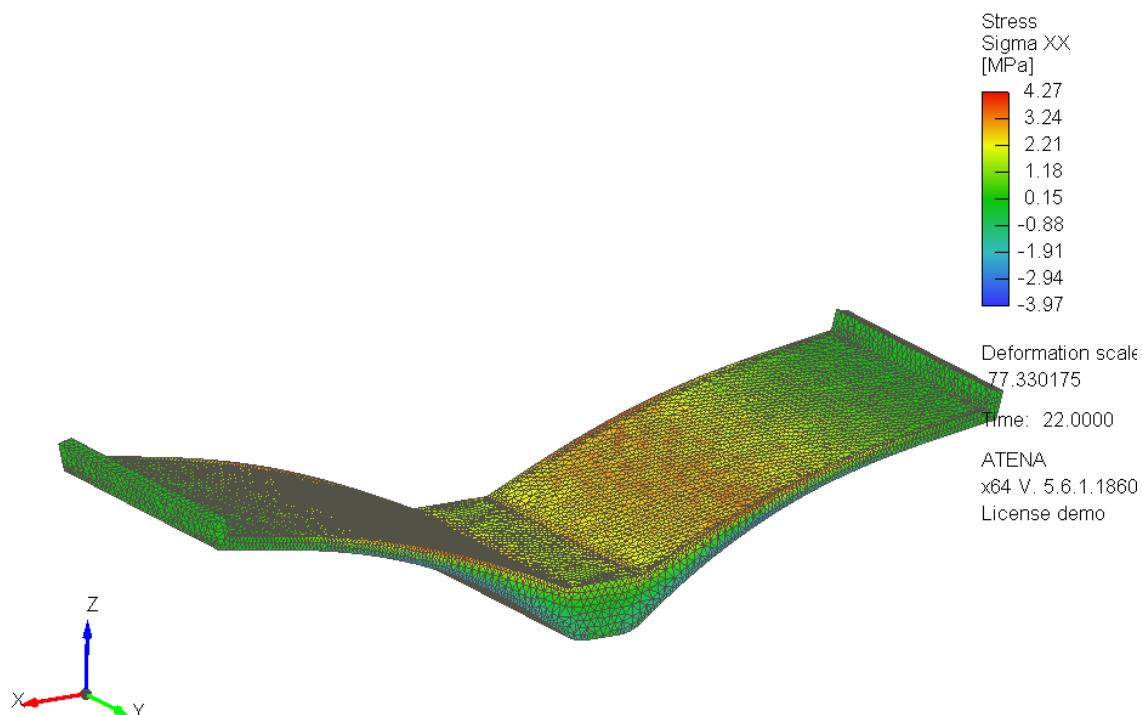
Tab. 18 Posouzení jednotlivých řezů konzoly na ohybové namáhání

Konzola – řez	M_{Ed}	M_{Rd}	Využití
Řez 1	8.9	113,31	8.0 %
Řez 2	8.1	31,11	26,0 %
Řez 3A	7.2	17,32	41.3 %
Řez 3B	7.1	11.06	64.0 %
Řez 4	5.7	7.01	81.2 %
Řez 5	4.1	5.39	75.5 %
Řez 6	2.3	5.03	44.8 %

Návrh konzoly vyhovuje na ohybové namáhání

Ověření návrhu – program Atena

Chování konzol prvku je porovnáváno s chováním prvku na výsekovém modelu v programu pro nelineární analýzu Atena Science od společnosti Červenka Consulting [C].

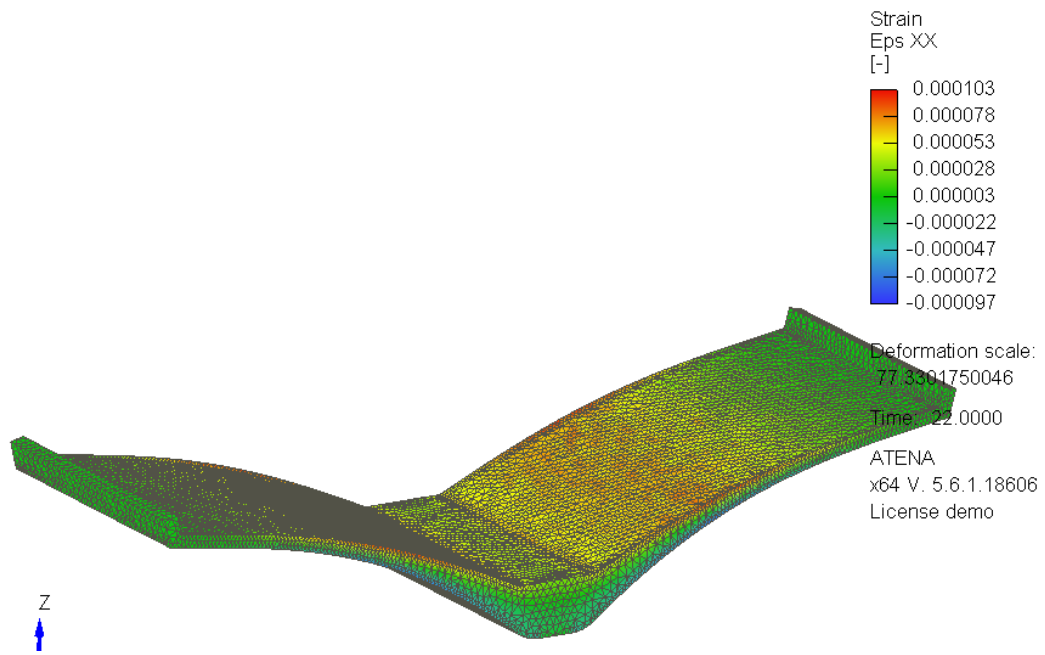


Obr. 88 Výsekový model v programu Atena Science [C] – zatížení odpovídá hodnotě 4,5 kN/m²

Hodnoty získané programem jsou pouze orientační. Chování modelu a skutečného prvku je silně závislé na vložených materiálových parametrech. Materiálové parametry zvolené pro tuto úlohu vycházejí z doporučených hodnot dle NF P18-710 a nejsou výsledkem materiálových zkoušek. Stejně tak materiálové parametry pro nelineární model jsou odhadnuty. Pro získání reálných dat z modelu je třeba model verifikovat.

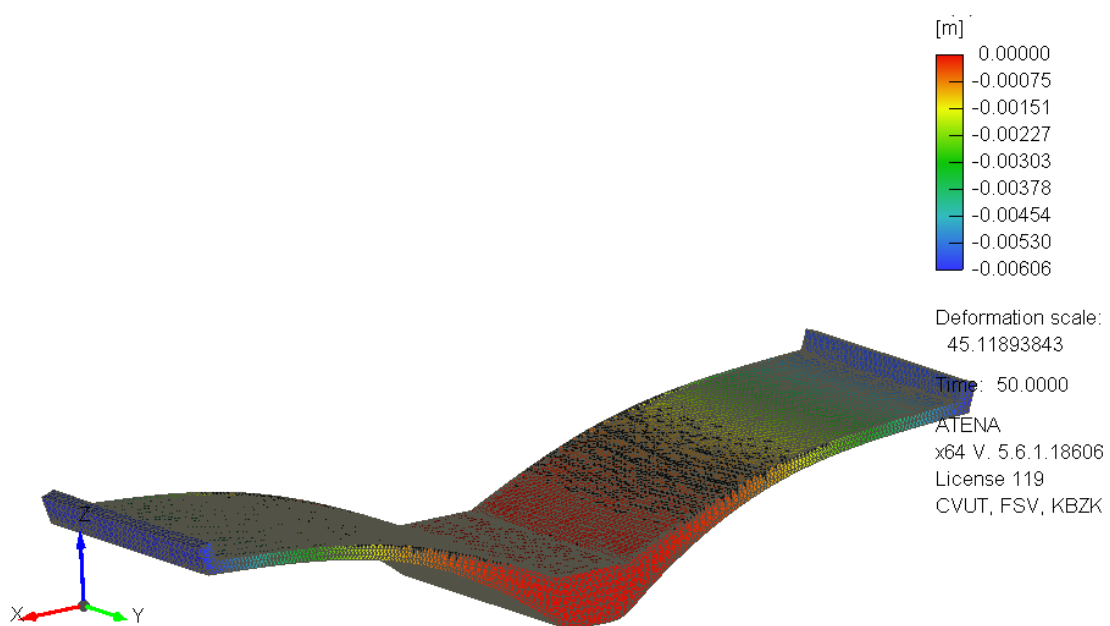
Pro verifikaci pevnosti v tahu je třeba provést zkoušku v tahu za ohybu (ideálně čtyřbodovým ohybem) a to jak v programu, tak v laboratoři na fyzickém vzorku. Následně jsou porovnány pracovní diagramy v tahu obou zkoušek a materiálový model v programu se upraví [46]. K dosažení dostatečné shody je obvykle třeba několik iterací. Takto odladěný materiálový model se použije do modelu zkoumaného prvku. Následně je třeba verifikovat model prvku na základě zkoušek prvku ve skutečném měřítku. Celý proces modelování chování prvků nelineární analýzou z UHPC je časově a finančně náročný.

Výše uvedené postupy výpočtu MSŮ dle NF P18-710 nelze s výsledky získané programem přímo porovnat již z podstaty obou výpočtů. Výpočet dle NF P18-710 je značně idealizovaný a konzervativní. Oproti tomu nelineární model se snaží co nejvěrněji napodobit skutečnost.



Obr. 89 Výsekový model v programu Atena Science [C] – přetvoření ve směru konzol

Oblast největších přetvoření je na obr. 89 znázorněna mezi řezy č.1 až č.4. Přetvoření odpovídá souměrnému plošnému zatížení $4,5 \text{ kN/m}^2$. Tato hodnota odpovídá maximálnímu symetrickému zatížení pro mezní stav únosnosti. Dle modelu nevznikají v prvku žádné trhliny ($\epsilon_{\text{model}} = 0,0103\% < \epsilon_{u,el} = 0,0120\%$). Na základě výše uvedeného lze odhadnout, že v mezním stavu použitelnosti nevzniknou trhliny od ohybu. Je třeba ale uvážit vznik trhlin od smršťování. Na základě modelu se dá přibližně odhadnout deformace konců konzol. Odhad je proveden na konzole s trhlinami odpovídajícím plošnému zatížení cca 10 kN/m^2 . Deformace konců konzol na takto zatíženém průřezu dosahuje 6 mm . Odhad deformace konzol v MSP ve svislém směru při zohlednění reologických vlivů – do 10 mm .



Obr. 90 Výsekový model v programu Atena Science [C] – deformace ve směru osy z

Vnitřní síly – podélný směr prvku

V podélném směru působí prvek jako prostý nosník délky 10 m se vzepětím 0,5 m. Prvek je vymodelován v programu Scia Engineer jako prutový prvek. Prut je zatížen posouvajícími silami od konzol. Od každé konzoly („křídla“) působí ohybový moment. Prvek je symetrický podle podélné osy a momenty se v případě symetrického zatížení navzájem vyruší. V případě dominantního zatížení na jedné konzole dochází ke kroucení celého prvku. Kombinace zatížení C12 je nejnepříznivější z hlediska kroucení.

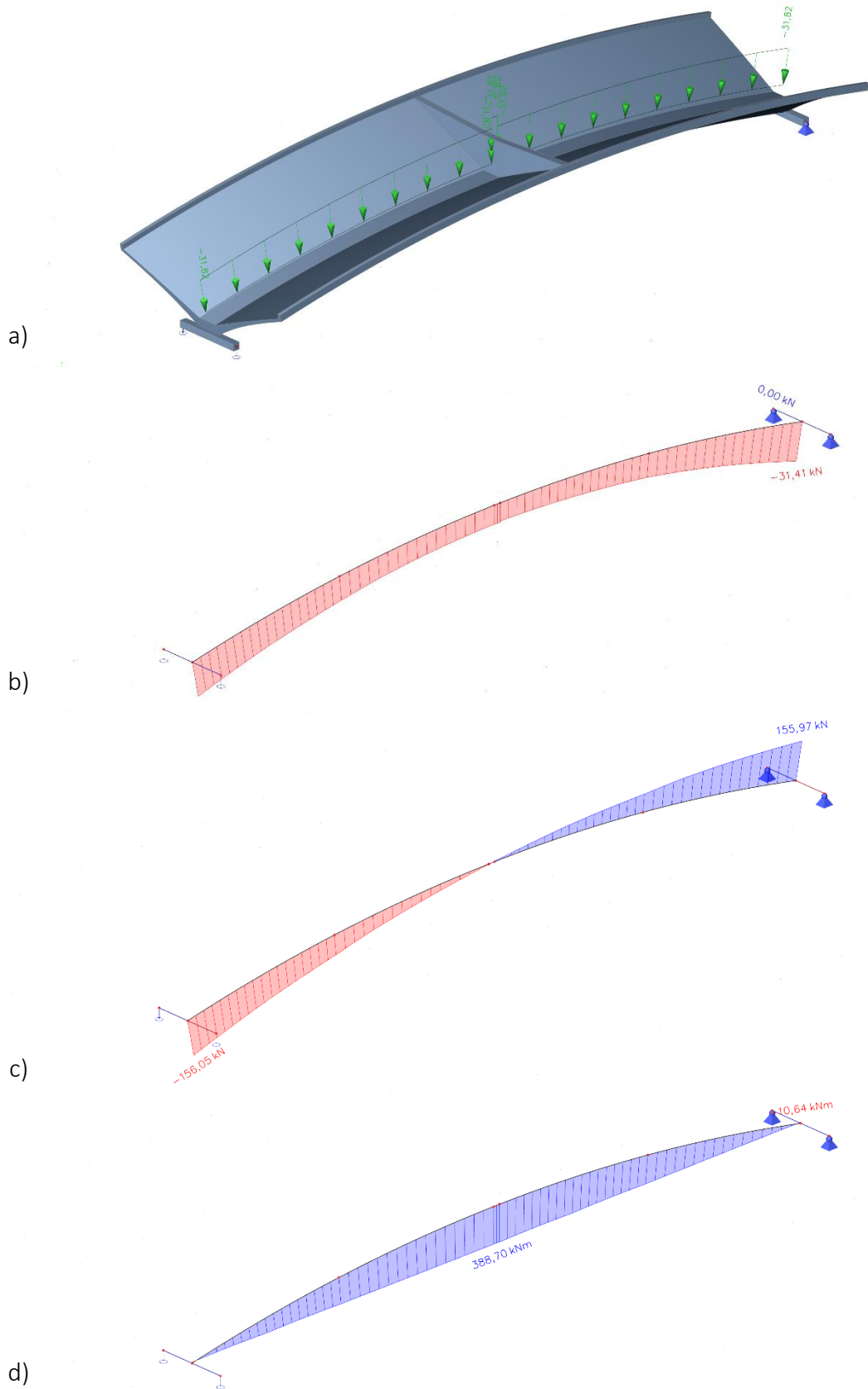
Tab. 19 Kombinace zatěžovacích stavů – zatížení žebra levou a pravou konzolou

	$V_{Ed,L}$	$V_{Ed,P}$	ΣV		$M_{Ed,L}$	$M_{Ed,P}$	ΣM
	[kN]	[kN]	[kN]		[kNm]	[kNm]	[kNm]
C01	7.791	7.791	15.582		3.268	3.268	0.000
C02	10.331	10.331	20.662		7.940	7.940	0.000
C03	10.331	10.331	20.662		7.940	7.940	0.000
C04	10.036	10.036	20.073		4.289	4.289	0.000
C05	12.576	12.576	25.153		8.960	8.960	0.000
C06	12.576	12.576	25.153		8.960	8.960	0.000
C07	7.157	7.157	14.314		2.244	2.244	0.000
C08	9.697	9.697	19.394		6.916	6.916	0.000
C09	9.697	9.697	19.394		6.916	6.916	0.000
C10	4.970	7.849	12.819		0.753	2.798	2.045
C11	7.510	11.455	18.965		5.425	7.469	2.045
C12	4.970	11.455	16.425		0.753	7.469	6.716
C13	-0.465	-0.465	-0.930		-1.746	-1.746	0.000
C14	-0.121	-0.121	-0.242		-1.406	-1.406	0.000
C15	-0.332	-0.332	-0.665		-2.088	-2.088	0.000
C16	-0.332	0.627	0.295		1.867	2.549	0.682
C17	2.597	2.597	5.194		8.393	8.393	0.000
C18	0.627	0.627	1.255		8.903	8.903	0.000
C19	-0.332	-0.332	-0.665		7.880	7.880	0.000
C20	-2.161	0.627	-1.533		8.221	8.903	0.682
C21	5.889	5.889	11.777		6.040	6.040	0.000
C22	6.637	6.637	13.274		6.380	6.380	0.000
C23	6.546	6.546	13.092		5.698	5.698	0.000
C24	7.506	8.465	15.971		5.420	6.380	0.960
C25	0.575	0.575	1.150		-2.482	-2.482	0.000
C26	4.809	4.809	9.617		5.303	5.303	0.000
C27	4.809	4.809	9.617		5.303	5.303	0.000

maximum:

25.153

6.716

Zatěžovací stav C05

Obr. 91 Schéma zatížení (a), normálová síla (b), posouvající síla (c) a max ohybový moment (d) pro kombinaci C05, grafický výstup z programu Scia Engineer [B]

MSÚ – ohyb – podélný směr prvku

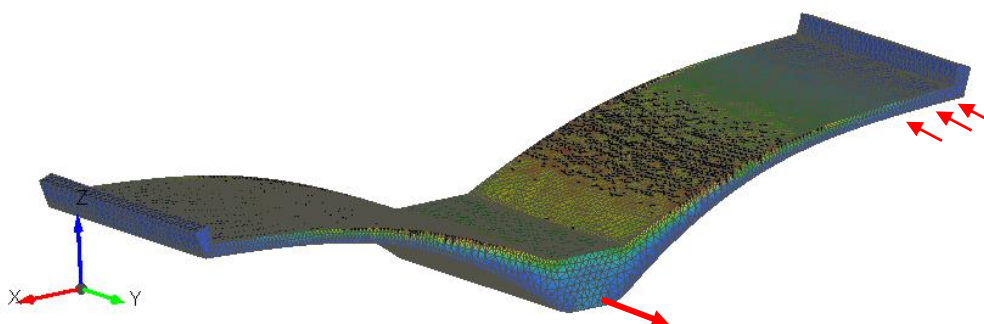
$E_{cm} =$	45	GPa	$f_{ctk} =$	9.0	MPa	$e_{c0d} =$	0.00189	[-]
$f_{ck} =$	150	MPa	$f_{ctk,el} =$	7.0	MPa	$e_{cud} =$	0.00317	[-]
$f_{cm} =$	160	MPa	$K_{global,x} =$	1.35	[-]	$\epsilon_{u,el} =$	0.00012	[-]
$f_{yd} =$	434.78	MPa	$f_{ctd,x} =$	5.13	MPa	$\epsilon_{u,lim} =$	0.00563	[-]
$\epsilon_{sy} =$	0.0024	[-]	$f_{ctd,el,x} =$	3.99	MPa	$E_1 =$	33.33	GPa
$E_s =$	200	GPa	$L_f =$	12	mm	$E_2 =$	0.207	GPa
$h =$	800	mm	\varnothing výztuže	20	mm	$d_1 =$	755.0	mm
$b =$	240	mm	prutů	5	ks	$z_1 =$	670.1	mm
$c =$	25	mm	$A_{sy,prov} =$	1571	mm ²	$z_2 =$	640.1	mm
x [mm]	F_{cc} [kN]	$\sum M_{cci}$ [kNm]	F_{st} [kN]	ϵ_s [-]	F_{ct} [kN]	$\sum M_{fci}$ [kNm]	$\sum F_i = 0$	M_{Rd} [kNm]
84.873	695.98	29.63	682.95	0,027	13.02	13.02	0.00	492
	50%		49%		1%			

$$\underline{M_{Ed,max} = 388,7 \text{ kNm} < M_{Rd} = 492 \text{ kNm}}$$

Pozn.:

Provedený výpočet únosnosti prvku v ohybu dle [2] není zcela přesný. Výpočet je proveden dle lineárně pružné analýzy a předpokládá zachování rovinnosti průřezu dle Bernouliho-Navierovi hypotézy. Vzhledem k extrémně štíhlé geometrii v tlačené oblasti průřezu a masivnější tažené části průřezu nemusí být Bernouliho-Navierova hypotéza zcela vypovídající.

Při zatíženích blízkých mezním stavu únosnosti se začne projevovat efekt zvaný smykové ochabnutí na koncích konzol. Smykové ochabnutí může způsobovat další rozvoj trhlin a mít za následek snížení ohybové únosnosti průřezu.



Obr. 92 Znárodnění normálové síly v průřezu – vliv smykového ochabnutí, zdroj [C]

Průřez je navržen s rezervou ohybové únosnosti (20 %). Ověření skutečné únosnosti průřezu je předmětem experimentálních zkoušek na prototypu prvku ve skutečné velikosti. Poznatky získané experimentálním ověřením je vhodné využít pro vytvoření globálního prostorového modelu a jeho verifikaci.

MSÚ – smyk od posouvající síly – podélný směr prvku

Posouzení [2] je provedeno na hlavním žeburu v místě změny geometrie (200 mm od středu uložení). Vliv konzol na smykovou únosnost je zanedbán. Třmínky nejsou navrženy.

$$V_{Ed} \leq \min(V_{Rd}; V_{Rd,max}) \quad (4.18)$$

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f} \quad (4.19)$$

Stanovení V_{Rd}

$$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_{cf} \cdot \gamma_E} \cdot k \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} \cdot b_w \cdot h \quad (4.20)$$

kde:

$$k = 1 + 3 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{ck}} = 1 + 3 \cdot \frac{0,65}{150} = 1,013 \quad (4.21)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} = \frac{31400}{48000} = 0,65 \text{ MPa} \quad (4.22)$$

$$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{1,3 \cdot 1,15} \cdot 1,013 \cdot 150^{\frac{1}{2}} \cdot 240 \cdot 200 = 70,781 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,s} = 0 \text{ kN} \quad (\text{příspěvek smykové výztuže – zanedbání konstrukční v.}) \quad (4.23)$$

$$V_{Rd,f} = A_{fv} \cdot \sigma_{Rd,f} \cdot \cot \theta \quad (\text{příspěvek rozptýlené výztuže}) \quad (4.24)$$

kde:

$$A_{fv} = b_w \cdot z = b_w \cdot 0,9 \cdot d = b_w \cdot 0,9 \cdot \frac{7}{8} \cdot h = 240 \cdot 0,9 \cdot \frac{7}{8} \cdot 200 = 37800 \text{ mm}^2 \quad (4.25)$$

$$\sigma_{Rd,f} = \frac{1}{K \cdot \gamma_{cf}} \cdot \frac{1}{\varepsilon^* - \varepsilon_{el}} \cdot \int_{\varepsilon_{el}}^{\varepsilon^*} \sigma_f(\varepsilon) \cdot d\varepsilon = 3,95 \text{ MPa} \quad (4.26)$$

Pozn.: $\sigma_{Rd,f}$ je střední hodnota pevnosti v tahu po vzniku trhliny podél smykové trhliny

$$\varepsilon^* = \max(\varepsilon_u; \varepsilon_{u,lim}) = 0,005625 \quad (4.27)$$

$$\theta = 30^\circ$$

$$V_{Rd,f} = 37800 \cdot 3,95 \cdot \cot 30 = 258,31 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = 70,78 + 0 + 258,31 = 329,09 \text{ kN} \quad (4.19)$$

$V_{Rd,max}$ - únosnost tlakové diagonály

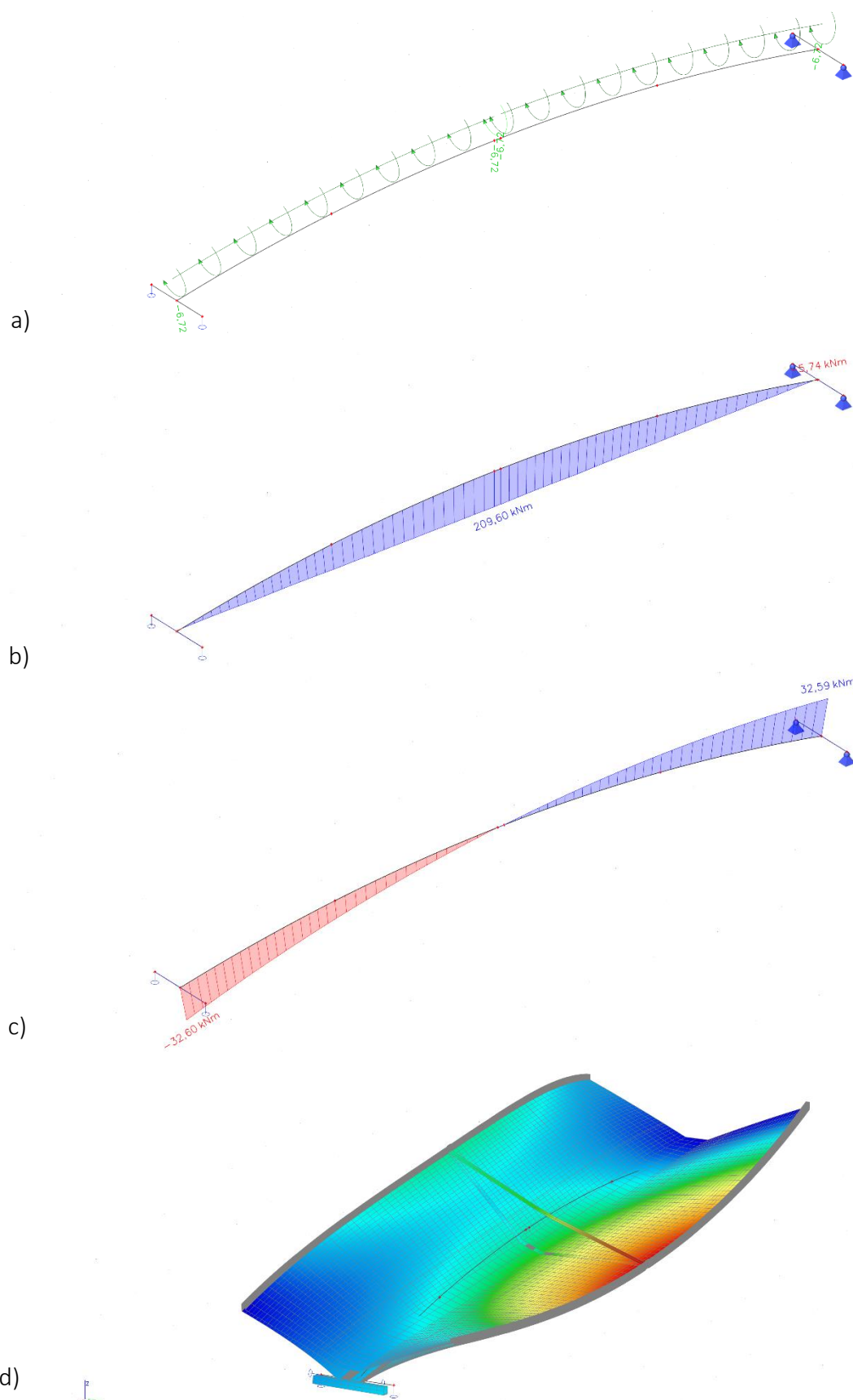
$$V_{Rd,max} = 2,3 \cdot \frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z \cdot f_{ck}^{2/3} \cdot \tan \theta \quad (4.28)$$

$$V_{Rd,max} = 2,3 \cdot \frac{0,85}{1,5} \cdot 240 \cdot 0,9 \cdot \frac{7}{8} \cdot 200 \cdot 150^{2/3} \cdot \tan 30 = 803,01 \text{ kN}$$

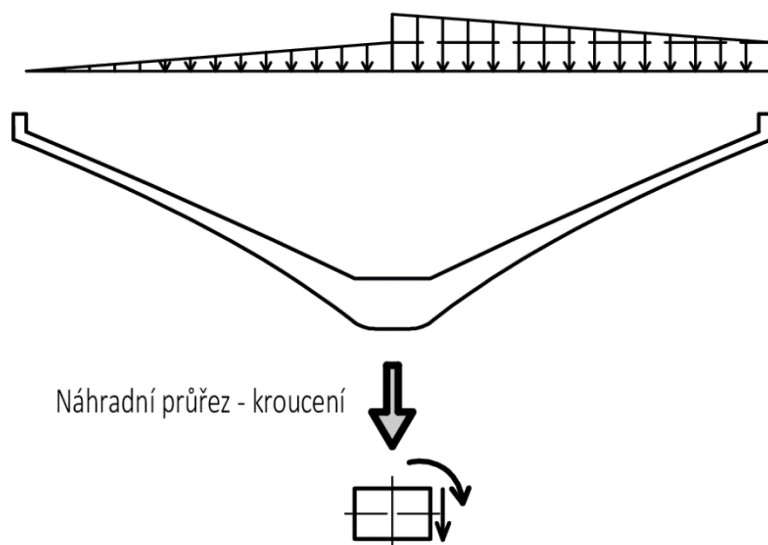
$$V_{Ed} = 156 \text{ kN} \leq V_{Rd} = \min(329,09 \text{ kN}; 803,01 \text{ kN})$$

VYHOVÍ

Zatěžovací stav C12 – kroucení

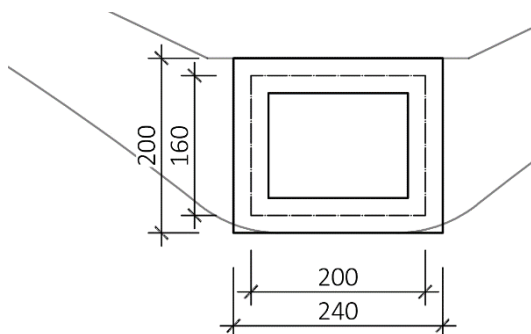


Obr. 93 Zatížení (a), ohybový moment (b), krouticí moment m_x (c), tvar deformovaného prvku (d), grafický výstup z programu Scia Engineer [B]

MSŮ – žebro – kroucení

Obr. 94 Kroucení – náhradní obdélníkový průřez

Návrh třmínek na kroucení je proveden na náhradním obdélníkovém průřezu dle NF P18-710 (obdobně jako dle ČSN EN 1992-1-1).

Analogický tenkostěnný dutý průřez

Obr. 95 Analogický tenkostěnný dutý průřez

$$t_{eff} = \frac{1}{6} \cdot b_w = \frac{1}{6} \cdot 240 = 40 \text{ mm}$$

$$A_k = 200 \cdot 160 = 32\,000 \text{ mm}^2$$

Krutící moment při vzniku trhlin

$$T_{Rd,max} = 2,3 \cdot \frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c} \cdot 2 \cdot A_k \cdot t_{eff} \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \cdot \tan \theta \quad (4.29)$$

$$T_{Rd,max} = 2,3 \cdot \frac{0,85}{1,3} \cdot 2 \cdot 32\,000 \cdot 40 \cdot 150^{\frac{2}{3}} \cdot \tan 30 \quad (4.30)$$

$$T_{Rd,max} = 62,74 \text{ kNm}$$

$$T_{Ed} = 32,6 \text{ kNm} < T_{Rd,max} = 62,74 \text{ kNm}$$

Napětí od kroucení přeneše UHPC, není třeba navrhovat výztuž na kroucení.

Kombinace smyku od kroucení a posouvající síly

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 1,0 \quad (4.31)$$

$$\frac{32,6}{62,74} + \frac{80}{803} \leq 1,0$$

$$0,62 < 1,0$$

Podmínka kombinace smyku od posouvající síly a kroucení vyhovuje. Není třeba navrhovat třmínky. Postačí konstrukční vyztužení třmínky.

Za pomoci NF P18-710 byla posouzena smyková únosnost i únosnost prvku v kroucení. Do prvku není nutné navrhovat smykovou výztuž. Podmínku minimálního stupně vyztužení $\rho_{w,min}$ není nutné stanovovat [2]. Je ale třeba dodržet maximální vzdálenost třmínků $s_{t,max} \leq 300 \text{ mm}$ dle ČSN EN 1992-1 – NP86.

Návrh konstrukční smykové výztuže: $\quad \quad \quad \varnothing 8 \text{ mm} \text{ á } 300 \text{ mm}$

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s \cdot b_w \cdot \sin \alpha} = \frac{\frac{1}{4} \pi \cdot 8^2}{300 \cdot 240 \cdot \sin 90} = 0,07\% \quad (4.32)$$

Konstrukční zásady

Vybrané konstrukční zásady (kotevní délky, přesahové délky) jsou uvedeny v **PŘÍLOZE A**.

Výkres tvaru prvku – PŘÍLOHA CVýkres výztuže prvku – PŘÍLOHA DTechnologie výroby

Prvek bude betonován ve znovupoužitelné uzavřené ocelové formě. Objem betonovaného prvku je $3,1 \text{ m}^3$. Forma se bude skládat ze dvou částí – horního a spodního dílu. Předpokládá se vložení všech zabudovaných prvků (ocelové chráničky, kotevní desky a transportní kotvy) a vyztužení dílce do spodní formy. Následně se provede betonáž hlavního žebra a na prvek se umístí horní díl formy. Přestávka v betonáži prvku pro umístění horního dílu formy se předpokládá do 10 min (nutné koordinovat s požadavky technologa). Z důvodu použití UHPC ve formě SCC se nedoporučuje vibrovat vůbec, nebo jen velmi krátce a pod dohledem technologa (pro usnadnění úniku zachyceného vzduchu). Vzhledem k betonáži do uzavřené formy může docházet k zachycení vzduchových bublin na horním povrchu konzol. Bubliny vytvoří na finálním povrchu prvku póry, které mohou mít negativní vliv na odolnost jejich povrchu. Omezení tvorby těchto bublin je třeba věnovat zvýšenou pozornost.

Ošetřování

Vzhledem k rozměrům prvku se ošetřování předpokládá pouze skrápěním po odbednění prvku a betonáž při teplotách +10 až +25 °C. Prvek je třeba po odbednění umístit na skládku prefabrikátů tak, aby nebylo bráněno jeho smršťování.

Transport prvku

Před betonáží umístit do podélného žebra prvku dva transportní body. Každý transportní bod do vzdálenosti cca ¼ od okraje prvku (2,0 m). Návrh transportních bodů není součástí tohoto návrhu, ale prvek byl na zatížení během zvedání posouzen. Pro prvotní transport z formy použít vahadlo. Předpokládaná hmotnost prvku je < 8t.

4.1.2 Experimentální ověření prvku

Výpočet je proveden dle NF P18-710 [2] a je závislý na velkém množství materiálových parametrů. Součástí návrhu prvku proto musí být i jeho experimentální ověření. V této kapitole jsou popsány základní požadavky na zkoušení prvku. Způsoby zkoušení prvku by měli být určeny samostatným projektem se zohledněním použitých zkušebních zařízení / pomůcek dle možností výrobce. Příklad organizace zkoušek je uveden v kapitole 3.5.

V tomto prvku je vhodné věnovat pozornost zejména na:

Materiálové zkoušky

- odebrání vzorků během betonáže
- zkoušky UHPC v tahu za ohybu na vzorku 150 x 150 x 300 mm
- ověření chování použitého UHPC – klasifikace T3* (tahové zpevnění)
- zkouška pevnosti v tlaku a stanovení modulu pružnosti
- aktualizace materiálového modelu na základě zjištěných hodnot
- stanovení orientace vláken (K – faktor) ve vybraných oblastech prvku – odebrání vzorků z prototypu a v místě konzol (podélný i příčný směr), na spodní straně hlavního žebra a v horních ztužujících žebrech

Statické zkoušky prototypů

- ověření ohybové únosnosti konzol
- vliv smykového ochabnutí konzol na únosnost prvku
- ověření únosnosti celého prvku při návrhovém rovnoměrném zatížení
- ověření únosnosti prvky při vyvolání maximálního kroutícího momentu
- stanovení hodnot deformací v pro zatěžovací stavy MSP
- zohlednění vlivu smršťovacích trhlin na velikost deformace prvku
- zohlednění vlivu kvality horního povrchu prvku s ohledem na trvanlivost, povrch by měl být hladký a měl by obsahovat co nejméně dutin po vzduchových bublinách

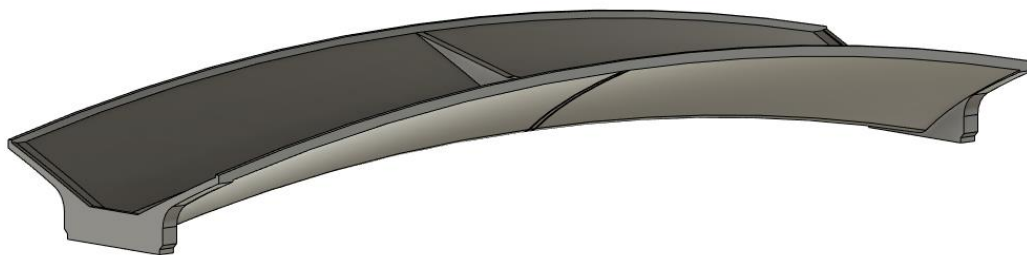
Na základě těchto experimentálního ověření prototypů bude navržen komplexní zkušební plán pro sériovou výrobu těchto prvků.

4.1.3 Zhodnocení

Navržený prvek zastřešení se snaží přiblížit možnosti využití výborných mechanicko-fyzikálních vlastností UHPC ve střešních konstrukcích. Tento prvek zřejmě nenajde masivní využití v běžných konstrukcích pozemních staveb, jelikož jsou na střešní pláště budov vyvíjeny vysoké nároky na tepelně-technické parametry.

Tento prvek nalezne využití v zastřešení staveb bez požadavků na zateplení střechy. Typicky zejména otevřené haly, částečně kryté sportovní stadiony, venkovní výstavní prostory, letištní hangáry, čerpací stanice, parkovací domy, zastřešení cest spojující jednotlivé nemocniční pavilony, autobusové a vlakové zastávky či nádraží.

Zásadní výhodou tohoto prvku oproti jiným dnes běžně vyráběným betonovým panelům (např. SPIROLL) je komplexnost daného řešení. Navržený prvek tvoří unikátní architektonické a konstrukční řešení. Po umístění prvku do finální pozice není třeba provádět instalaci střešního pláště a řešit odvodnění prvku. Po osazení je řešen pouze detail styků prvků (oplechování – obr. č.82).



Obr. 96 Zobrazení navrhovaného prvku zastřešení v axonometrii, [F]

4.2 Úhlová opěrná stěna

Opěrné stěny lze zařadit spíše mezi inženýrské konstrukce. Často se ale vyskytují u pozemních staveb, např. bytové domy ve svahu. Tyto opěrné konstrukce jsou často ponechány jako pohledové, bez dodatečné povrchové úpravy. V důsledku vystavení povětrnostním vlivům lze pozorovat v období několika málo let po výstavbě degradaci povrchu a zhoršení estetických kvalit. Nejedná o závažný problém s vlivem na primární (statickou) funkci, může ale zapříčinit vynaložení budoucích nákladů na sanaci povrchu s cílem obnovení vzhledu.



Obr. 97 Příklad opěrné stěny s nevzhledným povrchem. Stěna byla vybetonována v roce 2009. Fotoarchiv autora.

Opěrná stěna vyrobená z UHPC díky své vysoké trvanlivosti výrazně zvyšuje morální živostnost těchto konstrukcí. Zásadní nevýhodou oproti opěrné stěně z běžného betonu, je vysoká cena UHPC. Vytvoření např. gravitační opěrné stěny z UHPC by bylo ekonomicky nerentabilní. Opěrná stěna z UHPC tedy musí být tvarově optimalizována. Vzhledem k vysoké náročnosti technologie výroby je vhodné realizovat opěrné stěny jako prefabrikované konstrukce vyráběné ve speciálních opakovatelně použitelných ocelových formách. Inspirace k návrhu opěrné stěny v této kapitole vychází z článku [41] popisovaném v kapitole 2.4.2. Úhlová stěna popisovaná v [41] dosahuje výšky 2,5 m.

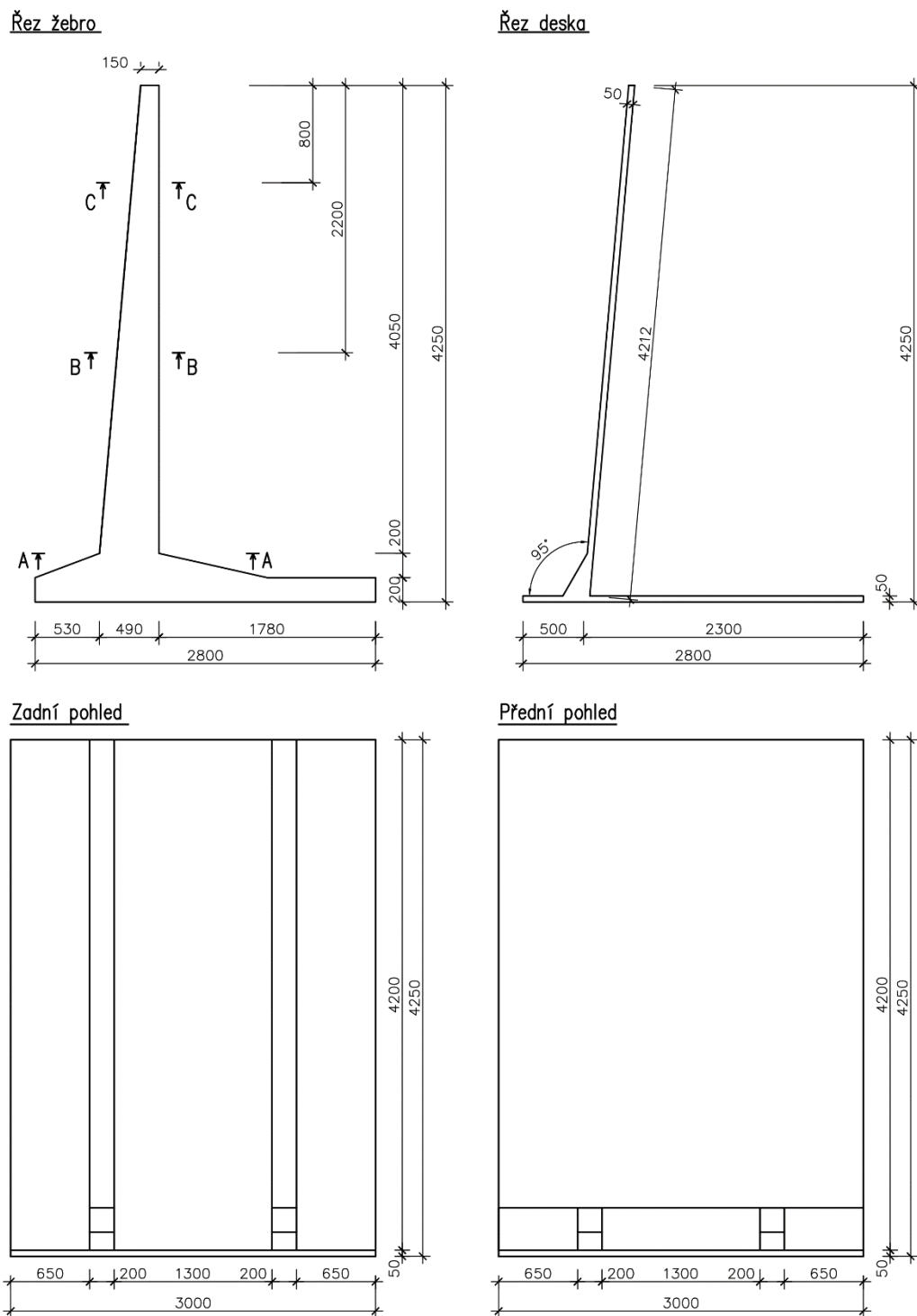
Opěrná stěna v této kapitole je navržena jako úhlová stěna vysoká 4,25 m, široká 3 m a s tloušťkou desek 50 mm. Součástí stěny je dvojice zesilujících žebér na dřívku i na základové desce. Tenká deska vyztužená rozptýlenou výztuží zajišťuje roznošení zatížení do zesilujících žebér. Žebra jsou vyztužena betonářskou výztuží. Šířka prvku vychází z maximální povolené šířky nákladu přepravovaného po pozemních komunikacích v ČR bez nutnosti technického doprovodu, tj. do 3,2 m.

Založení stěny se předpokládá v nezámrzné hloubce (tj. 0,8 m pod povrchem), čistá výška stěny dosahuje tedy 3,45 m. To zhruba odpovídá výšce jednoho podlaží v běžné budově.

4.2.1 Návrh a posouzení opěrné stěny

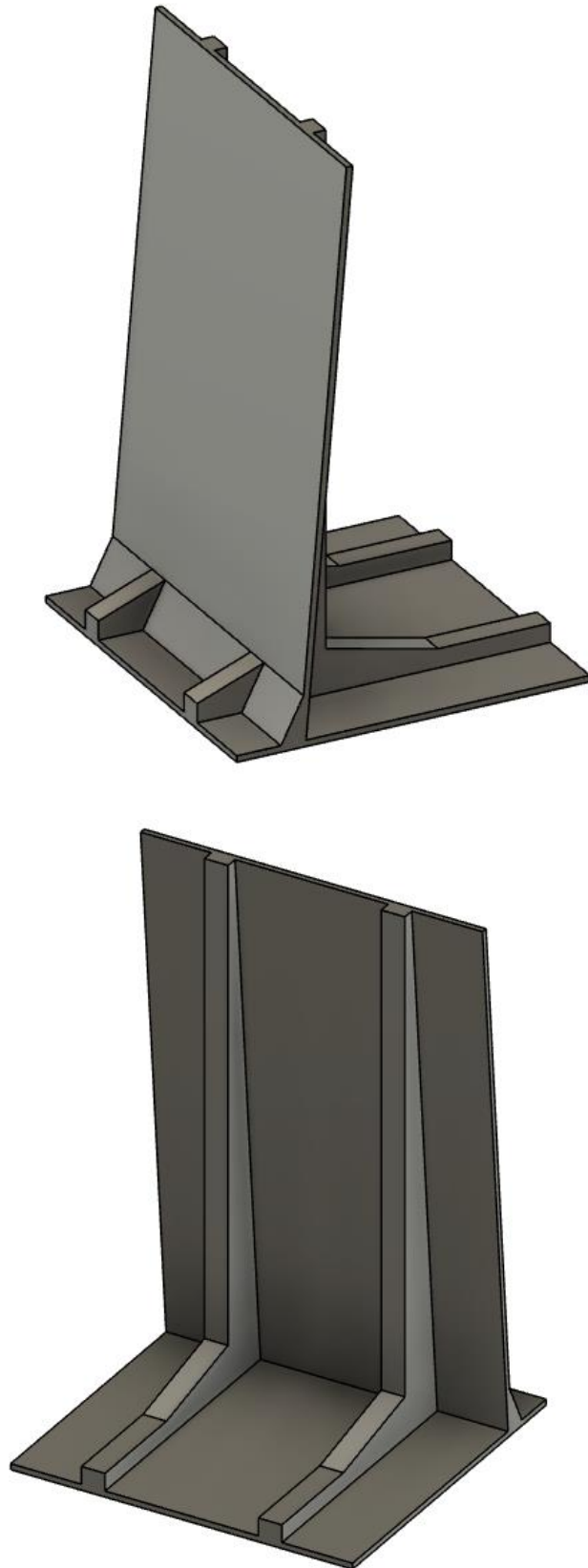
Geometrie

Geometrie vychází z požadavku na výšku a šířku prvku. Líc dříku stěny je ukloněn o 5° směrem dovnitř a pata dříku je mírně rozšířena.



Obr. 98 Geometrie opěrné stěny

Axonometrie



Obr. 99 Zobrazení opěrné stěny v axonometrii, [F]

Parametry zeminy

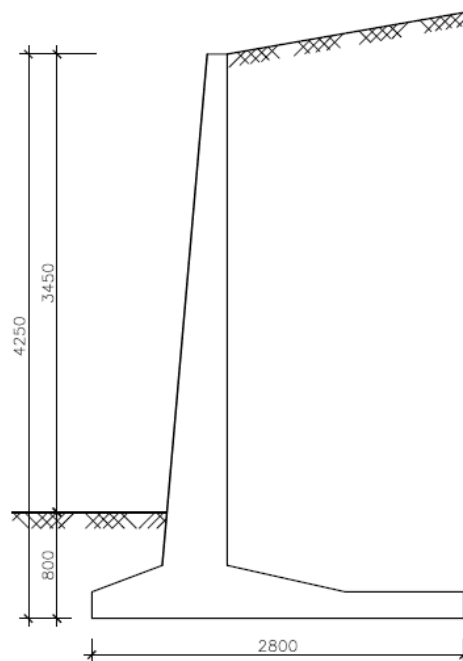
Tab. 20 Parametry zeminy pro výpočet zatížení stěny

třída	S3	dle ČSN
symbol	S - F	731001
$\gamma_k =$	19.	kN/m ³
HPV	není	
$\varphi_{ef} =$	33	°
$c_{ef} =$	0	kPa
sklon terénu za rubem $\beta =$	10	°

Návrhový přístup dle ČSN EN 1997

NP1 – K1 – pro mezní stav STR

NP1 – K2 – pro mezní stav GEO



Obr. 100 Schéma uložení opěrné stěny v zemním tělese

Způsoby porušení opěrné stěny

MSÚ – GEO - překlopení, vodorovná a svislá únosnost, globální usmyknutí
- není hlavní obsah práce, posouzeno a uvedeno v příloze č.2.

MSÚ – STR - momentová únosnost žebel, přední konzolky a desky dřívku

Vnitřní síly

$$\sigma_0 = \gamma_k \cdot h \cdot K_0 \cdot \frac{\sin \varphi_d \cdot \cos \beta}{\sin \varphi_d \cdot \sin \beta^2} = 19 \cdot 4,25 \cdot 0,4554 \cdot \frac{\sin 19 \cdot \cos 10}{\sin 19 \cdot \cos 10^2} = 38,4 \text{ kPa} \quad (4.32)$$

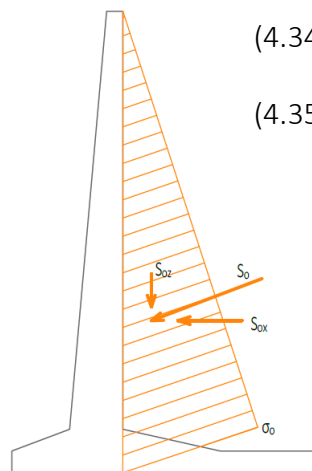
$$K_0 = 1 - \sin \varphi_k = 1 - \sin 33 = 0,4554 [-] \quad (\text{zemní tlak v klidu}) \quad (4.33)$$

$$S_{0,i} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_0 \cdot h \cdot \gamma_g \quad (4.34)$$

$$M_{d,i} = \frac{1}{3} \cdot S_{0x} \cdot h \quad (4.35)$$

Tab. 21 Návrhové ohybové momenty v jednotlivých posuzovaných řezech žebra

	h_i	$S_{0,i}$	$S_{0x,i}$	$M_{d,i} / \text{m}'$	$M_{d,i} / \text{žebro}$
	[m]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]
řez A	3.85	143.0	134.4	172.5	258.7
řez B	2.2	81.7	76.8	56.3	84.5
řez C	0.8	29.7	27.9	7.4	11.2



Zvolené vstupní parametry materiálu

Tab. 22 Materiálové parametry zvolené pro výpočet, dle přílohy T – NF P18-710

charakteristická pevnost v tlaku (28dní)	f_{ck}	150	MPa
Střední hodnota pevnosti v tlaku (28dní)	f_{cm}	160	MPa
Youngův modul pružnosti	E_{cm}	45	GPa
charakteristická lim. pevnost v tahu	$f_{ctk,el}$	10.0	MPa
střední hodnota lim. pevnosti v tahu	$f_{ctm,el}$	11.5	MPa
char. pevnost po vzniku trhliny	f_{ctk}	6.8	MPa
střední hod. pevnosti po vzniku trhliny	f_{ctm}	8.2	MPa
Globální faktor orientace vláken	K_{global}	1,25	-
Lokální faktor orientace vláken	K_{local}	1,75	-
Délka ocelových vláken	L_f	15	mm
Průměr největšího použitého kameniva	D_{sup}	6	mm
š. trhliny odpovídající lokálnímu maximu	w_{pic}	0,3	mm
Výška zkušebních trámců ve zkoušce v tahu za ohybu	H	300	mm

Pozn.: pro použití v reálné konstrukci je nutné všechny materiálové parametry získat experimentálně

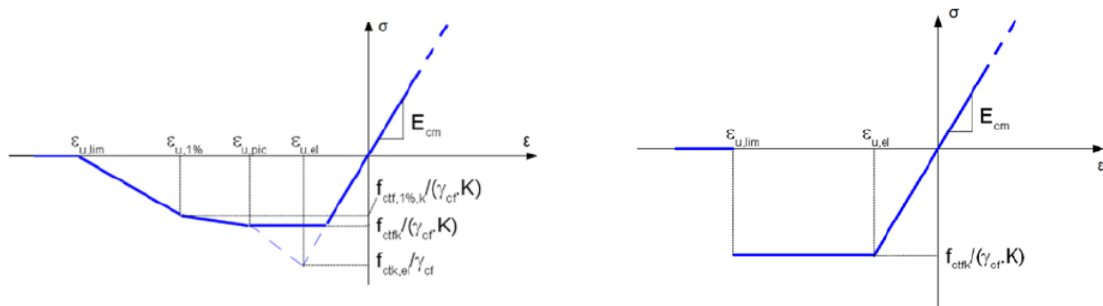
Klasifikace UHPC

$$\left. \begin{aligned} \frac{f_{ctm}}{K} &= \frac{8.2}{1.25} = 6.56 \text{ MPa} \leq f_{ctm,el} = 11.5 \text{ MPa} \\ \frac{f_{ctk}}{K} &= \frac{6.8}{1.25} = 5.44 \text{ MPa} \leq f_{ctk,el} = 10.0 \text{ MPa} \end{aligned} \right\} \text{ Třída T1*}$$

Použité návrhové pracovní diagramy pro tahovou pevnost UHPC (dle [2])

Pro posouzení žebra:

Pro tenké části:



Obr. 101 Návrhové pracovní diagramy UHPC v tahu pro třídu T1* dle [4]

Návrhové hodnoty jednotlivých mezí pracovního diagramu byly spočteny dle rovnic uvedených v kapitole 3.3. Výpočet těchto hodnot je třeba provést pro každý posuzovaný průřez s odlišnou geometrií, nebo s jiným koeficientem orientace vláken. Na obr. 98 jsou schématicky označeny jednotlivé posuzované průřezy úhlové opěrné stěny. Průřezy byly posouzeny pomocí programu Excel [A].

Jednotlivé části opěrné stěny jsou posouzeny jako konzoly vetknuté v místě styku dřívku se základovou deskou.

4. NÁVRH VYBRANÝCH PRVKŮ Z UHPC

MSÚ – ohyb – řez A

$E_{cm} =$	45	GPa	$f_{ctk} =$	6.8	MPa	$e_{cod} =$	0.00189	[-]
$f_{ck} =$	150	MPa	$f_{ctk,el} =$	10.0	MPa	$e_{cud} =$	0.00297	[-]
$f_{cm} =$	160	MPa	$K_{global,y} =$	1.25	[-]	$\epsilon_{u,el} =$	0.00012	[-]
$f_{yd} =$	434.78	MPa	$f_{ctd,y} =$	4.18	MPa	$\epsilon_{u,pic} =$	0.00109	[-]
$\epsilon_{sy} =$	0.0024	[-]	$f_{ctd,el,y} =$	6.15	MPa	$\epsilon_{1\%} =$	0.00476	[-]
$E_s =$	200	GPa	$L_f =$	15	mm	$\epsilon_{u,lim} =$	0.01722	[-]

$h =$	490	mm	\varnothing výztuže	16	mm	$c =$	25	mm
$b_{žebro} =$	200	mm	prutů	8	ks	$d_1 =$	452	mm
$b_{eff} =$	1000	mm	$A_{sy,prov} =$	1608	mm ²	$d_2 =$	414	mm
	800							

x [mm]	F_{cc} [kN]	$\sum M_{cci}$ [kNm]	F_{st} [kN]	ϵ_s [%]	F_{ct} [kN]	$\sum M_{fci}$ [kNm]	$\sum F_i = 0$	M_{Rd} [kNm]
130.293	738.40	72.43	699.35	0.0073	39.06	0.96	0.00	285.084

50.0%

47.4%

2.6%

$$M_{Ed} = 258.700 \text{ kNm} < M_{Rd} = 285.084 \text{ kNm} \quad \text{Využití: } 90.75\%$$

MSÚ – ohyb – řez B

$E_{cm} =$	45	GPa	$f_{ctk} =$	6.8	MPa	$e_{cod} =$	0.00189	[-]
$f_{ck} =$	150	MPa	$f_{ctk,el} =$	10.0	MPa	$e_{cud} =$	0.00297	[-]
$f_{cm} =$	160	MPa	$K_{global,y} =$	1.25	[-]	$\epsilon_{u,el} =$	0.00012	[-]
$f_{yd} =$	434.78	MPa	$f_{ctd,y} =$	4.18	MPa	$\epsilon_{u,pic} =$	0.00148	[-]
$\epsilon_{sy} =$	0.0024	[-]	$f_{ctd,el,y} =$	6.15	MPa	$\epsilon_{1\%} =$	0.00767	[-]
$E_s =$	200	GPa	$L_f =$	15	mm	$\epsilon_{u,lim} =$	0.02453	[-]

$h =$	344	mm	\varnothing výztuže	16	mm	$c =$	25	mm
$b_{žebro} =$	200	mm	prutů	4	ks	$d_1 =$	316	mm
$b_{eff} =$	600	mm	$A_{sy,prov} =$	804	mm ²			

x [mm]	F_{cc} [kN]	$\sum M_{cci}$ [kNm]	F_{st} [kN]	ϵ_s [%]	F_{ct} [kN]	$\sum M_{fci}$ [kNm]	$\sum F_i = 0$	M_{Rd} [kNm]
78.481	368.73	19.58	349.67	0.0090	19.06	0.37	0.00	103.011

50.0%

47.4%

2.6%

$$M_{Ed} = 84.500 \text{ kNm} < M_{Rd} = 103.011 \text{ kNm} \quad \text{Využití: } 82.03\%$$

Výška tlačené oblasti byla stanovena pomocí programu EXCEL – funkce hledání řešení. Výpočet byl proveden za dodržení mezních přetvoření dle pracovních diagramů UHPC a oceli.

Dle NF P18-710 se má uvažovat b_{eff} jako maximální možná. Výpočet zůstává dle EC2. V tomto případě byla b_{eff} ve vetknutí dříku do základů konzoly zjednodušeně určena jako součet ½ šířky přiléhajících polí desky dříku a zaokrouhlena směrem dolů (bezpečně) na 1000 mm. Směrem k hlavě dříku efektivní šířka klesá.

MSÚ – ohyb – řez C

$E_{cm} =$	45	GPa	$f_{ctk} =$	6.8	MPa	$e_{c0d} =$	0.00189	[-]
$f_{ck} =$	150	MPa	$f_{ctk,el} =$	10.0	MPa	$e_{cud} =$	0.00297	[-]
$f_{cm} =$	160	MPa	$K_{global,y} =$	1.25	[-]	$\epsilon_{u,el} =$	0.00012	[-]
$f_{yd} =$	434.78	MPa	$f_{ctd,y} =$	4.18	MPa	$\epsilon_{u,pic} =$	0.00221	[-]
$\epsilon_{sy} =$	0.0024	[-]	$f_{ctd,el,y} =$	6.15	MPa	$\epsilon_{1\%} =$	0.01095	[-]
$E_s =$	200	GPa	$L_f =$	15	mm	$\epsilon_{u,lim} =$	0.03818	[-]

$h =$	221	mm	\varnothing výztuže	16	mm	$c =$	25	mm
$b_2 =$	200	mm	prutů	2	ks	$d_1 =$	193	mm
$b_{eff} =$	400	mm	$A_{sy,prov} =$	402	mm ²			

x [mm]	F_{cc} [kN]	$\sum M_{cci}$ [kNm]	F_{st} [kN]	ϵ_s [%]	F_{ct} [kN]	$\sum M_{fci}$ [kNm]	$\sum F_i = 0$	M_{Rd} [kNm]
54.150	188.15	6.46	174.84	0.0076	13.31	0.27	0.00	31.008

50.0%

46.5%

3.5%

$$M_{Ed} = 11.200 \text{ kNm} < M_{Rd} = 31.008 \text{ kNm} \quad \text{Využití: } 36.12\%$$

MSÚ – ohyb žebek základové desky

Posouzení přední konzolky na ohybový moment vzniklý od napětí v základové spáře. Napětí v základové spáře je převzato z výpočtu svíslé únosnosti základu stěny v příslušném zemním prostředí. Toto napětí je zjednodušeně uvažováno jako rovnoměrné na efektivní ploše základu opěrné stěny. Výpočet napětí v základové spáře je proveden v příloze č.2. Přetížení přední konzolky zeminou se z bezpečnostních důvodů neuvažuje.

Pozn.: napětí v základové spáře bylo stanoveno dle návrhového přístupu NP1-K2 (redukce smykových parametrů). Pro výpočet únosnosti přední konzolky je použito NP1-K1 (bez redukce smykových parametrů), ale je dosazena hodnota napětí z geotechnického výpočtu. Dochází zde tedy k jistému předimenzování, které je vzhledem k nízkým zkušenostem s chováním UHPC akceptovatelné a tzv. „na straně bezpečné“.

$$\sigma_d = 0,138 \text{ MPa} \quad (\text{PŘÍLOHA B})$$

$$M_{Ed,\check{z},\check{r}ezD} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_d \cdot 0,530^2 \cdot 1,5$$

$$\sigma_{zemina} = 0,108 \text{ MPa}$$

$$M_{Ed,\check{z},\check{r}ezE} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{zemina} \cdot 0,385^2 \cdot 1,5 + \frac{1}{2} \cdot \sigma_{zemina} \cdot 1,5 \cdot 1,395 \cdot (0,385 + \frac{1}{3} \cdot 1,395)$$

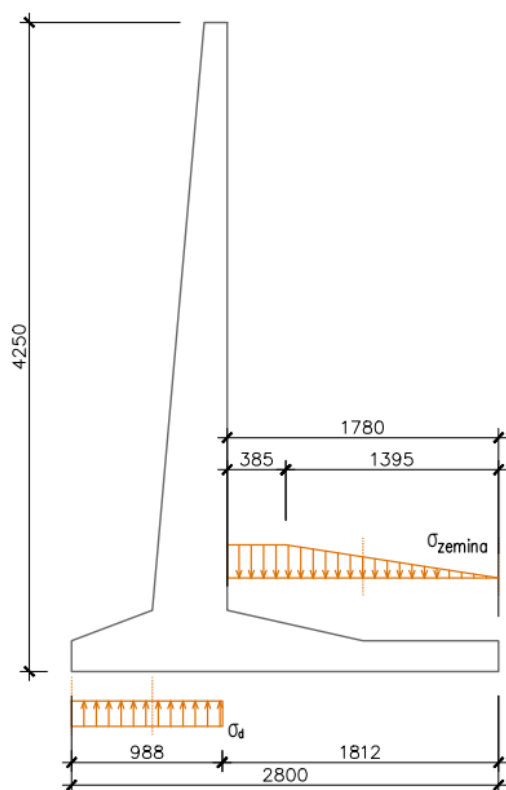
$$M_{Ed,\check{z},\check{r}ezF} = \frac{1}{6} \cdot \sigma_{zemina} \cdot 1,395^2 \cdot 1,5$$

Tab. 23 Ohybové momenty v jednotlivých řezech žebra základu opěrné stěny – převzato z přílohy č.2

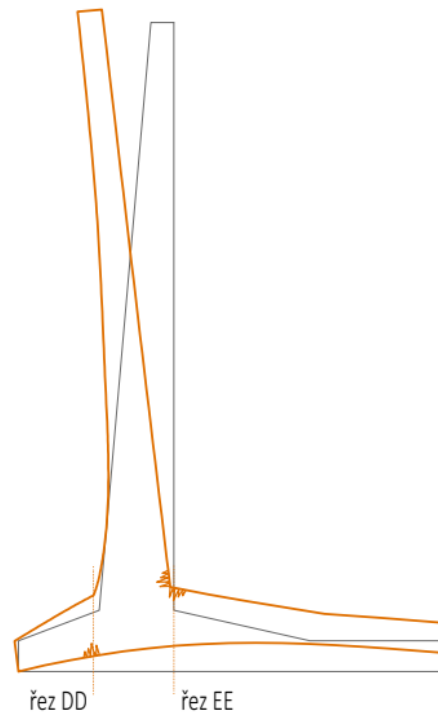
	h_i [mm]	σ_i [kPa]	$M_{Ed,\check{z},i}$ [kNm]
řez D	400	138.0	29.2
řez E	400	108.0	104.0
řez F	200	108.0	50.6

4. NÁVRH VYBRANÝCH PRVKŮ Z UHPC

Schéma zatížení základu
opěrné stěny



Předpokládaná deformace
opěrné stěny (overscale)



Obr. 102 Schéma zatížení základu opěrné stěny a představa deformované konstrukce

MSÚ – ohyb – řez D

$E_{cm} =$	45	GPa	$f_{ctk} =$	6.8	MPa	$e_{c0d} =$	0.00189	[-]
$f_{ck} =$	150	MPa	$f_{ctk,el} =$	10.0	MPa	$e_{cud} =$	0.00297	[-]
$f_{cm} =$	160	MPa	$K_{global,y} =$	1.25	[-]	$\epsilon_{u,el} =$	0.00012	[-]
$f_{yd} =$	434.78	MPa	$f_{ctd,y} =$	4.18	MPa	$\epsilon_{u,pic} =$	0.00109	[-]
$\epsilon_{sy} =$	0.0024	[-]	$f_{ctd,el,y} =$	6.15	MPa	$\epsilon_{1\%} =$	0.00476	[-]
$E_s =$	200	GPa	$L_f =$	15	mm	$\epsilon_{u,lim} =$	0.01722	[-]

$h =$	400	mm	\emptyset výztuže	16	mm	$c =$	25	mm
$b_{žebro} =$	200	mm	prutů	4	ks	$d_1 =$	367	mm
$b_{eff} =$	200	mm	$A_{sy,prov} =$	804	mm ²	$d_2 =$	335	mm

x [mm]	F_{cc} [kN]	$\sum M_{cci}$ [kNm]	F_{st} [kN]	ϵ_s [%]	F_{ct} [kN]	$\sum M_{fci}$ [kNm]	$\sum F_i = 0$	M_{Rd} [kNm]
228.080	330.17	49.49	291.28	0.0018	28.41	2.46	10.48	92.418

50.8%

44.8%

4.4%

$M_{Ed} = 29.150$ kNm < $M_{Rd} = 92.418$ kNm Využití: 31.54%

MSÚ – ohyb – řez E

$E_{cm} =$	45	GPa	$f_{ctk} =$	6.8	MPa	$e_{c0d} =$	0.00189	[-]
$f_{ck} =$	150	MPa	$f_{ctk,el} =$	10.0	MPa	$e_{cud} =$	0.00297	[-]
$f_{cm} =$	160	MPa	$K_{global,y} =$	1.25	[-]	$\epsilon_{u,el} =$	0.00012	[-]
$f_{yd} =$	434.78	MPa	$f_{ctd,y} =$	4.18	MPa	$\epsilon_{u,pic} =$	0.00148	[-]
$\epsilon_{sy} =$	0.0024	[-]	$f_{ctd,el,y} =$	6.15	MPa	$\epsilon_{1\%} =$	0.00767	[-]
$E_s =$	200	GPa	$L_f =$	15	mm	$\epsilon_{u,lim} =$	0.02453	[-]

$h =$	200	mm	\emptyset výztuže	20	mm	$c =$	25	mm
$b_{\text{žebro}} =$	200	mm	prutů	3	ks	$d_1 =$	165	mm
$b_{eff} =$	1000	mm	$A_{sy,prov} =$	942	mm ²	$d_2 =$	125	mm

x [mm]	F_{cc} [kN]	$\sum M_{cci}$ [kNm]	F_{st} [kN]	ϵ_s [%]	F_{ct} [kN]	$\sum M_{fci}$ [kNm]	$\sum F_i = 0$	M_{Rd} [kNm]
62.646	524.37	21.45	409.77	0.0049	114.59	7.90	0.00	71.289

50.0%

39.1%

10.9%

$M_{Ed} = 50.600 \text{ kNm} < M_{Rd} = 71.29 \text{ kNm}$ Využití: 70.98%

MSÚ – ohyb – řez F

$E_{cm} =$	45	GPa	$f_{ctk} =$	6.8	MPa	$e_{c0d} =$	0.00189	[-]
$f_{ck} =$	150	MPa	$f_{ctk,el} =$	10.0	MPa	$e_{cud} =$	0.00297	[-]
$f_{cm} =$	160	MPa	$K_{global,y} =$	1.25	[-]	$\epsilon_{u,el} =$	0.00012	[-]
$f_{yd} =$	434.78	MPa	$f_{ctd,y} =$	4.18	MPa	$\epsilon_{u,pic} =$	0.00148	[-]
$\epsilon_{sy} =$	0.0024	[-]	$f_{ctd,el,y} =$	6.15	MPa	$\epsilon_{1\%} =$	0.00767	[-]
$E_s =$	200	GPa	$L_f =$	15	mm	$\epsilon_{u,lim} =$	0.02453	[-]

$h =$	200	mm	\emptyset výztuže	20	mm	$c =$	25	mm
$b_{\text{žebro}} =$	200	mm	prutů	3	ks	$d_1 =$	165	mm
$b_{eff} =$	1000	mm	$A_{sy,prov} =$	942	mm ²	$d_2 =$	125	mm

x [mm]	F_{cc} [kN]	$\sum M_{cci}$ [kNm]	F_{st} [kN]	ϵ_s [%]	F_{ct} [kN]	$\sum M_{fci}$ [kNm]	$\sum F_i = 0$	M_{Rd} [kNm]
62.646	524.37	21.45	409.77	0.0049	114.59	7.90	0.00	71.289

50.0%

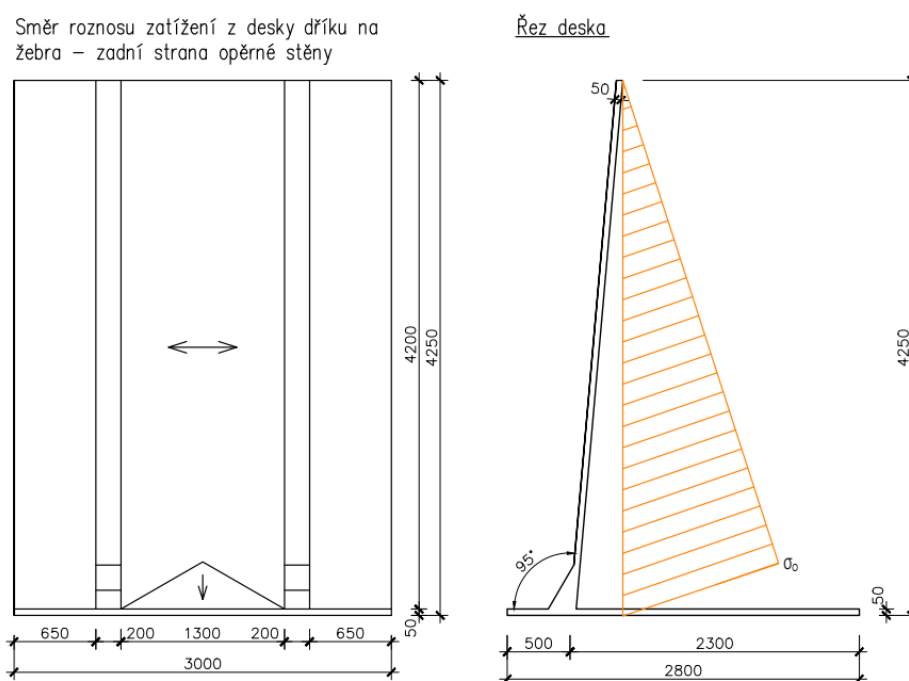
39.1%

10.9%

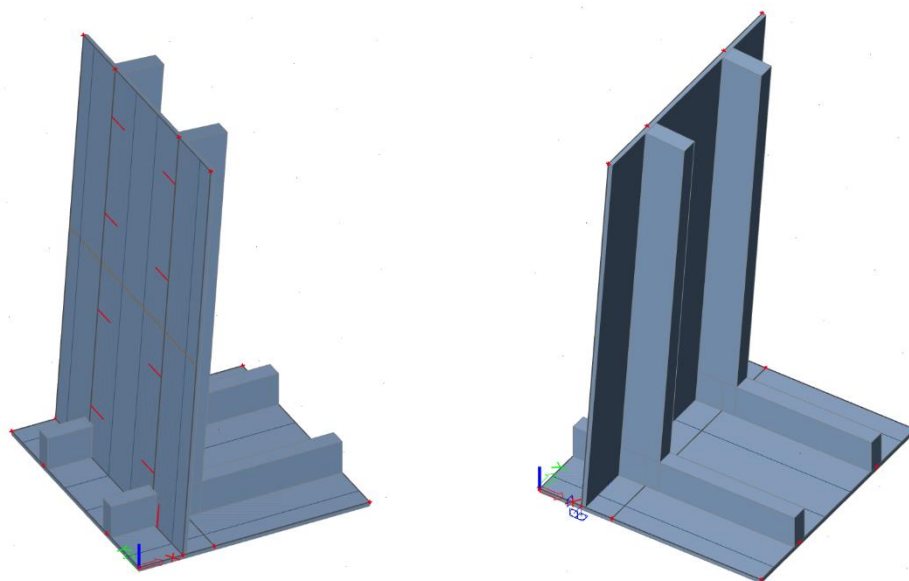
$M_{Ed} = 50.600 \text{ kNm} < M_{Rd} = 71.29 \text{ kNm}$ Využití: 70.98%

MSÚ – únosnost tenké desky dříku a základu**Vnitřní síly**

Vnitřní síly na spojitě desce byli stanoveny v programu Scia Engineer [B]. V programu byla vymodelována opěrná stěna jako dvojice desek s žebry. Deska dříku byla zatížena plošným zatížením odpovídajícím tlaku σ_0 . Výpočet byl proveden metodou konečných prvků podle Kirchhoffovi teorie tenkých desek. Statické schéma odpovídá trojici konzol vetknutých v místě jejich styku. Toto výrazné zjednodušení zanedbává tuhost zemního prostředí. V případě zapojení modelu zemního prostředí by pravděpodobně došlo ke snížení namáhání základové části opěrné stěny.

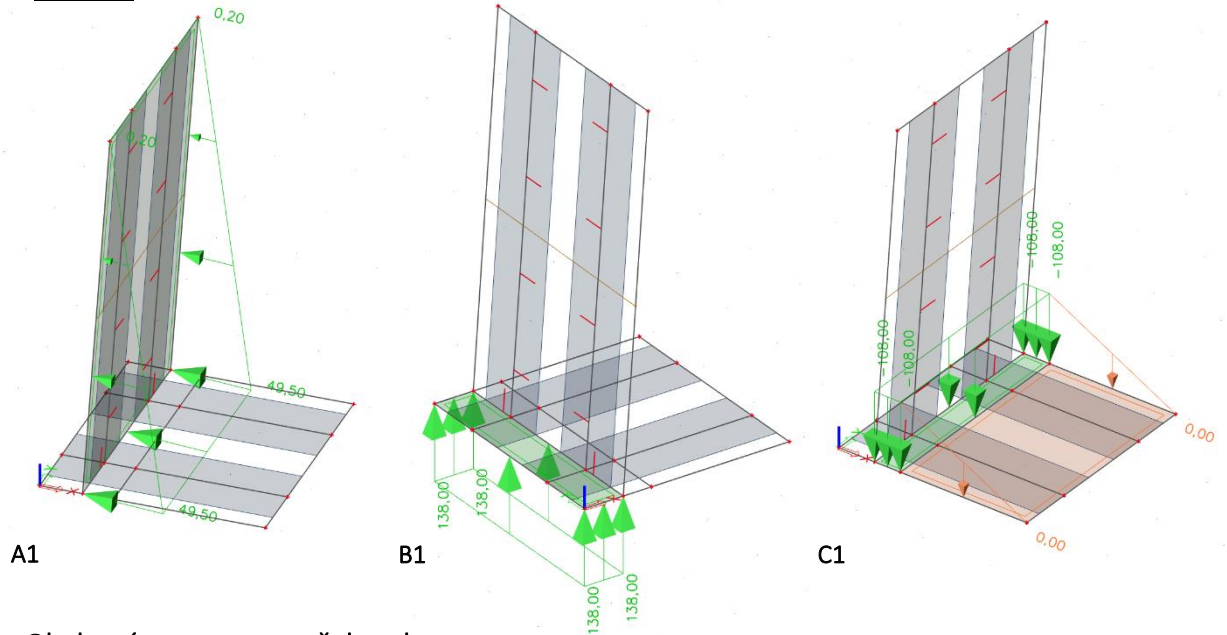


Obr. 103 Uvažovaný směr roznosu zatížení a schéma zatížení dříku stěny

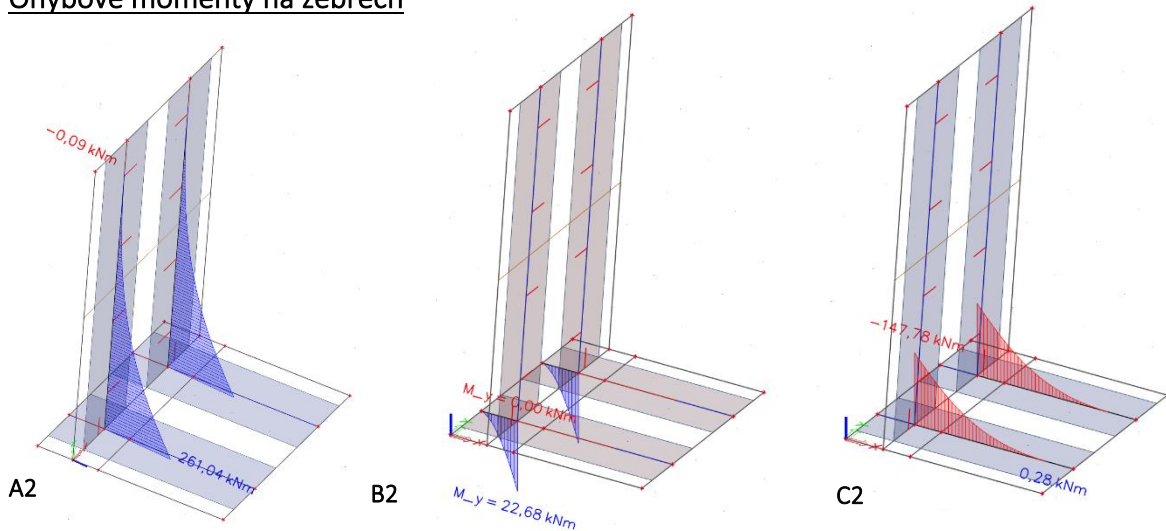


Obr. 104 Zjednodušený model opěrné stěny v programu Scia Engineer, [B]

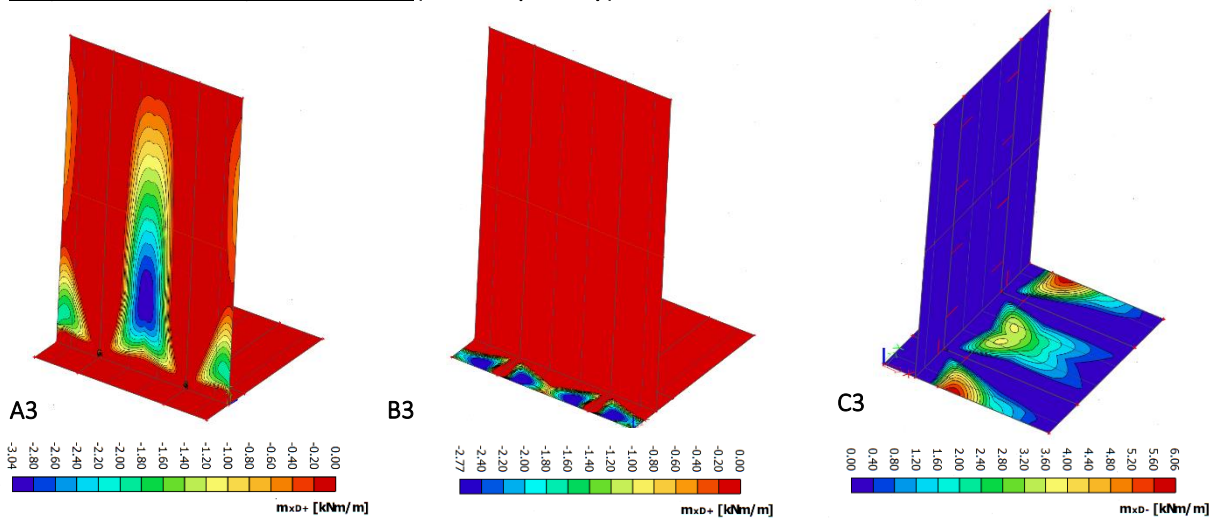
Zatížení



Ohybové momenty na žebrech



Ohybové momenty na deskách (tažené povrchy)



Obr. 105 Zatížení a ohybové momenty stanovených v programu Scia Engineer [B]

Zatížení opěrné stěny bylo rozfázováno na jednotlivé „konzoly“ s vlastním zatěžovacím stavem (obr. 105 A1-A3). Na základě získaných výsledků byla provedena kontrola ohybových momentů na žebrech porovnáním hodnot z programu Scia a hodnot získaných ručním výpočtem. Ohybové momenty na přední konzolce základové desky i ohybové momenty na dříku opěrné stěny jsou o několik jednotek % menší než momenty stanovené ručním výpočtem. Moment na zadní konzolce základové desky (obr. 105 C2) je o cca 1/3 větší než moment stanovený ručním výpočtem (147 kNm oproti 104 kNm). Tento rozdíl vznikl z důvodu střednicového uvažování zjednodušeného modelu v programu Scia. Ve skutečnosti působí zatížení na kratším rameni a kritický průřez je posunut dále od středu uvažovaného modelem. Hodnoty ohybových momentů žebor dosazených do výpočtů jsou tedy považovány za ověřené.

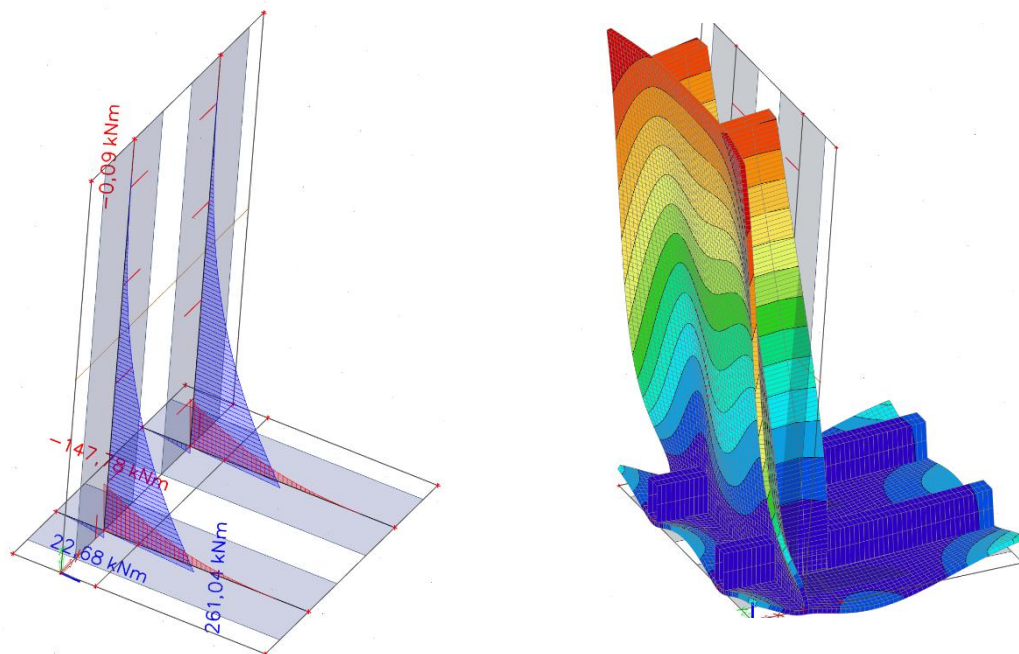
Na obr. 105 - A3, B3 a C3 byly vykresleny návrhové ohybové momenty na tažených površích desek. Na dříku, přední konzolce a střední části zadní konzolky dosahují hodnot do 3,2 kNm/m. Na převislých koncích zadní konzoly vycházejí v důsledku deformace základové desky hodnoty až 6 kNm/m. V reálné konstrukci bude toto zatížení pravděpodobně menší (viz předchozí odstavec). Porušení této části by pravděpodobně nevedlo ke kolapsu konstrukce a z důvodu ztužení desky na okrajích bude do okrajů opěrné stěny umístěna výztuž.

MSÚ – desky bez ohybové výztuže

$E_{cm} =$	45	GPa	$f_{ctk} =$	6.8	MPa	$e_{c0d} =$	0.00189	[-]
$f_{ck} =$	150	MPa	$f_{ctk,el} =$	10.0	MPa	$e_{cud} =$	0.00297	[-]
$f_{cm} =$	160	MPa	$K_{global,y} =$	1.25	[-]	$\epsilon_{u,el} =$	0.00012	[-]
$f_{yd} =$	434.78	MPa	$f_{ctd,y} =$	4.18	MPa	$\epsilon_{u,lim} =$	0.03818	[-]
$\epsilon_{sy} =$	0.0024	[-]	$f_{ctd,el,y} =$	6.15	MPa	$h =$	50	mm
$E_s =$	200	GPa	$L_f =$	15	mm	$b =$	1000	mm
x [mm]	F_{cc} [kN]	$\sum M_{cci}$ [kNm]	F_{ct} [kN]	$\sum M_{fci}$ [kNm]	$\sum F_i = 0$	M_{Rd} [kNm/m]	M_{Ed} [kNm/m]	Využití
3.482	194.53	0.43	194.53	4.43	0.00	4.854	3.270	67.37%

Posouzení smyku

Na rozhraní desky a žebra dochází ke koncentraci smykového namáhání. U paty dříku stěny je deska zesílena náběhem pro tužší propojení základové desky a dříku. Kritický průřez namáhání smykem je tak na dříku nad tímto zesílením (řez A) a na zadní konzolce (řez E). Pro zabránění odtržení desky od žebra je do kritických průřezů přidána výztuž (viz schéma vyztužení obr. 107). Smykovou únosnost těchto částí je třeba určit experimentálně.



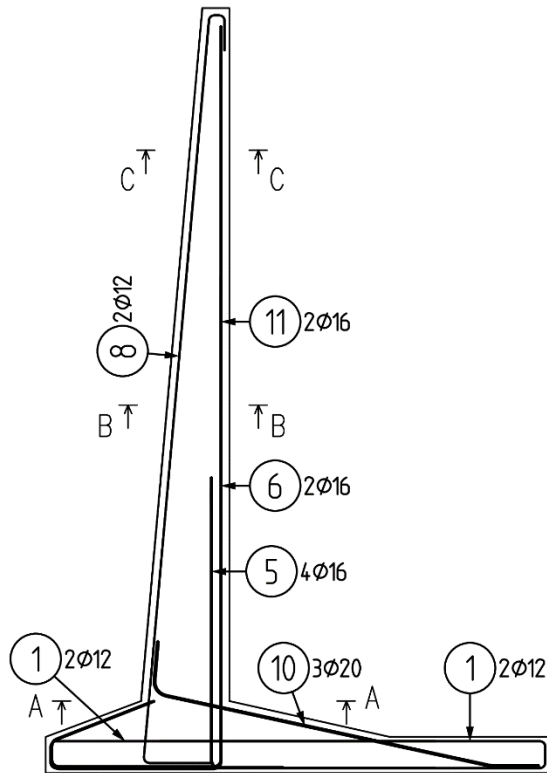
Obr. 106 Ohybové momenty pro kombinaci všech ZS na žebrech opěrné stěny a předpokládaný tvar deformované konstrukce, [B]

Deformace konstrukce je nutné stanovit experimentálně. Nejviditelnější deformace bude v hlavě opěrné stěny a bude se skládat z pootočení celé opěrné stěny a průhybu konzoly vlivem ohybového namáhání. Předpokládaný celkový průhyb je odhadnut do 12 mm. Vzhledem k šikmému líci stěny bude tento průhyb prakticky lidským okem neznatelný. Předpokládaný tvar deformace ostatních částí opěrné stěny je znázorněn na obr. 106.

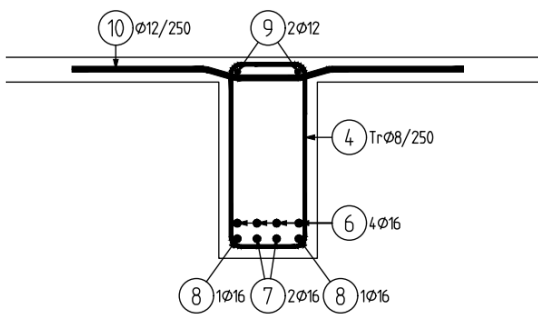
Konstrukční zásady

Vybrané konstrukční zásady (kotevní délky, přesahové délky) jsou uvedeny v **PŘÍLOZE A**.

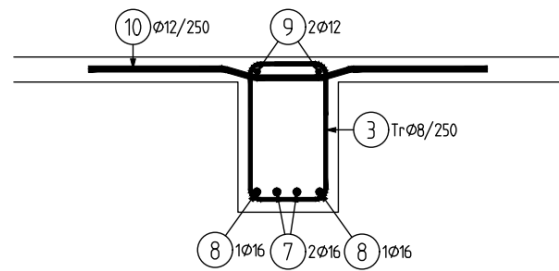
Schéma vyztužení – žebro



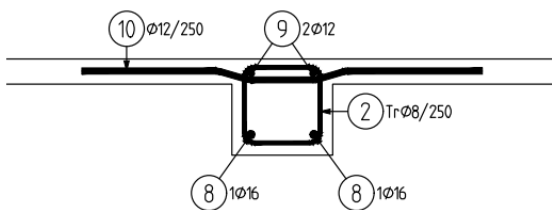
ŘEZ AA



ŘEZ BB



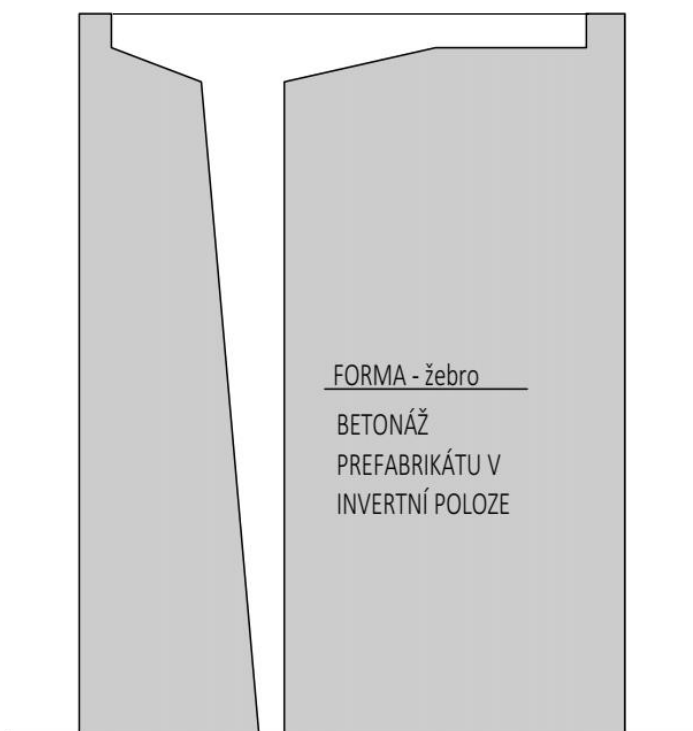
ŘEZ CC



Obr. 107 Schéma vyztužení opěrné stěny, [E]

Technologie výroby

Betonáž prvku bude provedena najednou. Prvek bude betonován v invertní poloze. Betonáž bude prováděna odspoda po vrstvách. Bednění bude ocelové s podpůrnou konstrukcí pro umožnění betonáže v invertované poloze. Vzhledem k použití ocelových vláken se nedoporučuje použít magnetických příložných vibrátorů. V případě použití UHPC ve formě SCC se nedoporučuje vibrovat vůbec, nebo jen velmi krátce a pod dohledem technologa (pro usnadnění úniku zachyceného vzduchu).



Obr. 108 Schéma bednění pro betonáž opěrné stěny v invertní poloze

Ošetřování

Ošetřování se předpokládá pouze skrápěním po odbednění prvku a betonáž při teplotách +10 až +25 °C.

Transport

Do žebrování prvku umístit čtyři transportní body (každé žebro před dírkem a za dírkem), návrh dle výrobce konkrétních prvků. Návrh transportních bodů není součástí této práce. Pro prvotní transport z formy použít vahadlo. Návrh transportních poloh je třeba řešit podrobněji s ohledem na dostupnou transportní mechanizaci daného výrobce. Prvek byl posouzen na transportní zatížení.

4.2.2 Experimentální ověření prvku

V předchozí kapitole je proveden návrh a posouzení prefabrikované úhlové opěrné stěny z materiálu UHPC C150 třídy T1*. Výpočet je proveden dle NF P18-710 a je závislý na velkém množství vstupních materiálových parametrů. Součástí návrhu prvku proto musí být i jeho experimentální ověření. Základní požadavky na zkoušení prvku a doporučená organizace zkoušek je uvedena v kapitole 3.5. Způsoby zkoušení prvku by měli být určeny samostatným projektem se zohledněním použitých zkušebních zařízení / pomůcek dle možností výrobce.

V tomto prvku je vhodné věnovat pozornost zejména na:

Materiálové zkoušky

- odebrání vzorků čerstvého UHPC během betonáže
- zkoušky UHPC v tahu za ohybu na vzorku 150 x 150 x 300 mm
- ověření materiálového modelu, zejména meze přetvoření v tahu dle uvažovaného pracovního diagramu v tahu pro UHPC s klasifikací T1*
- zkouška pevnosti v tlaku a stanovení modulu pružnosti
- aktualizace materiálového modelu na základě zjištěných hodnot
- ostatní laboratorní zkoušky s ohledem na vystavení opěrné stěny agresivnímu zemnímu prostředí

Statické zkoušky prototypů

- ověření ohybové únosnosti dříku stěny – porušení ohybem
- ověření ohybové únosnosti přední a zadní konzolky – porušení ohybem
- ověření smykové únosnosti tenké desky u ztužujícího žebra – porušení smykem
- odebrání zkušebních vzorků a kontrola množství a orientace vláken, stanovení skutečného K faktoru pro různé směry (zejména v tenkých částech)
- ověření průhybu konců konzol tenké desky dříku i základové desky

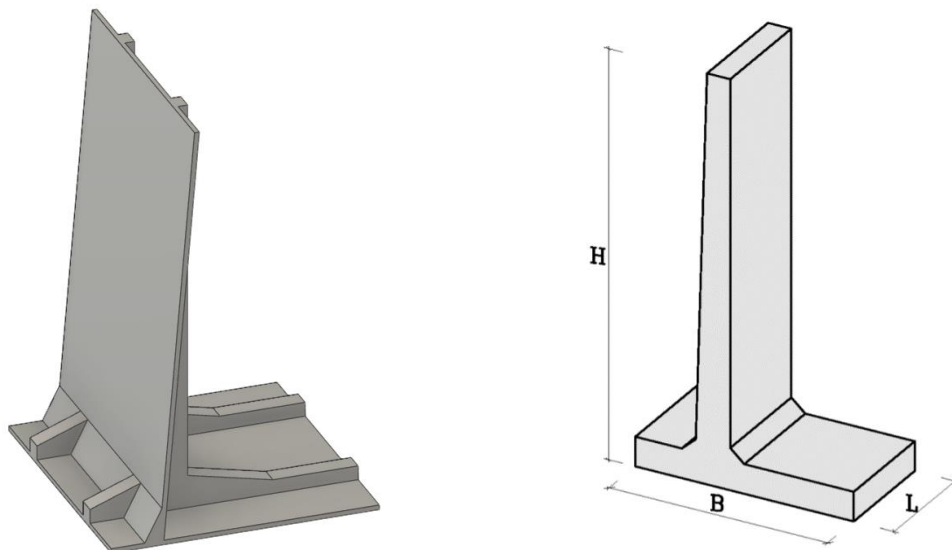
Zkoušení prvku lze provést v reálných podmínkách, nebo ho lze simulovat např. vodní zátěží. Jednotlivé části (konzoly) opěrné stěny je vhodné nejprve odzkoušet samostatně a nakonec napodobit reálné chování prvku. Během zkoušení je vhodné využívat měřit přetvoření prvku ve význačných bodech pomocí tenzometrů a do zkušebních vzorků určených pro ověřovací série (prototypy) umísťovat vnitřní senzory.

4.2.3 Zhodnocení

Prefabrikované opěrné stěny z běžného betonu jsou běžný sortiment většiny výrobců betonových prefabrikovaných prvků. Jejich výroba není náročná a jsou cenově dostupné.

Proč tedy vyrábět opěrnou stěnu z UHPC?

Pro porovnání varianty opěrné stěny z UHPC a běžného betonu byla zvolena opěrná stěna ve tvaru T, která se běžně vyskytuje v nabídce výrobců prefabrikovaných prvků.



Obr. 109 Navržená opěrná stěna z UHPC a prefabrikovaná opěrná stěna z C30/37 [65]

Tab. 24 Porovnání parametrů opěrné stěny z UHPC a běžného betonu

Parametr	jed.	UHPC C150	Stěna T 30/37	%	Pozn.
L	mm	3000	3000	100%	3 ks L = 1m
B	mm	2800	2200	127%	
H	mm	4250	4250	100%	
Objem	m ³	1.682	7.065	24%	3 x 2.355 m ³
Hmotnost	kg	4373	17667	25%	3 x 5.889 kg

Pozn. Parametry opěrné stěny T z běžného betonu převzaty z [65], obě stěny mají srovnatelnou únosnost

Cena opěrné stěny z běžného betonu (3 x 1m) se pohybuje okolo 90 000 Kč. Cenu stěny z UHPC nelze zatím přesně stanovit. Samotná cena UHPC se odhaduje kolem 10násobku ceny běžného betonu za m³. Odhadem 30 000 Kč / m³. Samotné materiálové náklady (bez zohlednění bednění, dopravy, zkoušek) by se mohly pohybovat kolem 60 000 Kč.

Prefabrikované opěrné stěny z běžného betonu se dodávají v šířkách 1 m (popř. 1,19 m) a to především z důvodu hmotnosti. Při vzrůstající hmotnosti rostou náklady na transportní a zdvihací techniku. Vzhledem ke čtvrtinové hmotnosti stěny z UHPC, je možné se stejně výkonnou zdvihací technikou vybudovat opěrnou stěnu 3x rychleji.

5 Závěr

Z několika představených návrhových norem a doporučujících metodik byl pro účely návrhu prvků v rámci této práce zvolen jako stěžejní dokument francouzský národní dodatek k Eurokódu 2 NF P18-710. Použití tohoto dokumentu pro návrh prvku z UHPC lze jednoznačně doporučit. Jelikož se jedná o dodatek k EC2, je založen na shodných návrhových principech, a je tak kompatibilní s ostatními eurokódami pro stanovení zatížení a návrh konstrukcí.

V konstrukční části byl navržen prefabrikovaný prvek zastřešení a opěrná úhlová stěna z UHPC. Návrh byl proveden dle zmíněné normy NF P18-710. Na těchto prvcích je demonstrován způsob návrhu prvků z UHPC s proměnou geometrií a na provedených výpočtech je ukázán výrazný vliv materiálových charakteristik. Na návrhu konzol prvku zatřesení je dobře patrné, že se snižující se výškou průřezu prvku přebírá UHPC vyšší podíl tahového namáhání. V tenkých prvcích se betonářská výztuž dostává blíže k normálové ose průřezu a je málo efektivní. Výborné vlastnosti UHPC se tak projeví zejména při návrhu tenkých prvků. V tenkých prvcích navíc často dochází k pozitivnímu vlivu segregace vláken k taženému povrchu (jedná-li se o povrch spodní) a orientace vláken je spíše rovnoběžně s povrchem prvku. Na tenkém prvku lze také snadněji určit faktor orientace vláken, který má na návrhovou pevnost UHPC v tahu výrazný vliv.

Prvek zastřešení v sobě kombinuje funkci nosného prvku střešní konstrukce a hydroizolační funkci střešního pláště. Šířka prvku (3 m) společně s nízkou hmotností urychluje výstavbu. Tento prvek pravděpodobně nebude nikdy výrazněji rozšířen v konstrukcích zastřešení pozemních staveb. Oproti tomu prefabrikovaná úhlová stěna je dle mého názoru vysoce konkurenceschopná a její potenciál pro sériovou výrobu je značný.

Na příkladu opěrné stěny se plně projevila potřeba optimalizace prvků z UHPC. Výroba UHPC je technologicky velice náročná, a to se projevuje na jeho vysoké ceně. Pouhá záměna běžného betonu v běžně vyráběných prvcích za UHPC je nerentabilní. Optimalizací geometrie opěrné stěny bylo dosaženo výrazné úspory množství použitého materiálu. Při porovnání optimalizované opěrné stěny z UHPC a standardní prefabrikované stěny ve tvaru T z nabídky výrobců prefabrikátů je zřejmé, že cena stěny z UHPC při srovnatelných parametrech bude s největší pravděpodobností jen o něco málo vyšší. Stěna z UHPC je ale oproti železobetonové variantě výrazně trvanlivější a umožňuje rychlejší výstavbu se srovnatelnou mechanizací.

K rychlejšímu rozvoji UHPC napomůže i nově vznikající *fib* Model Code 2020 a s rostoucí zkušeností výrobců betonů, bude cena UHPC klesat. Materiálové vlastnosti UHPC jsou natolik inovativní a významné, že lze v blízké budoucnosti předpokládat masivní rozšíření tohoto inovativního materiálu do všech konstrukčních oborů stavebnictví.

LITERATURA

Normy a metodiky

- [1] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. ČNI 2006
- [2] NF P18-710 French standart: National addition to Eurocode 2 — Design of concrete structures: specific rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPC), AFNOR 2016
- [3] NF P18-470 French standarts: National addition to Eurocode 2 - Ultra-high performance fibre-reinforced concrete - Specifications, performance, production and conformity, AFNOR 2016
- [4] Model Code for Concrete Structures 2010. International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland, 2013. ISBN: 978-3-433-03061-5
- [5] Metodika 1 – Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky, výstup projektu TAČRTA01010269, Kloknerův ústav ČVUT v Praze, 2015
- [6] Metodika 2 – Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky, výstup projektu TAČRTA01010269, Kloknerův ústav ČVUT v Praze, 2015
- [7] Metodika 3 – Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky, výstup projektu TAČRTA01010269, Kloknerův ústav ČVUT v Praze, 2015
- [8] AFGC/SETRA; Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes, Recommendations CEDEX, Paris 2013
- [9] Graybeal, B., "Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete," FHWA, U.S. Department of Transportation, Report No. FHWA-HRT-06-103, VA,2006
- [10] ČSN EN 1991-1-3 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Zatížení sněhem, ČNI 2006
- [11] ČSN EN 1991-1-4 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Zatížení větrem, ČNI 2006
- [12] ČSN EN 1991-1-5 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Zatížení teplotou, ČNI 2006
- [13] ČSN EN 1991-7-1 Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – část 1: Obecná pravidla. ČNI 2006
- [14] ČSN EN 206+A1: Beton–Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. ÚNMZ 2018
- [15] ČSN EN 14651+A1 – Zkušební metoda betonu s kovovými vlákna – Měření pevnosti v tahu za ohybu (mez úměrnosti, zbytková pevnost). ÚNMZ 2008
- [16] TP 226: Vysokohodnotné betony pro mosty PK – Technické podmínky; Pontex spol s.r.o., Praha 2010, Schváleno ministerstvem dopravy ČR
- [17] Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC); JSCE 2008

Publikace, články

- [18] PIERRE-CLAUDE AÏTCIN: Vysokohodnotný beton (Autorizovaný překlad); Praha: Informační centrum ČKAIT; 2005; IBSN 80-86769-39-9
- [19] HUDOBA IGOR: Vysokohodnotný betón; Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislavě; 2008; IBSN 978-80-227-2836-2
- [20] POWERS T.C. and collective.: Permeability of Portland Cement Paste; Research and Development Laboratories of Portland Cement Association – Research department – Bulletin 53, Chicago 1955
- [21] PAVLÍKOVÁ MILENA a kol.; Materiálové inženýrství I; Praha 2011, IBSN 978-80-01-04263-2
- [22] RICHARD P., Cheyrezy M.: Composition of Reactive Powder Concretes; St. Quentin en Yvelines, France, 1995
- [23] TIPKA M.: Tahové vlastnosti konstrukčních vláknobetonů. Disertační práce, obor Konstrukce a dopravní stavby, Praha 2017
- [24] POWERS T.C.: Structure and Physical Properties of Hardened Portland cement Paste, Research and Development Laboratories of Portland Cement Association – Research department – Bulletin 94, Chicago 1958
- [25] TRAN N.; TRAN T., JEON J.; PARK J.; KIM D.: Fracture energy of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at high strain rates, Cement and Concrete Research, Volume 79, 2016, Pages 169-184, ISSN 0008-8846
- [26] KUSUMAWARDANINGSIH Y., FEHLINGB E., ISMAIL M.: UHPC compressive strength test specimens: Cylinder or cube?, Kassel 2015, DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.165
- [27] COUFAL R.; VÍTEK J.; PROCHÁZKOVÁ A.; Praktická zkušenost s výrobou a dopravou UHPC; BETON TKS, číslo 2/2015; str. 28–33.
- [28] MARC MIMRAM and collective: Roofing of Montpellier – South of France TGV Station, AFGC – ACI – *fib*-RILEM Int. Symposium on UHPFRC 2017, Montpellier, France 2017
- [29] VOORT T., Muhannad T., Sritharan S.: Design and Performance Verification of Ultra-High Performance Concrete Piles for Deep Foundations, Final report, Center for Transportation Research and Education Project 06-264 and Iowa Highway Research Board Project TR-558, November 2008
- [30] Příručka technologa: BETON – suroviny, vlastnosti, výroba; Českomoravský beton. 2013 / aktualizace 1. vydání
- [31] BETONOVÉ KONSTRUKCE 21. STOLETÍ, samostatná příloha časopisu Beton TKS, Beton TKS, s.r.o., Praha 14.12.2012, ISSN 1213 - 3116
- [32] Structural Concrete 2019; 20(2):860-866, fib-news-0032-2019-E, dostupné z: <https://www.fib-international.org/publications/free-documents/fib-news-%7C-april-2019-pdf-detail.html>

-
- [33] SOVJÁK R.; KONVALINKA P.; Mobilní ochranná bariéra; Pražská technika; Časopis ČVUT v Praze, číslo 01/2019; str. 14.
- [34] CARMEN A.; TORRES J.; Long term carbonatation of UHPC; RILEM-*fib*-AFGC Int. Symposium on UHPFRC 2013 – October 1-3,2013; Marseille, France
- [35] PIÉRARD J.; DOOMS B.; CAUBERG N.; Evaluation of Durability Parameters of UHPC Using Accelerated Lab Tests, dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/289652613>
- [36] DEPLACE G.; HAJAR Z.; SIMON A; CHANUT S; WIEZMANN L; Precast Thin UHPFRC Curved Shells in Waste Water Treatment Plant; RILEM-*fib*-AFGC Int. Symposium on UHPFRC 2013 – October 1-3,2013; Marseille, France
- [37] SEYAM A.; SHIHADA S.; NEMES R.; Effects of using polypropylene and steel fibres on UHPC subjected to elevated temperatures; Proceedings of the 2020 session of the 13th *fib* International PhD Symposium in Civil Engineering; IBSN: 978-2940643-06-6
- [38] BØHNSDALEN M. HISDAL J.: UHPFRC – State of Art; SINTEF 2012, COIN Project report 44-2012, ISBN 978-82-536-1298-0
- [39] XIE T.; FANG C.; MOHAMAD ALE A.S.; VISINTIN P.; Characterization of autogenous and drying shrinkage of UHPC: An Experimental Study
- [40] ADAM T.; MA J.; Development of an UHPC for precast spun concrete columns; UHPC symposium 2012, Kassel, Germany
- [41] NEMATOLLAHI B.; VOO Y.; SANJAYAN J.; Design and Construction of a Precast UHPC Cantilever Retaining Wall; First International Interactive Symposium on UHPC, 2016
- [42] BRUHWILER E.; Structural UHPFRC: Welcome to the post-concrete era!; First International Interactive Symposium on UHPC, 2016
- [43] ZHU Y.; ZHANG Y.; HUSSEIN H.; CHEN G.: Flexural strengthening of reinforced concrete beams or slabs using UHPC: A state of the art review
- [44] AL-OSTA MA, ISA MN, BALUCH MH, RAHMAN MK.: Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete. *Constr Build Mater* 2017; ISSN 0950-0618
- [45] HYOUNG-SEOK So: Spalling Prevention of High Performance Concrete at High Temperatures, *INTECH* 2016, DOI: 10.5772/64551
- [46] Červenka Consulting s.r.o.: ATENA Program Documentation Part 4-7 *Atena Science – GiD FRC Tutorial*, Praha 2016.

Webové stránky

- [47] Samovysychání betonu | eBeton – Specialista na Beton [Online], dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/samovysychani>
- [48] WCA - World Cement Association - Sustainability [Online], dostupné z: <https://www.worldcementassociation.org/about-us/sustainability>
- [49] International Federation for Structural Concrete (fib) – Update to the journey to fib MC2020. Dostupné z: <https://www.fib-international.org/blog/367-update-on-the-journey-to-fib-mc2020.html>
- [50] RDconcrete.com: What we have to know about fibres in UHPC [Online]. Dostupné z: <https://rdconcrete.com/what-we-have-to-know-about-fibres-in-uhpc/>
- [51] KOSTKA M.: Betonová kánoe – Most z UHPC pro soutěž MAGYAR BETONKENU KUPA – Hungary [Online], dostupné z: <https://betonovakanoe.webnode.cz/most/#&gid=1&pid=11>
- [52] Arhiweb.cz: Lávka přes Dřetovický potok [Online], dostupné z: <https://www.archiweb.cz/b/lavka-pres-dretovicky-potok>
- [53] Silnice-zeleznice.cz: Unikátní lávky a mosty z UHPC v ČR [Online], dostupné z: <https://silnice-zeleznice.cz/silnicni-infrastruktura/unikatni-lavky-a-mosty-z-uhpc-37>
- [54] ksprefa.cz: Lávka přes řeku Lubinu v Příboře [Online], dostupné z: <https://ksprefa.cz/portfolio/lavka-pres-reku-lubinu-v-pribore/>
- [55] Časopis stavebnictví: Lávka přes Labe v Čelákovících [Online], dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/lavka-pres-labe-v-celakovicich N5446>
- [56] Zadávací dokumentace ávky v Lužci nad Vltavou: [Online], dostupné z: <https://www.vhodne-uvarejneni.cz/zakazka/lavka-v-luzci-nad-vltavou>
- [57] Ductal.com: The roofing of the Montpellier TGV Station – South of France: <https://www.ductal.com/en/architecture/The-roofing-of-the-Montpellier-TGV-Station-South-of-France>
- [58] Archdaily.com: Gare TGV de Montpellier [Online]. Dostupné z: <https://www.archdaily.com/915279/gare-tgv-de-montpellier-montpellier-railway-station-marc-mimram>
- [59] Rdconcrete.com: The roofing of the Montpellier – South of France TGV Station [Online]. Dostupné z: <https://rdconcrete.com/3rd-international-symposium-on-uhpc-designing-and-building/>
- [60] Scia.net: Museum Of European And Mediterranean Civilizations [Online], dostupné z: <https://www.scia.net/en/company/references/projects/museum-european-and-mediterranean-civilizations-mucem-marseille-france>
- [61] DETAIL inspiration: Technology: MuCEM in Marseille – Diaphanous and Structural Applications of UHPC, [Online], dostupné z: <https://inspiration.detail.de/technology-mucem-in-marseille-diaphanous-and-structural-applications-of-uhpc-107699.html#>

-
- [62] Dura.com – Construction Of Wilson Hall [Online], dostupné z:
<http://dura.com.my/latest-project/2008-projects/86-construction-of-wilson-hall>
- [63] abt.eu: Ultra-slim hybrid staircase [Online], dostupné z:
<https://www.abt.eu/en/expertise/innovations/ultra-thin-hybrid-staircase.aspx>
- [64] HI-CON.com: Ultra high performance concrete – our work, [Online], dostupné z: <https://www.hi-con.com/cases/>
- [65] Výrobní program Prefa Žatec – opěrné stěny – technická dokumentace, [Online], dostupné z: <http://www.prefazatec.cz/cz/vyrobní-program/dilce-prumyslove-a-obcanske-vystavby/165--operne-steny-l t/technicke-dokumentace>

SOFTWARE

- [A] MS Office 2013 od společnosti Microsoft
- [B] Scia Engineer 19.0.2018 (studentská verze) od společnosti Nemetscheck
- [C] Atena Science v.5 x64 (studentská verze) od společnosti Cervenka Consulting
- [D] Autodesk AutoCAD 2018 (studentská verze) od společnosti Autodesk
- [E] RECOC BETON 7.0 (studentská verze) od společnosti RECOC
- [F] Autodesk Fusion 360 (studentská verze) od společnosti Autodesk