



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

DEPARTMENT OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

**KONSTRUKČNÍ VLASTNOSTI ULTRALEHKÝCH
BETONŮ A JEHO OPTIMÁLNÍ VYUŽITÍ
V KONSTRUKCÍCH**

STRUCTURAL PROPERTIES OF ULTRALIGHT CONCRETE AND ITS OPTIMAL APPLICATION
IN STRUCTURES

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS SUMMARY

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jaroslav KADLEC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Ivailo TERZIJSKI, CSc.

BRNO 2017

KLÍČOVÁ SLOVA

Ultralehký beton, pórovité kamenivo, objemová hmotnost, pevnostní třída, kotvení, soudržnost, výztuž.

KEYWORDS

Ultra-lightweight concrete, light-weight aggregate, mass density, strength classes, anchoring, bond strength, reinforcement.

Obsah

1. ÚVOD	4
2. ÚČEL A CÍLE PRÁCE	4
3. PŘEHLED PROBLEMATIKY A DOSAVADNÍ STAV POZNÁNÍ	5
3.1. Druhy lehkého betonu	5
3.2. Druhy lehkého kameniva	5
3.3. Vývoj lehkých betonů v zahraničí	6
3.4. Odlišnosti hutného lehkého betonu s pórovitým kamenivem od běžného betonu .	6
<i>Zpracovatelnost čerstvého betonu</i>	7
<i>Doprava a čerpání lehkého betonu</i>	7
<i>Hutnění</i>	7
<i>Ošetřování lehkého betonu</i>	7
<i>Tlakové porušení</i>	7
<i>Nárůst pevnosti v čase</i>	8
<i>Statický modul pružnosti</i>	9
<i>Dotvarování a smršťování</i>	9
<i>Vnitřní ošetřování</i>	9
3.5. Problematika soudržnosti výztuže s běžným a lehkým betonem.....	9
4. VLASTNÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOST.....	10
4.1. ULC s třídou objemové hmotnosti D1,0 - Liapor.....	10
4.2. ULC s třídou objemové hmotnosti D1,0 – Liaver	13
4.3. ULC s třídou objemové hmotnosti D1,2 - Liapor.....	13
4.4. ULC s třídou objemové hmotnosti D1,2eco - Liapor.....	14
4.5. Mikrobeton LC – Liapor/Poraver.....	16
4.6. Soudržnost ULC s výztuží	16
5. PRAKTICKÉ APLIKACE ULC.....	24
6. ZÁVĚR.....	25
LITERATURA.....	27
VÝBĚR VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOSTI.....	28
CURRICULUM VITAE	29
ABSTRACT	30

1. Úvod

Beton, též označovaný jako umělý kámen, prošel za poslední roky značným vývojem. Největší změny doznala technologie betonu v důsledku použití plastifikátorů a superplastifikátorů, které umožnily snížení vodního součinitele pod hodnotu 0,5. Snížení vodního součinitele vede k výraznému nárůstu pevnosti a trvanlivosti betonu a betonových konstrukcí. I proto je beton v současnosti nejvíce používaným stavebním materiálem.

Jako téměř každý stavební materiál má i beton své klady a zápory. Ve srovnání s ostatními materiály se beton vyznačuje vysokou pevností v tlaku, značnou trvanlivostí, hospodárností a především možností výroby monolitických konstrukcí rozmanitých tvarů. K často zmiňovaným nevýhodám patří nízká tahová pevnost, časově závislé materiálové vlastnosti, velká tepelná vodivost a v neposlední řadě vysoká objemová hmotnost.

Vyšší objemová hmotnost betonu se negativně projevuje především v relativně vysoké hmotnosti vlastní nosné konstrukce tvořící někdy i více než 50% celkového zatížení, na které je konstrukci nutno nadimenzovat. Jedním z řešení, jak snížit vlastní tíhu konstrukce, je použití „lehkého“ materiálu. V tomto případě lehkého betonu.

Disertační práce se zaměřuje na konstrukční vysokohodnotné lehké betony s objemovou hmotností ve vysušeném stavu nižší než 1200 kg/m^3 , čili zhruba poloviční ve srovnání s běžným betonem. Dle [1] lze takové betony označit za ultralehké (zkratka ULC). Kromě nízké objemové hmotnosti mají tyto betony i další zvláštnosti, které je nutné při jejich návrhu brát v úvahu.

2. ÚČEL A CÍLE PRÁCE

Disertační práce se specializuje na ultralehké hutné betony (ULC), které je možné používat pro konstrukční účely¹. U těchto betonů obvykle dochází k nahrazení veškerého hutného kameniva za kamenivo lehké. Tato změna má za následek mnoho odlišností oproti běžným² hutným betonům. Nejvýraznější rozdíl je ve způsobu porušení. U ultralehkých betonů dochází k velmi křehkému porušení bez znatelné sestupné větve v pracovním diagramu. Rozdílné jsou i některé fyzikálně-mechanické parametry.

Jak ukázaly provedené experimenty s ULC, které budou popsány dále, naměřené mechanické parametry se v některých případech od parametrů určených podle normy [2] značně liší. Ne všechny parametry jsou přitom stanoveny správně. Některé parametry se zdají být značně podhodnoceny, což vede k neekonomickému návrhu konstrukcí, a jiné parametry se naopak zdají být nadhodnoceny, což může vést k nebezpečnému návrhu konstrukcí z ultralehkých betonů.

Z výše zmíněného se odvíjí hlavní cíle popsané v disertační práci:

- technologie ultralehkých betonů: návrh, výroba a ošetřování ULC; testování různých způsobů vylehčení lehkých betonů;

¹ Za konstrukční materiál je v tomto případě považován beton, ze kterého lze navrhnout konstrukční prvky. Musí tedy být definován v návrhové normě pro beton [2]. V případě lehkých betonů je nejnižší definovaná pevnostní třída LC12/13.

² Pod pojmem běžný beton se v této práci rozumí obyčejný beton dle ČSN EN 206

- optimalizace návrhu ULC objemové třídy D 1,0 a D 1,2 s ohledem na maximalizaci fyzikálně mechanických parametrů; ekonomická optimalizace návrhu a výroby ULC objemové třídy D 1,2;
- ověření konstrukčních vlastností navržených ULC; kromě základních fyzikálně-mechanických parametrů se práce zabývá i soudržností ultralehkých betonů s ocelovou výztuží.

3. PŘEHLED PROBLEMATIKY A DOSAVADNÍ STAV POZNÁNÍ

Lehký beton je podle ČSN EN 206 [3] definovaný jako beton, který má po vysušení (do ustálené hmotnosti při teplotě 105°C) objemovou hmotnost větší než 800 kg/m³ a menší než 2000 kg/m³ a je vyráběn zcela nebo jen zčásti z pórovitého kameniva.

3.1. DRUHY LEHKÉHO BETONU

Hutný lehký beton je nejvíce podobný obyčejnému betonu, a to díky podobně uzavřené (kompaktní) struktuře. Nízké objemové hmotnosti je nejčastěji dosaženo záměnou hutného (těžkého) kameniva za lehké. Betony s pórovitým lehkým kamenivem se nejčastěji uplatňují v konstrukčních betonech.

Nízké objemové hmotnosti **mezerovitého lehkého betonu** je dosaženo záměrně upravenou křivkou zrnitosti, kdy jsou některé frakce lehkého kameniva značně redukovány nebo přímo vynechány. Vzniká tzv. jedno-frakční beton, ve kterém jsou značné vzduchové mezery mezi jednotlivými zrny kameniva.

Pěnobeton je v podstatě tvořen z cementu a vody bez přidání hrubého kameniva. Tato směs je v důsledku přidání pěnotvorné látky silně napěněna a tím dojde k vylehčení betonu. Pěnobeton je nejčastěji používán jako izolační a výplňový materiál.

V pórobetonu zaujímají póry až 80% z celkového objemu materiálu. Napěnění je dosaženo přidáním plynotvorné látky, která způsobí tzv. „nakynutí“ směsi. V další fázi je materiál umístěn do autoklávu, kde za zvýšené teploty a tlaku dojde k finálnímu vytvrzení směsi.

3.2. DRUHY LEHKÉHO KAMENIVA

Základní dělení lehkého kameniva je dle původu kameniva na přírodní a umělé. Disertační práce se věnuje uměle vyrobeným lehkým kamenivům vzhledem k většímu rozšíření v ČR. Použití čistě přírodního kameniva bez dodatečné úpravy již není zcela běžné.

Expandovaný perlit při působení teploty okolo 870°C dokáže zvětšit svůj objem až dvacetkrát. Nevýhodou této expanze je značná pórovitost materiálu a s ní spojená velká nasákavost, která může dosahovat až 310% objemu původního kameniva. Experimenty provedené v [4] ukazují, že se dosud nepodařilo z expandovaného perlitu vyrobit izolační beton, který by bylo možné považovat za konstrukční.

Expandovaný jíl patří mezi nejčastěji používaná lehká kameniva pro výrobu lehkých betonů. Výhodou expandovaného jílu je nízká objemová hmotnost při relativně velké

tlakové pevnosti. Objemová hmotnost kameniva se pohybuje v rozmezí od 327 do 1050 kg/m³ a kamenivo je vyráběno v zrnitosti 0 až 16 mm [5], [6]. Ve světě je známé pod obchodními názvy Leca a Liapor.

Alternativní lehké kamenivo na **bázi spékaných popílků** je vyrobeno z popílků vznikajících jako odpad z energetického průmyslu při spalování uhlí. Výhodou je rychlá nasákavost (neovlivňuje později konzistenci čerstvého betonu) a vysoká pevnost. Kamenivo je ve světě známo pod obchodním názvem Lytag [7]. V České republice se pro kamenivo na bázi spékaných popílků používá obchodní název Agloporit [8], není však běžně produkováno.

Expandované sklo je lehké kamenivo, k jehož výrobě se používá odpadní surovina. Skleněné střepy jsou jemně rozemlety a smíchány s dalšími látkami. Ze vzniklé směsi jsou vyrobena zrníčka, která jsou následně vypalována v rotačních pecích. Vzniká tak kamenivo s velkou pórovitostí, ale s kompaktní a pevnou povrchovou vrstvou.

3.3. VÝVOJ LEHKÝCH BETONŮ V ZAHRANIČÍ

Lehké betony vykazují rozdílné vlastnosti v závislosti na použitém lehkém kamenivu. Ukazuje se, že existuje silná závislost mezi tlakovou pevností lehkého betonu a jeho objemovou hmotností. Důležitou roli hraje rovněž to, zda je veškeré hutné kamenivo nahrazeno lehkým, nebo zda je lehkým kamenivem nahrazena například jen hrubá frakce. Při použití lehkého kameniva na bázi expandovaného skla byla při dosavadních výzkumech dosažena objemová hmotnost lehkého betonu ve vysušeném stavu 650 – 700 kg/m³ [9]. Tlaková pevnost měřená na krychlich o délce strany 100 mm dosahovala hodnoty okolo 10 MPa. Velký důraz při experimentech prováděných v zahraničí byl kladen na nízkou tepelnou vodivost vyvinutého betonu, která dosahovala hodnoty 0,12 W/(m·K).

Vliv expandovaného perlitu na fyzikálně mechanické pevnosti betonu zkoumal Sengul a kol. [4]. Experiment spočíval ve vytvoření 6 různých variant betonu, u kterých bylo kamenivo frakce 0-4 mm postupně v krocích po 20% nahrazováno expandovaným perlitem frakce 2-4 mm. První varianta byla provedena pouze z hutného drobného kameniva. U poslední varianty bylo veškeré hutné kamenivo nahrazeno expandovaným perlitem. Při objemové hmotnosti ve vysušeném stavu 909 kg/m³ bylo dosaženo tlakové pevnosti 4,6 MPa. Při veškerém nahrazení kameniva za expandovaný perlit bylo sice dosaženo objemové hmotnosti ve vysušeném stavu 354 kg/m³, ovšem tlaková pevnost byla pouze 0,1 MPa.

Ve studii [10] provedené Jacquemotem a dalšími byl publikován vysokohodnotný lehký beton vylehčený pěnotvornou přísadou. Výzkumný tým dosáhl krychelné pevnosti v tlaku po 28 dnech 16 MPa při objemové hmotnosti ve vysušeném stavu 1040 kg/m³. Součinitel teplotní vodivosti pěnobetonu dosahoval hodnoty 0,33 W/(m·K).

3.4. ODLIŠNOSTI HUTNÉHO LEHKÉHO BETONU S PÓROVITÝM KAMENIVEM OD BĚŽNÉHO BETONU

Pórovité kamenivo tvoří hlavní podstatu vylehčení betonu a též „zodpovídá“ za hlavní rozdíly v chování lehkého betonu oproti běžnému hutnému betonu. Níže jsou popsány

hlavní rozdíly jak v reologii čerstvého betonu, tak v hlavních fyzikálně mechanických parametrech ztvrdlého lehkého betonu.

ZPRACOVATELNOST ČERSTVÉHO BETONU

Pro výrobu hutného lehkého betonu lze použít lehké pórovité kamenivo nasákavé nebo nenasákavé. V případě nasákavého pórovitého kameniva (např. kamenivo Liapor) dochází v čerstvém betonu ke vsakování vody do kameniva a tím k výraznému poklesu zpracovatelnosti. Vhodným řešením, jak předcházet vsakování vody do kameniva při výrobě betonu, je použití již vlhkého kameniva.

Nízká objemová hmotnost kameniva se projevuje například při zkoušce rozlitím [11]. Při testu působí na lehký beton nižší tíhové síly úměrně jeho objemové hmotnosti. To má za následek nižší hodnoty stupně rozlití lehkého betonu v porovnání s běžným betonem srovnatelné konzistence.

DOPRAVA A ČERPÁNÍ LEHKÉHO BETONU

Nasákavost lehkého pórovitého kameniva ovlivňuje dobu, po kterou lze beton dopravovat, zpracovávat a ukládat do bednění. Jak je uvedeno výše, nedoporučuje se používat pórovité nasákavé kamenivo v suchém stavu. Předvlhčení nabývá na významu při čerpání betonu, při němž v důsledku vyššího tlaku dochází ke zvýšení množství vtlačované vody do pórů kameniva. Při ukládání lehkého betonu do konstrukcí pomocí košů na beton ke změně konzistence nedochází.

HUTNĚNÍ

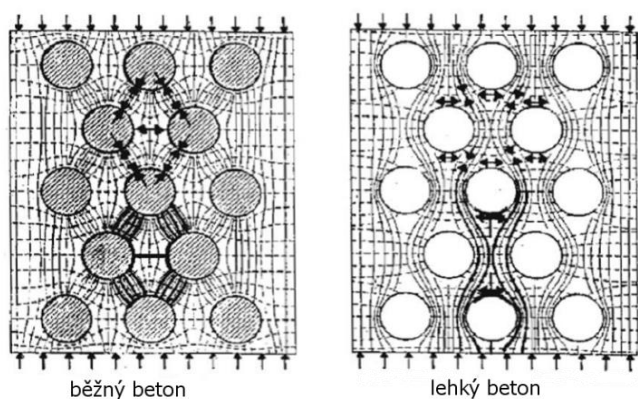
Nižší objemová hmotnost lehkého betonu má za následek změnu kinetické energie potřebné při hutnění čerstvého betonu. Frekvenci příloženého vibrátoru je u lehkého betonu vhodné snížit se současným zvýšením amplitudy [12].

OŠETŘOVÁNÍ LEHKÉHO BETONU

I přes vnitřní ošetření betonu vodou obsaženou v kamenivu je nutné povrch lehkého betonu chránit před vysycháním více než u běžného betonu. Důvodem je potřeba zachování nízkého vlhkostního a teplotního gradientu mezi jádrem a okrajem betonového prvku. Teplo vzniklé při hydrataci se v betonu hromadí a vlivem nízké tepelné vodivosti zůstává „uzavřené“ v betonu. Velký teplotní a vlhkostní gradient v betonu způsobuje vyšší tahové namáhání, které může způsobovat povrchové trhliny.

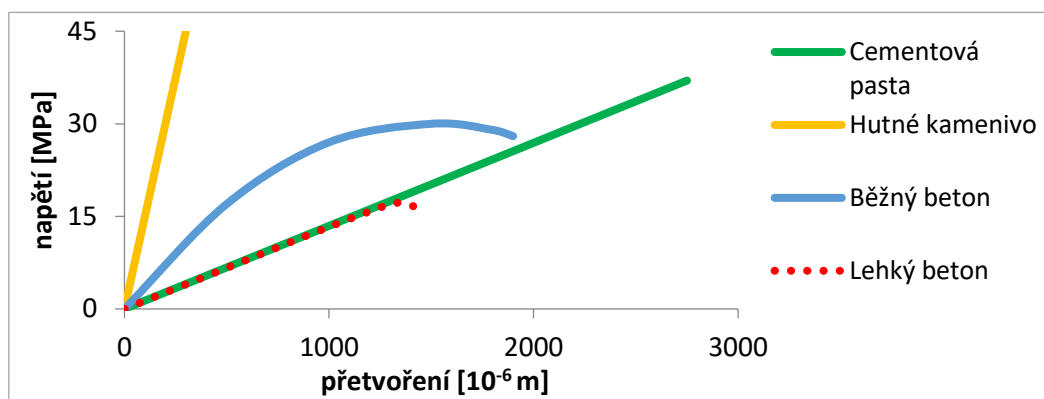
TLAKOVÉ PORUŠENÍ

U lehkého betonu je nejslabším článkem porézni lehké kamenivo. Příspěvek kameniva na celkovou pevnost lehkého betonu je zanedbatelný a zatížení je přenášeno výhradně pomocí cementového tmelu, který „přemostuje“ jednotlivá zrna kameniva, čímž vznikají v materiálu značné tahové síly, viz *Obr. 1* [12]. Lomová plocha prochází při porušení materiálu skrz jednotlivá zrna lehkého kameniva, jak zobrazuje *Obr. 2*.



Obr. 1: Tlakové porušení běžného a lehkého betonu [12] Obr. 2: Lomová plocha ULC

Lehké betony s vysokým obsahem cementového tmelu mají značně křehké chování. Na Obr. 3. je znázorněn vztah mezi napětím a přetvořením pro kamenivo, cementový tmel a běžný beton [13]. Graf je doplněn o předpokládanou závislost napětí na přetvoření u ultralehkého betonu. Lehké kamenivo se v kompozitu lehkého betonu vyznačuje nejmenším modulem pružnosti. Při zatížení se chování lehkého betonu v počáteční fázi zatěžování přibližuje chování cementového tmelu. Lehké kamenivo se výrazně nepodílí na přenosu zatížení, ale svým celkovým objemem a rozložením v matici kompozitu předurčuje celkovou pevnost a přetvoření lehkého betonu.



Obr. 3: Pracovní diagramy běžného a lehkého betonu a jednotlivých komponent

NÁRŮST PEVNOSTI V ČASE

U lehkého betonu dochází k razantnějšímu nárůstu počáteční pevnosti [12] než v případě běžného betonu. Sedmidenní pevnost dosahuje cca 75% hodnoty 28denní pevnosti. U ultralehkých betonů to může být až 80% výsledné pevnosti betonu, někdy i více. Vysoká počáteční pevnost lehkých betonů umožňuje dřívější odbednění konstrukce a znatelně zvyšuje rychlost výstavby.

Také vývoj tlakové pevnosti v čase větším než 28 dní je u lehkého betonu odlišný. Po cca 28 dnech dosáhne pevnost v tlaku lehkého betonu v podstatě svého maxima a se zvyšujícím se stářím betonu se dále již prakticky nezvyšuje. Naproti tomu u běžných betonů dochází i po 28 dnech k dalšímu nárůstu tlakové pevnosti.

STATICKÝ MODUL PRUŽNOSTI

Modul pružnosti patří k základním mechanickým charakteristikám betonu. Výrazně ovlivňuje velikost deformací (průhyb, dotvarování a smršťování). Velikost modulu pružnosti lehkého betonu je nižší než u běžného betonu. Velký podíl má modul pružnosti kameniva, který dosahuje u lehkého kameniva hodnoty 3 až 18 GPa, což je pouze zlomek hodnoty modulu pružnosti běžného kameniva. Při stejné tlakové pevnosti bude lehký beton vykazovat cca 30 až 70% hodnoty modulu pružnosti běžného betonu.

DOTVAROVÁNÍ A SMRŠŤOVÁNÍ

Při shodné pevnosti běžného a lehkého betonu je při stejném napětí dotvarování lehkého betonu větší než u běžného betonu. U lehkého betonu má vliv velký objem cementového tmelu, který nejvíce podléhá dotvarování. Výslednou velikost přetvoření také zásadně ovlivňuje nízký modul pružnosti lehkého betonu.

Smršťování závisí na více faktorech, jako je například kamenivo, obsah cementu, vlhkost, vodní součinitel a geometrie tělesa. Při použití lehkého pórovitého kameniva je nutné uvažovat s větší mírou smršťování, které však lze redukovat předvlhčením kameniva.

VNITŘNÍ OŠETŘOVÁNÍ

Pozitivní vliv vnitřního ošetřování je znám již od poloviny 50. let minulého století. Hlavní výhody spočívají ve zlepšení hydratace cementového tmelu a případně latentně hydraulických příměsí. Vlivem spotřebovávání vody během hydratace dochází k deficitu vody nutné pro ošetřování čerstvého betonu. Prosté přidání vody do receptury betonu by mělo za následek zvýšení vodního součinitele a mělo by tak nepříznivý dopad na trvanlivost a pevnost betonu. Řešením je vytvořit „zásobu vody“ uvnitř betonu, která se bude postupně uvolňovat a plnit roli ošetřovací vody. To je možné za použití absorpčních materiálů, jakým je například právě pórovité lehké kamenivo.

3.5. PROBLEMATIKA SOUDRŽNOSTI VÝZTUŽE S BĚŽNÝM A LEHKÝM BETONEM

Spolupůsobení betonu a výztuže je nutným předpokladem funkčnosti všech nosných konstrukcí ze železobetonu. Spolupůsobení obou základních materiálů je zajištěno pomocí soudržnosti, která umožňuje přenést tahová namáhání z okolního betonu do výztužných vložek. Velikost napětí v soudržnosti závisí na několika parametrech. Mezi ty nejdůležitější se řadí průměr výztuže, povrchovou úpravu výztuže, pevnost cementového tmelu v tahu, velikost krycí vrstvy a polohu výztuže při betonování. Pro korektní sledování spolupůsobení mezi výztuží a betonem mají význam i vlastnosti čerstvého betonu, jak uvádí např. Bogas [14]. Celkovou velikost napětí v soudržnosti lze rozdělit na několik „složek“ napětí. Při malých posunech výztuže se uplatňuje převážně složka adheze a tření výztuže. S narůstající velikostí posunu roste na významu vliv zaklínění zrn kameniva mezi žebírka výztuže. Tato složka je u běžného betonu dominantní, avšak k její celkové aktivaci je nutný dostatečný posun výztuže, jak uvádí např. [15].

Mezní napětí v soudržnosti lze stanovit experimentálně, např. pomocí pull-out testů (výstupem je tzv. bond-slip diagram) nebo numericky dle norem, kdy je na základě semi-empirických vztahů stanovena hodnota soudržnosti pro normou uvažované minimální krytí. Při porovnání naměřených a vypočtených hodnot napětí v soudržnosti se ukázaly značné neshody právě v oblasti ultralehkých betonů. Pro přímě porovnání naměřených a normou stanovených hodnot bylo nutné upravit experiment pull-out testu tak, aby zahrnoval také vliv minimálního krytí výztuže. Navržená modifikace pull-out testu o vliv krytí je popsána níže.

4. VLASTNÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOST

Disertační práce se zabývá návrhem a vlastní výrobou ULC o třídě objemové hmotnosti D1,0. Z ekonomických důvodů a pro snadnější výrobu betonu i mimo laboratorní podmínky jsou poté navrženy dva další druhy betonu, a sice v třídě objemové hmotnosti D1,2. Ke standardně prováděné zkoušce pro stanovení napětí v soudržnosti, která ovšem nezahrnuje velikost krytí výztuže, je navržena modifikovaná zkouška reflektující minimální krytí výztuže. V závěru kapitoly jsou navrženy úpravy existujících výpočtových vztahů pro stanovení velikosti napětí v soudržnosti.

4.1. ULC S TŘÍDOU OBJEMOVÉ HMOTNOSTI D1,0 - LIAPOR

Třída objemové hmotnosti D1,0 představuje u lehkých betonů podle [3] nejnižší přípustnou hmotnostní třídu. Pro dosažení této třídy bylo veškeré hutné kamenivo nahrazeno lehkým kamenivem Liapor ve frakcích 0-2/575, 1-4/500 a 4-8/350. Pro všechny připravené záměsi byl použit Portlandský cement CEM I 52,5 R z cementárny Mokrá, jehož vlastnosti byly upravovány pomocí příměsí metakaolinu a strusky. Pro dosažení objemové hmotnosti betonu pod hodnotu 1000 kg/m^3 musel být navíc vylehčen i cementový tmel záměrným provzdušněním. Tento postup výroby betonu je ovšem značně technologicky náročný a je vhodný spíše pro výrobu v laboratoři. Míra provzdušnění je totiž závislá na aktuální konzistenci čerstvého betonu a délce a intenzitě míchacího cyklu. Objemová hmotnost musí být proto během výroby několikrát kontrolována, neboť na velikosti objemové hmotnosti jsou závislé i ostatní mechanické parametry betonu. Materiálové složení ULC s třídou objemové hmotnosti D1,0 je zobrazeno v Tab. 1

Tab. 1: Hmotnostní a procentuální složení ULC D1,0

ULC D1,0 - Liapor			
vodní součinitel 0,31	MATERIÁL	[kg/m ³]	[%]
	CEM I 52,5-R	350	37
	STRUSKA ŠSJM380	115	12
	S-META	49	5
	POLYFUNKČNÍ PŘÍSADA	9	1
	LIAPOR 0/2 575	52	6
	LIAPOR 1/4 500	229	24
	LIAPOR 4/8 350	139	15

Naměřená objemová hmotnost čerstvého betonu ULC D1,0 – Liapor činila 1070 kg/m³. Konzistence ULC byla stanovena jak pomocí zkoušky rozlitím, tak pomocí stupně zhutnitelnosti. Zkouška stupně zhutnitelnosti byla provedena podle [16] a bylo dosaženo nejvyššího možného stupně zhutnitelnosti, tedy C3. Při zkoušce rozlitím [11] bylo dosahováno stupně F3 až F4, tedy rozlité o velikosti 420 až 550 mm. Zkouška rozlitím sloužila i k posouzení, zda u čerstvého betonu nedochází k segregaci. Jak plyne z Obr. 4, k segregaci betonu nedocházelo. Důvodem omezení segregace u betonů ULC D1,0 – Liapor bylo značné provzdušnění.



Obr. 4: Detail „nadýchané“ konzistence a stupeň rozlití F3 (450 mm) ULC D1,0 – Liapor

Objemová hmotnost betonu ve vysušeném stavu byla v průměru 970 kg/m³. Beton lze tak zařadit do třídy objemové hmotnosti D1,0.

Ultralehký beton dosahoval průměrné krychelné tlakové pevnosti $f_{lcm,cube}$ po 28 dnech 19,95 MPa. Charakteristická hodnota krychelné tlakové pevnosti $f_{lck,cube}$ činila 15,65 MPa.

Naměřená hodnota **modulu pružnosti** na válci vycházela 8,6 GPa a průměrná hodnota modulu pružnosti měřená na trámci byla 9,1 GPa. Naměřené hodnoty modulů pružnosti značně převyšují hodnoty stanovené výpočtem podle aktuální normy [2], a to o 64% v případě válcových těles a o 73% u těles tvaru trámce.

Přímé stanovení tahové pevnosti betonu je značně komplikované, a proto byla měřena **pevnost v příčném tahu**, která byla následně přepočítána na tahovou pevnost. Naměřená pevnost v příčném tahu dosahovala hodnoty 1,2 MPa, kde po přepočtu vychází tahová pevnost 1,08 MPa, což je ve shodě s hodnotou stanovenou pouze výpočtem na základě objemové hmotnosti.

Hloubka průsaku byla díky vnitřní vlhkosti lehkého kameniva méně výrazná, než je tomu u běžného betonu. Průměrná hloubka průsaku tlakovou vodou stanovená na 4 vzorcích byla cca 9,8 mm.

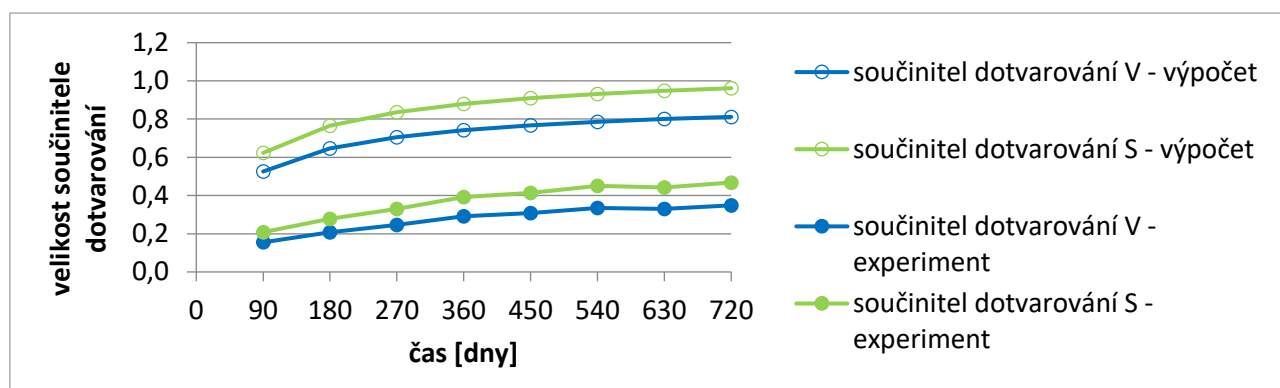
U lehkého betonu byla měřena i **odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám**, kde bylo dosaženo odolnosti odpadu 1000g/m² při 136 cyklech.

Hodnota **součinitele tepelné vodivosti** λ byla orientačně stanovena na Ústavu pozemního stavitelství FAST VUT v Brně a dosahovala velikosti 0,27 W/(m·K) při vysušeném vzorku a hodnotou 0,3 W/(m·K) při ustálené vlhkosti. Pro srovnání, součinitel tepelné vodivosti běžného betonu má hodnotu cca 1,36 W/(m·K).

Z důvodu použití výhradně lehkého kameniva je vyrobený beton značně křehký, což se prokázalo především při měření lomové energie. Naměřená velikost lomové energie dosahovala hodnoty $19,7 \text{ J/m}^2$ s výběrovou směrodatnou odchylkou $6,42 \text{ J/m}^2$, což je přibližně pouze desetina hodnoty lomové energie běžného betonu.

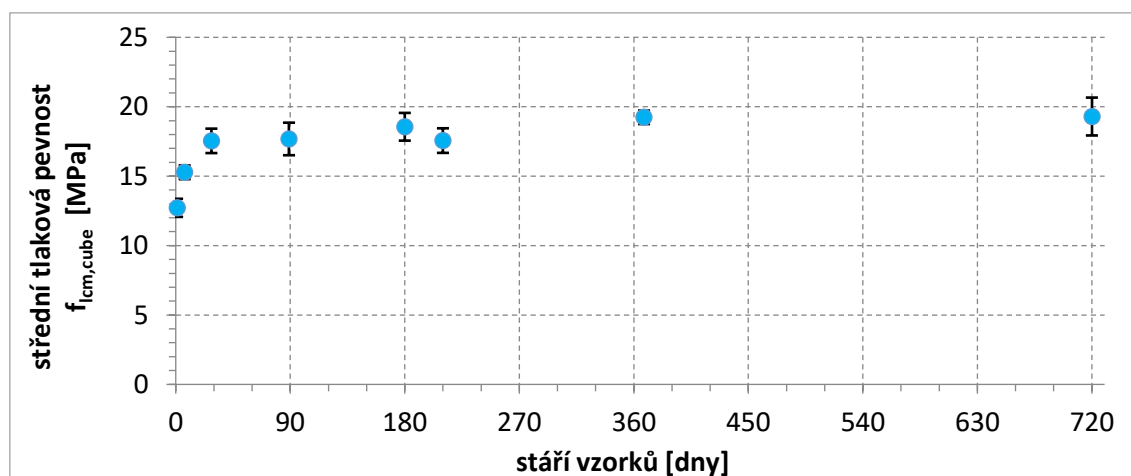
Při porovnání velikosti součinitele dotvarování stanoveného experimentálně a teoreticky podle aktuální normy docházíme opět k závěru, že norma udává velmi konzervativní hodnoty a skutečná naměřená hodnota součinitele dotvarování je méně než poloviční, jak udává Obr. 5.

Experimenty pro určení velikosti dotvarování a smršťování byly provedeny s různou vlhkostí pórovitého kameniva. Ve variantě označené písmenem „S“ (zelená barva) bylo kamenivo navlhčeno dodatkovou vodou před mícháním. U varianty označované písmenem „V“ (modrá barva) bylo kamenivo před zkouškou uloženo po dobu 24 hodin ve vodě.



Obr. 5: Grafické porovnání součinitelů dotvarování určených výpočtem a experimentálně

Dlouhodobá tlaková pevnost byla měřena po dobu dvou let. Pro každý časový úsek byly vždy zkoušeny tři vzorky. U naměřených hodnot je zobrazena kladná i záporná výběrová směrodatná odchylka. Z Obr. 6 je patrné, že po prudkém počátečním nárůstu pevnosti dochází k dalšímu navyšování tlakové pevnosti jen pozvolna. Tlaková pevnost po jednom dni dosahovala již 73% pevnosti 28denní. Po sedmi dnech pevnost v tlaku vzrostla na 87% 28denní pevnosti. Na vzorcích se stářím 2 roky byla stanovená pevnost v tlaku pouze o 10% vyšší než 28denní pevnost.



Obr. 6: Závislost pevnosti ULC D1,0 – Liapor na čase

4.2. ULC s TŘÍDOU OBJEMOVÉ HMOTNOSTI D1,0 – LIAVER

Lehké kamenivo na bázi zpěněného skla je dostupné především pod obchodními názvy Liaver a Poraver. Pro experimenty byl použit opět cement CEM I 52,5R z cementárny Mokrá. Vlastnosti cementového tmelu byly tentokrát modifikovány pomocí příměsí Micrositu H20 a vápence. Složení čerstvého betonu v Tab. 2.

Tab. 2: Hmotnostní a procentuální složení ULC D1,0 - Liaver

ULC D1,0 - Liaver			
vodní součinitel 0,32	MATERIÁL	[kg/m ³]	[%]
	CEM I 52,5-R	350	39
	VÁPENEC 12	22	2
	MICROSIT H20	123	13
	POLYFUNKČNÍ PŘÍSADA	15	2
	LIAVER 0,25/0,8 HP	101	11
	LIAVER 0,5/1,2 HP	168	19
	LIAVER 2/4	125	14

Čerstvý beton vykazoval rozlití zhruba 500 mm, tedy třídu rozlití F4. Objemová hmotnost čerstvého betonu činila 1058 kg/m³. Čerstvý beton nevykazoval známky segregace a byl velmi dobře zhutnitelný.

U betonu s kamenivem Liaver byly provedeny pouze zkoušky tlakové pevnosti na krychlích po 1, 7 a 28 dnech a stanovení objemové hmotnosti ve vysušeném stavu. Důvodem nízkého počtu provedených zkoušek byly nižší mechanické parametry oproti ULC D1,2 – Liapor a značně vyšší ekonomická náročnost.

Průměrná objemová hmotnost ve vysušeném stavu dosahovala hodnoty 960 kg/m³. Lehký beton s kamenivem Liaver lze na základě objemové hmotnosti ve vysušeném stavu zařadit do třídy objemové hmotnosti D1,0.

Po 28 dnech byla dosažena na zkušebních tělesech pevnost 18 MPa. Velmi rychlý je opět nárůst tlakové pevnosti, kdy po jednom dni bylo dosaženo 72% 28 denní pevnosti.

4.3. ULC s TŘÍDOU OBJEMOVÉ HMOTNOSTI D1,2 - LIAPOR

Další z hlavních navržených lehkých betonů byl vylehčen pouze lehkým kamenivem Liapor. Tímto způsobem bylo možné dosáhnout objemové hmotnosti ve vysušeném stavu do 1200 kg/m³. **Složení betonu bylo zjednodušeno tak, aby bylo možné beton připravit i mimo laboratorní podmínky.** Receptura ultralehkého betonu obsahovala dvě frakce kameniva Liapor 0-4/550 a 4-8/450. Cement CEM 52,5R byl nahrazen dostupnějším cementem CEM 42,5R z výrobního závodu Mokrá. Vlastnosti cementového tmelu byly upraveny pouze pomocí jediné příměsí S-Meta. Složení čerstvého betonu je zobrazeno v Tab. 3.

Čerstvý beton vykazoval opět velmi dobrou konzistenci. Rozlití lehkého betonu dosahovalo třídy konzistence F3. Čerstvý beton nevykazoval známky segregace a byl velmi dobře zhutnitelný.

Tab. 3: Hmotnostní a procentuální složení ULC D1,2 – Liapor

ULC D1,2 - Liapor			
vodní součinitel 0,30	MATERIÁL	[kg/m ³]	[%]
	CEM I 42,5-R	465	41
	S-META	79	7
	POLYFUNKČNÍ PŘÍSADA	8	1
	LIAPOR 0-4/550	399	35
	LIAPOR 4-8/450	183	16

Průměrná objemová hmotnost betonu ULC D1,2 – Liapor byla 1320 kg/m³ s průměrnou vlhkostí 10%. **Objemová hmotnost betonu ve vysušeném stavu dosahovala průměrné hodnoty 1190 kg/m³.**

Ultralehký beton dosahoval průměrné tlakové pevnosti $f_{lcm,cube}$ 28,2 MPa. Charakteristická hodnota krychelné tlakové pevnosti $f_{lck,cube}$ činila 22,75 MPa. Nejvyšších pevností bylo dosaženo na vzorcích tvaru trámce o rozměrech 100×100×400 mm, kde průměrná tlaková pevnost $f_{lcm,prism}$ dosahovala hodnoty 31,8 MPa.

Naměřená hodnota **modulu pružnosti** na válci byla 12,2 GPa a průměrná hodnota modulu pružnosti na trámcích vycházela 13,0 GPa. Naměřené hodnoty modulů pružnosti jsou poměrně vyšší než stanovené výpočtem podle aktuální normy [2], a sice o 39% na tělesech válcových a o 48% na trámcích.

Průměrná **pevnost v příčném tahu** dosahovala velikosti 1,5 MPa.

Velikost **lomové energie** u betonu s třídou objemové hmotnosti D1,2 dosahovala hodnoty 23,0 J/m²

4.4. ULC S TŘÍDOU OBJEMOVÉ HMOTNOSTI D1,2ECO - LIAPOR

Nejvíce experimentů bylo provedeno na betonu s označením ULC D1,2eco – Liapor. Jedná se o lehký beton odvozený z varianty ULC D1,2 – Liapor záměnou příměsí. **Namísto metakaolinu byl s ohledem na ekonomický návrh receptury zvolen mletý vápenec.** Objemová hmotnost čerstvého betonu byla 1327 kg/m³. Složení udává Tab. 4.

Tab. 4: Hmotnostní a procentuální složení ULC D1,2eco – Liapor

ULC D1,2eco - Liapor			
vodní součinitel 0,30	MATERIÁL	[kg/m ³]	[%]
	CEM I 42,5-R	465	40
	VÁPENEC CARMEUSE 8	81	7
	POLYFUNKČNÍ PŘÍSADA	4	1
	LIAPOR 0-4/550	411	36
	LIAPOR 4-8/450	188	16

Čerstvý beton dosahoval velikosti rozlití 450 mm, což odpovídá třídě rozlití F3. Čerstvý beton byl kompaktní a nebylo pozorováno odměšování vody.

Průměrná objemová hmotnost betonu ULC D1,2eco – Liapor ve vysušeném stavu dosahovala hodnoty 1180 kg/m³.

Beton ULC D1,2eco – Liapor dosahoval průměrné tlakové pevnosti na krychlich $f_{lcm,cube}$ 26,9 MPa. Charakteristická krychelná pevnost dosahuje hodnoty 22,24 MPa. Průměrná tlaková pevnost betonu stanovená na trámcích byla $f_{lcm,prism}$ 27 MPa.

Modul pružnosti lehkého betonu vykazoval opět vyšších hodnotu, než jaké stanovuje norma [2]. Naměřená hodnota modulu pružnosti stanoveného na tělese tvaru trámce se rovnala 11,9 GPa. Rozdíl mezi naměřenou a dle normy určenou hodnotou byl 38%.

U pevnosti v **příčném tahu** byly obdrženy stejné hodnoty jako u předchozího betonu, tedy 1,5 MPa.

Průměrná hodnota **hloubky průsaku** tlakovou vodou činila 9 mm. Dosažený výsledek je z hlediska návrhu vodonepropustného lehkého betonu velmi dobrý.

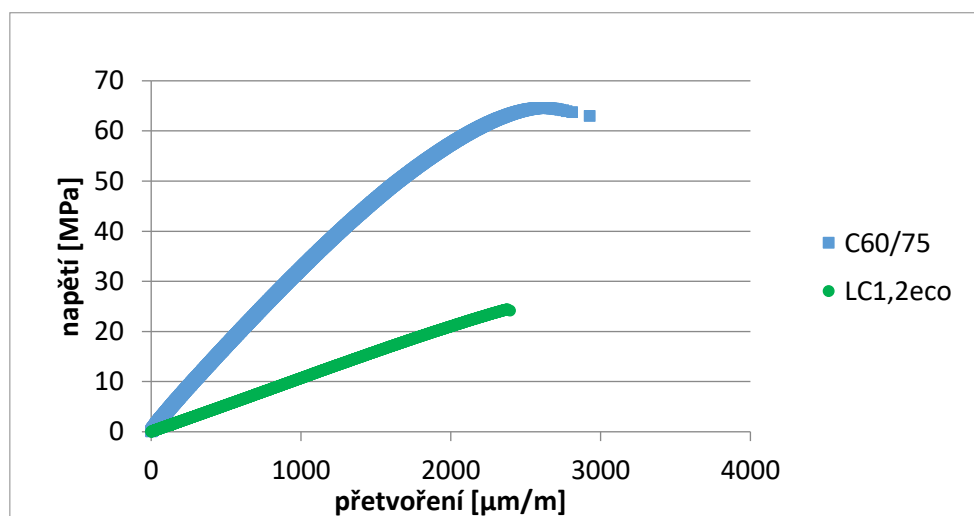
Nedostatečné výsledky byly získány při zkoušce odolnosti betonu proti **chemickým rozmrazovacím látkám**. Bylo dosaženo 1000 g/m² odpadu již při 31 cyklech.

Záměna příměsi metakaolinu za vápenec měla patrně za následek zvýšení křehkosti materiálu, jež se projevila poklesem **lomové energie** o 67% v porovnání s ULC D1,2 – Liapor. Naměřená hodnota činila pouhých 7,7 J/m².

Velikost **součinitele dotvarování** byla též u této varianty normovým výpočtem nadhodnocena, celkem o 30%. Reálná velikost dotvarování je tedy u vyvinutého lehkého betonu nižší než stanovená výpočtem podle normy.

U **dlouhodobé pevnosti betonu** ULC D1,2eco – Liapor, kde byl sledován rozdíl mezi navlhčeným a zcela nasyceným kamenivem, bylo zjištěno, že varianta betonu s plně nasyceným kamenivem vodou dosahuje horších a více rozptýlených hodnot.

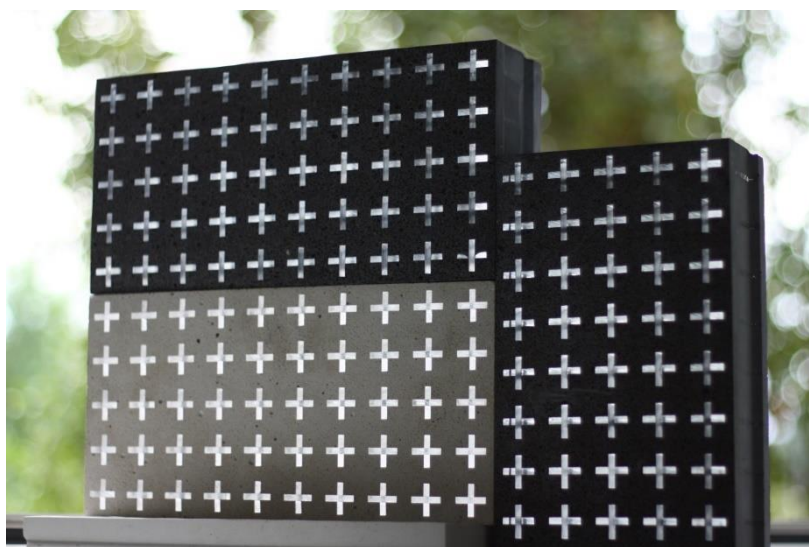
Důležitá vlastnost betonu z hlediska bezpečného návrhu je mezní přetvoření betonu, které udává tzv. **pracovní diagram**. Jedná se o graf závislosti napětí betonu na deformaci. Z důvodu předpokládané nízké duktility je pro srovnání uveden průběh napětí vysokopevnostního betonu C60/75. Aby byla zachycena i sestupná větev diagramu, byly vzorky zatěžovány deformačně s rychlostí 0,1 mm/min. Záznam naměřených hodnot poskytuje Obr. 7.



Obr. 7: Pracovní diagram ultralehkého a vysokopevnostního betonu

4.5. MIKROBETON LC – LIAPOR/PORAVER

Pro uplatnění ve speciálních stavebních konstrukcích byl vyvinut lehký beton s maximální velikostí zrna kameniva 2 mm. Z důvodu použití výhradně jemného kameniva je vhodnější jej označovat spíše jako mikrobeton. Mikrobeton byl použit jako matrice pro speciální designové tvarovky s názvem LiCrete® umožňující vytvářet průsvitné přičky. Na materiál byly zadavatelem kladeny značné požadavky z hlediska konzistence, odolnosti proti segregaci i vzhledu. Výroba tvarovky spočívala v „zalití“ světlovodivé mřížky tímto mikrobetonem. Po vytvrdnutí betonu byly obě strany tvarovek zbroušeny. Bylo vyhotoveno 7 receptur lehkého mikrobetonu s Liaporem o objemových hmotnostech ve vysušeném stavu 1052 až 1330 kg/m³. Rozpětí objemových hmotností odpovídaly i tlakové pevnosti, které dosahovaly hodnot 21,7 až 43,1 MPa. Pro bílou variantu tvarovek bylo použito lehké kamenivo Poraver, jež má v řezu kamenivem bílou barvu. V bílé variantě bylo vyhotoveno opět 7 receptur v rozpětí objemových hmotností ve vysušeném stavu 950 až 1330 kg/m³. Tlakové pevnosti dosahovaly hodnot od 17,3 do 29,8 MPa.

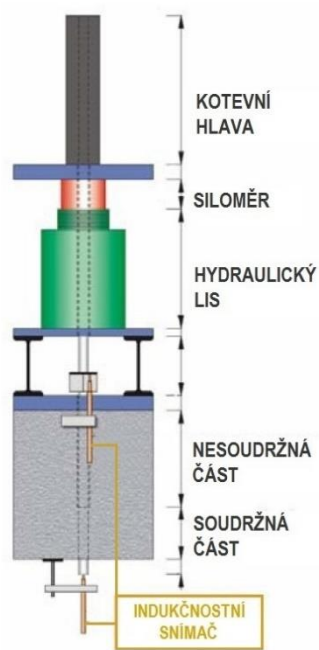


Obr. 8: Designové tvarovky LiCrete® s lehkým mikrobetonem

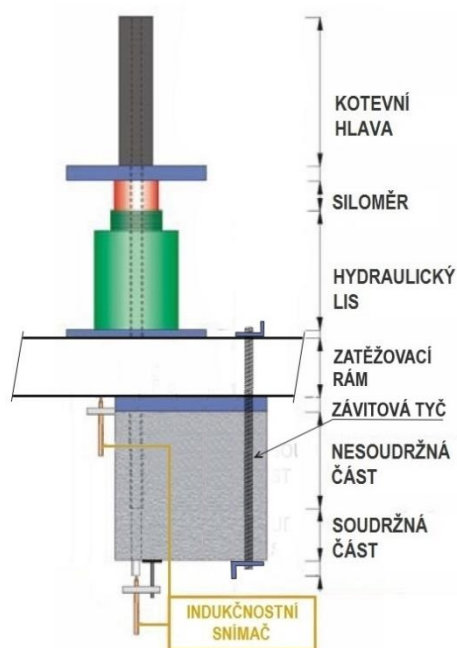
4.6. SOUDRŽNOST ULC S VÝZTUŽÍ

Pro stanovení soudržnosti lehkého betonu s výztuží **byl proveden komplexní test, který zahrnoval jak centricky, tak excentricky umístěnou ocelovou výztuž**. Současně byly zhotoveny vzorky sloužící ke stanovení fyzikálně mechanických vlastností použitých betonů. Sledovány byly i vlastnosti čerstvého betonu (zejména jeho stabilita), které mohou mít na velikost a průběh napětí v soudržnosti vliv. Komplexnímu experimentu byly podrobeny 4 typy betonů. V experimentu byly zastoupeny tři nejnižší hmotnostní třídy lehkých betonů D1,0, D1,2 a D1,4. Pro možnost srovnání byl experiment proveden s běžným hutným betonem o pevnostní třídě C30/37. Schéma a provedení standardní zkoušky pull-out s centricky umístěnou výztuží je zobrazen na Obr. 9 a byla provedena podle [17]. **Navržená modifikace zkoušky pull-out spočívala v excentrickém umístění zkoušené výztuže**. Krytí výztuže v experimentech odpovídalo jednomu profilu zkoušené

výztuže. Uchycení vzorku ke zkušebnímu rámu bylo provedeno pomocí závitových tyčí umístěných cca 140 mm od osy zkoušené výztuže. Jedná se o nejvzdálenější možné místo od zkoušené výztuže. Důvodem byla snaha o nejnižší možné ovlivnění zkoušené oblasti betonu v části se soudržnou výztuží. Tahová síla do výztuže byla vnášena pomocí hydraulického lisu. Velikost vnesené síly byla kontinuálně měřena siloměrem. Kotevní hlava byla tvořena kotevním kuželíkem. Posun volného konce výztuže a posun výztuže u horního povrchu betonu byl stanoven pomocí indukčnostních snímačů. Schéma zkoušky s excentricky umístěnou výztuží a její provedení je zobrazeno na Obr. 10



Obr. 9: Schéma pull-out testu při zkoušení centrické výztuže



Obr. 10: Schéma a provedení pull-out testů s excentricky umístěnou výztuží

Napětí v soudržnosti výztuže s betonem bylo zkoušeno v laboratořích ústavu SZK, FAST VUT v Brně. Síla byla vyvozena hydraulickým lisem. Posun výztuže byl měřen na dvou místech vzorku pomocí indukčnostních snímačů. Změřený posun na nezátíženém dolním konci výztuže sloužil pro vyhodnocení velikosti napětí v soudržnosti. Vyhodnocení mezního napětí v soudržnosti bylo provedeno podle předpokladu konstantního rozdělení napětí v soudržnosti po délce prutu. Naměřené výsledky fyzikálně mechanických parametrů použitých betonů ve stáří 28 dnů zobrazuje Tab. 5. S poklesem objemové hmotnosti nejvíce korespondoval pokles tlakové pevnosti. Ostatní fyzikálně mechanické charakteristiky klesaly strměji. Nejvyšší pokles v porovnání s poklesem objemové hmotnosti byl zaznamenán u veličiny G_f – lomové energie.

Tab. 5: Fyzikálně mechanické parametry použitých betonů

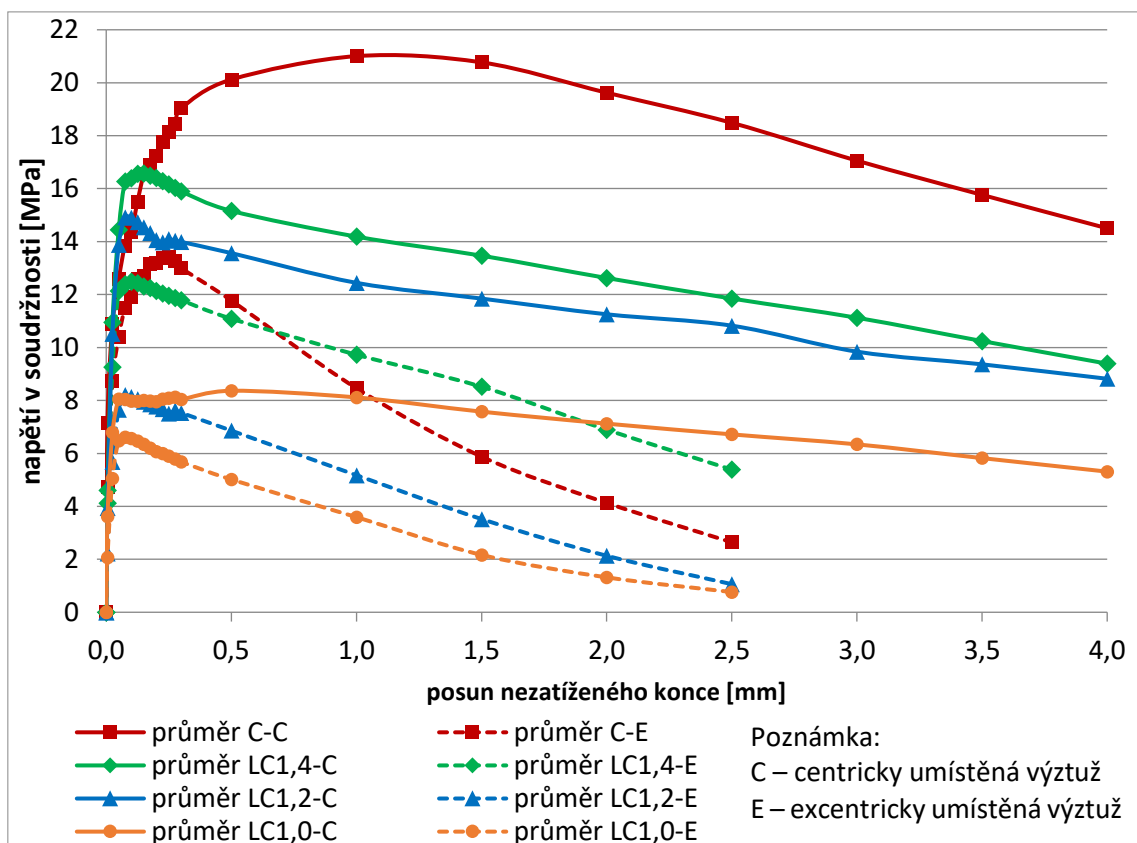
označení vzorků	tlaková pevnost	tahová pevnost	objemová hmotnost ρ_{dry}	modul pružnosti	efektivní lomová houževnatost K_{lce}	lomová energie G_f
	[MPa]	[MPa]	[kg/m ³]	[GPa]	[MPa.m ^{1/2}]	[J/m ²]
C30/37	45,3	3,3	2180	31,3	1,492	212,8
LC1,4	35,6	1,7	1400	18,2	0,554	13,4
LC1,2	25,4	1,5	1190	13,8	0,413	7,67
LC1,0	22,5	1,2	1020	9,3	0,283	19,7

Naměřené hodnoty v soudržnosti poskytuje Tab. 6. V tabulce jsou uvedené průměrné velikosti mezního napětí v soudržnosti. Grafickou závislost napětí v soudržnosti na velikosti posunu nezátíženého konce zobrazuje Obr. 11.

Tab. 6: Naměřené hodnoty napětí v soudržnosti

CENTRICKÉ					
označení betonu	napětí při 0,05 mm	napětí při 0,1 mm	napětí při 0,25 mm	maximální napětí	odpovídající posun
	MPa	MPa	MPa	MPa	mm
C30/37	12,577	14,353	18,144	21,569	1,023
LC1,4	14,440	16,398	16,165	16,773	0,104
LC1,2	13,880	14,902	14,091	14,989	0,078
LC1,0	8,051	7,972	8,082	8,514	0,413
EXCENTRICKÉ					
C30/37	10,403	11,917	13,401	13,527	0,229
LC1,4	12,137	12,491	11,956	13,220	0,090
LC1,2	7,652	8,140	7,508	8,234	0,073
LC1,0	6,480	6,568	5,895	6,655	0,070

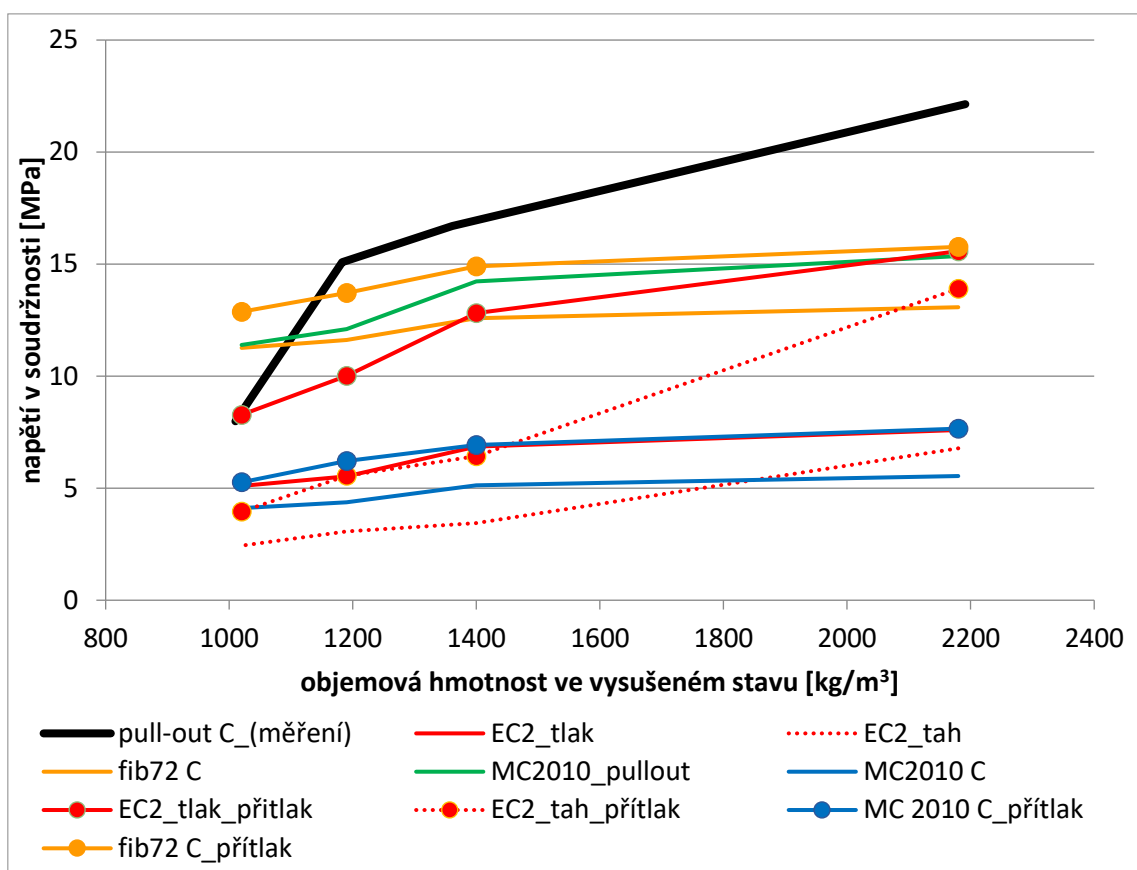
V níže uvedených legendách značí C/LC běžný/lehký beton a C/E centricky/excentricky umístěnou výztuž. Očekávaný trend chování mezilehlých hodnot je zobrazen spojnici vycházející z průměrných hodnot. V případě centricky umístěné výztuže je trend hodnot zobrazen plnou čarou a v případě excentricky umístěné výztuže čárkovanou čarou.



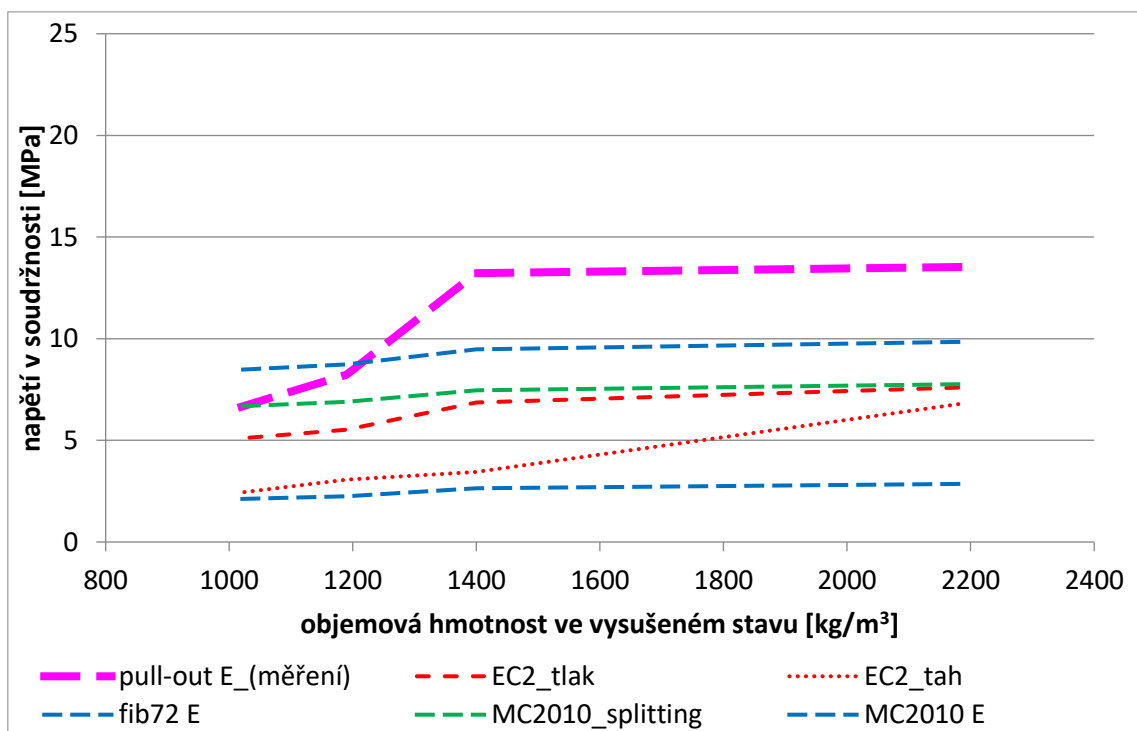
Obr. 11: Závislost velikosti napětí v soudržnosti na posunu nezatíženého konce výztuže

Se snižující se objemovou hmotností dochází k téměř lineárnímu snižování napětí v soudržnosti. Tento jev se objevuje rovněž při stanovení napětí v soudržnosti lehkých betonů dle normativního podkladu [2]. **Lineární závislost poklesu napětí v soudržnosti na objemové hmotnosti přestává ovšem platit u betonů s objemovou hmotností ve vysušeném stavu nižší než 1200 kg/m^3 . Napětí v soudržnosti je značně nižší.** Zřetelný pokles napětí v soudržnosti je patrný také v případě excentricky umístěné výztuže. Naměřené údaje ukazují razantní pokles napětí v soudržnosti již od velikosti objemové hmotnosti 1400 kg/m^3 . U varianty s excentricky umístěnou výztuží byl zaznamenán u všech vzorků srovnatelný rozptyl.

Srovnání naměřených a vypočítaných hodnot je zobrazeno na Obr. 12 a Obr. 13. Centricky umístěné výztuže jsou zobrazeny v následujících grafech plnou čarou. Vliv přítlaku, který se uplatní u centricky umístěných výztuží, je zobrazen plnou čarou s výraznými body. Pouze v případě MC 2010_pull-out je již přítlak ve vzorci zahrnut. Excentricky umístěné výztuže jsou zobrazeny čárkovanou čarou. Výjimkou je pouze zobrazení napětí v soudržnosti podle EC2, které je odvozené jak z tlakové, tak z tahové pevnosti betonu. Hodnoty odvozené z tlakové pevnosti jsou zobrazeny plnou čarou a hodnoty odvozené z tahové pevnosti betonu tečkovanou čarou.



Obr. 12: Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot napětí v soudržnosti s centricky umístěnou výztuží



Obr. 13: Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot napětí v soudržnosti s excentricky umístěnou výztuží

Srovnání naměřených hodnot s výpočty dle norem ukázalo, že i přes započítání vlivu přítlaku u centricky umístěné výztuže byla výpočtem stanovená hodnota napětí v soudržnosti o 30 % nižší u běžného betonu odpovídající pevnostní třídy. Obdobného rozdílu bylo dosaženo i u excentricky umístěné výztuže. Rozdíl mezi naměřenou a vypočítanou hodnotou může být způsoben velikostí zkušebního souboru. Normové vztahy jsou odvozeny pro mnohem větší statistický soubor.

Důležitým poznatkem je však dominantní snížení napětí v soudržnosti u betonů s objemovou hmotností nižší než 1200 kg/m³ s centricky umístěnou výztuží. V případě aproximace naměřených hodnot bilineární závislosti je poměr směrnic mezi přímkami v intervalu 1000 až 1200 kg/m³ a 1200 až 2200 kg/m³ více než šestinásobný. Takto velký pokles velikosti napětí v soudržnosti ani jedna z uvedených norem nepředpokládá a v několika případech jsou hodnoty stanovené dle normy dokonce vyšší než hodnoty naměřené. V případě excentricky umístěných výztuží dochází ke znatelnému poklesu³ již u hodnoty objemové hmotnosti 1400 kg/m³. Ani v tomto případě normové hodnoty se změnou velikosti napětí v soudržnosti nepočítají.

Vhodným opatřením pro snížení normových hodnot napětí v soudržnosti v oblasti ultralehkých betonů by bylo započítat do soudržnosti vliv provzdušnění betonu. Jak je známo, provzdušnění betonu má vliv na pokles tlakové pevnosti. Udává se, viz např. [13], že jedno procento vzduchu v čerstvém betonu způsobí pokles tlakové pevnosti betonu o 5%. Ve výpočtu napětí v soudržnosti, která převážně vychází z tlakové pevnosti, je již pokles vlivem provzdušnění nepřímě zahrnut. Jak ukazují provedené experimenty, pouze „nižší“ tlaková pevnost ovšem nevystihuje chování ultralehkých betonů. Pokles mezi napětím v soudržnosti u varianty betonu LC1,2 a LC1,0 dosahuje hodnoty 43%. Pokles mezi změřenou tlakovou pevností je pouze 11%. Úprava výpočtového vzorce se zohledněním poklesu mezního napětí v soudržnosti byla provedena pro výpočet dle fib 72 [18], který vykazoval nejlepší shodu s naměřenými hodnotami. Objem vzduchu v čerstvém betonu u varianty LC1,0 byl 15%. U varianty LC1,2 byl naměřen obsah vzduchu 9% a beton LC1,4 obsahoval 6% vzduchu v čerstvém betonu. U běžného betonu, který byl vyráběn mimo laboratoře FAST VUT, obsah vzduchu stanoven nebyl. Lze ovšem předpokládat, že se bude pohybovat kolem standardní hodnoty 4%. Vzorec mezního napětí v soudržnosti lze modifikovat o vliv obsahu vzduchu:

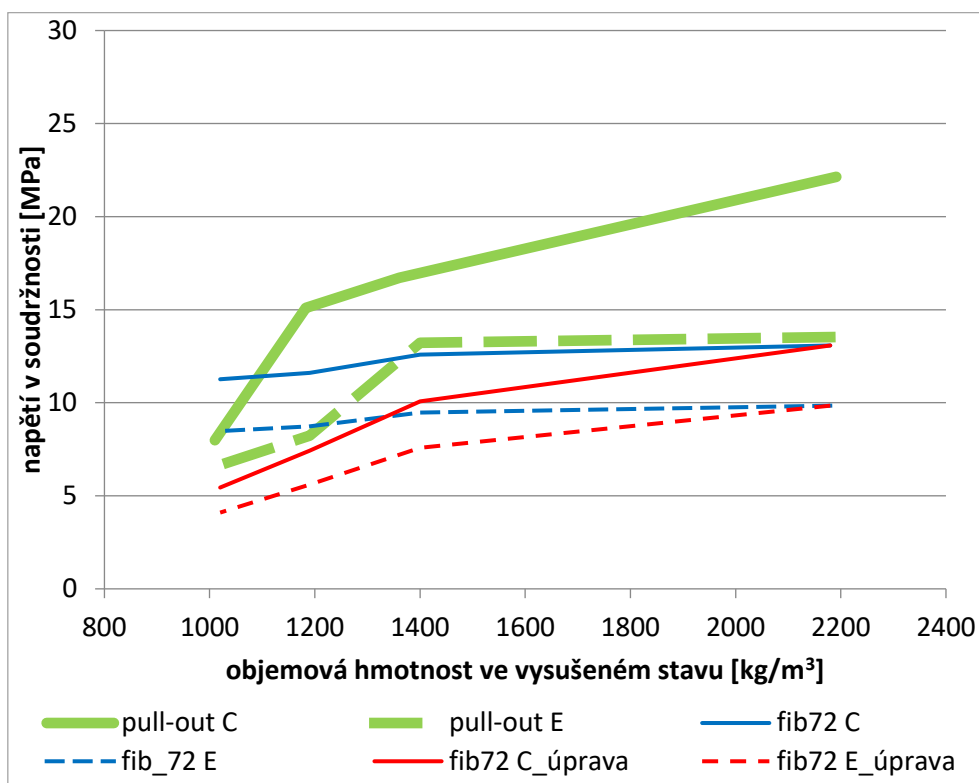
$$f_{stm} = 54 \left(\frac{f_{cm}}{25} \right)^{0,25} \left(\frac{l_b}{\phi} \right)^{0,55} \left(\frac{25}{\phi} \right)^{0,2} \left[\left(\frac{c_{min}}{\phi} \right)^{0,25} \left(\frac{c_{max}}{c_{min}} \right)^{0,1} + k_m K_{tr} \right] \left(\frac{4}{V} \right)^{0,55} \quad (4.1)$$

Úprava vzorce spočívá v přidání redukujícího součinitele závislého na obsahu vzduchu v čerstvém betonu. Obsah vzduchu se stanoví dle [19].

V ... procentuální objem vzduchu v čerstvém betonu, minimálně však 4%. Pro beton s běžným provzdušněním je poslední člen rovnice (4.1) roven jedné. Snížení napětí ve výztuži (v soudržnosti) je zaznamenáno pouze se zvýšením objemu vzduchu v čerstvém betonu. Forma úpravy vztahu je navržena s přihlédnutím k odvození původního vztahu pro výpočet mezního napětí v soudržnosti. Upravený vztah vychází

³ Závěry jsou odvozeny pouze z provedených experimentů. Pro zpřesnění výsledků je nutné provedení většího počtu experimentů, které by zahrnovaly i další třídy objemové hmotnosti lehkých betonů.

pouze jako doporučení možného snížení velikosti napětí v soudržnosti s doposud naměřenými hodnotami. Bylo by vhodné uvedený vztah zpřesnit v závislosti na větším množství provedených experimentů. Upravený vztah spolu s původním výpočtem napětí v soudržnosti a naměřenými hodnotami je zobrazen na Obr. 14.

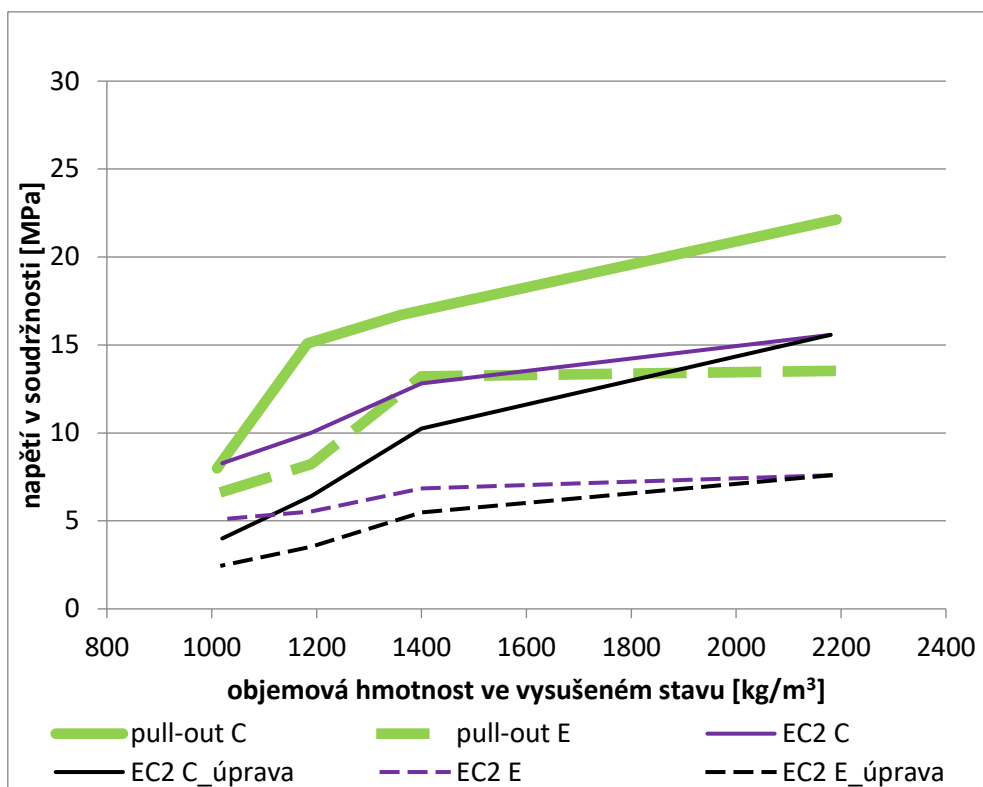


Obr. 14: Upravený vztah pro výpočet napětí v soudržnosti pro fib 72

Nejpoužívanějším předpisem pro návrh betonových konstrukcí v České republice je aktuálně EC2 [2]. I přes nižší shodu mezi naměřenými a teoretickými hodnotami, která může být způsobena nízkým počtem použitých zkušebních vzorků, je vhodné aplikovat zmenšující součinitel též na výpočtový vztah uvedený v [2]. Opět lze docílit snížení napětí v soudržnosti u betonů s vyšším obsahem vzduchových pórů:

$$f_{bd} = 2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctm} \frac{1}{\alpha_2} \frac{1}{\alpha_5} \left(\frac{4}{V} \right)^{0,55} \quad (4.2)$$

V grafu na Obr. 15 je zobrazen upravený a původní vztah pro výpočet napětí v soudržnosti podle EC2 spolu s naměřenými hodnotami z provedeného experimentu. Plná čára zobrazuje hodnoty s centricky umístěnou výztuží a čárkovaná čára odpovídá výztuží excentrické s krytím jednoho profilu. Veškeré uvedené hodnoty jsou uvažovány jako střední.



Obr. 15: Upravený vztah pro výpočet napětí v soudržnosti pro EC 2

5. PRAKTICKÉ APLIKACE ULC

Největší předností, kterou vyvinuté receptury betonů vykazují, je velmi nízká objemová hmotnost při současně relativně dobré pevnostní třídě. U tlačených konstrukčních prvků, kterými jsou například sloupy a stěny, lze s výhodou ultralehké betony použít. Pozitivní vliv nízké objemové hmotnosti se projeví při dimenzování na mezní stav únosnosti. Navržené prvky vycházejí subtilnější než z běžného betonu. Problém nastává u prvků namáhaných ohybem. Nízký modul pružnosti⁴ lehkého betonu způsobí zvětšení průhybu konstrukce. Tento průhyb lze kompenzovat opětovným navýšením účinné výšky průřezu, tedy opětovným zvýšením zatížení od vlastní tíhy. Řešením tohoto „začarovaného kruhu“ je **návrh sendvičové konstrukce**. Tlačená část průřezu je navržena z běžného, alternativně z vysokopevnostního betonu. Tažená část betonového průřezu, která se do mezního stavu únosnosti železobetonových konstrukcí nezapočítává a slouží pro zakotvení výztuže, lze s výhodou navrhnout právě z ultralehkého betonu. **Tento postup se osvědčil zejména při zhotovení filigránových nosníků.** Filigránový nosník byl zhotoven z ultralehkého betonu. Nízká hmotnost nosníku se pozitivně uplatní již při přepravě a zvedání nosníků na stavbě. Po zabudování nosníku do konstrukce dojde k nadbetonování nosné vrstvy z běžného betonu. **Tímto způsobem dochází k úspoře cca 40% zatížení od vlastní tíhy.** Velmi důležitou část sendvičových konstrukcí představuje rozhraní mezi ultralehkým a běžným betonem. Jak doposud experimenty prokázaly, smyková pevnost kontaktní vrstvy dosahuje velmi dobrých hodnot, což je dáno zejména vysokou kvalitou cementového tmelu.



Obr. 16: Vzhled povrchu ULC D1,2eco - Liapor po odformování

⁴ Návrhová norma uvažuje s nižším modulem pružnosti, než který lze reálně při zkouškách odvodit. Ovšem i reálně naměřený modul pružnosti je v porovnání s modulem pružnosti běžného betonu nízký.

6. ZÁVĚR

V rámci diplomové práce a za přispění projektu MPO TIP FR TI 4/159 – „Light structures - progresivní konstrukce z moderních kompozitních materiálů“ a specifických výzkumů FAST-J-13-2140 „Zjištění vývoje pevnosti lehkého betonu v čase“ a FAST-J-14-2421 „Kvantifikování změn mechanických parametrů ULC při samoošetřování“, bylo vyvinuto několik variant ultralehkého betonu. Ultralehké betony bylo možno vyrobit pouze s použitím lehkého kameniva. Splněny a částečně i překročeny byly požadované základní parametry (pevnost v tlaku, objemová hmotnost) podmiňující použitelnost ULC v nosných prvcích stavebních konstrukcí. Při řešení diplomové práce zabývající se ultralehkými betony s použitím výhradně pórovitého (nasákavého) lehkého kameniva byla zjištěná následující specifika, která je nutné respektovat a zohledňovat jak při výrobě, tak při návrhu prvků z těchto betonů:

- pórovité lehké kamenivo je nutné dávkovat do čerstvého betonu již navlhčené, aby nedocházelo k vsakování záměsové vody do kameniva;
- ultralehký beton nelze hutnit stejným způsobem jako běžný beton. Při intenzivní vibraci ultralehkého betonu dochází k vyplavování zrn lehkého kameniva k hornímu povrchu betonového prvku. Při hutnění ULC je tedy nutné snížit frekvenci vibrací;
- při použití kameniva s vnitřní vlhkostí jsou lehké betony více tolerantní k nedostatečnému ošetřování;
- aktuální platná norma [2] pro návrh konstrukcí z lehkých/ultralehkých betonů ve všech naměřených případech značně podhodnocuje modul pružnosti;
- naměřené hodnoty součinitelů dotvarování ULC byly o několik desítek procent nižší, než uvádí norma [2];
- ultralehké betony jsou „křehčí“ než vysokopevnostní betony. Mají poměrně nízkou hodnotou parametru lomové energie a krátkou větev pracovního diagramu;
- ULC vykazuje křehké chování při zkoušce napětí v soudržnosti, jehož maxima je dosaženo již při velmi nízkém posunu výztuže;
- celkově nižší mezní napětí v soudržnosti ve srovnání s běžným betonem je důsledkem provzdušnění ULC a absence „zakliňování“ hutného kameniva;
- žádná z platných norem nezohledňuje nižší velikost napětí v soudržnosti ULC;
- navržená úprava vztahů výpočtu mezního napětí v soudržnosti je uvedena v kapitole 4.6

Ultralehké betony mohou najít jistě značné uplatnění ve stavební praxi. Je ovšem nutné, aby jediným požadovaným kritériem při srovnání běžného betonu a ULC nebyla jeho cena. I přes vyšší počáteční náklady na výrobu ULC přináší nižší hmotnost betonových prvků úspory při přepravě, umísťování betonového prvku do konstrukce, nižší požadavky na základové konstrukce a základovou spáru. Ultralehký beton najde uplatnění ve speciálních designových konstrukcích nebo při kombinaci běžného a ultralehkého betonu.

Výše uvedené údaje o ultralehkých betonech jsou většinou stanoveny jen pro velmi malý zkušební soubor. Pro další výzkumnou činnost doporučuji rozšířit zkušební soubory a převážně se zaměřit na problematiku chování rozhraní lehký-běžný beton, které se ve velké míře uplatňuje při řešení vícevrstevných konstrukcí. Další zpřesnění výsledků je nutné provést u problematiky kotvení výztuže, kde je vhodné provést větší počet měření s různými hmotnostními třídami lehkých betonů. Za důležité považuji také provedení zkoušek soudržnosti s nekovovou výztuží.

LITERATURA

- [1] TRTÍK, Karel.: Technologie betonu. Praha: Česká technika. 2009. ISBN 978-80-01-04408-7.
- [2] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Praha: Český normalizační institut. 2006. 210 s.
- [3] ČSN EN 206: Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda; Praha: Český normalizační institut; 2014
- [4] SENGUL, O., a kol., "Effect of Expanded Perlite on the Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Lightweight Concrete", Journal of Energy and Buildings, Vol. 43, No. 2-3, February/March 2011, pp. 671 – 676
- [5] CHANDRA, S a Leif BERTSSON. Lightweight aggregate concrete: science, technology. and applications. Norwich, N.J.: Noyes Publications, c2003, xx, 430 p. ISBN 0815514867
- [6] Lehké keramické kamenivo. Liapor [online]. Vintířov [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.liapor.cz/cz/lehke-keramicke-kamenivo>
- [7] Lytag® lightweight aggregate [online]. North Yorkshire [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.lytag.com>
- [8] Agloporit, lehké umělé kamenivo určené pro stavebnictví [online]. Brno [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://agloporit.cz/>
- [9] YU, Q. L., P. SPIESZ a H. J. H. BROUWERS. Design of ultra-lightweight concrete: towards monolithic concrete structures. Cement and Concrete Composites. 2015, 2015(61), 18-28. ISSN 0958-9465.
- [10] JACQUEMOT, F., P. FRANCISCO a P. ROUGEAU. New high performance foamed concretes. In: FIB Symposium. Tel Aviv, Israel, 2013, s. 81-85. ISBN 978-965-92039-0-1.
- [11] ČSN EN 12350-5: Zkoušení čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlitím. Praha: Český normalizační institut, 2009
- [12] THIENEL, K., Ch.: Werkstoffe des Bauwesens: Leichtbeton; Universität der Bundeswehr; München; 2008.
- [13] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. 1. vyd. Praha: vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009, 342 s. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7

- [14] BOGAS, J. A., M. G. GOMES a S REAL. Construction and Building Materials: The influence of failure mechanism and concrete composition. *Construction and Building Materials*. 2014, (65), 350-359. DOI: 0950-0618.
- [15] Guohua Xing, Cheng Zhou, Tao Wu, and Boquan Liu, "Experimental Study on Bond Behavior between Plain Reinforcing Bars and Concrete," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2015, Article ID 604280, 9 pages, 2015. doi:10.1155/2015/604280
- [16] ČSN EN 12350-4. Zkoušení čerstvého betonu - Část 4: Stupeň zhutnitelnosti. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [17] ACI 440.3R-12: Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures; 2012
- [18] fib Bulletin 72: Bond and anchorage of embedded reinforcement: Background to the fib Model Code for Concrete Structures 2010; 2014
- [19] ČSN EN 12350-7: Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody. Praha: Český normalizační institut, 2009

VÝBĚR VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOSTI

- [1] ZVOLÁNEK, L.; KRATOCHVÍL, M.; TERZIJSKI, I.; KADLEC, J., Experimental Evaluation of Residual Stresses in the Concrete, příspěvek na konferenci *Advanced Engineering Technology II*, ISSN 1660-9336, ISBN 978-3-03835-680-6, Trans Tech Publication, Switzerland, 2016
- [2] ZVOLÁNEK, L.; TERZIJSKI, I.; KADLEC, J., Vliv dotvarování mladého betonu na velikost vynucených napětí, článek v *Beton TKS*, ISSN 1213-3116, BETON TKS, s.r.o., Praha, 2016
- [3] KADLEC, J.; ZVOLÁNEK, L.; GIRGLE, F.; TERZIJSKI, I., Effect of Lightweight Concrete Density on Bond Strength, příspěvek na konferenci *Proceedings from 21st Czech Concrete Day 2014*, ISSN 1022-6680, ISBN 9780000031327, Trans Tech Publications, Churerstrasse 20, CH-8808 Pfaffikon, Switzerland, 2015
- [4] KADLEC, J.; TERZIJSKI, I.; KRATOCHVÍL, M.; ZVOLÁNEK, L., Vývoj a základní vlastnosti ultralehkého betonu, článek v *TZB-info*, ISSN 1801-4399, Topinfo s.r.o., Praha, 2014
- [5] KADLEC, J.; TERZIJSKI, I., Effect of various ways of curing on ultra-light concrete, příspěvek na konferenci *Young scientist 2014*, ISBN 978-80-553-1668-0, Technical University of Košice, Faculty of Civil Engineering, Košice, 2014

CURRICULUM VITAE

Osobní údaje

Jméno:
Datum narození:
Místo narození:

Ing. Jaroslav Kadlec
27. března 1986
Moravská Třebová

Kontaktní údaje

Kontaktní adresa:
Telefon:
e-mail:

Stamicova 827/11, Brno 623 00
+420 602 828 166
kadlecJIV@gmail.com

Vzdělání

- 2012 - současnost Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
Stavební inženýrství - Doktorský studijní program
Obor: Konstrukce a dopravní stavby
Ocenění: Medaile SIGNUM PROSPERITATIS za přínos fakultě
- 2011 – 2012 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
Stavební inženýrství - Navazující magisterský studijní program
Obor: Pozemní stavitelství
Ocenění: Název *diplomové práce*: Statické zajištění barokního kostela
Uznání děkana fakulty za vynikající studijní výsledky během studia
Uznání děkana fakulty za vzorně vypracovanou diplomovou práci
Cena za 1. místo v soutěži diplomových prací ČKAIT
- 2009 – 2010 Technische Universität Wien, Fakulta stavební
Stavební inženýrství – Studijní pobyt
- 2005 – 2009 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
Stavební inženýrství - Bakalářský studijní program
Obor: Pozemní stavitelství
Ocenění: Název bakalářské práce: Bytový dům v Boskovicích
Uznání děkana fakulty za vynikající studijní výsledky během studia
- 2001 – 2005 Všeobecné gymnázium v Moravské Třebové
Ukončení studia: Maturitní zkouška -prospěl s vyznamenáním

Jazykové znalosti

Němčina	aktivní znalost slovem i písmem
Angličtina	aktivní znalost slovem i písmem

Pracovní zkušenosti

- 2016 - současnost Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
Ústav betonových a zděných konstrukcí - asistent
- 2012 – 2016 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
Ústav betonových a zděných konstrukcí
Pedagogická činnost v rámci DSP
Vědecko-výzkumná činnost na Stavební fakultě VUT v Brně
- 2009 – 2013 JP a SP statika – projektant/statik

ABSTRACT

This doctoral thesis deals with design of three variants of ultra lightweight concrete (ULC) and their mechanical properties. The ULC usually has the dry density of 900-1200 kg/m³ and it is possible to use it for load bearing structures. Low density of ULC is achieved by replacing heavy aggregate for lightweight aggregate. The lightweight aggregate is known under the trade name Liapor in the Czech Republic. To achieve density below 1000 kg/m³, an aeration of the paste has to be done. An exchange of heavy aggregate for lightweight aggregate results in a very fragile behavior of ULC. A great attention is paid to bond strength between concrete and reinforcing steel in the thesis. In addition to the standard test of bond strength testing by pull-out, a modified pull-out test is designed, which includes the effect of minimum reinforcement cover. The mentioned test more precisely simulates a real behaviour of the structure exposed to bending moment. The doctoral thesis tries to point out on different parameters between measured data and the applicable standard for the design of load-bearing structures.