



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

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jaroslav KADLEC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Ivailo TERZIJSKI, CSc.

BRNO 2017

DISERTAČNÍ PRÁCE

© Copyright by Jaroslav Kadlec 2017
All rights reserved

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební
Ústav betonových a zděných konstrukcí

ABSTRAKT

Disertační práce se zabývá návrhem tří variant ultralehkých betonů (ULC) a jejich základními fyzikálně-mechanickými vlastnostmi. Ultralehké betony dosahují objemové hmotnosti ve vysušeném stavu od 900 do 1200 kg/m³ a je možné je použít pro nosné konstrukce. Nízké objemové hmotnosti ULC je dosaženo záměnou veškerého hutného kameniva za pórovité tuzemské kamenivo Liapor. Pro dosažení objemové hmotnosti pod hodnotu 1000 kg/m³ muselo být přistoupeno i k provzdušnění cementového tmelu. Záměna hutného kameniva za pórovité lehké kamenivo má za následek velmi křehké chování ULC. Velká pozornost je v práci věnována také problematice soudržnosti těchto betonů s ocelovou výztuží. Kromě standardní zkoušky soudržnosti pomocí pull-out testů je navržena modifikovaná zkouška pull-out, která zahrnuje vliv minimálního krytí výztuže. Tato zkouška více odpovídá reálnému namáhání ohybovým momentem v ohýbaných konstrukcích. Disertační práce upozorňuje na rozdíly mezi naměřenými údaji a platnou normou pro návrh nosných konstrukcí.

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.

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.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Ing. Jaroslav KADLEC. *Konstrukční vlastnosti ultralehkých betonů a jeho optimální využití v konstrukcích*. Brno, 2017. 146 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce prof. Ing. Ivailo Terzijski, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27. 2. 2017

.....
Ing. Jaroslav Kadlec
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych vyjádřit svou upřímnou vděčnost a poděkování mému školiteli prof. Ing. Ivailu Terzijskému, CSc. za jeho podporu a cenné rady v průběhu celé této práce. Další dík patří Ing. Františku Girglemu, Ph.D. za ochotu a vstřícnost při řešení problematiky vztahující se k tématu disertační práce.

Prezentované výsledky byly získány za podpory 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“; projektu MPO TIP FR TI 4/159 – „Light structures - progresivní konstrukce z moderních kompozitních materiálů“.

OBSAH

Obsah	1
1. Úvod.....	5
2. Účel a cíle práce	7
3. Přehled problematiky a dosavadní stav poznání	9
3.1. Definice lehkého betonu a způsoby vylehčení	9
3.1.1. Hutný lehký beton.....	10
3.1.2. Mezerovitý lehký beton.....	11
3.1.3. Pěnobeton	11
3.1.4. Pórobeton.....	11
3.2. Druhy lehkého kameniva	11
3.2.1. Expandovaný perlit.....	11
3.2.2. Expandovaný jíl	12
3.2.3. Kamenivo na bázi spékaných popílků.....	12
3.2.4. Expandované sklo	12
3.3. Vývoj lehkých betonů v zahraničí	13
3.4. Odlišnosti hutného lehkého betonu s pórovitým kamenivem od běžného betonu	14
3.4.1. Zpracovatelnost čerstvého betonu	14
3.4.2. Doprava a čerpání lehkého betonu	15
3.4.3. Hutnění	16
3.4.4. Ošetřování lehkého betonu	16
3.4.5. Tlakové porušení	16
3.4.6. Nárůst pevnosti v čase	17
3.4.7. Statický modul pružnosti	18
3.4.8. Dotvarování a smršťování	19
3.4.9. Vnitřní ošetřování	19
3.5. Realizované konstrukce z lehkého betonu v ČR	20
3.6. Problematika soudržnosti výztuže s běžným a lehkým betonem.....	23
3.6.1. Stanovení kotevní délky dle ČSN EN 1992-1-1 [2]	24
3.6.2. Stanovení kotevní délky dle fib Model Code 2010 [32]	25
3.7. Potenciál využití lehkého betonu	28
4. Vlastní experimentální činnost	30
4.1. Návrh a výroba čerstvého betonu.....	30
4.1.1. Testované možnosti vylehčení betonu	30
4.1.1.1. Vybraná lehká plniva a způsob zkoušení	30
4.1.1.2. Dosažené výsledky a diskuse.....	31

4.1.1.1.	<i>Postup výroby betonů s lehkým kamenivem</i>	32
4.1.2.	ULC s třídou objemové hmotnosti D1,0 - Liapor	33
4.1.2.1.	<i>Materiálové složení ULC D1,0 - Liapor</i>	33
4.1.2.2.	<i>Vlastnosti čerstvého betonu ULC D1,0 – Liapor</i>	35
4.1.3.	ULC s třídou objemové hmotnosti D1,0 – Liaver.....	36
4.1.3.1.	<i>Materiálové složení ULC D1,0 - Liaver</i>	37
4.1.3.2.	<i>Vlastnosti čerstvého betonu ULC D1,0 – Liaver</i>	39
4.1.4.	ULC s třídou objemové hmotnosti D1,2 - Liapor	39
4.1.4.1.	<i>Materiálové složení ULC D1,2 – Liapor</i>	39
4.1.4.2.	<i>Vlastnosti čerstvého betonu ULC D1,2 – Liapor</i>	40
4.1.5.	ULC s třídou objemové hmotnosti D1,2eco - Liapor	40
4.1.5.1.	<i>Materiálové složení ULC D1,2eco – Liapor</i>	40
4.1.5.2.	<i>Vlastnosti čerstvého betonu ULC D1,2eco – Liapor</i>	41
4.1.6.	Mikrobeton LC – Liapor	41
4.1.6.1.	<i>Materiálové složení mikrobetonu LC – Liapor</i>	42
4.1.6.2.	<i>Vlastnosti čerstvého mikrobetonu LC – Liapor</i>	42
4.1.7.	Mikrobeton LC – Poraver.....	42
4.1.7.1.	<i>Materiálové složení mikrobeton LC – Poraver</i>	43
4.1.7.2.	<i>Vlastnosti čerstvého mikrobetonu LC – Poraver</i>	43
4.1.8.	Shrnutí návrhů a vlastností čerstvého betonu	43
4.2.	Vlastnosti ztvrdlého ultralehkého betonu	44
4.2.1.	Vliv způsobu ošetření vzorků na tlakovou pevnost	47
4.2.2.	Vliv předvlhčení kameniva na tlakovou pevnost ULC - Liapor	51
4.2.3.	ULC D1,0 - Liapor.....	51
4.2.3.1.	<i>Objemová hmotnost ve vysušeném stavu</i>	52
4.2.3.2.	<i>Tlaková pevnost</i>	52
4.2.3.3.	<i>Modul pružnosti</i>	54
4.2.3.4.	<i>Tahová pevnost</i>	54
4.2.3.5.	<i>Hloubka průsaku</i>	55
4.2.3.6.	<i>Odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám</i>	55
4.2.3.7.	<i>Součinitel tepelné vodivosti</i>	56
4.2.3.8.	<i>Lomová energie</i>	57
4.2.3.9.	<i>Dotvarování a smršťování betonu ULC D1,0 – Liapor</i>	57
4.2.3.10.	<i>Dlouhodobá pevnost</i>	59
4.2.4.	ULC D1,0 – Liaver	61
4.2.4.1.	<i>Objemová hmotnost ve vysušeném stavu</i>	62
4.2.4.2.	<i>Tlaková pevnost</i>	62
4.2.5.	ULC D1,2 - Liapor.....	63
4.2.5.1.	<i>Objemová hmotnost ve vysušeném stavu</i>	63
4.2.5.2.	<i>Tlaková pevnost</i>	63
4.2.5.3.	<i>Modul pružnosti</i>	65

4.2.5.4.	<i>Tahová pevnost</i>	65
4.2.5.5.	<i>Lomová energie</i>	66
4.2.6.	<i>ULC D1,2eco – Liapor</i>	67
4.2.6.1.	<i>Objemová hmotnost ve vysušeném stavu</i>	67
4.2.6.2.	<i>Tlaková pevnost</i>	67
4.2.6.3.	<i>Modul pružnosti</i>	70
4.2.6.4.	<i>Tahová pevnost</i>	70
4.2.6.5.	<i>Hloubka průsaku</i>	71
4.2.6.6.	<i>Odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám</i>	71
4.2.6.7.	<i>Lomová energie</i>	72
4.2.6.8.	<i>Dotvarování a smršťování</i>	73
4.2.6.9.	<i>Dlouhodobá pevnost a modul pružnosti</i>	75
4.2.6.10.	<i>Pracovní diagram lehkého betonu</i>	78
4.3.	Soudržnost ULC s výztuží	80
4.3.1.	<i>Soudržnost centricky umístěné výztuže B500B</i>	80
4.3.2.	<i>Modifikace pull-out testů o vliv krytí</i>	85
4.3.2.1.	<i>Navržený postup pull-out testů s vlivem krytí výztuže</i>	85
4.3.3.	<i>Komplexní test pro stanovení napětí v soudržnosti</i>	86
4.3.3.1.	<i>Výroba betonu a zkušebních těles</i>	87
4.3.3.2.	<i>Ošetřování zkušebních vzorků</i>	88
4.3.3.3.	<i>Zkoušení soudržnosti výztuže s betonem</i>	88
4.3.3.4.	<i>Naměřené hodnoty</i>	88
4.3.3.5.	<i>Porovnání naměřených údajů s normovými podklady</i>	96
4.3.3.6.	<i>Výpočet dle EC2 [2]</i>	97
4.3.3.7.	<i>Výpočet dle MC 2010 [32]</i>	98
4.3.3.8.	<i>Výpočet dle fib 72 [33]</i>	99
4.3.3.9.	<i>Srovnání teoretických a naměřených hodnot</i>	100
4.3.3.10.	<i>Diskuze výsledků a navrhované úpravy vztahů</i>	102
4.3.4.	<i>Využití akustické emise při měření napětí v soudržnosti</i>	105
5.	Praktické aplikace ULC	109
5.1.	<i>Lehký příčný segment pro konstrukci ekoduktů</i>	109
5.2.	<i>Klenba ze segmentů z ultralehkého betonu</i>	112
5.3.	<i>Vrstvený nosník</i>	115
5.4.	<i>Smyková odolnost spáry</i>	118
5.5.	<i>Filigránový nosník</i>	120
5.6.	<i>Balkonový prvek</i>	123
5.7.	<i>Vylehčené designové tvarovky LiCrete®</i>	125
6.	Diskuze dosažených výsledků	128
	<i>ULC D1,0</i> 129	
	<i>ULC D1,2 - Liapor</i>	130

<i>ULC D1,2eco - Liapor</i>	130
<i>Soudržnost</i>	131
<i>Shoda s normovými podklady</i>	132
<i>Praktické uplatnění ultralehkých betonů</i>	132
7. Závěr	133
8. Literatura	135
9. Seznam obrázků	140
10. Seznam tabulek	143
11. Označení veličin	144

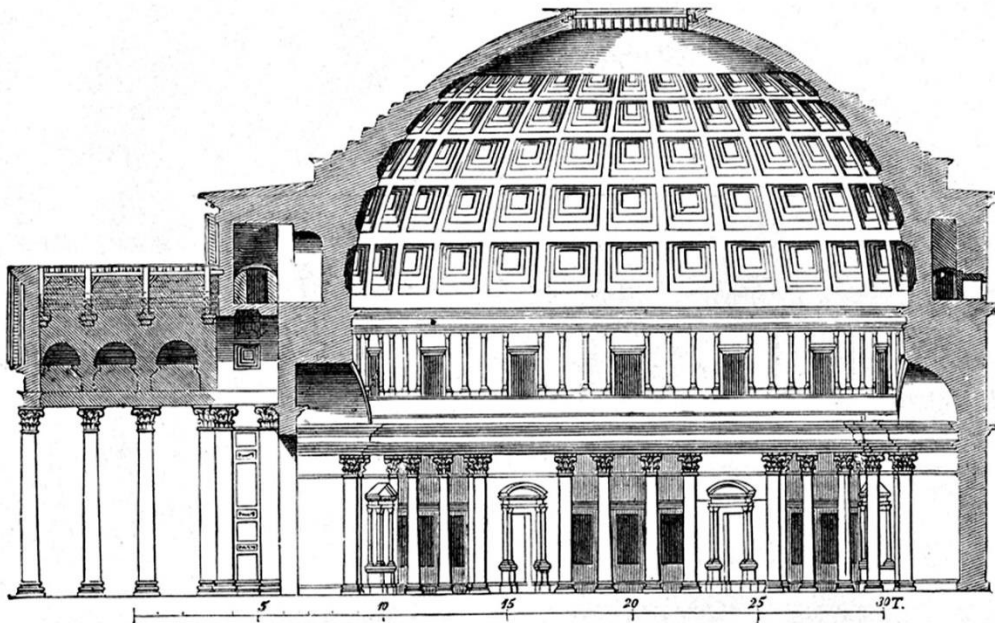
1. ÚVOD

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. Některé nevýhodné vlastnosti betonu je možné jednoduše omezit či kompenzovat, s jinými se musí počítat již při návrhu konstrukce. Příkladem může být nízká tahová pevnost betonu. Ta je v betonových konstrukcích eliminována pomocí vložené předpínací či betonářské výztuže, hovoříme pak o konstrukcích železobetonových. V posledních letech se stále více objevuje i aplikace nekovových výztuží či lamel.

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. Je zcela zjevné, že je žádoucí tuto část zatížení (v anglosaské literatuře označované výstižně jako „dead load“) minimalizovat. Snížení vlastní váhy konstrukcí lze obecně dosáhnout několika způsoby, koncepčně rozdílnými. Základem by pochopitelně mělo být vhodné konstrukční řešení. Z hlediska řešení materiálového je to především použití vysokohodnotného betonu (HPC). Zmíněné vysoké hodnoty lze přitom dosáhnout i zcela rozdílnými přístupy. Například použití vysoko-pevnostního betonu umožní navrhovat subtilnější konstrukce s nižším relativním podílem vlastní (mrtvé) hmotnosti. Koncepčně odlišným přístupem je snižování objemové hmotnosti vlastního konstrukčního betonu. I v tomto případě lze použít několik rozdílných způsobů vylehčení, která budou dále rozebrána.

Idea redukce objemové hmotnosti betonu není vůbec nová. První zmínka a následně přímo revoluční použití lehkého betonu je datováno téměř před 2000 lety při stavbě Pantheonu v Římě. Zde byla z lehkého betonu postavena kopule s průměrem i výškou 43,4 m. V konstrukci kopule není použita žádná výztuž a pouze efektivní redukce vlastní tíhy umožnila postavení takto obrovské stavby. Vylehčení je provedeno hned několika způsoby. Konstrukce kopule je vylehčena kazetovými prvky a tloušťka kopule je po výšce proměnná. Směrem vzhůru se tloušťka postupně zmenšuje z 6,4 m na 1,2 m, viz Obr. 1. Další vylehčení je provedeno v samotné struktuře betonu. Směrem od paty kopule k vrcholu dochází ke změně poměru zastoupení písku, tufu a pemzy. Tímto způsobem je docíleno proměnné objemové hmotnosti od 1750 kg/m³ v patě kopule až po 1350 kg/m³ ve vrcholu.



Obr. 1: Řez konstrukcí Pantheonu

Znalost používání hydraulických pojiv dočasně zmizela se zánikem římské říše kolem 5. století a byla znovuobjevena až ve 2. polovině 18. století. Redukce objemové hmotnosti betonu získala opět na významu až počátkem 20. století, kdy došlo ve Spojených státech amerických k první umělé výrobě lehkého kameniva na bázi expandovaného jílu.

I v současné době tvoří lehké kamenivo na bázi expandovaného jílu nejčastější způsob, jak efektivně dosáhnout nízké objemové hmotnosti betonu. Velmi často je u konstrukčních betonů nahrazena lehkým kamenivem pouze část hutného kameniva. Takto vytvořené betony mají vlastnosti blízké běžným hutným betonům, ovšem úspora ve vlastní tíze betonu není výrazná. Naproti tomu betony s velmi nízkou objemovou hmotností se kvůli nízkým pevnostem převážně využívají pouze jako výplňové a izolační materiály.

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 betonem¹. 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. V rámci vývoje a výzkumu lehkých betonů byl na Fakultě stavební Vysokého učení technického v Brně řešen projekt MPO TIP FR TI 4/159 – „Light structures - progresivní konstrukce z moderních kompozitních materiálů“, který se touto tematikou podrobně zabýval. V následujícím textu je popsán počátek prací od vývoje ultralehkého betonu až po jeho fyzikálně mechanické parametry a aplikaci v konstrukcích.

¹ Pod pojmem běžný beton se v této práci rozumí obyčejný beton dle ČSN EN 206

2. ÚČEL A CÍLE PRÁCE

Disertační práce se, jak již bylo uvedeno, specializuje na ultralehké hutné betony (ULC), které je možné používat pro konstrukční účely. U těchto betonů obvykle dochází k nahrazení veškerého hutného kameniva za kamenivo lehké. Betony, které obsahují pouze lehké kamenivo, mají oproti běžným betonům mnoho odlišností. 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.

Původně měla pro hutný lehký beton vzniknout samostatná norma pro navrhování. Od tohoto záměru se upustilo a problematika navrhování lehkého betonu je zahrnuta v normě ČSN EN 1992-1-1 [2] (jako kapitola č. 11). 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 disertační práce:

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

Zpracování jednotlivých témat disertační práce lze rozdělit na dvě části, teoretickou a experimentální.

Teoretická část zahrnuje:

- rešerši české i světové literatury a odborných publikací, zabývajících se lehkými a ultralehkými betony, a z rešerše vyplynuvší:
- přehled možných typů lehkých betonů a způsobů jejich vylehčení;
- popis hlavních rozdílů mezi lehkým a běžným hutným betonem;
- rozbor vhodných metodik zkoušení konstrukčních vlastností ULC, zejména problematika soudržnosti výztuže s LC (lehkým betonem) a ULC.

Experimentální činnost sestává z:

- nalezení vhodného způsobu vylehčení;
- návrh ultralehkých betonů v třídě objemové hmotnosti D1,0 a D1,2;
- optimalizace složení ultralehkých betonů;

- návrh mikrobetonu pro designové tvarovky LiCrete;
- provedení zkoušek na čerstvém a ztvrdlém betonu;
- modifikace zkoušky soudržnosti s ohledem na reálné namáhání v konstrukcích;
- úprava stávajících vztahů pro výpočet napětí v soudržnosti;
- příprava pilotní betonáže ultralehkého betonu v závodě Prefa Brno, a.s.

3. PŘEHLED PROBLEMATIKY A DOSAVADNÍ STAV POZNÁNÍ

Problematika všech možných způsobů vylehčení betonů je značně rozsáhlá, proto je v disertační práci uveden základní přehled jednotlivých způsobů vylehčení. Podrobně se práce věnuje především lehkým hutným betonům. Nejprve je stručně definován pojem „lehký beton“ podle platné normy a jsou zmíněny nejčastější druhy lehkých betonů, u nichž jsou stručně popsány klady a zápory a jejich nejčastější použití.

Od počátku 20. let 20. století, kdy došlo k první umělé výrobě lehkého kameniva na bázi expandovaného jílu, probíhají neustále výzkumy a pokusy o dosažení co nejlepších vlastností lehkých betonů. V posledních letech se vývoj rozděluje na dva hlavní směry. První směr si klade za cíl dosažení vynikajících mechanických vlastností lehkých betonů (zejména relativně vysoké pevnosti). Cílem druhého směru je vyvinutí konstrukčního lehkého betonu s výbornými tepelně izolačními vlastnostmi. Rozbor výsledků intenzivního výzkumu z uplynulého století je velmi obsáhlý, disertační práce proto uvádí nejčastěji používaná lehká kameniva, nejdůležitější dosažené fyzikálně mechanické vlastnosti a dále některé realizace hlavních tuzemských staveb z LC. Samostatná kapitola je věnována srovnání lehkého a běžného hutného betonu. Závěrem je popsána problematika soudržnosti výztuže s běžným a lehkým hutným betonem.

3.1. Definice lehkého betonu a způsoby vylehčení

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. Podle objemové hmotnosti ve vysušeném stavu se lehký beton dělí do 6 tříd, viz Tab.1. Pevnostní třídy lehkého betonu s pórovitým kamenivem udává Tab. 2, kde f_{lck} značí charakteristickou válcovou pevnost lehkého betonu v tlaku ve stáří 28 dní, $f_{lck,cube}$ charakteristickou krychelnou pevnost lehkého betonu v tlaku a f_{lcm} průměrnou válcovou pevnost lehkého betonu v tlaku. (V normě [3] je uvedena ještě pevnostní třída 8/9, která v návrhové normě [2] již není uvedena.)

Jiné dělení udává americká směrnice ACI [4], které uvádí i např. Collepardi v publikaci [5]. ACI dělí lehký beton do třech tříd podle objemové hmotnosti a tlakové pevnosti (obojí měřené po 28 dnech):

- **tepelně izolační lehké betony.** Betony s tlakovou pevností 0,5 až 7 MPa, které mají objemovou hmotnost ve vysušeném stavu v rozmezí 300 až 800 kg/m³;
- **lehké betony střední pevnosti.** Do této třídy patří betony, které dosahují objemové hmotnosti ve vysušeném stavu 800 až 1400 kg/m³ a krychelné pevnosti 7 až 18 MPa;
- **konstrukční lehké betony.** Betony s objemovou hmotností ve vysušeném stavu 1400 až 2000 kg/m³, které vykazují tlakovou pevnost 18 až 70 MPa.

Tab. 1: Klasifikace lehkého betonu podle objemové hmotnosti [3]

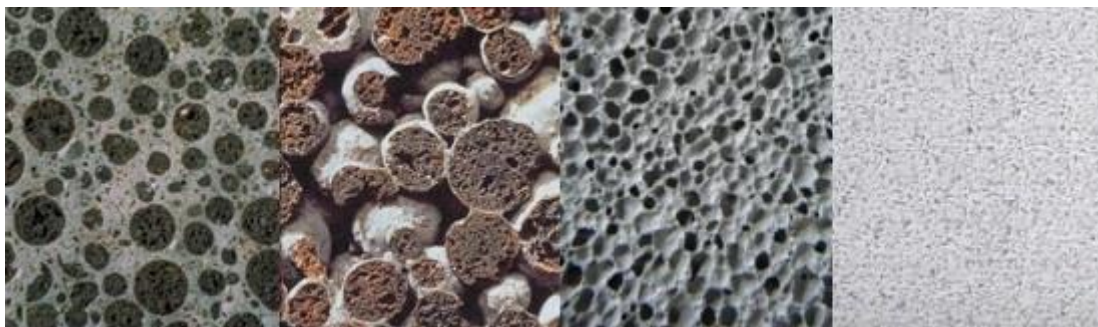
třída objemové hmotnosti	D1,0	D1,2	D1,4	D1,6	D1,8	D2,0
rozsah objemové hmotnosti kg/m ³	≥ 800 a ≤ 1 000	> 1 000 a ≤ 1 200	> 1 200 a ≤ 1 400	> 1 400 a ≤ 1 600	> 1 600 a ≤ 1 800	> 1 800 a ≤ 2 000

Tab. 2: Pevnostní charakteristiky betonu s pórovitým kamenivem [2]

Pevnostní třídy betonu s pórovitým kamenivem													
f_{1ck}(MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80
f_{1ck,cube}(MPa)	13	18	22	28	33	38	44	50	55	60	66	77	88
f_{1cm}(MPa)	17	22	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88

Dle způsobu vylehčení se lehký beton dělí na:

- hutný lehký beton,
- mezerovitý lehký beton,
- pěnobeton,
- pórobeton (plynobetony).



Obr. 2: Druhy lehkých betonů (zleva: hutný lehký beton, mezerovitý lehký beton, pěnobeton a pórobeton)

3.1.1. Hutný lehký beton

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. Nahradit lze veškeré hutné kamenivo, nebo jen určitou část. Jako lehké kamenivo lze použít například vermikulit, perlit, expandovaný jíla, pemzu, expandované sklo atd. Hutný lehký beton je v České republice převážně vyráběn z kameniva na bázi expandovaného jílu, které se na našem trhu vyskytuje pod obchodním názvem Liapor (dříve označovaný jako Keramzit). Betony s pórovitým lehkým kamenivem se nejčastěji uplatňují v konstrukčních betonech. Návrh konstrukcí se provádí dle normy [2], kde se většina fyzikálních mechanických parametrů upravuje součinitelem η , který udává „míru“ vylehčení. Snižující součinitel η závisí na objemové hmotnosti ve vysušeném stavu a dosahuje hodnot od 0,62 pro lehké betony o objemové hmotnosti ve vysušeném stavu 800 kg/m³ do 1,0 pro betony o objemové hmotnosti ve vysušeném stavu 2200 kg/m³.

3.1.2. Mezerovitý lehký beton

Pro návrh mezerovitého lehkého betonu je též nejčastěji použito lehké kamenivo na bázi expandovaného jílu. Nízké objemové hmotnosti je dosaženo záměrně upravenou křivkou zrnitosti, kdy jsou některé frakce značně redukovány nebo přímo vynechány. Vzniká tzv. jednofrakční beton, ve kterém jsou značné vzduchové mezery mezi jednotlivými zrny kameniva. Objem cementového tmelu je redukován pouze na obalení jednotlivých zrn kameniva a nestačí již na vyplnění mezer mezi kamenivem. Nejčastější využití lehkého mezerovitého betonu je ve výplňových konstrukcích. Je možné jej použít i pro konstrukční účely, je však nutné zajistit dodatečnou ochranu výztuže proti korozi. Pro konstrukce navrhované z mezerovitého lehkého betonu platí samostatná norma [6].

3.1.3. Pěnobeton

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. Pěnu je možné vytvořit buď přímo v čerstvém betonu nebo externě a následně ji do čerstvého betonu vmíchat. Podle účelu použití lze k napěněnému cementovému tmelu přimíchat písek nebo granulovaný polystyrén. Pěnobeton je nejčastěji používaný jako izolační a výplňový materiál. Značné uplatnění pěnobetonu lze nalézt i ve vyrovnávacích vrstvách podlah [7]. Pro tento účel se nejčastěji používají pěnobetony s objemovou hmotností od 330 do 350 kg/m³. Pěnobeton je možné vyrábět přímo na staveništi smícháním technické pěny, vody, přísad a příměsí. Při použití automatického dávkování složek lze dodržet stejnou kvalitu materiálu.

3.1.4. Pórobeton

V pórobetonu zaujímají póry až 80% z celkového objemu materiálu. Napěnění je dosaženo přidáním plynatvorné látky, kterou je v ČR nejčastěji hliníkový prášek. Tato látka po přimísení do betonové směsi reaguje s alkalickým prostředím a za uvolnění vodíku způsobí tzv. „nakynutí“ směsi. V další fázi je materiál umístěn do autoklávu, kde za zvýšené teploty a tlaku dojde k finálnímu vytvrzení směsi. Kvůli procesu autoklárování není pórobeton předurčen do monolitických konstrukcí. Užívá se především pro výrobu tvárníc. Největším výrobcem pórobetonového zdiva u nás je společnost Xella CZ s výrobkem Ytong.

3.2. Druhy lehkého kameniva

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

3.2.1. Expandovaný perlit

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 [8]. Díky své nízké objemové hmotnosti

v rozmezí 30 až 240 kg/m³ [9] a příznivé ceně je ve stavebnictví často využíván jako izolační materiál. Experimenty provedené v [8] ukazují, že se prozatím nepodařilo z expandovaného perlitu vyrobit izolační betony, které by bylo možné považovat za konstrukční. 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 nejnížší definovaná pevnostní třída LC12/13.

3.2.2. Expandovaný jíl

Expandovaný jíl patří mezi nejčastěji používaná lehká kameniva pro výrobu lehkých betonů. Proces výroby lehkých kameniv z expandovaných jílu a břidlic se liší podle vstupního materiálu. Používá se plastický nebo suchý postup. Vypalování a expandování probíhá v obou případech v rotačních pecích při teplotě 1100 až 1200 °C. Pro výrobu lehkého kameniva se nejčastěji používají druhohorní jíly z období Lias stáří až 200 milionů let. Odtud je také odvozen název tuzemského zpracovatele – Lias Vintřův. Výrobním postupem lze ovlivnit, zda se vyrábí pouze úzká frakce kameniva (např. 4-8 mm s požadovanou sypanou hmotností) nebo široká frakce 0-16 mm, která je následně vytříděna na jednotlivé užší frakce [10]. Výhodou expandovaného jílu je především 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 [9], [10]. Toto kamenivo je ve světě známé pod názvy Leca a Liapor.

3.2.3. Kamenivo na bázi spékaných popílků

Alternativní lehké kamenivo je vyrobeno z popílků vznikajících jako odpad z energetického průmyslu při spalování uhlí. Neefektivněji se jeví výroba kameniva krátkodobým samovýpalem na aglomeračních roštech. Objemová hmotnost kameniva se pohybuje v rozmezí 400 až 1350 kg/m³ [11]. Kamenivo se řadí z environmentálního hlediska k velice výhodným, neboť využívá odpadní látky a jeho výroba není tak energeticky nákladná jako například u lehkého kameniva z expandovaného jílu. Vyrábí se v zrnitostech do 16 mm. Výhodou je rychlá nasákavost (neovlivňuje později konzistenci čerstvého betonu) a vysoká pevnost. Kamenivo je ve světě známo pod obchodním názvem Lytag [12]. V České republice se pro kamenivo na bázi spékaných popílků používá obchodní název Agloporit [13], není však běžně produkováno.

3.2.4. Expandované sklo

Vývoj expandovaného skla započal v roce 1983. Kamenivo se vyrábí z odpadního skla. Skleněné střepy jsou jemně rozemlety a smíchány s dalšími látkami. Ze vzniklé směsi jsou vyrobeny zrníčka, která jsou následně vypalována v rotačních pecích. Vzniká tak kamenivo s velkou pórovitostí, ale s kompaktní a pevnou povrchovou vrstvou. Kamenivo z expandovaného skla má bílou barvu, kulovitý tvar a vyrábí se v zrnitostech od 0,04 mm po

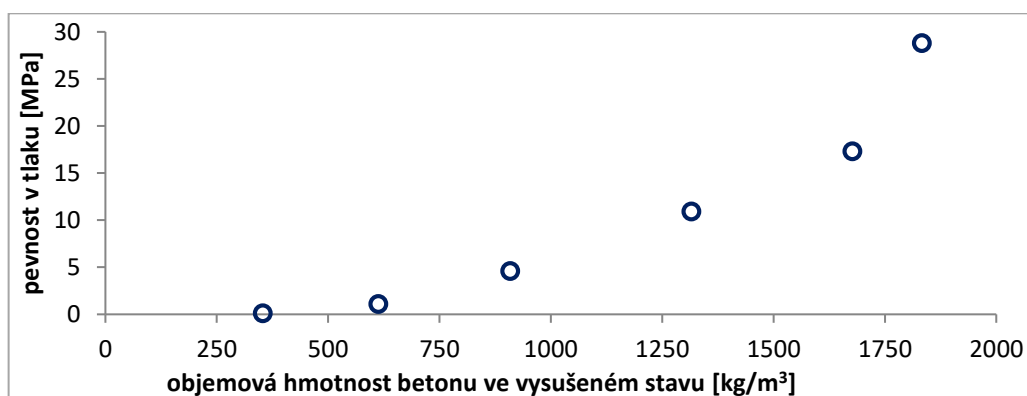
8 mm s objemovou hmotností 300 až 950 kg/m³ [14], [15]. Kamenivo na bázi expandovaného skla se prodává pod obchodními názvy Poraver a Liaver.

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 bylo při výzkumech v zahraničí dosaženo objemové hmotnosti lehkého betonu ve vysušeném stavu 650 – 700 kg/m³ [16]. Tlaková pevnost měřená na krychlích 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. [8]. 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. Tlaková pevnost² se zjišťovala na krychlích o délce strany 70 mm. Velikosti krychelných pevností v závislosti na objemových hmotnostech jsou zobrazeny na Obr. 3. Sledovaným parametrem byl současně i součinitel tepelné vodivosti betonu. U betonu zcela bez expandovaného perlitu dosahoval hodnoty 0,6 W/(m·K) a v případě lehkého betonu s kamenivem tvořeným výhradně expandovaným perlitem byl naměřen součinitel tepelné vodivosti 0,13 W/(m·K). Pro dosažení potřebného vylehčení a lepších tepelněizolačních parametrů byla u všech variant použita i provzdušňovací přísada.



Obr. 3: Závislost tlakové pevnosti na objemové hmotnosti betonu s expandovaným perlitem [8]

² Tlaková pevnost se standardně měří na tělesech tvaru krychle s délkou strany 150 mm. Stanovením pevnosti na krychlích o délce strany 70 mm dochází k zvýšení tlakové pevnosti, než která by byla dosažena pro standardní zkušební těleso. Tyto hodnoty nelze pak přímo porovnávat s ostatními experimenty. Ovšem pro ověření sestupného trendu tlakové pevnosti se zvyšujícím se množstvím expandovaného perlitu jsou použita zkušební tělesa dostačující.

Ve studii [17] 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.

3.4.1. 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. Opětovně lze zpracovatelnost zvýšit přidáním vody nebo plastifikační přísady, případně kombinací obou výše uvedených způsobů. Tyto úpravy však vedou ke zvýšení vodního součinitele, a tedy k poklesu pevnosti výsledného betonu, případně k neekonomickému návrhu betonu. Výhodnějším řešením, jak předcházet vsakování vody do kameniva při výrobě betonu, je použití již vlhkého kameniva. Kamenivo lze navlhčit i v míchacím zařízení tzv. „dodatkovou vodou“ dávkovanou s předstihem ještě před přidáním cementu a dalších přísad. V případě nenasákavého lehkého kameniva výše uvedený problém nenastává. Příkladem takového kameniva je expandované sklo známé například pod obchodními názvy Liaver nebo Poraver [14], [15].

Pro posouzení míry zpracovatelnosti čerstvého betonu je nevhodnější metoda „Stupně zhutnitelnosti“ [18]. Primárně je zkouška stupně zhutnitelnosti určena pro betony s kamenivem frakce větší než 63 mm. Princip zkoušky spočívá v naplnění nádoby o rozměrech 200×200×400 mm čerstvým betonem bez zhutňování. Přebytkový beton se odstraní. Čerstvý beton se následně zhutňuje pomocí vibračního stolu nebo ponorného vibrátoru do doby, kdy již není patrné další zmenšování objemu. Po zhutnění se stanoví průměrná vzdálenost s mezi horní hranou formy a povrchem zhutněného betonu. Stupeň zhutnitelnosti je označován písmenem C (Compaction test) a rozlišují se 4 třídy: C0 – směs velmi tuhá, C1 – směs tuhá, C2 – směs plastická a C3 – směs měkká. Určení stupně zhutnitelnosti se provede dle vzorce:

$$c = h/(h - s) \quad (3.1)$$

kde h je výška nádoby.

Tab. 3: Klasifikace stupňů zhutnitelnosti [18]

Označení	Stupeň zhutnitelnosti c
C0	≥ 1,46
C1	1,45 až 1,26
C2	1,25 až 1,11
C3	1,10 až 1,04

Stupeň zhutnitelnosti je vhodný zvláště proto, že výsledky nejsou závislé na objemové hmotnosti použitého kameniva.

Druhým způsobem zkoušení zpracovatelnosti čerstvého betonu je zkouška rozlitím [19]. Princip zkoušky spočívá v naplnění formy tvaru komolého kužele čerstvým betonem, která je umístěna na střešacím stolku. Po odstranění formy se pomocí patnácti zdvihů horní desky dosáhne rozlití betonu. Stupeň rozlití se stanoví jako průměrná velikost rozlití betonu ve dvou navzájem kolmých směrech. Výsledná hodnota se zaokrouhlí na 10 mm a stanoví se stupeň rozlití dle Tab. 4.

Tab. 4: Klasifikace stupně rozlití [19]

Označení	Průměr rozlití [mm]
F1	≤ 340
F2	350 – 410
F3	420 – 480
F4	490 – 550
F5	560 – 620
F6	≥ 630

Při testu rozlitím působí na lehký beton nižší tíhové síly úměrně jeho objemové hmotnosti. Tím jsou vykazovány nižší hodnoty stupně rozlití lehkého betonu v porovnání s běžným betonem srovnatelné konzistence.

3.4.2. 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 nasákové 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. Aby byl působící tlak na beton v potrubí co nejnižší, musí být beton co nejvíce tekutý. Toho lze docílit zvýšením podílu jemných částic v betonu. Dle doporučení firmy Lias Vintířov je vhodné, aby objemový podíl malty ze zrn do 0,125 mm byl 375 až 475 dm³/m³, objemový podíl maltových složek do 2 mm byl 525 až 625 dm³/m³ a objemový podíl maltových složek do 4 mm v rozmezí 600 až 700 dm³/m³ [20]. Při ukládání lehkého betonu do konstrukcí pomocí košů na beton ke změně konzistence nedochází.

3.4.3. Hutnění

Nižší objemová hmotnost lehkého betonu má za následek změnu kinetické energie potřebné při hutnění čerstvého betonu. Frekvenci příložného vibrátoru je u lehkého betonu vhodné snížit se současným zvýšením amplitudy [21]. Při vibrování betonu pomocí ponorného vibrátoru by měly být mezi místy vpichů výrazně menší vzdálenosti než při hutnění běžného betonu. Účinný rádius ponorného vibrátoru je závislý na objemové hmotnosti betonu. Při poloviční objemové hmotnosti lehkého betonu oproti běžnému betonu je účinný rádius ponorného vibrátoru zhruba poloviční. Vibrování se musí provádět jen po nezbytně nutnou dobu, jinak hrozí vyplavování lehkého kameniva k hornímu povrchu prvku z LC.

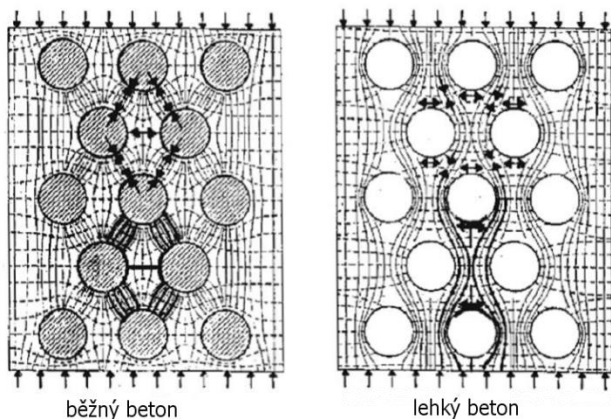
3.4.4. Ošetřování lehkého betonu

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. Pro snížení teplotního gradientu je možné povrch betonu odbednit později nebo povrch betonu chránit, například tepelnou izolací.

3.4.5. Tlakové porušení

Pevnost běžného betonu je primárně daná pevnostní třídou použitého cementu a velikostí vodního součinitele. Cementový tmel je z hlediska pevnosti „nejslabším článkem“ běžného betonu, což lze určit z lomové plochy. Pokud by tímto nejslabším článkem betonu bylo kamenivo, procházela by lomová plocha při porušení tlakem skrz zrna kameniva. Při tlakovém namáhání běžného betonu se však zatížení přenáší přes jednotlivá zrna kameniva. V místě vnášení zatížení působí třecí síly, které redukuje horizontální tahové síly vznikající mezi kamenivem. Se vzrůstající vzdáleností od vnášení zatížení se tyto třecí síly zmenšují a převládají tahové síly, které jsou rozhodující pro celkovou pevnost materiálu. Vzniklé tahové síly pak přenáší cementový tmel.

U lehkého betonu je naopak nejslabším článkem porézní 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. 4 [21]. Lomová plocha prochází při porušení materiálu skrz jednotlivá zrna lehkého kameniva, jak zobrazuje Obr. 5. Lehké betony s vysokým obsahem cementového tmelu mají značně křehké chování. Na Obr. 6. je znázorněn vztah mezi napětím a přetvořením pro kamenivo, cementový tmel a běžný beton [5]. 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

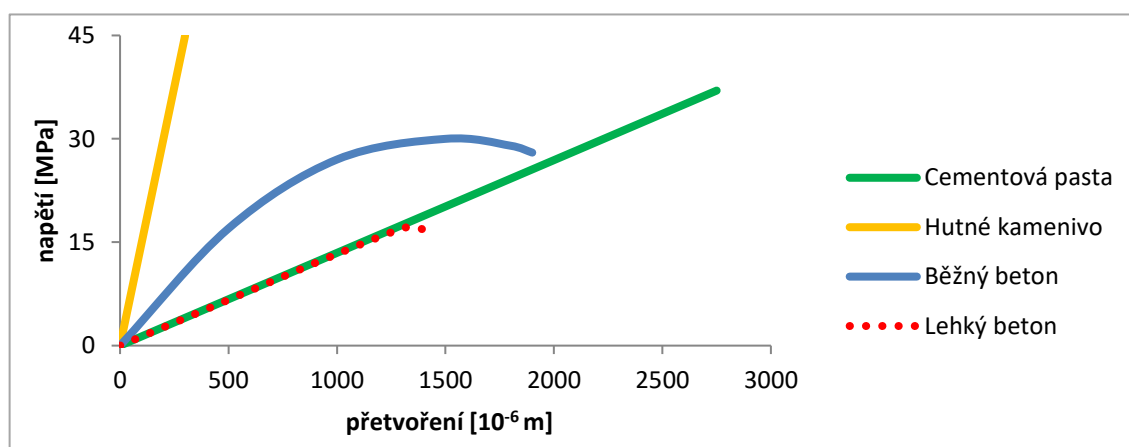


Obr. 4: Tlakové porušení běžného a lehkého betonu [21]



Obr. 5: Lomová plocha ULC

matrici kompozitu předurčuje celkovou pevnost a přetvoření lehkého betonu. Naměřené výsledky pracovních diagramů jsou uvedeny v kapitole 4.2.6.10.



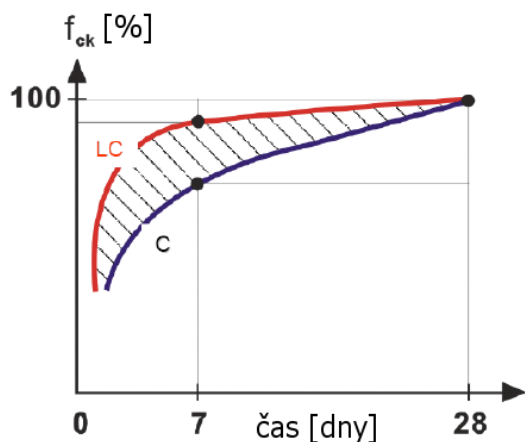
Obr. 6: Pracovní diagramy běžného a lehkého betonu a jednotlivých komponent

3.4.6. Nárůst pevnosti v čase

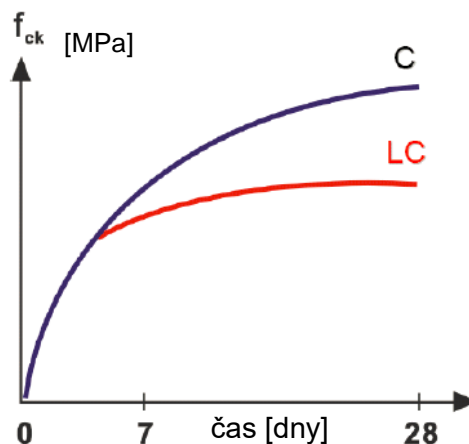
Sledujeme-li graf vývoje tlakové pevnosti běžného a lehkého betonu v čase, viz Obr. 7, zaznamenáme u lehkého betonu razantnější nárůst počáteční pevnosti [21]. Sedmidenní pevnost dosahuje cca 75% hodnoty 28-denní pevnosti. U ultralehkých betonů to může být až 80% výsledné pevnosti betonu, někdy i více. Vysvětlení spočívá zejména v tepelně-izolačních vlastnostech lehkého betonu. Součinitel tepelné vodivosti lehkých betonů může dosahovat hodnoty cca 0,2 W/(m·K). Hodnota součinitele tepelné vodivosti pro běžné betony se pohybuje okolo 1,3 W/(m·K). Nižší hodnota součinitele tepelné vodivosti způsobuje akumulaci tepla vzniklého při hydratačním procesu ve zkušební vzorku. Teplo beton prohřívá a tím způsobuje nárůst pevnosti. Dochází v podstatě k urychlování tuhnutí betonu ohřevem. Svůj podíl má obvykle i vyšší objem cementového tmelu. Vysoká počáteční pevnost lehkých betonů dovoluje dřívější odbednění konstrukce a zřetelně zvyšuje rychlost výstavby.

Také vývoj tlakové pevnosti v čase větším než 28 dní je u lehkého betonu odlišný, viz Obr. 8. Po cca 28 dnech dosáhne pevnost lehkého betonu v tlaku 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. Ten může dosahovat až 40% 28-denní tlakové pevnosti.



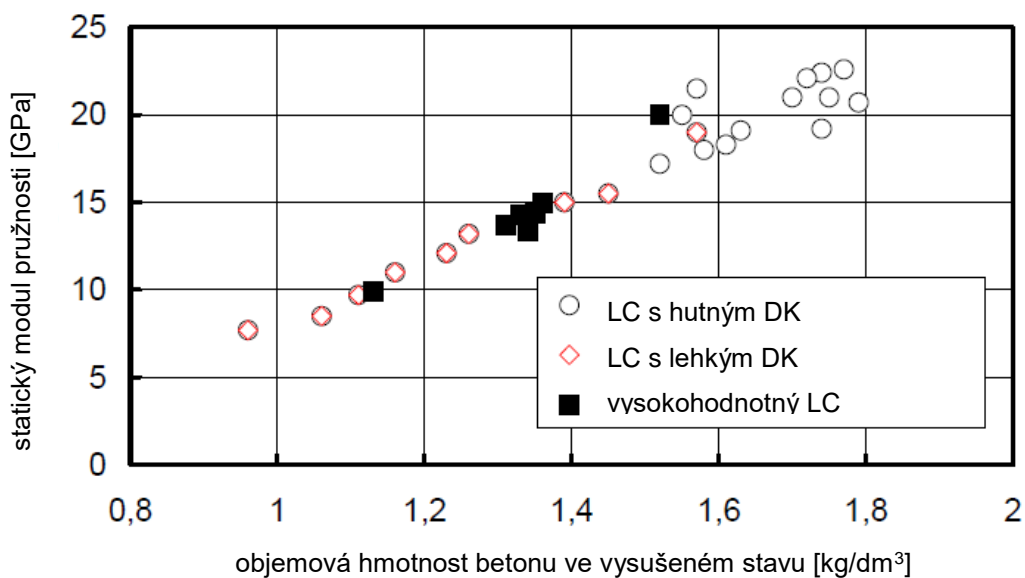
Obr. 7: Nárůst tlakové pevnosti v čase [21]



Obr. 8: Závislost tlakové pevnosti na čase [21]

3.4.7. 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. Závislost velikosti statického modulu pružnosti na objemové hmotnosti zobrazuje Obr. 9, [21].



Obr. 9: Závislost modulu pružnosti na objemové hmotnosti (DK-drobné kamenivo) [21]

3.4.8. Dotvarování a smršťování

Dotvarování je deformace betonu způsobená dlouhodobým působením vnějšího zatížení. Při stejné 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. Vysoká hodnota modulu pružnosti hutného kameniva účinně zabraňuje nadměrnému smršťování běžného betonu. Při použití lehkého pórovitého kameniva je nutné uvažovat s větší mírou smršťování, které však lze redukovat předvlhčením kameniva.

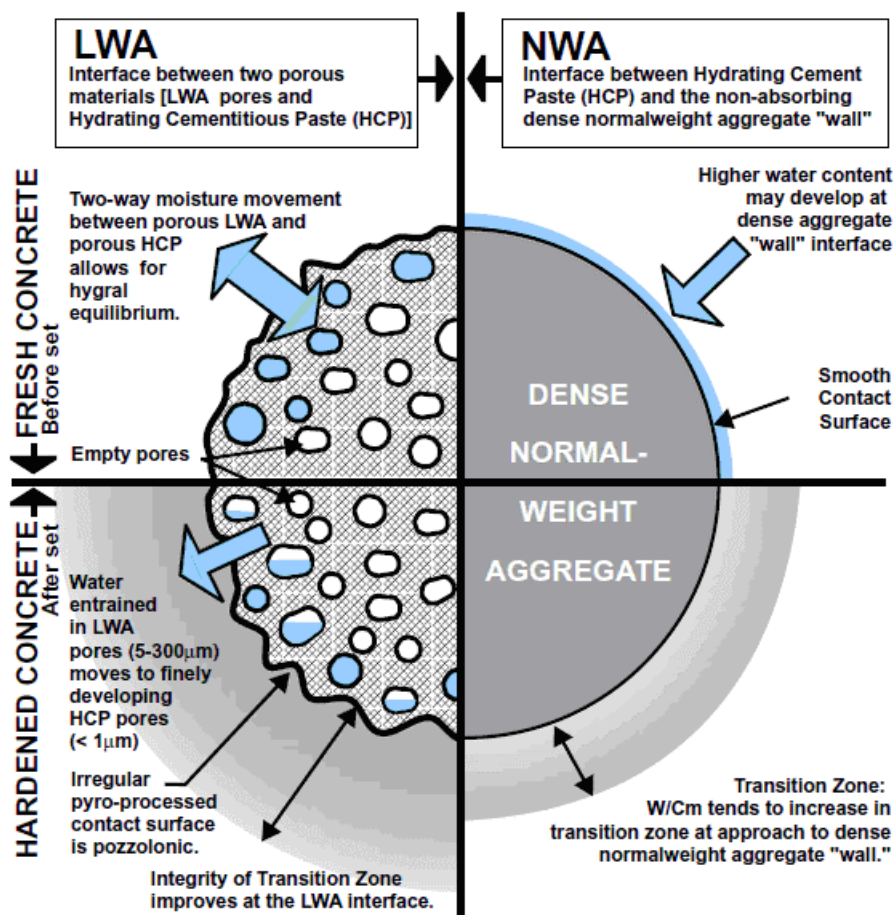
3.4.9. Vnitřní ošetřování

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 spotřebování 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, viz Obr. 10 [22]. To je možné za použití absorpčních materiálů, jakým je například právě pórovité lehké kamenivo.

Vnitřním ošetřováním lze snížit smrštění od vysychání a předejít trhlinám v raném stádiu vývoje betonu. Díky postupnému uvolňování vlhkosti z kameniva dochází k vysychání až v pozdější fázi tvrdnutí betonu, kdy má již beton dostatečnou tahovou pevnost. Tak se předejde mikrotrhlinám v raném stádiu a zvýší se trvanlivost betonu. Další výhodou interního ošetřování spočívá v nižší reakci betonu na nedostatečné vnější ošetřování. Na stavbách se poměrně často stává, že je beton nedostatečně chráněn před ztrátou vlhkosti, čímž dochází k rozvoji trhlin a zhoršení fyzikálně mechanických parametrů. Vlhkost obsažená v kamenivu se uvolňuje postupně a poskytuje betonu dostatečnou vlhkost i při „nešetrném“ vnějším ošetřování betonu.

Praktickou ukázkou uplatnění vnitřního ošetřování je stavba dálnice SH 121 ve státě Texas, USA v roce 2006 [23]. Úsek dálnice délky 125 m byl proveden z normálního betonu a z betonu s přídavkem vodou nasyceného lehkého kameniva. Úseky byly bez dilatací. Po osmi měsících bylo napočítáno 52 trhlin u běžného betonu a 21 trhlin u betonu s vnitřním ošetřováním. Trhliny u betonu s vnitřním ošetřováním byly navíc znatelně menší. Dalším příkladem mohou být dva mosty postavené ve státě Indiana, USA. V roce 2010 byly zhotoveny dva identické mosty stejnou metodou a ze stejných materiálů [23]. V jednom případě bylo však

nahrazeno 55% drobného kameniva (písku) kamenivem lehkým. U mostů se sledoval nárůst pevnosti betonu, který byl v případě betonu s lehkým kamenivem vyšší³ o 20%.



Obr. 10: Vnitřní ošetřování a kontaktní zóna běžného a lehkého betonu [22]

3.5. Realizované konstrukce z lehkého betonu v ČR

Ačkoli se nejedná o nový materiál, realizací staveb z lehkého betonu zatím není v Česku mnoho. Lehký beton je častěji užíván v severských zemích. Příkladem může být první most z lehkého betonu ve Švédsku z roku 1975, Nordhordland bridge v Norsku, případně těžební věže a další [9]. Ale i u nás lze již nalézt několik úspěšných aplikací lehkého betonu, ať již při použití v mostním inženýrství nebo v pozemním stavitelství. V mostním stavitelství se často využívají lehké betony s vyšší pevností, které je možné i dodatečně předpínat. V pozemním stavitelství se uplatňují spíše betony s vhodnými tepelně-izolačními vlastnostmi, díky kterým lze docílit betonových staveb bez nutnosti dodatečného zateplování.

První realizace předepnutého mostu z lehkého betonu v České republice byla provedena v roce 2002. Jedná se o lávku pro pěší přes řeku Vltavu v Českých Budějovicích, s názvem projektu: Komunikační propojení Stromovky s centrem města České Budějovice lávkou přes Vltavu a Malší - I. Most byl navržen jako konstrukce o třech polích (25, 76, 25 m). Na

³ Nahrazena byla pouze část drobného kameniva nasyceným lehkým kamenivem. Zbylé hutné kamenivo, které se značně podílí na velikosti tlakové pevnosti betonu, bylo v obou srovnávaných betonech totožné. K navýšení tlakové pevnosti tak přispěla vnitřní vlhkost uložená v pórovitém lehkém kamenivu.

stavbu byl použitý lehký beton LC 30/37 s deklarovanou objemovou hmotností 1800 kg/m^3 [24]. Stavba mostu z lehkého betonu získala hned několik ocenění: Nejlepší stavba roku 2002 financovaná z veřejných prostředků, cenu Presta 2002, Inovace roku 2002 a mostní dílo roku 2002.



Obr. 11: Lávka pro pěší v Českých Budějovicích [24]

V roce 2010 byl z lehkého betonu realizován plnostěnný trémový otevřený most na rychlostní komunikaci R6 Sokolov – Tisová [25]. Během zpracování realizační dokumentace byly v místě projektovaného mostu zjištěny zhoršené inženýrsko-geologické podmínky, než které byly v projektu doposud uvažovány. Bylo vypracováno několik variant řešení a jako nejvhodnější varianta se ukázala náhrada běžného betonu za lehký beton. Nosná konstrukce mostu byla navržena jako spojitý nosník o sedmi polích. V příčném směru se jedná o dvoutrémový monolitický most z dodatečně předpjatého betonu LC 35/38 D2,0-XF2. Tlaková pevnost betonu po 28 dnech dosahovala hodnoty 46 MPa při objemové hmotnosti ve vysušeném stavu 1950 kg/m^3 . Statický modul pružnosti po 28 dnech měl hodnotu 28 GPa.



Obr. 12: Plnostěnný trémový otevřený most z lehkého betonu, R6 Sokolov – Tisová [26]

Pro použití lehkého betonu v pozemním stavitelství převládají hlavně architektonické důvody. Pokud budeme chtít konstrukci z pohledového betonu jak z interiéru, tak z exteriéru, je lehký beton s nízkou tepelnou vodivostí prakticky jedinou možností. Tuto koncepci zvolili architekti u stavby dvou rodinných domů v Brně v městské části Žebětín, Obr. 13. Požadavkem architektů bylo vytvořit rodinný dům s pohledovými stěnami a stropní konstrukcí z betonu. Obvodové stěny a stropní konstrukce byly provedeny z tepelně izolačního Liaporbetonu. Pro splnění tepelně technických požadavků však vycházely konstrukce mnohem masivnější než je potřeba ze statického hlediska. Obvodové stěny byly navrženy v tloušťkách 450 mm. Stropní konstrukce, která zároveň tvořila i střechu, byla navržena v tloušťce 650 mm. Beton byl na stavbu dopravován autodomíchávači a podle technologického předpisu jej bylo nutné do 2 hodin uložit do bednění. Ukládání probíhalo pomocí bádří [27].



Obr. 13: Liaporbetonové domy Brno Žebětín

Další architektonicky významnou stavbou z tepelně-izolačního betonu je rodinný dům v Praze Kunraticích, viz Obr. 14 [28]. I zde byl zvolen stejný koncept, tedy interiérové i exteriérové stěny z pohledového betonu, a dále snaha o vyloučení složitých detailů u isonosníků a sendvičových konstrukcí. Tloušťka stěn z lehkého betonu byla navržena až 700 mm. Stropní konstrukce jsou v tloušťce 530 až 700 mm. Díky velkým tloušťkám konstrukcí bylo nutné navrhnout výztuže ve třech úrovních, což se z konstrukčního hlediska jeví jako neekonomické. Beton měl ovšem objemovou hmotnost ve vysušeném stavu v rozmezí 900 až 950 kg/m³ s koeficientem tepelné vodivosti $\lambda=0,24$ W/(m·K). Pevnost po 28 dnech dosahovala hodnoty kolem 9 MPa.

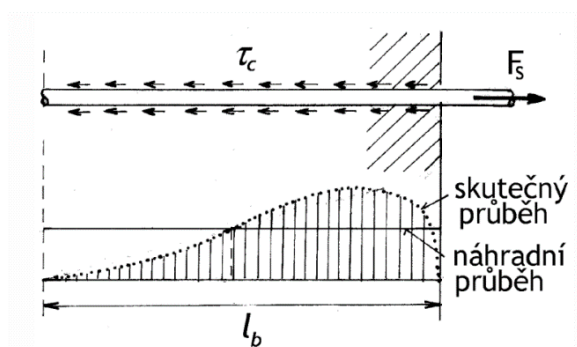


Obr. 14: Teprve druhá významná realizace rodinného domu z lehkého betonu [28]

3.6. Problematika soudržnosti výztuže s běžným a lehkým betonem

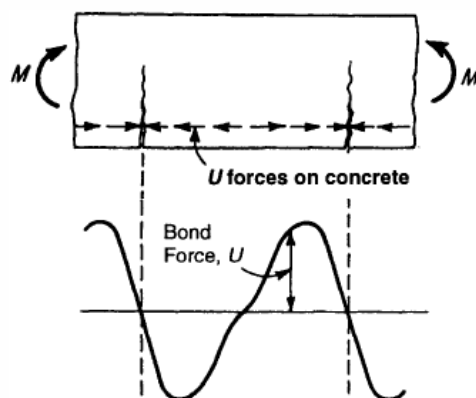
Spolupůsobení betonu a výztuže je nutným předpokladem funkčnosti všech nosných konstrukcí ze železobetonu. Spolupůsobení obou základních materiálů je zajištěno pomocí soudržnosti, která umožňuje přenést tahová namáhání z okolního betonu do výztužných vložek. Velikost napětí v soudržnosti závisí na několika parametrech. Mezi ty nejdůležitější je možno uvést 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 [29]. 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. [30].

Průběh napětí v soudržnosti je po délce prutu značně rozdílný. Nejvyššího napětí v soudržnosti při vytahování výztuže z betonu je dosahováno v počáteční části zakotvené výztuže. S narůstající se kotevní délkou napětí v soudržnosti po dosažení své maximální hodnoty dále již klesá, viz Obr. 15. Tento skutečný průběh napětí v soudržnosti je ovšem pro výpočet nahrazen konstantním, tzv. mezním napětím v soudržnosti. Předpoklad konstantního průběhu napětí v soudržnosti po délce prutu je možné použít pouze při krátkých kotevních délkách, čehož se využívá při experimentech označovaných jako pull-out testy.



Obr. 15: Průběh napětí v soudržnosti po délce prutu

Zcela odlišný je pak průběh napětí v soudržnosti na prvku namáhaném ohybem, který je porušen trhlinami. V místě trhlin je nulové napětí v soudržnosti. Následně dochází k prudkému zvýšení napětí v soudržnosti a jeho následnému poklesu. Tento průběh napětí v soudržnosti je zobrazen na Obr. 16.



Obr. 16: Průběh napětí v soudržnosti u prvku namáhaného ohybem [31]

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.

3.6.1. Stanovení kotevní délky dle ČSN EN 1992-1-1 [2]

Jako většina normových předpisů, i EC 2 vychází při výpočtu kotevní délky z předpokladu, že síla potřebná k vytržení ocelového prutu z betonu je rovna síle potřebné k přetržení prutu. Na základě tohoto předpokladu lze kotevní délku vyjádřit rovnicí:

$$l_{b,rqd} = (\phi/4) (\sigma_{sd}/f_{bd}) \quad (3.2)$$

kde: $l_{b,rqd}$... základní požadovaná kotevní délka,
 ϕ ... průměr výztuže,
 σ_{sd} ... návrhové napětí v místě prutu, od kterého se měří kotevní délka,
 f_{bd} ... mezní napětí v soudržnosti.

Mezní napětí v soudržnosti se pro žebírkovou výztuž stanoví jako:

$$f_{bd} = 2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctd} \quad (3.3)$$

kde: η_1 ... součinitel závislý na kvalitě podmínek v soudržnosti a poloze prutu během betonáže,
 η_2 ... součinitel závislý na průměru prutu,
 f_{ctd} ... návrhová hodnota pevnosti betonu v tahu.

Pro lehké betony se ve vztahu (3.3) pouze nahradí návrhová hodnota betonu v tahu f_{ctd} návrhovou pevností v tahu pro lehký beton f_{lctd} , která se určí:

$$f_{lctd} = f_{lctk,0,05} / \gamma_C \quad a$$

$$f_{lctk,0,05} = f_{ctk,0,05} \eta_1,$$

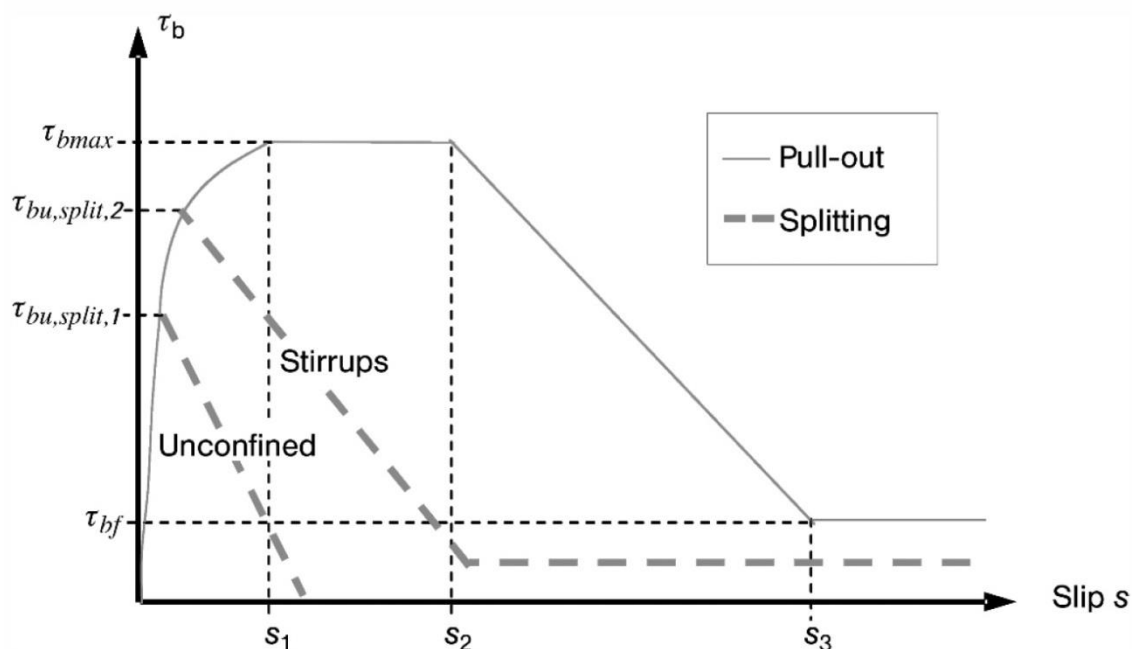
kde: $f_{ctk,0,05}$... 5% kvantil charakteristické hodnoty tahové pevnosti (běžného) betonu,
 η_1 ... součinitel zohledňující nižší objemovou hmotnost lehkého betonu:
 $\eta_1 = 0,40 + 0,60 \rho / 2200$, kde je dále:
 ρ ... objemová hmotnost vysušeného betonu.

3.6.2. Stanovení kotevní délky dle fib Model Code 2010 [32]

Nejnovějším předpisem pro návrh betonových konstrukcí je dokument fib Model Code 2010 [32], označovaný zkratkou MC2010. Uvedené výpočtové vztahy pro stanovení kotevní délky jsou více empirické a dávají tak větší shodu s experimenty, a tedy i s praxí, než stávající návrhová norma pro betonové konstrukce [2]. Napětí v soudržnosti závisí na množství parametrů, mezi něž se řadí geometrie žebírek výztuže, pevnost betonu, pozice a orientace výztuže během betonáže, napjatostní stav prvku, okrajové podmínky a velikost krycí vrstvy.

MC 2010 rozlišuje dva způsoby porušení a udává vztahy jak pro výpočet tzv. bond-slip modelu, tak pro návrhové napětí v soudržnosti. Způsob porušení prvku je závislý na míře omezení betonu. Omezení je způsobeno příčnou výztuží, přítlakem, případně velkou mocností krycí vrstvy. V případě dostatečného omezení prvku dochází k vytržení výztuže. Toto porušení je označováno „Pull-out“. Průběh napětí při pull-out porušení lze rozdělit na tři části. Tangenciální napětí až do velikosti posunu výztuže s_1 roste nelineárně. Mezi posunem výztuže o velikosti s_1 až s_2 je napětí konstantní a dosahuje své maximální hodnoty. Od velikosti posunu s_2 do velikosti posunu výztuže s_3 dochází k lineárnímu snižování tangenciálního napětí. Po dosažení posunu výztuže o velikosti s_3 je tangenciální napětí již pouze reziduální, viz Obr. 17.

V případě nedostatečného omezení prvku nastává druhý způsob porušení, kdy dojde k náhlému rozštěpení zkušebního prvku. V anglosaské literatuře je tento způsob porušení označován „Splitting“. Typickým projevem je náhlý a nečekaný pokles napětí. Velikost posunu výztuže je v tomto případě několikanásobně menší než v případě prvku s omezením, kde je dominantním jevem „zaklesnutí“ betonu mezi žebírka výztuže. Výpočtové vztahy s velikostmi posunů výztuží jsou uvedeny v Tab. 5.



Obr. 17: Vztah mezi velikostí napětí a posunem výztuže pro různé způsoby porušení vzorku [32]

Tab. 5: Výpočtové vztahy pro různé způsoby porušení a omezení výztuže převzaté z MC2010 [32]

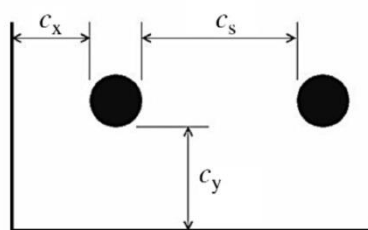
	1	2	3	4	5	6
	Pull-out (PO)		Splitting (SP)			
	$\varepsilon_s < \varepsilon_{s,y}$		$\varepsilon_s < \varepsilon_{s,y}$			
	Good bond cond.	All other bond cond.	Good bond cond.		All other bond cond.	
			Unconfined	Stirrups	Unconfined	Stirrups
τ_{bmax}	$2.5\sqrt{f_{cm}}$	$1.25\sqrt{f_{cm}}$	$2.5\sqrt{f_{cm}}$	$2.5\sqrt{f_{cm}}$	$1.25\sqrt{f_{cm}}$	$1.25\sqrt{f_{cm}}$
$\tau_{bu,split}$	—	—	$7.0 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{25}\right)^{0.25}$	$8.0 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{25}\right)^{0.25}$	$5.0 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{25}\right)^{0.25}$	$5.5 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{25}\right)^{0.25}$
s_1	1.0 mm	1.8 mm	$s(\tau_{bu,split})$	$s(\tau_{bu,split})$	$s(\tau_{bu,split})$	$s(\tau_{bu,split})$
s_2	2.0 mm	3.6 mm	s_1	s_1	s_1	s_1
s_3	$c_{clear}^1)$	$c_{clear}^1)$	$1.2s_1$	$0.5c_{clear}^1)$	$1.2s_1$	$0.5c_{clear}^1)$
a	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
τ_{bf}	$0.40\tau_{max}$	$0.40\tau_{max}$	0	$0.4\tau_{bu,split}$	0	$0.4\tau_{bu,split}$

Podrobné vysvětlení výše uvedených vztahů s komentářem je možné nalézt ve fib Bulletinu 72 [33]. Základní vztah pro výpočet průměrného napětí ve výztuži při zkoušce soudržnosti, který je v modifikaci uveden i v MC2010, má tvar:

$$f_{stm} = 54 \left(\frac{f_{cm}}{25} \right)^{0,25} \left(\frac{l_b}{\phi} \right)^{0,55} \left(\frac{25}{\phi} \right)^{0,2} \left[\left(\frac{c_{min}}{\phi} \right)^{0,25} \left(\frac{c_{max}}{c_{min}} \right)^{0,1} + k_m K_{tr} \right] \quad (3.4)$$

- kde: f_{stm} ... průměrná hodnota dosaženého napětí ve výztuži,
 f_{cm} ... naměřená válcová pevnost betonu v tlaku,
 l_b a ϕ ... kotevní délka a průměr výztuže,
 c_{max} a c_{min} ... minimální a maximální velikost krytí stanovená dle Obr. 18,
 k_m a K_{tr} ... vliv příčné výztuže, podrobněji v [33].

Uvedený vzorec (3.4) je odvozen z celkem 750 provedených experimentů a vykazuje s provedenými experimenty největší shodu. Velikost napětí v soudržnosti je možné odvodit ze vztahu (3.4) za předpokladu, že síla ve výztuži je rovna síle přenesené betonem. Vztah je kalibrován pro betony s válcovou pevností od 15 od 110 MPa.



$$c_{min} = \min(c_s/2, c_x, c_y)$$

$$c_{max} = \max(c_s/2, c_x)$$

Obr. 18: Stanovení maximální a minimální krycí vrstvy [32]

Vztah (3.4) se stal základem pro další výpočty kotevní délky uvedené v MC2010.

Základní napětí v soudržnosti se stanoví dle vzorce:

$$f_{bd,0} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 (f_{ck}/25)^{0,5} / \gamma_c \quad (3.5)$$

- kde: $f_{bd,0}$... průměrná hodnota napětí v soudržnosti,
 η_1 ... koeficient zohledňující použitou výztuž (pro žebírkovou výztuž má hodnotu 1,75),
 η_2 ... koeficient zohledňující pozici při betonáži (při dobrých podmínkách má hodnotu 1),
 η_3 ... koeficient zohledňující velikost výztuže (při $\phi \leq 25$ mm se uvažuje velikostí 1),
 η_4 ... koeficient zohledňující charakteristickou pevnost použité výztuže (při $f_{yk}=500$ MPa má koeficient velikost 1),
 f_{ck} ... charakteristická pevnost betonu v tlaku,

γ_c ... součinitel bezpečnosti uvažovaný hodnotou 1,5.

Návrhová hodnota napětí v soudržnosti se odvodí dle následujícího vztahu:

$$f_{bd} = (\alpha_2 + \alpha_3)f_{bd,0} - 2p_{tr}/\gamma_c < 2,5f_{bd,0} - 0,4p_{tr}/\gamma_c < 1,5\sqrt{f_{ck}}/\gamma_c \quad (3.6)$$

kde: f_{bd} ... výpočtová hodnota napětí v soudržnosti,

α_2 ... vliv pasivního omezení krycí vrstvou,

α_3 ... vliv příčné výztuže,

p_{tr} ... přitlak.

kde α_2 se pro žebírkovou výztuž stanoví:

$$\alpha_2 = (c_{min}/\emptyset)^{0,5} \cdot (c_{max}/c_{min})^{0,15} \quad (3.7)$$

Při použití lehkého betonu se uvedené vztahy nemění. Vliv lehkého betonu je zahrnut ve výpočtu pouze nižší hodnotou tlakové pevnosti.

3.7. Potenciál využití lehkého betonu

Používání lehkých betonů v betonovém stavitelství začíná získávat na významu. I přes vyšší cenu lehkého betonu si investoři a projektanti začínají uvědomovat přínosy, které jsou s lehkým betonem spjaty. Jedná se především o nižší objemovou hmotnost, která se pozitivně projevuje jak při dopravě, tak při manipulaci, a to zejména prefabrikovaných výrobků z lehkého betonu. Nízká objemová hmotnost je prospěšná též při dimenzování základových konstrukcí, neboť vede ke snížení namáhání základové spáry.

Jak bylo uvedeno výše, pro lehké betony je možné s výhodou použít i kamenivo, které je vyrobeno z odpadních surovin. Tím se znovu využívá původní surovina, která by byla určena pouze ke skládkování, a naopak se šetří běžné kamenivo.

Mezi další výhodné vlastnosti lehkých betonů patří snadná opracovatelnost ztvrdlého betonu, mrazuvzdornost a žáruvzdornost. Lehký beton také vytváří v budovách příjemné mikroklima [34].

Lepší tepelně-izolační vlastnosti lehkého betonu se pozitivně projeví při výpočtu energetické náročnosti budov. Dle nových požadavků plynoucích z evropské směrnice energetické náročnosti budov (2010/31) [35] je požadavkem členských států EU zajistit, aby nové budovy postavené po 31. 12. 2020 splňovaly podmínky budov s téměř „nulovou spotřebou energie“. Zde je nutné si uvědomit, že i když je součinitel tepelné vodivosti lehkého betonu cca 4x nižší než součinitel tepelné vodivosti obyčejného betonu, běžné tepelně izolační materiály dosahují ještě 10x nižších hodnot než lehký beton. Například stěna z běžného betonu tloušťky 200 mm potřebuje pro splnění tepelně technických parametrů zateplení obvodové stěny z pěnového polystyrénu (EPS) o tloušťce 105 mm. Stěna z lehkého betonu tloušťky 200 mm potřebuje zateplení EPS o tloušťce 80 mm (při uvažování $\lambda_{LC} = 0,24 \text{ W/mK}$). Z uvedeného příkladu vyplývá, že i když jsou tepelně-izolační vlastnosti lehkého betonu několikrát lepší než

běžného betonu, jsou stále řádově nižší než vlastnosti, které běžně dosahují tepelné izolace. Konstrukce, které by dnes splnily přísné tepelně-technické požadavky, je proto prakticky vždy nutné navrhovat v kombinaci s tepelnou izolací.

Následující část disertační práce, která se zabývá vývojem ultralehkých betonů, je zaměřena převážně na splnění konstrukčních normou požadovaných fyzikálně-mechanických parametrů, nikoli na dosažení co nejnižšího součinitele tepelné vodivosti. Nejnižší možná pevnostní třída pro navrhování konstrukcí z lehkého betonu je LC12/13. Výzkum lehkých betonů, který se stal podkladem pro disertační práci, byl směřován k dosažení minimálně této pevnosti třídy při co nejnižší objemové hmotnosti.

4. VLASTNÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOST

Popis experimentální činnosti je rozdělen do několika hlavních částí, z nichž stěžejními jsou výroba ultralehkého betonu a stanovení fyzikálně mechanických vlastností ztvrdlého betonu. Úvod je věnován experimentům směřujícím k nalezení ekonomicky vhodného tuzemského kameniva pro výrobu ultralehkého betonu. Dále se práce 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. Dále je práce věnována jak základním, tak podrobnějším fyzikálně-mechanickým vlastnostem všech čtyř navržených receptur betonů. Velký důraz je přitom kladen na problematiku kotvení výztuže v ULC. Je sledován vliv velikosti napětí v soudržnosti v závislosti na objemové hmotnosti betonu. K 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. Ověřen je i předpoklad nízkého účinku „zakliňování“ lehkého kameniva na velikosti napětí v soudržnosti pomocí akustické emise.

4.1. Návrh a výroba čerstvého betonu

4.1.1. Testované možnosti vylehčení betonu

Nejběžnější způsob, jak dosáhnout efektivního vylehčení betonu, je použití dostatečně lehkého a přitom pevného kameniva. V České republice je takové kamenivo dostupné pod obchodním názvem Liapor. Prováděné experimentální práce měly v počátečních fázích vývoje za cíl ověřit, zda lze dosáhnout potřebného vylehčení betonu za pomoci jiných materiálů, než je běžně dostupné kamenivo.

4.1.1.1. Vybraná lehká plniva a způsob zkoušení

Bylo zvoleno několik „vhodných“ lehkých materiálů, které byly přidávány do cementového tmelu. Testována byla následující lehká plniva:

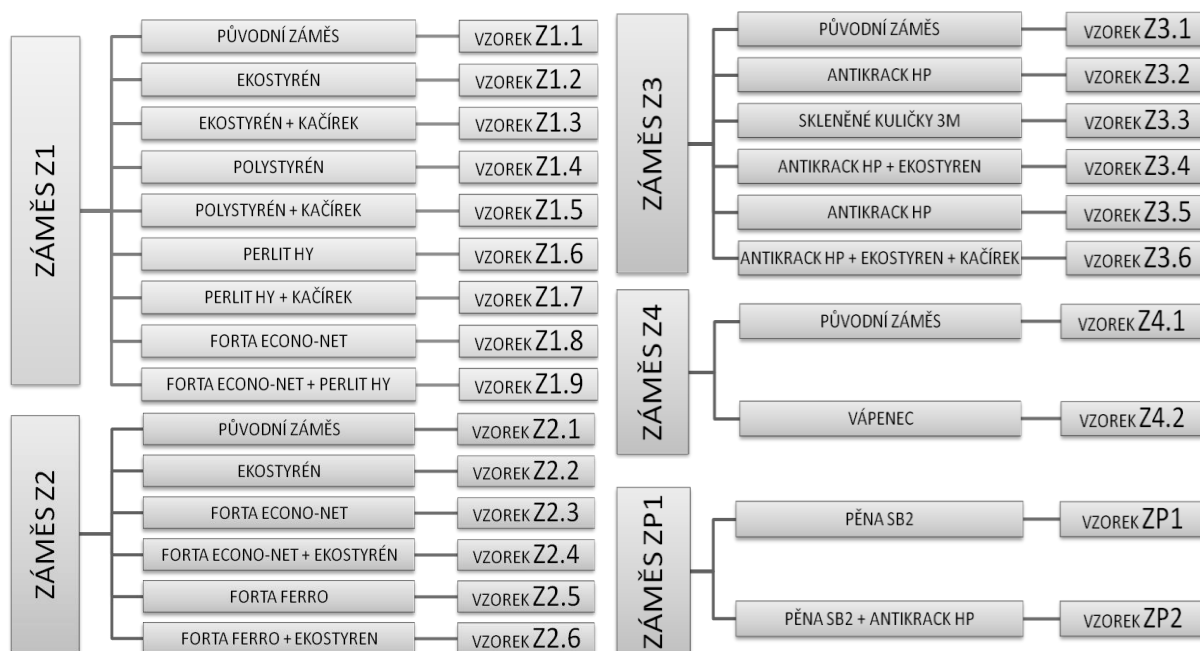
- **Ekostyren** - speciálně upravený odpadní polystyrén. Úprava spočívá v hydrofobizaci povrchu, díky kterému je snížena nasákavost a s tím je spojeno i snazší vmíchání do betonu oproti běžnému polystyrénu;
- **drcený polystyrén** – odpad při výrobě speciálního bednění v závodě Prefa Brno a. s., který již nebyl dále upravován;
- **skleněné kuličky 3M S22** - duté skleněné kuličky o hustotě 220 kg/m³ s pevností v tlaku cca 2,7 MPa od společnosti 3M;
- **pěna SB2** - pěna vyrobená pomocí pěnící pistole a pěnotvorné látky Sika® SB 2;
- **perlit** - expandovaná rozemletá hornina s nízkou objemovou hmotností. Pro výzkum byl použit komerční Perlit HY se sníženou nasákavostí;

- **Poralan** - provzdušňující přísada, která v betonové směsi vytváří vzduchové póry o průměru 10 – 300 μm .

Při laboratorní přípravě variant ultralehkého betonu byla vždy nejprve připravena základní cementová záměs, ke které byly alternativně přidávány další složky pro dosažení požadovaného vylehčení. Jednotlivé základní záměsi jsou uvedeny v Tab. 6. Kombinace záměsí a vylehčujících složek zobrazuje Obr. 19.

Tab. 6: Složení základních směsí

dávka v kg na m^3	Z1	Z2	Z3	Z4	ZP1
CEM I 52,5 N	500	550	550	550	550
vodní součinitel	0,4	0,39	0,36	0,34	0,36
plastifikátor	6,0	7,15	7,15	8,8	7,15
zpomalovač	2,5	2,5	2,5	1,3	-
provzdušňovač	6,5	4,0	4,0	4,0	-
kamenivo 0/4	1635	1555	1588	1612	1605

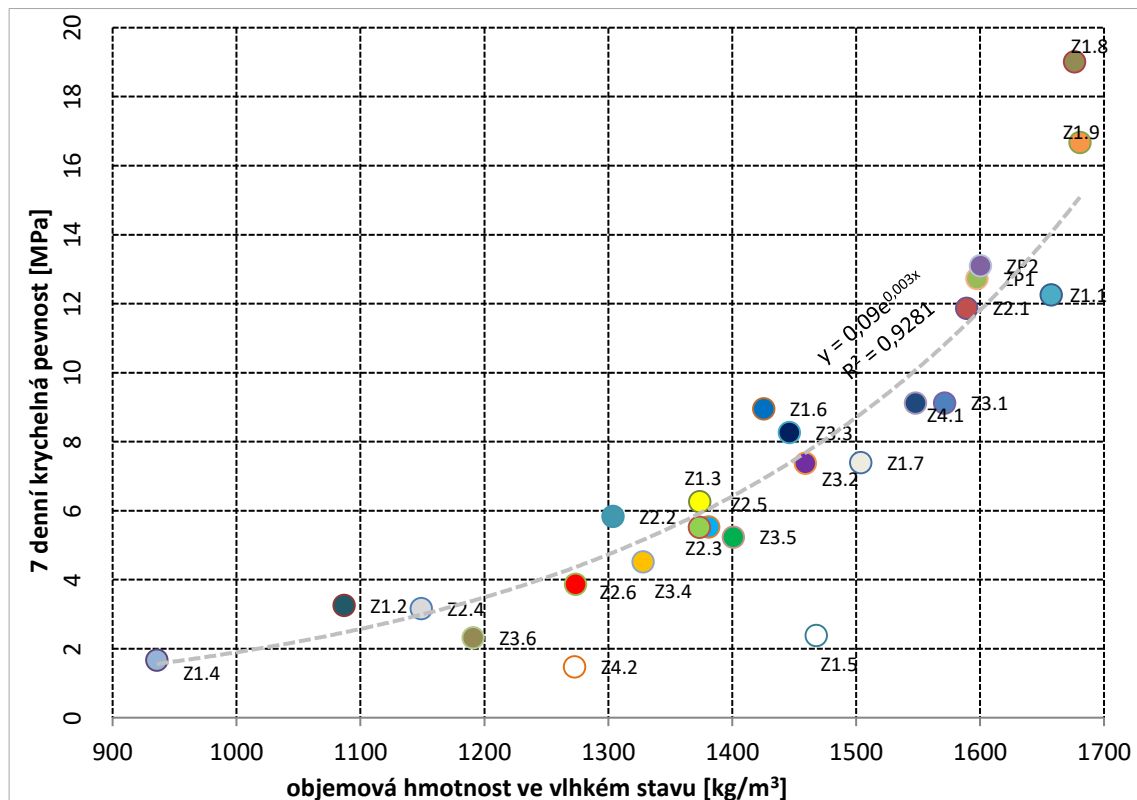


Obr. 19: Podrobné složení jednotlivých vzorků a z nich plynoucí označení

4.1.1.2. Dosažené výsledky a diskuse

Zvolený postup výroby jednotlivých záměsí s kombinací vylehčujících přísad poskytl možnost provedení velkého množství zkoušek za účelem odhalení efektivního způsobu vylehčení. To byl i důvod, proč se zkoušení vyrobených těles provádělo již po 7 dnech. Závislost pevnosti na objemové hmotnosti je zobrazena na Obr. 20. Z naměřených údajů vyplynulo, že na bázi pěnobetonu (případně dále modifikovaného lehkým plnivem) je dosažení vylehčení s mechanickými parametry vhodnými pro konstrukční beton prakticky nemožné. Při

objemové hmotnosti betonu ve vysušeném stavu nižší než 1200 kg/m^3 byla zjištěna krychelná pevnost pouze cca 4 MPa. Z Obr. 20 je vidět, že při takto zvolené koncepci nehledě na druh vylehčujícího materiálu je krychelná pevnost exponenciálně závislá na objemové hmotnosti. Dalším zkoušeným lehkým plnivem bylo kamenivo na bázi expandovaného jílu. Již při prvním experimentu byl navržen lehký beton s objemovou hmotností 1199 kg/m^3 a střední krychelnou pevností po sedmi dnech 16,5 MPa. Tento výsledek jasně ukázal, že pro lehké konstrukční betony se ze všech testovaných tuzemských materiálů jako nejvhodnější jeví koncepce vycházející právě z použití kameniva na bázi expandovaného jílu.



Obr. 20: Závislost⁴ sedmidenní krychelné pevnosti na objemové hmotnosti

4.1.1.1. Postup výroby betonů s lehkým kamenivem

Lehké kamenivo Liapor je porézním kamenivem a v suchém stavu odebírá značné množství (záměsově) vody z čerstvého betonu. Aby bylo tomuto odebrání vody zabráněno, bylo porézní lehké kamenivo před mícháním navlhčeno tzv. dodatkovou vodou. Tato dodatková voda se (plně v souladu s doporučením dle [21]) nezapočítává do výsledného (tzv. aktivního) vodního součinitele. Dle závěrů uvedených v [21] nesnižuje výslednou pevnost betonu, která závisí na aktivním vodním součiniteli. Navíc tato voda obsažená v zrnech lehkého kameniva později ve tvrdnoucím betonu působí jako voda ošetřující. V dalším kroku výroby směsi byl přidán cement, práškové příměsi a 95% účinné (záměsově) vody s rozpuštěnou provzdušňující a kombinovanou polyfunkční přísadou. Kombinovaná polyfunkční přísada byla připravena na řešitelském pracovišti smísením polykarboxylátového superplastifikátoru a polymelaminu.

⁴ Závislost je platná pouze pro výše uvedená lehká plniva a neplatí pro použití lehkého kameniva.

Jedině tak mohlo být dosaženo dobře zpracovatelného a přitom stabilního ULC požadované objemové hmotnosti. Zbylá voda sloužila k doladění konzistence čerstvého betonu.

Kamenivo Liaver/Poraver, které je nenasákavé, nebylo před mícháním vlhčeno dodatkovou vodou. Další postup výroby je shodný s výše uvedeným postupem míchání.

4.1.2. ULC s třídou objemové hmotnosti D1,0 - Liapor

4.1.2.1. Materiálové složení ULC D1,0 - Liapor

Třída objemové hmotnosti D1,0 představuje u lehkých betonů podle [3] nejnižší přípustnou hmotnostní třídu. Do třídy objemové hmotnosti D1,0 jsou zařazeny betony s objemovou hmotností 800 až 1000 kg/m³. Pro dosažení této třídy byly v experimentech použity následující frakce lehkého kameniva: Liapor 0-2/575, 1-4/500 a 4-8/350. Vlastnosti použitého materiálu jsou uvedeny v následující tabulce Tab. 7.

Tab. 7: Vlastnosti použitého kameniva Liapor pro ULC D1,0 [10]

Vlastnosti materiálu	Sypná hm. [kg/m ³]	Objemová hm. zrna [kg/m ³]	Nasákavost w				Odolnost proti drcení [MPa]
			5 min % hm.	30 min % hm.	60 min % hm.	120 min % hm.	
	Liapor 0-2/575	575	1050	2	3	4	5	4
Liapor 1-4/500	500	925	2	4	5	6	3
Liapor 4-8/350	350	700	3	5	7	8	1,2

Pro všechny připravené záměsi byl použit Portlandský cement CEM I 52,5 R z cementárny Mokrý. Vlastnosti cementového tmelu byly upravovány pomocí následujících příměsí:

- **S-Meta 4** - metakaolin vyrobený výpalem kaolinů a kaolinitických jíílů, který je využíván jako aktivní příměs. V přítomnosti Ca(OH)₂ a vlhkosti dochází k hydraulické reakci, která se označuje jako pucolánová aktivita. Metakaolin má příznivý vliv na kvalitu betonu a zlepšení jeho fyzikálně-mechanických a fyzikálně-chemických vlastností;
- **Struska SMŠ 380** – vysokopecní struska je odpadem při výrobě železa ve vysokých pecích. Na rozdíl od jiných pucolánů struska tvrdne ve vodě sama bez přídavku vápna. Vápno ovšem působí jako katalyzátor hydratačního procesu. Vysokopecní jemně mletá struska má pozitivní vliv na dlouhodobé pevnosti betonu, snižuje hydratační teplo a zlepšuje odolnost betonu [5], [36].

Pro ověření reálné míry vylehčení byl proveden teoretický rozbor. Z poměrného zastoupení zvolených frakcí kameniva a jejich objemové hmotnosti byla výpočtem stanovena průměrná objemová hmotnost směsi lehkého kameniva na hodnotu cca 850 kg/m³. Při objemové hmotnosti cementového tmelu 2270 kg/m³ a požadované výsledné objemové hmotnosti betonu do 1000 kg/m³ vychází maximální dávka cementového tmelu cca 105 l. Tento objem je vzhledem k běžné spotřebě cementového tmelu na hutný beton cca 300 l nedostatečný. Takto navržený lehký beton by byl mezerovitý, špatně zpracovatelný a s

nedostatečnou pevností. Bylo tedy nezbytné, kromě použití lehkého kameniva, přijmout ještě další opatření pro snížení objemové hmotnosti betonu, které, jak vyplynulo z teoretického rozboru, musí být směřováno k vylehčení cementového tmelu. Jako nejefektivnější se jevílo provzdušnění tmelu, které vytváří v betonu malé vzduchové póry o průměru 10 – 300 μm . Tyto póry nejen snižují objemovou hmotnost betonu, ale navíc působí v čerstvém betonu plastifikačně a ve ztvrdlém betonu výrazně zvyšují jeho odolnost vůči mrazu, požáru a většině agresivních prostředí. Negativním dopadem provzdušnění je pokles výsledné pevnosti betonu.

Bylo testováno 12 různých receptur betonu s lehkým kamenivem Liapor, které se lišily použitými příměsemi a poměrem frakcí kameniva. Pro vyhodnocení nejefektivnější receptury byl zaveden poměr P/OH [-], který vyjadřuje poměr krychelné pevnosti ve stáří 28 dní a objemové hmotnosti ve vysušeném stavu. Poměr P/OH se při použití kameniva Liapor pohyboval v mezích 7,2 až 23,0. Materiálové složení uvedené v Tab. 8 odpovídá receptuře s nejlepším poměrem P/OH. Průměrná hodnota poměru P/OH z dvaceti vzorků dosahuje pro uvedenou recepturu hodnoty 20,5.

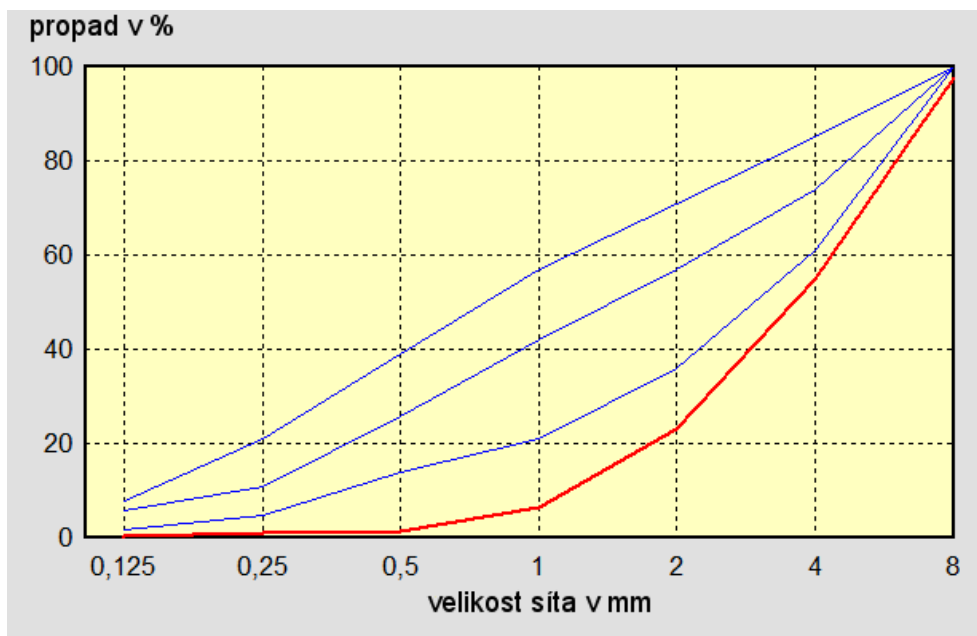
Tab. 8: Hmotnostní a procentuální složení ULC D1,0

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

Objem cementového tmelu v receptuře ULC D1,0 - Liapor byl výpočtem stanoven na hodnotu 335 l/m³. Z naměřené objemové hmotnosti betonu byl zpětným výpočtem stanoven objem vzduchu v čerstvém betonu, který dosahoval 170 l/m³. Provzdušnění bylo dosaženo pomocí přísady Microporan o dávkování 0,6% z hmotnosti cementu. (Doporučené dávkování přísady pro zkoušky je dle výrobce 0,03% z hmotnosti cementu.) Vysoká dávka provzdušňovací přísady byla aplikována po sérii zkoušek, kde bylo prokázáno, že pokud čerstvý beton neobsahuje drobné kamenivo, provzdušnění není efektivní a je tedy nutné aplikovat větší množství provzdušňující látky. Snížení vodního součinitele a zajištění vhodné zpracovatelnosti bylo dosaženo použitím polyfunkční plastifikační přísady. Provzdušněný cementový tmel tvořil více než polovinu objemu čerstvého betonu.

Objem kameniva v čerstvém betonu byl stanoven na 494 l/m³ a skládal se ze tří výše uvedených frakcí kameniva Liapor. Poměr jednotlivých frakcí lehkého kameniva byl u ULC zvolen s důrazem na dosažení optimálního vylehčení. Křivka zrnitosti použitého kameniva je zobrazena na Obr. 21. (Jedná se o údaje poskytnuté výrobcem kameniva.) Optimální křivka zrnitosti je vymezena krajními modrými křivkami a slouží k dosažení vhodné skladby kameniva

s minimální mezerovitostí. Navržená křivka zrnitosti kameniva se nachází v nevhodné oblasti pro použití kameniva do betonu. To ale platí pouze pro hutné kamenivo. Zrnitost kameniva úzce souvisí s množstvím potřebného cementového tmelu a předurčuje konzistenci čerstvého betonu a především následné fyzikálně-mechanické parametry.



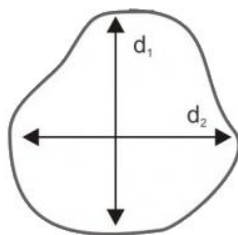
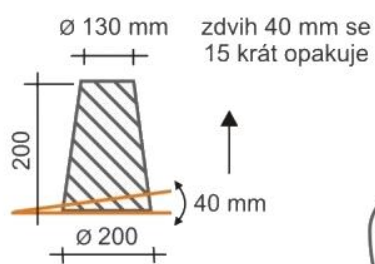
Obr. 21: Křivka zrnitosti kameniva Liapor ve směsi ULC D1,0 – Liapor

4.1.2.2. Vlastnosti čerstvého betonu ULC D1,0 – Liapor

U čerstvého betonu byla měřena objemová hmotnost, konzistence a bylo sledováno, zda nedochází k segregaci cementového tmelu.

Objemová hmotnost čerstvého betonu byla stanovována na krychlích o hraně 150 mm. Naměřená objemová hmotnost čerstvého betonu ULC D1,0 – Liapor činila 1070 kg/m³. Výpočtem stanovená objemová hmotnost se lišila o 2%.

Konzistence byla stanovena jak pomocí zkoušky rozlitím, tak pomocí stupně zhutnitelnosti. Zkouška stupně zhutnitelnosti byla provedena podle [18] a bylo dosaženo nejvyššího možného stupně zhutnitelnosti, tedy C3. Zkouška rozlitím byla provedena podle [19] a u směsi ULC D1,0 – Liapor bylo dosahováno stupně rozlití F3 až F4, tedy rozlití o velikosti 420 až 550 mm. Zkouška rozlitím sloužila i k posouzení, zda u čerstvého betonu nedochází k segregaci. Jak plyne z Obr. 22, k segregaci betonu nedocházelo. Důvodem omezení segregace u betonů ULC D1,0 – Liapor bylo značné provzdušnění, což dokazuje Obr. 23.



Obr. 22: Způsob měření stupně rozlití a stupeň rozlití F3 (450 mm) ULC D1,0 – Liapor



Obr. 23: Detail „nadýchané“ konzistence betonu ULC D1,0 - Liapor

4.1.3. ULC s třídou objemové hmotnosti D1,0 – Liaver

Návrh receptury lehkého betonu o třídě objemové hmotnosti D1,0 byl proveden i se zahraničním a poněkud dražším kamenivem na bázi zpěněného skla. Cílem experimentů bylo ověřit, zda je možné z tohoto kameniva vyrobit beton s vyšší hodnotou poměru P/OH, než s tuzemským kamenivem Liapor.

4.1.3.1. Materiálové složení ULC D1,0 - Liaver

Lehké kamenivo na bázi zpěněného skla, viz Obr. 24, je dostupné především pod obchodními názvy Liaver a Poraver.



Obr. 24: Kamenivo na bázi zpěněného skla – různé frakce

Základní fyzikálně-mechanické charakteristiky (objemová a sypná hmotnost, tlaková pevnost zrn) těchto dvou materiálů jsou uvedeny v Tab. 9 a Tab. 10.

Tab. 9: Základní parametry kameniva Liaver [15]

LIAVER	Frakce kameniva [mm]					
	0,25 - 0,5	0,25 - 0,8	0,5 - 1,2	0,5 - 1	2 - 4	4 - 8
Sypná hmotnost [kg/m ³]	300	530	475	250	190	170
Objemová hm. zrna [kg/m ³]	540	1000	1000	450	310	300
Pevnost zrna [MPa]	2,9	11	10	2,6	2,4	1,8

Tab. 10: Základní parametry kameniva Poraver [14]

PORAVER	Frakce kameniva [mm]				
	0,04 - 0,125	0,25 - 0,5	1 - 2	2 - 4	4 - 8
Sypná hmotnost [kg/m ³]	530	340	230	190	170
Objemová hm. zrna [kg/m ³]	1400	1000	400	320	300
Pevnost zrna [MPa]	-	10	1,6	1,4	1,2

Pro experimenty byl použit opět cement CEM I 52,5R z cementárny Mokrá. Vlastnosti cementového tmelu byly tentokrát modifikovány pomocí následujících příměsí:

- **vápenec** – snižuje hydratační teplo cementového tmelu a v důsledku jemného mletí zlepšuje zpracovatelnost čerstvého betonu. Brání odlučování vody z čerstvého betonu a zlepšuje kvalitu povrchu ztvrdlého betonu.
- **Microsit® H20** - pucolánová přísada pro cementové materiály. Jedná se o speciálně separovaný popílek vzniklý při spalování uhlí. Obsahuje především sloučeniny SiO₂ a Al₂O₃, čímž se řadí do skupiny hliníkokřemičitanů. Tvar zrn Microsиту® je převážně kulovitý s hladkým povrchem. Díky hodně jemné křivce zrnitosti a kulovému tvaru zrn má Microsit® H20 velice příznivý vliv na zpracovatelnost čerstvého betonu. Výsledný

beton má v důsledku pucolánové aktivity Microsиту® H20 vyšší pevnost a odolnost proti chemickým vlivům. [37].

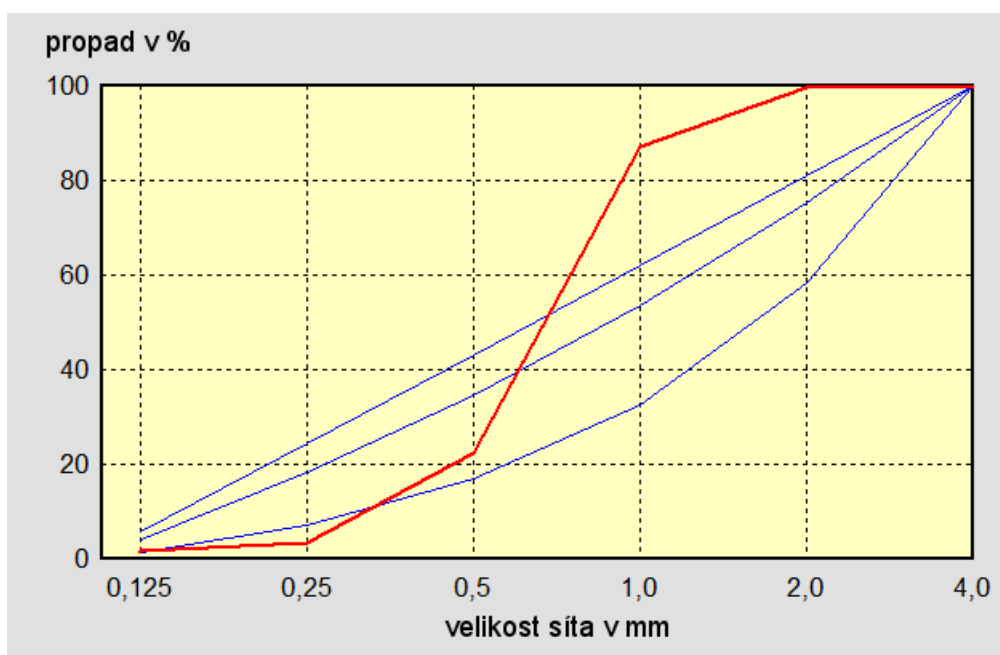
Složení čerstvého betonu v Tab. 11 je uvedeno pro ultralehký beton s kamenivem Liaver, který splnil požadované kritérium objemové hmotnosti ve vysušeném stavu 1000 kg/m^3 a dosáhl nejvyššího poměru P/OH. Naměřený poměr mezi krychelnou pevností po 28 dnech a objemovou hmotností ve vysušeném stavu byl 18,4.

Tab. 11: 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

Výpočtem stanovený objem cementového tmelu v receptuře ULC D1,0 – Liaver byl 330 l/m^3 . Snížení vodního součinitele a zajištění dobré zpracovatelnosti bylo dosaženo opět použitím polyfunkční plastifikační přísady.

Objem kameniva v čerstvém betonu byl 667 l/m^3 a skládal se z výše uvedených tří frakcí kameniva Liaver. Křivka zrnitosti použitého kameniva je zobrazena na Obr. 25. Bylo použito kamenivo s maximální velikostí zrna 4 mm.



Obr. 25: Křivka zrnitosti použitého kameniva

4.1.3.2. Vlastnosti čerstvého betonu ULC D1,0 – Liaver

Čerstvý beton vykazoval rozlítí zhruba 500 mm, tedy třídu rozlítí F4. Objemová hmotnost čerstvého betonu měřená na krychlích o hraně 150 mm činila 1058 kg/m^3 a od výpočtem stanovené se lišila o 1,1%. Čerstvý beton nevykazoval známky segregace a byl velmi dobře zhutnitelný.

4.1.4. ULC s třídou objemové hmotnosti D1,2 - Liapor

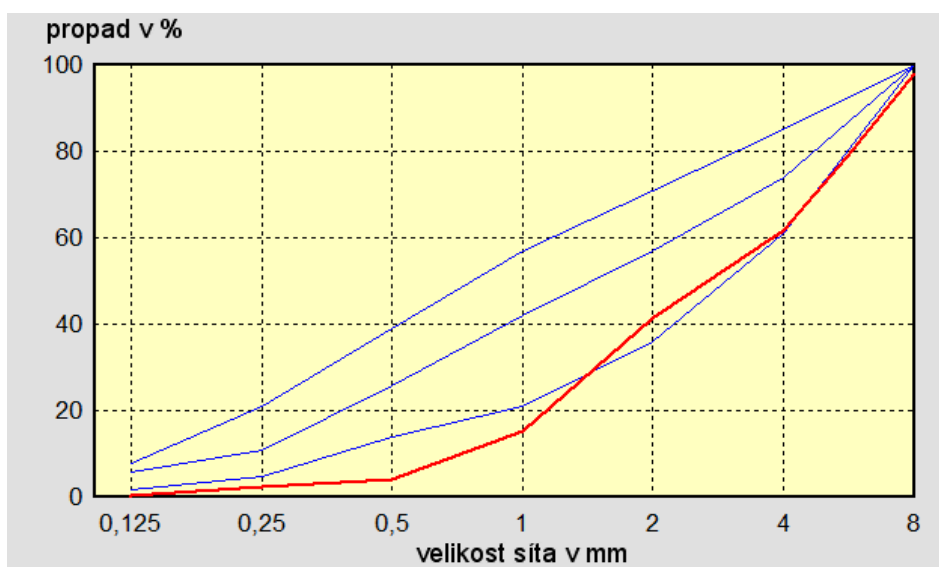
Výroba betonu objemové třídy D1,0 je v důsledku provzdušňování, které je nutné neustále kontrolovat a následně upravovat dobu a intenzitu míchání, značně obtížná, a při výrobě mimo laboratoř prakticky nemožná. Bez provzdušnění ovšem nelze třídu objemové hmotnosti D1,0 dosáhnout. Proto byl vyvinut lehký beton s objemovou hmotností ve vysušeném stavu do 1200 kg/m^3 , který byl minimálně o jednu pevnostní třídu vyšší než ULC D1,0 – Liapor. Dále byla receptura betonu zjednodušena tak, aby bylo možné beton připravit i mimo laboratorní podmínky.

4.1.4.1. Materiálové složení ULC D1,2 – Liapor

Pro výrobu ultralehkého betonu s vyšší pevnostní třídou bylo opět použito kamenivo Liapor, Tab. 12. Receptura obsahovala pouze dvě frakce kameniva s maximální velikostí zrna 8 mm.

Tab. 12: Vlastnosti použitého kameniva Liapor

Vlastnosti materiálu	Sypná hm. [kg/m ³]	Objemová hm. zrna [kg/m ³]	Nasákavost w				Odolnost proti drcení [MPa]
			5 min % hm.	30 min % hm.	60 min % hm.	120 min % hm.	
Liapor 0-4/550	550	1000	2	3	4	5	3,7
Liapor 4-8/450	350	850	2	4	5	6	1,7



Obr. 26: Křivka zrnitosti použitého kameniva Liapor

Cement CEM 52,5R byl nahrazen dostupnějším cementem CEM 42,5R z výrobního závodu Mokrý. Vlastnosti cementového tmelu byly upraveny pouze pomocí jediné příměsi S-Meta. Objem cementového tmelu byl výpočtem stanoven na hodnotu 346 l/m³. Objem dopočítaného vzduchu v čerstvém betonu byl 40 l/m³. Lehké kamenivo bylo přidáno v množství 614 l/m³. Složení čerstvého betonu je zobrazeno v Tab. 13.

Tab. 13: 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

4.1.4.2. Vlastnosti čerstvého betonu ULC D1,2 – Liapor

Čerstvý beton vykazoval opět velmi dobrou konzistenci. Rozlítí lehkého betonu dosahovalo hodnoty 450 mm, tedy třídy konzistence F3. Objemová hmotnost čerstvého betonu měřená na krychlích o hraně 150 mm činila 1323 kg/m³, rozdíl od výpočtem stanovené byl 0,5%. Čerstvý beton nevykazoval známky segregace a byl velmi dobře zhutnitelný.

4.1.5. ULC s třídou objemové hmotnosti D1,2eco - Liapor

Z důvodu ještě většího snížení ceny a tím snazšího uvedení na trh byl ve složení betonu metakaolin S-Meta nahrazen výrazně levnější a dostupnější příměsí – mikromletým vápencem Carmeuse 8 a to i za cenu očekávaného zhoršení fyzikálně-mechanických vlastností. Tato varianta lehkého betonu byla označena eco – ekonomická.

4.1.5.1. Materiálové složení ULC D1,2eco – Liapor

Výchozí pro návrh receptury byla již vyvinutá směs ULC D1,2 – Liapor. Frakce lehkého kameniva Liapor byly zvoleny shodně, došlo pouze k mírnému navýšení objemu kameniva (o 23 l/m³) a navýšení příměsi (o 2 kg/m³). Dávka a druh cementu se nezměnily. Složení receptury čerstvého betonu ukazuje Tab. 14.

Tab. 14: 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

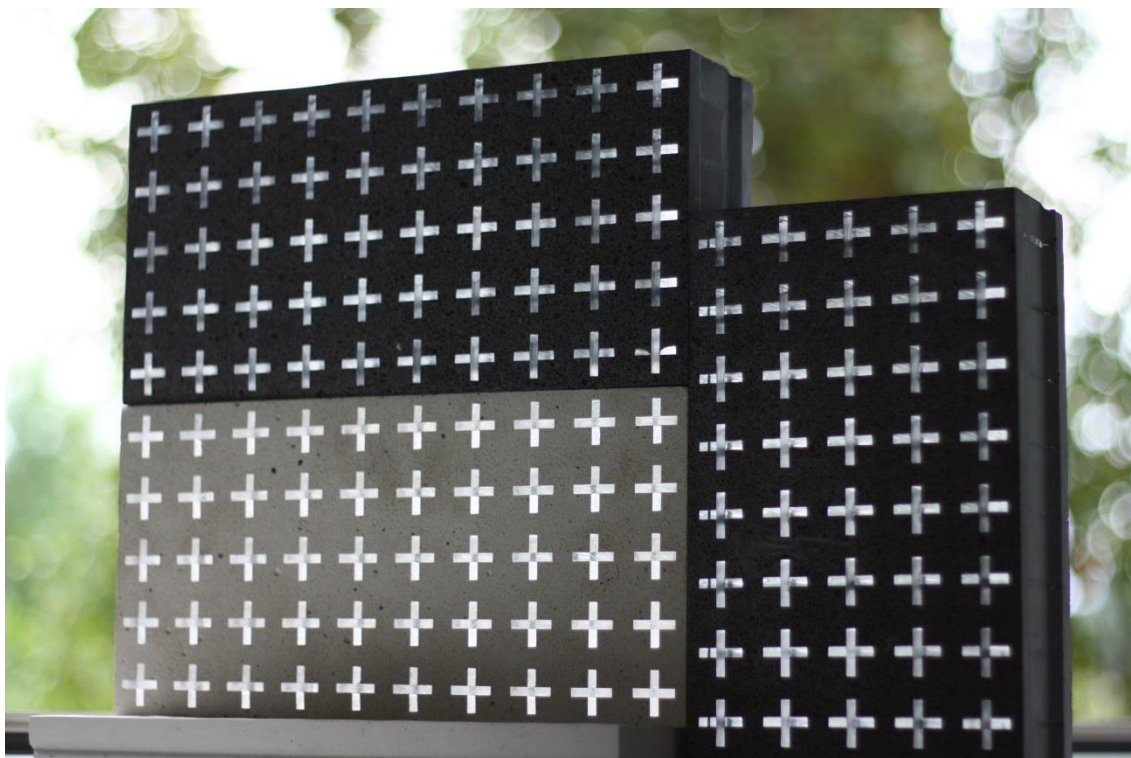
Objem cementového tmelu byl výpočtem stanoven na hodnotu 328 l/m^3 a objem vzduchu 40 l/m^3 . Objemová hmotnost čerstvého betonu byla 1327 kg/m^3 a odchylovala se o 0,5% od výpočtem stanovené hodnoty.

4.1.5.2. Vlastnosti čerstvého betonu ULC D1,2eco – Liapor

Čerstvý beton měl konzistenci vhodnou pro jednoduché zabudování do konstrukce. Byla naměřená velikost rozlití o hodnotě 450 mm, což odpovídá třídě rozlití F3. Čerstvý beton byl kompaktní a nebylo pozorováno odměšování vody.

4.1.6. Mikrobeton LC – Liapor

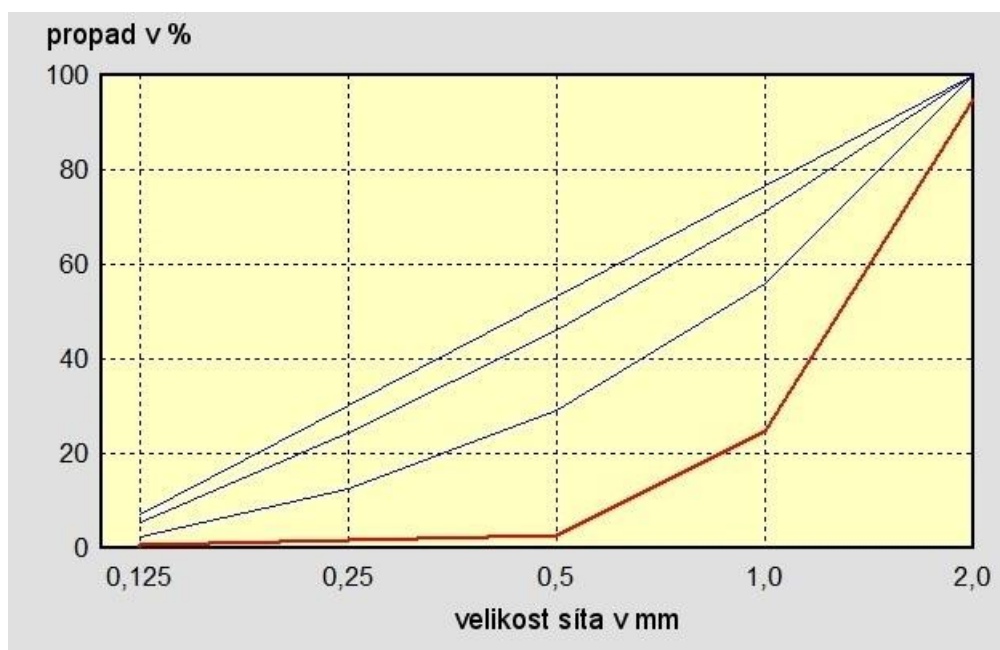
Pro uplatnění ve speciálních stavebních konstrukcích byl vyvinut lehký beton s maximální velikostí zrna kameniva 2 mm. Z důvodu použití výhradně jemného kameniva je vhodnější jej označovat spíše jako mikrobeton. Mikrobeton byl použit jako matrice pro speciální designové tvarovky s názvem LiCrete®, umožňující 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 zbrušeny. Bylo vyhotoveno 7 receptur lehkého mikrobetonu s Liaporem o objemových hmotnostech ve vysušeném stavu 1052 až 1330 kg/m^3 . Rozpětí objemových hmotností odpovídaly i tlakové pevnosti, které dosahovaly hodnot 21,7 až 43,1 MPa.



Obr. 27: Designové tvarovky LiCrete® s lehkým mikrobetonem

4.1.6.1. Materiálové složení mikrobetonu LC – Liapor

Pro výrobu mikrobetonu byl použit bílý cement a příměs. Cementový tmel byl následně obarven černým pigmentem. Kamenivo Liapor bylo před mícháním navlhčeno dodatkovou vodou po dobu 5 minut. Konzistence byla upravována polyfunkční přísadou, která zajistila vhodnou konzistenci a omezení segregace. Jednotlivé receptury mikrobetonu se lišily různým poměrem cementu, příměsi a polyfunkční přísady. Pro dosažení nízkých objemových hmotností byla navíc použita provzdušňovací přísada. Složení mikrobetonu je obchodním tajemstvím společnosti Gravelli, která si ho nepřeje zveřejňovat. Objem cementového tmelu činil 449 l/m^3 . Vypočítaný objem vzduchu byl 30 l/m^3 . Křivku zrnitosti kameniva dle výrobce zobrazuje Obr. 28.



Obr. 28: Křivka zrnitosti kameniva Liapor pro mikrobeton

4.1.6.2. Vlastnosti čerstvého mikrobetonu LC – Liapor

Konzistence byla měřena pomocí rozlívového stolku (Hägermann). Mikrobeton dosahoval rozlítí 110 mm ihned po nadzvednutí zkušebnímu kuželíku a 220 mm po 15 úderech.

4.1.7. Mikrobeton LC – Poraver

Designové tvárnice LiCrete® byly provedeny také v bílé variantě. K tomuto účelu se osvědčilo lehké kamenivo Poraver, které má bílou barvu jak na povrchu, tak uvnitř zrn, viz Obr. 29. Velikost zrna kameniva byla i v tomto případě maximálně 2 mm. Na mikrobeton byly kladeny stejně přísné požadavky na konzistenci a segregaci jako v předchozím případě. V bílé variantě bylo odzkoušeno 8 směsí s rozpětím objemových hmotností ve vysušeném stavu 945 až 1216 kg/m^3 . Objemovým hmotnostem odpovídalo rozpětí tlakových pevností od 17,9 do 29,8 MPa.



Obr. 29: Kamenivo Poraver - různé frakce a řez zrnem kameniva

4.1.7.1. Materiálové složení mikrobeton LC – Poraver

Cementový tmel byl složen z bílého cementu a příměsí. Bělejšího odstínu bylo dosaženo přidáním pigmentu. Objem cementového tmele činil 486 l/m^3 a vypočtený objem vzduchu 26 l/m^3 .

4.1.7.2. Vlastnosti čerstvého mikrobetonu LC – Poraver

Konzistence byla opět měřena pomocí rozlivového stolku Hägermann. Rozlití mikrobetonu bylo 120 mm ihned po nadzvednutí zkušební kuželíku a 190 mm po 15 úderech stolku.

4.1.8. Shrnutí návrhů a vlastností čerstvého betonu

Téma disertační práce bylo úzce provázáno s projektem MPO TIP FR TI 4/159 – „Light structures - progresivní konstrukce z moderních kompozitních materiálů“. Výsledkem spolupráce bylo velké množství navržených receptur a různé druhy lehkého betonu, z nichž byly vybrány takové, které vykazovaly největší potenciál pro zavedení do praxe a splnění cílů disertační práce.

Nejefektivnějšího vylehčení bylo dosaženo pomocí lehkého kameniva Liapor. Objemové tíhy betonu ve vysušeném stavu pod hodnotu 1000 kg/m^3 však bylo možné dosáhnout pouze s provzdušněním cementového tmele. Výroba takového betonu je ovšem značně komplikovaná, a proto byla navržena i receptura nevyužívající provzdušnění a receptura se zvýšeným důrazem na ekonomickou rentabilitu. Aby nedocházelo ke změnám konzistence, muselo být lehké kamenivo Liapor před mícháním navlhčeno dodatkovou vodou. U kameniva Poraver/Liaver problém se změnou konzistence nenastává a není tedy potřeba kamenivo před mícháním vlhčit. Konzistence všech vyrobených lehkých betonů dosahovala velmi dobrých výsledků. Srovnatelných konzistencí bylo dosaženo pomocí zkoušky stupně zhutnitelnosti. Zkoušky rozlitím, které závisí na objemové hmotnosti čerstvého betonu, poskytly různé hodnoty konzistencí a výsledky jsou tedy nerelevantní.

Lehké kamenivo se osvědčilo i při výrobě designových tvarovek LiCrete®. Byly vyvinuty dvě různé receptury pro variantu tvarovek v antracitovém a bílém provedení. Celkově bylo dosaženo vylehčení cementového tmele o 46% v antracitovém provedení a o 47% v bílém provedení oproti původním variantám.

4.2. Vlastnosti ztvrdlého ultralehkého betonu

U lehkých betonů je jednou ze základních měřených vlastností **objemová hmotnost** betonu, která řadí beton do třídy objemové hmotnosti. Jelikož vlhkost výrazně ovlivňuje objemovou hmotnost betonu, uvádí se v platné normě objemová hmotnost LC ve vysušeném stavu. Vysušení vzorku betonu se provádí v sušárně se samočinným udržováním teploty v rozmezí 105 ± 5 °C do ustálené hmotnosti. Objemová hmotnost ve vysušeném stavu se určí podle vztahu:

$$\rho_{dry} = \rho \frac{m_s}{m_m - m_s} \quad (4.1)$$

kde: ρ_{dry} ... objemová hmotnost ve vysušeném stavu [kg/m^3],
 ρ ... objemová hmotnost betonu [kg/m^3],
 m_s ... hmotnost vysušeného vzorku betonu [g],
 m_m ... hmotnost vlhkého vzorku betonu [g].

Další důležitou vlastností betonů sloužící k jejich zařazení je **tlaková pevnost**, která se dle [38] určuje na tělesech tvaru válce nebo krychle (případně trámce) ve stáří betonu 28 dní. I v případě ultralehkého betonu byla základním fyzikálně-mechanickým požadavkem na ultralehké betony tlaková pevnost, která by zaručila zařazení betonu minimálně do pevnostní třídy 12/13. Průměrná tlaková pevnost lehkého betonu f_{lcm} se určí dle vzorce:

$$f_{lcm,(cube)} = \frac{F}{A} \quad (4.2)$$

kde: $f_{lcm,(cube)}$... průměrná hodnota válcové (krychelné) pevnosti v tlaku [MPa],
 F ... maximální síla [N],
 A ... tlačena plocha [mm^2].

Tlaková pevnost byla zjišťována na zkušebních vzorcích tvaru krychle o hraně 150 mm, na trémčích o rozměrech 100×100×400 mm a na válcích o průměru 150 mm a výšce 300 mm. Pro výrobu zkušebních těles tvaru krychle a válce byly použity plastové formy a pro výrobu trémčů ocelové formy.

Zařazení betonu do pevnostní třídy bylo provedeno na základě kritérií uvedených v [3]. Při větším počtu zkušebních těles byla charakteristická pevnost betonu dopočítána na základě vztahů uvedených v [39] a [40].

Dalším důležitým parametrem potřebným pro návrh konstrukcí z betonů je **modul pružnosti** měřený podle [41] a [42]. Rozdíly mezi oběma zkušebními postupy jsou shrnuty v [43]. Nejčastěji byl modul pružnosti měřen na tělesech tvaru trámce o rozměrech 100×100×400 mm, méně často na tělesech tvaru válce o poloměru 150 mm a výšce 300 mm. Důvodem byla pracnější úprava horní plochy u těles tvaru válce. Vlivu tvaru a úpravy vzorků na

velikost modulu pružnosti si všímá např. Hůňka v článku [44] a [45]. Modul pružnosti lehkých betonů je možné určit i podle [2], dle vzorce:

$$E_{lcm} = E_{cm} \eta_E \quad (4.3)$$

kde: E_{lcm} ... průměrná hodnota modulu pružnosti lehkého betonu [GPa],
 E_{cm} ... sečnový modul pružnosti betonu odpovídající pevnostní třídy [GPa],
 η_E ... převodní součinitel pro výpočet modulu pružnosti:
 $\eta_E = (\rho/2200)^2$
 ρ ... objemová hmotnost lehkého betonu ve vysušeném stavu.

Tahová pevnost u betonů dosahuje hodnoty obvykle kolem 1/10 z hodnoty pevnosti tlakové. Ovšem měření tahové pevnosti v dostředném tahu je v praxi dosti obtížné. Proto byla měřena pevnost v příčném tahu a pevnost tahová byla následně dopočítána podle vztahu (4.4) uvedeného v [2]:

$$f_{ctm} = 0,9 f_{ctm,sp} \quad (4.4)$$

kde: f_{ct} ... pevnost v dostředném tahu [MPa],
 $f_{ct,sp}$... pevnost v příčném tahu [MPa],

$$f_{ctm,sp} = \frac{2 F}{\pi l d} \quad (4.5)$$

kde: F ... maximální síla [N],
 l ... délka dotykové přímky [mm],
 d ... příčný rozměr tělesa [mm].

Pevnost v příčném tahu byla měřena dle normy [46] na tělesech tvaru krychle o hraně 150 mm.

Tahovou pevnost lehkého betonu je možné určit podle [2], jako:

$$f_{lctm} = f_{ctm} \eta_1 \quad (4.6)$$

kde: f_{lctm} ... průměrná hodnota pevnosti lehkého betonu v dostředném tahu [MPa],
 f_{ctm} ... průměrná hodnota pevnosti betonu v dostředném tahu [MPa],
 η_1 ... součinitel pro stanovení pevnosti v tahu:
 $\eta_1 = 0,4 + 0,6 \rho/2200$
 ρ ... objemová hmotnost lehkého betonu ve vysušeném stavu.

U vybraných betonů byla měřena **lomová energie**, která je důležitým údajem pro nelineární výpočtové modely pomocí metody konečných prvků [47]. Lomová energie byla měřena na tělesech tvaru trámce o rozměrech 100×100×400 mm a byla určena podle vztahu:

$$G_f = \frac{W_f}{A} \quad (4.7)$$

kde: G_f ... lomová energie [J/m²],
 W_f ... lomová práce [J],
 A ... porušovaná plocha [m²].

U vybraných typů lehkých betonů byla stanovena **hloubka průsaku tlakovou vodou** dle [48] a odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám (CHRL) dle [49]. Při měření hloubky průsaku byla stanovena maximální hodnota průsaku vody do betonu při působení tlaku 500 ±50 kPa po dobu 72 ±2 hodin. U zkoušky **CHRL** je stanovena odolnost betonu při působení chloridů v kombinaci se zmrazovacími a rozmrazovacími cykly. Výsledek je vyjádřen jako odpad betonu v g/m² za určitý počet zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů. **Součinitel tepelné vodivosti** λ byl měřen pouze u varianty betonu ULC D1,0 – Liapor, u které se předpokládala nejnižší dosažená hodnota tohoto parametru. Stanovení součinitele tepelné vodivosti bylo prováděno na Ústavu pozemního stavitelství FAST VUT v Brně. K měření tepelné vodivosti byla použita metoda s příložnou dotykovou sondou zařízení ISOMET model 2104 – Heat transfer analyzer. Veškeré zkoušky byly provedeny na tělesech tvaru krychle o hraně 150 mm.

Součinitel dotvarování byl měřen u lehkých betonů s kamenivem Liapor v obou hmotnostních třídách. Výpočet součinitele dotvarování byl proveden podle [2], přílohy B:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0) \quad (4.8)$$

kde: φ_0 ... základní součinitel dotvarování [-]:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0),$$

φ_{RH} ... součinitel vystihující vliv rel. vlhkosti na základní součinitel dotvarování:

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1-RH/100}{0,1 \sqrt[3]{h_0}} \quad \text{pro } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa},$$

RH ... relativní vlhkost prostředí [%],

h_0 ... náhradní rozměr prvku [mm]:

$$h_0 = \frac{2A_c}{u},$$

A_c ... plocha průřezu [mm²],

u ... obvod prvku vystavený okolnímu prostředí [mm],

$\beta(f_{cm})$... součinitel vystihující vliv pevnosti betonu na základní součinitel dotvarování:

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

f_{cm} ... průměrná pevnost betonu v tlaku ve stáří 28 dní [MPa],

$\beta(t_0)$... součinitel vystihující vliv stáří betonu v okamžiku vnesení zatížení na základní součinitel dotvarování:

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0,1+t_0^{0,2})}$$

t_0 ... stáří betonu ve dnech v okamžiku vnesení zatížení,

$\beta_c(t, t_0)$... součinitel časového průběhu dotvarování pro zatížení:

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t-t_0)}{(\beta_H+(t-t_0))} \right]^{0,3},$$

t ... stáří betonu ve dnech v uvažovaném okamžiku,

β_H ... součinitel závislý na relativní vlhkosti a na náhradním rozměru prvku:

$$\beta_H = 1,5[1 + (0,012 RH)^{18}]h_0 + 250 \leq 1500 \quad \text{pro } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa.}$$

Pro lehký beton je zapotřebí součinitel dotvarování upravit o hodnotu součinitele $(\rho/2200)^2$. Poměrná přetvoření od dotvarování lehkého betonu je nutno ještě vynásobit součinitelem η_2 :

kde $\eta_2 = 1,3$ pro $f_{lck} \leq LC 16/18$ a

$\eta_2 = 1,0$ pro $f_{lck} \geq LC 20/22$.

U vybraných typů betonů byly provedeny **dlouhodobé zkoušky tlakové pevnosti**. Pro beton s lehkým kamenivem platí při výpočtu pevnosti v čase podle [2] stejný vzorec jako pro běžný beton:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cm} \quad (4.9)$$

kde: $f_{cm}(t)$... průměrná hodnota pevnost betonu v tlaku ve stáří t dní [MPa],

f_{cm} ... průměrná hodnota pevnost betonu v tlaku ve stáří 28 dní [MPa],

$\beta_{cc}(t)$... součinitel závisící na stáří betonu [-]:

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

s koeficient závisející na druhu cementu (0,2 pro CEM I 52,5R a 42,5R),

t ... stáří betonu ve dnech.

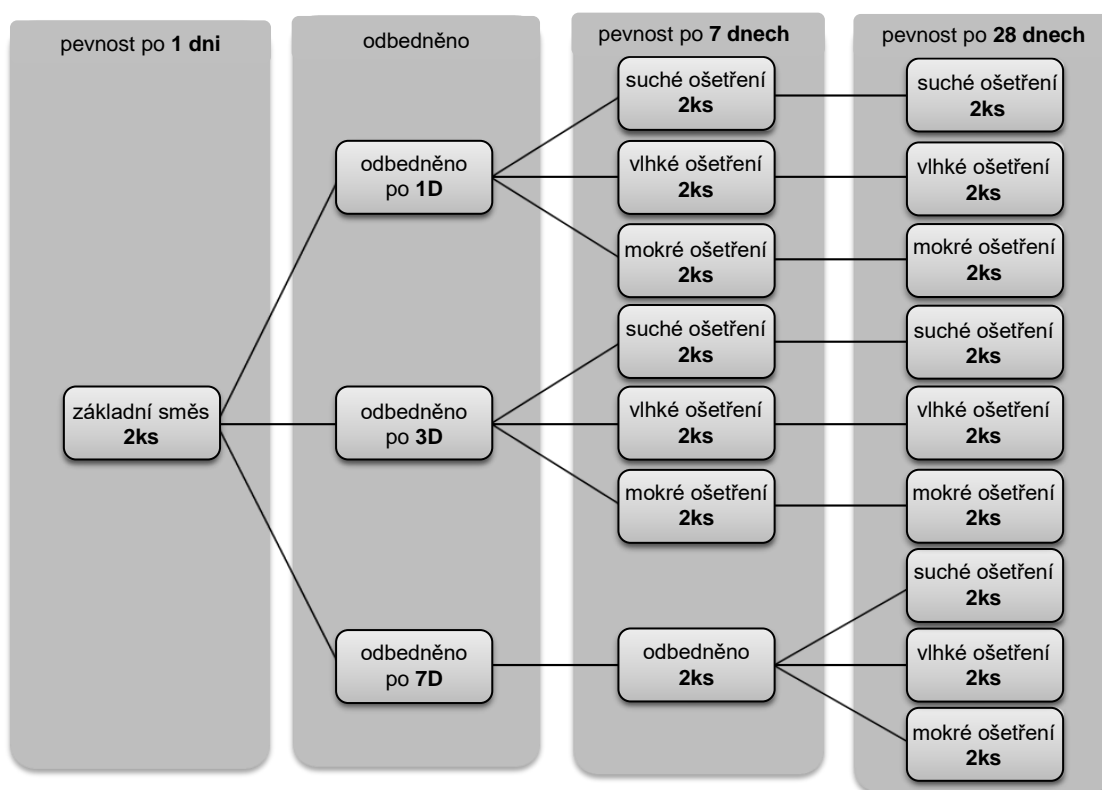
Ošetření vzorků pro zkoušku dotvarování a smršťování probíhalo standardně se zavedenými postupy na stavební fakultě. Po vybetonování byla zkušební tělesa do dvou hodin uložena pod hladinu vody. Odbednění vzorků proběhlo po 24 hodinách, kdy byly vzorky osazeny zařízením pro záznam dat a opět byly uloženy pod hladinu vody. Po sedmi dnech byla tělesa přenesena do klimatizované místnosti, kde byla již uložena na vzduchu při konstantní teplotě a vlhkosti. Síla pro dotvarování byla do vzorků vnesena pomocí pružiny po 28 dnech.

4.2.1. Vliv způsobu ošetření vzorků na tlakovou pevnost

V rámci prováděných experimentálních činností byl testován vliv různého okamžiku odbednění zkušebních vzorků z ULC, přičemž byla sledována změna krychelné pevnosti.

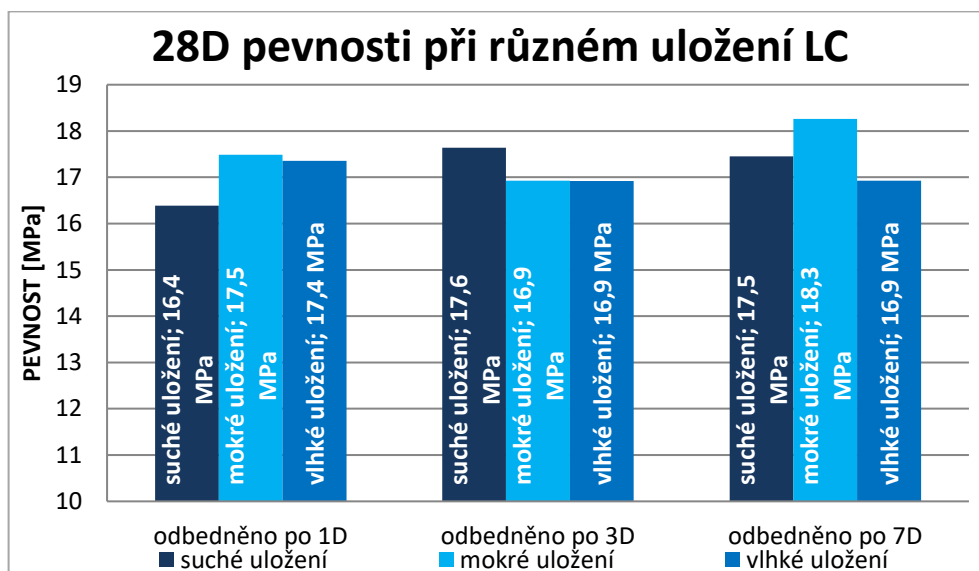
Testován byl vliv odbednění vzorků po jednom, třech a sedmi dnech. Do okamžiku odbednění byly vzorky ošetřovány v plastové formě, kde byly chráněny před ztrátou vlhkosti. Zkoušky byly prováděny na vzorcích z betonu ULC D1,0 - Liapor.

Na zkušební vzorky byly aplikovány tři různé postupy ošetřování. Jedna třetina vzorků nebyla po odbednění ošetřována vůbec a byla pouze uložena v klimatizované místnosti s teplotou $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkostí vzduchu $60\% \pm 10\%$ (suché ošetřování). Druhá třetina vzorků byla po odbednění obalena vlhkou tkaninou a chráněna proti ztrátě vlhkosti (vlhké ošetřování). Zbytek vzorků byl ihned po odbednění uložen do vody (mokrý ošetřování). Veškeré vzorky byly 2 dny před 28denní tlakovou zkouškou umístěny ve zkušební místnosti (a dále již nebyly ošetřovány) pro vyrovnání vlhkosti a teploty zkoušených těles. Schéma uložení, času odbednění a počtu zkoušených těles je pro přehlednost uvedeno na Obr. 30.

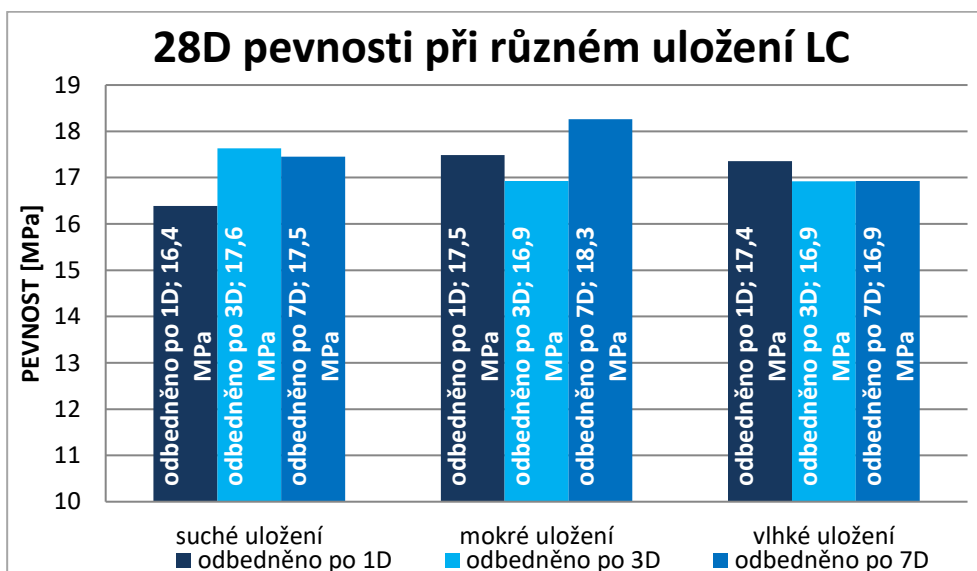


Obr. 30: Schéma uložení a ošetřování vzorků

Dosažená 28denní krychelná pevnost je zobrazena v následujících sloupcových grafech (viz Obr. 31 a Obr. 32). Vývoj pevnosti v čase pro různé kombinace ošetřování a časy odbednění je zobrazen na Obr. 33.

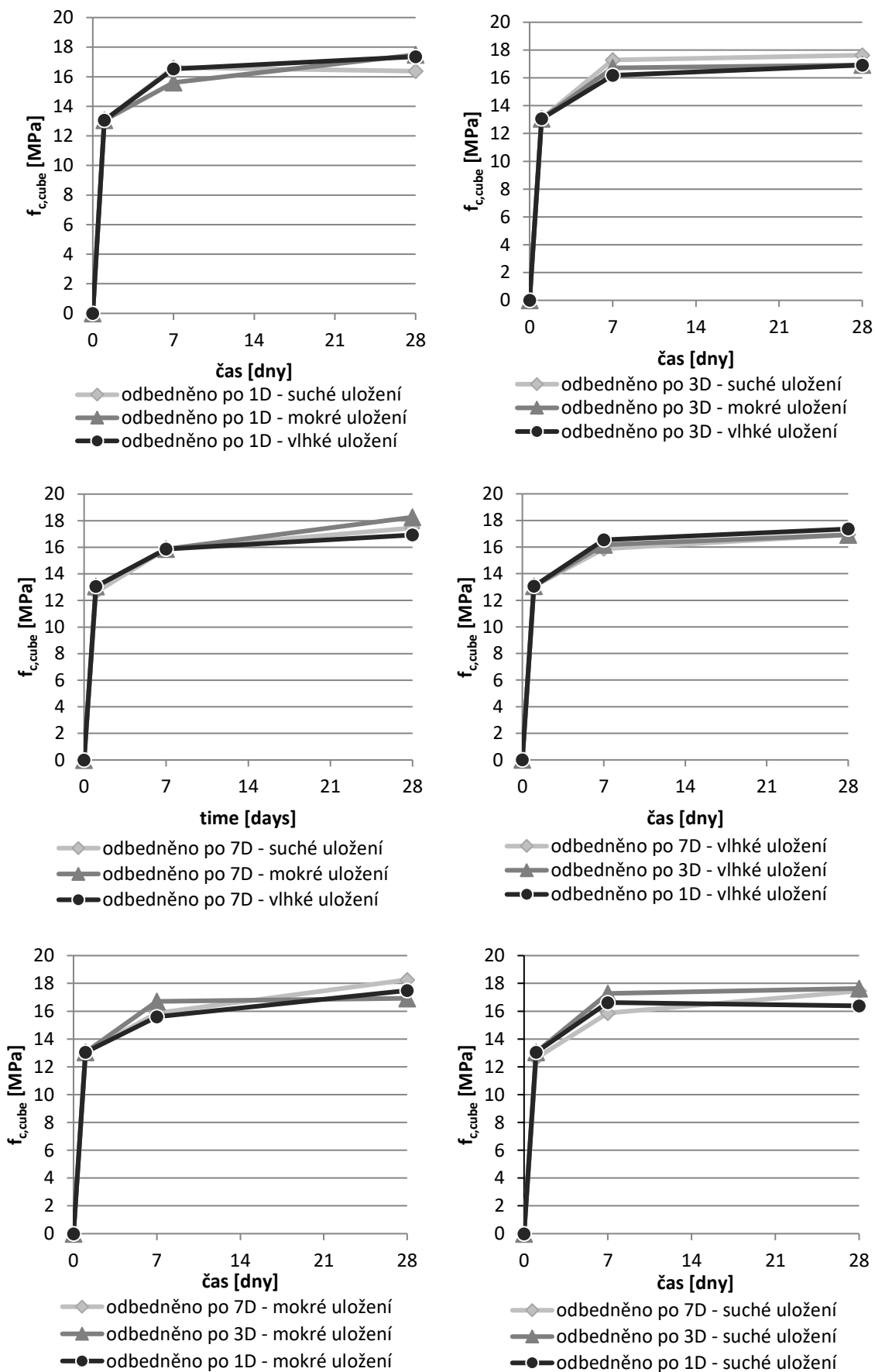


Obr. 31: Závislost 28denní tlakové (krychelné) pevnosti ULC D1,0 na čase odbednění



Obr. 32: Závislost 28denní tlakové (krychelné) pevnosti ULC D1,0 na způsobu ošetřování

Z uvedených grafů (Obr. 31, Obr. 32 a Obr. 33) vyplývá, že vliv různé doby odbednění a různých způsobů ošetřování na výslednou pevnost ULC není v zásadě významný. Jelikož byly sledované parametry stanoveny pouze na dvojici vzorků, jsou výsledky statisticky neprůkazné a slouží pouze k orientačnímu určení chování lehkého betonu při různých kombinacích ošetřování a doby odbednění. Relativně nejhorších výsledků bylo, v souladu s očekáváním, dosaženo při suchém ošetřování a odbednění po jednom dni. Pokles pevnosti ULC odbedněného po jednom a sedmi dnech při suchém ošetřování je zhruba 10% oproti vzorkům vykazujícím nejvyšší dosažené tlakové pevnosti (tj. vzorky s mokrým uložením odbedněné po 7 dnech). Ovšem například Price [50] uvádí, že u běžného betonu může být tento pokles až 50%. Menší náchylnost na způsob a dobu odbednění lze u lehkého betonu vysvětlit pomocí tzv. samoošetřování, viz kapitola 3.4.9.

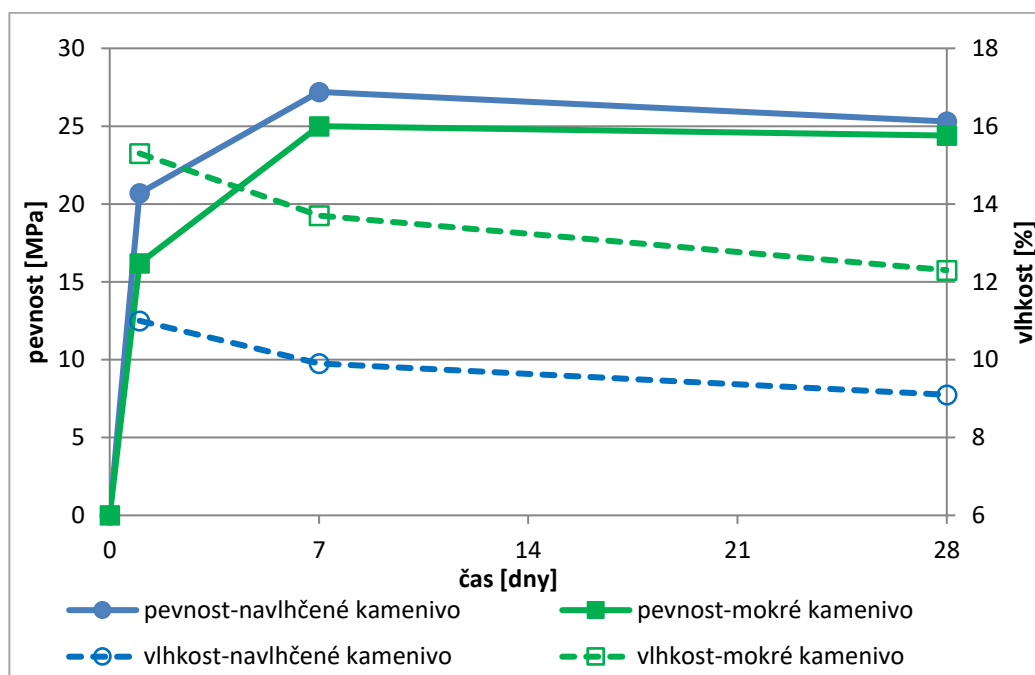


Obr. 33: Vývoj pevnosti v čase pro různé časy odbednění a typy uložení

4.2.2. Vliv předvlhčení kameniva na tlakovou pevnost ULC - Liapor

Ošetření kameniva před mícháním betonu je velice důležité a může být provedeno různými způsoby. Kamenivo je možné navlhčit tzv. dodatkovou vodou před vlastním mícháním betonu v míchacím zařízení nebo může být externě saturováno před výrobou betonu. Experimentálně byl ověřen rozdíl na tlakových pevnostech mezi oběma způsoby navlhčení kameniva. Dodatková voda (navlhčené kamenivo) byla aplikována po dobu 5 minut v dávce 40 l vody/1 m³ betonu. Kamenivo bylo následně promícháváno intenzitou 20 ot/min. Druhá úprava spočívala v úplném nasycení kameniva vodou namočením kameniva po dobu 24 hodin do vody (mokrý kamenivo). Odlišnost je patrná ve vývoji tlakové pevnosti v čase, viz graf na Obr. 34. Rychlost nárůstu pevnosti betonu u varianty s mokrým kamenivem nebyla tak razantní jako u betonu s kamenivem navlhčeným. V grafu je zaznamenána i změna vlhkosti v čase pro oba zkoušené druhy betonu.

Součástí testování citlivosti dosahovaných parametrů v závislosti na úpravě kameniva byla i dlouhodobá měření se zahrnutím ročních pevností. Zjištěné závěry jsou podrobně popsány v rámci kapitoly 4.2.6.9.



Obr. 34: Graf závislosti pevnosti a vlhkosti na čase pro dvě varianty betonu ULC D1,2eco

4.2.3. ULC D1,0 - Liapor

Nejvíce experimentů bylo provedeno s ultralehkým betonem s objemovou hmotností ve vysušeném stavu nižší než 1000 kg/m³. U betonu byly provedeny všechny výše popsané zkoušky a bylo provedeno srovnání s normovými hodnotami získanými z [2].

4.2.3.1. Objemová hmotnost ve vysušeném stavu

Průměrná objemová hmotnost betonu ULC D1,0 – Liapor v nevysušeném stavu (s průměrnou vlhkostí 11,3%) stanovená na krychlích o délce strany 150 mm byla 1090 kg/m³. Objemová hmotnost tohoto betonu ve vysušeném stavu byla v průměru 970 kg/m³.

Shrnutí:

Lehký beton lze dle objemové hmotnosti ve vysušeném stavu zařadit do třídy objemové hmotnosti D1,0.

4.2.3.2. Tlaková pevnost

Tlaková pevnost byla zjišťována při všech zkouškách provedených s ultralehkým betonem, čímž bylo získáno velké množství naměřených dat potřebných pro přesnější statistické vyhodnocení pevnosti betonu.

Ultralehký beton dosahoval průměrné krychelné tlakové pevnosti $f_{icm,cube}$ po 28 dnech 19,95 MPa se směrodatnou odchylkou 2,44 MPa. Velikost zkušební souboru byla 24 vzorků. Charakteristická hodnota krychelné tlakové pevnosti $f_{lck,cube}$ činila 15,65 MPa. Charakteristická hodnota tlakové pevnosti byla stanovena podle [39] a [40]. Naměřené údaje krychelné pevnosti jsou zobrazeny v Tab. 15 (šedě zobrazené hodnoty vlhkosti jsou odvozené).

Tab. 15: Tlakové pevnosti ULC D1,0 - Liapor stanovené na krychlích o hraně 150 mm ve stáří 28 dní

ozn. vzorku	$f_{icm,cube}$ [MPa]		s [MPa]	vlhkost		ρ_{moist} [kg*m ⁻³]		ρ_{dry} [kg*m ⁻³]		objemová třída	pevnostní třída
	jedn.	průměr		[%]	\pm (5)	průměr	\pm (5)	průměr			
LC5_1	17,8	19,9	2,44	11,99	1060	1070	970	945	D 1,0	12/13	
	18,7			12,00	1045			935			
LC5_2	21,2			12,27	1080			965			
	19,3			12,00	1095			980			
LC5_3	16,6			12,43	1015			905			
	17,9			12,45	1025			915			
	18,2			12,55	1045			930			
LC5_4	20,1			12,37	1055			940			
	21,3			12,30	1080			960			
	22,1			12,30	1115			995			
LC5_5	19,7			10,59	1075			970			
	15,9			10,50	1105			1000			
LC5_5	21,6			10,49	1080			975			
	20,7			10,00	1060			965			
	22,6			10,07	1125			1020			
LC5_6	24,0			10,00	1150			1045			
	16,8			10,00	975			885			
	17,1			10,00	985			895			
LC5_6	18,4			10,00	1025			930			
	19,1			10,00	1030			935			
	22,3			12,00	1105			990			
LC5_7	20,6			12,00	1115			995			
	21,4			12,00	1125			1005			
	25,6			12,00	1125			1005			
	11,92	1205	1080	1080							

Průměrná tlaková pevnost stanovená na tělesech tvaru válce f_{lcm} byla 18,42 MPa se směrodatnou odchylkou 1,21 MPa. Výběrový soubor v tomto případě obsahoval 5 vzorků. Charakteristická hodnota válcové pevnosti v tlaku f_{lck} , i přes nízký počet vzorků, dosahovala hodnoty 14,12 MPa. Naměřené hodnoty zobrazuje Tab. 16.

Tab. 16: Tlaková pevnost a modul pružnosti na válci průměru 150 mm a výšky 300 mm ve stáří 28 dní

ozn. vzorku	f_{lcm} [MPa]		s [MPa]	vlhkost [%]	ρ_{moist} [kg*m ⁻³]		ρ_{dry} [kg*m ⁻³]		E [MPa]	
	jedn.	průměr			≐ (5)	průměr	≐ (5)	průměr	jedn.	průměr
LC5	18,8	18,4	1,21	13,61	1050	1060	925	930	-	8600
	19,1			13,00	1060		935		9200	
	16,4			13,00	1055		935		8400	
	18,2			13,00	1065		940		-	
	19,5			13,00	1070		945		8300	

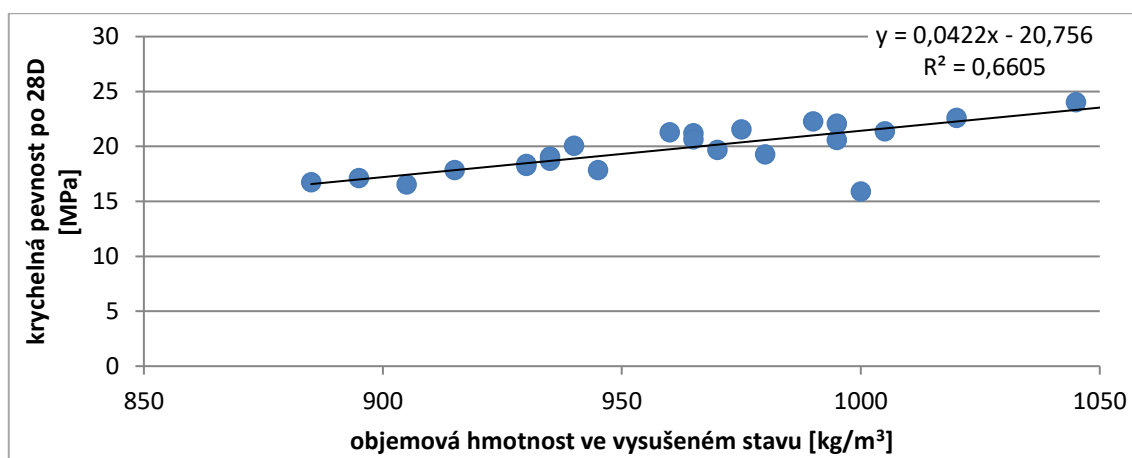
Průměrná tlaková pevnost změřená na trámcích $f_{lcm,prism}$ dosahovala hodnoty 13,09 MPa s výběrovou směrodatnou odchylkou 2,16 MPa. Hodnoty byly zjištěny na souboru 3 vzorků a jednotlivé naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 17 .

Tab. 17: Tlaková pevnost a modul pružnosti stanovený na trámcích 100×100×400 mm ve stáří 28 dní

ozn. vzorku	$f_{lcm,prism}$ [MPa]		s [MPa]	vlhkost [%]	ρ_{moist} [kg*m ⁻³]		ρ_{dry} [kg*m ⁻³]		E [MPa]	
	jedn.	průměr			≐ (5)	průměr	≐ (5)	průměr	jedn.	průměr
LC5.7	13,0	13,1	2,2	12,29	1085	1120	965	990	9800	9100
	15,3			12,29	1125		1005		8700	
	11,0			12,29	1135		1010		8700	

Shrnutí:

Celkově lze uvést, že ULC D1,0 - Liapor lze zařadit do pevnostní třídy LC12/13. Zařídění do pevnostní třídy bylo provedeno jak podle válcové, tak podle krychelné tlakové pevnosti. Mezi objemovou hmotností a tlakovou pevností ULC D1,0 - Liapor si lze všimnout zřetelné závislosti, jak dokazuje Obr. 35. Změnu krychelné pevnosti lehkého betonu lze v 66% vysvětlit změnou objemové hmotnosti při uvažování lineární aproximace.



Obr. 35: Závislost mezi tlakovou pevností a objemovou hmotností

4.2.3.3. Modul pružnosti

Modul pružnosti lze určit podle vzorce 4.3, který při uvažování $E_{cm} = 15 \text{ GPa}$ (C 12/15) a převodního součinitele $\eta_E = 0,1944$ (pro $\rho_{dry} 970 \text{ kg/m}^3$) vychází 5,25 GPa. Průměrná hodnota modulu pružnosti na válci vycházela 8,6 GPa s výběrovou směrodatnou odchylkou 0,49 MPa a průměrná hodnota modulu pružnosti měřená na trámcích byla 9,1 GPa s výběrovou směrodatnou odchylkou 0,64 MPa. Průměrné hodnoty byly získány vždy na třech tělesech a jsou spolu s dílčími výsledky uvedeny v Tab. 16 a Tab. 17.

Shrnutí:

Experimentálně stanovený modul pružnosti ULC D1,0 – Liapor se pohybuje kolem hodnoty 9 GPa. Rozdíl mezi normovou hodnotou modulu pružnosti a hodnotou modulu pružnosti experimentálně stanovenou činí 63,8% v případě těles tvaru válce a 73,3% v případě těles tvaru trámce. I přes vyšší štíhlostní poměr u těles tvaru trámce jsou dosahovány vyšší moduly pružnosti právě na těchto tělesech. Některé důvody způsobující rozdílné moduly pružnosti jsou uvedeny v [44], [45] a může se jednat například o úpravu horní plochy u vzorků tvaru válce, zkoušení betonu ve směru hutnění u válců a kolmo na směr hutnění u trámců atd.

Z naměřených výsledků lze vyvodit závěr, že modul pružnosti stanovený postupem podle normy [2] je značně podhodnocený a může vést k neekonomickému návrhu konstrukcí z ultralehkých betonů.

4.2.3.4. Tahová pevnost

Průměrná pevnost v příčném tahu měřená na třech zkušebních vzorcích dosahovala velikosti 1,2 MPa s výběrovou směrodatnou odchylkou 0,1 MPa, viz Tab. 18. Orientační velikost pevnosti betonu v dostředném tahu vychází podle rovnice 4.4 hodnotou 1,08 MPa. Vypočítaná velikost pevnosti v dostředném tahu dle vztahu 4.6 (při uvažování $f_{ctm} = 1,6 \text{ MPa}$ a $\rho_{dry} 970 \text{ kg/m}^3$) je 1,06 MPa.

Tab. 18: Naměřené údaje pevnosti v příčném tahu ve stáří vzorků 28 dní

ozn. vzorku	$f_{ctm,sp}$ [MPa]		s [MPa]	vlhkost [%]	ρ_{moist} [kg*m ⁻³]		ρ_{dry} [kg*m ⁻³]		objemová třída
	jedn.	průměr			≐ (5)	průměr	≐ (5)	průměr	
LC5.7	1,1	1,2	0,1	12,00	1185	1170	1060	1050	D 1,2
	1,3			12,00	1155		1030		
	1,2			12,00	1170		1045		

Shrnutí:

Přímé měření tahové pevnosti v dostředném tahu je značně obtížné, a proto byla měřena pevnost v příčném tahu, ze které byla pevnost v dostředném tahu dopočítána podle vztahů uvedených v [2]. Rozdíl mezi naměřenou hodnotou tahové pevnosti a hodnotou pevnosti vypočítanou podle normy dosahoval 1,9%. Z výsledku je možné konstatovat, že byla dosažena dobrá shoda mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami tahové pevnosti dle normy.

4.2.3.5. Hloubka průsaku

Hloubka průsaku byla stanovena podle [48]. V důsledku vnitřní vlhkosti lehkého kameniva nebyla hloubka průsaku zcela zřetelná jako v případě běžného betonu, viz Obr. 36. Průměrná hloubka průsaku tlakovou vodou stanovená na 4 vzorcích byla cca 9,8 mm.



Obr. 36: Velikost hloubky průsaku při působení tlakové vody na beton ULC D1,0 – Liapor

Shrnutí:

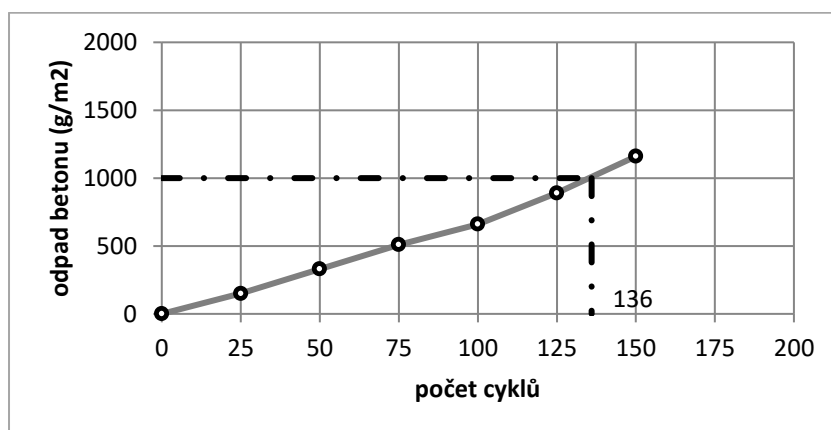
Dosažený výsledek je z hlediska návrhu vodonepropustného lehkého betonu velmi dobrý. Větší zřetelnosti hloubky průsaku při zkoušce by v případě lehkých betonů bylo dosaženo například přidáním fenolftaleinového roztoku do tlakové vody.

4.2.3.6. Odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám

Na rozdíl od normou definovaného postupu byla zkouška CHRL nestandardně zkoušena na dolní podstavě krychle. Tato změna nastala z důvodu poškození povrchu u horní stěny, ke kterému došlo patrně již při odformování. Porušený povrch po 150 cyklech ukazuje Obr. 37. Závislost odpadu betonu na počtu cyklů je zobrazena na Obr. 38. Při 136 cyklech dojde k odpadu 1000 g/m². Výsledné zatřídění betonu je tedy D1=136.



Obr. 37: Zkoušená dolní podstava po 150 cyklech (boční pohled)



Obr. 38: Závislost množství odpadu na počtu cyklů

Shrnutí:

Výsledky z provedených zkoušek je nutné brát pouze jako orientační. Důvodem je zmíněné nestandardní zkoušení spodní plochy vzorků, která může být ovlivněna odbedňovacím přípravkem. (K odbednění byl použit odbedňovací přípravek Addiment Trennmittel TR5 firmy Sika). Příčinu vyšší odolnosti betonu proti CHRL je možné hledat v použití provzdušňovací přísady, která byla primárně použita k dosažení hmotnostní třídy D1,0 a sekundárně zlepšila i odolnost betonu proti působení chemických rozmrazovacích látek.

4.2.3.7. Součinitel tepelné vodivosti

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 0,3 W/(m·K) při ustálené vlhkosti na hodnotě 6,5% po 20 dnech. Pro srovnání, součinitel tepelné vodivosti běžného betonu má hodnotu cca 1,36 W/(m·K).

Shrnutí:

Naměřená hodnota součinitele tepelné vodivosti ultralehkého betonu je 4,5x nižší než hodnota součinitele tepelné vodivosti běžného betonu. Minimální tloušťka obvodové stěny z ULC, potřebná z hlediska tepelně izolačních požadavků staveb (při uvažování požadovaného

součinitele prostupu tepla $0,30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$), by musela dosahovat tloušťky 850 mm . Takto navržená stavba je ovšem značně neekonomická.

4.2.3.8. Lomová energie

Velikost lomové energie u betonu s objemovou třídou D1,0 dosahovala hodnoty $19,7 \text{ J}/\text{m}^2$ s výběrovou směrodatnou odchylkou $6,42 \text{ J}/\text{m}^2$. Údaj byl získán na třech vzorcích. Současně s lomovou energií byl na vzorcích (4 ks) dopočítán modul pružnosti hodnotou $9,3 \text{ GPa}$ s výběrovou směrodatnou odchylkou $1,33 \text{ GPa}$.

Tab. 19: ULC D1,0 - Liapor model efektivní trhliny

	označení	jednotka	vzorek	hodnota	průměr	s
Modul pružnosti	E_c	GPa	LC1,0-1	10,3	9,3	1,33
			LC1,0-2	10,4		
			LC1,0-3	7,6		
			LC1,0-4	8,7		
Efektivní lomová houževnatost	K_{ice}	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	LC1,0-1	0,278	0,283	0,0192
			LC1,0-2	0,311		
			LC1,0-3	0,268		
			LC1,0-4	0,275		
Lomová energie	G_F	J/m^2	LC1,0-1	15,6	19,7	6,42
			LC1,0-2	-		
			LC1,0-3	16,4		
			LC1,0-4	27,1		

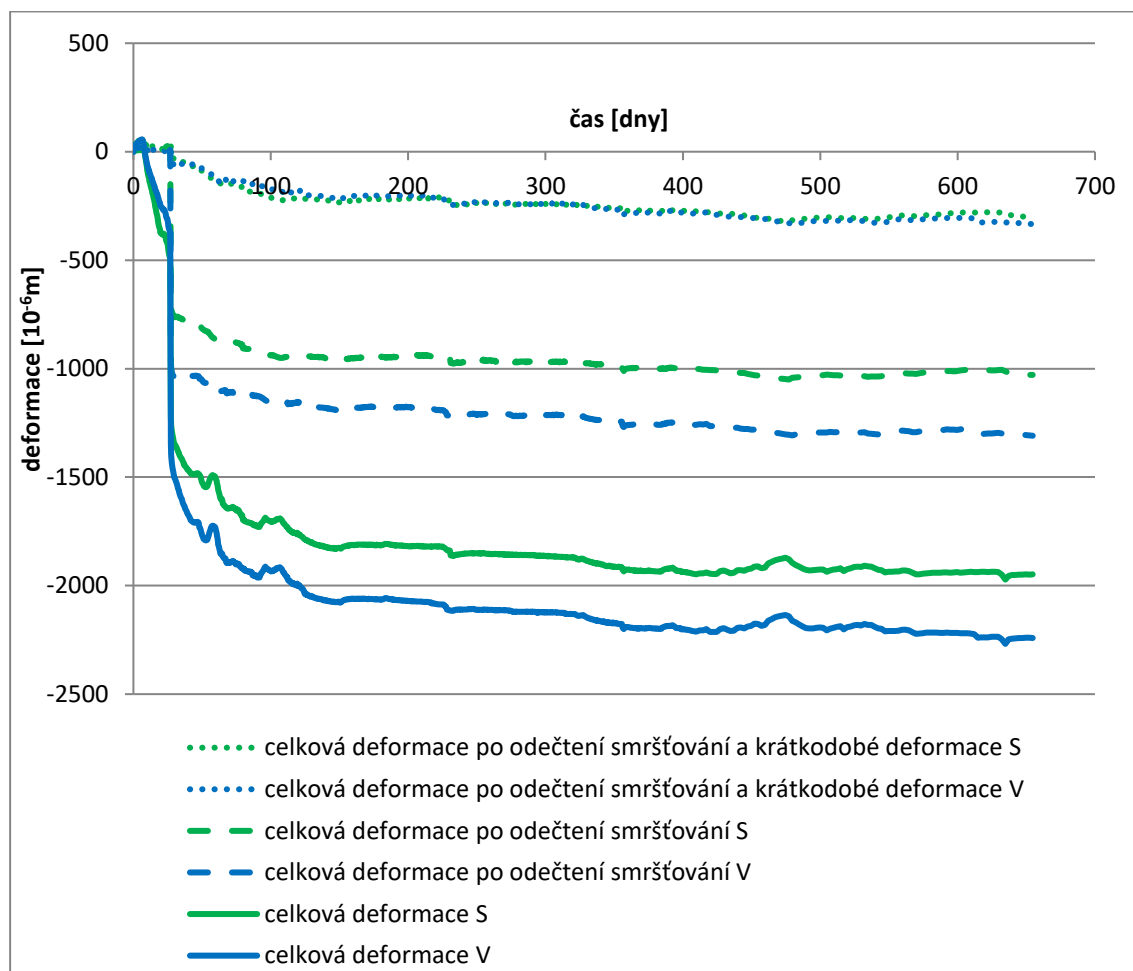
Shrnutí:

Hodnota lomové energie lehkého betonu ULC D1,0 se pohybuje pouze kolem jedné desetiny hodnoty lomové energie běžného betonu (C30/37). Při takto nízkých hodnotách lomové energie dosahuje směrodatná odchylka více jak 30% naměřené hodnoty. Z naměřených údajů vyplývá, že ULC D1,0 vykazuje značně křehké chování, což bylo pozorováno i při dalších experimentech. Současně s měřením lomové energie byl dopočítán modul pružnosti, jehož velikost byla $9,3 \text{ GPa}$. Hodnoty modulů pružnosti naměřené při zkouškách lomové energie korespondují s výsledky stanovenými experimentálně podle [42].

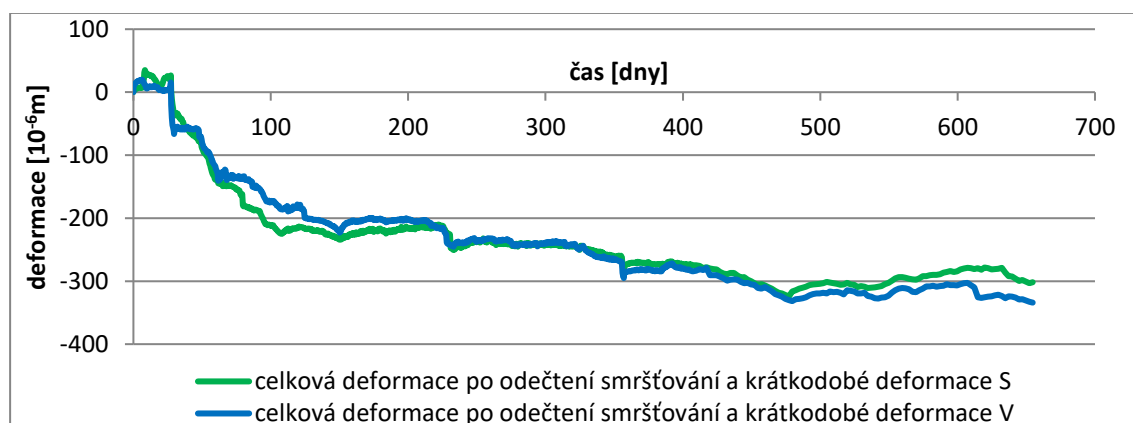
4.2.3.9. Dotvarování a smršťování betonu ULC D1,0 – Liapor

Experimenty pro určení velikosti dotvarování a smršťování byly provedeny opět s různou vlhkostí pórovitého kameniva. Ve variantě označené písmenem „S“ (viz. zelená barva v grafech) bylo kamenivo standardně navlhčeno dodatkovou vodou před mícháním. U varianty označované písmenem „V“ (modrá barva) bylo kamenivo před zkouškou uloženo po dobu 24 hodin ve vodě. Velikost napětí pro dotvarování byla volena jako $1/3$ ze střední krychelné pevnosti betonu, která byla zjištěna experimentálně ve stáří vzorků 28 dní. Velikost napětí pro měření dotvarování u varianty „V“ byla $3,3 \text{ MPa}$ a u varianty „S“ $2,7 \text{ MPa}$. Velikost celkové deformace a smršťování po dobu dvou let je zobrazena na Obr. 39. Velikost celkové deformace

s odečteným vlivem smršťování a krátkodobé deformace (od vneseného působícího zatížení) je zobrazena na Obr. 40.



Obr. 39: Deformace betonu ULC D1,0 -Liapor v závislosti na čase



Obr. 40: Celková deformace po odečtení smršťování a krátkodobé deformace

Velikosti součinitelů dotvarování vyhodnocených z provedených experimentů jsou uvedeny v Tab. 20.

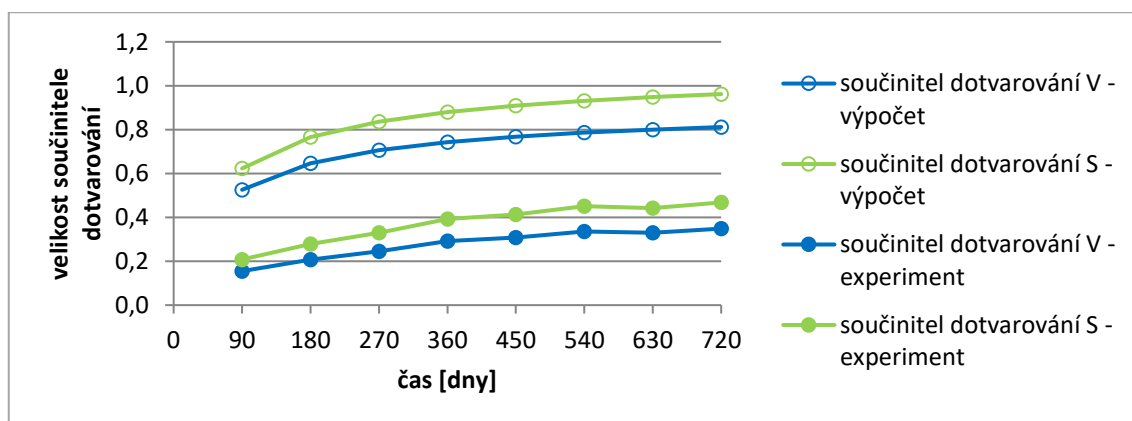
Tab. 20: Naměřené velikosti součinitelů dotvarování ULC D1,0 – Liapor

t [dny]	90	180	270	360	450	540	630	720
$\varphi_{LCexp.}(t,t_0)=$	0,208	0,278	0,330	0,392	0,413	0,451	0,442	0,468
$\varphi_{LCexp.}(t,t_0)=$	0,155	0,207	0,246	0,292	0,308	0,336	0,329	0,349

Normový výpočet součinitele dotvarování je proveden podle normy ČSN EN 1992-1-1, příloha B (4.8) a výsledky udává Tab. 21. Grafické porovnání naměřených a vypočítaných hodnot součinitele dotvarování je zobrazeno na Obr. 41.

Tab. 21: Normový výpočet součinitele dotvarování pro ULC D1,0 – Liapor

t [dny]	90	180	270	360	450	540	630	720
$\varphi_{LC}(t,t_0)=$	0,623	0,766	0,836	0,880	0,910	0,932	0,948	0,962
$\varphi_{LC}(t,t_0)=$	0,526	0,646	0,706	0,742	0,768	0,786	0,800	0,812



Obr. 41: Grafické porovnání součinitelů dotvarování určených výpočtem a experimentálně

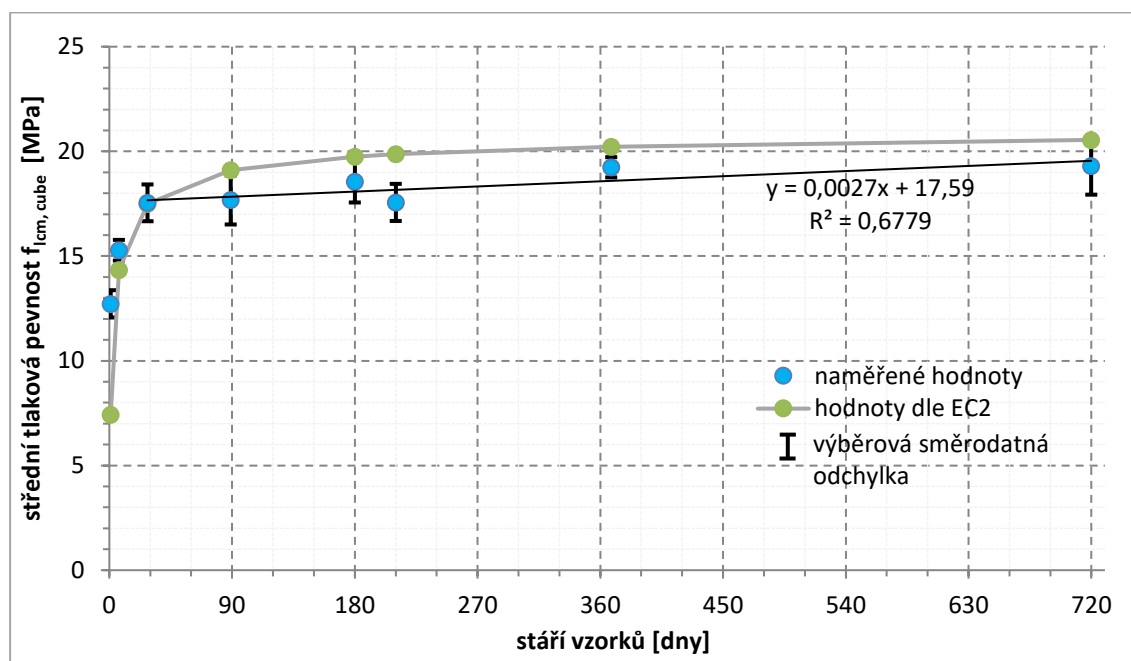
Shrnutí:

Jak je patrné z porovnání experimentálně a teoreticky (dle normy [2]) stanovených hodnot součinitelů dotvarování, skutečně naměřené hodnoty součinitele dotvarování jsou méně než poloviční oproti normě.

4.2.3.10. Dlouhodobá pevnost

Tlaková pevnost byla měřena po dobu dvou let. Pro omezení vlivu vlhkosti prostředí byly vzorky uloženy v klimatizované místnosti s teplotou $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkostí vzduchu $60\% \pm 10\%$. Pro každý časový úsek byly vždy zkoušeny tři vzorky. U naměřených hodnot je zobrazena kladná i záporná výběrová směrodatná odchylka. Z Obr. 42 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. Naměřené hodnoty jsou porovnány s hodnotami vypočítanými podle (4.9). Nejvyššího rozdílu mezi naměřenými a vypočítanými hodnotami je dosaženo v počátečních dnech. Vypočítaná jednodenní pevnost

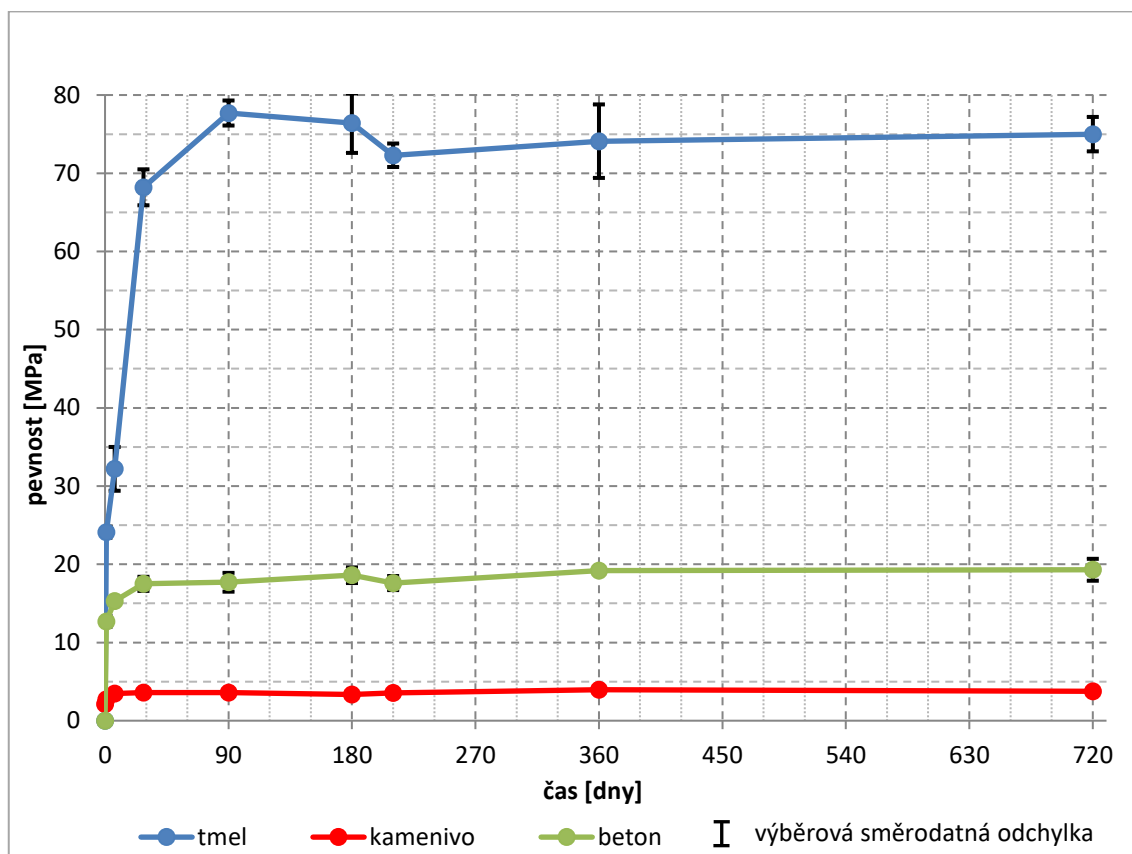
podle (4.9) dosahuje hodnoty 42% 28denní pevnosti. Naměřená jednodenní pevnost byla tedy o 31% vyšší. Rozdíl v sedmidenních pevnostech dosahoval rozdílu pouze 5%. Naměřené pevnosti ve stáří 28 dnů a více vycházely o 7 až 14% nižší než pevnosti určené podle [2].



Obr. 42: Závislost pevnosti ULC D1,0 – Liapor na čase

Důvodem nižší dlouhodobé pevnosti může být rozdílné tlakové porušení popsané v kapitole 3.4.5. Pro ověření této hypotézy byl proveden experiment, kde byla sledována pevnost rozhodujících komponent betonu ULC D1,0 – Liapor v čase, tedy cementového tmelu a směsi kameniva.

Směs kameniva byla před zkouškou navlhčena dodatkovou vodou, aby byl simulován stav kameniva v betonu. Uložení kameniva bylo voleno tak, aby nedocházelo k vysychání po celou dobu měření. Měření pevnosti kameniva se provádělo stlačením kameniva pístem ve válci. Tlaková pevnost cementového tmelu byla měřena na trámečcích o rozměru 40×40×160 mm. Uložení trámečků bylo shodné s uložením krychlí z ULC (klimatizovaná místnost). Z naměřených údajů vyplývá, že i přes značné zvýšení pevnosti cementového tmelu v čase k výraznému nárůstu pevnosti betonu nedochází a tlaková pevnost výsledného kompozitu, tedy cementového tmelu a kameniva, je značně závislá na pevnosti kameniva.



Obr. 43: Závislost pevnosti na čase jednotlivých komponent a ULC D1,0 – Liapor

Shrnutí:

Nárůst dlouhodobé pevnosti u ultralehkého betonu nedosahuje takových hodnot, jaké předpokládá norma [2]. Rozdíl mezi normovou a experimentálně stanovenou hodnotou pevnosti po dvou letech dosahuje 6%. V tomto případě norma nadhodnocuje velikost pevnosti lehkého betonu v tlaku pro delší časový úsek. Při výpočtu dlouhodobé pevnosti se patrně vychází z předpokladu, že u cementu dochází k hydrataci doposud nezhydratovaných cementových zrn, např.: [5] a [36], a tím k postupnému navýšování tlakové pevnosti, bez ohledu na limitující pevnost kameniva. U lehkého betonu však tvoří nejslabší článek betonového kompozitu právě lehké kamenivo a samotné navýšení pevnosti cementového tmelu nemá výrazný vliv na celkovou pevnost betonu. Naměřené údaje dlouhodobé pevnosti jsou ve shodě se závěry uvedenými v kapitole 3.4.6.

4.2.4. ULC D1,0 – Liaver

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 byl nízký poměr P/OH, který má o 25% nižší hodnotu než u ULC s kamenivem Liapor.

4.2.4.1. Objemová hmotnost ve vysušeném stavu

Průměrná objemová hmotnost betonu ULC D1,0 – Liaver byla 1049 kg/m^3 s průměrnou vlhkostí 9,2%. Objemová hmotnost betonu ve vysušeném stavu dosahovala průměrné hodnoty 960 kg/m^3 . Průměrné hodnoty byly stanoveny na 6 tělesech.

Shrnutí:

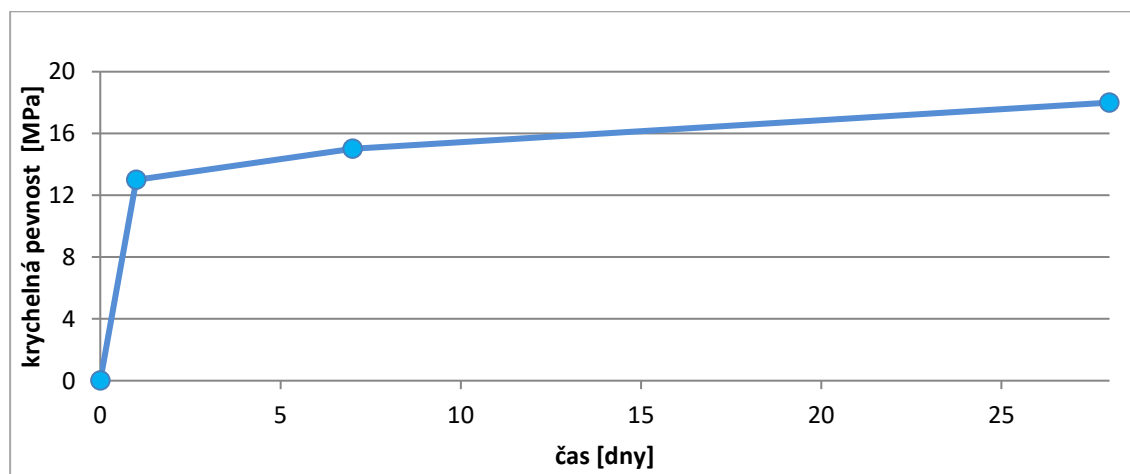
Lehký beton s kamenivem Liaver lze na základě objemové hmotnosti ve vysušeném stavu zařadit do třídy objemové hmotnosti D1,0.

4.2.4.2. Tlaková pevnost

Tlakovou pevnost stanovenou na krychlich udává Tab. 22 a vývoj tlakové pevnosti v závislosti na čase Obr. 44. Průměrné hodnoty jsou získány vždy na dvou vzorcích a mají tedy spíše orientační charakter. Nárůst pevnosti betonu je opět velmi výrazný. Po jednom dni dosahuje ULC 72% 28denní pevnosti.

Tab. 22: Tlaková pevnost stanovená na krychlich pro různé stáří betonu ULC D1,0 - Liaver

ozn. vzorku	stáří [dny]	$f_{1cm,cube}$ [MPa]		Vlhkost [%]	ρ_{moist} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]		ρ_{dry} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]		objemová třída	pevnostní třída
		jedn.	průměr		\div (5)	průměr	\div (5)	průměr		
LC6.3	1	12,5	13,0	9,50	1030	1035	940	945	D 1,0	NP
		13,4		9,50	1040		950			
	7	15,3	15,0	9,65	1045	1048	950	955		
		14,7		9,65	1050		960			
	28	17,1	18,0	8,43	1055	1065	970	980		
		18,9		8,40	1075		990			



Obr. 44: Vývoj tlakové pevnosti v závislosti na čase

Shrnutí:

Zatřídění lehkého betonu do třídy tlakové pevnosti lze provést pouze orientačně podle kritérií uvedených v [3], kde se uvádí, že průměr pevností musí být větší než $f_{ck} + 4 \text{ MPa}$ a každý výsledek musí být vyšší než $f_{ck} - 4 \text{ MPa}$. Z důvodu nízkého počtu vzorků je provedené

zatřídění materiálu pouze orientační. Na základě výše uvedených kritérií by byl beton zatříděn do pevnostní třídy 12/13.

4.2.5. ULC D1,2 - Liapor

S lehkým betonem v třídě objemové hmotnosti D1,2 byly provedeny experimenty pro stanovení tlakové a tahové pevnosti. Na vzorcích betonu byl stanoven modul pružnosti a lomově mechanické parametry.

4.2.5.1. Objemová hmotnost ve vysušeném stavu

Průměrná objemová hmotnost betonu ULC D1,2 – Liapor stanovená na tělesech tvaru krychle byla 1320 kg/m^3 s průměrnou vlhkostí 10%. Objemová hmotnost betonu ve vysušeném stavu dosahovala průměrné hodnoty 1190 kg/m^3 .

Shrnutí:

Na základě naměřených hodnot lze lehký beton zařadit do třídy objemové hmotnosti D1,2, která má rozpětí 1001 až 1200 kg/m^3 .

4.2.5.2. Tlaková pevnost

Tlaková pevnost byla zjišťována na tělesech tvaru krychle, trámce a válce. Ultralehký beton dosahoval průměrné tlakové pevnosti $f_{lcm,cube}$ $28,2 \text{ MPa}$ se směrodatnou odchylkou $1,81 \text{ MPa}$. Velikost zkušebního souboru byla 12 vzorků. Charakteristická hodnota krychelné tlakové pevnosti $f_{lck,cube}$ činila $22,75 \text{ MPa}$. Naměřené údaje krychelné pevnosti jsou zobrazeny v Tab. 23. Průměrná tlaková pevnost stanovená na tělesech tvaru válce f_{lcm} byla $26,0 \text{ MPa}$ se směrodatnou odchylkou $1,21 \text{ MPa}$. Výběrový soubor v tomto případě obsahoval 9 vzorků. Charakteristická hodnota válcové pevnosti v tlaku f_{lck} dosahovala hodnoty $20,91 \text{ MPa}$. Naměřené hodnoty zobrazuje Tab. 24. Nejvyšších pevností bylo dosaženo na vzorcích tvaru trámce o rozměrech $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$, kde průměrná tlaková pevnost $f_{lcm,prism}$ dosahovala hodnoty $31,8 \text{ MPa}$ s výběrovou směrodatnou odchylkou $0,7 \text{ MPa}$. Hodnota byla stanovena na 6 vzorcích, viz Tab. 25.

Tab. 23: Tlaková pevnost ULC D1,2 – Liapor stanovená na krychlích o hraně 150 mm ve stáří 40 dní

ozn. vzorku	$f_{1cm,cube}$ [MPa]		S [MPa]	Vlhkost [%]	ρ_{moist} [kg*m ⁻³]		ρ_{dry} [kg*m ⁻³]		objemová třída	pevnostní třída
	jedn.	průměr			\approx (5)	průměr	\approx (5)	průměr		
LC7-5	28,6	28,2	1,81	11,56	1320	1320	1180	1190	D 1,2	20/22
	29,2			11,50	1315		1180			
LC7-5 kl. I	25,0			10,00	1285		1170			
	28,0			10,00	1290		1170			
	26,2			10,00	1280		1165			
LC7-5 kl. II	28,1			9,20	1305		1195			
	27,3			9,22	1310		1200			
	31,5			9,04	1320		1210			
	28,2			9,20	1310		1200			
LC7-5 kl. III	27,8			10,00	1285		1170			
	31,0			10,00	1315		1195			
	27,1			10,00	1335		1215			

Tab. 24: Tlaková pevnost a modul pružnosti stanovený na tělesech tvaru válce ve stáří 40 dní

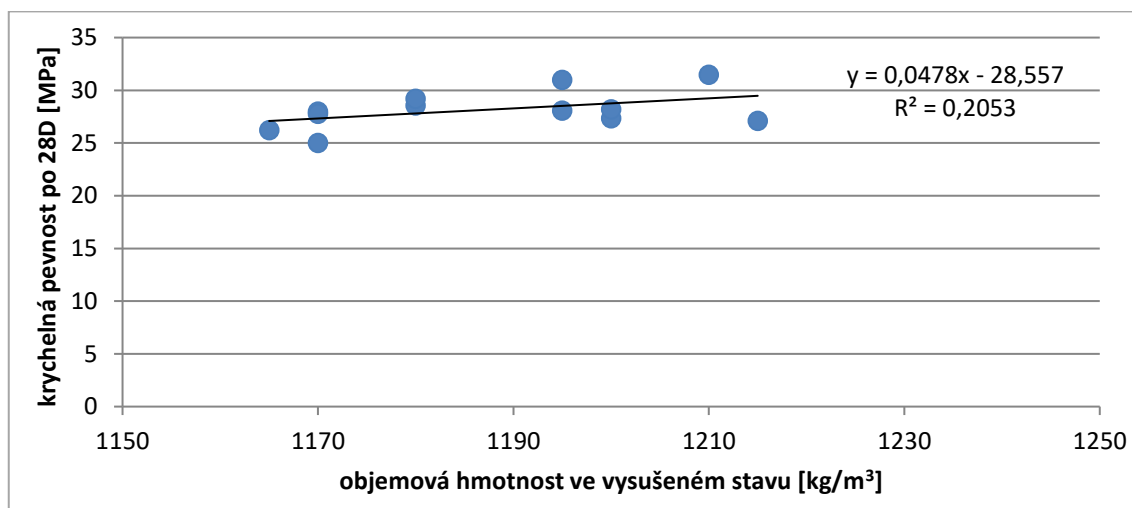
ozn. vzorku	f_{1cm} [MPa]		S [MPa]	vlhkost [%]	ρ_{moist} [kg*m ⁻³]		ρ_{dry} [kg*m ⁻³]		E [MPa]	
	jedn.	průměr			\approx (5)	průměr	\approx (5)	průměr	jedn.	průměr
LC7-52 kl.I	24,5	26,0	1,21	10,00	1270	1300	1155	1180	11800	12200
	24,2			10,00	1260		1145		12000	
	25,5			10,00	1255		1140		11200	
LC7-52 kl.II	26,6			10,00	1315		1195		12100	
	27,1			10,00	1315		1195		-	
	25,1			10,00	1325		1205		-	
	27,8			10,00	1330		1210		13000	
	26,3			10,00	1310		1190		12900	
	26,7			10,00	1315		1200		-	

Tab. 25: Tlaková pevnost a modul pružnosti stanovený na tělesech tvaru trámce ve stáří 40 dní

ozn. vzorku	$f_{1cm,prism}$ [MPa]		s [MPa]	vlhkost [%]	ρ_{moist} [kg*m ⁻³]		ρ_{dry} [kg*m ⁻³]		E [MPa]	
	jedn.	průměr			\approx (5)	průměr	\approx (5)	průměr	jedn.	průměr
LC7-52 kl. II	30,8	31,8	0,7	10,00	1320	1330	1200	1210	-	13000
	31,0			10,00	1335		1215		13700	
	32,3			10,00	1340		1215		13100	
	32,3			10,00	1325		1205		-	
	32,0			10,00	1315		1195		-	
	32,2			10,00	1325		1205		12200	

Shrnutí:

Celkově lze uvést, že lehký ULC D1,2 - Liapor lze zařadit do pevnostní třídy 20/22. Zařazení do pevnostní třídy bylo provedeno jak podle válcové, tak podle krychelné tlakové pevnosti. Naměřené hodnoty krychelné pevnosti jsou zobrazeny v závislosti na objemové hmotnosti na Obr. 45. Z naměřených hodnot a indexu korelace lze vyvodit závěr, že změnu krychelné pevnosti lze při předpokladu lineární funkce vysvětlit pouze ve 20% změnou objemové hmotnosti. Zbýlých 80% jsou ostatní vlivy.



Obr. 45: Závislost tlakové pevnosti na objemové hmotnosti ULC D1,2 – Liapor

4.2.5.3. Modul pružnosti

Modul pružnosti lze určit podle vzorce 4.3, který při uvažování $E_{cm} = 30 \text{ GPa}$ (C 20/25) a převodního součinitele $\eta_E = 0,2926$ (pro $\rho_{dry} 1190 \text{ kg/m}^3$) vychází 8,78 GPa. Naměřená hodnota modulu pružnosti na válci vycházela 12,2 GPa s výběrovou směrodatnou odchylkou 0,68 MPa a průměrná hodnota modulu pružnosti měřená na trámcích byla 13,0 GPa s výběrovou směrodatnou odchylkou 0,75 MPa. Průměrné hodnoty byly získány na třech a šesti tělesech, viz Tab. 24 a Tab. 25.

Shrnutí:

Modul pružnosti vypočítaný dle normy [2] vychází opět značně podhodnocen. Rozdíl mezi modulem pružnosti určeným výpočtem a experimentálně změřeným dosahuje 39% v případě tělesa tvaru válce a 48% v případě tělesa tvaru trámce.

4.2.5.4. Tahová pevnost

Průměrná pevnost v příčném tahu měřená na devíti zkušebních vzorcích dosahovala velikosti 1,5 MPa s výběrovou směrodatnou odchylkou 0,3 MPa, viz Tab. 26. Orientační velikost pevnosti betonu v dostředném tahu vychází podle rovnice 4.4 hodnotou 1,35 MPa. Vypočítaná velikost pevnosti v dostředném tahu dle vztahu 4.6 (při uvažování $f_{ctm} = 2,2 \text{ MPa}$ a $\rho_{dry} 1170 \text{ kg/m}^3$) dosahuje 1,58 MPa.

Tab. 26: Pevnost v příčném tahu měřená na krychlich o hraně 150 mm - ULC D1,2 ve stáří 40 dní

ozn. vzorku	$f_{lctm,sp}$ [MPa]		S [MPa]	vlhkost [%]	ρ_{moist} [kg*m ⁻³]		ρ_{dry} [kg*m ⁻³]		objemová třída	pevnostní třída
	jedn.	průměr			\pm (5)	průměr	\pm (5)	průměr		
LC7 kl I	1,6	1,5	0,3	10,00	1275	1290	1160	1170	D 1,2	
	1,3			10,00	1290		1170			
	1,5			10,00	1250		1135			
	1,4			10,00	1255		1140			
	1,3			10,00	1270		1155			
LC7 kl II	1,8	1,5	0,3	10,00	1315	1290	1195	1170	D 1,2	
	1,7			10,00	1315		1195			
	1,4			10,00	1280		1165			
	2,1			10,00	1320		1200			

Shrnutí:

Stejně jako u varianty ULC D1,0-Liapor byla měřena pevnost v příčném tahu, ze které byla pevnost v dostředném tahu dopočítána podle vztahů uvedených v [2]. Rozdíl mezi naměřenou hodnotou tahové pevnosti a hodnotou pevnosti vypočítanou podle normy dosahoval 17%. V tomto případě byla tahová pevnost určená výpočtem nadhodnocena a reálně bylo dosaženo nižší hodnoty tahové pevnosti betonu.

4.2.5.5. Lomová energie

Velikost lomové energie u betonu s třídou objemové hmotnosti D1,2 dosahovala hodnoty 23,0 J/m² s výběrovou směrodatnou odchylkou 0,3 J/m². Údaj byl získán na třech vzorcích. Současně s lomovou energií byl na vzorcích (4 ks) dopočítán modul pružnosti o hodnotě 10,6 GPa s výběrovou směrodatnou odchylkou 0,77 GPa.

Tab. 27: ULC D1,2 - Liapor model efektivní trhliny

	označení	jednotka	vzorek	hodnota	průměr	s
Modul pružnosti	E_c	GPa	LC1,2-1	9,6	10,6	0,77
			LC1,2-2	10,9		
			LC1,2-3	11,4		
			LC1,2-4	10,6		
Efektivní lomová houževnatost	K_{lce}	MPa.m ^{1/2}	LC1,2-1	0,366	0,388	0,0257
			LC1,2-2	0,424		
			LC1,2-3	0,374		
			LC1,2-4	0,388		
Lomová energie	G_F	J/m ²	LC1,2-1	23,3	23,0	0,30
			LC1,2-2	-		
			LC1,2-3	22,9		
			LC1,2-4	22,8		

Shrnutí:

Lomová energie dosahovala i v tomto případě nízkých hodnot (1/10 hodnoty lomové energie běžného betonu C30/37). V porovnání s ULC D1,0 – Liapor je lomová energie vyšší o

16,7%. U experimentů byla naměřena značná shoda a výběrová směrodatná odchylka dosahovala hodnoty 0,3 J/m².

4.2.6. ULC D1,2eco – Liapor

Beton s označením ULC D1,2eco byl navržen tak, aby jej bylo možné vyrobit i mimo laboratoř a aby jeho výroba byla ekonomičtější než předchozí vyvinutá varianta ultralehkých betonů. To je zároveň důvod, proč byl tento lehký beton použit u většiny navazujících experimentů s lehkým betonem, které jsou uvedeny v kapitole 5. Současně s těmito experimenty byly vždy provedeny vzorky betonu pro stanovení fyzikálně mechanických vlastností betonu. Vzniklo tak velké množství výsledků, díky kterým bylo možno přesněji stanovit fyzikálně mechanické parametry betonu.

4.2.6.1. Objemová hmotnost ve vysušeném stavu

Průměrná objemová hmotnost betonu ULC D1,2eco – Liapor stanovená na tělesech tvaru krychle byla 1300 kg/m³ při průměrné vlhkosti 10,2 %. Objemová hmotnost betonu ve vysušeném stavu dosahovala průměrné hodnoty 1180 kg/m³. Objemová hmotnost byla stanovena na 37 tělesech.

Shrnutí:

Dle naměřených hodnot lze lehký beton zařadit do třídy objemové hmotnosti D1,2.

4.2.6.2. Tlaková pevnost

Tlaková pevnost byla měřena na krychlích o hraně 150 mm a na trámčích o rozměrech 100×100×400 mm. Beton ULC D1,2eco – Liapor dosahoval průměrné tlakové pevnosti na krychlích $f_{lcm,cube}$ 26,9 MPa se směrodatnou odchylkou 2,09 MPa. Zkušební soubor obsahoval 37 vzorků, viz Tab. 28. Charakteristická krychelná pevnost stanovená podle [39] dosahuje hodnoty 22,24 MPa. Průměrná tlaková pevnost betonu stanovená na trámčích dosahovala hodnoty $f_{lcm,prism}$ 27 MPa se směrodatnou odchylkou 3,1 MPa. Hodnoty byly stanoveny na 31 tělesech. Charakteristická pevnost v tlaku dosahovala hodnoty 21,65 MPa.

Tab. 28: ULC D1,2eco - Liapor – krychelná tlaková pevnost ve stáří 28 dní

ozn. vzorku	f _{icm,cube} [MPa]		s [MPa]	vlhkost		ρ _{moist} [kg*m ⁻³]		ρ _{dry} [kg*m ⁻³]		objemová třída	pevnostní třída
	jedn.	průměr		[%]	≐ (5)	průměr	≐ (5)	průměr			
LC8_1	27,2	26,9	2,09	14,38	1355	1300	1180	1185	D 1,2	20/22	
	27,5			14,00	1345			1180			
LC8_2	23,8			9,10	1290			1180			
	26,7			9,10	1300			1190			
LC8_3	26,2			12,33	1305			1165			
	22,6			12,30	1340			1190			
LC8_4	28,0			11,00	1305			1175			
	28,8			11,00	1320			1190			
	29,9			11,00	1300			1175			
	32,0			11,26	1300			1170			
	27,1			11,00	1320			1190			
	27,8			10,92	1280			1155			
	29,1			10,87	1305			1175			
	28,7			10,50	1320			1195			
LC8_5	27,3			9,36	1270			1165			
	26,6			9,74	1280			1165			
	26,9			10,00	1290			1170			
	26,2			10,30	1285			1165			
	24,7			10,30	1255			1140			
	27,5			10,33	1310			1190			
	26,2	10,30	1270	1155							
	24,4	10,30	1250	1135							
LC8SV	26,0	8,14	1225	1130							
	26,8	8,00	1235	1145							
	23,5	8,00	1235	1140							
LC8SV	23,9	10,50	1250	1130							
LC8_7	27,7	10,00	1335	1210							
	24,9	10,00	1285	1170							
	27,5	10,00	1340	1215							
	29,5	10,00	1325	1205							
Dot.	28,7	10,00	1320	1200							
	25,0	9,00	1310	1200							
	28,0	8,40	1305	1200							
	28,3	8,50	1300	1195							
Soudr.	22,9	9,20	1270	1165							
	28,4	9,20	1315	1205							
	29,1	9,20	1315	1205							

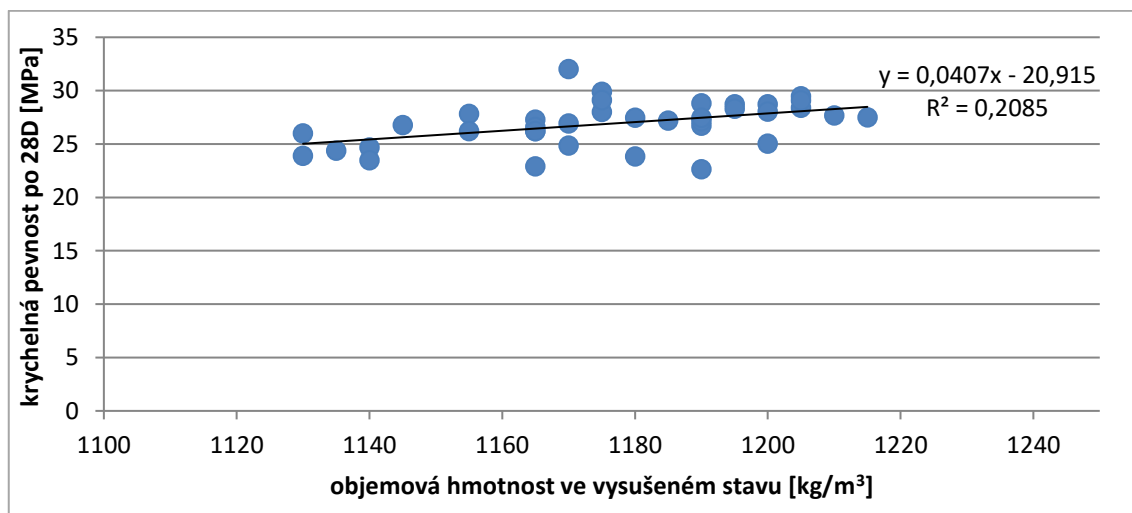
Tab. 29: ULC D1,2eco - fyzikálně-mechanické vlastnosti stanovené na trámčích ve stáří 28 dní

ozn. vzorku	f _{icm,prism} [MPa]		s [MPa]	vlhkost		ρ _{moist} [kg*m ⁻³]		ρ _{dry} [kg*m ⁻³]		E [MPa]	
	jedn.	průměr		[%]	≐ (5)	průměr	≐ (5)	průměr	jedn.	průměr	
LC8-1	29,0	27,0	3,1	11,00	1290	1260	1170	1160	12200	11900	
	28,6			11,00	1300			1170	12700		
	32,1			11,00	1305			1180	12500		
	27,8			11,17	1290			1160	-		
	30,5			11,00	1310			1180	12700		
	26,9			9,72	1260			1150	-		

LC8-2	28,1			10,70	1260		1140		11300
	27,3			10,70	1260		1140		11200
	26,5			10,78	1260		1140		11200
LC8-3	20,5			8,00	1235		1140		-
	25,0			8,00	1220		1130		-
	26,2			8,00	1225		1135		-
	27,1			8,46	1225		1130		10600
	28,2			8,65	1260		1160		11000
	28,2			8,18	1245		1155		11000
LC8_7	30,0			10,00	1320		1200		13700
	31,9			10,00	1325		1205		14300
	32,5			10,00	1340		1215		14300
	31,2			10,00	1330		1205		14600
LC8-4S	20,4			8,00	1235		1140		-
	25,1			8,00	1220		1130		-
	26,0			8,00	1225		1135		-
	27,2			8,46	1225		1130		10600
	28,0			8,65	1260		1160		11000
	28,0			8,18	1245		1155		11000
LC8-4M	21,3			11,50	1245		1115		-
	24,8			11,50	1255		1125		-
	24,1			11,50	1245		1115		-
	25,7			11,05	1260		1135		10800
	25,1			11,27	1255		1130		10700
	25,3			12,16	1240		1105		10600

Shrnutí:

Lehký beton ULC D1,2eco - Liapor lze na základě charakteristické krychelné a trémové pevnosti zařadit do pevnostní třídy 20/22. Naměřené údaje krychelné pevnosti v závislosti na objemové hmotnosti jsou zobrazeny na Obr. 46. Podobně jako u betonu ULC D1,2 lze vysvětlit změnu krychelné pevnosti v závislosti na objemové hmotnosti (při lineární aproximaci) pouze v 21%. Zbýlých 79% představují ostatní vlivy.



Obr. 46: Závislost mezi objemovou hmotností a krychelnou pevností ULC D1,2eco

4.2.6.3. Modul pružnosti

Modul pružnosti byl měřen pouze na tělesech tvaru trámce. Průměrná naměřená hodnota modulu pružnosti na trámci dosahovala hodnoty 11,9 GPa s výběrovou směrodatnou odchylkou 1,38 MPa. Zkušební soubor obsahoval 20 hodnot. Modul pružnosti lze opět určit podle vzorce 4.3, který při uvažování $E_{cm} = 30 \text{ GPa}$ (C 20/25) a převodního součinitele $\eta_E = 0,288$ (pro ρ_{dry} 1180 kg/m³) vychází 8,64 GPa.

Shrnutí:

Modul pružnosti vypočítaný dle normy [2] vychází opět značně nižší. Rozdíl mezi modulem pružnosti určeným výpočtem a experimentálně změřeným dosahuje 38%.

4.2.6.4. Tahová pevnost

Průměrná pevnost v příčném tahu měřená na dvaceti zkušebních vzorcích dosahovala velikosti 1,5 MPa s výběrovou směrodatnou odchylkou 0,1 MPa. Naměřené údaje jsou shrnuty v Tab. 30. Orientační velikost pevnosti betonu v dostředném tahu vychází podle rovnice 4.4 hodnotou 1,35 MPa. Vypočítaná velikost pevnosti v dostředném tahu dle vztahu 4.6 (při uvažování $f_{ctm} = 2,2 \text{ MPa}$ a ρ_{dry} 1180 kg/m³) dosahuje 1,59 MPa.

Tab. 30: Pevnost v příčném tahu ULC D1,2eco – Liapor ve stáří vzorků 28 dní

ozn. vzorku	f _{ictm,sp} [MPa]		s [MPa]	vlhkost [%]	ρ _{moist} [kg*m ⁻³]		ρ _{dry} [kg*m ⁻³]		objemová třída	pevnostní třída
	jedn.	průměr			÷ (5)	průměr	÷ (5)	průměr		
LC8 kl III	1,8	1,5	0,1	10,73	1295	1290	1165	1180	D 1,2	
	1,5			10,70	1295		1170			
	1,6			10,70	1280		1160			
	1,4			10,70	1225		1110			
LC8 vrstv.	1,6	1,5	0,1	10,00	1315	1290	1195	1180	D 1,2	
	1,2			10,00	1310		1190			
	1,5			10,00	1305		1190			
	1,6			10,00	1315		1195			
LC8 pull-out	1,5	1,5	0,1	9,64	1280	1290	1165	1180	D 1,2	
	1,5			9,19	1280		1170			
	1,5			9,13	1310		1200			
	1,6			9,20	1320		1210			
LC8 filigran	1,4	1,5	0,1	10,00	1305	1290	1190	1180	D 1,2	
	1,3			10,00	1295		1180			
	1,7			10,00	1305		1185			
	1,5			10,00	1215		1105			
LC8 balkón	1,3	1,5	0,1	10,00	1235	1290	1120	1180	D 1,2	
	1,6			10,00	1245		1130			
	1,7			10,00	1245		1130			
	1,5			10,00	1510		1370			

Shrnutí:

Pevnost betonu v dostředném tahu pro ULC D1,2eco – Liapor dosahovala stejné velikosti jako u betonu ULC D1,2 – Liapor. Rozdíl mezi naměřenou hodnotou tahové pevnosti a

hodnotou pevnosti vypočítanou podle normy činí 17%. V tomto případě byla tahová pevnost určená výpočtem opět nadhodnocena.

4.2.6.5. Hloubka průsaku

Hloubka průsaku byla měřena na čtyřech vzorcích. Maximální hloubka průsaku dosahovala 11, 10 a 5 mm, jak ukazuje Obr. 47. Čtvrté těleso s hloubkou průsaku 24 mm bylo z experimentu vyřazeno, neboť docházelo k zřetelnému postrannímu úniku tlakové vody.



Obr. 47: Tělesa po zkoušce průsaku ULC D1,2eco

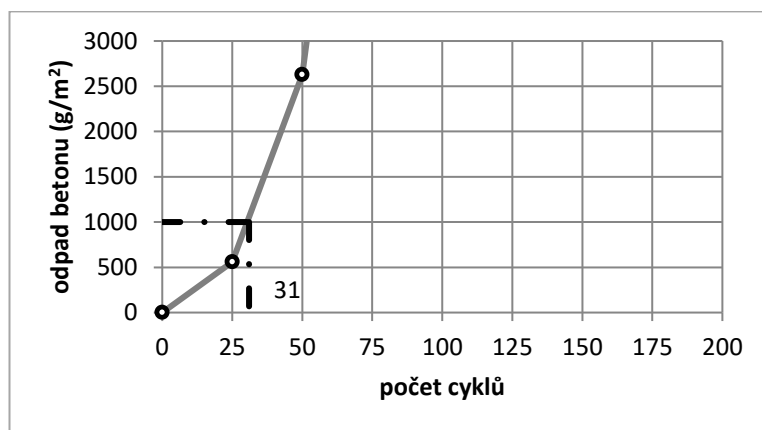
Shrnutí:

Průměrná hodnota hloubky průsaku tlakovou vodou byla 9 mm. Dosažené výsledky jsou z hlediska návrhu vodonepropustného lehkého betonu velmi dobré.

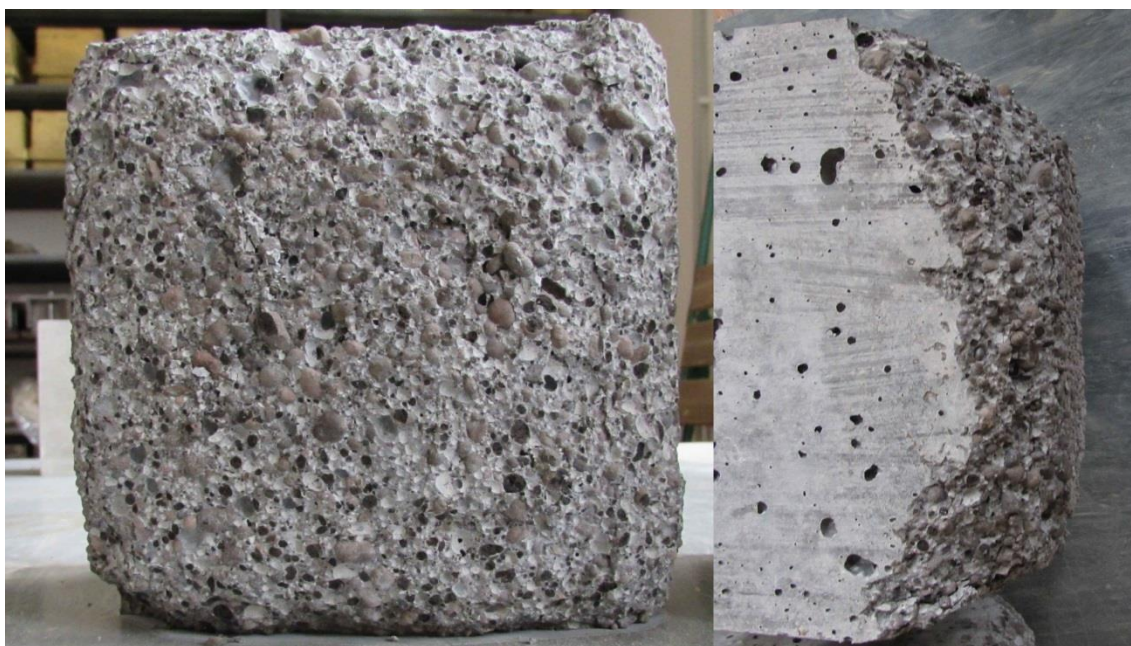
4.2.6.6. Odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám

Zkouška byla provedena na čtyřech vzorcích betonu ULC D1,2eco. Stáří vzorků v době zkoušky bylo 19 a 22 dní a oproti předchozímu zkoušení ULC D1,0 byly vzorky až do zkoušky uloženy ve vodě a zkoušena byla horní plocha vzorku⁵. Dosažení odpadu 1000 g/m² bylo dosaženo již při 31 cyklech. Zatřídění betonu ULC D1,2eco – Liapor vychází D1 = 31.

⁵ Zkouška byla prováděna na ústavu THD FAST VUT v Brně, kde z důvodu vytíženosti zkušebního stroje musely být vzorky zkoušeny dříve než ve stáří 28 dní. Mokré uložení před zkouškou není pro nasávkové pórovité kamenivo vhodné, neboť v důsledku zmrazovacích cyklů může docházet k porušení struktury betonu a tím k vyšší degradaci materiálu. Zkoušení horní plochy vzorku předepisuje norma, ovšem při předchozí zkoušce materiálu ULC D1,0 byla z důvodu porušení horní plochy zkoušena nestandardně plocha spodní. Proto nelze oba materiály přímo porovnávat.



Obr. 48: Závislost velikosti odpadu na počtu cyklech



Obr. 49: Povrch betonu zkušebního vzorku po 100 cyklech

Shrnutí:

Odolnost betonu ULC D1,2eco dosahovala velmi malých hodnot a beton není možné považovat za odolný vůči chemickým rozmrazovacím látkám. Výše uvedený závěr je spíše orientační, neboť je odvozen z velmi malého souboru vzorků. Pro podrobnější vysvětlení nízké odolnosti ULC D1,2eco je nutné provedení většího počtu měření.

4.2.6.7. Lomová energie

Lomová energie byla měřena na tělesech tvaru trámce o rozměrech 100×100×400 mm a dosahovala hodnoty 7,7 J/m² s výběrovou směrodatnou odchylkou 0,88 J/m². Údaj byl stanoven na 4 vzorcích. Současně s lomovou energií byl vypočten i modul pružnosti o velikosti 13,8 GPa s výběrovou směrodatnou odchylkou 1,51 GPa.

Tab. 31: Lomová energie betonu ULC D1,2eco

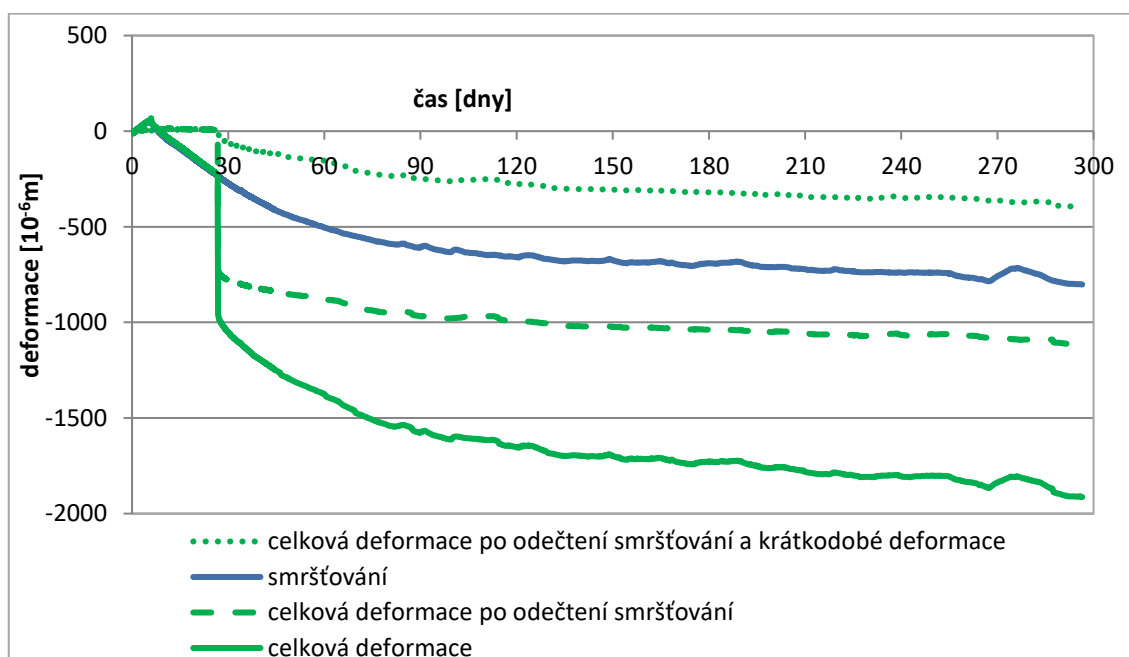
	označení	jednotka	vzorek	hodnota	průměr	s
Modul pružnosti	E_c	GPa	LC1,2-1	13,5	13,8	1,51
			LC1,2-2	13,5		
			LC1,2-3	12,3		
			LC1,2-4	15,9		
Efektivní lomová houževnatost	K_{Ice}	MPa.m ^{1/2}	LC1,2-1	0,425	0,413	0,0383
			LC1,2-2	0,383		
			LC1,2-3	0,382		
			LC1,2-4	0,462		
Lomová energie	G_F	J/m ²	LC1,2-1	7,5	7,7	0,88
			LC1,2-2	6,5		
			LC1,2-3	8,4		
			LC1,2-4	8,3		

Shrnutí:

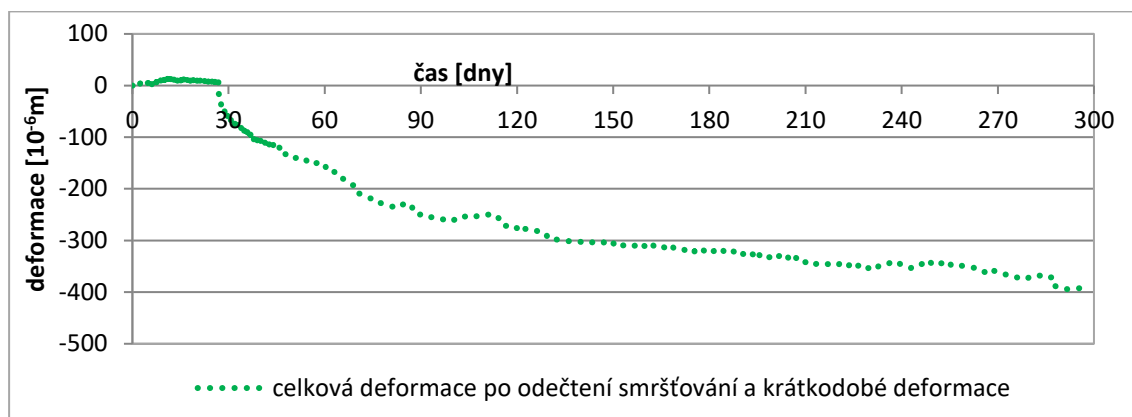
Ze všech zkoušených druhů betonu dosahuje ULC D1,2eco – Liapor nejnížší naměřené hodnoty lomové energie. Hodnota lomové energie byla o 67% nižší než v případě ultralehkého betonu se stejnou objemovou třídou (ULC D1,2 – Liapor). Lehký beton vykazuje velmi křehké chování.

4.2.6.8. Dotvarování a smršťování

Experimenty pro stanovení velikosti součinitele dotvarování byly provedeny se standardně ošetřeným kamenivem, tj. ošetření dodatkovou vodou. Velikost napětí pro měření dotvarování bylo určeno jako 1/3 pevnosti vzorků a odpovídalo velikosti 9 MPa. Zatížení bylo na vzorky aplikováno ve stáří 28 dní. Průběh dotvarování a smrštění zobrazuje Obr. 50 a Obr. 51.



Obr. 50: Deformace betonu ULC D1,2eco v závislosti na čase



Obr. 51: Celková deformace po odečtení smršťování a krátkodobé deformace

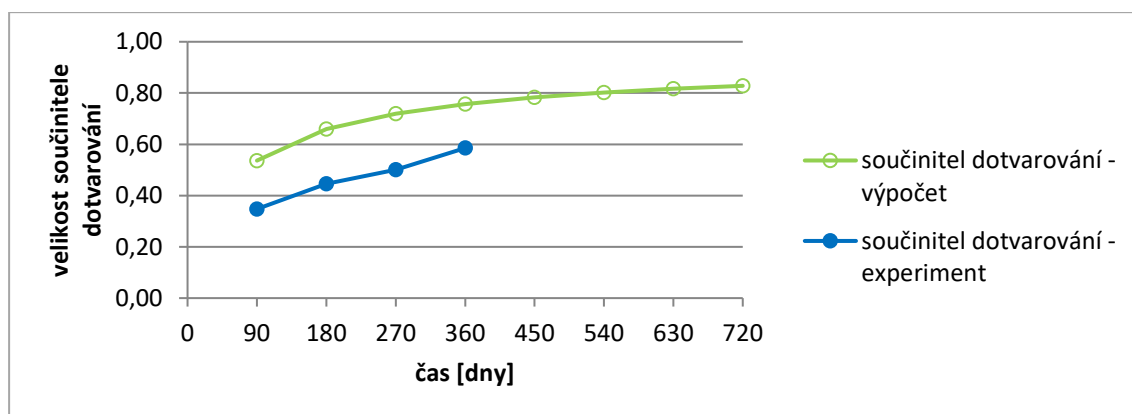
Velikosti součinitelů dotvarování vyhodnocených z provedených experimentů jsou uvedeny v Tab. 32. Normový výpočet součinitele dotvarování je proveden podle normy ČSN EN 1992-1-1, příloha B (4.8) a výsledky udává Tab. 33. Grafické porovnání naměřených a vypočítaných hodnot součinitelů dotvarování je zobrazeno na Obr. 52.

Tab. 32: Naměřené hodnoty součinitele dotvarování

t [dny]	90	180	270	360	450	540	630	720
$\varphi_{LCexp.}(t, t_0)=$	0,348	0,446	0,500	0,585	-	-	-	-

Tab. 33: Normový výpočet součinitele dotvarování

t [dny]	90	180	270	360	450	540	630	720
$\varphi_{LC}(t, t_0)=$	0,536	0,659	0,720	0,757	0,783	0,802	0,817	0,828



Obr. 52: Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot součinitele dotvarování ULC D1,2eco

Shrnutí:

Norma i v tomto případě uvádí vyšší hodnoty součinitele dotvarování, než které byly na zkušebních tělesech experimentálně změřeny. Rozdíl není tak výrazný jako v případě ULC D1,0 – Liapor. Opět se potvrzuje že u ultralehkých betonů jsou normové hodnoty více konzervativní.

4.2.6.9. Dlouhodobá pevnost a modul pružnosti

U betonu ULC D1,2eco - Liapor byl sledován vývoj pevnosti na krychlích po dobu dvou let a na trámcích po dobu jednoho roku. U vzorků tvaru trámce byl spolu s pevností měřen dynamický a statický modul pružnosti. Kamenivo bylo ošetřováno dvěma způsoby:

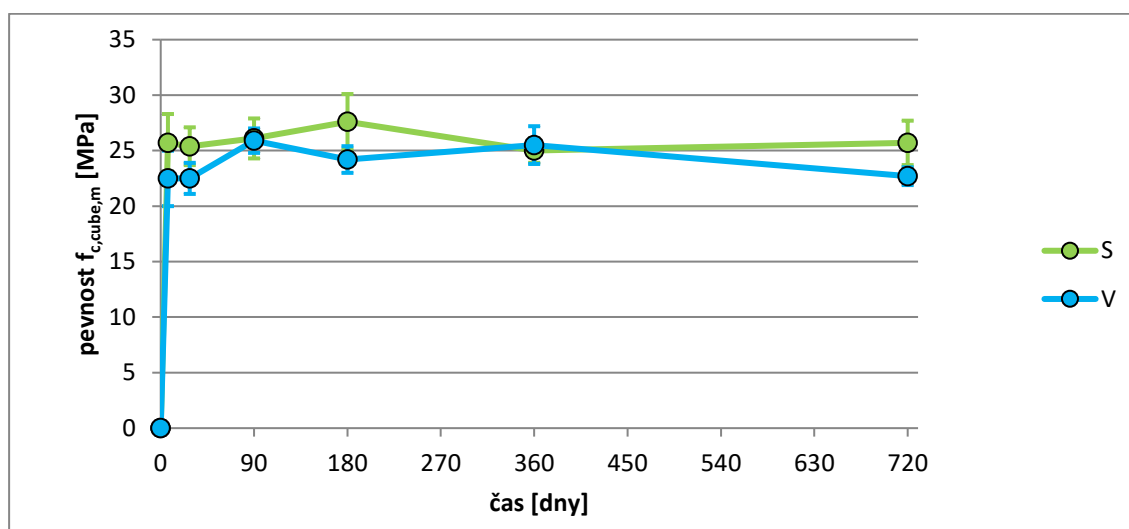
- navlhčeno v míchacím zařízení dodatkovou vodou ve výsledcích „suché kamenivo“ označení „S“ (zelená barva);
- ponořeno 24 hodin před zkouškou do vody - ve výsledcích „mokrý kamenivo“ označení „V“ (modrá barva).

V každém časovém úseku byly zkoušeny vždy tři krychle pro stanovení tlakové pevnosti. Na vzorcích trámceků byl měřen dynamický a následně statický modul pružnosti. Po stanovení modulu pružnosti byly vzorky zatěžovány až do porušení. Velikosti zatěžovacích sil pro stanovení statického modulu pružnosti byly odvozeny z krychelných pevností. Upřesnění síly bylo provedeno pouze ve stáří vzorků 28 dní, kdy byla stanovena nejprve tlaková pevnost na třech trámcích a následně byl na dalších třech tělesech změřen modul pružnosti. V závislosti na poměru mezi tlakovou pevností na krychlích a trámcích ve stáří 28 dní byly upravovány síly sloužící ke stanovení modulů pružnosti starších než 28 dní. Tab. 34 zobrazuje údaje stanovené na krychlích o straně 150 mm. Grafický vývoj krychelných pevností je zobrazen na Obr. 53, kde jsou současně znázorněny kladné a záporné směrodatné odchylky pevnosti.

Tab. 34: Vývoj krychelné pevnosti v čase - ULC D1,2eco

ozn. vzorku	stáří [dny]	$f_{1cm,cube}$ [MPa]		s [MPa]	Vlhkost [%]	ρ_{dry} [kg·m ⁻³]		objemová třída	pevnostní třída
		jedn.	průměr			$\pm (5)$	průměr		
S	7	28,7	25,7	2,6	9,93	1130	1150	D 1,2	16/18
		24,0			10,00	1175			
		24,4			10,00	1130			
V	7	19,7	22,5	2,5	14,43	1120	1120	D 1,2	16/18
		24,4			14,50	1115			
		23,5			14,50	1115			
S	28	26,0	25,4	1,7	8,14	1130	1140	D 1,2	16/18
		26,8			8,00	1145			
		23,5			8,00	1140			
V	28	21,2	22,5	1,4	10,71	1125	1120	D 1,2	16/18
		23,9			10,50	1130			
		22,4			10,50	1110			
S	90	27,7	26,1	1,8	7,40	1165	1150	D 1,2	20/22
		24,0			8,00	1135			
		26,5			8,00	1135			
V	90	24,7	25,9	1,1	10,05	1115	1120	D 1,2	16/18
		26,8			9,19	1130			
		26,1			10,00	1120			
S	181	28,3	27,6	2,5	6,00	1135	1150	D 1,2	20/22
		29,6			6,00	1180			
		24,8			6,00	1130			

V	181	25,4	24,2	1,2	8,40	1125	1120	D 1,2	16/18
		24,1			8,00	1120			
		23,0			8,40	1100			
S	360	26,2	25,0	1,1	6,66	1145	1130	D 1,2	16/18
		24,9			6,70	1125			
		24,0			6,70	1130			
V	360	24,7	25,5	1,7	7,82	1120	1120	D 1,2	16/18
		24,4			7,82	1120			
		27,4			7,82	1105			
S	720	26,6	25,7	2,0	7,0	1125	1130	D1,2	16/18
		27,1			7,0	1150			
		23,5			7,0	1110			
V	720	22,7	22,7	0,8	7,0	1110	1110	D1,2	16/18
		23,6			7,0	1110			
		22,0			7,0	1100			



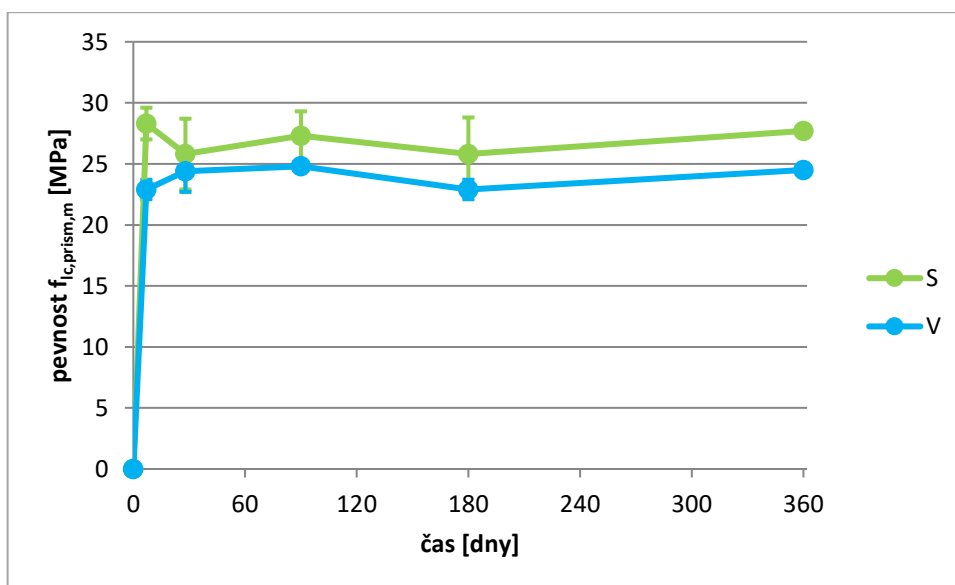
Obr. 53: Závislost krychelné pevnosti betonu ULC D1,2eco - Liapor na čase (V - mokré kamenivo; S - suché kamenivo)

Velikost tlakové pevnosti na trávci a statický a dynamický modul pružnosti udává Tab. 35. Grafické znázornění vývoje tlakové pevnosti na čase při rozdílném počátečním ošetření kameniva poskytuje Obr. 54. Závislost statického a dynamického modulu v čase zobrazuje Obr. 55.

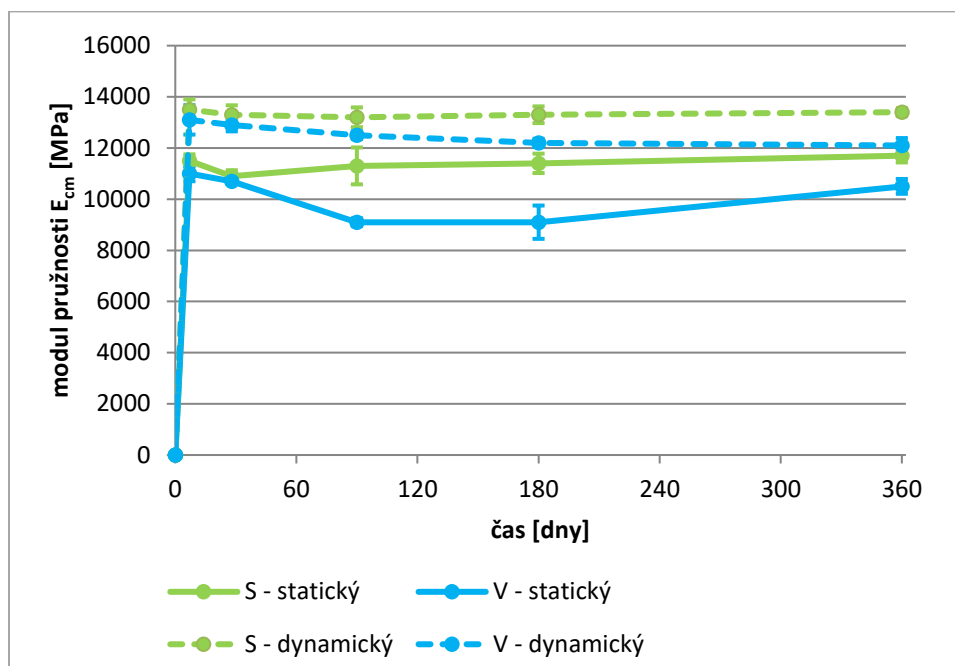
Tab. 35: Vývoj pevnosti a modulů pružnosti v čase - ULC D1,2eco – Liapor

ozn.	stáří [dny]	f _{icm,prism} [MPa]		s [MPa]	vlhkost [%]	ρ _{dny} [kg·m ⁻³]		E _{ic,s} [GPa]		E _{ic,u} [GPa]	
		jedn.	průměr			á	ø	á	ø	á	ø
S	7	28,1	28,3	1,3	10,00	1140	1150	11,5	11,50	13,4	13,50
		29,6			9,79	1165		11,8		14,0	
		27,1			9,61	1130		11,3		13,2	
V	7	22,5	22,9	0,8	13,68	1130	1120	11,3	11,00	13,6	13,10
		23,8			13,50	1110		10,7		12,5	
		22,4			13,64	1120		11,0		13,1	

S	28	20,4	25,8	2,9	8,00	1140	1140	-	13,3	13,30	
		25,1			8,00	1130			13,1		
		26,0			8,00	1135			13,9		
		27,2			8,46	1130	10,6	10,90	13,4		
		28,0			8,65	1160	11,0		13,0		
		28,0			8,18	1155	11,0		12,8		
V	28	21,3	24,4	1,7	11,50	1115	1120	-	13,3	12,90	
		25,1			11,50	1125			12,8		
		23,9			11,50	1115			13,1		
		25,8			11,05	1135	10,8	10,70	13,0		
		25,0			11,27	1130	10,7		12,8		
		25,3			12,16	1105	10,6		12,6		
S	90	29,6	27,3	2,0	7,16	1165	1140	11,30	12,1	13,20	
		25,8			8,00	1120			11,1		13,0
		26,5			8,00	1125			10,7		13,0
V	90	24,9	24,8	0,2	8,93	1135	1130	9,10	9,0	12,50	
		25,0			10,00	1115			9,1		12,4
		24,6			10,00	1135			9,3		12,6
S	181	29,1	25,8	3,0	5,90	1160	1140	11,40	11,8	13,30	
		23,4			5,00	1135			11,1		13,2
		24,8			5,60	1135			11,2		13,1
V	181	23,6	22,9	0,8	6,70	1120	1130	9,10	9,7	12,20	
		22,0			7,50	1130			8,4		12,2
		23,3			8,00	1125			9,1		12,4
S	360	28,2	27,7	0,5	6,41	1155	1150	11,70	12,0	13,40	
		27,2			6,40	1140			11,5		13,2
		27,8			6,40	1150			11,6		13,5
V	360	24,2	24,5	0,3	7,08	1130	1120	10,50	10,8	12,10	
		24,9			7,08	1125			10,3		11,8
		24,5			7,08	1115			10,3		12,0



Obr. 54: Závislost tlakové pevnosti na trámcích betonu ULC D1,2eco – Liapor na čase



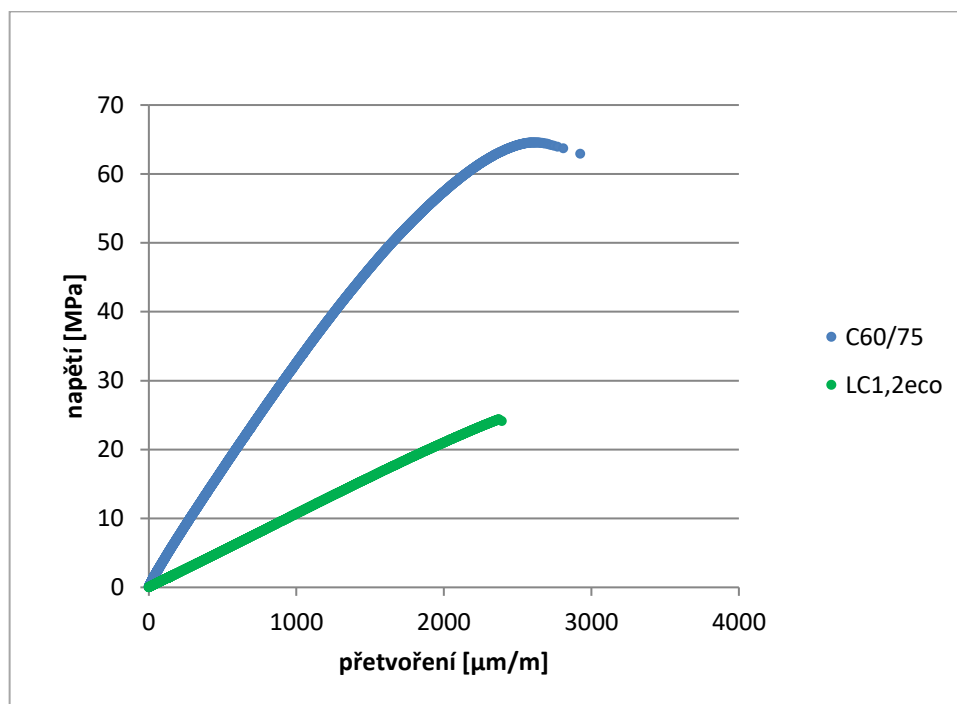
Obr. 55: Závislost modulů pružnosti betonu ULC D1,2eco – Liapor na čase

Shrnutí:

Jak vyplývá z naměřených dat, varianta s plně nasyceným kamenivem vodou dosahuje horších a více proměnných hodnot ve srovnání s navlhčeným kamenivem. Tento závěr odporuje původnímu předpokladu, kterým bylo navýšení fyzikálně mechanických parametrů v důsledku vnitřního ošetřování, jak uvádí [23].

4.2.6.10. Pracovní diagram lehkého betonu

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. 56.



Obr. 56: Pracovní diagram ultralehkého a vysokopevnostního betonu

Shrnutí:

Ultralehký beton vykazuje velmi křehké chování (křehčí než běžné vysokopevnostní betony), což je patrné ze závislosti napětí na přetvoření zkušebního vzorku. Průběh deformace je lineární až do porušení, které nastalo při velikosti přetvoření cca 2,3 ‰.

4.3. Soudržnost ULC s výztuží

Mezní napětí v soudržnosti bylo zjišťováno experimentálně pomocí tzv. pull-out testů. Při těchto zkouškách se stanovuje maximální síla při vytažení výztuže z betonového bloku. S ohledem na geometrii vzorku se jedná o zkoušky bez vlivu krytí výztuže. Pro zkoušení ocelové výztuže lze v České republice využít doporučení normy [51]. Zkoušení soudržnosti FRP výztuže lze provést podle směrnice ACI [52], dle metodiky [53] nebo evropské normy ISO [54]. Hlavní rozdíl v postupu zkoušky mezi normou ČSN pro zkoušení ocelové výztuže a směrnicí ACI pro nekovou výztuž, která byla již dříve na pracovišti FAST VUT v Brně hojně používána, spočívá ve způsobu zajištění betonu proti účinkům příčných tahů vznikajících při zkoušce. Norma [51] využívá k zajištění příčných tahů třmínkovou výztuž a směrnice ACI volí větší velikost zkušební tělesa. Rozdíly ve výsledných dosažených hodnotách mezního napětí v soudržnosti, jak prokázal ve své disertační práci D. Horák [55], jsou malé.

Část disertační práce věnující se soudržnosti je zaměřena na stanovení soudržnosti ultralehkých betonů s běžnou výztuží s označením B500 B. Ovšem pro možnost budoucího srovnání plánovaných experimentů s nekovovou výztuží bylo přikročeno k provedení zkoušek s využitím jednotné geometrie vzorků a způsobem vyhodnocení dle americké normy ACI 440.3R-12 [52].

Při určení mezního napětí v soudržnosti pomocí pull-out testů se vychází z předpokladu rovnoměrného rozdělení napětí po kotvené délce prutu, které lze vyjádřit jako:

$$\tau_{max} = \frac{F_{max}}{\pi\phi l_b} \quad (4.10)$$

kde: F_{max} ... maximální síla dosažená při zkoušce,
 ϕ ... průměr výztuže,
 l_b ... kotevní délka.

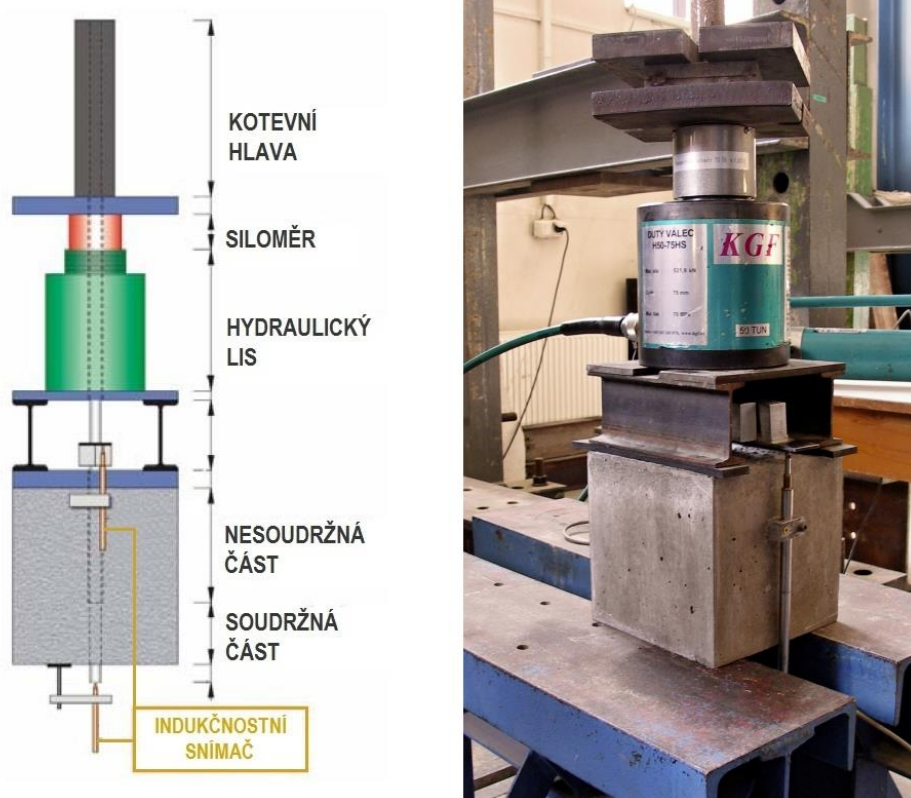
Předpoklad rovnoměrného rozdělení napětí po kotevní délce je oprávněný zejména pro krátké kotevní délky. Délka, na níž je zajištěna soudržnost výztuže s okolním betonem a platí výše uvedený předpoklad, je normou definovaná a odpovídá pěti profilům výztuže. Zbylá část výztuže procházející betonovým blokem je odseparovaná a tedy nespolutůsobící.

Při experimentech byla použita výztuž s průměrem 14 mm. Zkušební vzorek výztuže byl osazen do betonové krychle o rozměrech 200×200×200 mm vyhotovené bez příčné výztuže. Schéma uspořádání zkoušky je zobrazeno na Obr. 57. Napětí v soudržnosti se zjišťuje pro posun nezatíženého konce o velikosti 0,05 mm, 0,1 mm, 0,25 mm a pro maximální velikost síly dosaženou při experimentu.

4.3.1. Soudržnost centricky umístěné výztuže B500B

Experimenty se soudržností ultralehkého betonu byly provedeny s běžnou ocelovou výztuží s označením B500B, která má povrchovou úpravu tvořenou žebírky. Velikost mezního

napětí v soudržnosti byla zkoušena na třech typech lehkého betonu s označením ULC D1,0 - Liapor, ULC D1,2eco – Liapor a LC D1,4 – Liapor. Poslední uvedený lehký beton byl odvozen od ULC D1,2eco – Liapor přídatkem drobného hutného kameniva (písku). Složení ostatních betonů je uvedeno v kapitole 4.1.2.1 a 4.1.5.1 Pro srovnání jsou uvedeny i výsledky mezního napětí v soudržnosti získané pro běžný beton C30/37. Materiálové charakteristiky lehkých betonů udává Tab. 36. Umístění výztuže bylo voleno kolmo ke směru hutnění betonu.



Obr. 57: Schéma pull-out testu při zkoušení centrické výztuže

Tab. 36: Materiálové vlastnosti lehkých betonů

ozn. vzorku	stáří [dny]	$f_{1cm,cube}$ [MPa]		s [MPa]	ρ_{dry} [kg·m ⁻³]		objemová třída	pevnostní třída
		jedn.	průměr		$\pm (5)$	průměr		
LC1,0	28	21,6	21,6	1,0	975	990	D 1,0	12/13
		20,7			960			
		22,6			1020			
LC1,2	31	27,3	26,9	0,3	1165	1170	D 1,2	20/22
		26,6			1165			
		26,9			1175			
LC1,4	28	31,5	29,8	2,7	1300	1300	D 1,4	20/22
		32,6			1320			
		27,9			1290			
		27,2			1300			

Experimentálně stanovené hodnoty soudržnosti jsou uvedeny v Tab. 37.

Pro ultralehký beton s hmotnostní třídou D1,0 dosahoval průměr z experimentálně zjištěných hodnot mezního napětí v soudržnosti pro ocelovou výztuž hodnoty 7,46 MPa s výběrovou směrodatnou odchylkou 0,56 MPa.

U betonu s označením ULC D1,2eco se většina zkušebních těles porušila příčným tahem ještě před dosažením měřených velikostí posunů volného konce výztuže. Naměřené hodnoty uvedené v tabulce Tab. 37 jsou proto pouze orientační.

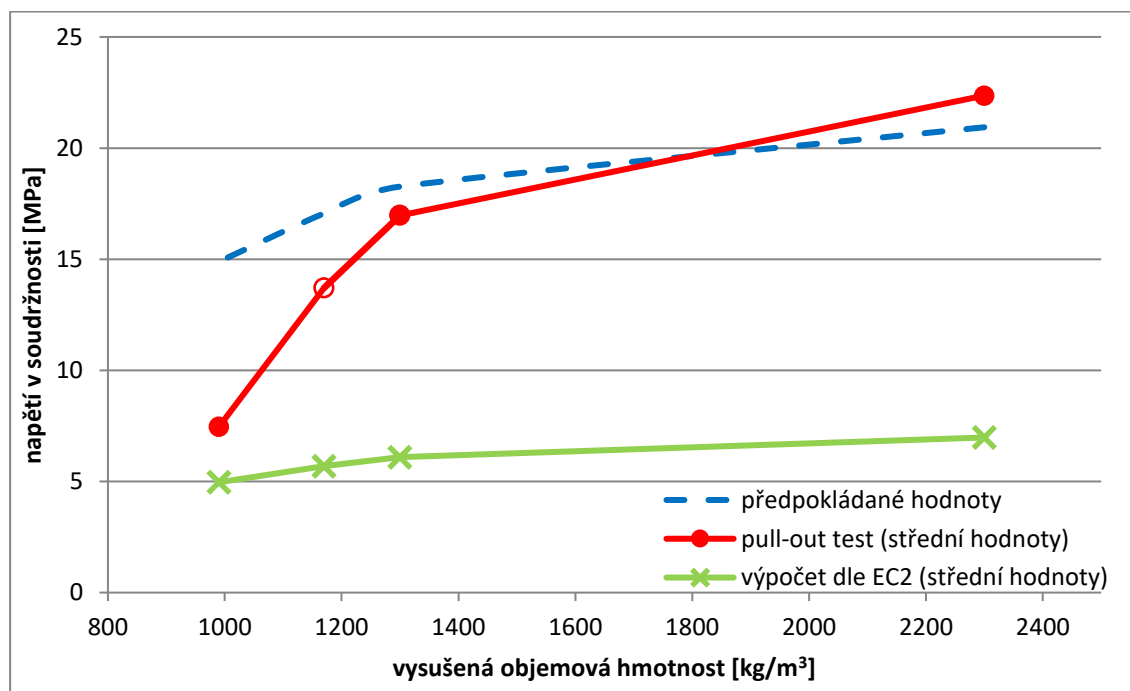
Lehký beton s třídou objemové hmotnosti D1,4 dosahoval průměrné hodnoty mezního napětí v soudržnosti 16,94 MPa s výběrovou směrodatnou odchylkou 0,92 MPa.

Hutný beton C30/37 měl průměrnou hodnotu napětí v soudržnosti 22,36 MPa s výběrovou směrodatnou odchylkou 1,01 MPa.

Grafické zobrazení závislosti velikosti napětí v soudržnosti na objemové hmotnosti ve vysušeném stavu je uvedeno na Obr. 58. Zobrazeny jsou jednak mezní hodnoty napětí v soudržnosti pro ocelovou výztuž určené z experimentů (pull-out testů) a jednak hodnoty vypočtené dle vztahu (3.2) uvedeného v normě [2]. Pro možnost porovnání teoretických hodnot s experimentálně dosaženými hodnotami je ve vzorci (3.2) nahrazena návrhová pevnost betonu v dostředném tahu f_{ctd} průměrnou tahovou pevností betonu f_{ctm} , stanovenou podle vzorce:

$$f_{ctm} = 0,3 f_{cm}^{2/3} \quad (4.11)$$

kde: f_{cm} je průměrná válcová pevnost betonu⁶.



Obr. 58: Závislost napětí v soudržnosti na objemové hmotnosti pro ocelovou výztuž B500B

⁶ Průměrná válcová pevnost betonu je odvozená od naměřené krychelné pevnosti betonu, která je upravená poměrem třídy betonu (poměr mezi krychelnou a válcovou pevností). Součinitel pro lehký beton η_1 se v tomto případě neuplatní, protože vliv lehkého kameniva je již zahrnut v nižší naměřené krychelné pevnosti.

Tab. 37: Naměřené hodnoty napětí v soudržnosti pro výztuž B500B

Napětí v soudržnosti [MPa]				
B500B				
posun [mm]	0,05	0,1	0,25	τ_{max}
ULC D1,0	5,27	5,63	6,54	7,19
	5,08	5,29	6,09	6,88
	6,24	6,46	7,58	7,60
	6,40	6,55	7,48	8,17
průměr	5,75	5,98	6,92	7,46
ULC D1,2eco	14,68	15,18	14,76	15,29
	-	-	-	13,73
	-	-	-	
	-	-	-	12,12
průměr	-	-	-	13,71
LC D1,4	15,08	16,08	-	16,54
	15,78	15,95	15,16	15,98
	16,84	17,66	-	18,12
	15,70	16,24	17,08	17,23
průměr	15,85	16,48	16,12	16,97
C 30/37	12,13	13,94	18,42	22,25
	11,45	14,78	19,62	23,16
	12,59	15,20	18,30	21,29
	14,30	16,67	21,09	23,56
průměr	13,00	15,27	19,27	22,36



Obr. 59: Měření napětí v soudržnosti ULC D1,2eco a zkušební tělesa po zkoušce



Obr. 60: Měření napětí v soudržnosti a porušená tělesa po zkoušce

Rozdíl mezního napětí v soudržnosti mezi hodnotami stanovenými normou (při uvažování středních hodnot) a experimentálními hodnotami je převážně způsoben vlivem krytí výztuže. Normové hodnoty napětí v soudržnosti jsou odvozeny pro krytí o velikosti profilu výztuže [33]. Naproti tomu u pull-out testů se vliv krytí neprojeví. Z výsledků je patrné, že poměr mezi hodnotou stanovenou z pull-out testu a hodnotou určenou výpočtem je v určité shodě. Toto platí pro betony o objemové hmotnosti vyšší než 1300 kg/m^3 . Změna nastává u ultralehkých betonů, kde dochází k výraznému snížení tohoto poměru. Vystává tak otázka, zda v případě konstrukčního betonu s velmi nízkou objemovou hmotností poskytuje norma [2] korektní hodnoty.

Shrnutí:

Provedené experimenty ukázaly, že napětí v soudržnosti pro ultralehké betony (ULC D1,0 a ULC D1,2eco) je výrazně nižší, než byl předpoklad, který vycházel právě z poměru mezi experimentálně stanovenou a výpočtem určenou hodnotou napětí v soudržnosti. V odborné literatuře je uvedeno velké množství doporučení, někdy i protichůdných, pro stanovení napětí v soudržnosti u lehkých betonů. Například Clark a Birjandi ve své práci [56] uvádějí, že napětí v soudržnosti bylo vyšší u lehkého betonu v porovnání s běžným betonem stejné tlakové pevnosti a normativní doporučení pro lehké betony jsou velmi konzervativní. K značně odlišnému názoru dospěli autoři článků [57] a [58], kteří uvádí, že napětí v soudržnosti pro lehké betony je značně nižší. Rozdílnost odborných názorů na velikost napětí v soudržnosti u lehkých betonů plyne převážně z velké variability v použitém lehkém kamenivu, typu a povrchové úpravě výztuže, různém ošetření lehkého kameniva před výrobou betonu a dalším. Rozdíly ve

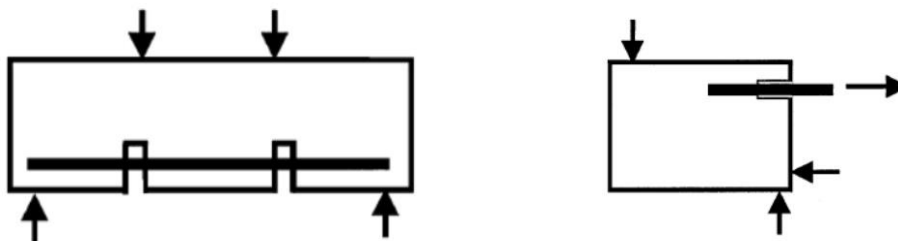
výsledcích různých autorů se zabývá i Bogas a kolektiv v článku [29]. Zde poukazuje na konzervativnost vztahů uvedených v normativních dokumentech a větší závislost napětí v soudržnosti na vodním součiniteli než na tlakové pevnosti. V závěru článku je uveden vztah pro přepočtení napětí v soudržnosti u lehkých betonů, který závisí na objemové hmotnosti a vodním součiniteli.

U výše uvedených článků nahrazovalo lehké kamenivo pouze část hutného kameniva. Zcela odlišné závěry byly dosaženy při výše uvedených experimentech s ultralehkými betony, kde je veškeré hutné kamenivo nahrazeno lehkým pórovitým kamenivem. Zde došlo ke zřetelnému poklesu napětí v soudržnosti ve srovnání s výpočtem stanovenými hodnotami.

Pro objasnění poklesu napětí v soudržnosti u ultralehkých betonů bylo potřeba provést komplexní experimenty, které by zahrnovaly vliv krycí vrstvy a také sledovaly širší spektrum fyzikálně mechanických a technologických vlastností použitých betonů.

4.3.2. Modifikace pull-out testů o vliv krytí

Pro zkoušení soudržnosti s vlivem krytí existuje velké množství doporučení a norem, viz [31], [51] a [59]. V zásadě je možné použít dva základní principy, jak ukazuje Obr. 61. Jedná se o stanovení napětí v soudržnosti na trámci při zkoušce ohybu nebo při zkoušce v prostém tahu. Nevýhoda první zmíněné zkoušky spočívá v ovlivnění napětí v betonu ve vyšetřované oblasti kotvení výztuže tlakovými silami a jiný způsob stanovení tahového napětí. U druhé zkoušky nastávají komplikace s upevněním vzorku proti pootočení vlivem momentu, který vzniká při vytahování excentricky umístěné výztuže. Podrobný popis a postup zkoušky včetně rozměrů zkušebních těles lze najít v [59]. Pro přímé porovnání s pull-out testy s centricky umístěnou výztuží nejsou výše popsané zkoušky vhodné vzhledem k odlišnosti geometrie zkušebních vzorků. Bylo tedy nutné navrhnout vlastní zkušební postup, který by toto přímé porovnání umožnil, zároveň by byl nenáročný na provedení a neovlivňoval by kotevní oblast tlakovými silami vznikajícími během zkoušky.

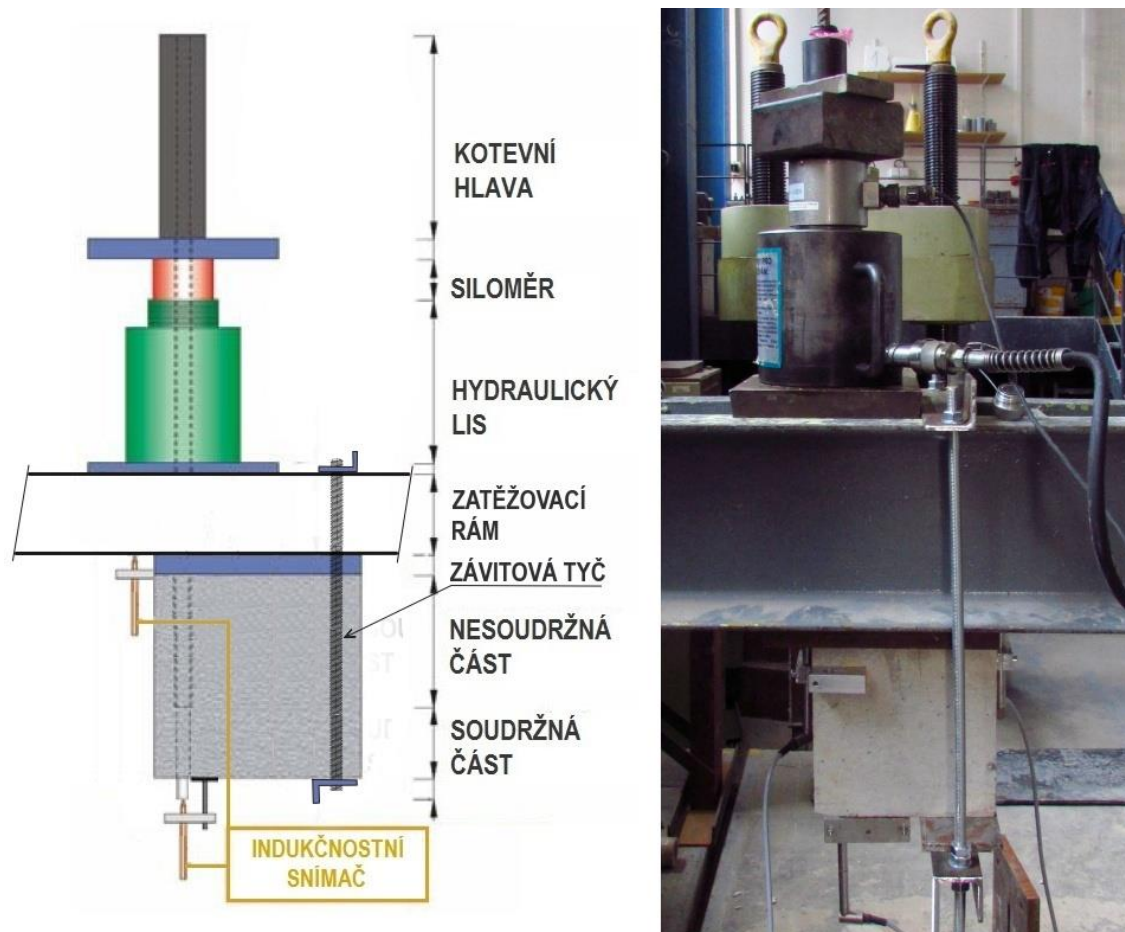


Obr. 61: Modely pro zkoušení napětí v soudržnosti s vlivem krytí

4.3.2.1. Navržený postup pull-out testů s vlivem krytí výztuže

Při návrhu způsobu zkoušení se vycházelo z geometrie zkušebního tělesa určeného pro pull-out testy s centricky umístěnou výztuží a byl použit též stejný průměr výztuže. Výztuž byla umístěna ve zkušební krychli excentricky s krytím o velikosti jednoho profilu výztuže, tj. 15 mm. Výroba a ošetření zkušebních těles byly shodné jako u vzorků s centricky umístěnou výztuží.

Zkušební vzorek byl uchycen ke zkušebnímu rámu pomocí závitových tyčí umístěných cca 140 mm od osy zkoušené výztuže, což odpovídá nejvzdálenějšímu možnému místu 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 a její provedení je zobrazeno na Obr. 62.



Obr. 62: Schéma a provedení pull-out testů s excentricky umístěnou výztuží

4.3.3. Komplexní test pro stanovení napětí v soudržnosti

Komplexní test spočíval ve stanovení mezního napětí v soudržnosti s centricky a excentricky umístěnou ocelovou výztuží. 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 i s běžným hutným betonem o pevnostní třídě C30/37.

4.3.3.1. Výroba betonu a zkušebních těles

Vzorky z běžného betonu C30/37, sloužící pro srovnání, byly vyrobeny v podniku Prefa Brno a.s., závod Kuřim. Veškeré zkušební vzorky byly vyrobeny z jedné záměsi. Lehké betony byly vyrobeny v laboratorních podmínkách FAST VUT v Brně. Z důvodu malého objemu laboratorní míchačky musely být vzorky lehkého betonu provedeny ze dvou záměsí. Velikost jedné záměsi byla 55 litrů a byla z ní vyrobena vždy polovina zkušebních těles. Obě záměsi byly vyrobeny ve stejný den.

Složení lehkých betonů bylo shodné s již zkoušenými betony pro stanovení soudržnosti uvedenými v kapitole 4.3.1.

Zkušební soubor zahrnoval následující tělesa:

- 4 tělesa pro stanovení napětí v soudržnosti s centricky umístěnou výztuží (krychle o rozměrech 200×200×200 mm),
- 4 tělesa pro stanovení napětí v soudržnosti s excentricky umístěnou výztuží (krychle o rozměrech 200×200×200 mm),
- 4 tělesa pro stanovení krychelné pevnosti betonu (krychle o rozměrech 150×150×150 mm),
- 4 tělesa pro stanovení pevnosti betonu v příčném tahu (krychle o rozměrech 150×150×150 mm),
- 4 tělesa pro stanovení lomové energie, modulu pružnosti a efektivní lomové houževnatosti (trámec o rozměrech 100×100×400 mm).

Na čerstvém betonu byl měřen objem vzduchu a konzistence. Z parametrů složení betonu byl sledován vodní součinitel a objem cementového tmelu. Zkoušené čerstvé betony dosahovaly následujících vlastností:

Tab. 38: Vlastnosti čerstvých betonů

označení betonu	konzistence		objem vzduchu [%]	vodní součinitel [-]	objem cem. tmelu [l/m ³]	kamenivo
	stupeň rozlití	stupeň zhutnitelnosti				
LC D1,0	390/380	1,07	15	0,28	328	10% Liapor 0-2/575
	F2	C3 měkká směs				51% Liapor 1-4/500
LC D1,2	330/320	1,10	9	0,28	376	39% Liapor 4-8/350
	F1	C3 měkká směs				65% Liapor 0-4/550
LC D1,4	470/460	1,05	6	0,26	328	35% Liapor 4-8/450
	F3	C3 měkká směs				13% TK Zaječí 0-4
C30/37	460/470	1,04	-	0,4	310	55% Liapor 0-4/550
	F3	C3 měkká směs				32% Liapor 4-8/450
						49% TK Hrušovany 0/4
						14% DK Předkl. 4/8
						37% DK Předkl. 8/16

4.3.3.2. Ošetřování zkušebních vzorků

Zkušební vzorky byly 1 den po vybetonování odbedněny a uloženy do vlhkého prostředí. Vlhké prostředí bylo vytvořeno pomocí namočených textilií. Vzorek a textilie byly chráněny před vysycháním igelitovou fólií. Vzorky byly jeden den před zkouškou vyjmuty z vlhkého prostředí a umístěny na vzduchu v laboratoři, kde došlo k vyrovnání vlhkosti. Zkouška fyzikálně mechanických vlastností betonu byla provedena ve stáří vzorků 28 dní.

4.3.3.3. Zkoušení soudržnosti výztuže s betonem

Napětí v soudržnosti výztuže s betonem bylo zkoušeno v laboratořích ústavu SZK, FAST VUT v Brně. Centrická výztuž byla zkoušena dle doporučení [52], jehož schéma provedení je uvedené na Obr. 57. Schéma provedení zkoušky excentrické výztuže je uvedeno na Obr. 62. Síla byla v obou případech vyvozena hydraulickým lisem. Posun výztuže byl měřen na dvou místech vzorku pomocí indukčních snímačů. Změřený posun na nezatíženém dolním konci výztuže sloužil pro vyhodnocení velikosti napětí v soudržnosti a posun na horní straně výztuže sloužil pro kontrolu a ověření správnosti měření (byly měřeny posuny výztuže vždy na protilehlých stranách krychle). Vyhodnocení mezního napětí v soudržnosti bylo provedeno podle vzorce (4.10), který vychází z teoretického předpokladu konstantního rozdělení napětí v soudržnosti po délce prutu.

4.3.3.4. Naměřené hodnoty

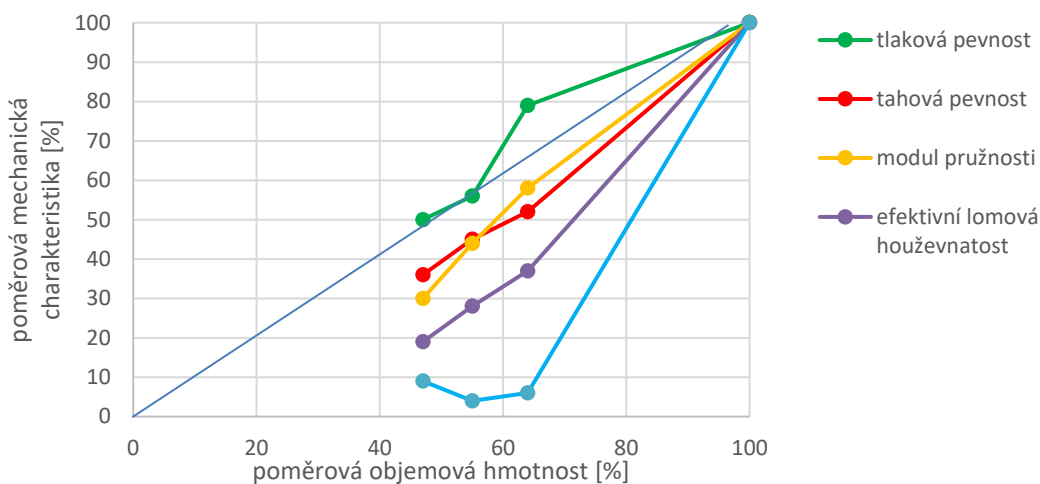
Naměřené výsledky fyzikálně mechanických parametrů použitých betonů ve stáří 28 dnů zobrazuje Tab. 39. Procentuální hodnoty vztažené k běžnému betonu udává Tab. 40 a jsou graficky znázorněny na Obr. 63. Zde je patrné, že s poklesem objemové hmotnosti nejvíce korespondoval pokles tlakové pevnosti. Ostatní fyzikálně mechanické charakteristiky klesaly strměji. Nejvyššího poklesu v porovnání s poklesem objemové hmotnosti byl zaznamenán u veličiny G_f – lomové energie.

Tab. 39: 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

Tab. 40: Procentuální zobrazení fyzikálně mechanických parametrů použitých betonů

označení vzorků	tlaková pevnost	tahová pevnost	objemová hmotnost ρ_{dry}	modul pružnosti	efektivní lomová houževnatost K_{lce}	lomová energie G_f
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
C30/37	100	100	100	100	100	100
LC1,4	79	52	64	58	37	6
LC1,2	56	45	55	44	28	4
LC1,0	50	36	47	30	19	9

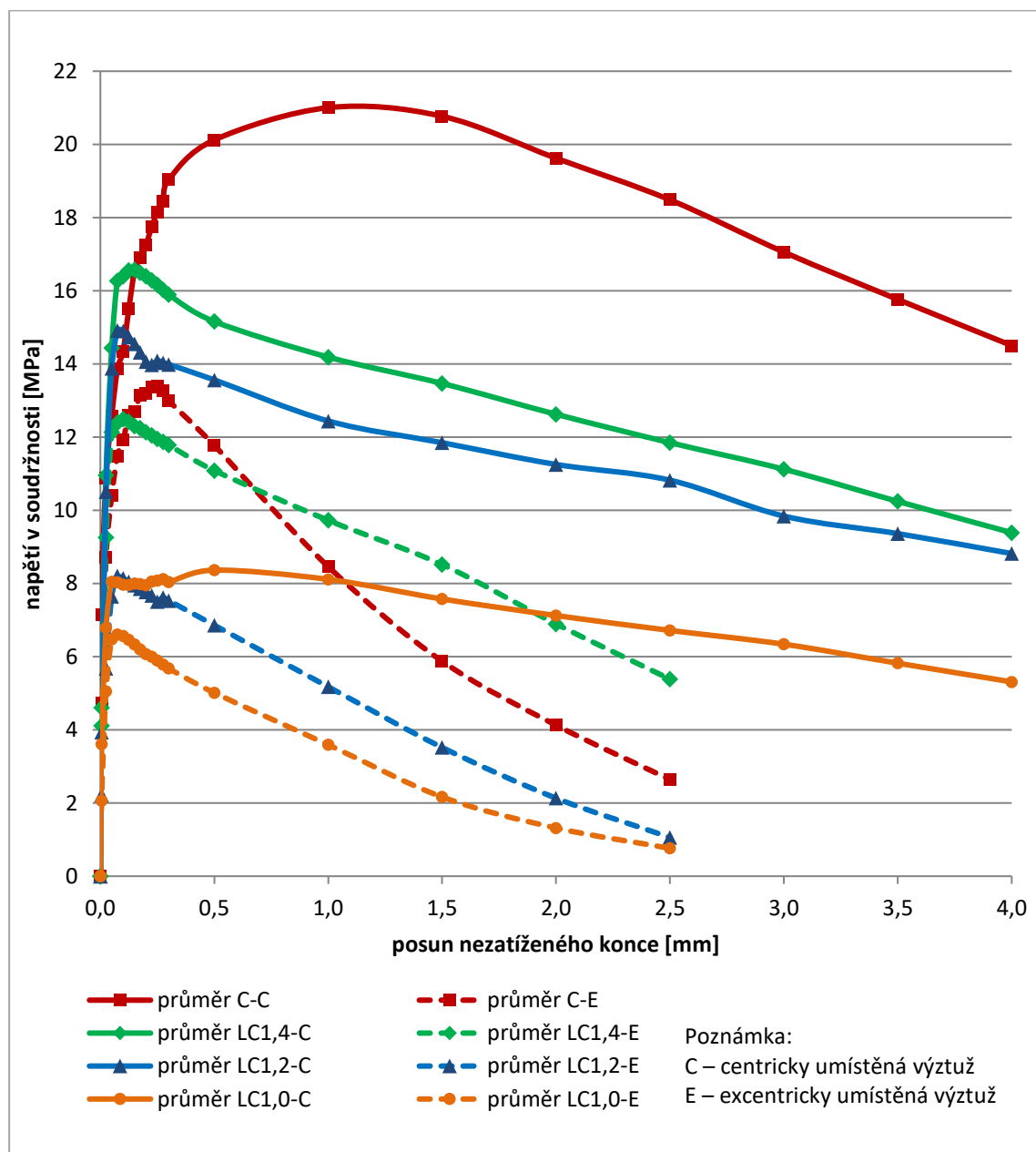


Obr. 63: Grafické znázornění procentuálních hodnot mechanických parametrů na objemové hmotnosti

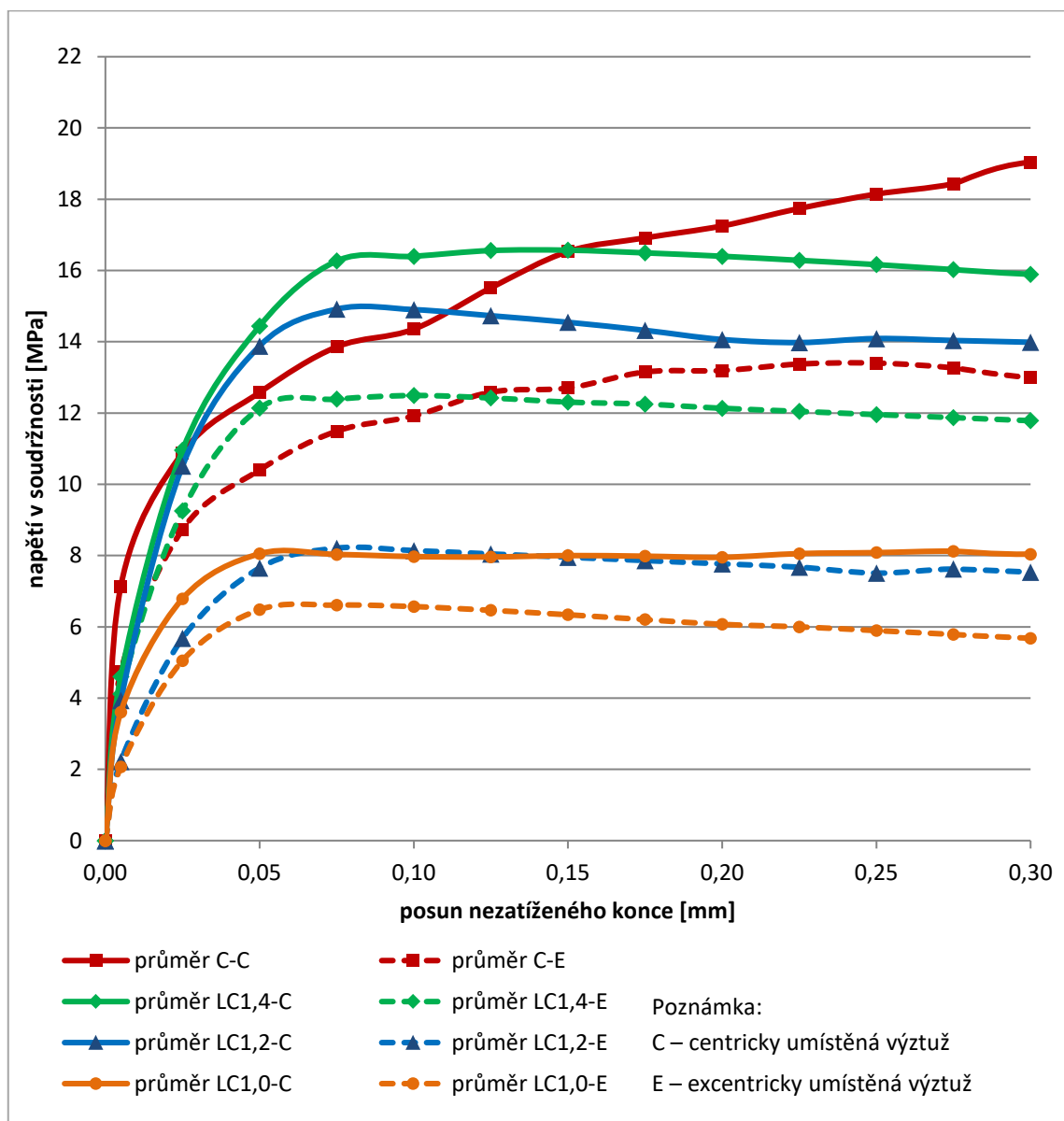
Naměřené hodnoty v soudržnosti poskytují Tab. 41. V tabulce jsou uvedené průměrné velikosti napětí stanovené podle vzorce (4.10) při uvažování konstantního průběhu napětí po délce prutu. Detailní výpis naměřených hodnot je uveden v příloze 1. Grafickou závislost napětí v soudržnosti na velikosti posunu nezátíženého konce zobrazuje Obr. 64. Detailní zobrazení napětí v soudržnosti pro posun nezátíženého konce do velikosti 0,3 mm je uvedeno na Obr. 65.

Tab. 41: Naměřené hodnoty napětí v soudržnosti

CENTRICKÉ					
označení betonu	napětí při 0,05	napětí při 0,1	napětí při 0,25	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



Obr. 64: Závislost velikosti napětí v soudržnosti na posunu nezatíženého konce výztuže



Obr. 65: Detail závislosti napětí v soudržnosti na posunu nezátíženého konce výztuže

Tab. 42: Poměrná velikost napětí v soudržnosti v závislosti na posunu nezátíženého konce výztuže

CENTRICKÉ				
označení betonu	napětí při 0,05	napětí při 0,1	napětí při 0,25	maximální napětí
C30/37	100%	100%	100%	100%
LC1,4	115%	114%	89%	78%
LC1,2	110%	104%	78%	69%
LC1,0	64%	56%	45%	39%
EXCENTRICKÉ				
C30/37	100%	100%	100%	100%
LC1,4	117%	105%	89%	98%
LC1,2	74%	68%	56%	61%
LC1,0	62%	55%	44%	49%

Nejvyššího mezního napětí v soudržnosti bylo dosaženo u běžného betonu při zkoušení centricky umístěné výztuže. Napětí dosahovalo velikosti 21,6 MPa a bylo dosaženo při posunu nezátíženého konce výztuže o 1 mm. Změnou umístění výztuže ze středu zkušební tělesa k jeho okraji bylo naměřeno napětí v soudržnosti o 37% nižší, 13,5 MPa.

U lehkého betonu s třídou objemové hmotnosti D1,4 bylo naměřeno mezní napětí v soudržnosti při centrickém umístění výztuže 16,8 MPa. Tohoto napětí bylo dosaženo při posunu nezátíženého konce výztuže o 0,1 mm. K dosažení maximálního napětí v soudržnosti tedy došlo při desetkrát menšímu posunu konce výztuže než v případě běžného betonu. Změnou umístění výztuže došlo k poklesu mezního napětí v soudržnosti o 21%, tedy poměrově nižšímu poklesu než v případě běžného betonu.

V případě lehkého betonu s označením LC1,2, který lze zařadit do skupiny ultralehkých betonů [1], byla velikost mezního napětí v soudržnosti 15,0 MPa při posunu nezátíženého konce výztuže o 0,08 mm. Velikost mezního napětí v soudržnosti u výztuže s hodnotou krytí 15 mm byla 8,2 MPa. Vlivem snížení krytí na minimální hodnotu došlo tedy k poklesu napětí o 45%.

U betonu s třídou objemové hmotnosti D1,0 bylo dosaženo velikosti mezního napětí 8,5 MPa při posunu nezátíženého konce výztuže 0,4 mm. Posunem výztuže ze středu vzorku k jejímu okraji bylo mezní napětí v soudržnosti sníženo o 21% na hodnotu 6,7 MPa.

Experimentálně stanovená závislost velikosti napětí v soudržnosti na objemové hmotnosti je patrná z Obr. 66. V grafu jsou zobrazeny jednotlivé naměřené hodnoty maximálního dosaženého napětí v soudržnosti (tj. mezního napětí při porušení kontaktu) jak centricky, tak excentricky umístěné výztuže.

V níže uvedených grafech je následující konvence značení: výsledky ze zkoušek pull-out testů s centricky umístěnou výztuží jsou zobrazeny pomocí „kruhové“ značky a výsledky s excentricky umístěnou výztuží pomocí „čtvercových“ značek. V níže uvedených legendách značí C/LC běžný/lehký beton a C/E centricky/excentricky umístěnou výztuž. Očekávaný trend chování mezilehlých hodnot je zobrazen spojnicí vycházející z průměrných hodnot. V případě centricky umístěné výztuže je trend hodnot zobrazen plnou čarou a v případě excentricky umístěné výztuže čárkovanou čarou. V grafech jsou také zobrazeny horní a dolní meze⁷ odpovídající dvojnásobné směrodatné odchylce při uvažování normálního rozdělení hodnot.

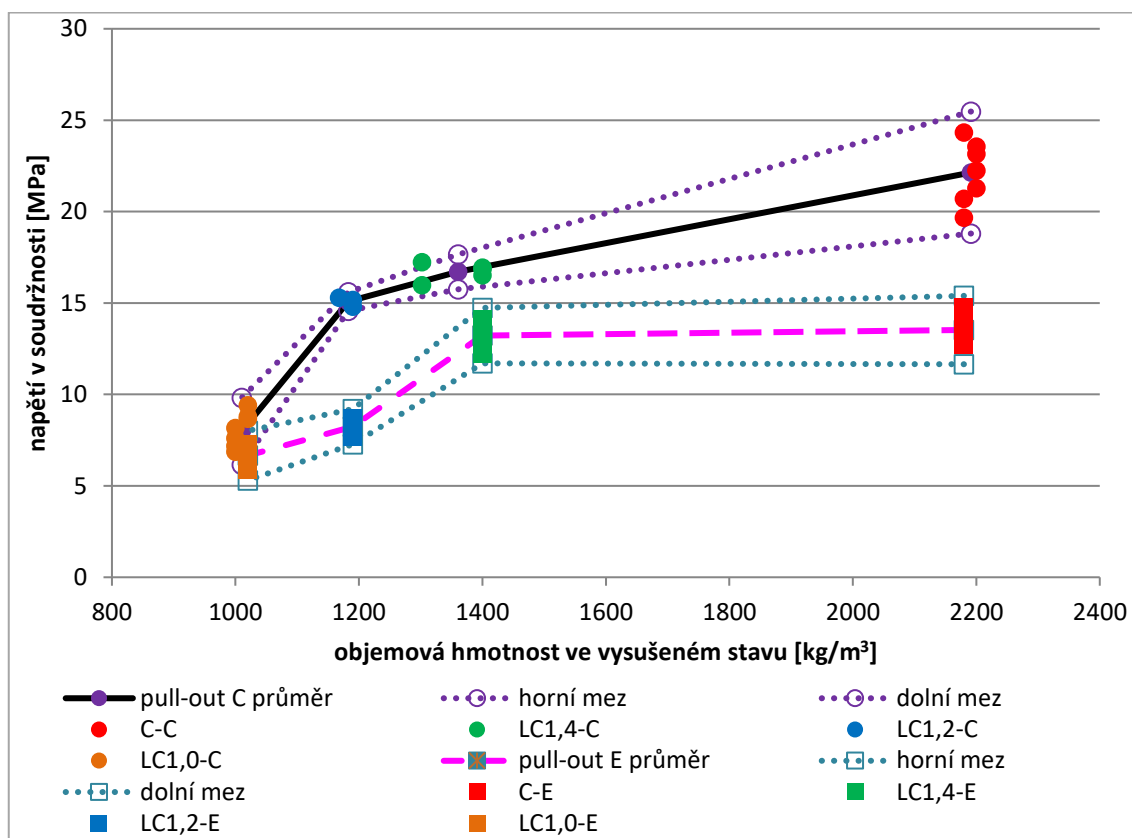
Největší rozptyl hodnot byl zjištěn u vzorků z běžného betonu při variantě centricky umístěné výztuže.

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 v závislosti na objemové pevnosti přestává ovšem platit u betonů s objemovou hmotností ve vysušeném stavu

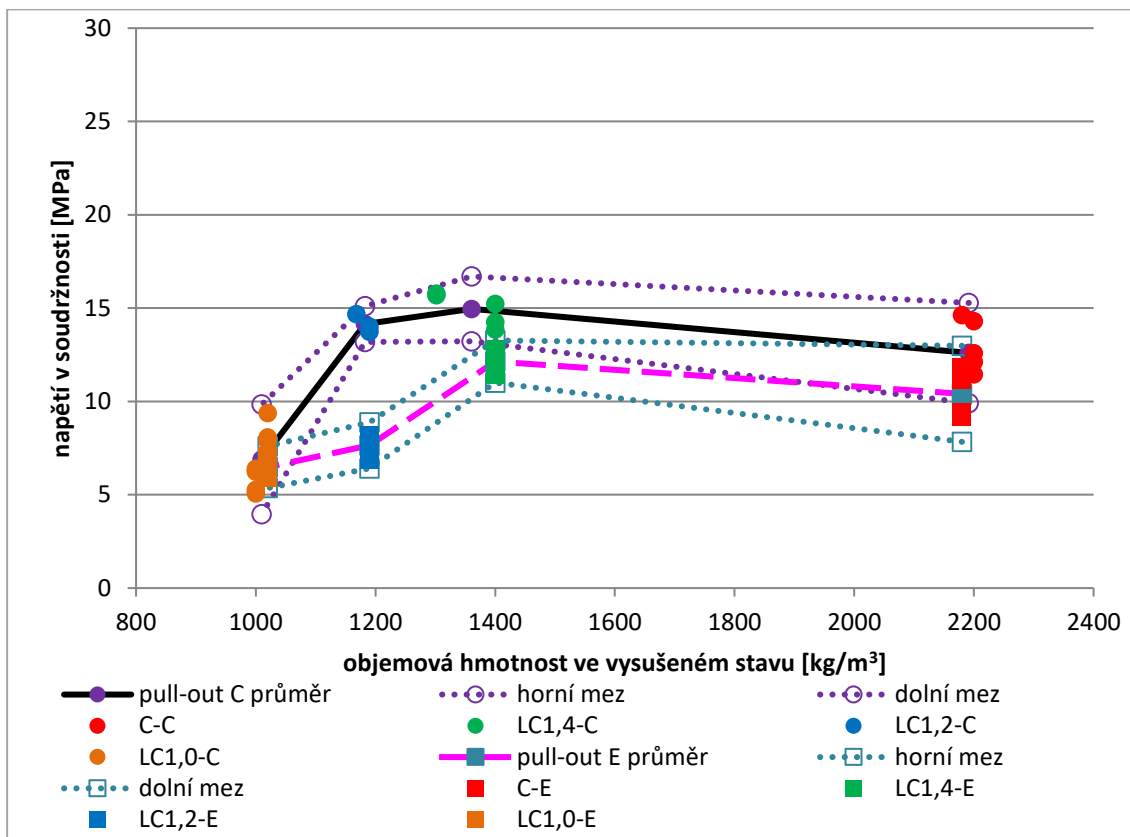
⁷ Zobrazené meze mají spíše orientační charakter, neboť se jedná o malé množství vzorků.

nižší než 1200 kg/m^3 . Napětí v soudržnosti je zde 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.

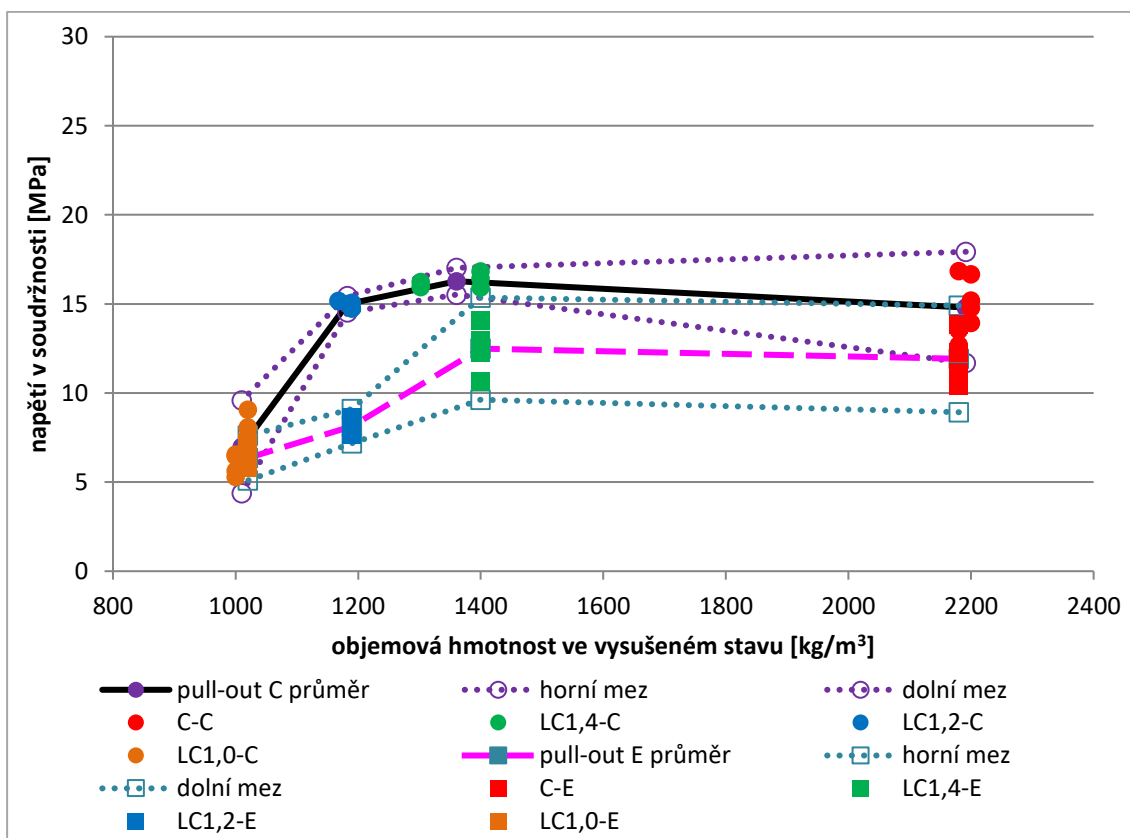
Na grafech (Obr. 67, Obr. 68 a Obr. 69) jsou zobrazeny závislosti napětí v soudržnosti na objemové hmotnosti pro posuny výztuže 0,05; 0,1 a 0,25 mm. Na Obr. 70 jsou shrnuty všechny průměrné hodnoty z předchozích grafů.



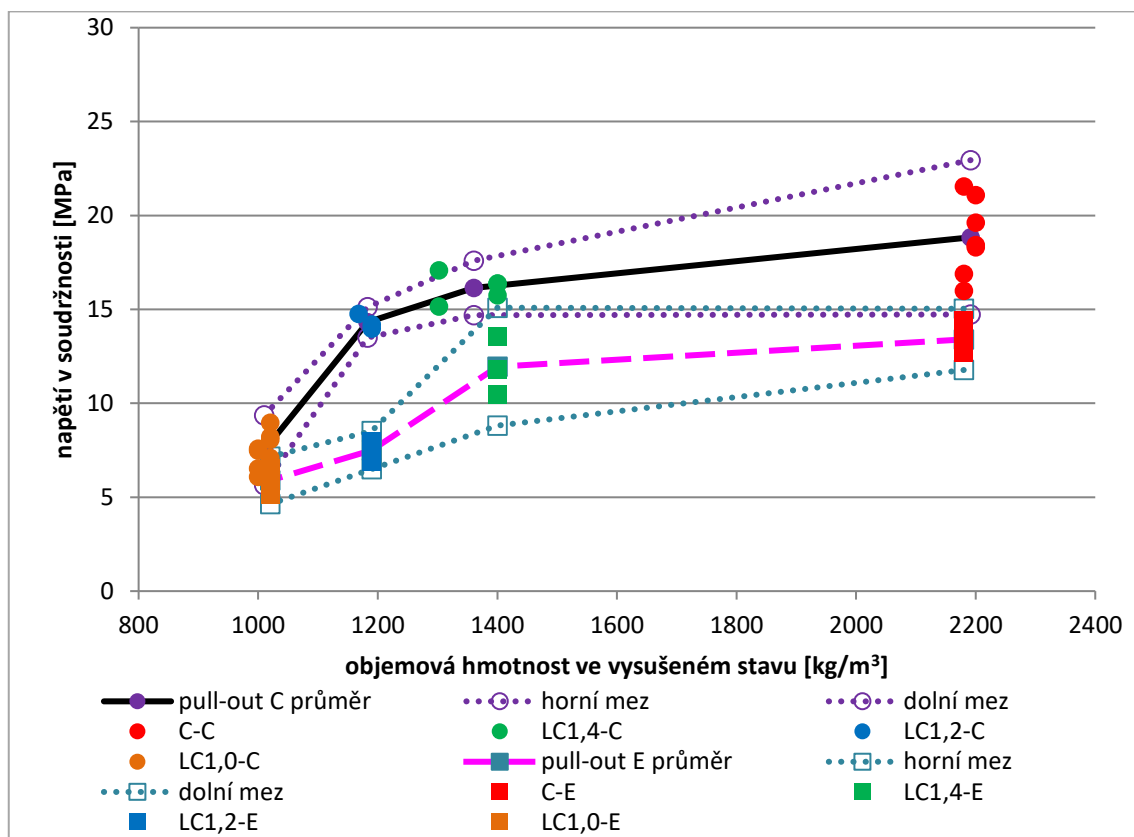
Obr. 66: Závislost napětí v soudržnosti na objemové hmotnosti při maximálním posunu



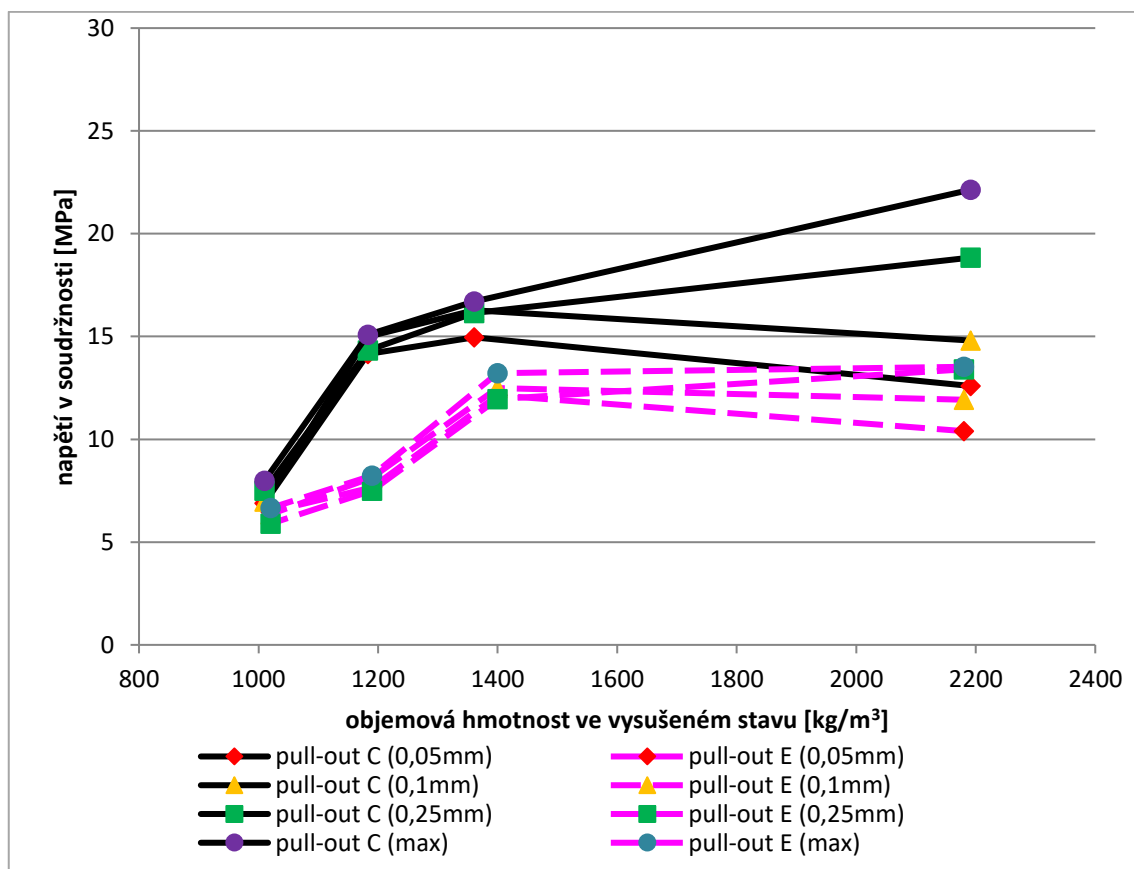
Obr. 67: Závislost napětí v soudržnosti na objemové hmotnosti při posunu 0,05 mm



Obr. 68: Závislost napětí v soudržnosti na objemové hmotnosti při posunu 0,1 mm



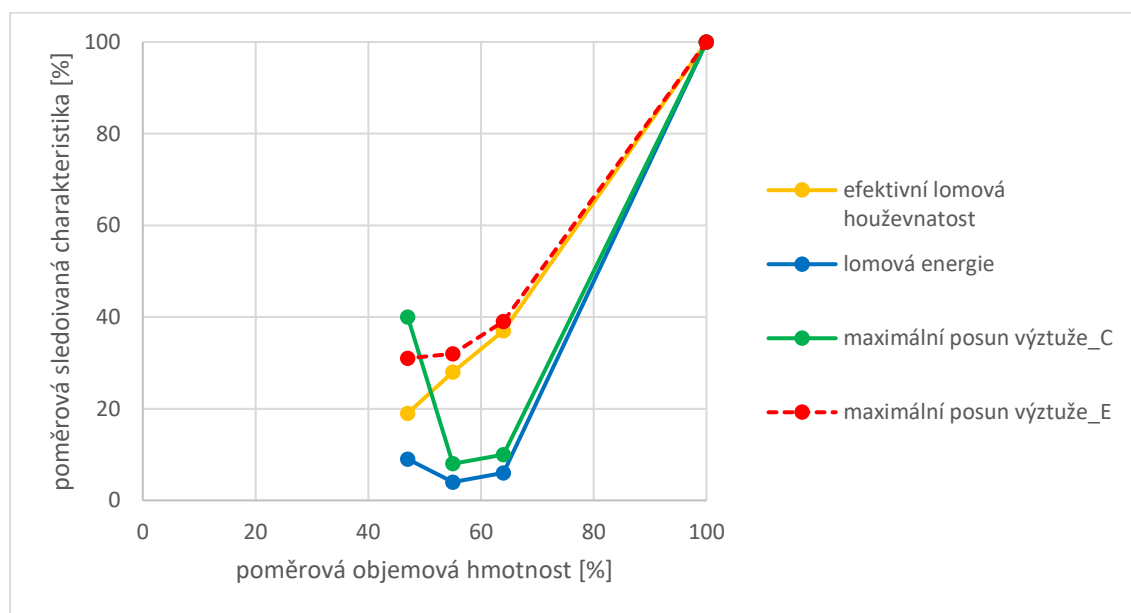
Obr. 69: Závislost napětí v soudržnosti na objemové hmotnosti při posunu 0,25 mm



Obr. 70: Závislosti napětí v soudržnosti na objemové hmotnosti pro změřené posuny

Z grafů je patrné, že čím větší je posun výztuže, tím je naměřeno vyšší napětí v soudržnosti. To platí zejména pro běžný beton. Při malých deformacích (0,05 mm a 0,1 mm), kde se projevuje především adheze a vliv tření, bylo naměřeno vyšší napětí v soudržnosti u lehkých betonů s označením LC1,2 a LC 1,4. Použitím pouze lehkého kameniva byl nárůst napětí v soudržnosti při zvyšující se deformaci minimální. U lehkého betonu s označením LC1,4, kde bylo již přidáno drobné hutné kamenivo, je možné mírné zvýšení mezního napětí v soudržnosti pozorovat. Hodnota napětí v soudržnosti se dominantně zvýšila pouze u varianty běžného betonu, a to až o 75% oproti velikosti napětí v soudržnosti, které bylo dosaženo při posunu 0,05 mm. Dá se důvodně předpokládat, že na zvýšení hodnoty napětí v soudržnosti se podílí především vliv zaklínění hutného kameniva mezi žebírka výztuže.

Velmi zajímavé shody bylo dosaženo při poměrovém srovnání maximálního dosaženého posunu nezátíženého konce centricky umístěné výztuže a velikostí lomové energie. Poměrovému srovnání maximálního posunu nezátíženého konce excentricky umístěné výztuže nejvíce odpovídal parametr efektivní lomové houževnatosti, jak zobrazuje Obr. 71. Hodnota 100% odpovídá parametrům dosaženým na běžném betonu.



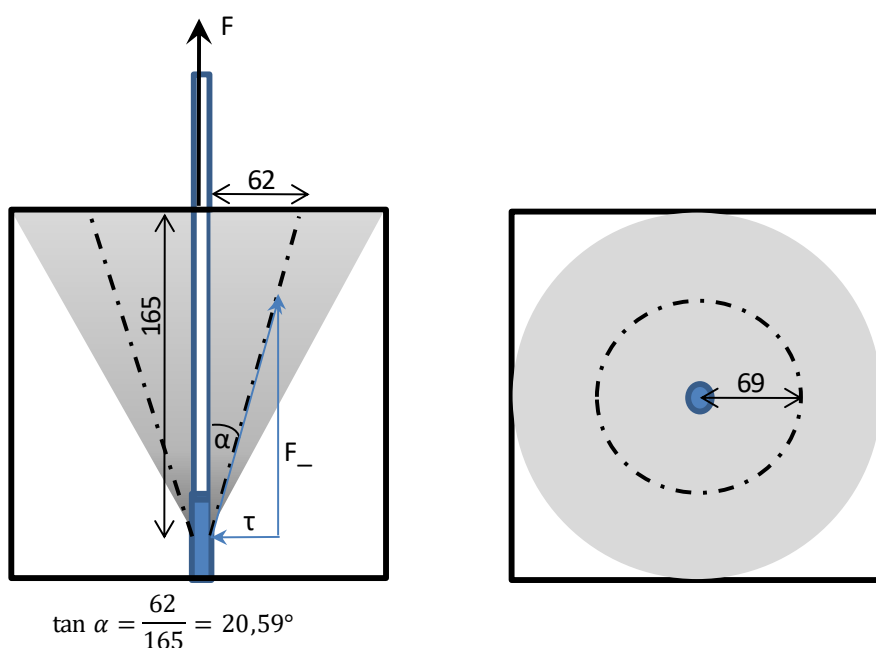
Obr. 71: Grafické srovnání maximálních dosažených posunů výztuže s lomovými charakteristikami

4.3.3.5. Porovnání naměřených údajů s normovými podklady

Pro porovnání experimentálně stanovených hodnot s hodnotami předepsanými normami byly použity tři různé dokumenty. Důležité srovnání poskytuje v současnosti platný předpis pro navrhování betonových konstrukcí „EC2“, [2]. Další srovnání je provedeno s dokumentem [32], označovaným zkratkou „MC 2010“, jenž patří mezi nejnovější předpisy. Poslední srovnání poskytuje fib Bulletin 72, viz [33], který rozvádí a komentuje vztahy uvedené v MC 2010 a dává je do hlubších souvislostí.

Při porovnání vzorků s centricky umístěnou výztuží je nutné normové hodnoty zvýšit o vliv přitlaku, který vzniká v důsledku konfigurace pull-out zkoušky. Zkouška s excentricky umístěnou výztuží byla navržena tak, aby přitlak neovlivňoval výsledné hodnoty.

Přítlak byl u centricky umístěných výztuží stanoven z geometrie zatěžovací zkoušky a velikosti maximální síly, která byla při zkoušce dosažena. Idealizované tlakové pole, které bylo při výpočtu přitlaku uvažováno, je zobrazeno na Obr. 72. Tlaková síla (N/m) byla uvažována v těžišťové ose vzniklé plochy. Takto stanovená velikost přitlaku dosahovala v případě běžného betonu hodnoty 7,59 MPa. Pro lehký beton s označením LC1,4 byla velikost přitlaku 5,90 MPa. Hodnota přitlaku pro ultralehký beton LC1,2 činila 5,27 MPa. Nejnižšího přitlaku bylo dosaženo u nejllehčího typu betonu s označením LC1,0, u nějž dosahoval přitlak hodnoty pouze 2,99 MPa.



Obr. 72: Uvažované tlakové pole ve vzorku

4.3.3.6. Výpočet dle EC2 [2]

Velikost napětí v soudržnosti podle EC2 je dána vztahem (3.3) uvedeným v kapitole 3.6.1. Charakteristické hodnoty byly pro možnost porovnání nahrazeny hodnotami průměrnými a všechny součinitele bezpečnosti byly uvažovány velikostí 1,0. Průměrnou pevnost betonu v tahu, která je uvažována ve vzorci (3.3), je možné získat dvěma způsoby, a to buď z naměřené tlakové pevnosti dle vzorce (4.11), nebo z pevnosti betonu v příčném tahu, vzorec (4.4). V obou případech vstupuje vliv lehkého betonu na velikost napětí v soudržnosti pouze sníženými (naměřenými) mechanickými charakteristikami betonu. V případě, kdy nejsou stanoveny mechanické parametry lehkého betonu ze zkoušek, použijí se tabulkové hodnoty pro běžný beton, které jsou upraveny součinitelem η_1 reflektujícím nižší objemovou hmotnost lehkého betonu.

Vliv velikosti krycí vrstvy je do výpočtu kotevní délky zahrnut součinitelem α_2 :

$$\alpha_2 = 1 - 0,15(c_d - \emptyset)/\emptyset \quad (4.12)$$

kde: c_d ... minimální hodnota krycí betonové vrstvy [mm],
 \emptyset ... průměr výztuže [mm].

Součinitel α_2 , jehož hodnota je omezena od 0,7 do 1,0, slouží pro redukci kotevní délky, která je lineárně závislá na velikosti napětí. Lze tedy převrácenou hodnotou součinitele α_2 navýšit napětí v soudržnosti.

Vliv přítlaku je v případě normy EC2 zahrnut v součiniteli α_5 :

$$\alpha_5 = 1 - (0,04 p) \quad (4.13)$$

kde: p ... příčný tlak [MPa].

Součinitel α_5 slouží také pro snížení kotevní délky. Stejně jako v předchozím případě lze velikost napětí v soudržnosti zvýšit převrácenou hodnotou součinitele α_5 .

V normovém výpočtu se umístění výztuže projeví pouze velikostí součinitele α_2 . Normové vztahy jsou kalibrovány pro velikost krycí vrstvy jeden profil [33], a tedy platí „stejně“ vztahy pro centricky i excentricky umístěnou výztuž. Pouze konfigurace provedené zkoušky s centricky umístěnou výztuží dovoluje zvýšit výpočtovou hodnotu o vliv přítlaku.

4.3.3.7. Výpočet dle MC 2010 [32]

Pro stanovení napětí v soudržnosti lze podle MC 2010 zvolit dva odlišné postupy, bond slip model a semi-empirický vztah.

První uvedený způsob výpočtu, bond slip model, je určen převážně pro FEM modelování a je odvozen z analytických vztahů napětí v soudržnosti v závislosti na posunu výztuže při monotónním zatížení. Vztahy jsou uvedeny pro případ dvou způsobů porušení vzorku (tzv. „pull-out“ a „splitting“), pro případ vzorku s třmínkovou výztuží a bez ní, a pro dobré a ostatní podmínky soudržnosti. Způsob porušení vzorku závisí na míře omezení zkoušeného vzorku, kde hraje roli tloušťka krycí vrstvy, příčná výztuž a přítlak. Výpočtové vzorce jsou uvedeny v kapitole 3.6.2 na Obr. 17 a v Tab. 5. V případě centricky umístěné výztuže používá MC 2010 vztah pro model porušení pull-out. U excentricky umístěné výztuže, bez vlivu omezení výztuže, se použije model porušení splitting.

Druhým způsobem výpočtu je stanovení napětí v soudržnosti pomocí vztahu (3.6), který slouží k návrhu konstrukcí. Vztah vychází ze základního napětí upraveného o vliv krytí a vliv třmínkové výztuže.

Použití lehkého betonu je ve vztazích zohledněno sníženými mechanickými parametry betonu (nižší tlaková pevnost). V případě druhého způsobu výpočtu lze vliv přítlaku zahrnout pomocí parametru $\Omega_{p,tr}$, který má hodnotu:

$$\Omega_{p,tr} = 1,0 - \tanh \left[0,2 \frac{p_{tr}}{0,1f_{cm}} \right] \quad (4.14)$$

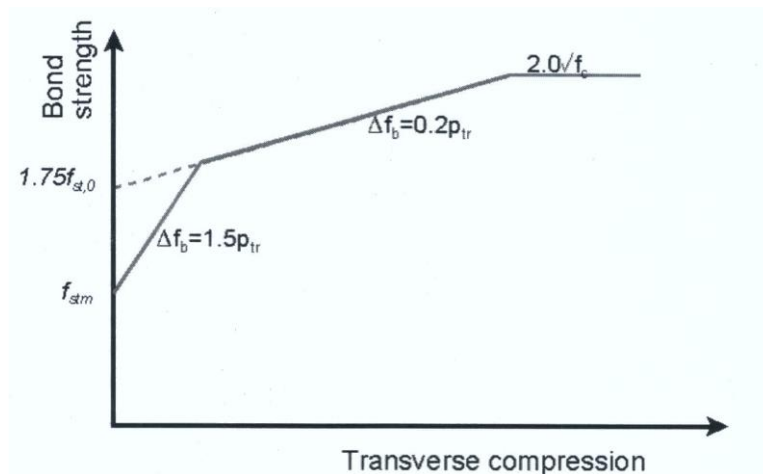
kde: p_{tr} ... příčný tlak [MPa], kde tlak má záporné znaménko.

Součinitelem $\Omega_{p,tr}$ se přímo zvyšuje napětí v soudržnosti.

4.3.3.8. Výpočet dle fib 72 [33]

Poslední srovnání je provedeno podle fib Bulletinu 72. Výpočet pro stanovení napětí v soudržnosti je zde uveden v kapitole 3.6.2 jako vztah (3.4). Použitý vzorec vychází jako nejlepší shoda odvozená ze 750 provedených a vyhodnocených experimentů. Pro lehký beton se vztah (3.4) nemění a lehký beton vstupuje do výpočtu opět pouze nižšími dosaženými mechanickými parametry.

Nejpodrobnější popis vlivu přítlaku na velikost mezního napětí v soudržnosti je uveden právě v tomto předpisu. Vliv přítlaku způsobuje oddálení porušení vlivem štěpení (označovaného splitting) a zvyšuje vliv třecích sil mezi výztuží a betonem. Největší změna napětí v soudržnosti vlivem přítlaku je vyvolána při nižších přítlacích. Se zvyšujícím se přítlakem se napětí v soudržnosti mění již méně výrazně a je omezeno hodnotou, která je odvozena od bond-slip modelu (vztah pro porušení pull-out v MC 2010). Vliv přítlaku je v dokumentu popsán pomocí tri-lineárního vztahu, který zobrazuje Obr. 73 a je popsán vztahem (4.15).



Obr. 73: Vliv přítlaku na velikost napětí v soudržnosti

$$f_{stm,tr} = f_{stm} + 6 \left(\frac{l_b}{\phi} \right) p_{tr} < 1,75f_{st,0} + 0,8 \left(\frac{l_b}{\phi} \right) p_{tr} < 8 \left(\frac{l_b}{\phi} \right) f_c^{0,5} \quad (4.15)$$

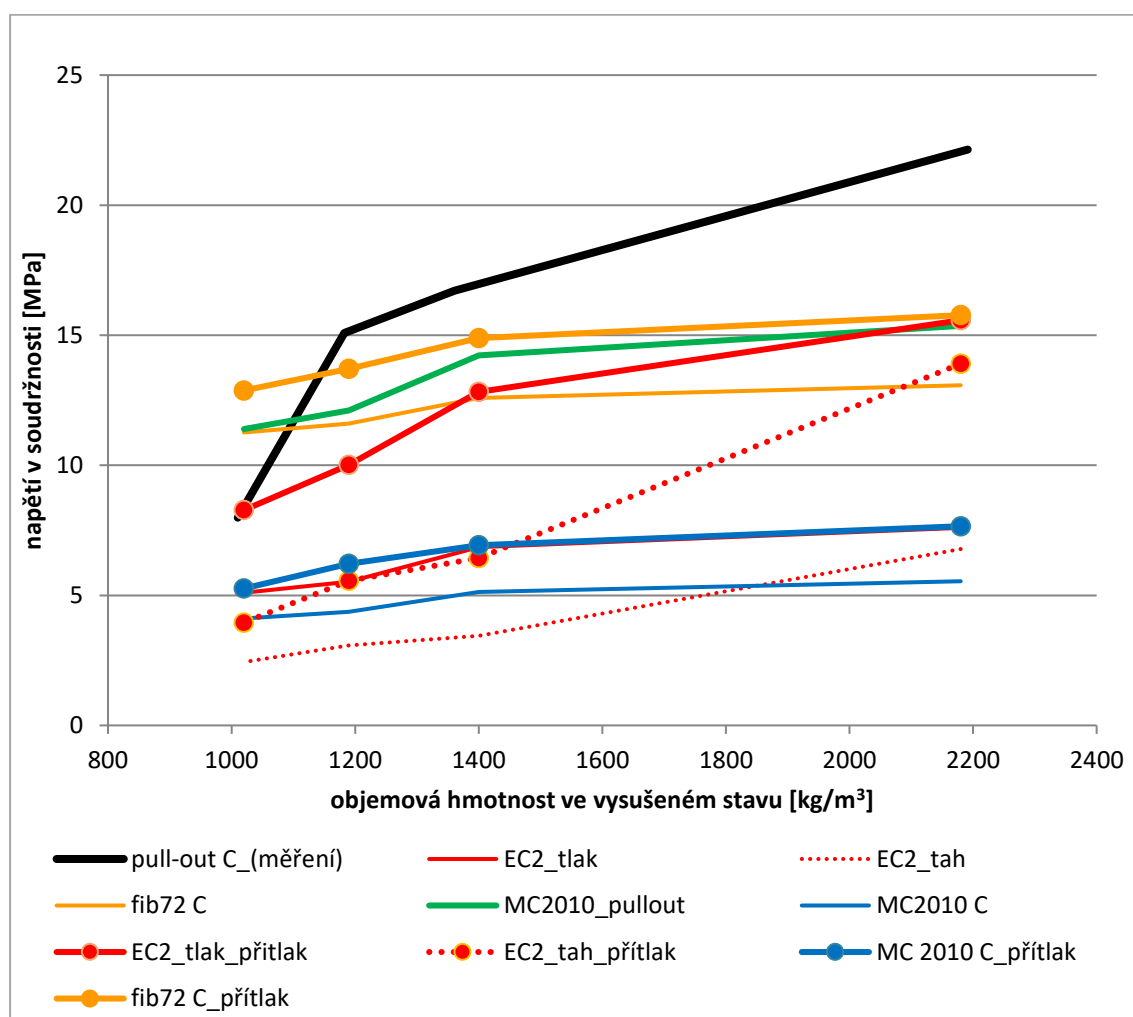
kde: p_{tr} ... příčný tlak [MPa],

$f_{st,0}$... střední napětí v soudržnosti:

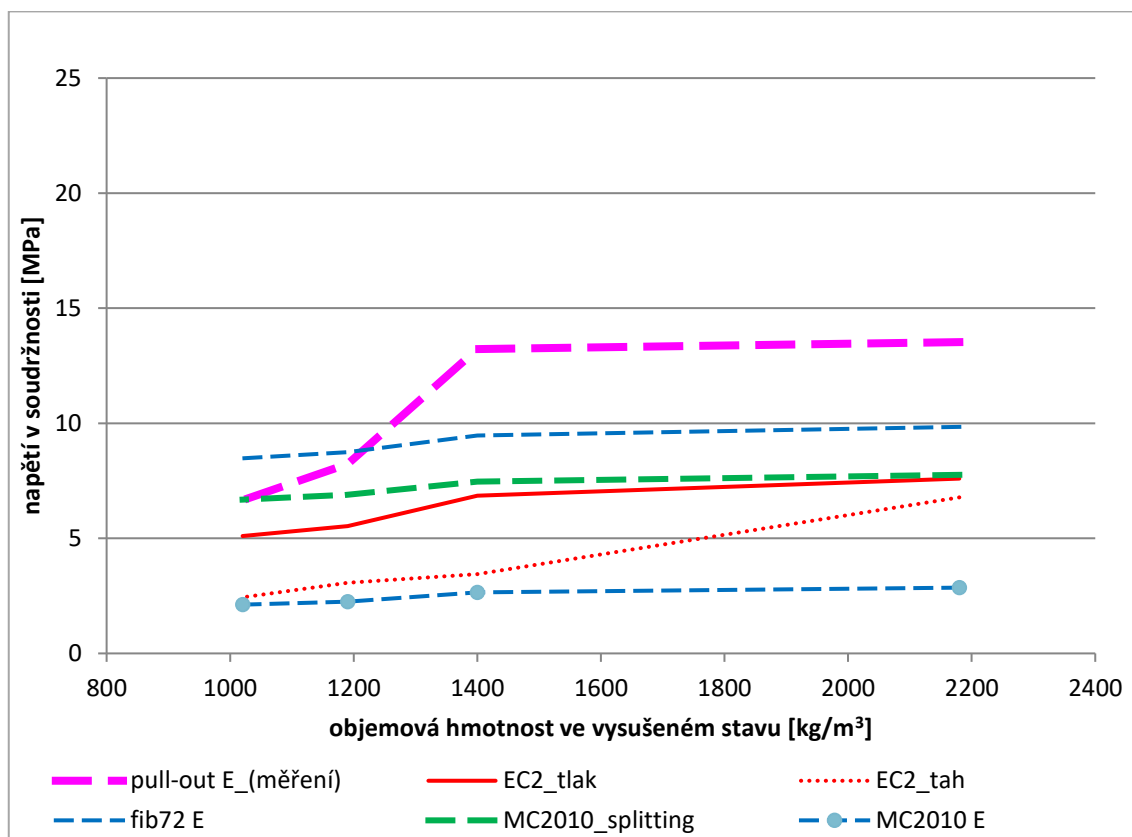
$$f_{st,0} = 54 \left(\frac{f_c}{25} \right)^{0,25} \left(\frac{l_b}{\phi} \right)^{0,55} \left(\frac{25}{\phi} \right)^{0,2} \quad (4.16)$$

4.3.3.9. Srovnání teoretických a naměřených hodnot

Srovnání naměřených a vypočítaných hodnot je zobrazeno na Obr. 74 a Obr. 75. 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 jsou zobrazeny tečkovanou čarou. Obr. 74 zobrazuje závislost centricky umístěné výztuže a Obr. 75 excentricky umístěné výztuže.



Obr. 74: Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot napětí v soudržnosti s centricky umístěnou výztuží



Obr. 75: Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot napětí v soudržnosti s excentricky umístěnou výztuží

Nejlepší shody napětí v soudržnosti bylo dosaženo (vyjma ultralehkých betonů) u centricky umístěné výztuže v případě použití vztahu (3.4) uvedeného ve fib 72 při započítání vlivu přítlaku. Obdobné hodnoty udává i vztah uvedený v MC 2010 s pull-out porušením. V aktuálně platné normě poskytuje lepší shodu výpočet odvozený z tlakové pevnosti betonu než vztah na základě pevností tahových. Při započítání vlivu přítlaku a zohlednění polohy výztuže ve vztahu EC2 odvozeného z tlakové pevnosti bylo dosaženo dobré shody s hodnotami z experimentu. Nejnižších hodnot bylo dosaženo výpočtem dle MC 2010 pomocí semi-empirických vztahů a EC2 odvozeného z tahové pevnosti bez započítání přítlaku a bez zohlednění umístění výztuže.

Vliv přítlaku na zvýšení velikosti napětí v soudržnosti byl ve všech případech srovnatelný a zvyšoval hodnoty napětí v soudržnosti kolem 30%.

U zkoušky s excentricky umístěnou výztuží bylo dosaženo nejlepší shody rovněž při použití vztahu uvedeného ve fib 72. Méně výraznou shodu poskytuje vztah v normě MC 2010, který popisuje porušení způsobem splitting. Vztahy uvedené v EC2 jsou pro porovnání vztahů s excentricky umístěnou výztuží vhodnější, neboť byly odvozeny pro velikost krycí vrstvy o velikosti právě jednoho profilu. Nejlepší shody výpočtu s experimentem bylo dosaženo opět při výpočtu dle semi-empirických vztahů uvedených v MC 2010.

4.3.3.10. Diskuze výsledků a navrhované úpravy vztahů

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/m^3 s centricky umístěnou výztuží. V případě aproximace naměřených hodnot bilineární závislosti je poměr směrnic mezi přímkami v intervalu 1000 až 1200 kg/m^3 a 1200 až 2200 kg/m^3 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 poklesu⁸ již u hodnoty objemové hmotnosti 1400 kg/m^3 . Ani v tomto případě normové hodnoty se změnou velikosti napětí v soudržnosti nepočítají.

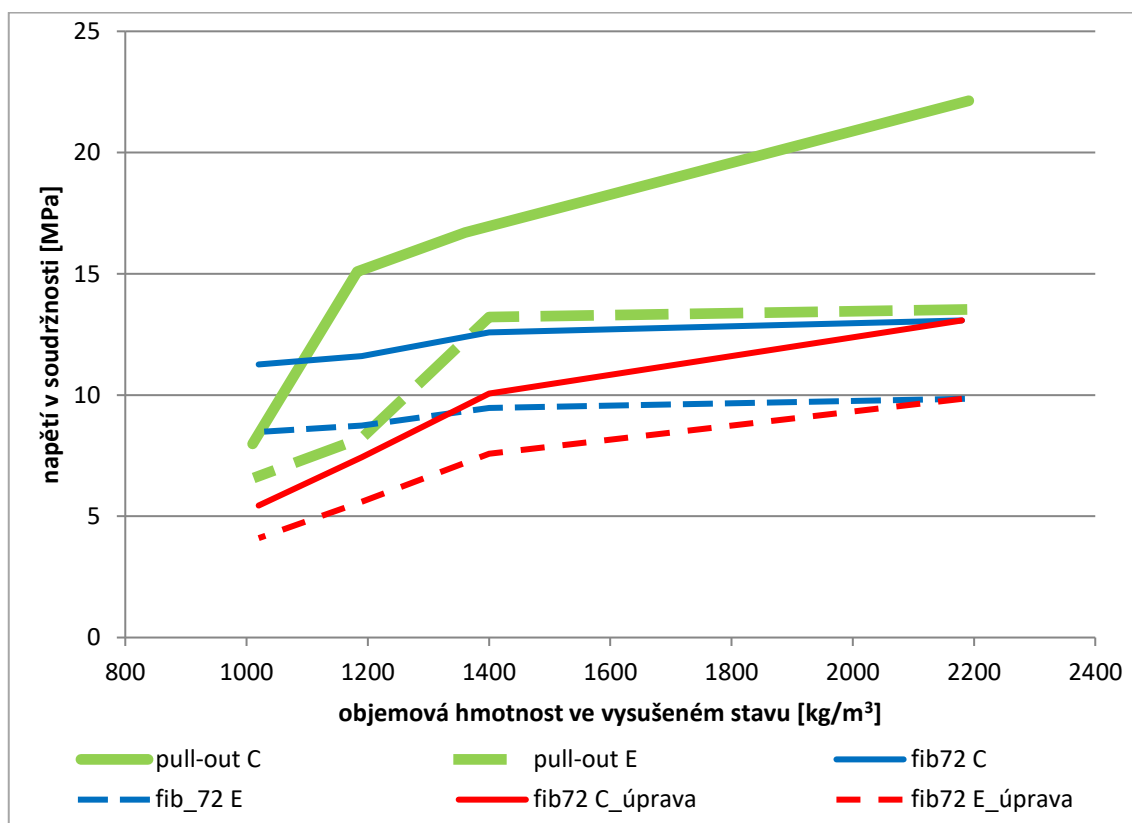
Vhodným opatřením pro snížení normových hodnot napětí v soudržnosti v oblasti ultralehkých betonů by bylo započítat do soudržnosti vliv provzdušnění betonu. Jak je známo, provzdušnění betonu má vliv na pokles tlakové pevnosti. Udává se, viz např. [5], že jedno procento vzduchu v čerstvém betonu způsobí pokles tlakové pevnosti betonu o 5%. Ve výpočtu napětí v soudržnosti, který převážně vychází z tlakové pevnosti, je již pokles vlivem provzdušnění nepřímo 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 [33], který vykazoval nejlepší shodu s naměřenými hodnotami. Objem vzduchu v čerstvém betonu byl u varianty LC1,0 15%. U varianty LC1,2 byl naměřen obsah vzduchu 9% a varianta betonu LC1,4 obsahovala 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:

$$f_{stm} = 54 \left(\frac{f_{cm}}{25}\right)^{0,25} \left(\frac{l_b}{\phi}\right)^{0,55} \left(\frac{25}{\phi}\right)^{0,2} \left[\left(\frac{c_{min}}{\phi}\right)^{0,25} \left(\frac{c_{max}}{c_{min}}\right)^{0,1} + k_m K_{tr} \right] \left(\frac{4}{V}\right)^{0,55} \quad (4.17)$$

Úprava vzorce spočívá v přidání redukujícího součinitele závislého na obsahu vzduchu v čerstvém betonu. Obsah vzduchu se stanoví dle [60].

⁸ 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.

V ... procentuální objem vzduchu v čerstvém betonu, minimálně však 4%. Pro beton s běžným provzdušněním je poslední člen rovnice (4.17) 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 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. 76.



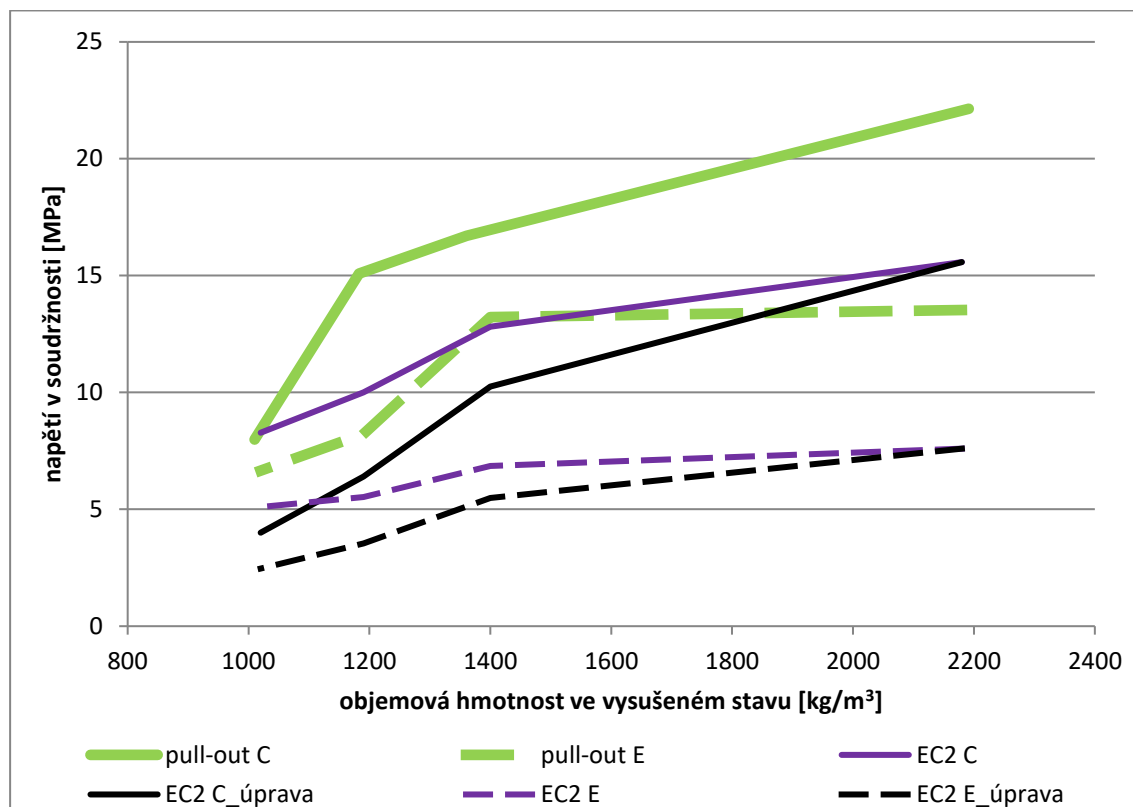
Obr. 76: Upravený vztah pro výpočet napětí v soudržnosti pro fib 72

Nejpoužívanějším předpisem pro návrh betonových konstrukcí v České republice je aktuálně EC2. 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 (3.3), čímž lze opět docílit snížení napětí v soudržnosti u betonů s vyšším obsahem vzduchových pórů. Lze aplikovat upravený vztah, který je navíc modifikován o vliv přítlaku a umístění výztuže:

$$f_{bd} = 2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctm} \frac{1}{\alpha_2} \frac{1}{\alpha_5} \left(\frac{4}{V}\right)^{0,55} \quad (4.18)$$

kde: f_{ctm} je odvozena z tlakové pevnosti, vztah (4.11).

V grafu na Obr. 77 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 výztuži excentrické s krytím jednoho profilu. Veškeré uvedené hodnoty jsou uvažovány jako střední.



Obr. 77: Upravený vztah pro výpočet napětí v soudržnosti pro EC 2

4.3.4. Využití akustické emise při měření napětí v soudržnosti

Ověření sníženého až nulového účinku zaklínění kameniva mezi žebírka výztuže (a tím i křehkého způsobu porušení) u betonů s lehkým kamenivem bylo provedeno pomocí nedestruktivní metody založené na principu akustické emise.

Pojmem akustická emise se označuje fyzikální jev, při němž pozorujeme akustické signály vysílané mechanicky nebo tepelně namáhaným tělesem, a zároveň diagnostickou metodu založenou na tomto jevu [60].

Akustická metoda je vhodná především pro nedestruktivní měření vad a poruch v materiálech. Uplatňuje se například při lokalizaci závad potrubí, stanovování koroze betonářských výztuží a předpínacích kabelů [62]. Díky síti snímačů umožňuje akustická emise lokalizaci emisních zdrojů, při detekci pouze aktivních vad, které vznikají při daném způsobu namáhání. Akustická emise umožňuje následné kontinuální měření a sledování vad.

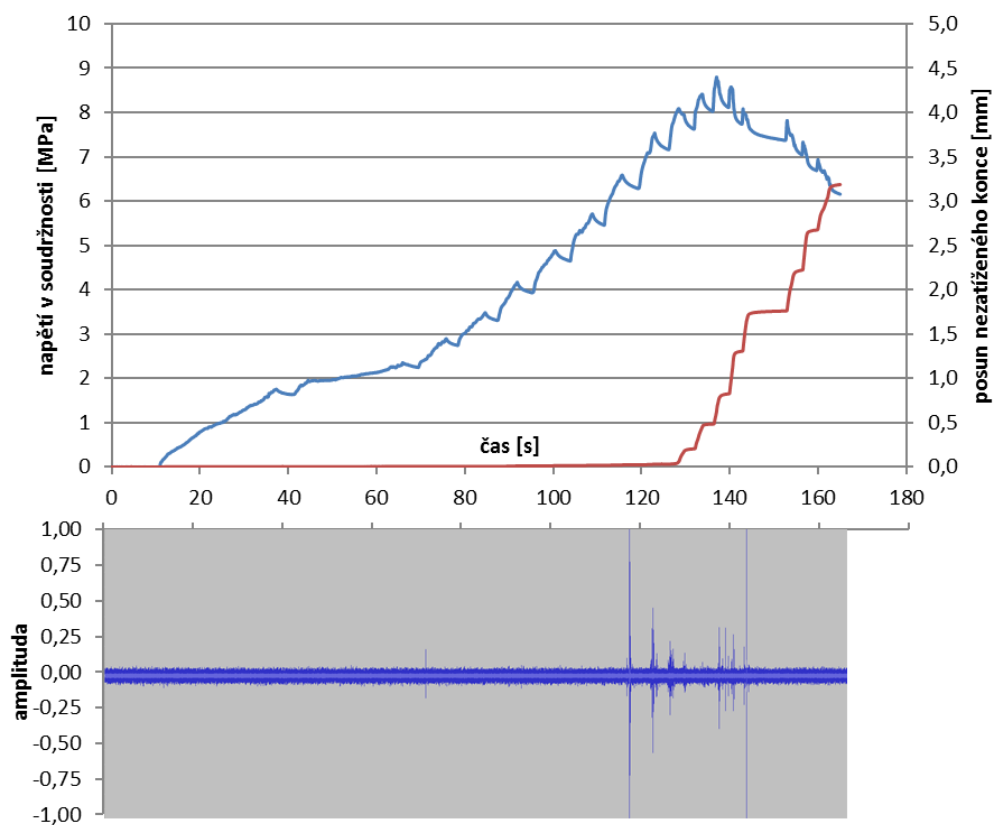
S pomocí akustické emise byl sledován rozvoj „vnitřních“ trhlin při zkoušce centrické soudržnosti výztuže s betonem ULC D1,0 – Liapor. Naměřené výsledky byly porovnány s běžným betonem C30/37. Běžný beton byl vyroben v podniku Prefa Brno a.s., závod Kuřim. Maximální hodnota napětí v soudržnosti dosahovala u tohoto betonu pouze 8,77 MPa⁹.

Měření probíhalo v laboratořích SZK, FAST VUT v Brně za přítomnosti Ing. Jana Kašpaříka, který prováděl měření akustické emise při průběhu testu soudržnosti. Měření napětí v soudržnosti probíhalo shodně s měřením uvedeným v kapitole 4.3.1. Akustická emise byla měřena v průběhu pull-out testu. Na zkušební vzorek byly osazeny tři piezoelektrické snímače vlastní konstrukce Ing. Kašpaříka. Dva snímače byly umístěny na betonové krychli (poblíž soudržné části výztuže). Třetí snímač byl umístěn na kotevním kuželíku. Více snímačů bylo použito pro časové odlišení impulzů. Záznam pro vyhodnocení měření akustické emise byl ukládán dvoukanalově pomocí programu Audacity s rozlišením čtyř mikrosekund. Snímač umístěný na kotevním kuželíku sloužil pro on-line akustickou kontrolu, kterou prováděl Ing. Kašpařík. Umístění měřících snímačů je patrné z Obr. 78.

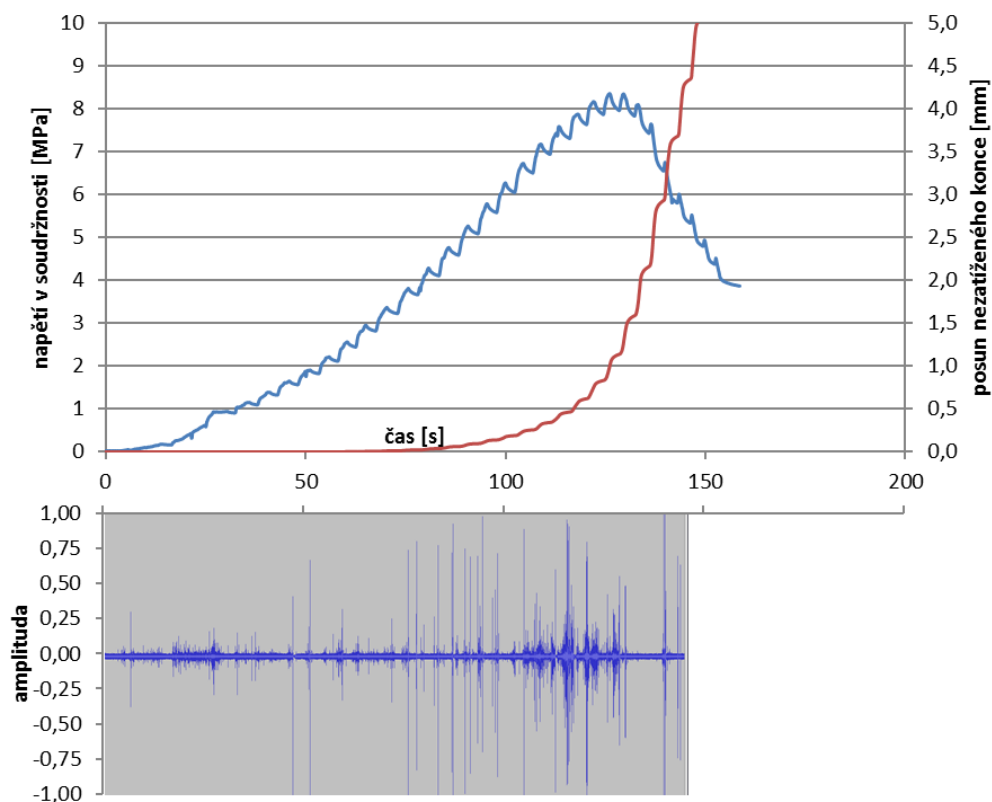
⁹ Dosažená hodnota napětí v soudržnosti je cca 2,5x nižší než byla standardně u tohoto typu betonů dosahována. Důvodem může být nedostatečná kázeň při výrobě vzorků, neopatrná manipulace s vybetonovanými vzorky před převozem na FAST VUT v Brně, případně nevhodné vlastnosti čerstvého betonu. Výroba vzorků pro měření akustické emise probíhala bez dozoru pracovníka FAST VUT v Brně.



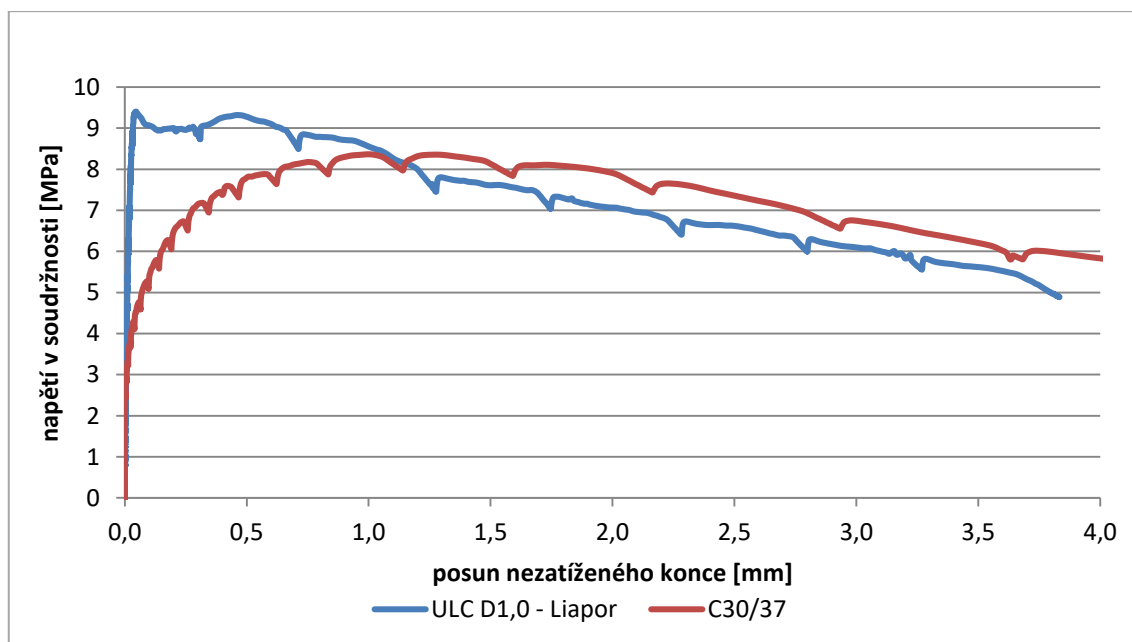
Obr. 78: Osazení snímačů pro měření akustické emise



Obr. 79: Záznam napětí v soudržnosti (modře), posunu nezatíženého konce výztuže (červeně) a akustické emise v závislosti na čase při centrickém pull-out testu betonu s označením ULC D1,0



Obr. 80: Záznam napětí v soudržnosti (modře), posunu nezátíženého konce výztuže (červeně) a akustické emise v závislosti na čase při centrickém pull-out testu betonu C30/37



Obr. 81: Závislost velikosti napětí v soudržnosti na posunu nezátíženého konce při zkoušení akustické emise

Maximálního napětí v soudržnosti u lehkého betonu s označením ULC D1,0 – Liapor bylo dosaženo při posunu nezátíženého konce výztuže o velikosti 0,039 mm a dosahovalo hodnoty 9,4 MPa (výsledky z jednoho zkušební vzorku). Po dosažení maximálního napětí docházelo

u vzorku pouze k poklesu napětí bez znatelného navýšení napětí vlivem efektu zaklínění kameniva mezi žebírka výztuže. Tomuto předpokladu odpovídá i odezva akustické emise zobrazená na Obr. 79. Největšího akustického impulzu bylo dosaženo v čase 117 sekund, těsně před znatelným posunem výztuže. Ke znatelnému akustickému impulzu došlo ještě ve 143. sekundě, kdy bylo dosaženo největšího napětí. Mezi těmito hraničními impulzy bylo zaznamenáno několik slabších impulzů.

V případě běžného betonu, u kterého dosahovalo maximální napětí v soudržnosti hodnoty jen 8,36 MPa při velikosti posunu nezatíženého konce výztuže 1 mm, je situace (i přes znatelné porušení kontaktu) značně odlišná. První větší impulz je zaznamenán již v čase 50 sekund od začátku měření. Velikost napětí v soudržnosti při tomto impulzu dosahovala hodnoty 1,9 MPa. Dalšího znatelného impulzu je dosaženo v čase 75 sekund, při napětí 3,8 MPa. Dále již nebyla závislost napětí v soudržnosti na velikosti posunu nezatíženého konce výztuže lineární. Do tohoto momentu bylo zaznamenáno velké množství impulzů, které s velkou pravděpodobností naznačují lokální zaklínění hutného kameniva mezi žebírka výztuže. Největší impulz nastal v čase 115 sekund, kdy bylo dosaženo také nejvyššího napětí v soudržnosti. I poté docházelo k postupnému zaklíňování kameniva mezi žebírka výztuže, což vyvolávalo další měřitelné impulzy.

Ze zvukového záznamu a ze záznamů zobrazených na Obr. 79, Obr. 80 a Obr. 81 je patrný rozdílný způsob porušení zkušebních vzorků s hutným a lehkým kamenivem. I přes nízký počet provedených experimentů lze usuzovat, že v případě lehkých betonů se z větší části projevuje adheze a tření, která je dominantní při malých deformacích. V případě běžného betonu je naproti tomu znatelný vliv zaklínění kameniva mezi žebírka výztuže, ke kterému dochází se zvětšující se deformací.

5. PRAKTICKÉ APLIKACE ULC

Vyvinutý ultralehký beton byl aplikován pro celou řadu prvků použitelných v reálných konstrukcích v rámci projektu MPO TIP FR TI 4/159. Výroba větších prvků probíhala převážně v podniku Prefa Brno a.s., závod Kuřim. Menší prvky byly zhotoveny v laboratoři ÚBZK, FAST VUT v Brně. Velkou měrou se na výrobě všech prvků podílel autor disertační práce. Vyhodnocení provedli Ing. Kostiha, Ing. Čairovič a Ing. Šulák, Ph.D. Níže uvedené výsledky experimentů jsou převzaty z průběžných a závěrečných zpráv projektu MPO [64]-[71], a to z důvodu komplexnosti celého textu.

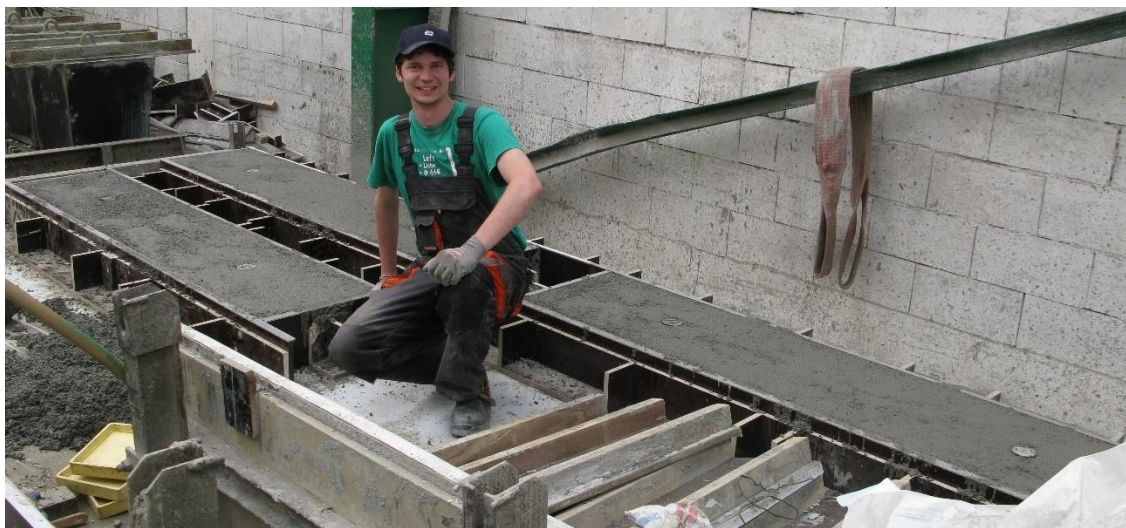
5.1. Lehký příčný segment pro konstrukci ekoduktů

Využití lehkého betonu je plánováno v inženýrských stavbách ekoduktů. Tuhé nosné prvky jsou navrženy z vysokopevnostního betonu v definovaných modulových vzdálenostech. Mezi tyto prvky jsou aplikovány příčné segmenty z lehkého betonu.



Obr. 82: Vizualizace monolitické varianty ekoduktů

Příčný výplňový segment byl vyhotoven z lehkého betonu ULC D1,2eco 20/22 o rozměrech 200/500/2200 mm. Výroba probíhala v podniku Prefa Brno a.s., závod Kuřim. Průřez byl vyztužen 4 pruty průměru 14 mm z nekovové výztuže GFRP.



Obr. 83: Povedená betonáž panelů v podniku Prefa Brno a.s.



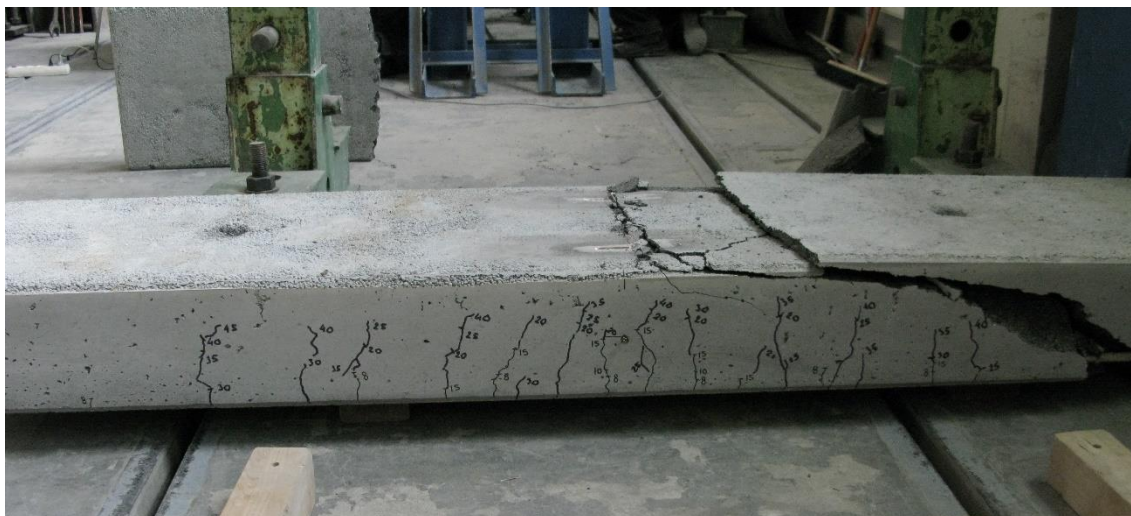
Obr. 84: Výplňový segment z lehkého betonu po odformování



Obr. 85: Zkoušení příčného segmentu v třibodovém ohybu (SZK FAST VUT v Brně)

Zatěžování prvků do vzniku prvních trhlin probíhalo po krocích 2 kN a následně po 5 kN až do porušení prvku. Mezi jednotlivými kroky byly prováděny časové prodlevy kvůli ustálení deformací a kontrole vzniku a rozvoje trhlin.

První trhliny vznikly při zatížení cca 10 kN. Při síle 55 kN a dosaženém průhybu 12,8 mm došlo ke smykovému porušení prvků.



Obr. 86: Porušení příčného segmentu ekoduktu

5.2. Klenba ze segmentů z ultralehkého betonu

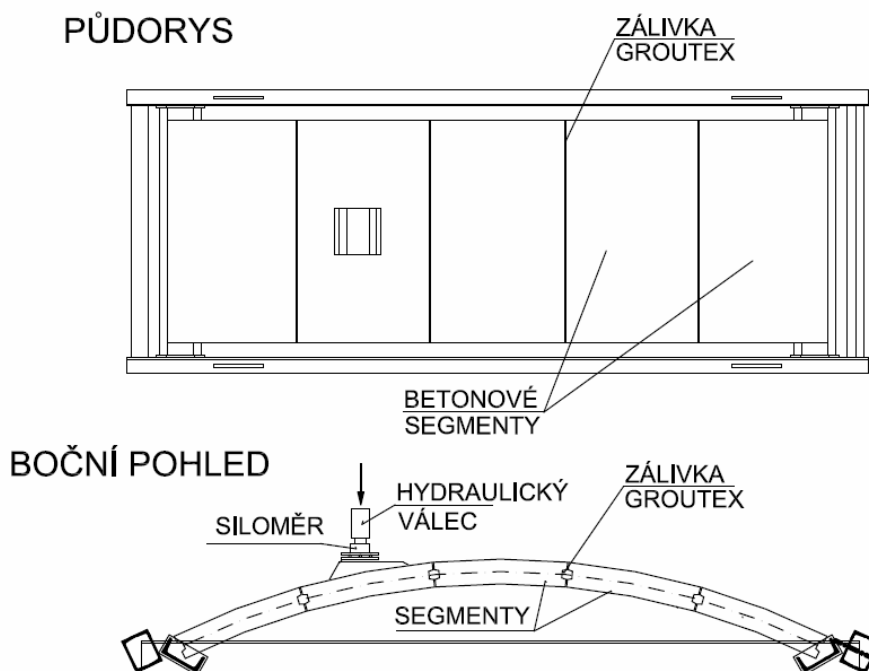
Prefabrikovaný prvek klenbového tvaru byl vyhotoven v laboratoři ÚBZK, FAST VUT v Brně a skládal se z 5 zakřivených segmentů o půdorysných rozměrech 550/900 mm. Segmenty z lehkého betonu byly provedeny v tloušťce 100 mm. Dvě klenby byly provedeny z ultralehkého betonu s označením ULC20/22 D1,2 a jedna z betonu ULC20/22 D1,2eco. U kleneb byly zkoušeny různé typy předpínacích GFRP lan. Tvar bednění segmentu pro klenbu je patrný z Obr. 87. U segmentů umístěných pod vnášenu silou byly ponechány drážky pro vlepení dodatečné výztuže na rubové straně klenby.



Obr. 87: Bednění segmentu klenby



Obr. 88: Klenbový segment po odbednění s detailem zámku

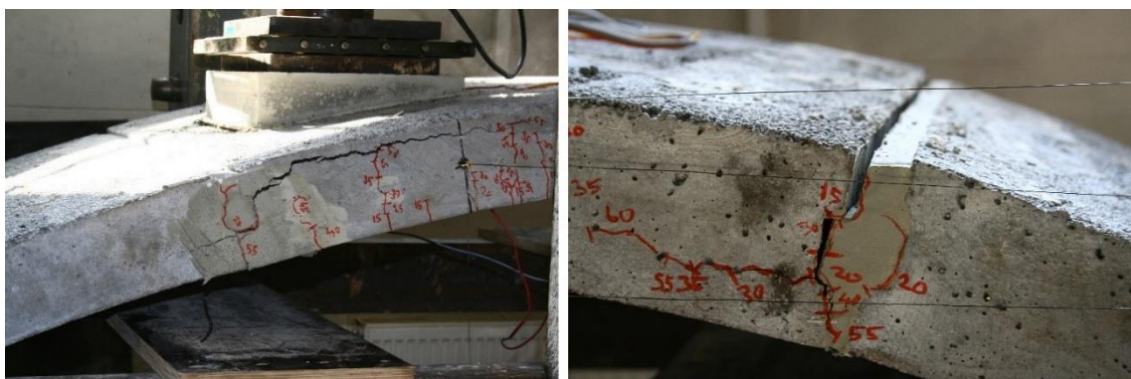


Obr. 89: Schéma experimentu a provedení klenby (referenční - nepředpjatý prvek)



Obr. 90: Zkoušení klenby z lehkého betonu s předpínacími GFRP lany

Konstrukce byla zatěžována osamělou silou umístěnou ve vzdálenosti 550 mm od vrcholu klenby. Nejčastějším druhem porušení klenby bylo smykové selhání. Vliv předpětí měl ovšem značný vliv na deformaci (tuhost) konstrukce, způsob porušení a na zvýšení únosnosti prvku. S použitím předpínacích nekovových lan došlo ke zvýšení únosnosti klenby o 70%. Maximální vnesená síla dosahovala 112 kN. Síla u nepředepnuté klenby byla pouze 66 kN. Rozdíl ve způsobu selhání nepředepnuté a předepnuté klenb zobrazuje Obr. 91 a Obr. 92.



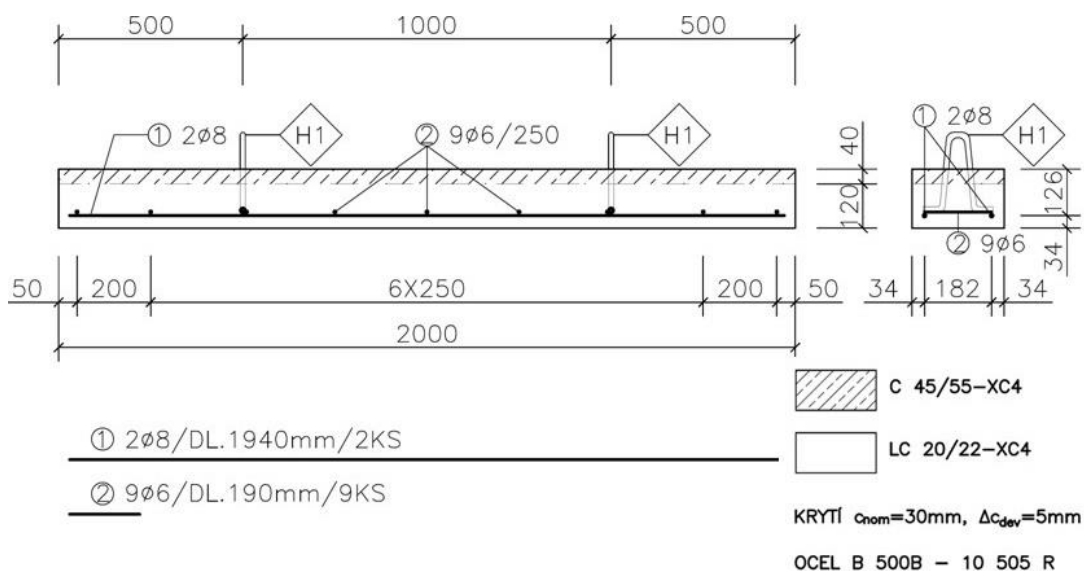
Obr. 91: Porušení nepředepjaté segmentové klenby



Obr. 92: Porušení předepjaté segmentové klenby

5.3. Vrstvený nosník

Možné uplatnění lehkého betonu bylo nalezeno ve vrstvených (sendvičových) konstrukcích. Pro prvotní experimenty byl navržen nosník o rozměrech 250/160/2000 mm. Beton ULC 20/22 D1,2eco tvořil 75% objemu (výšky) nosníku. Zbytek nosníku byl dobetonován z běžného betonu C45/55. Mocnost betonových vrstev byla navržena s ohledem na minimalizaci namáhání v místě pracovní spáry (na rozhraní lehkého a běžného betonu). Rozměry a způsob vyztužení jsou zřetelné z Obr. 93.



Obr. 93: Schéma a způsob vyztužení vrstveného nosníku



Obr. 94: Úprava pracovní spáry zdrsněním a dobetonávka vrstvy z běžného betonu

Pracovní spára mezi jednotlivými vrstvami betonu byla upravena pouze zdrsněním povrchu, jak naznačuje Obr. 94. Při betonáži byla nejprve vyhotovena vrstva o tloušťce 120 mm z lehkého betonu a následně byla dobetonována vrstva o tloušťce 40 mm z běžného betonu třídy C45/55. Úprava horního povrchu konstrukce byla provedena ocelovým hladítkem. Z Obr. 95 je patrná vysoká kvalita všech provedených povrchů vrstveného nosníku.



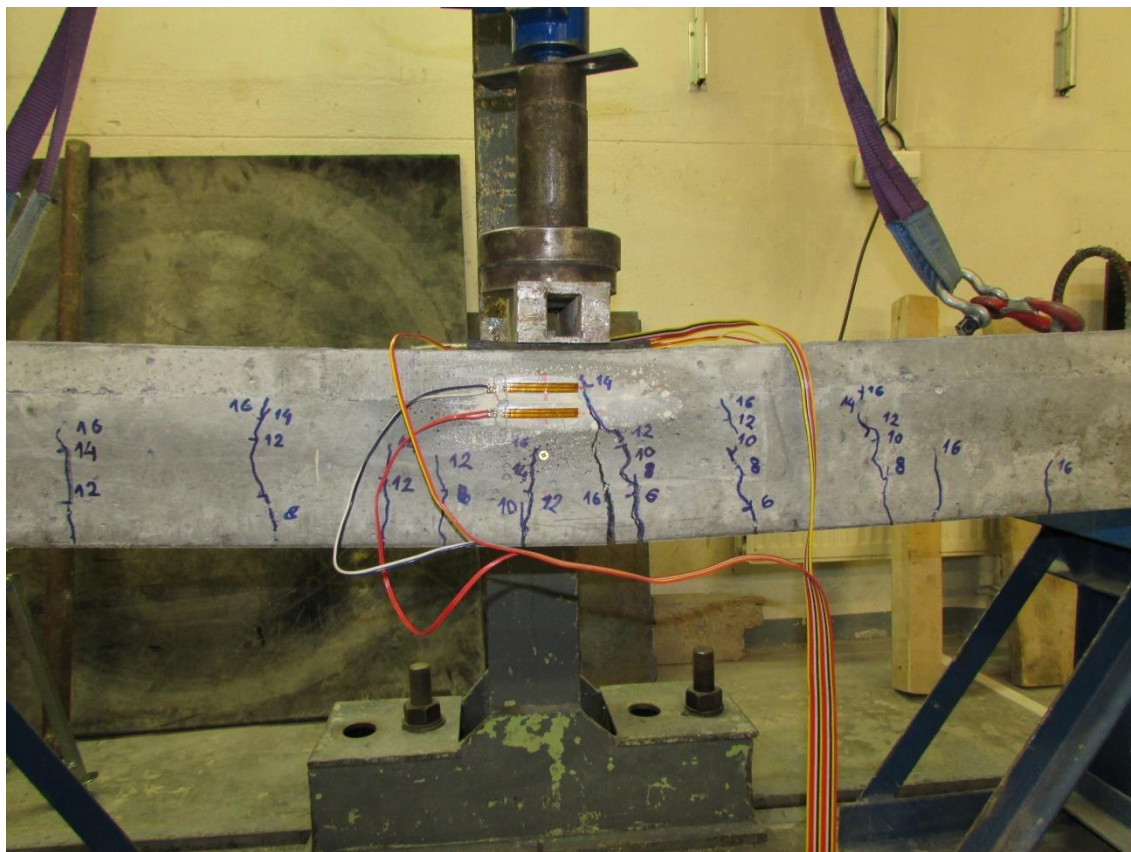
Obr. 95: Bednění s vloženou výztuží a povrch vrstveného nosníku po odformování



Obr. 96: Zatěžovací zkouška vrstveného nosníku třibodovým ohybem

Pro dosažení předpokládaného způsobu porušení ohybovým momentem byl nosník zatěžován silou uprostřed rozpětí (třibodový ohyb). V průběhu experimentu byla měřena velikost vnášené síly, deformace uprostřed rozpětí a také přetvoření v tlačeném betonu v místě

vnášení zatížení. Zjišťováno bylo též přetvoření v místě pracovní spáry. Před vznikem prvních trhlin byl prvek zatěžován po krocích o velikosti 1 kN, následně pak po 2 kN až do porušení. Časové prodlevy mezi jednotlivými kroky sloužily k ustálení deformaci a znázornění rozvoje trhlin. První trhliny byly zaznamenány při působení zatížení cca 6 kN. Při zatížení silou 16 kN a odpovídající deformaci cca 17 mm došlo k ohybovému porušení prvku Obr. 97.



Obr. 97: Ohybové porušení vrstveného nosníku

5.4. Smyková odolnost spáry

Z důvodu velkého potenciálu využití ULC ve vrstvených konstrukcích byla smyková odolnost spáry podrobně zkoumána. Zkoušení smykové únosnosti bylo provedeno několika různými způsoby. Níže je uveden stručný výčet experimentů s jejich základními výsledky. Podrobně se problematice chování spáry na rozhraní dvou různých betonů věnuje Ing. Čairovič, FAST VUT Brno.

Prvotní experimenty pro stanovení smykové únosnosti rozhraní ultralehký - běžný beton byly provedeny na trámcích o rozměru 100×100×400 mm, kde vnitřní třetina prvku byla vybetonována z běžného betonu o střední krychelné pevnosti 90 MPa. Smyková únosnost byla zjišťována protlačováním střední části prvku hydraulickým lisem podle Obr. 98. Takto měřená „smyková únosnost“ byla ovšem značně větší, než se předpokládalo, a prvky se porušovaly šikmou smykovou trhlinou mezi hranou podložky a hranou ocelového podkladu. Trhlina procházela přes celistvou hmotu hutného a lehkého betonu, díky čemuž lze usuzovat na velmi dobré soudržnosti obou materiálů. Konfigurace zkoušky ovšem neumožňovala přímě měření velikosti smykové odolnosti (čistého střihu) přímo ve spáře.



Obr. 98: Stanovení smykové únosnosti na trámci

Nejvhodnější modifikací zkoušky umožňující přímě měření smykové odolnosti spáry se jevila úprava zkušebního tělesa podle Obr. 99. Těleso tvaru krychle, které bylo vyhotoveno ze dvou různých betonů, bylo opatřeno dvěma zářezy, jejichž vzdálenost přesně definovala smykovou plochu. Díky této modifikaci bylo možno přímo měřit smykové napětí na rozhraní vrstev betonu. Naměřená smyková únosnost spáry mezi běžným a lehkým betonem byla 0,41 MPa. Vypočítaná smyková únosnost dle [2] dosahovala hodnoty pouze 0,14 MPa.

Poslední modifikací vzorků určených k měření smykové odolnosti spáry bylo vytvoření náběhů na vzorcích se zářezem, neboť v některých případech docházelo k „ulomení“ konzolovitých částí vzorků.



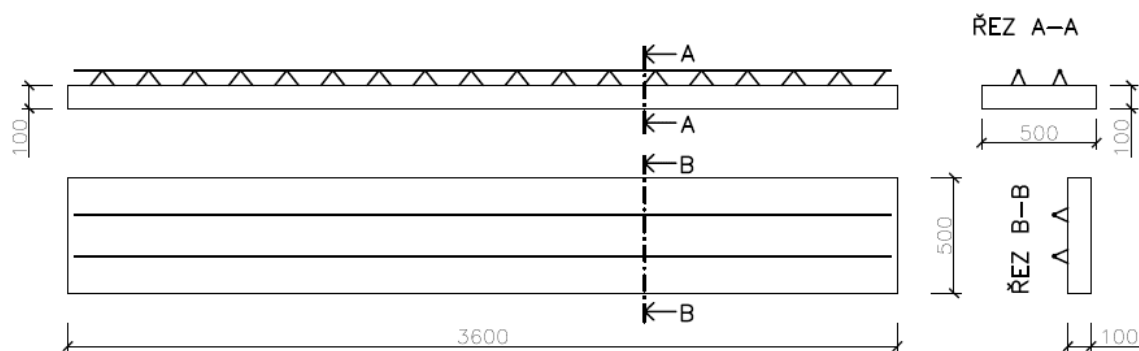
Obr. 99: Stanovení smykové únosnosti na krychli se zářezy



Obr. 100: Zkušební vzorek s náběhy po zkoušce

5.5. Filigránový nosník

Značného potenciálu dosahuje lehký beton v kombinaci s běžným betonem umístěným v tlačené oblasti ohybaného prvku. Nejběžnějším typem takto namáhaných konstrukcí jsou tzv. filigránové nosníky. V provozovně závodu Prefa Kuřim a.s. byly experimentálně vyhotoveny 3 kusy filigránových nosníků z ultralehkého betonu. Jeden nosník z běžného betonu vyrobený ve stejný den sloužil jako referenční. Rozměry nosníků byly shodně 3600/500/100 mm. Dobetonávka filigránového nosníku měla následně shodnou tloušťku 80 mm. Oproti předchozí výrobě ULC v provozovně Prefa Brno a.s. došlo k značné změně. Nasákové lehké kamenivo bylo v tomto případě navlhčeno dodatkovou vodou v míchacím zařízení před výrobou betonu. Tato změna přinesla urychlení a nižší pracnost výroby ULC. Došlo také ke sjednocení výrobního postupu mezi výrobou ULC v závodě Prefa Kuřim a.s. a výrobou v laboratorních podmínkách. Rozměry a výroba filigránových nosníků jsou patrné z Obr. 101 a Obr. 102.



Obr. 101: Tvar filigránového nosníku



Obr. 102: Filigránový nosník - bednění s výztuží a výroba nosníku

Smyková únosnost spáry byla stanovena výpočtem dle [2] hodnotou 0,113 MPa, což byla dostatečná hodnota odolnosti spáry pro plánované ohybové porušení nosníku. Jak ukázaly předchozí experimenty, reálná smyková únosnost spáry je značně vyšší.

Zkoušení filigránových nosníků probíhalo v laboratořích FAST VUT v Brně. Zatížení nosníku bylo realizováno pomocí čtyřbodového ohybu (síly byly umístěny ve třetinách rozpětí) při osové vzdálenosti podpor 3,3 m.



Obr. 103: Povrch filigránového nosníku před dobetonávkou horní vrstvy



Obr. 104: Zatěžovací zkouška filigránového nosníku z ULC



Obr. 105: Typické porušení filigránového nosníku

Tab. 43: Vyhodnocení zatěžovací zkoušky filigránových nosníků

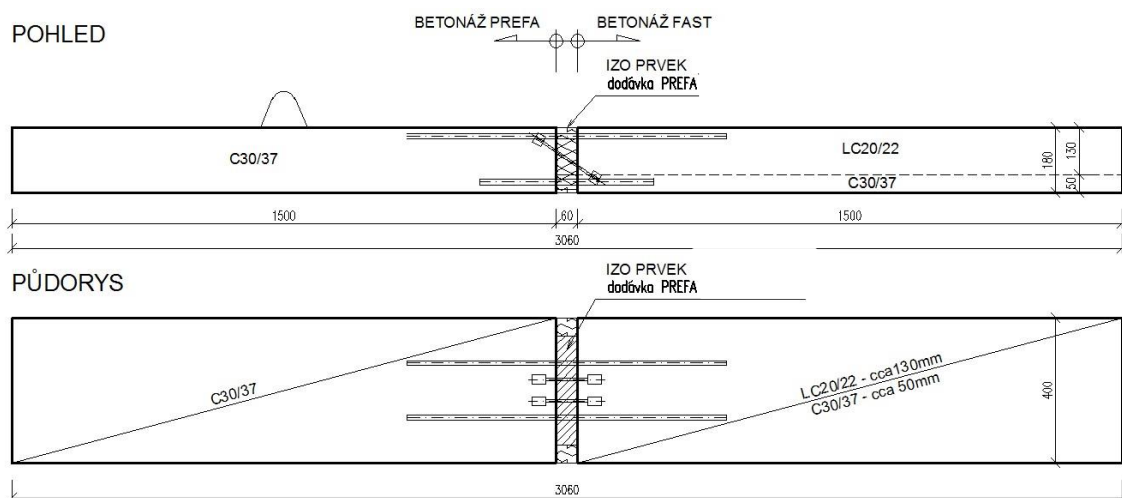
vzorek	referenční	ULC 1	ULC 2	ULC 3
F_{\max} [kN]	27,33	29,05	27,15	29,36
w [mm]	43,58	87,30	61,96	83,71

Tab. 43 zobrazuje velikost maximální dosažené síly a deformace při zatěžovací zkoušce filigránových nosníků. Z naměřených výsledků je patrná dobrá shoda v naměřených hodnotách. V souladu s předpoklady bylo možné použitím lehkého betonu docílit přibližně shodné únosnosti, a to při snížení vlastní tíhy prvku včetně nadbetonávky o cca 30%.

Vyrobené filigránové nosníky z ULC vykazují vyšší deformace při stejné hodnotě zatížení než filigránový nosník z běžného betonu C30/37. Důvodem je pouze třetinová velikost modulu pružnosti ULC v porovnání s běžným betonem. Je důležité zdůraznit, že zobrazené výsledky nezahrnují deformace způsobené vlastní tíhou nosníku, neboť měření probíhá na již zdeformovaném nosníku od vlastní tíhy. V případě stejné mezní únosnosti mohou být filigránové nosníky z ULC zatížené užitým zatížením o 1,3 kN/m² vyšší než v případě běžného betonu.

5.6. Balkonový prvek

Poslední velký experiment s použitím lehkého betonu spočíval ve zhotovení balkonového prvku s vyložení 1,5 m. Statické schéma nosníku při zkoušce odpovídalo vetknutí a bylo simulováno pomocí druhého nosníku z běžného betonu. Schéma celého zkušebního tělesa zobrazuje Obr. 106 a Obr. 107. Celkem byly vyhotoveny tři balkonové prvky, dva s kombinací lehkého a hutného betonu a jeden z běžného betonu C30/37. Výška balkonového nosníku byla 180 mm, z čehož 130 mm tvořil ultralehký beton ULC 20/22 D1,2eco a 50 mm běžný beton C30/37. Betonáž vykonzolované části balkonu byla provedena v laboratořích FAST VUT v Brně. Referenční nosník a části sloužící pro simulaci vetknutí byly vyrobeny v závodě Kuřim, společnosti Prefa Brno a.s.

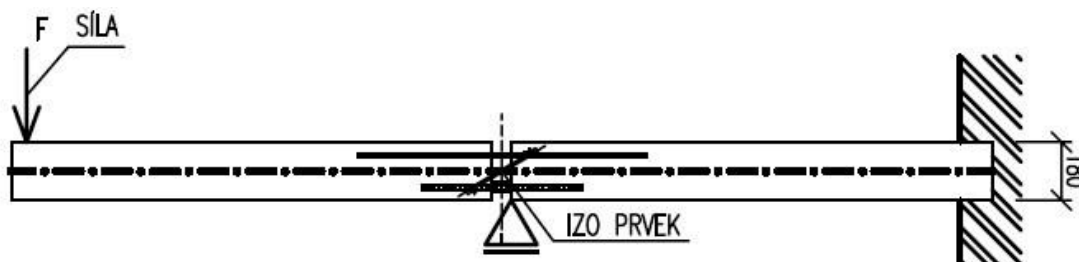


Obr. 106: Schéma balkonového nosníku



Obr. 107: Bednění balkonového nosníku s vloženým izo prvkem

Zatěžovací schéma balkonového nosníku je zobrazeno na Obr. 108 a Obr. 109. Síla F byla vnášena na volném konci prvku pomocí hydraulického lisu.



Obr. 108: Zatěžovací schéma zkoušeného balkonového nosníku



Obr. 109: Zkoušení balkonového nosníku v laboratořích SZK FAST VUT v Brně

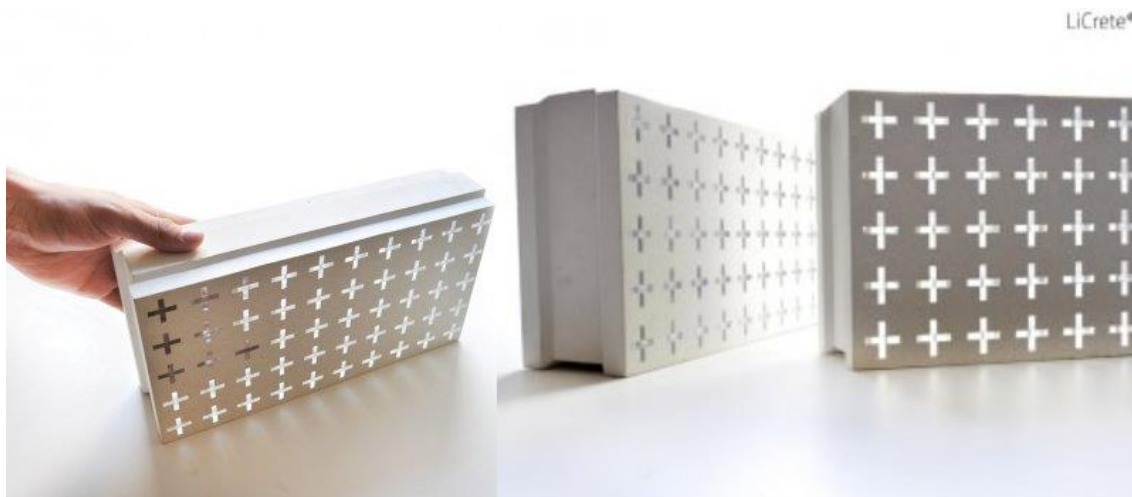
U obou nosníků z vrstveného betonu nastalo porušení v dobetonované vrstvě provedené z ULC. Při dosažení síly na konci konzoly cca 8 kN došlo ke křehkému selhání, jak zobrazuje Obr. 110. Pouze u referenčního balkonového prvku z běžného betonu došlo k plánovanému porušení v IZO prvku. Porušení vrstveného betonu (mimo oblast IZO prvku) bylo způsobeno nízkou tahovou pevností lehkého betonu. Je proto nutné dbát zvýšené pozornosti při návrhu vyztužení v oblasti kotvení IZO prvku a do této oblasti umístit konstrukční výztuž, která by vznikající tahy zachytila.



Obr. 110: Selhání balkonového prvku

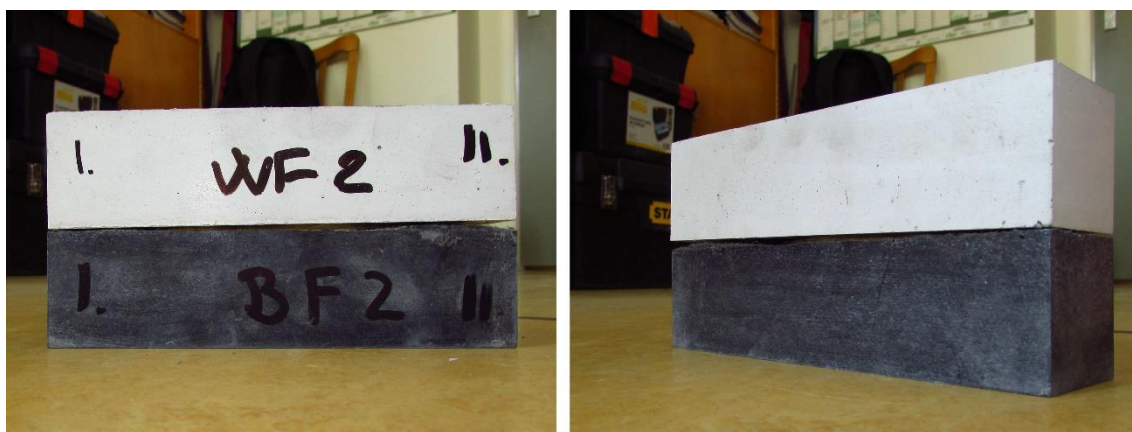
5.7. Vylehčené designové tvarovky LiCrete®

Pozitivní vliv vylehčení se uplatnil i u designových tvarovek LiCrete®, Obr. 111. Původní cementový tmel, vyplňující plastovou světlovodnou mřížku, dosahoval objemové hmotnosti 2200 kg/m^3 . Z důvodu použití plastové mřížky nelze kvůli požadavkům požární bezpečnosti tvarovky použít v nosných konstrukcích. Vývoj byl tedy zaměřen na co nejnižší hmotnost tvarovky při snížené únosnosti.

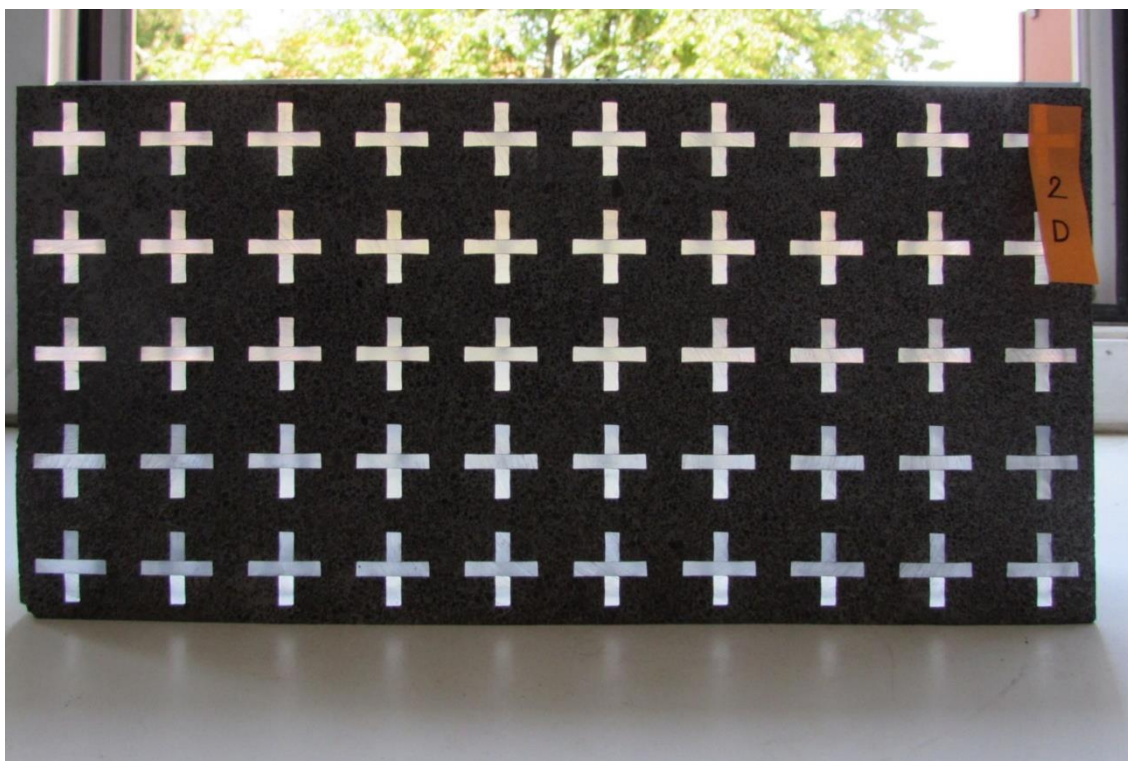


Obr. 111: Designové tvarovky LiCrete® [72]

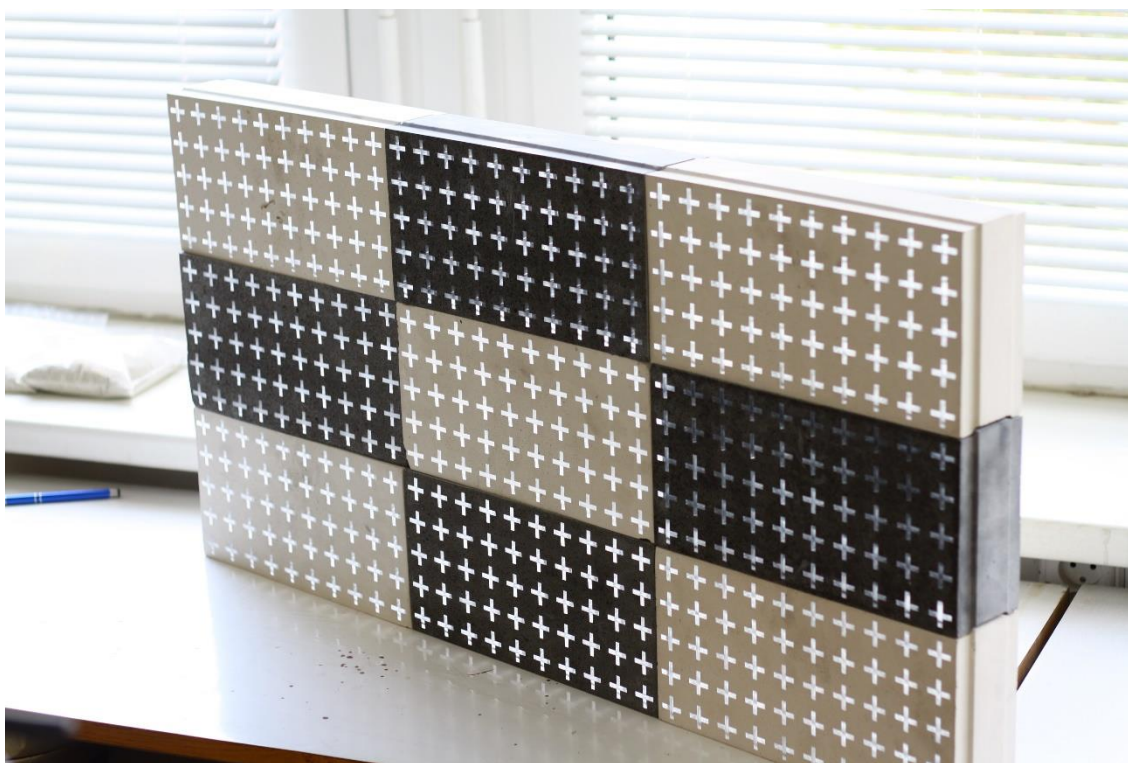
Vylehčení tvarovek bylo dosaženo použitím lehkého kameniva ve výplňovém cementovém tmelu tvarovek. Pro bílou variantu tvarovek muselo být použito lehké kamenivo Poraver, jež má v řezu kamenivem bílou barvu, neboť finální úprava povrchu tvarovek spočívá ve zbrúsení lícové a rubové strany tvarovky. Při návrhu tmelu v černé barvě bylo s výhodou použito lehké kamenivo Liapor. Hlavní důraz u vylehčené směsi byl kladen na vysokou pohledovou kvalitu a velmi dobrou konzistenci směsi. Konzistence a homogenita směsi byly dosaženy použitím kombinované polyfunkční plastifikační přísady.



Obr. 112: Zkušební trámečky; bílá a černá varianta pro designové tvarovky LiCrete



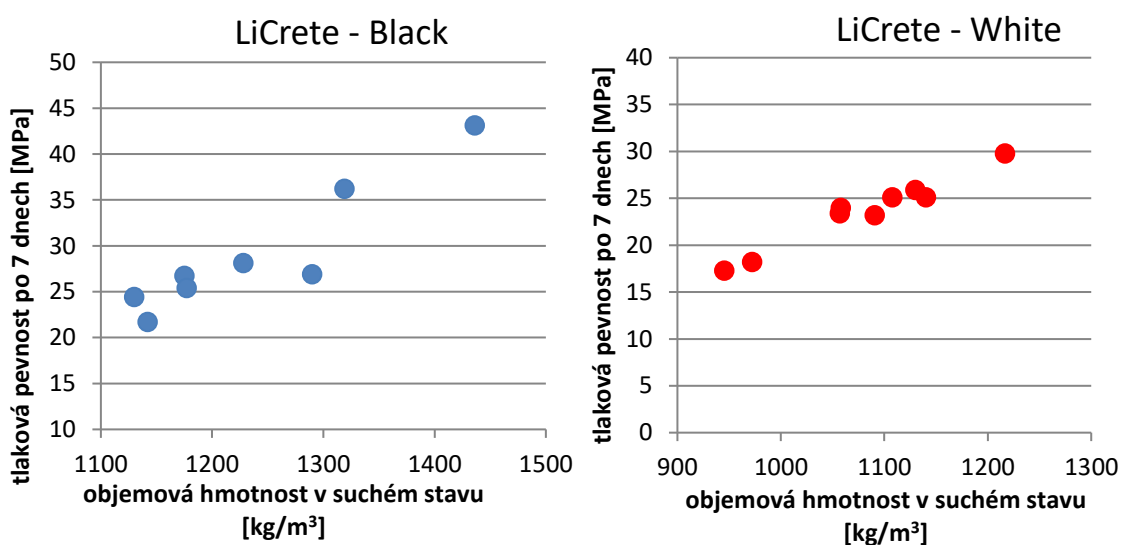
Obr. 113: Vylehčená designová tvarovka LiCrete s kamenivem Liapor



Obr. 114: Vyrobené vylehčené tvarovky LiCrete v bílé a černé variantě



Obr. 115: Porovnání hmotnosti vylehčené a původní tvarovky na laboratorní váze s omezením 6 kg



Obr. 116: Závislost objemové hmotnosti na tlakové pevnosti černého a bílého tmelu pro tvarovky LiCrete

Použitím lehkého kameniva v cementové směsi pro tvarovky LiCrete bylo dosaženo vylehčení o 46% u černé varianty (označované Black) a 47% u bílé varianty (označované White). Jak ukazuje Obr. 115, vylehčení tvarovek bylo znatelné i při laboratorním vážení. I v tomto případě byla tlaková pevnost cementového tmelu značně závislá na objemové hmotnosti, viz Obr. 116.

6. DISKUZE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Předložená disertační práce shrnuje dosavadní poznatky při návrhu, výrobě a následném uplatnění ultralehkých betonů. Navržené betony byly unikátní svojí nízkou objemovou hmotností (objemová hmotnost ve vysušeném stavu pod hodnotu 1200 kg/m^3) a relativně vysokými mechanickými parametry vhodnými pro nosné konstrukce.

Nízké objemové hmotnosti bylo dosaženo použitím lehkého kameniva Liapor. **Pro dosažení třídy objemové hmotnosti D1,0 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 její velikosti jsou závislé i ostatní mechanické parametry betonu, jak ukazuje např. Obr. 35.

Ostatní lehké betony byly navrženy bez provzdušnění cementového tmelu. **S použitím výhradně lehkého kameniva bylo možné dosáhnout třídy objemové hmotnosti D1,2.** V této hmotnostní třídě bylo cílem vyvinout dva druhy lehkého betonu. U prvního betonu byla pozornost zaměřena na dosažení co nejlepších mechanických vlastností a u druhého betonu na příznivý technicko - ekonomický návrh.

Při výrobě čerstvého betonu je nutné se vypořádat s nasákavostí lehkého kameniva. Suché lehké kamenivo odebírá z čerstvého betonu značné množství vody a tím se výrazně zhoršuje konzistence betonu. Použitím suchého kameniva se doba zpracovatelnosti čerstvého betonu výrazně snižuje a beton po ukončení míchacího cyklu již není možné vhodně zpracovat. **Opatřením pro zamezení odebírání vody z čerstvého betonu je předvlhčení kameniva nebo použití již vlhkého kameniva.** Při experimentech se více osvědčila metoda předvlhčení kameniva. Metoda spočívá v navlhčení vysušeného kameniva dodatkovou vodou v míchacím zařízení před výrobou betonu. Po aplikaci předvlhčovací (dodatkové) vody v množství 40 l/m^3 betonu se směs kameniva míchá na nízké otáčky po dobu 5 minut. K navlhčenému kamenivu se následně přidá cement, práškové příměsi a záměsová voda s rozpuštěnou polyfunkční přísadou. V druhém případě se kamenivo vlhčí předem. Je nutné nejprve navážit dávku kameniva do vhodného vodopropustného pytle. Pytel s kamenivem se namočí do vody po dobu cca 24 hodin. Po krátkém okapání je možné vlhké kamenivo ihned použít pro výrobu lehkého betonu. Nevýhoda spočívá především v práci s mokrým kamenivem a následně složitým stanovení veškeré vody použité pro výrobu lehkého betonu. Při použití mokrého kameniva byl zaznamenán nižší nárůst tlakové pevnosti, jak dokazuje Obr. 34.

Konzistence všech vyrobených betonů dosahovala uspokojivých výsledků a byla vhodná pro ukládání do bednění. Konzistence měřená podle stupně zhutnění dosahovala ve všech případech nejvyššího možného zatřídění. Při měření konzistence pomocí metody rozlití bylo standardně dosahováno stupně F3. Patrně se zde projevil vliv velmi nízké objemové hmotnosti betonu, kdy na čerstvý beton působí úměrně nižší tíhové síly.

V následujícím textu je proveden detailní rozbor fyzikálně-mechanických charakteristik jednotlivých vyvinutých betonů a samostatná podkapitola je věnována problematice soudržnosti ultralehkých betonů.

ULC D1,0

Jedná se o beton s nejnižší objemovou hmotností, která po vysušení dosahovala průměrné hodnoty 970 kg/m³. Beton přitom vykazoval hodnotu průměrné krychelné pevnosti 19,95 MPa. Pevnost stanovená na tělesech tvaru válce dosahovala hodnoty 18,42 MPa.

Naměřená hodnota modulu pružnosti na válci vycházela 8,6 GPa a průměrná hodnota modulu pružnosti měřená na trámčích 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 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.

Při měření odolnosti ULC proti chemickým rozmrazovacím látkám bylo dosaženo odpadu 1000g/m² při 136 cyklech.

Součinitel tepelné vodivosti lehkého betonu při ustálené vlhkosti měl hodnotu 0,3 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 J/m² s výběrovou směrodatnou odchylkou 6,42 J/m², což je přibližně jedna desetina hodnoty lomové energie běžného betonu.

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

Norma [2] však nepodhodnocuje veškeré mechanické parametry lehkého betonu. Lze se setkat i s opačným případem, kdy jsou některé mechanické hodnoty nadhodnoceny a návrh podle normy se tak stává nebezpečnějším. Příkladem může být nárůst dlouhodobé pevnosti betonu, který byl experimentálně stanoven o 6% nižší než stanovený výpočtem dle normy.

ULC D1,2 - Liapor

Další z hlavních navržených lehkých betonů byl vylehčen pouze lehkým kamenivem Liapor, které bylo složeno ze dvou frakcí. Příměs cementu byla tvořena metakaolinem. **Lehký beton dosahoval průměrné objemové hmotnosti po vysušení 1190 kg/m³. Při této objemové hmotnosti činila průměrná krychelná pevnost 28,2 MPa a válcová pevnost 26,0 MPa.** Tlaková pevnost byla zkoušena i na tělesech tvaru trámce, kde byla dosažena nejvyšší hodnota pevnosti, a to 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.

Tahová pevnost byla opět měřena nepřímo, tj. pomocí pevnost v příčném tahu. Naměřená pevnost v příčném tahu byla stanovena na 1,5 MPa a po přepočtu byla získána tahová pevnost 1,35 MPa.

Lomová energie byla rovněž velmi nízká, pouze 23,0 J/m².

ULC 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. Lehký beton dosahoval srovnatelné objemové hmotnosti jako předchozí uvedený beton. **Objemová hmotnost ve vysušeném stavu byla 1180 kg/m³. Při této objemové hmotnosti bylo dosaženo průměrné krychelné pevnosti betonu 26,9 MPa.** Tlaková pevnost měřená na tělesech tvaru trámce činila 27,0 MPa.

Modul pružnosti lehkého betonu dosahoval opět vyšších hodnot, 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 příměsí metakaolinu za vápenec měla patrně za následek zvýšení křehkosti materiálu, jež se projevila poklesem lomové energie o 67% v porovnání s předchozím typem betonu 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.

Při srovnání pracovních diagramů ultralehkého a vysokopevnostního betonu je patrné velmi křehké chování ultralehkého betonu. Závislost napětí na přetvoření je u ultralehkého betonu lineární až do porušení, které nastalo při velikosti přetvoření 2,3‰.

Souhrn

Měření soudržnosti betonu s výztuží bylo provedeno ve dvou konfiguracích testu pro čtyři zcela odlišné druhy betonu. V první variantě bylo napětí v soudržnosti stanovováno standardně prováděnou zkouškou **pull-out s centricky umístěnou výztuží**. Druhá varianta, která více odpovídá reálnému působení výztuže v převážně ohýbané betonové konstrukci a také normovým vztahům, byla modifikovaná zkouška **pull-out s vlivem krytí**. Velikost krytí byla volena s ohledem na normové vztahy o velikosti jednoho profilu testované výztuže. Při experimentech byl sledován vliv objemové hmotnosti na velikosti mezního napětí v soudržnosti. **Na rozdíl od normových vztahů, kde je tento vliv uvažován jako převážně lineární, byl u ultralehkých betonů zaznamenán značný pokles mezního napětí v soudržnosti vůči hodnotám predikovaným normou.** Zvýšený pokles mezního napětí v soudržnosti je patrně důsledkem provzdušnění lehkého betonu. To lze nejlépe ukázat při porovnání hodnot napětí v soudržnosti ultralehkého betonu s třídou objemové hmotnosti D1,0 a D1,2. Hlavní rozdíl v těchto dvou variantách betonu byl právě v míře provzdušnění cementového tmelu. V případě betonu LC D1,0 je pokles tlakové pevnosti o 11% a pokles mezního napětí v soudržnosti o 43% v porovnání s betonem LC D1,2. Pro bezpečný normový návrh železobetonových konstrukcí z ultralehkého betonu by bylo potřeba pokles mezního napětí v soudržnosti při výpočtu zohlednit.

Dalším markantním rozdílem mezi běžným a lehkým betonem je závislost dosaženého napětí na posunu výztuže v kotevní oblasti. U ultralehkých betonů je maximálního napětí v soudržnosti dosaženo již při posunu výztuže 0,05 mm. **Se zvyšujícím se posunem se napětí v soudržnosti již výrazně nezvyšuje.** V případě běžného betonu je maximálního napětí v soudržnosti dosaženo při velikosti posunu 1 mm. Zvýšení napětí mezi hodnotou posunu výztuže 0,05 mm a 1 mm je u běžného betonu více než 100%. Značnou roli zde hraje druh použitého kameniva. V běžném betonu dochází k zaklínění hutného kameniva mezi žebírka výztuže. **U lehkých betonů, kde lehké pórovité kamenivo tvoří „nejslabší“ část kompozitu, je vliv zaklínění kameniva takřka nulový.** Hlavní význam zde má adheze a tření cementového tmelu.

Shoda s normovými podklady

Některé z mechanických parametrů stanovené experimentálně vycházejí v porovnání s normovými hodnotami výrazně lépe. Mezi tyto parametry patří především modul pružnosti a velikost součinitele dotvarování. Naměřené hodnoty jsou v některých případech více než dvojnásobné. Ne zcela všechny údaje jsou ovšem v normě nadhodnocené. Výrazně nižší hodnoty byly naměřeny u velikosti mezního napětí v soudržnosti. Norma [2] v tomto případě neudává bezpečný návrh.

Lze se domnívat, že při obvyklém návrhu lehkých betonů (tj. při nahrazení určitého množství hutného kameniva za lehké pórovité) poskytuje norma vhodnou oporu pro bezpečné dimenzování konstrukcí. Problematickým se jeví návrh konstrukcí s použitím speciálních betonů, kam se výše uvedené vyvinuté receptury ultralehkých betonů řadí. **Výměnou veškerého hutného kameniva za lehké dochází k odlišnému chování betonu při zatížení. Takový beton je značně křehký, což norma dostatečně nepodchycuje.** Při širším uplatnění vyvinutých betonů by bylo vhodné uvést do praxe samostatný předpis, který by lépe dokázal reagovat na specifika ultralehkých betonů.

Praktické uplatnění ultralehkých betonů

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 pružnosti¹⁰ 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.

¹⁰ 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.

7. 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 a nepřípustným změnám zpracovatelnosti čerstvého betonu;
- 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 mezního napětí v soudržnosti ULC;
- navržená úprava vztahů výpočtu mezního napětí v soudržnosti je uvedena v kapitole 4.3.3.10.

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, umístování 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-hutný beton, které se ve velké míře uplatňuje při řešení vícevrstevných konstrukcí. Další zpřesnění výsledků je nutné zajistit 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.

8. 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] 213R-14. Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete. ACI Committee 213, 2014. ISBN 9780870318979.
- [5] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. 1. vyd. Praha: vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009, 342 s. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7
- [6] ČSN EN 1520: Prefabrikované dílce z mezerovitého betonu z pórovitého kameniva vyztužené nosnou a nenosnou výztuží. Praha: Český normalizační institut. 2011
- [7] SCHERFEL, W. Pěnobeton jako vyrovnávací vrstva podlahy. Stavební ročenka 2009. 1. Bratislava: Jaga group, 2008, s. 76-77. ISBN 80-8076-056-4.
- [8] 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
- [9] CHANDRA, S a Leif BERNTSSON. Lightweight aggregate concrete: science, technology. and applications. Norwich, N.J.: Noyes Publications, c2003, xx, 430 p. ISBN 0815514867
- [10] Lehké keramické kamenivo. Liapor [online]. Vintířov [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.liapor.cz/cz/lehke-keramicke-kamenivo>
- [11] MELICHAR, T.; PROCHÁZKA, D.; ČERNÝ, V., Studium fyzikálně-mechanických parametrů lehkých vysokopevnostních betonů s pórovitým kamenivem na bázi spékaných popílků, článek v Beton TKS, ISSN 1213-3116, Beton TKS, s.r.o., Praha, 2010
- [12] Lytag® lightweight aggregate [online]. North Yorkshire [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.lytag.com>
- [13] Agloporit, lehké umělé kamenivo určené pro stavebnictví [online]. Brno [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://agloporit.cz/>
- [14] PORAVER expanded glass: Poraver® Blähglasgranulat. PORAVER expanded glass: Leichtzuschlagstoff aus Recyclingglas für Industrieprodukte [online]. Schlüsselfeld [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.poraver.com/produkte/poraver-blahglasgranulat/>
- [15] Liaver: Materialeigenschaften. Liaver [online]. Ilmenau [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.liaver.com/index.php?id=33>

- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] ČSN EN 12350-4. Zkoušení čerstvého betonu - Část 4: Stupeň zhutnitelnosti. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [19] ČSN EN 12350-5: Zkoušení čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlitím. Praha: Český normalizační institut, 2009
- [20] Příručka Liaporbeton [online]., 20 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: www.betonsserver.cz/Katalogy/Readymix/Prirucka_liapor.pdf
- [21] THIENEL, K., Ch.: *Werkstoffe des Bauwesens: Leichtbeton*; Universität der Bundeswehr; München; 2008.
- [22] ESCSI - Internal Curing New Overview. Expanded Shale, Clay and Slate Institute [online]. Chicago: ESCSI, 2010 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: http://www.escsi.org/ContentPage.aspx?id=1062&ekmense1=1b7c39fc_61_74_btlink
- [23] Internal Curing: Helping Concrete Realize its Maximum Potential. In: Expanded Shale, Clay and Slate Institute [online]. Chicago: ESCSI, 2012 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: http://www.escsi.org/uploadedFiles/Technical_Docs/Internal_Curing/ESCSI%20IC%20Brochure%204362.1.pdf
- [24] Most Dlouhá lávka přes Vltavu v Českých Budějovicích. *JHP Mosty* [online]. [cit. 2015-10-27]. Dostupné z: <http://www.jhp-mosty.cz/stavby/dlouha-lavka-pres-vltavu-v-ceskych-budejovicich.html>
- [25] Liapornews: Kulatý svět [online]. Vintířov, 2011, 2011(1) [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: http://www.liapor.cz/liapor_news/Liapornews1_2011.pdf
- [26] Přehled významných referenčních prací: MKS Praha s.r.o. MKS Praha [online]. Praha, 2010 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.mkspraha.cz/cs/reference/>
- [27] Liaporbetonové domy - Brno. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Česká betonářská společnost, 2010, (1). ISSN 1213-3116.
- [28] Rodinný dům postavený z lehkého monolitického tepelně-izolačního betonu. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Česká betonářská společnost, 2013, (6). ISSN 1213-3116.
- [29] 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.
- [30] 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

- [31] ACI 408R 03: Bond and development of straight reinforcing bars in tension; 2003, American Concrete Institute
- [32] PREPARED BY SPECIAL ACTIVITY GROUP 5, New Model Code a U.K. PROOFREADING AND EDITING: PAUL BEVERLY. Fib model code for concrete structures 2010. Berlin: Ernst, Wilhelm & Sohn, 2013. ISBN 9783433030615.
- [33] fib Bulletin 72: Bond and anchorage of embedded reinforcement: Background to the fib Model Code for Concrete Structures 2010; 2014
- [34] Lehký keramický beton Liaporbeton: Liapor přírodní stavební materiál. Liapor: přírodní stavební materiál pro hrubou stavbu [online]. Vintířov [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: www.liapor.cz/cz/lehky-keramicky-beton-liaporbeton
- [35] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2010/31/EU ze dne 19. května 2010 o energetické náročnosti budov. In: . 2010, L 153/13.
- [36] PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.
- [37] Microsit. BauMineral Kraftwerkstoffe [online]. Herten [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.baumineral.de/downloads/file/385/Infoblatt%20Microsit%20Stand%2011.2014.pdf>
- [38] ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: Český normalizační institut, 2009
- [39] ČSN EN 1990: Zásady navrhování konstrukcí. Praha: Český normalizační institut. 2004
- [40] HOLICKÝ, M., K. JUNG a M. SÝKORA. Stanovení charakteristické pevnosti konstrukcí z betonu na základě zkoušek. Stavebnictví. 2009, 09(03), 53-56. ISSN 1802-2030.
- [41] ČSN ISO 6784 Beton. Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku. Praha: Český normalizační institut. 1993
- [42] ČSN EN 12390-13 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 13: Stanovení sečnového modulu v tlaku. Praha: Český normalizační institut, 2014
- [43] KOCÁB, D., P. MISÁK, P. CIKRLÉ, T. KOMÁRKOVÁ a B. MORAVCOVÁ. Statický modul pružnosti betonu v tlaku dle ČSN ISO 6784 a ČSN EN 12390-13. Beton TKS. Praha, 2014, 14(3), 74-79. ISSN 12133116.
- [44] HUŇKA, P. a J. KOLÍSKO. Studium vlivu tvaru, velikosti a způsobu přípravy zkušebního tělesa na výsledek zkoušky statického modulu pružnosti betonu v tlaku. Beton TKS. Praha, 2011, 11(1), 69-71. ISSN 12133116.
- [45] HUŇKA, P., J. KOLÍSKO, S. ŘEHÁČEK a M. VOKÁČ. Zkušební a technologické vlivy na modul pružnosti betonu - rekapitulace. Beton TKS. Praha, 2012, 12(4), 62-67. ISSN 12133116.
- [46] ČSN EN 12390-6 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles. Praha: Český normalizační institut, 2010
- [47] STIBOR, M. Lomové parametry kvazikřehkých materiálů a jejich určování. Brno, 2004. Disertační práce.

- [48] ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou. Praha: Český normalizační institut, 2009
- [49] ČSN 73 1326 Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. 1984
- [50] PRICE, W. H. Factors Influencing Concrete Strength. *Journal of American Concrete Institute*. 1951, 47(2), 417-432.
- [51] ČSN 73 1328: Stanovení soudržnosti oceli s betonem; Praha 1972
- [52] ACI 440.3R-12: Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures; 2012
- [53] RILEM/CEB/FIP RECOMMENDATION.—Bond test for reinforcing steel. *Materials and Structures*, Vol. 6, No. 32, 1973.
- [54] ISO 10406-1: Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete -- Test methods -- Part 1: FRP bars and grids; 2015.
- [55] HORÁK, D.: Kotevní oblast vnitřních nekovových výztuží, Disertační práce, Brno, 2011
- [56] CLARKE, J. L. a F. K. BIRJANDI. Bond strength tests for ribbed bars in lightweight aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*. New York: Thomas Telford Ltd, 1993, 45(163), 79-87. DOI: 10.1680/mac.1993.45.163.79. ISSN 0024-9831.
- [57] ROBINS, P. J. a I. G. STANDISH. Effect of lateral pressure on bond of reinforcing bars in concrete. In: *Proceedings of the international conference on bond in concrete*. London: Paisley, 1982, s. 262-272.
- [58] ORANGUN, C. O. The bond Resistance between steel and lightweight-aggregate (Lytag) concrete. *Building science*. Pergamon Press, 1967, (2), 21-28.
- [59] ASTM A 944-10(2015): Standard Test Method for Comparing Bond Strength of Steel Reinforcing Bars to Concrete Using Beam-End Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015
- [60] ČSN EN 12350-7: Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody. Praha: Český normalizační institut, 2009
- [61] Akustická emise. In: Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity [online]. [cit. 2016-09-23]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/projekty/kemis.html>
- [62] VYUŽITÍ METODY AKUSTICKÉ EMISE K HODNOCENÍ STAVU MOSTNÍCH NOSNÍKŮ. POSPÍŠIL, K., M. KOŘENSKÁ, L. PAZDERA a J. STRYK. *Centrum dopravního výzkumu* [online]. ©2016 [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <https://www.cdv.cz/file/clanek-vyuziti-metody-akusticke-emise-k-hodnoceni-stavu-mostnich-nosniku/>
- [63] EN 12615:1999: Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of slant shear strength; 1999
- [64] Průběžná zpráva o pracích provedených v rámci řešení projektu MPO ČR TIP FR-TI4/159 za rok 2012 (první rok řešení), Štěpánek, P. a kol., Brno 2012

- [65] Roční zpráva o činnostech provedých v rámci řešení projektu MPO ČR TIP FR-TI4/159 v roce 2012 (první rok řešení), Štěpánek, P. a kol., VUT v Brně, FAST, Brno 2013
- [66] Průběžná zpráva o pracích provedených v rámci řešení projektu MPO ČR TIP FR-TI4/159 za rok 2013 (druhý rok řešení), Štěpánek, P. a kol., Brno 2013
- [67] Roční zpráva o činnostech provedých v rámci řešení projektu MPO ČR TIP FR-TI4/159 v roce 2013 (druhý rok řešení), Štěpánek, P. a kol., VUT v Brně, FAST, Brno 2014
- [68] Průběžná zpráva o pracích provedených v rámci řešení projektu MPO ČR TIP FR-TI4/159 za rok 2014 (třetí rok řešení), Štěpánek, P. a kol., Brno 2014
- [69] Roční zpráva o činnostech provedých v rámci řešení projektu MPO ČR TIP FR-TI4/159 v roce 2014 (třetí rok řešení), Štěpánek, P. a kol., VUT v Brně, FAST, Brno 2015
- [70] Průběžná zpráva o pracích provedených v rámci řešení projektu MPO ČR TIP FR-TI4/159 za rok 2015 (čtvrtý rok řešení), Štěpánek, P. a kol., Brno 2015
- [71] Roční zpráva o činnostech provedých v rámci řešení projektu MPO ČR TIP FR-TI4/159 v roce 2015 (čtvrtý rok řešení), Štěpánek, P. a kol., VUT v Brně, FAST, Brno 2016
- [72] Licrete - Beton propouštějící světlo. Český kutil. cz [online]. [cit. 2016-12-07]. Dostupné z: <http://www.ceskykutil.cz/licrete-beton-propoustejjici-svetlo>

9. SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 1: ŘEZ KONSTRUKCÍ PANTHEONU	6
OBR. 2: DRUHY LEHKÝCH BETONŮ (ZLEVA: HUTNÝ LEHKÝ BETON, MEZEROVITÝ LEHKÝ BETON, PĚNOBETON A PÓROBETON)	10
OBR. 3: ZÁVISLOST TLAKOVÉ PEVNOSTI NA OBJEMOVÉ HMOTNOSTI BETONU S EXPANDOVANÝM PERLITEM [8]	13
OBR. 4: TLAKOVÉ PORUŠENÍ BĚŽNÉHO A LEHKÉHO BETONU [21]	17
OBR. 5: LOMOVÁ PLOCHA ULC	17
OBR. 6: PRACOVNÍ DIAGRAMY BĚŽNÉHO A LEHKÉHO BETONU A JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT	17
OBR. 7: NÁRŮST TLAKOVÉ PEVNOSTI V ČASE [21]	18
OBR. 8: ZÁVISLOST TLAKOVÉ PEVNOSTI NA ČASE [21]	18
OBR. 9: ZÁVISLOST MODULU PRŮJZKNOSTI NA OBJEMOVÉ HMOTNOSTI (DK-DROBNÉ KAMENIVO) [21]	18
OBR. 10: VNITŘNÍ OŠETŘOVÁNÍ A KONTAKTNÍ ZÓNA BĚŽNÉHO A LEHKÉHO BETONU [22]	20
OBR. 11: LÁVKA PRO PĚŠÍ V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH [24]	21
OBR. 12: PLNOSTĚNNÝ TRÁMOVÝ OTEVŘENÝ MOST Z LEHKÉHO BETONU, R6 SOKOLOV – TISOVÁ [26]	21
OBR. 13: LIAPORBETONOVÉ DOPY BRNO ŽEBĚTÍN	22
OBR. 14: TEPRVE DRUHÁ VÝZNAMNÁ REALIZACE RODINNÉHO DOMU Z LEHKÉHO BETONU [28]	23
OBR. 15: PRŮBĚH NAPĚTÍ V SOUDRŽNOSTI PO DÉLCE PRUTU	24
OBR. 16: PRŮBĚH NAPĚTÍ V SOUDRŽNOSTI U PRVKU NAMÁHANÉHO OHYBEM [31]	24
OBR. 17: VZTAH MEZI VELIKOSTÍ NAPĚTÍ A POSUNEM VÝTUŽE PRO RŮZNÉ ZPŮSOBY PORUŠENÍ VZORKU [32]	26
OBR. 18: STANOVENÍ MAXIMÁLNÍ A MINIMÁLNÍ KRYCÍ VRSTVY [32]	27
OBR. 19: PODROBNÉ SLOŽENÍ JEDNOTLIVÝCH VZORKŮ A Z NICH PLYNOUCÍ OZNAČENÍ	31
OBR. 20: ZÁVISLOST SEMIDENNÍ KRYCHELNÉ PEVNOSTI NA OBJEMOVÉ HMOTNOSTI	32
OBR. 21: KŘÍVKA ZRNITOSTI KAMENIVA LIAPOR VE SMĚSI ULC D1,0 – LIAPOR	35
OBR. 22: ZPŮSOB MĚŘENÍ STUPNĚ ROZLITÍ A STUPEŇ ROZLITÍ F3 (450 MM) ULC D1,0 – LIAPOR	36
OBR. 23: DETAIL „NADÝCHANÉ“ KONZISTENCE BETONU ULC D1,0 - LIAPOR	36
OBR. 24: KAMENIVO NA BÁZI ZPĚNĚNÉHO SKLA – RŮZNÉ FRAKCE	37
OBR. 25: KŘÍVKA ZRNITOSTI POUŽITÉHO KAMENIVA	38
OBR. 26: KŘÍVKA ZRNITOSTI POUŽITÉHO KAMENIVA LIAPOR	39
OBR. 27: DESIGNOVÉ TVAROVKY LICRETE® S LEHKÝM MIKROBETONEM	41
OBR. 28: KŘÍVKA ZRNITOSTI MIKROBETONU	42
OBR. 29: KAMENIVO PORAVER - RŮZNÉ FRAKCE A ŘEZ ZRNEM KAMENIVA	43
OBR. 30: SCHÉMA ULOŽENÍ A OŠETŘOVÁNÍ VZORKŮ	48
OBR. 31: ZÁVISLOST 28 DENNÍ TLAKOVÉ (KRYCHELNÉ) PEVNOSTI ULC D1,0 NA ČASE ODBEDNĚNÍ	49
OBR. 32: ZÁVISLOST 28 DENNÍ TLAKOVÉ (KRYCHELNÉ) PEVNOSTI ULC D1,0 NA ZPŮSOBU OŠETŘOVÁNÍ	49
OBR. 33: VÝVOJ PEVNOSTI V ČASE PRO RŮZNÉ ČASY ODBEDNĚNÍ A TYPY ULOŽENÍ	50
OBR. 34: GRAF ZÁVISLOSTI PEVNOSTI A VLHKOSTI NA ČASE PRO DVĚ VARIANTY BETONU ULC D1,2ECO	51
OBR. 35: ZÁVISLOST MEZI TLAKOVOU PEVNOSTÍ A OBJEMOVOU HMOTNOSTÍ	53
OBR. 36: VELIKOST HLOUBKY PRŮSAKU PŘI PŮSOBNÍ TLAKOVÉ VODY NA BETON ULC D1,0 – LIAPOR	55
OBR. 37: ZKOUŠENÁ DOLNÍ PODSTAVA PO 150 CYKLECH (BOČNÍ POHLED)	56
OBR. 38: ZÁVISLOST MNOŽSTVÍ ODPADU NA POČTU CYKLŮ	56
OBR. 39: DEFORMACE BETONU ULC D1,0 - LIAPOR V ZÁVISLOSTI NA ČASE	58
OBR. 40: CELKOVÁ DEFORMACE PO ODEČTENÍ SMRŠŤOVÁNÍ A KRÁTKODOBÉ DEFORMACE	58
OBR. 41: GRAFICKÉ POROVNÁNÍ SOUČINITELŮ DOTVAROVÁNÍ URČENÝCH VÝPOČTEM A EXPERIMENTÁLNĚ	59
OBR. 42: ZÁVISLOST PEVNOSTI ULC D1,0 – LIAPOR NA ČASE	60
OBR. 43: ZÁVISLOST PEVNOSTI NA ČASE JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT A ULC D1,0 – LIAPOR	61
OBR. 44: VÝVOJ TLAKOVÉ PEVNOSTI V ZÁVISLOSTI NA ČASE	62
OBR. 45: ZÁVISLOST TLAKOVÉ PEVNOSTI NA OBJEMOVÉ HMOTNOSTI ULC D1,2 – LIAPOR	65
OBR. 46: ZÁVISLOST MEZI OBJEMOVOU HMOTNOSTÍ A KRYCHELNOU PEVNOSTÍ ULC D1,2ECO	69
OBR. 47: TĚLESA PO ZKOUŠCE PRŮSAKU ULC D1,2ECO	71
OBR. 48: ZÁVISLOST VELIKOSTI ODPADU NA POČTU CYKLECH	72
OBR. 49: POVRCH BETONU ZKOUŠEBNÍHO VZORKU PO 100 CYKLECH	72
OBR. 50: DEFORMACE BETONU ULC D1,2ECO V ZÁVISLOSTI NA ČASE	73

OBR. 102: FILIGRÁNOVÝ NOSNÍK - BEDNĚNÍ S VÝZTUŽÍ A VÝROBA NOSNÍKU	120
OBR. 103: POVRCH FILIGRÁNOVÉHO NOSNÍKU PŘED DOBETONÁVKOU HORNÍ VRSTVY	121
OBR. 104: ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA FILIGRÁNOVÉHO NOSNÍKU Z ULC	121
OBR. 105: TYPICKÉ PORUŠENÍ FILIGRÁNOVÉHO NOSNÍKU	122
OBR. 106: SCHÉMA BALKONOVÉHO NOSNÍKU	123
OBR. 107: BEDNĚNÍ BALKONOVÉHO NOSNÍKU S VLOŽENÝM IZO PRVKEM	123
OBR. 108: ZATĚŽOVACÍ SCHÉMA ZKOUŠENÉHO BALKONOVÉHO NOSNÍKU	124
OBR. 109: ZKOUŠENÍ BALKONOVÉHO NOSNÍKU V LABORATOŘÍCH SZK FAST VUT V BRNĚ	124
OBR. 110: SELHÁNÍ BALKONOVÉHO PRVKU	124
OBR. 111: DESIGNOVÉ TVAROVKY LiCRETE® [72]	125
OBR. 112: ZKUŠEBNÍ TRÁMEČKY; BÍLÁ A ČERNÁ VARIANTA PRO DESIGNOVÉ TVAROVKY LiCRETE	125
OBR. 113: VYLEHČENÁ DESIGNOVÁ TVAROVKA LiCRETE S KAMENIVEM LIAPOR	126
OBR. 114: VYROBENÉ VYLEHČENÉ TVAROVKY LiCRETE V BÍLÉ A ČERNÉ VARIANTĚ	126
OBR. 115: POROVNÁNÍ HMOTNOSTI VYLEHČENÉ A PŮVODNÍ TVAROVKY NA LABORATORNÍ VÁZE S OMEZENÍM 6 KG	127
OBR. 116: ZÁVISLOST OBJEMOVÉ HMOTNOSTI NA TLAKOVÉ PEVNOSTI ČERNÉHO A BÍLÉHO TMELU PRO TVAROVKY LiCRETE	127

10. SEZNAM TABULEK

TAB. 1: KLASIFIKACE LEHKÉHO BETONU PODLE OBJEMOVÉ HMOTNOSTI [3]	10
TAB. 2: PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY BETONU S PÓROVITÝM KAMENIVEM [2]	10
TAB. 3: KLASIFIKACE STUPŇŮ ZHUTNITELNOSTI [18]	15
TAB. 4: KLASIFIKACE STUPNĚ ROZLITÍ [19]	15
TAB. 5: VÝPOČTOVÉ VZTAHY PRO RŮZNÉ ZPŮSOBY PORUŠENÍ A OMEZENÍ VÝZTUŽE PŘEVZATÉ Z MC2010 [32]	26
TAB. 6: SLOŽENÍ ZÁKLADNÍCH SMĚSÍ	31
TAB. 7: VLASTNOSTI POUŽITÉHO KAMENIVA LIAPOR PRO ULC D1,0 [10]	33
TAB. 8: HMOTNOSTNÍ A PROCENTUÁLNÍ SLOŽENÍ ULC D1,0	34
TAB. 9: ZÁKLADNÍ PARAMETRY KAMENIVA LIAVER [15]	37
TAB. 10: ZÁKLADNÍ PARAMETRY KAMENIVA PORAVER [14]	37
TAB. 11: HMOTNOSTNÍ A PROCENTUÁLNÍ SLOŽENÍ ULC D1,0 - LIAVER	38
TAB. 12: VLASTNOSTI POUŽITÉHO KAMENIVA LIAPOR	39
TAB. 13: HMOTNOSTNÍ A PROCENTUÁLNÍ SLOŽENÍ ULC D1,2 – LIAPOR	40
TAB. 14: HMOTNOSTNÍ A PROCENTUÁLNÍ SLOŽENÍ ULC D1,2ECO – LIAPOR	40
TAB. 15: TLAKOVÉ PEVNOSTI ULC D1,0 - LIAPOR STANOVENÉ NA KRYCHLÍCH O HRANĚ 150 MM VE STÁŘÍ 28 DNÍ	52
TAB. 16: TLAKOVÁ PEVNOST A MODUL PRUŽNOSTI NA VÁLCI PRŮMĚRU 150 MM A VÝŠKY 300 MM VE STÁŘÍ 28 DNÍ	53
TAB. 17: TLAKOVÁ PEVNOST A MODUL PRUŽNOSTI STANOVENÝ NA TRÁMCÍCH 100×100×400 MM VE STÁŘÍ 28 DNÍ	53
TAB. 18: NAMĚŘENÉ ÚDAJE PEVNOSTI V PŘÍČNÉM TAHU VE STÁŘÍ VZORKŮ 28 DNÍ	54
TAB. 19: ULC D1,0 - LIAPOR MODEL EFEKTIVNÍ TRHLINY	57
TAB. 20: NAMĚŘENÉ VELIKOSTI SOUČINITELŮ DOTVAROVÁNÍ ULC D1,0 – LIAPOR	59
TAB. 21: NORMOVÝ VÝPOČET SOUČiniteLE DOTVAROVÁNÍ PRO ULC D1,0 – LIAPOR	59
TAB. 22: TLAKOVÁ PEVNOST STANOVENÁ NA KRYCHLÍCH PRO RŮZNÉ STÁŘÍ BETONU ULC D1,0 - LIAVER	62
TAB. 23: TLAKOVÁ PEVNOST ULC D1,2 – LIAPOR STANOVENÁ NA KRYCHLÍCH O HRANĚ 150 MM VE STÁŘÍ 40 DNÍ	64
TAB. 24: TLAKOVÁ PEVNOST A MODUL PRUŽNOSTI STANOVENÝ NA TĚLESECH TVARU VÁLCE VE STÁŘÍ 40 DNÍ	64
TAB. 25: TLAKOVÁ PEVNOST A MODUL PRUŽNOSTI STANOVENÝ NA TĚLESECH TVARU TRÁMCE VE STÁŘÍ 40 DNÍ	64
TAB. 26: PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU MĚŘENÁ NA KRYCHLÍCH O HRANĚ 150 MM - ULC D1,2 VE STÁŘÍ 40 DNÍ	66
TAB. 27: ULC D1,2 - LIAPOR MODEL EFEKTIVNÍ TRHLINY	66
TAB. 28: ULC D1,2ECO - LIAPOR – KRYCHELNÁ TLAKOVÁ PEVNOST VE STÁŘÍ 28 DNÍ	68
TAB. 29: ULC D1,2ECO - FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ VLASTNOSTI STANOVENÉ NA TRÁMCÍCH VE STÁŘÍ 28 DNÍ	68
TAB. 30: PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU ULC D1,2ECO – LIAPOR VE STÁŘÍ VZORKŮ 28 DNÍ	70
TAB. 31: LOMOVÁ ENERGIE BETONU ULC D1,2ECO	73
TAB. 32: NAMĚŘENÉ HODNOTY SOUČINITELŮ DOTVAROVÁNÍ	74
TAB. 33: NORMOVÝ VÝPOČET SOUČiniteLE DOTVAROVÁNÍ	74
TAB. 34: VÝVOJ KRYCHELNÉ PEVNOSTI V ČASE - ULC D1,2ECO	75
TAB. 35: VÝVOJ PEVNOSTI A MODULŮ PRUŽNOSTI V ČASE - ULC D1,2ECO – LIAPOR	76
TAB. 36: MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI LEHKÝCH BETONŮ	81
TAB. 37: NAMĚŘENÉ HODNOTY NAPĚTÍ V SOUDRŽNOSTI PRO VÝZTUŽ B500B	83
TAB. 38: VLASTNOSTI ČERSTVÝCH BETONŮ	87
TAB. 39: FYZIKÁLNĚ MECHANICKÉ PARAMETRY POUŽITÝCH BETONŮ	88
TAB. 40: PROCENTUÁLNÍ ZOBRAZENÍ FYZIKÁLNĚ MECHANICKÝCH PARAMETRŮ POUŽITÝCH BETONŮ	89
TAB. 41: NAMĚŘENÉ HODNOTY NAPĚTÍ V SOUDRŽNOSTI	89
TAB. 42: POMĚRNÁ VELIKOST NAPĚTÍ V SOUDRŽNOSTI V ZÁVISLOSTI NA POSUNU NEZATÍŽENÉHO KONCE VÝZTUŽE	91
TAB. 43: VYHODNOCENÍ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY FILIGRÁNOVÝCH NOSNÍKŮ	122

11. OZNAČENÍ VELIČIN

A	... porušovaná/tlačená plocha
A_c	... plocha průřezu
c	... stupeň zhutnitelnosti
c_d	... minimální hodnota krycí betonové vrstvy
c_{max}	... maximální velikost krytí
c_{min}	... minimální velikost krytí
d	... příčný rozměr tělesa
E_{cm}	... sečnový modul pružnosti betonu odpovídající pevnostní třídy
E_{lcm}	... průměrná hodnota modulu pružnosti lehkého betonu
F	... maximální síla
$l_{b,rqd}$	... základní požadovaná kotevní délka
f_{bd}	... mezní napětí v soudržnosti/výpočtová hodnota napětí v soudržnosti
$f_{bd,0}$	... průměrná hodnota napětí v soudržnosti
f_{cm}	... naměřená válcová pevnost betonu v tlaku/průměrná pevnost betonu v tlaku ve stáří 28 dní
$f_{cm}(t)$	... průměrná hodnota pevnost betonu v tlaku ve stáří t dní
f_{ct}	... pevnost v dostředném tahu
$f_{ct,sp}$	... pevnost v příčném tahu
f_{ctd}	... návrhová hodnota pevnosti betonu v tahu
$f_{ctk,0,05}$	... 5% kvantil charakteristické hodnoty tahové pevnosti (běžného) betonu
f_{ctm}	... průměrná hodnota pevnosti betonu v dostředném tahu
f_{lck}	... charakteristická válcová pevnost lehkého betonu
$f_{lck,cube}$	... charakteristická krychelná pevnost lehkého betonu
f_{lctm}	... průměrná hodnota pevnosti lehkého betonu v dostředném tahu
$f_{lcm,(cube,prism)}$	... průměrná hodnota válcové (krychelné, trámcové) pevnosti v tlaku
$f_{st,0}$	... střední napětí v soudržnosti
f_{stm}	... průměrná hodnota dosaženého napětí ve výztuži/mezní napětí v soudržnosti
$f_{stm,tr}$	... vliv přítlaku
G_f	... lomová energie
h_0	... náhradní rozměr prvku
K_{lce}	... efektivní lomová houževnatost
k_m	... vliv příčné výztuže
K_{tr}	... vliv příčné výztuže
l	... délka dotykové přímky
l_b	... kotevní délka
m_m	... hmotnost vlhkého vzorku betonu
m_s	... hmotnost vysušeného vzorku betonu
p	... příčný tlak

p_{tr}	... příčný tlak/přítlak
RH	... relativní vlhkost prostředí
t	... stáří betonu ve dnech v uvažovaném okamžiku
t_0	... stáří betonu ve dnech v okamžiku vnesení zatížení
u	... obvod prvku vystavený okolnímu prostředí
V	... procentuální objem vzduchu v čerstvém betonu
W_f	... lomová práce
α_2	... vliv pasivního omezení krycí vrstvou
α_3	... vliv příčné výztuže/vliv přítlaku
$\beta(f_{cm})$	... součinitel, vystihující vliv pevnosti betonu na základní součinitel dotvarování
$\beta(t_0)$	... součinitel, vystihující vliv stáří betonu v okamžiku vnesení zatížení
$\beta_c(t, t_0)$	... součinitel časového průběhu dotvarování pro zatížení
$\beta_{cc}(t)$	... součinitel závisící na stáří betonu
β_H	... součinitel závislý na relativní vlhkosti a na náhradním rozměru prvku
η_1	... koeficient zohledňující použitou výztuž/ součinitel pro stanovení pevnosti v tahu
η_1	... součinitel závislý na kvalitě podmínek v soudržnosti a poloze prutu během betonáže
η_1	... součinitel zohledňující nižší objemovou hmotnost lehkého betonu
η_2	... koeficient zohledňující pozici při betonáži/ součinitel závislý na průměru prutu
η_3	... koeficient zohledňující velikost výztuže
η_4	... koeficient zohledňující charakteristickou pevnost použité výztuže
η_E	... převodní součinitel pro výpočet modulu pružnosti
λ	... koeficient tepelné vodivosti
ρ	... objemová hmotnost betonu
ρ_{dry}	... objemová hmotnost ve vysušeném stavu
σ_{sd}	... návrhové napětí v místě prutu, od kterého se měří kotevní délka
τ_{max}	... mezní napětí v soudržnosti
ϕ	... průměr výztuže
φ_0	... základní součinitel dotvarování
φ_{RH}	... součinitel, vystihující vliv rel. vlhkosti na základní součinitel dotvarování
$\Omega_{p,tr}$	... vliv přítlaku

Příloha: Naměřené hodnoty ze zkoušky soudržnosti centrické a excentrické výztuže (C/LC běžný/lehký beton – C/E centricky/excentricky umístěná výztuž)

označení	ρ_{dry}	f_{bd} [MPa]				$f_{c,cube,m}$	$x_0(\rho_{dry})$	$x_0(f_{bd})$	s	x_0+2s	x_0-2s
		0,05	0,1	0,25	max	[MPa]	[kg/m ³]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
C-C-1	2180	11,446	12,687	15,993	19,673	45,3	2191	22,137	1,668	25,474	18,801
C-C-3	2180	14,633	16,841	21,544	24,325	45,3					
C-C-4	2180	11,651	13,531	16,896	20,710	45,3					
C-Fe1	2200	12,128	13,940	18,421	22,245	45,0					
C-Fe2	2200	11,451	14,777	19,616	23,161	45,0					
C-Fe3	2200	12,586	15,195	18,301	21,289	45,0					
C-Fe4	2200	14,299	16,668	21,089	23,559	45,0					
LC1,4-C-1	1400	15,223	16,437	15,754	16,528	35,6	1361	16,707	0,477	17,661	15,754
LC1,4-C-3	1400	14,242	16,831	16,384	16,850	35,6					
LC1,4-C-4	1400	13,856	15,926	16,356	16,941	35,6					
LC1,4-Fe1	1302	15,777	15,951	15,159	15,983	29,8					
LC1,4-Fe2	1302	15,698	16,236	17,076	17,234	29,8					
LC1,2-C-1	1190	13,743	14,737	14,202	14,801	25,4	1183	15,088	0,254	15,597	14,579
LC1,2-C-3	1190	14,017	15,067	13,979	15,177	25,4					
LC1,2-Fe1	1168	14,684	15,175	14,763	15,286	26,9					
LC1,0-C-1	1020	6,888	6,723	7,098	7,181	22,5	1010	7,986	0,914	9,814	6,159
LC1,0-C-2	1020	9,374	9,070	8,959	9,403	22,5					
LC1,0-C-3	1020	8,072	8,018	8,059	8,798	22,5					
LC1,0-C-4	1020	7,870	8,075	8,213	8,674	22,5					
LC1,0-Fe1	1000	5,266	5,632	6,536	7,187	22,2					
LC1,0-Fe2	1000	5,079	5,285	6,088	6,875	22,2					
LC1,0-Fe3	1000	6,240	6,458	7,581	7,600	22,2					
LC1,0-Fe4	1000	6,400	6,548	7,484	8,173	22,2					
C-E-1	2180	9,429	11,125	12,774	12,853	45,3	2180	13,527	0,933	15,392	11,661
C-E-2	2180	11,810	13,827	14,398	14,730	45,3					
C-E-3	2180	11,173	12,304	13,734	13,795	45,3					
C-E-4	2180	9,199	10,413	12,699	12,729	45,3					
LC1,4-E-1	1400	12,387	14,101	13,587	14,107	35,6	1400	13,220	0,759	14,739	11,701
LC1,4-E-2	1400	11,468	12,274		12,274	35,6					
LC1,4-E-3	1400	11,921	12,924	11,821	13,097	35,6					
LC1,4-E-4	1400	12,770	10,666	10,460	13,403	35,6					
LC1,2-C-1	1190	6,878	7,673	7,284	7,733	25,4	1190	8,232	0,483	9,197	7,266
LC1,2-C-2	1190	7,434	7,783	6,895	7,911	25,4					
LC1,2-C-3	1190	8,195	8,617	7,946	8,718	25,4					
LC1,2-C-4	1190	8,102	8,486	7,905	8,565	25,4					
LC1,0-E-1	1020	6,093	6,041	5,157	6,252	22,2	1020	6,656	0,677	8,009	5,302
LC1,0-E-2	1020	5,913	5,824	5,600	5,913	22,2					
LC1,0-E-3	1020	7,042	7,253	6,293	7,268	22,2					
LC1,0-E-4	1020	6,873	6,293	6,528	7,189	22,2					

Příloha 1: Data napětí v soudržnosti