

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera

Experimentální analýza vlivu prostředí na trvanlivost lehkých  
samozhutnitelných drátkobetonů

Bc. Martin Drajer

Diplomová práce

2022

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2019/2020

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Drajer**  
Osobní číslo: **D19424**  
Studijní program: **N0732A260017 Dopravní stavitelství**  
Téma práce: **Experimentální analýza vlivu prostředí na trvanlivost lehkých samozhutnitelných drátkobetonů**  
Zadávací katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

## Zásady pro vypracování

Požaduje se zpracovat rešerše stávající míry poznání v ČR a v zahraničí. V tématice trvanlivosti „lehkých betonů“ je požadováno zaměřit se na stupeň vlivu prostředí XF a XA.

V experimentální části práce se pro daný stupeň expozice vyberou adekvátní zkoušky. Lze modifikovat (referenční) recepturu typového lehkého samozhutnitelného betonu (LWSCC).

Vlastní experimentální práce budou probíhat na autorem zhotovených zkušebních tělesech.

Doporučuje se modifikovat LWSCC všesměrně přidanými ocelovými drátky.

### Požadované výstupy:

Úvod

Přehled stanovených cílů

#### 1) Teoretická část

Analýza současného stavu poznání v ČR a v zahraničí

#### 2) Experimentální část

Výroba lehkého samozhutnitelného drátkobetonu

Provedení zkoušek v čerstvém stavu (obsah vzduchu, stanovení konzistence, objemová hmotnost)

Provedení zkoušek ve ztvrdlém stavu

Sledování trvanlivostních zkoušek

#### 3) Vyhodnocení dosažených výsledků

Verifikace a závěr

Rozsah pracovní zprávy:

Rozsah grafických prací:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- ČSN EN 206+A1. Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- ČSN P 73 2404. Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- ČSN EN 12 350-X. Zkoušení čerstvého betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 12 390-X. Zkoušení ztvrdlého betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN 73 1322. Stanovení mrazuvzdornosti betonu. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1968.
- ČSN 73 1326. Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1984.
- TKP staveb pozemních komunikací: Kapitola 18: Betonové konstrukce a mosty. Praha: Ministerstvo dopravy, 2016.
- TKP staveb státních drah: Kapitola 17: Beton pro konstrukce. Praha: Správa železniční dopravní cesty, 2013.
- TP 187: Samozhutnitelný beton pro mostní objekty pozemních komunikací. In: Technické podmínky. Praha: Ministerstvo dopravy ČR: Odbor infrastruktury, 2008.
- COLLEPARDI, M., 2009. Moderní beton. Praha: Informační centrum ČKAIT. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- KRÁTKÝ, J., K. TRTÍK a J. VODIČKA, 1999. Drátkobetonové konstrukce: Úvodní část a příklady použití: Směrnice pro navrhování, provádění, kontrolu výroby a zkoušení drátkobetonových konstrukcí. Praha: Informační centrum ČKAIT. Betonové stavitelství. ISBN 80-86364-00-3.
- MEHTA, P. Kumar a Paulo J. M. MONTEIRO. Concrete: microstructure, properties, and materials. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 978-0-07-179787-0; MHID 0-07-179787-4.
- PYTÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.
- SCHUTTER, Geert De, Peter J.M. BARTOS, Peter DOMONE, John GIBBS a Rudolf HELA, 2008. Samozhutnitelný beton. Praha: ČBS Servis. ISBN 978-1904445-30-2.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladimír Suchánek, Ph.D.**  
Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání diplomové práce: **27. října 2019**  
Termín odevzdání diplomové práce: **29. ledna 2021**

L.S.

---

**doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.**  
děkan

---

**Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 30. října 2019



Prohlašuji:

Práci s názvem Experimentální analýza vlivu prostředí na trvanlivost lehkých samozhutnitelných drátkobetonů jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Tato diplomová práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě.

V Pardubicích 17.05.2022

Bc. Martin Drajer

## PODĚKOVÁNÍ

Mé poděkování patří vedoucímu diplomové práce panu Ing. Vladimíru Suchánkovi, Ph.D. za odborné vedení a rady poskytnuté při tvorbě této práce. Další poděkování patří paní doc. Ing. Petře Bajerové, Ph.D. z katedry analytické chemie za přípravu kyseliny chlorovodíkové, panu Michalu Konířovi ze společnosti Cemex Czech Republic s.r.o. za pomoc při zkoušení těles a panu Jiřímu Kudrnovi z Ústavu stavebního zkušebnictví s.r.o. za odborné rady a pomoc při zkoušení těles. Rovněž bych rád poděkoval svým spolužákům Ing. Filipu Kosinkovi, Ing. Janu Fadrhonsovi a Ing. Vojtěchu Koletovi za pomoc v experimentální části.

Diplomová práce byla zpracována v souvislosti s řešením vědeckovýzkumného projektu Univerzity Pardubice č. SGS\_2020\_009, SGS\_2021\_010, SGS\_2022\_011.

## **ANOTACE**

Diplomová práce se zabývá experimentální analýzou vlivu prostředí na trvanlivost lehkých samozhutnitelných drátkobetonů a současným stavem poznání v oblasti lehkých betonů. Experimentální část je zaměřena na zkoumání trvanlivosti typového betonu modifikovaného ocelovými drátky v prostředích XA a XF. Analýza je provedena použitím standardních (normových) a nestandardních postupů.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

lehký samozhutnitelný drátkobeton, trvanlivost betonu, stupeň vlivu prostředí, mrazuvzdornost, chemická odolnost, pevnost v tahu za ohybu

## **TITLE**

Experimental analysis of the impact of exposure classes of durability of lightweight self compacting steel fibre reinforced concrete.

## **ANNOTATION**

The diploma thesis deals with the experimental analysis of the impact of exposure classes on the durability of lightweight self compacting steel fibre reinforced concrete and the current state of knowledge in the field of light-weight concrete. The experimental part of the work is focused on investigating of durability of type concrete modified with steel wires in exposure classes XA and XF. The analysis is performed using standard and non-standard procedures.

## **KEYWORDS**

lightweight self compacting steel fibre reinforced concrete, durability of concrete, exposure class, frost resistance, chemical resistance, flexural tensile strength

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	15
<b>CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE</b> .....	16
<b>I. TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	17
<b>1. Lehký samozhutnitelný drátkobeton</b> .....	17
1.1 Historie LC.....	17
1.2 Historie SCC.....	17
1.3 Složení lehkého samozhutnitelného drátkobetonu.....	18
1.3.1 Lehké kamenivo.....	18
1.3.2 Cement.....	20
1.3.3 Záměsová voda.....	20
1.3.4 Přísady.....	20
1.3.5 Příměsi.....	22
1.3.6 Rozptýlená výztuž.....	23
1.4 Specifika chování LWSCC.....	25
1.4.1 Výhody a nevýhody.....	25
1.4.2 Technologické odlišnosti LWSCC.....	25
1.4.3 Trvanlivost LWSCC.....	27
1.5 Realizované stavby.....	29
<b>2. Trvanlivost betonu</b> .....	31
2.1 Stupně vlivů prostředí.....	33
2.1.1 Bez nebezpečí koroze nebo narušení (X0).....	33
2.1.2 Koroze vlivem karbonatace (XC).....	34
2.1.3 Koroze vlivem chloridů (XD a XS).....	36
2.1.4 Působení mrazu a rozmrazování (XF).....	38
2.1.5 Chemické působení (XA).....	44
2.1.6 Koroze vlivem mechanického působení (XM).....	48



<b>II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	49
<b>3. Výroba a ošetřování zkušebních těles</b> .....	50
<b>4. Zkoušení čerstvého betonu</b> .....	51
4.1 Zkouška sednutí-rozlitím .....	51
4.2 Objemová hmotnost čerstvého betonu.....	53
4.3 Obsah vzduchu .....	54
<b>5. Experimentální prostředí</b> .....	55
5.1 Působení kyseliny chlorovodíkové .....	55
5.2 Periodické působení vody v kombinaci s povětrnostními vlivy .....	56
<b>6. Zkoušení ztvrdlého betonu</b> .....	59
6.1 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu .....	59
6.1.1 Objemová hmotnost ve stavu, jak byl dodán.....	60
6.1.2 Objemová hmotnost ve stavu nasycení a po vysušení.....	62
6.2 Pevnost v tlaku .....	63
6.2.1 Pevnost v tlaku na válcích .....	63
6.2.2 Pevnost v tlaku na krychlích.....	64
6.3 Pevnost v tahu za ohybu.....	66
6.3.1 Pevnost v tahu za ohybu – sada REF .....	69
6.3.2 Pevnost v tahu za ohybu – sada CHEM.....	70
6.3.3 Pevnost v tahu za ohybu – sada KOM.....	71
6.3.4 Pevnost v tahu za ohybu – sada PVM.....	72
6.3.5 Porovnání dosažených výsledků.....	73
6.4 Pevnost v tahu za ohybu s kruhovou singularitou.....	74
6.5 Hloubka průsaku tlakovou vodou .....	76
6.6 Stanovení mrazuvzdornosti.....	78
6.6.1 Referenční sada.....	80
6.6.2 Sada vystavená 50 cyklům.....	81

6.6.3	Sada vystavená 100 cyklům.....	82
6.6.4	Sada vystavená 150 cyklům.....	83
6.6.5	Porovnání dosažených hodnot .....	84
6.7	Stanovení odolnosti proti působení vody a CHRL .....	85
<b>ZÁVĚR</b>	.....	<b>88</b>
<b>CITACE</b>	.....	<b>91</b>
<b>DOKLADOVÁ ČÁST</b>	.....	<b>97</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Kamenivo Liapor (frakce 8-16 mm) [9].....	18
Obrázek 2: Kamenivo Rugen (frakce 8-16 mm) [vlastní foto].....	19
Obrázek 3: Různé druhy drátků do betonu [23] .....	24
Obrázek 4: Porušení vzorků po cyklech zmrazování [26] .....	28
Obrázek 5: Výstavba stadionu Eden v Praze [33] .....	29
Obrázek 6: Plnostěnný trámový most na silnici R6 Sokolov-Tisová [33] .....	30
Obrázek 7: Holistický model degradace betonu [14] .....	31
Obrázek 8: Ternární znázornění poškození vyztužených betonových konstrukcí [14].....	32
Obrázek 9: Schematické znázornění mechanismu glue spall [46] .....	40
Obrázek 10: Schéma poškození betonu kapalným agresivním prostředím [49] .....	44
Obrázek 11: Předvlhčení lehkého kameniva (vlevo) [vlastní foto] .....	50
Obrázek 12: Ošetřování části zkušebních těles (vpravo) [vlastní foto] .....	50
Obrázek 13: Průběh zkoušky sednutí-rozlítím [vlastní foto].....	51
Obrázek 14: Stanovení obsahu vzduchu u záměsi č.3 [vlastní foto] .....	54
Obrázek 15: Sady CHEM a KOM vystavené působení HCL [vlastní foto].....	55
Obrázek 16: Detail poškození sady CHEM [vlastní foto] .....	56
Obrázek 17: Sady KOM a PVM vystavené vodě a povětrnostním vlivům [vlastní foto] .....	56
Obrázek 18: Úbytek hmotnosti u tělesa CHEM 2 [vlastní foto].....	61
Obrázek 19: Hmotnost po nasycení (vlevo) a hmotnost po vysušení (vpravo) [vlastní foto] ..	62
Obrázek 20: Stanovení pevnosti v tlaku na tělese KOM 1 [vlastní foto] .....	64
Obrázek 21: Automatické zaznamenávání průběhu zkoušky [vlastní foto] .....	66
Obrázek 22: Porušené těleso při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu [vlastní foto].....	67
Obrázek 23: Schéma uspořádání zkoušky (vlevo) a axiální síly v krčcích (vpravo) [61] .....	74
Obrázek 24: Jádrové vrtání (vlevo) a porušené těleso (vpravo) [vlastní foto] .....	74
Obrázek 25: Zkušební tělesa vystavená působení vodního tlaku [vlastní foto] .....	76
Obrázek 26: Hloubka průsaku na tělese 1-V5 [vlastní foto] .....	77
Obrázek 27: Rozložení těles v cyklovacím zařízení [vlastní foto] .....	79
Obrázek 28: Pevnost v tahu ohybem po 50 cyklech [vlastní foto] .....	79
Obrázek 29: Zkušební vzorky před začátkem cyklování [vlastní foto] .....	86
Obrázek 30: Zkušební vzorky a odpady po 25 cyklech [vlastní foto] .....	86
Obrázek 31: Zkušební vzorky a odpady po 50 cyklech [vlastní foto] .....	86

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Srovnání parametrů lehkých umělých kameniv dostupných v ČR [13].....	20
Tabulka 2: Stupeň vlivu prostředí X0, upraveno z [15] .....	33
Tabulka 3: Stupeň vlivu prostředí XC, upraveno z [15], [37] .....	35
Tabulka 4: Stupeň vlivu prostředí XD a XS, upraveno z [15], [37].....	37
Tabulka 5: Požadavky na vlastnosti betonu v prostředí XF, upraveno z [37] .....	42
Tabulka 6: Stupeň vlivu prostředí XF, upraveno z [15], [37].....	43
Tabulka 7: Stupeň vlivu prostředí XA, upraveno z [15], [37].....	47
Tabulka 8: Hodnoty pro stupně chemického působení rostlé zeminy a podzemní vody [15]..	47
Tabulka 9: Stupeň vlivu prostředí XM, upraveno z [37].....	48
Tabulka 10: Výsledky zkoušky sednutí-rozlitím .....	52
Tabulka 11: Objemové hmotnosti čerstvého betonu .....	53
Tabulka 12: Obsah vzduchu v čerstvém betonu .....	54
Tabulka 13: Maximální a minimální teploty v období působení, upraveno z [57] .....	57
Tabulka 14: Objemová hmotnost ve stavu, jak byl dodán.....	60
Tabulka 15: Objemová hmotnost ve stavu nasycení vodou a po vysušení v sušárně.....	62
Tabulka 16: Pevnost v tlaku na válcích .....	63
Tabulka 17: Pevnost v tlaku na krychlích.....	64
Tabulka 18: Porovnání pevností v tahu za ohybu a dostředném tahu – všechny sady .....	73
Tabulka 19: Maximální hodnoty průsaku na jednotlivých tělesech .....	77
Tabulka 20: Naměřené hodnoty na referenčních (nezmrazovaných) tělesech .....	80
Tabulka 21: Naměřené hodnoty po 50 cyklech zmrazování a rozmrazování.....	81
Tabulka 22: Naměřené hodnoty po 100 cyklech zmrazování a rozmrazování.....	82
Tabulka 23: Naměřené hodnoty po 150 cyklech zmrazování a rozmrazování.....	83
Tabulka 24: Odolnost proti působení vody a CHRL .....	87



## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Pracovní diagram drátkobetonu v tahu (F) a obdobného prostého betonu (B) [20].....	24
Graf 2: Charakteristický průběh vodního součinitele LC během čerpání [4].....	26
Graf 3: Hloubka karbonatace v závislosti na čase [38] .....	34
Graf 4: Vývoj teploty vzduchu v období působení, upraveno z [57] .....	58
Graf 5: Porovnání objemových hmotností ve stavu, jak byl dodán.....	61
Graf 6: Porovnání dosažených pevností v tlaku (krychle 150 mm) .....	65
Graf 7: Diagramy odolnosti – sada REF.....	69
Graf 8: Průměrný a charakteristický diagram odolnosti – sada REF .....	69
Graf 9: Diagramy odolnosti – sada CHEM .....	70
Graf 10: Průměrný a charakteristický diagram odolnosti – sada CHEM .....	70
Graf 11: Diagramy odolnosti – sada KOM.....	71
Graf 12: Průměrný a charakteristický diagram odolnosti – sada KOM .....	71
Graf 13: Diagramy odolnosti – sada PVM .....	72
Graf 14: Průměrný a charakteristický diagram odolnosti – sada PVM .....	72
Graf 15: Porovnání průměrných diagramů odolnosti .....	73
Graf 16: Diagramy odolnosti – tělesa s kruhovou singularitou .....	75
Graf 17: Grafické schéma zkoušky [vlastní foto].....	79
Graf 18: Porovnání dosažených pevností v tahu ohybem.....	84
Graf 19: Porovnání dosažených pevností v tlaku (krychle 100 mm) .....	84

## SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

CaCO <sub>3</sub>	uhličitan vápenatý
Ca(OH) <sub>2</sub>	hydroxid vápenatý
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
HCl	kyselina chlorovodíková
CHEM	sada těles vystavená působení HCl
CHRL	chemické rozmrazovací látky
KOM	sada těles vystavená kombinovanému působení
LC	lehký beton (lightweight concrete)
LWSCC	lehký samozhutnitelný beton (lightweight self-compacting concrete)
LWSFRSCC	lehký samozhutnitelný drátkobeton (lightweight self-compacting steel fibre reinforced concrete)
NaCl	chlorid sodný
PVM	sada těles vystavená periodickému působení vody s povětrnostními vlivy
REF	referenční sada těles (nevystavená žádnému působení)
SFRC	drátkobeton (steel fibre reinforced concrete)
SCC	samozhutnitelný beton (self-compacting concrete)
VMA	přísady modifikující viskozitu (viscosity modifying admixture)
VVCD	Výukové a výzkumné centrum v dopravě

## ÚVOD

Tématem diplomové práce je problematika trvanlivosti lehkých samozhutnitelných drátkobetonů. Práce se zaměřuje především na stanovení vlivu na trvanlivost typového betonu ve stupních vlivu prostředí XA a XF. Tato práce rovněž doplňuje další charakteristiky perspektivního betonu s využitím umělého kameniva Rugen v návaznosti na předchozí závěrečné práce zabývající se tematikou lehkých betonů s kamenivem Rugen.

Lehké samozhutnitelné betony jsou označovány zkratkou LWSCC (lightweight self-compacting concrete). Jedná se o stavební materiál spojující výhody lehkých vibrovaných a hutných samozhutnitelných betonů. Hlavní výhodou lehkého betonu je snížení zatížení konstrukcí. Tím lze dosáhnout snížení nákladů celé stavby.

Diplomová práce je rozdělena na část teoretickou a praktickou. V teoretické části je popsána historie, složení a specifika chování LWSCC, rovněž jsou zde uvedeny příklady konkrétních staveb. Dále je popisována trvanlivost betonu a jednotlivé stupně vlivu prostředí, ve kterých se betonová konstrukce může vyskytovat, včetně požadavků na složení a vlastnosti betonu pro dané stupně vlivu prostředí.

Praktická část se zaměřuje na zkoumání trvanlivosti typového LWSCC v prostředích XA a XF. Receptura typového betonu byla modifikována pouze přidáním ocelových vláken. Výsledný beton byl vytvořen kombinací tří speciálních betonů (lehký beton, samozhutnitelný beton a drátkobeton). Pro stanovení trvanlivosti byly provedeny normové zkoušky (stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou, stanovení mrazuvzdornosti a stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení vody a CHRL). Tyto normové postupy byly dále doplněny o nestandardní metody (tělesa byla vystavena působení HCl a periodickému působení vody v kombinaci s povětrnostními vlivy).

V závěru práce je provedeno vyhodnocení provedených zkoušek včetně zatřídění betonu do stupňů vlivu prostředí.

## CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cíle diplomové práce jsou následující:

- Zachytit historický a současný stav poznání v oblasti LWSCC.
- Navázat na závěrečné práce zabývající se tématem lehkých betonů s aplikací kameniva Rugen.
- Zkoumat trvanlivost typové receptury modifikované přidáním ocelových vláken v prostředích XA a XF. Pro analýzu použít standardní (normové) a nestandardní postupy.
- Provést normové zkoušky ověřující trvanlivost betonu (stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou, stanovení mrazuvzdornosti, stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení vody a CHRL).
- Vytvořit podmínky simulující reálná prostředí XA a XF. Sady těles vystavené těmto podmínkám porovnat s referenční sadou. Zkoumány budou úbytky hmotností, objemové hmotnosti ztvrdlého betonu, pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu.
- Zkoumanou recepturu LWSFRSCC 25/28 zařadit do stupňů vlivu prostředí.
- Jedním z dalších cílů je provedení zkoušky pevnosti v tahu za ohybu podle navrhované metodiky Fakulty stavební ČVUT, kde jsou trámce opatřeny kruhovým vývrtem.
- Popsat závěrečné vyhodnocení zkoušek.



# I. TEORETICKÁ ČÁST

## 1. Lehký samozhutnitelný drátkobeton

### 1.1 Historie LC

Historie lehkých betonů sahá až do antického období. V éře harappské civilizace byl při výstavbě měst Harappa a Mohenjo-Daro používán lehký beton vyráběný z kameniva sopečného původu. První zmínky o lehkém betonu v Evropě pochází z rané říše římské. Římané tímto způsobem vybudovali slavný Pantheon, akvadukty a Koloseum v Římě. Po rozpadu jejich říše bylo používání lehkého betonu do značné míry omezeno.

Historický zlom nastal ve 20. století vývojem průmyslově vyráběných lehkých kameniv. V roce 1918 si nechal Stephen J. Hayde patentovat technologii expandace břidlic. Její první využití bylo při stavbě válečných lodí na konci první světové války. Úspěšná aplikace při stavbě lodí vedla k jejímu rozšíření do stavebnictví. První výrobní závod byl otevřen v roce 1920 v Kansasu. V průběhu dvacátých let bylo s využitím expandované břidlice vystavěno několik mostů v USA. V Evropě začalo kolem roku 1960 vznikat mnoho závodů vyrábějících kamenivo na bázi expandovaných jíílů. Například v Československu byly otevřeny v letech 1955 a 1964 závody v Bratislavě a Vintřově [1], [2].

### 1.2 Historie SCC

Vývoj moderního SCC započal v druhé polovině osmdesátých let 20. století v Japonsku. Podnětem k jeho vzniku byly poválečné rekonstrukce v padesátých a šedesátých letech, které upřednostňovaly rychlost dodávky na úkor kvality, což vedlo k rozpadu staveb vybudovaných z železobetonu během příštích dvaceti let.

Zlepšením kvality budoucích betonových konstrukcí se začal zabývat tým z Tokijské univerzity pod vedením H. Okamury, který došel k závěru, že příčinou poškození konstrukcí bylo nedostatečné zhutnění, což vedlo ke zlepšení zpracovatelnosti čerstvého betonu, tak aby zhutňování nebylo potřeba a směs se stala samozhutnitelnou. K prvnímu použití samozhutnitelného betonu došlo na začátku devadesátých let 20. století v Japonsku.

V České republice byl SCC poprvé zmíněn v roce 1997 na konferenci 6. Betonářské dny. První větší stavbou, kde došlo k jeho použití byl v roce 2000 železniční most v Praze na Zlíchově (realizovaný společností TBG Metrostav s.r.o.). V následujících letech došlo k jeho rozšíření a používání (stavba vysílače na Spořilově, betonáž pilířů Vysočanské radiály, betonáž horní klenby sekundárního ostění metra IV.C v Praze) [3], [4].

## 1.3 Složení lehkého samozhutitelného drátkobetonu

### 1.3.1 Lehké kamenivo

Při výrobě LC se používá pórovité (lehké) kamenivo, což je podle ČSN EN 13055 [5] kamenivo nerostného původu s objemovou hmotností nepřevyšující 2 000 kg/m<sup>3</sup> nebo sypnou hmotností do 1 200 kg/m<sup>3</sup>. Pórovitá kameniva se primárně dělí dle původu na přírodní a umělá.

#### 1.3.1.1 Přírodní lehké kamenivo

Přírodní lehké kamenivo se získává drcením lehkých pórovitých hornin. Používají se přírodní tufy a tufty, lehké lávy, přírodní pemza a diatomity.

Tufy jsou horniny sopečného původu vzniklé během sopečné erupce. Jedná se o poměrně měkké horniny, které se běžně vyskytují v Itálii. Pemza je pyroklastická hornina světlé barvy s vysoce porézní strukturou a velmi malou objemovou hmotností (na hladině vody plave). Pemza se ve stavebnictví používá jako přísada do stavebních hmot, při výrobě tvárnic nebo jako stavební kámen. Mezi největší světové producenty patří Itálie a Turecko [6], [7], [8].

#### 1.3.1.2 Umělé lehké kamenivo

Umělé lehké kamenivo se vyrábí tepelným zpracováním přírodních materiálů (břidlice, jílu, perlitu), průmyslových produktů (skla) a vedlejších průmyslových produktů (popílků). Umělé kamenivo je rovněž možné vyrábět bez tepelného zpracování (za studena sbalkovaná popílková kameniva) [1].

- **Umělé lehké kamenivo z přírodních materiálů**

Nejpoužívanějšími typy umělých kameniv z přírodních látek jsou Liapor, Perlit a Leca. **Liapor** se vyrábí výpalem a expandací třetihorních jílu v rotačních pecích. Používá se suchý nebo plastický postup. Vstupní surovinou pro výrobu jsou tvrdší břidlice či plastické jíly. Výhodou kameniva Liapor je především nízká objemová hmotnost (500 až 1 500 kg/m<sup>3</sup>) při poměrně vysoké pevnosti v tlaku (0,7 až 10 MPa). V ČR se Liapor vyrábí plastickým způsobem z třetihorních cypřišových jílu v závodě Lias Vintířov [9].



Obrázek 1: Kamenivo Liapor (frakce 8-16 mm) [9]

**Expandovaný perlit** je drobné pórovité kamenivo vyráběné žháním zrn surového perlitu. Perlit je přírodní vulkanické sklo jako například obsidián a pemza. Má tedy podobné chemické složení a vlastnosti. Expandovaný perlit je nehořlavý, odolný proti mrazu, objemově stálý a vzhledem k velkému množství otevřených pórů i velmi nasákavý (až 400 % hmotnosti). Sypná hmotnost se pohybuje v rozmezí od 50 do 120 kg/m<sup>3</sup> [10].

- **Umělé lehké kamenivo z průmyslových produktů**

Mezi typické zástupce umělého lehkého kameniva z průmyslových produktů patří Liaver, Poraver a Technopor. U lehkého kameniva z vedlejších průmyslových produktů se jedná například o Agloporit, Lytag a Rugen [1].

**Agloporit** se vyrábí spékáním hnědouhelných, černouhelných, případně antracitických popílků a jiných korekčních příměsí. Agloporit má nízkou objemovou hmotnost (1 150 až 1 250 kg/m<sup>3</sup>) a vysokou pevnost (5 až 9 MPa), další výhodou je rychlá nasákavost, objemová stálost a vysoká teplotní odolnost [11].

**Kamenivo Rugen** se vyrábí z jemných odpadních materiálů za přirozených teplot. Hlavní výhodou je nízká energetická náročnost výroby a nízké pořizovací náklady vstupních surovin. Vstupními surovinami jsou odpadní materiály, odprašky, hydraulická pojiva a přísady do betonu. Kamenivo Rugen má nízkou objemovou hmotnost (od 850 do 1 200 kg/m<sup>3</sup>) a vysokou odolnost proti drcení (min. 1,5 MPa). Dále vyniká mimořádně rychlou nasákavostí a nehořlavostí [12], [13].



Obrázek 2: Kamenivo Rugen (frakce 8-16 mm) [vlastní foto]

Tabulka 1: Srovnání parametrů lehkých umělých kameniv dostupných v ČR [13]

Název	Frakce [mm]	Sypná objemová hmotnost [ps]	Odolnost proti drcení [MPa]	Podíl odpadních surovin [%]	Teplota výroby kameniva [°C]
Rugen	4/8	500 – 1 200	2 – 20	60 – 100	≥ 5
	8/16	400 – 1 000	1 – 12	60 – 100	≥ 5
SioPor	0,1/1	120 – 160	0,08	0	300
	0,63/2,5	60 – 100	0,03	0	300
	2,5/4	60 – 80	0,01	0	300
Poraver	2,4/4,8	145 – 230	1,3	100	900
Liapor	0/2	575	4	0	> 1 100
	0/4	450	2,1	0	> 1 100
	4/8	450	1,7	0	> 1 100
	8/16	275	0,6	0	> 1 100

### 1.3.2 Cement

Při výrobě LWSCC se používají různé druhy cementů vyhovující ČSN EN 197-1. Na rozdíl od běžného betonu je zde požadován vyšší poměr cementové matrice ke kamenivu, objem cementové matrice je důležitý pro pohyblivost betonové směsi. Kamenivo je pak unášeno vlivem gravitační síly nebo vlivem tlaku při čerpání betonu [14].

### 1.3.3 Záměsová voda

Pro záměsovou vodu platí požadavky ČSN EN 1008 a pro její použití ČSN EN 206-1. Vodní součinitel je závislý na stupni vlivu prostředí dle ČSN EN 206-1 [15].

U LC je vzhledem k vysoké nasákavosti lehkého kameniva obzvláště nutné zohlednit potřebu většího množství záměsové vody. Záměsová voda se v tomto případě rozděluje na vodu přídavnou a účinnou. Přídavná voda se vsákne během míchání do lehkého kameniva a nepodílí se na tvorbě cementového tmele a zároveň se, ale ani nezapočítává do vodního součinitele. Množství potřebné přídavné vody je závislé na nasákavosti kameniva, jeho vlhkosti, době míchání a způsobu ukládání [4].

### 1.3.4 Přísady

Chemické přísady jsou kapalné látky přidávající se v průběhu míchání za účelem zlepšení vlastností čerstvého i ztvrdlého betonu. Přidávají se v malém množství (0,1 – 10 kg/m<sup>3</sup>).

Podle své funkce se přísady dělí do následujících skupin:

- urychlující a zpomalující
- plastifikační a superplastifikační
- provzdušňující
- přísady modifikující viskozitu
- hydrofobizační a ostatní přísady

#### **1.3.4.1 Superplastifikátory**

Superplastifikátory jsou organické polymery s dlouhými řetězci molekul, princip jejich plastifikace je stejný jako u plastifikátorů, avšak ztekucující účinek je mnohem vyšší. Jejich použitím se snižuje množství potřebné vody o 30 % a pevnost v tlaku narůstá za jeden den nejméně na 140 %, respektive na 115 % za 28 dní v porovnání s referenčním betonem.

Rozlišujeme tři základní typy superplastifikátorů. SNF (na bázi sulfonovaných naftalen-formaldehydových kondenzátů), SMF (na bázi sulfonovaných melamin-formaldehydových pryskyřic) a PCL (na bázi polykarboxylových esterů)

Při použití superplastifikátorů u samozhutnitelných betonů obecně se u prvních dvou typů v minulosti vyskytovaly problémy kompatibility s cementem, což vedlo ke kratší zpracovatelnosti, větší náchylnosti ke krvácení a tixotropii.

Použití přísad na bázi polykarboxylátů vede k vyššímu ztekucení a stabilnějšímu chování. Výhodou tohoto typu je pružnost chemické struktury, čímž je možné upravit výsledné chování betonu s cílem překonání problémů s kompatibilitou jednotlivých složek (cement, příměsi, přísady a jemné podíly v kamenivu) [4], [6], [14], [16].

#### **1.3.4.2 Přísady modifikující viskozitu betonu**

Přísady modifikující viskozitu betonu (VMA) jsou ve vodě rozpustné polymery zvyšující viskozitu záměsové vody a zlepšující zadržování složek cementové pasty v suspenzi. Používají za účelem zvýšení stabilizace reologických vlastností a konzistence samozhutnitelných betonů. Přísady modifikující viskozitu lze rozdělit na adsorpční (ve vodě rozpustné polymery na bázi akrylátu a celulózy) a neadsorpční typy (ve vodě rozpustné mikrobiální polysacharidy). Adsorpční typy se adsorbují na povrch částic cementu a vytváří mezi nimi přemostění. S rostoucí dávkou tohoto typu narůstá plastická viskozita a klesá odolnost proti rozměšování. Neadsorpční typy se oproti tomu vážou na molekuly vody, čímž rovněž zvyšují plastickou viskozitu čerstvého betonu. Při použití do samozhutnitelných betonů jsou výhodnější neadsorpční VMA, protože z hlediska jejich působení nedochází na rozdíl od prvního typu k „soupeření“ o povrch částic cementu se superplastifikátorem [4], [17].

### 1.3.5 Příměsi

Příměsi jsou práškovité anorganické látky přidávané do čerstvého SCC za účelem zlepšení jeho vlastností v čerstvém a zatvrdlém stavu. Jedná se o částice s velkým měrným povrchem a velikostí menší než 0,125 mm. V čerstvém SCC příměsi zlepšují odolnost proti segregaci, zvyšují pohyblivost a homogenitu.

Příměsi se dělí na dva typy:

- typ I – inertní příměsi,
- typ II – pucolánové nebo latentně hydraulické látky [18].

#### 1.3.5.1 Typ I – inertní příměsi

Mezi tento typ příměsí řadíme filery (kamenné moučky) a práškové pigmenty. Filery jsou jemně mleté horniny zlepšující zejména zpracovatelnost čerstvého betonu díky navýšení množství jemných částic. Dále zlepšují přídržnost betonu k podkladu a zvyšují soudržnost. Inertní příměsi se v betonu neúčastní hydratačních reakcí. Výjimku tvoří jemně mletý vápenec, jehož jemná zrna v betonu působí jako nukleační centra pro krystaly portlanditu (dochází k urychlení hydratace a nárůstu počáteční pevnosti).

Mletý vápenec je minerální plnivo obsahující více než 75 %  $\text{CaCO}_3$ , z hlediska granulometrie je požadováno, aby propad sítem o velikosti 0,063 mm byl větší než 70 %. Ve studiích zabývajících se vlivem jemně mletého vápence na vlastnosti SCC bylo zjištěno, že při přídatku 20 % z hmotnosti cementu dosahují hodnoty rozlití a pevnosti v tlaku nejvyšších hodnot, nad 20 % naopak rozlití a pevnost rychle klesá a hrozí rovněž ztráta samozhutnitelnosti [6], [19].

#### 1.3.5.2 Typ II – aktivní příměsi

Aktivní příměsi dále dělíme dle jejich působení na pucolánové (popílky, mikrosilika) a latentně hydraulické látky (vysokopecní jemně mletá struska). Latentně hydraulické látky jsou aktivovány účinkem budičů, které mohou být alkalické nebo síranové. Mezi nejpoužívanější latentně hydraulické látky patří vysokopecní struska. Jedná se o vedlejší produkt vznikající při výrobě surového železa.

Pucolánové látky jsou přírodní (sopečné tufy a tufity, křemelina) nebo průmyslové anorganické látky (mikrosilika, popílky a kalcinované břidlice), které samy netuhnou, netvrdnou a nejsou latentně hydraulické. Obsahují však amorfni  $\text{SiO}_2$ , který ve vodě reaguje s hydroxidem vápenatým ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) a tím vytváří C-S-H gel.

Aktivní příměsi rovněž zlepšují zpracovatelnost a díky své účasti při hydrataci také pevnost a trvanlivost ztvrdlého betonu [6], [19].



### 1.3.6 Rozptýlená výztuž

Přidáním rozptýlené výztuže (vláken) do čerstvého betonu vzniká kompozitní materiál, který obecně nazýváme vláknobeton (FRC). Vlákná jsou do betonu přidávána za účelem zlepšení některých jeho fyzikálně-mechanických vlastností. Zejména dochází k zvýšení odolnosti vůči tahovým napětím, větší odolnosti vůči rázovému a dynamickému namáhání, lepší odolnosti vůči objemovým změnám vlivem smršťování a okolní teploty, čímž se zamezuje vzniku smršťovacích trhlin.

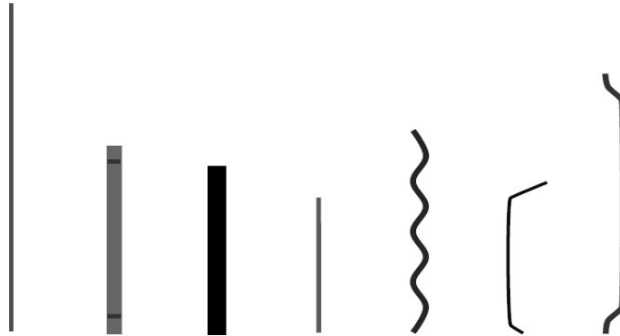
Zlepšení fyzikálně-mechanických vlastností vláknobetonu je ovlivněno především materiálem, dále pak množstvím a tvarem použitých vláken. Používají se vlákna vyrobená z různých materiálů. Dle chemického složení rozlišujeme vlákna ocelová, skleněná a syntetická (polyetylenová, polyesterová, polypropylenová a akrylátová), případně existují vlákna speciální (uhlíková, nylonová, hliníková a whiskery) [6], [20], [21].

Zkoumání vlivu různých druhů vláken na vlastnosti již navržených a ověřených receptur LWSCC probíhalo v Ústavu technologie stavebních hmot a dílců Fakulty stavební v Brně. Jednalo se o recepturu obsahující lehké kamenivo Liapor spolu s přírodním kamenivem a recepturu pouze s lehkým kamenivem Liapor. Obě receptury byly dále modifikovány různými typy vláken (syntetická vlákna, polypropylenová vlákna a dva druhy ocelových vláken). U všech sad byly sledovány reologické vlastnosti, objemové změny a fyzikálně-mechanické vlastnosti. Z hlediska reologických vlastností byla splněna kritéria pro pohyblivost pouze u receptur s ocelovými vlákny. U receptur se syntetickými a polypropylenovými vlákny docházelo k vysoké blokaci čerstvého betonu. Z hlediska pevnosti v tahu za ohybu došlo k největšímu nárůstu u polypropylenových vláken (až 142 % u kameniva Liapor). Celkové hodnocení práce uvádí, že pro LWSCC lze s ohledem na splnění reologických vlastností použít některé typy krátkých ocelových vláken (do 12 mm). U LWSCC pouze s lehkým kamenivem se doporučují krátká polypropylenová vlákna (do 12 mm) [21].

Vlivem množství dávkovaných drátků na pevnostní charakteristiky LWSCC obsahující kamenivo Rugen se ve své práci zabýval Kosinka [22]. V práci byla použita ocelová vlákna Dramix 3D 45/50 BL v množství  $25 \text{ kg/m}^3$  a  $50 \text{ kg/m}^3$ . Vyšších hodnot pevností bylo dosaženo při dávce  $50 \text{ kg/m}^3$ . Nárůst pevnosti v tlaku oproti referenční receptuře byl až 10 MPa, u pevnosti v tahu za ohybu byl znatelný rozdíl v reziduální oblasti, kde bylo dosaženo jednoznačně vyšších zatížení [22].

### 1.3.6.1 Vláknobeton s ocelovými vlákny (drátkobeton)

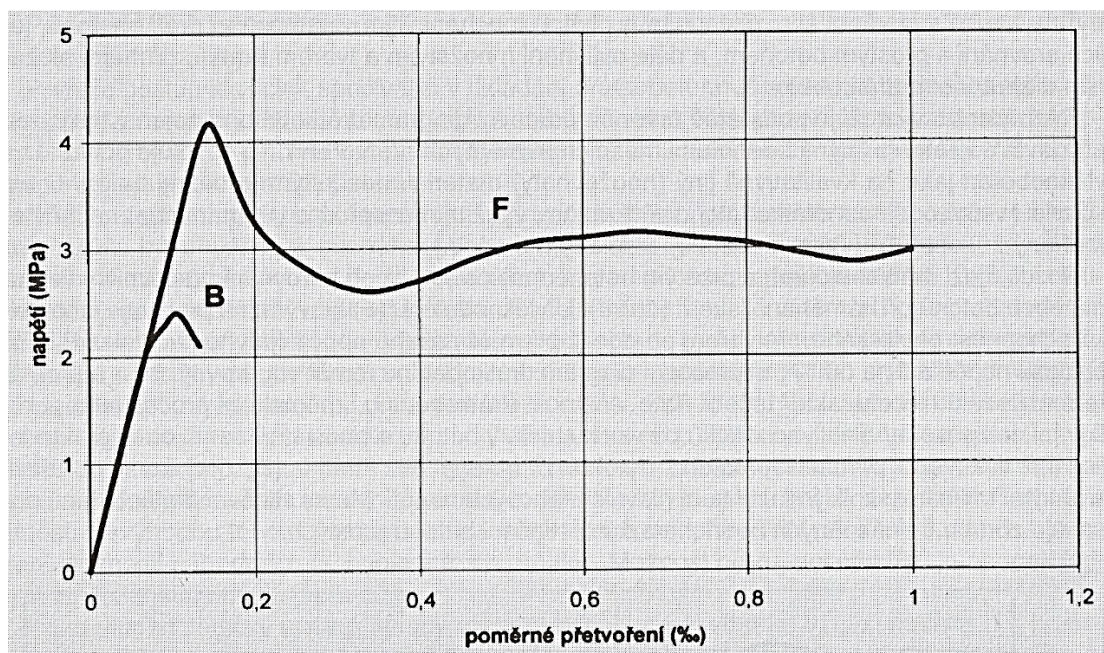
Vláknobeton vyztužený ocelovými vlákny (drátky) nazýváme drátkobeton. Drátky jsou vyráběny z uhlíkové oceli. Pro lepší zakotvení v cementovém kameni jsou drátky ohnuté nebo zploštělé, povrch bývá zdrsňený, zvlněný nebo profilovaný. Délka drátků je 7 až 75 mm.



Obrázek 3: Různé druhy drátků do betonu [23]

Ocelová vlákna oddalují rozvoj mikrotrhlin ve struktuře betonu a tím zvyšují pevnost betonu v tahu (nárůst 50 až 100 %), rovněž umožňují přenášet jistá reziduální tahová napětí. Velikost těchto napětí závisí na množství a tvaru použitých drátků. Na rozdíl od prostého betonu, který se již při malém protažení porušuje křehkým lomem, dosahují drátkobetonu až desetinásobně větších hodnot mezního protažení. Porovnání pracovního diagramu drátkobetonu a prostého betonu je zobrazeno v grafu 1.

Dochází také k nárůstu pevnosti v tlaku (10 až 20 %), zvýšení odolnosti proti smršťování a působení teploty nebo lepší vodotěsnosti, což má pozitivní vliv na trvanlivost [6], [20].



Graf 1: Pracovní diagram drátkobetonu v tahu (F) a obdobného prostého betonu (B) [20]



## 1.4 Specifika chování LWSCC

### 1.4.1 Výhody a nevýhody

**Výhody:** Nízká objemová hmotnost (úspora v množství použitého konstrukčního materiálu, úspora v oblasti zakládání, při manipulaci a přepravě), dobré tepelněizolační vlastnosti a tepelná jímavost (vhodné pro nízkoenergetické a pasivní stavby), nižší koeficient teplotní roztažnosti, vysoká pevnost vzhledem k nízké objemové hmotnosti, možnost použití kameniva vyrobeného z vedlejších průmyslových produktů.

Lehké betony rovněž dosahují vyšší životnosti, a to hlavně kvůli menšímu smršťování, permeabilitě a dobré mrazuvzdornosti.

**Nevýhody:** Křehkost (u hutných konstrukčních betonů s vyšší pevností), vyšší teplota během zrání betonu (vlivem hydratace cementu a vysoké tepelné jímavosti LC), nasákavost lehkého kameniva (komplikace v průběhu míchání a čerpání betonu), vyšší cena lehkého kameniva oproti běžnému kamenivu [1].

### 1.4.2 Technologické odlišnosti LWSCC

#### 1.4.2.1 Vliv povrchu, tvaru a vlastností lehkého kameniva na pevnost betonu

Vlastnosti povrchu a rozdíly v pórovitosti mají vliv na chování lehkého kameniva v betonu, především jeho nasákavost v čerstvém stavu. Například u umělých kameniv z přírodních materiálů (Liapor) jsou patrné rozdíly v hutnosti vnější slupky oproti pórovitému vnitřku. Naproti tomu u popílkových kameniv nejsou ve struktuře zrn kameniva žádné rozdíly. Distribuce zrn a velikost maximálního zrna jsou při výrobě lehkého betonu velmi důležité. Velká zrna mají tendenci snižovat pevnost a způsobovat segregaci vlivem rozdílných objemových hmotností jednotlivých složek.

Lehké kamenivo má obecně nižší pevnost než standardní hutné kamenivo, čímž vytváří limitující faktor při dosahování horní meze pevnosti LC. Pro dosažení vyšší pevnosti LC je možné kombinovat lehké a hutné kamenivo. Experimentálními pracemi bylo zjištěno, že nejvýhodnější je použití přírodního písku s maximálním zrnem 4 mm v kombinaci s lehkým kamenivem o velikosti zrn do 8 mm [1], [4], [24].

#### 1.4.2.2 Vlhkost, sytná a objemová hmotnost zrna

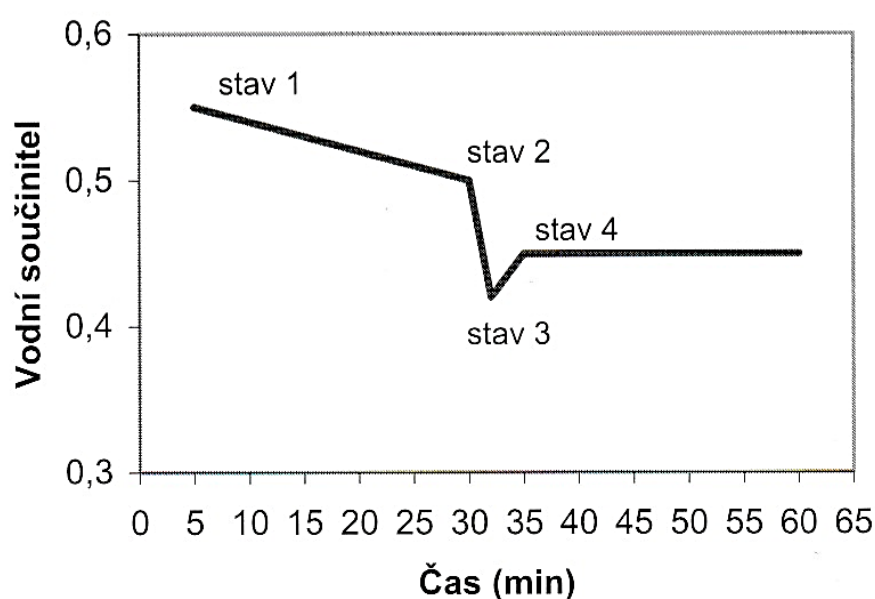
Vzhledem k rozdílným hodnotám sytných a objemových hmotností je nutné při dávkování kameniva tyto hodnoty společně s vlhkostí pravidelně kontrolovat. Lehké kamenivo se doporučuje dávkovat objemově. Rozdíl oproti hutnému kamenivu je i ve značné vnitřní vlhkosti lehkého kameniva, která ovšem nemá vliv na vodní součinitel [1], [4].

### 1.4.2.3 Nasákavost za vysokého tlaku během čerpání

Lehké betony vykazují oproti běžným betonům rozdílné chování i při čerpání. Důvodem je vyšší nasákavost lehkého kameniva pod tlakem. V důsledku toho dochází ke vtažení části vody z cementového tmele do zrn lehkého kameniva. Množství této vody je závislé na druhu použitého kameniva, jeho okamžité vlhkosti a maximálním tlaku v potrubí při čerpání.

Tlak v potrubí je nižší v případě, že je čerstvý beton dostatečně tekutý a současně stabilní a robustní. Toho lze dosáhnout zvýšením podílu jemných částic. Objemový podíl malty se zrny do 0,125 mm by se měl pohybovat v intervalu 375 až 475 l/m<sup>3</sup>, u maltových složek do 2 mm v rozmezí 525 až 625 l/m<sup>3</sup> a u složek do 4 mm pak 600 až 700 l/m<sup>3</sup>.

Při čerpání LC je důležité sledovat konzistenci v několika etapách (ihned po namíchání, na počátku čerpání, během čerpání a po čerpání, tedy v průběhu ukládání). Vývoj vodního součinitele v těchto etapách je znázorněn na obrázku níže. Průkazní zkoušky LC je vhodné provádět tak, aby složení odpovídalo stavu po čerpání [1], [4].



Graf 2: Charakteristický průběh vodního součinitele LC během čerpání [4]

### 1.4.2.4 Ovlivnění nasákavosti lehkého kameniva předvlhčením

Nasákavost lehkého kameniva za atmosférického tlaku i za zvýšeného tlaku při čerpání je možné snížit nebo eliminovat předvlhčením kameniva. Předvlhčení se provádí postříkem na skládce, zkrápěním na páse nebo na začátku míchání přímo v míchačce (voda je dávkována s předstihem před přidáním cementu a dalších přísad). Takto dávkovanou vodu pak můžeme nazývat jako předmáčecí. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, tato voda se nezapočítává do vodního součinitele. Důležité je však stanovit vnitřní vlhkost a nasákavost lehkého kameniva po předmáčení a zohlednit tyto hodnoty při návrhu záměsové vody [1], [4].

### 1.4.3 Trvanlivost LWSCC

Trvanlivost lehkého betonu je stejně jako trvanlivost obyčejného betonu závislá na pórovitosti, vlhkosti ztvrdlého betonu a na okolních podmínkách prostředí. Podrobněji viz kapitola 2. Trvanlivost betonu. Tato kapitola popisuje pouze některé odlišnosti v trvanlivosti vyplývající z použití lehkého kameniva.

- Propustnost (permeabilita)

Lehké betony mají díky absorpci vody lehkým kamenivem v průběhu zrání čerstvého betonu kvalitní kontaktní zónu mezi kamenivem a cementovým tmelem. Kvalitní kontaktní zóna a cementová pasta zajišťují odolnost proti pronikání vody a agresivních látek. Propustnost betonu je určována dlouhodobým obsahem vlhkosti LC a kameniva při styku s vodou [25]. I přes obvykle vyšší nasákavost LC může být jejich vodotěsnost srovnatelná s normálními betony, případně dokonce lepší [26], [27].

Propustnost betonu je často zhoršována v důsledku vzniku trhlin v krycí vrstvě betonu. Trhliny způsobují vyšší nasákavost vodou a vnikání agresivních látek. Vznik trhlin může být způsoben smršťováním. LC mají v porovnání s normálním betonem velmi nízké autogenní smršťování i smršťování vysycháním, což je způsobeno vodou v zrnech lehkého kameniva. Takto obsažená voda plní funkci vodního zdroje během zrání betonu. Díky tomu je zajištěna lepší hydratace cementu a redukce smrštění samovysycháním betonu. Tento proces je označován jako „vnitřní samoošetřování“ betonu [25].

Propustností LC s popílkovým kamenivem o různém stupni nasycení se zabývá práce [28]. Její výsledky ukazují, že LC vyrobený ze suchého i nasyceného kameniva má dostatečnou vodotěsnost, a to i pro prvky vystavené agresivnímu prostředí.

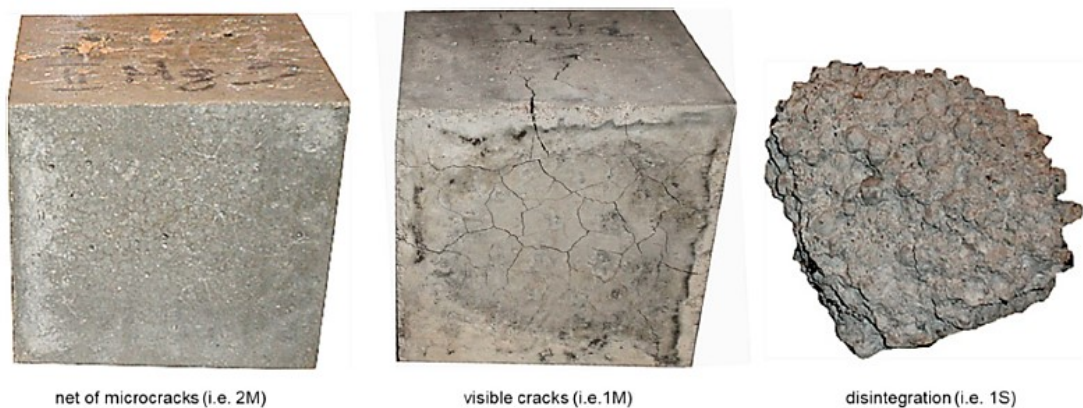
- Mrazuvzdornost

Mrazuvzdornost lehkých betonů je ovlivňována obsahem vody v lehkém kamenivu. Neprovzdušněný LC obsahující suché lehké kamenivo má dobrou mrazuvzdornost. Naproti tomu u LC obsahujícího plně nasycené lehké kamenivo dochází ke zhoršení mrazuvzdornosti. Snížení mrazuvzdornosti nastává v případě, že je stupeň nasycení vyšší než 90 % [25]. Problematika mrazuvzdornosti LC v souvislosti s nasycením lehkého kameniva je zkoumána například v pracích [27], [28], [29], [30].

Práce [27] zkoumala 10 různých druhů lehkého kameniva ve vysušeném i nasyceném stavu. Byly prováděny zkoušky mrazuvzdornosti a odolnosti proti rozmrazovacím solím. Obecně jejich výsledky ukázaly, že s provzdušněním byla většina betonů odolná, i s použitím nasyceného lehkého kameniva.

Práce [28] zkoumala odolnost LC s popílkovým kamenivem. Při výzkumu byl zohledněn vliv počáteční vlhkosti kameniva, zrnitosti kameniva a vodního součinitele. Výsledky provedených zkoušek prokázaly, že LC i bez provzdušňovacích přísad mohou dosahovat vysoké mrazuvzdornosti. Dále bylo zjištěno, že LC s předem nasyceným popílkovým kamenivem bez ohledu na jeho velikost nesplňoval odolnost proti mrazu a rozmrazování. Rozpad betonu vyrobeného z nasyceného kameniva byl způsoben špatnou vazbou mezi kamenivem a cementovou maticí.

Snížení počáteční vlhkosti kameniva a vodního součinitele zlepšilo mrazuvzdornost testovaných betonů. Na těchto vzorcích nebyly pozorovány žádné známky poškození a snížení pevnosti ani po 200 cyklech [28].



*Obrázek 4: Porušení vzorků po cyklech zmrazování [26]*

- Chemická odolnost

Chemická odolnost lehkého kameniva je stejná, případně i lepší než u kameniva přírodního. Zásadní roli hraje kvalita cementové matrice. V případě kvalitní matrice je dosaženo odolnosti proti pronikání síranových iontů a problematika sulfatace je shodná s obyčejnými betony [25].

- Mechanická odolnost

Lehký beton je méně otěruvzdorný než obyčejný beton. V experimentech zabývajících se tímto tématem bylo zjištěno, že opotřebení otěrem je u LC s kamenivem na bázi expandovaných jíílů dvakrát až pětkrát vyšší oproti obyčejnému betonu s přírodním kamenivem. Mechanickou odolnost lehkého betonu je možné zlepšit kombinací lehkého kameniva s drobným přírodním kamenivem (písek). Další variantou je aplikace povrchových úprav [25].

## 1.5 Realizované stavby

Lehké betony nacházejí uplatnění v oblasti pozemních, občanských i dopravních staveb. Lze je používat jako prosté, vyztužené i předpjaté. V oblasti monolitických staveb se používá od rekonstrukcí starších budov až po výstavbu nových výškových budov. Zajímavou realizací je například kampus University of Notre Dame du Lac v USA. V České republice byl postaven první dům z lehkého pohledového betonu v roce 2008. Stavba se nachází v Žebětíně u Brna. Lehký beton se také používá ve sportovních stavbách. Příklady realizace v sousedním Německu jsou Volkswagen arena ve Wolfsburgu, kde byl použit LC 25/28 D 1,6 pro vrchní ochozy a Mercedes Benz Arena ve Stuttgartu (použit LC 35/38 pro schodišťové prvky tribuny). Další aplikací ve světě je například Westpac stadion ve Wellingtonu, při jehož výstavbě bylo využito 4 000 prefabrikovaných dílců z LC 35/38 s kamenivem na bázi expandované břidlice. Důvody použití byly špatné základové poměry a riziková oblast zlomových linií s výskytem zemětřesení. Použitý beton s objemovou hmotností  $1\,850\text{ kg/m}^3$  snížil seismické zatížení a náklady v oblasti zakládání.

V České republice byl lehký beton aplikován při výstavbě stadionu Eden v roce 2008 (od listopadu 2018 Sinobo Stadium) a multifunkční arény v Karlových Varech v roce 2009. V případě stadionu Eden byl pro výrobu prefabrikovaných dílců používán LC 35/38 D 1,8 XF4, XC4 s průměrnou objemovou hmotností ve vysušeném stavu  $1\,730\text{ kg/m}^3$  a modulem pružnosti 25 GPa. Použitím LC došlo ke snížení stálého zatížení, což vedlo ke snížení zatížení sloupů a základů. U arény v Karlových Varech byl použit LC 25/28 D 1,6 XF4, XC4 s objemovou hmotností  $1\,550\text{ kg/m}^3$  a modulem pružnosti 22 GPa [1], [31], [32], [33].



Obrázek 5: Výstavba stadionu Eden v Praze [33]

- **Lehký beton ve výškových stavbách**

Lehký beton nachází uplatnění i při stavbě výškových budov. Důvody použití jsou odlehčení konstrukce v oblasti stropů, podlah a dobrá požární odolnost. Možnými příklady jsou Bank of America Tower (366 metrů vysoká budova v New Yorku) nebo Salesforce (326 metrů vysoká budova v San Franciscu). V obou těchto případech byl beton ukládán čerpáním [31].

- **Lehký beton v dopravních stavbách**

V dopravních stavbách je LC hojně využíván v Severní Americe (přes 200 mostů). První použití bylo zaznamenáno při stavbě dálničního mostu již v roce 1922. V Evropě je nejčastější použití v severských zemích (Grenland Bridge, New Eidsvoll Bridge a Nordhordland Bridge v Norsku). U železničních staveb je významná aplikace na mostě Saale-Elster Viaduct na vysokorychlostní trati mezi Berlínem a Mnichovem v Německu.

V České republice lze jako příklad uvést most na rychlostní silnici R6 Sokolov-Tisová. V místě stavby byly složité geologické poměry (hladina podzemní vody v hloubce 0,2 m pod terénem). Přípustné zatížení pilot bylo výrazně menší než hodnoty stanovené výpočtem. S cílem snížit část stálého zatížení mostu bylo přistoupeno k realizaci konstrukce z lehkého betonu. V příčném směru se jedná o dvoutrámový monolitický most z dodatečně předpjatého betonu LC 35/38 D 2,0 XF2 s kamenivem Liapor. Objemová hmotnost betonu je  $1\,950\text{ kg/m}^3$  a modul pružnosti činí 24 GPa [1], [31], [34], [35].



*Obrázek 6: Plnostěnný trámový most na silnici R6 Sokolov-Tisová [33]*

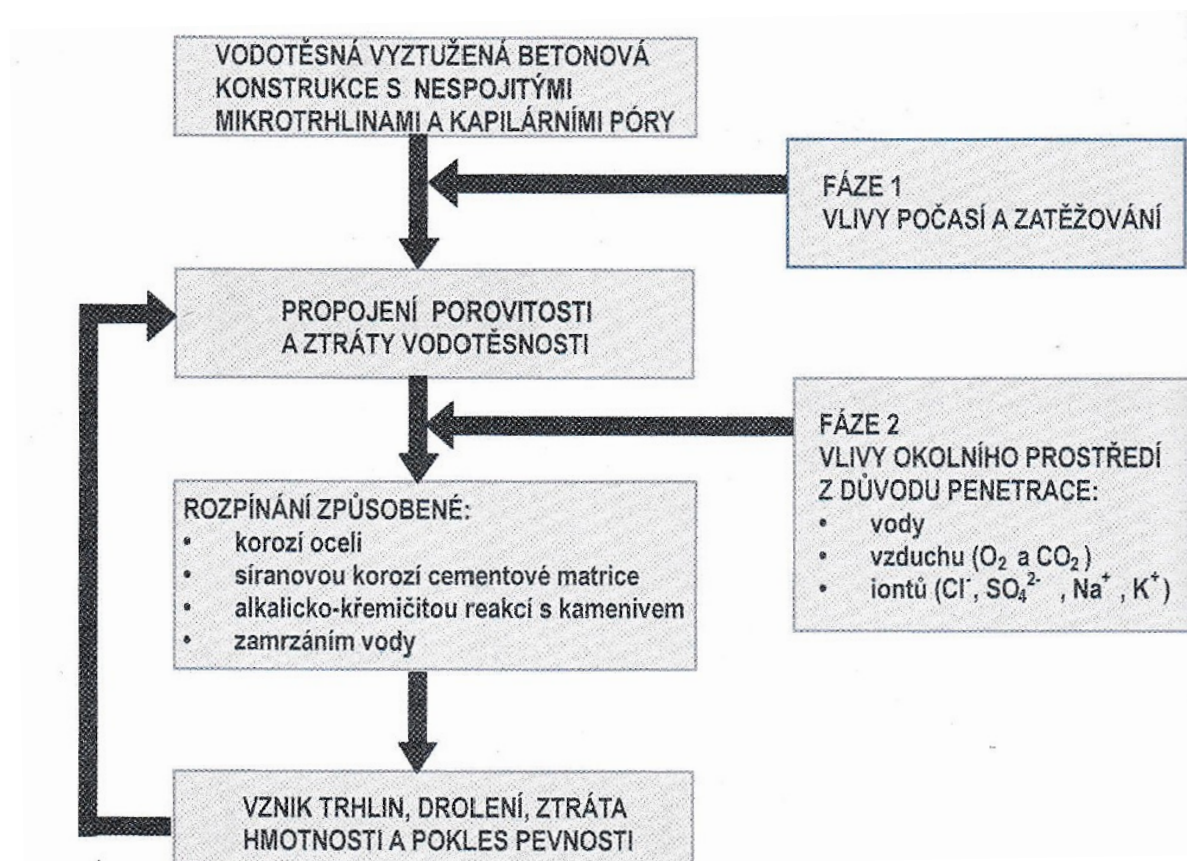


## 2. Trvanlivost betonu

Beton správně navržený do daného prostředí je velmi trvanlivý materiál. Trvanlivost betonu je dlouhodobá schopnost odolávat korozivním procesům:

- chemických vlivů (roztoky kyselin a solí, organické sloučeniny, tuhé škodlivé látky, plyny, znečištění ovzduší),
- fyzikálních vlivů (teploty pod bodem mrazu, vysoké teploty, mechanický otěr a jiné),
- biologického působení organismů (plísňe, mikroorganismy) [6].

K problému dochází v okamžiku spojení kapilárních pórů a mikrotrhlin a vytvoření spojitě pórovitosti. Na růst mikrotrhlin mají vliv ohřívání případně ochlazování betonu, rovněž jeho vysychání a nasakování, účinky působících zatížení (překročení pevnosti betonu). Vlivem těchto procesů dochází k postupné ztrátě vodotěsnosti a následně účinkem penetrace agresivních činidel (voda, vzduch a nebezpečné ionty) k šíření porušení (praskání, odprýskávání betonu), což vede ke snížení pevnosti a ztrátě hmotnosti betonu. Trhlinky velikosti menší než 100  $\mu\text{m}$  nesnižují únosnost konstrukce a při velikostech do 50  $\mu\text{m}$  nezhoršují ani vodotěsnost, nicméně vždy snižují trvanlivost betonu [14], [16].



Obrázek 7: Holistický model degradace betonu [14]

Aby došlo k porušení konstrukce je potřeba výskyt následujících tří činitelů:

**a) spojitá pórovitost**

Je způsobena mikrotrhlinami, kapilární pórovitostí cementové matrice (vysoký vodní součinitel, špatné ošetřování) a špatným zhutněním (vznikají kaverny).

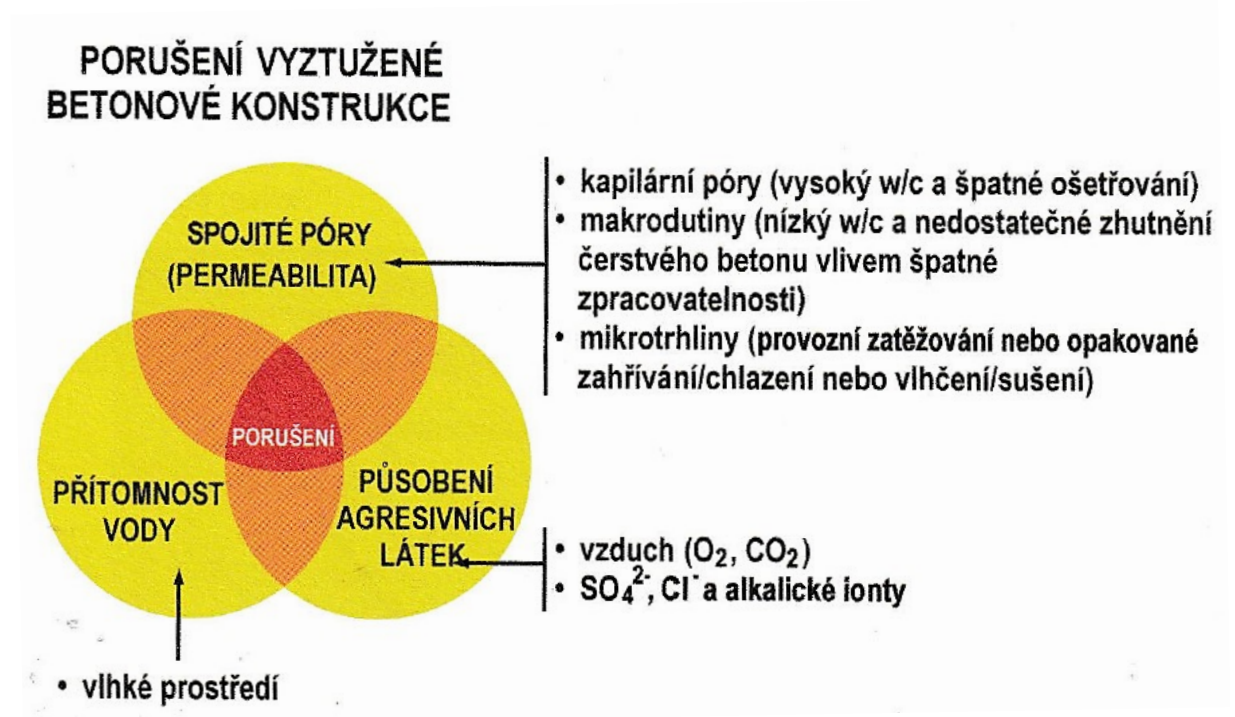
**b) působení agresivních činidel**

- působení síranů,
- koroze výztuže působením  $\text{Cl}^-$  nebo  $\text{CO}_2$ ,
- alkalickokřemičitá reakce (ASR) mezi zrny kameniva a cementovým tmelem.

**c) přítomnost vody**

Voda působí jako agresivní činidlo (zmrazování a rozmrazování), nebo společně s dalšími agresivními látkami ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , alkálie), a také jako rozpouštědlo (umožňuje přenos difundujících iontů spojitými póry cementové matrice).

V případě působení pouze jednoho z výše uvedených činitelů je porušení konstrukce nepravděpodobné. Naopak v situaci, kdy působí veškeré činitele (viz. obrázek 8), je velmi pravděpodobné, že k porušení konstrukce dojde [14].



Obrázek 8: Ternární znázornění poškození vyztužených betonových konstrukcí [14]



## 2.1 Stupně vlivů prostředí

Norma ČSN EN 206+A1 rozděluje jednotlivá prostředí ve kterých se může betonová konstrukce nacházet do kategorií, nazývajících se stupně vlivů prostředí. Stupeň vlivu prostředí je jednou z nejdůležitějších částí specifikace betonu. Podle toho, zda se jedná o nebezpečí koroze výztuže nebo betonu se dělí následovně:

- beton bez nebezpečí koroze nebo narušení (X0),
- nebezpečí koroze výztuže (XC, XD, XS),
- nebezpečí koroze betonu (XA, XM, XF) [36].

V normách ČSN EN 206+A1 a ČSN P 73 2404 jsou uvedeny požadavky na mezní hodnoty pro složení (maximální vodní součinitel, minimální pevnostní třída betonu a minimální obsah cementu) a vlastnosti betonu (minimální obsah vzduchu v ČB, maximální průsak vody a jiné) v jednotlivých prostředích. Norma ČSN P 73 2404 ještě navíc uvádí odlišné požadavky na beton s předpokládanou životností 50 let (tabulka F.1.1) a 100 let (tabulka F.1.2). V následujících kapitolách jsou uvedeny mezní hodnoty dle tabulky F.1.2 (betonové konstrukce s návrhovou životností 100 let) [37].

### 2.1.1 Bez nebezpečí koroze nebo narušení (X0)

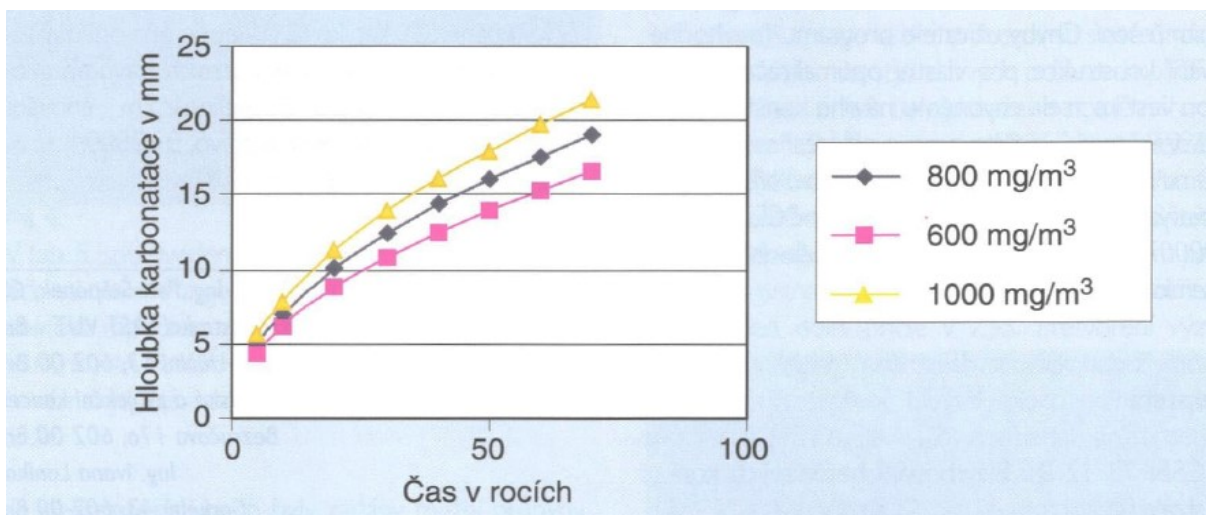
Stupeň vlivu prostředí X0 zahrnuje nevyztužené konstrukce ve vnitřním prostředí, vystavené všem vlivům prostředí kromě zmrazování a rozmrazování, obrusu nebo chemicky agresivního prostředí [15].

*Tabulka 2: Stupeň vlivu prostředí X0, upraveno z [15]*

Označení stupně	Popis prostředí	Příklad výskytu	Max. vodní součinitel	Min. pevnostní třída	Min. obsah cementu (kg/m <sup>3</sup> )
X0	Beton bez výztuže nebo zabudovaných kovových vložek.	Beton uvnitř budov s velmi nízkou vlhkostí vzduchu.	-	C 12/15	-

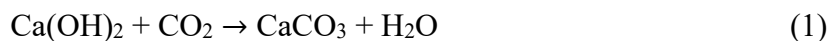
## 2.1.2 Koroze vlivem karbonatace (XC)

Železobetonové konstrukce jsou nejčastěji ohrožovány působením oxidu uhličitého, který je koncentrován v atmosféře ve stabilních hodnotách kolem 60 mg na 1 m<sup>3</sup>. Vyšší výskyt CO<sub>2</sub> je možné zaznamenat v průmyslových oblastech, zemědělství, spalínách a také těsně nad terénem (vliv koncentrace CO<sub>2</sub> na rychlost karbonatace je ukázán v grafu 3) [38].



Graf 3: Hloubka karbonatace v závislosti na čase [38]

Ke karbonataci dochází kontaktem oxidu uhličitého a cementové pasty.



Oxid uhličitý napadá v betonu Ca(OH)<sub>2</sub> obsažený ve vodě umístěné v pórech. Vznikající uhličitany snižují jeho koncentraci v roztoku a umožňují jeho další rozpouštění a opakování celé chemické reakce. Následkem toho dochází k poklesu hodnoty pH z původních hodnot (11 až 12,4) na hodnotu 9. Snížení hodnoty pH má negativní dopad na korozi výztuže. V zásaditém prostředí s pH nad 11,5 je ocelová výztuž chráněna před korozi ochrannou vrstvou FeOOH (speciální oxidy železa), díky které nemůže kyslík a voda přicházet do kontaktu s ocelovou výztuží. Při poklesu pH pod 9 se ochranné vrstvy stávají pórovitými a málo stálými. Další snižování hodnoty pH vede k jejich rozpouštění. Tento proces je známý pod pojmem depasivace. Společně s působením vlhkosti a kyslíku dochází následně ke korozi. Produkty koroze mají až 6krát vyšší objem než železo, čímž dochází ke vzniku napětí a praskání krycí vrstvy a tím k přímému kontaktu výztuže se vzduchem, což výslednou korozi ještě zhoršuje. Rychlost karbonatace je možné vyjádřit rovnicí:

$$x = K \sqrt{t} \quad (2)$$

Kde x je tloušťka betonu, ve kterém dochází k pronikání CO<sub>2</sub>, t je doba vystavení betonu působení vzduchu a K je koeficient karbonatace závislý na relativní vlhkosti vzduchu, vodním součiniteli, typu cementu a době ošetřování.

Pro stanovení míry karbonatace betonu se používá fenolftaleinový test. Princip spočívá v nanesení fenolftaleinového roztoku na beton a následné změně barvy v závislosti na pH betonu. Červená barva nám ukazuje, kde beton není zkarbonatovaný, naopak v místech, kde nedojde ke zbarvení beton zkarbonatoval. Z výsledku testu je pak patrné, jestli je ocelové výztuži poskytnuta dostatečná ochrana nebo ne [4], [14], [39].

### 2.1.2.1 Požadavky na složení a vlastnosti betonu v prostředí XC

Prostředí XC tedy zahrnuje železobetonové a předpjaté konstrukce. Nejagresivnější prostředí spadá do stupně XC4, ve kterém je konstrukce vystavena suchému prostředí (difuze O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub>) střídavě s vlhkým prostředím (nasakování vody). Stupeň XC3 zahrnuje konstrukce uvnitř budov se střední a velkou vlhkostí vzduchu nebo venkovní beton chráněný proti dešti. Pro stupně XC3 a XC4 je podle ČSN P 73 2404 dovolena maximální hloubka průsaku tlakovou vodou **50 mm**, zkoušená podle ČSN EN 12390-8 [40].

Nejméně agresivní prostředí je XC1, které zahrnuje konstrukce v suchém nebo stále mokřém prostředí [15], [37].

*Tabulka 3: Stupeň vlivu prostředí XC, upraveno z [15], [37]*

Označení stupně	Popis prostředí	Příklad výskytu	Max. vodní součinitel	Min. pevnostní třída	Min. obsah cementu (kg/m <sup>3</sup> )
XC1	Suché nebo stále mokřé.	Beton uvnitř budov s nízkou vlhkostí vzduchu. Beton trvale ponořený ve vodě.	0,65	C 20/25	260
XC2	Mokřé, občas suché.	Povrch betonu vystavený dlouhodobému působení vody, většina základů.	0,60	C 25/30	280
XC3	Středně mokřé, vlhké.	Beton uvnitř budov se střední nebo velkou vlhkostí vzduchu, venkovní beton chráněný proti dešti.	0,55	C 25/30	280
XC4	Střídavě mokřé a suché.	Povrchy betonu ve styku s vodou, které nejsou zahrnuty ve stupni XC2.	0,50	C 30/37	300

### 2.1.3 Koroze vlivem chloridů (XD a XS)

Stejně jako působením CO<sub>2</sub>, tak i vlivem chloridových iontů (Cl<sup>-</sup>) dochází k depasivaci ocelové výztuže. Aby došlo ke korozi je rovněž zapotřebí přítomnost vody a kyslíku, které převádějí ocel do formy rzi. Vyztužená konstrukce trvale ponořená v mořské vodě proto nemůže korodovat, kvůli nedostatku kyslíku a konstrukce v suchém prostředí zase postrádá přítomnost vody. Naproti tomu například v případě přílivu a odlivu dochází ke koroznímu procesu, neboť kyslík působí v suchém období a voda při ponoření konstrukce.

Rozdíl oproti korozi vyvolané působením CO<sub>2</sub> spočívá hlavně v hloubce zkorodované vrstvy, která je v případě Cl<sup>-</sup> výrazně nepravidelná a dochází k hlubokému defektu (bodové korozi). K pronikání chloridů skrz krycí vrstvu může dojít dvěma odlišnými způsoby:

- Absorpci vody kapilární elevací (absorpci způsobí kontakt vody se suchým nenasáklým betonem, vlivem kapilárního tlaku  $P_c$  dochází k vytlačení vody do prázdných kapilárních pórů).

$$P_c = \cos \theta (2\gamma/r) \quad (3)$$

kde:

$r$  je poloměr kapilárního póru.

$\theta$  je úhel smáčení.

$\gamma$  je povrchové napětí vody.

- Difuzí chloridů betonem (chloridy se pohybují kolmo k povrchu betonu pod tlakem koncentračního spádu). V případě ustáleného toku zde platí Fickův zákon, který nám říká, že tok iontů je úměrný gradientu koncentrace: [14].

$$J = -D_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (4)$$

kde:

$J$  je tok (množství Cl<sup>-</sup>, difundujících určitou plochou v daném čase),

$D_x$  je difuzní koeficient,

$C$  představuje koncentraci chloridových iontů [14], [41].

### 2.1.3.1 Požadavky na složení a vlastnosti betonu v prostředích XD a XS

Prostředí XD rozlišujeme ve třech skupinách vlhkostí a týkají se prostředí s výskytem chloridů, které však nepocházejí z mořské vody. Jedná se například o chloridy z rozmrazovacích solí bez přítomnosti střídavého zmrazování a rozmrazování. Stupeň XD1 zahrnuje prostředí střední vlhkosti. Sucho nebo nízkou vlhkost zahrnuje XD2. Pro XD1 a XD2 je stanovena maximální hloubka průsaku tlakovou vodou na **50 mm**. XD3 je pak pro prostředí s cyklickým střídáním sucha a vlhka, kde je vyžadováno maximálně **20 mm**.

Stupně XS jsou rovněž rozděleny do tří skupin, a to podle vzdálenosti dané konstrukce od mořské vody. Stupeň XS1 je prostředí poblíž mořské vody vystavené solím, které se přenáší větrem. XS2 jsou konstrukce trvale ponořené v moři a XS3 zahrnuje přílivové oblasti ve kterých kyslík ještě více umocňuje korozi [15], [37].

Tabulka 4: Stupeň vlivu prostředí XD a XS, upraveno z [15], [37]

Označení stupně	Popis prostředí	Příklad výskytu	Max. vodní součinitel	Min. pevnostní třída	Min. obsah cementu (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Koroze vlivem chloridů, ne však z mořské vody</b>					
XD1	Středně mokré, vlhké.	Povrchy betonů vystavené chloridům rozptýleným ve vzduchu.	0,55	C 25/30	300
XD2	Mokré, občas suché.	Plavecké bazény. Beton vystavený působení průmyslových vod obsahujících chloridy.	0,50	C 25/30	300
XD3	Střídavě mokré a suché.	Části mostů vystavené postřikům obsahujícím chloridy. Vozovky, betonové povrchy parkovišť.	0,45	C 30/37	320
<b>Koroze vlivem chloridů z mořské vody</b>					
XS1	Vystaven slanému vzduchu, ale ne přímý styk s mořskou vodou.	Stavby blízko mořského pobřeží nebo na pobřeží.	0,50	C 30/37	300
XS2	Trvale ponořené ve vodě.	Části staveb v moři.	0,45	C 35/45	320
XS3	Smáčený a ostřikovaný přílivem	Části staveb v moři.	0,45	C 35/45	340

## 2.1.4 Působení mrazu a rozmrazování (XF)

Stupeň prostředí XF se vyskytuje u konstrukcí, které jsou vystaveny účinku mrazu a rozmrazovacích solí, působících samostatně či ve vzájemné kombinaci. Typickými konstrukcemi vystavenými prostředí XF jsou dopravní a vodohospodářské stavby. Beton pak může být porušen dvojím způsobem: porušením vnitřní struktury nebo narušením povrchu.

### 2.1.4.1 Porušení vnitřní struktury

V případě, že na beton nepůsobí chemikálie dochází k postupnému porušení jeho vnitřní struktury. Podle některých teorií je porušení vnitřní struktury způsobeno přechodem vody v led a nárůstem jeho objemu přibližně o 9 %.

System pórů, nacházejících se ve struktuře betonu, je však mnohem složitější. Kromě kapilárních pórů se zde nachází ještě gelové a vzduchové póry. Gelové póry jsou velikosti od 1 nm do 10 nm. Nebezpečné jsou kapilární póry o velikosti 0,1 až 10  $\mu\text{m}$ . Experimentálně pak bylo prokázáno, že v některých pórech nevznikne led ani při velmi nízkých teplotách (až - 40 °C). Lze tedy předpokládat, že poškození je způsobeno hydraulickým tlakem vody tlačené do kapilár postupně vznikajícím ledem (při teplotě - 12 °C zamrzá veškerá kapilární voda). K porušení pak dochází při překročení tahové pevnosti cementové matrice. Poškození vnitřní struktury se projeví vznikem mikrotrhlin, jejichž rozvoj vede ke změnám mechanických vlastností. Odolnost proti tomuto porušení je nazývána mrazuvzdornost (schopnost betonu odolávat v nasyceném stavu opakujícímu se zmrazování a rozmrazování) [4], [42], [43].

Mrazuvzdornosti lze dosáhnout prostřednictvím následujících technologických opatření:

#### a) snížením objemu kapilárních pórů

Pro snížení kapilárních pórů v cementové pastě snižujeme vodní součinitel, čímž dosahujeme nižší nasákavosti a poklesu volné vody.

#### b) provzdušněním betonu

Provzdušněním vnášíme do betonu vzduchové bubliny o velikostech 100 až 300  $\mu\text{m}$ , které jsou umístěné v blízkosti kapilárních pórů (do 300  $\mu\text{m}$ ). Voda je pak při vzniku ledových krystalků vtlačována do těchto bublin, tím pádem nedochází k nárůstu hydrostatického tlaku a tvorbě nebezpečných napětí v cementové pastě. V průběhu tání se voda vrací vlivem kapilárního sání zpět do kapilárních pórů a následně se celý proces opakuje v průběhu dalšího zmrazování.

#### c) použitím hutného mrazuvzdorného kameniva

Vzhledem k tomu, že provzdušněním chráníme před účinky mrazu pouze cementovou matrici, je nutné pro výrobu betonu použít mrazuvzdorné kamenivo. K porušení kameniva dochází přítomností vody v pórech, nebezpečné jsou póry o velikostech několik  $\mu\text{m}$  [14].

#### **2.1.4.1.1 Stanovení mrazuvzdornosti**

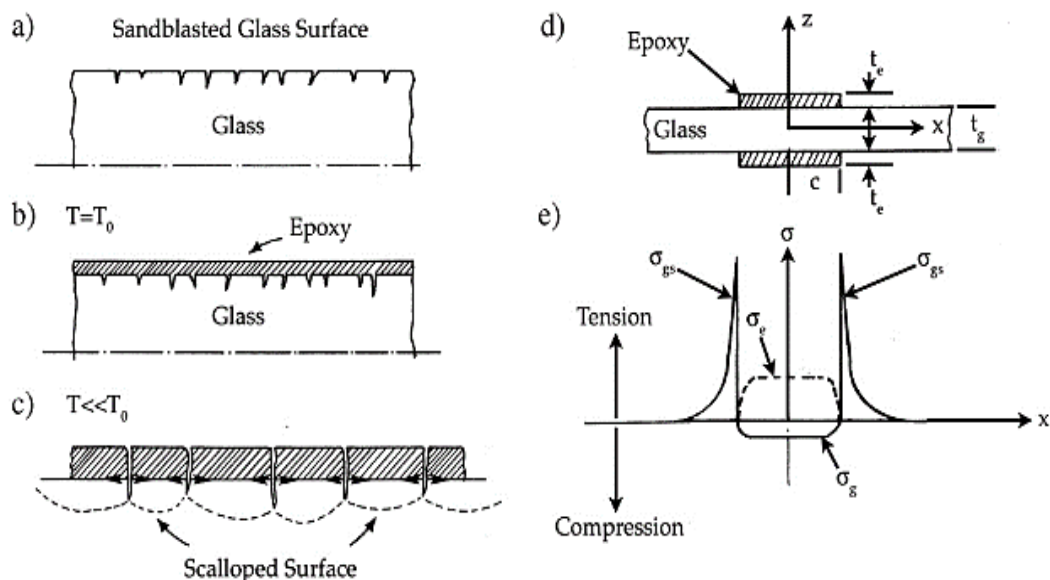
Mrazuvzdornost betonu se určuje zkouškou střídavého zmrazování a rozmrazování vodou nasycených trámů podle ČSN 73 1322 [44]. Zkušebními tělesy jsou nevyztužené trámy o rozměrech  $100 \times 100 \times 400$  mm, které jsou nejprve uloženy 25 dní ve vlhkém prostředí a 3 dny ve vodě (případně 57 dní ve vlhkém prostředí a 3 dny ve vodě bude-li konstrukce vystavena střídavému účinku mrazu ve stáří větším než 90 dní). Následně jsou tělesa v cyklech zmrazována při teplotě  $-15$  až  $-20$  °C a rozmrazována ve vodě  $+20$  °C. Jeden zmrazovací cyklus se skládá ze 4 hodin zmrazování a 2 hodin rozmrazování.

Po provedení daného množství cyklů se provede zkouška pevnosti v tahu ohybem dle ČSN EN 12390-5 [45]. Součinitel mrazuvzdornosti je dán jako poměr aritmetického průměru pevnosti v tahu za ohybu zmrazovaných těles k pevnosti referenčních těles. Beton je vyhodnocen jako mrazuvzdorný, pokud je součinitel mrazuvzdornosti větší než 75 % [44].

### 2.1.4.2 Povrchové poškození

Horizontální konstrukce (mostní desky, vozovky, venkovní podlahy) jsou zatěžovány střídavým zmrazováním a rozmrazováním v kombinaci s působením CHRL. Výsledkem je povrchové poškození betonu vznikající v povrchové vrstvě. Stupeň poškození se vyjadřuje hmotností odloučeného betonu (odpadem). Existuje řada hypotéz o tom, jak odpad vzniká.

Jako nejpřesnější se jeví mechanismus *glue spall*. Jedná se o mechanismus používaný při zdobení skla. Na pískovaném povrchu skla je při vysoké teplotě rozprostřena vrstva epoxidu. Při snižování teploty má epoxid tendenci se smršťovat více než sklo, a to vyvolá vznik napětí. Epoxid se rozpadne na mnoho malých částic. Podél jejich obvodu se vytvoří tahové napětí (jako na obrázku níže), které vyvolá poškození povrchu skla a odlupování částic. V případě betonové konstrukce hraje led na povrchu podobou roli jako epoxid [46].



Obrázek 9: Schematické znázornění mechanismu *glue spall* [46]

Chování prasklin můžeme předvídat pomocí lomové mechaniky. Analýzy ukazují, že trhliny vznikají kolmo k povrchu a v určité hloubce (v závislosti na mechanických vlastnostech) se otáčí rovnoběžně k povrchu. V případě, že jsou vlastnosti betonu na povrchu stejné, každý zmrazovací cyklus způsobuje relativně konstantní poškození.

Bylo prokázáno, že k největšímu poškození dochází při 3 % koncentraci roztoku, bez ohledu na to, jaká rozmrazovací látka byla použita. K poškození naopak nedochází, pokud roztok nepůsobí na povrchu betonu a při udržení minimální teploty nad hranicí  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Odolnost proti působení CHRL se dá zlepšit provzdušněním betonu. Provzdušnění snižuje krvácení betonu a podporuje vznik pevnějšího a odolnějšího povrchu. Souvislost mezi mrazovým namáháním a účinkem CHRL není možné definovat [46].



#### 2.1.4.2.1 Stanovení odolnosti vůči CHRL

Odolnost betonu proti CHRL se stanovuje podle ČSN 73 1326 vydané v roce 1984. Tato norma rozlišuje metodu automatického cyklování (metoda A) a metodu ruční manipulace (metoda B). V roce 2003 byla vydána změna Z1, která doplnila metodu automatického cyklování II (metoda C). V současné době se v České republice používají metody A a C.

##### a) Metoda A – Metoda automatického cyklování I

Při metodě A jsou zkušební tělesa (většinou krychle o hraně 150 mm) umístěna v miskách, do kterých se nalije 3 % roztok chloridu sodného (NaCl) v takovém množství, aby bylo zkušební těleso ponořeno v hloubce  $5 \pm 1$  mm. Misky se umístí do zkušebního přístroje, pod jehož dnem je umístěno chladicí a ohřívací zařízení. Vzorky se následně podrobují střídavému zmrazování a rozmrazování. Cyklus se skládá ze zchlazení vzorku na teplotu  $-15$  °C, který se na této teplotě udržuje po dobu 15 minut. Následuje ohřev na teplotu  $20$  °C a rovněž udržení této teploty po dobu 15 minut. Tím končí první cyklus a počínají další. Po každém 25. cyklu se zkoušení přeruší a vzorky se vyjmou ze zkušebního prostoru. Částice uvolněné ze zkušební plochy se proudem vody splaví a vysuší při teplotě  $105$  °C. Následně se zjistí jejich hmotnost s přesností na 0,1 g. [47].

##### b) Metoda B – Metoda ruční manipulace

Při metodě B se tělesa zmrazovala v prvním cyklu po dobu 16 h při teplotě  $(-8 \pm 1)$  °C. Poté se na vytvořený led nasypalo nebo nalilo potřebné množství rozmrazovací látky. Rozmrazování trvalo 1 h. Poté se tělesa omývala vodou o teplotě  $20$  °C po dobu 0,5 h. Druhý a každý další cyklus se skládal z 5 hodin zmrazování, 1 h rozmrazování a 0,5 h omývání [47].

##### c) Metoda C – Metoda automatického cyklování II

Při metodě C jsou zkušebními tělesy 50 mm tlusté odřezy z válce o průměru 150 mm. Zkušební tělesa se opatřují vodotěsnou objímkou (vyřiznutý pruh z automobilové vzdušnice pneumatiky). Na povrch tělesa se do výšky 5 mm nalije 3 % roztok NaCl. Zkušební tělesa jsou poté zatěžována zmrazovacími cykly. Jeden cyklus trvá 6 hodin a skládá se ze 3 hodin při teplotě  $(-18 \pm 1)$  °C a 3 hodin při teplotě  $(+5 \pm 1)$  °C. Po každém 25. cyklu se stanovuje hmotnost uvolněných částic. Uvolněné částice z povrchu jsou splaveny pomocí stříčky do misky, povrch se okartáčuje a omyje. Miska se vloží do sušárny, ve které je teplota nastavena na  $105 \pm 5$  °C, po vysušení se zjistí hmotnost částic s přesností na 0,1 g. Omyté zkušební těleso se uloží na 24 hodin v prostředí s teplotou vzduchu  $(20 \pm 2)$  °C a celý proces se opakuje. Odolnost betonu vůči CHRL je dána hmotností odpadu na jednotku plochy. Zkouška se ukončí po dosažení předepsaného počtu cyklů nebo po dosažení maximální povolené velikosti odpadu [48].

### 2.1.4.3 Požadavky na složení a vlastnosti betonu v prostředí XF

Prostředí XF je rozděleno do stupňů XF1 až XF4. Do stupňů XF1 a XF3 spadají konstrukce vystavené působení mrazu a rozmrazování za přítomnosti vody, avšak bez působení rozmrazovacích prostředků. Ve stupních XF1 a XF3 je normou ČSN P 73 2404 předepsaný stupeň mrazuvzdornosti. U **XF1** musí být stupeň mrazuvzdornosti minimálně **T100** a u **XF3** je předepsáno minimálně **T150** podle ČSN 73 1322 (tab. F.1.2) [44].

Stupně XF2 a XF4 pak zahrnují konstrukce, kde navíc působí ještě rozmrazovací prostředky. Pro tyto stupně je podle ČSN P 73 2404 požadována odolnost vůči zmrazování a rozmrazování zkoušená podle ČSN 73 1326 [47], [48]. Při použití metody A je požadováno provést 100 cyklů a při použití metody C je požadováno 75 cyklů. Pro **XF2** je maximální dovolená hodnota odpadu **1 250 g/m<sup>2</sup>** a pro stupeň **XF4** maximálně **1 000 g/m<sup>2</sup>** [37]. Jednotlivé metody jsou podrobněji popsány v předchozí kapitole.

Kromě toho ČSN P 73 2404 předepisuje další požadované parametry. Všechny požadavky na vlastnosti betonu v prostředí XF jsou přehledně shrnuty v tabulce 5.

Tabulka 5: Požadavky na vlastnosti betonu v prostředí XF, upraveno z [37]

Označení stupně		XF1	XF2	XF3	XF4
Minimální obsah vzduchu v ČB při zkoušce podle ČSN EN 12350-7 pro beton se zrnitostí do (%)	8 mm	–	4,5	5,0	5,5
	16 mm	–	3,5	4,0	4,5
	22-32 mm	–	3,0	3,5	4,0
Minimální obsah mikropórů $A_{300}$ ve ztvrdlém betonu při zkoušce podle ČSN EN 480-11 (mm)		–	1,0	1,0	1,8
Maximální součinitel rozložení vzduchových pórů (L) při zkoušce podle ČSN EN 480-11 (mm)		–	0,24	0,24	0,2
Maximální průsak vody při zkoušce podle ČSN EN 12390-8		50	35	20	20
Odolnost betonu vůči zmrazování a rozmrazování, při zkoušce podle ČSN 73 1326 – metoda/počet cyklů/odpad (g/m <sup>2</sup> )		–	A/100/1250 C/75/1250	–	A/100/1000 C/75/1000
Stupeň mrazuvzdornosti (ČSN 73 1322)		T100	–	T150	–

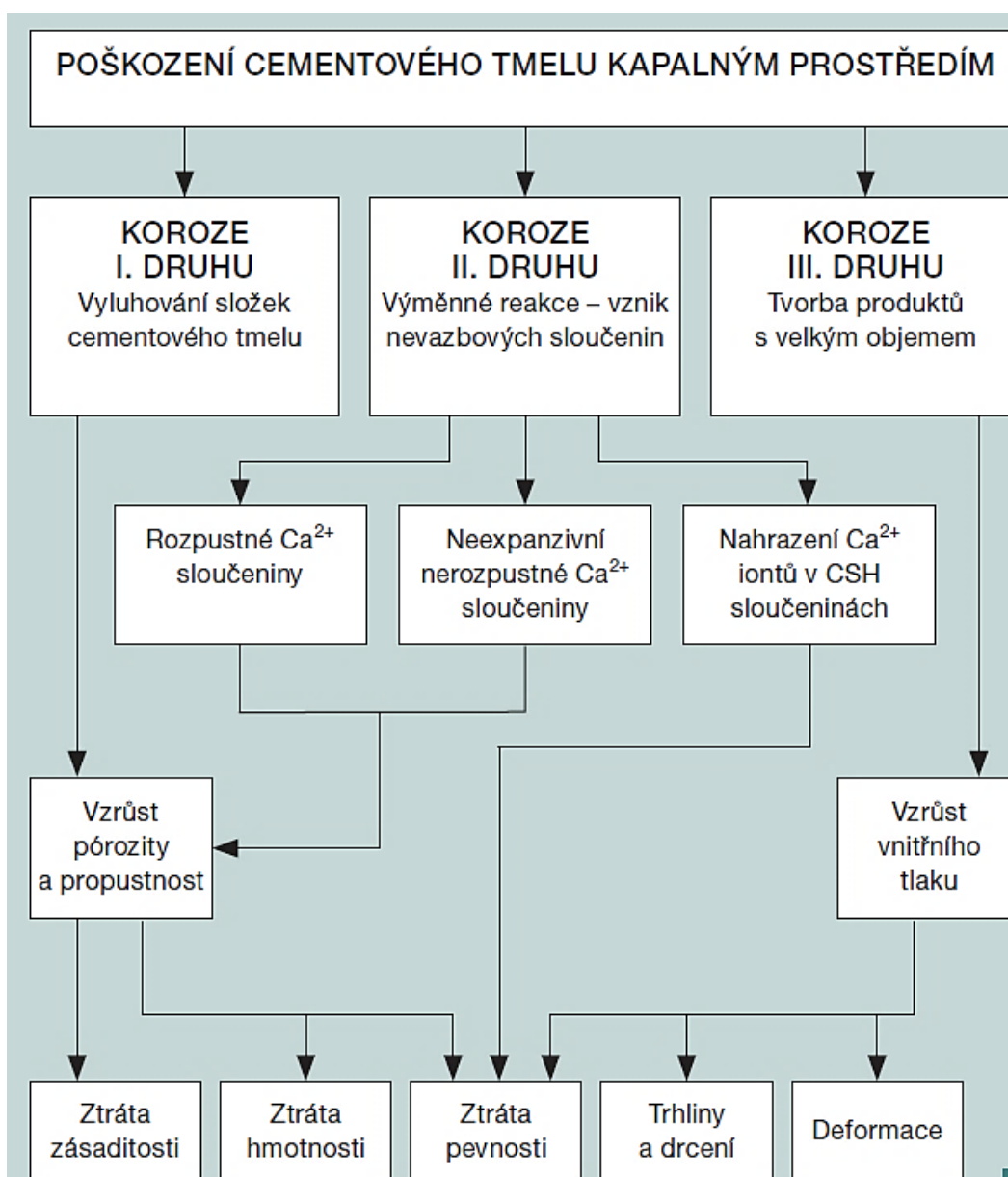
Tabulka 6: Stupeň vlivu prostředí XF, upraveno z [15], [37]

Označení stupně	Popis prostředí	Příklad výskytu	Max. vodní součinitel	Min. pevnostní třída	Min. obsah cementu (kg/m <sup>3</sup> )
XF1	Mírně nasycen vodou bez rozmrazovacích prostředků.	Svislé betonové povrchy vystavené dešti a mrazu.	0,55	C 25/30	300
XF2	Mírně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky.	Svislé betonové povrchy silničních konstrukcí vystavené mrazu a rozmrazovacím prostředkům rozptýleným ve vzduchu.	0,50	C 25/30	300
XF3	Značně nasycen vodou bez rozmrazovacích prostředků.	Vodorovné betonové povrchy vystavené dešti a mrazu.	0,50	C 25/30	320
XF4	Značně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky nebo mořskou vodou.	Vozovky a mosty vystavené rozmrazovacím prostředkům. Betonové povrchy vystavené přímému ostříku rozmrazovacími prostředky a mrazu. Omývaná část staveb v moři vystavená mrazu.	0,45	C 30/37	340

## 2.1.5 Chemické působení (XA)

Chemická koroze vzniká při působení agresivních látek v kapalném prostředí a představuje pro beton nejnebezpečnější druh koroze. Voda vnáší na povrch betonu a do pórové struktury agresivní látky, které reagují se složkami cementového tmelu, což vede ke ztrátě zásaditosti, poškození betonu, případně až k jeho rozpadu. Poškození betonu závisí na podmínkách prostředí (množství vody, pohyb podzemní vody, změny teploty a vlhkosti) a kvalitě betonu (přítomnost trhlin a jeho pórové struktury).

Agresivní vody způsobují tři různé druhy koroze, které se vzájemně liší povahou vzniklých produktů a případně i odlišnou mírou poškození betonu [49].



Obrázek 10: Schéma poškození betonu kapalným agresivním prostředím [49]

### 2.1.5.1 Chemická koroze I. typu

Korozi I. typu označujeme jako korozi vyluhováním. Dochází k vyluhování a rozpouštění hydroxidu vápenatého  $\text{Ca(OH)}_2$  vzniklého hydratací cementu. Díky tomu se snižuje koncentrace hydroxidových iontů  $\text{OH}^-$ , tedy hodnota pH pórového roztoku. Rychlost vyluhování je úměrná rychlosti filtrace, která závisí na množství a velikosti kapilárních pórů a na hydrostatickém tlaku vody.

Korozi vyluhováním způsobují vody s nízkou přechodovou tvrdostí. Jedná se o vody říční, rybníční a srážkové. Nejvíce jsou korozi vyluhováním ohroženy vodní stavby a betonové části střešních konstrukcí [6], [50].

### 2.1.5.2 Chemická koroze II. typu

Korozi II. typu způsobují výměnné reakce mezi složkami cementového tmelu (především  $\text{Ca(OH)}_2$ ) a agresivními látkami, které na beton působí. Agresivními látkami jsou většinou odpadní vody vzniklé při průmyslové výrobě, obsahující agresivní  $\text{CO}_2$ , hydroxidy, kyseliny, amonné a hořečnaté soli (mimo síranů). Výsledkem jsou pak rozpustné, nebo nerozpustné sloučeniny, které nemají vazebné vlastnosti a nejsou expanzivní.

Agresivní  $\text{CO}_2$  reaguje s hydroxidem vápenatým z cementového tmelu a vzniká  $\text{CaCO}_3$ , následně dochází k jeho rozpouštění na hydrogenuhličitan ( $\text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$ ).

Kyseliny reagují s  $\text{Ca(OH)}_2$  a dalšími produkty hydratace slínkových minerálů za vzniku vápenatých solí.

Působením amonných solí rozpuštěných ve vodě dochází k transformaci pevného vápna na rozpustné vápenaté soli ( $\text{Ca}^{2+}$ ) a plynný amoniak ( $\text{NH}_3$ ).

V případě hořečnatých solí dochází rovněž k přeměně pevného vápna na rozpustné vápenaté soli a nerozpustný brucit ( $\text{Mg(OH)}_2$ ) [14], [49].

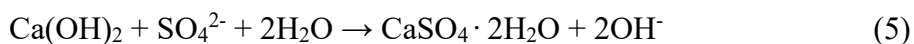
### 2.1.5.3 Chemická koroze III. typu

Při tomto typu koroze dochází k porušování betonu vlivem tvorby objemových sloučenin. Korozi III. typu způsobují zejména sírany, které mohou být vnitřní nebo vnější. Podle toho rozlišujeme vnější síranovou korozi (external sulphate attack – ESA) a vnitřní síranovou korozi (internal sulphate attack – ISA).

Vnitřní síranová koroze je způsobena dodatečným uvolňováním síranů obsažených přímo v betonu. Zdrojem síranů může být cement, případně kamenivo obsahující sádrovec. K nebezpečí dochází, pokud je obsah síranů v kamenivu vyšší než 0,2 %. K vnitřní síranové korozi rovněž může docházet při ošetřování betonu za teplot vyšších než 70 °C. Tento případ nastává například při propařování dílců nebo vzrůstu teploty u masivních konstrukcí.

K vnější síranové korozi dochází při styku betonu s vodou nebo rostlou zeminou s vysokou koncentrací síranů. Působením síranů dochází ke vzniku produktů s vyšším molárním objemem (sádrovec, sekundární ettringit a thaumasit) a to vyvolá krystalizační tlak, který může vést až k rozpadu betonu.

Sádrovec ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) vzniká reakcí mezi síranovými ionty  $\text{SO}_4^{2-}$  s portlanditem  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  podle rovnice 5.



Vznik sádrovce vede k nárůstu objemu o 17 %. Sádrovec dále reaguje s hydratovanými i nehydratovanými alumináty a způsobuje sulfoaluminátovou korozi, čímž vzniká sekundární ettringit (Candlotova sůl). Sekundární ettringit je na rozdíl od primárního ettringitu nebezpečný, protože jeho tvorba způsobuje expanzi ve ztvrdlém betonu, což vyvolá vznik trhlinek, odlupování betonu a ztrátu pevnosti.

V případě, kombinačního působení síranů a uhličitánů při  $\text{pH} > 10,5$  za působení nízkých teplot ( $0 - 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) dochází ke vzniku thaumasitu. Vznik thaumasitu má na beton ještě ničivější dopad než sekundární ettringit. Jeho vznik je totiž spojen s rozkladem C-S-H gelu [14], [49], [50].

#### 2.1.5.4 Požadavky na složení a vlastnosti betonu v prostředí XA

Prostředí XA rozlišujeme ve třech stupních rozdělených podle agresivity daného chemického prostředí na slabě, středně a vysoce agresivní chemické prostředí. Odstupňování chemického prostředí je založeno na přírodních půdách a spodních vodách při teplotě  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  s malou rychlostí proudění vody přibližující se nehybným podmínkám. Pro stanovení je rozhodující nejagresivnější hodnota jednotlivých chemických charakteristik. Pokud jsou dvě a více charakteristiky stejného stupně, tak se pro zařazení použije nejbližší vyšší stupeň. Jednotlivé hodnoty koncentrací škodlivých iontů a hodnoty pH jsou uvedeny v tabulce 8.

V normě ČSN P 73 2404 je kategorie chemického působení ještě doplněna poznámkou o dělení prostředí podle průměrné dlouhodobé relativní vlhkosti vzduchu, která se dělí na velmi nízkou (méně než 30 %), nízkou (30 až 60 %), střední (60 až 85 %) a vysokou (více než 85 %). Ve stupních **XA2** a **XA3** je normou ČSN P 73 2404 předepsaný minimální obsah vzduchu v čerstvém betonu. Například pro beton se zrnitostí do 16 mm je požadováno minimálně 4,5 %. V těchto prostředích je rovněž požadováno dle tabulky F.3 použití síranuvzdorného cementu. Z hlediska průsaku tlakovou vodou je pro **XA1** požadováno maximálně **50 mm**, u **XA2** je dovoleno maximálně **30 mm** a u **XA3** pak **20 mm** [15], [37].

Tabulka 7: Stupeň vlivu prostředí XA, upraveno z [15], [37]

Označení stupně	Popis prostředí	Příklad výskytu	Max. vodní součinitel	Min. pevnostní třída	Min. obsah cementu (kg/m <sup>3</sup> )
XA1	Slabě agresivní chemické prostředí.	Viz. tabulka 8.	0,55	C 25/30 <sup>a)</sup>	300
XA2	Středně agresivní chemické prostředí.	Viz. tabulka 8.	0,50	C 25/30 <sup>a)</sup>	320
XA3	Vysoce agresivní chemické prostředí.	Viz. tabulka 8.	0,45	C 30/37	360

a) Pevnosti v tlaku odpovídající C 30/37 a C 35/45 lze předepsat v případě použití síranuvzdorných a směsných cementů až po 90 dnech tvrdnutí betonu.

Tabulka 8: Hodnoty pro stupně chemického působení rostlé zeminy a podzemní vody [15]

Chemická charakteristika	Referenční zkušební metoda	XA1	XA2	XA3
<b>Podzemní voda</b>				
SO <sup>2-</sup> <sub>4</sub> mg/litr	EN 196-2	≥ 200 a ≤ 600	> 600 a ≤ 3 000	> 3 000 a ≤ 6000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 a ≥ 5,5	< 5,5 a ≥ 4,5	< 4,5 a ≥ 4,0
CO <sub>2</sub> mg/litr agresivní	EN 13577	≥ 15 a ≤ 40	> 40 a ≤ 100	> 100 až do nasycení
NH <sup>+</sup> <sub>4</sub> mg/litr	ISO 7150-1	≥ 15 a ≤ 30	> 30 a ≤ 60	> 60 a ≤ 100
Mg <sup>2+</sup> mg/litr	ISO 7980	≥ 300 a ≤ 1 000	> 1 000 a ≤ 3 000	> 3 000 až do nasycení
<b>Rostlá zemina</b>				
SO <sup>2-</sup> <sub>4</sub> mg/kg <sup>a</sup> celkem	EN 196-2 <sup>b</sup>	≥ 2 000 a ≤ 3 000 <sup>c</sup>	> 3 000 <sup>c</sup> a ≤ 12 000	> 12 000 a ≤ 24 000
Kyselost podle Baumann Gully ml/kg	prEN 16502	> 200	V praxi se nepoužívá.	
<sup>a</sup> Jílovité zeminy s propustností menší než 10 <sup>-5</sup> m/s se přiřadí do nižšího stupně. <sup>b</sup> Zkušební metoda předepisuje vyluhování SO <sup>2-</sup> <sub>4</sub> kyselinou solnou. Jestliže jsou k dispozici zkušenosti v místě užití betonu, lze alternativně použít vyluhování vodou. <sup>c</sup> V případě nebezpečí hromadění síranových iontů v betonu při střídavém vysoušení a zvlhčování nebo v důsledku kapilárního sání se mezní hodnota 3 000 mg/kg musí zmenšit na 2 000 mg/kg.				

## 2.1.6 Koroze vlivem mechanického působení (XM)

Mechanické opotřebení mohou způsobovat tři různé procesy: obrus, eroze a kavitace. K porušení betonu obrusem dochází při dlouhodobém působení tangenciálních sil v důsledku rozjezdu a brždění. S tímto namáháním se setkáváme nejčastěji na průmyslových podlahách a dopravních komunikacích. Odolnost betonu proti obrusu se zkouší na Böhmově přístroji podle ČSN 73 1324.

U vodních staveb (kanály, přepady a potrubí) dochází v důsledku pohybujících se kapalin, které obsahují pevné částice k poškození erozí.

Poslední z procesů je kavitace, která je způsobena opakovaným nárazem rychle proudící kapaliny (například v přehradních přepadech a zavodňovacích systémech) [6], [51].

Tabulka 9: Stupeň vlivu prostředí XM, upraveno z [37]

Označení stupně	Popis prostředí	Příklad výskytu	Max. vodní součinitel	Min. pevnostní třída	Min. obsah cementu (kg/m <sup>3</sup> )
XM1	Mírné nebo střední namáhání obrusem: minimální požadavky, včetně pojezdu vozidly opatřenými pneumatikami.	Nosné vyztužené nebo nevyztužené průmyslové podlahy pojižděné vozidly s pneumatikami, žlaby akvaduktů.	0,55	C 30/37	300
XM2	Silné namáhání obrusem: provoz vysokozdvížných vozíků, obrus unášenými splaveninami vody při malé rychlosti vody.	Nosné vyztužené nebo nevyztužené průmyslové podlahy pojižděné vozidly s pneumatikami nebo celogumovými koly vysokozdvížných vozíků, stěny a dna kanálů, jezové pilíře a tělesa jezů.	0,55 0,45	C 30/37 C 35/45	300 320
XM3	Velmi silné namáhání obrusem: častý pojezd pásovými vozidly, otluk unášenými splaveninami vody při vysoké rychlosti vody.	Nosné vyztužené nebo nevyztužené průmyslové podlahy pojižděné vozidly ocelovými nebo umělohmotnými koly vysokozdvížných vozíků; plochy pojižděné pásovými vozidly; vodní stavby vystavené intenzivnímu proudění vody (vývařiště).	0,45	C 35/45	320



## II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části byla zkoumána receptura typového LWSCC s umělým kamenivem Rugen (LC 25/28 D 1,8 – XC1 (CZ, F.1.1) – C1 0,2 – Dmax16 – SCC (SF1)). Tato práce navazuje na předchozí závěrečné práce zpracované na Katedře dopravního stavitelství Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice [13], [22], [52], které se zabývají tematikou lehkého betonu s aplikací kameniva Rugen, zejména pak na práci pana Ing. Kosinky [22], více viz kapitola 1.3.6.1. Na základě jejích výsledků byla receptura typového betonu modifikována přidáním ocelových vláken (Dramix 3D 45/50 BL) v množství  $50 \text{ kg/m}^3$ . Prohlášení o vlastnostech všech složek, které byly v receptuře použity, jsou uvedeny v Dokladové části. Výsledné složení betonu bylo následující:

- Těžené kamenivo fr. 0/4 Čeperka
- Lehké kamenivo fr. 4/8 a 8/16 Rugen
- Vápenec velmi jemně mletý (třída V, druh 8)
- CEM I 42,5 R Prachovice
- Voda
- Superplastifikační přísada MasterGlenium ACE 446
- Stabilizační přísada MasterMatrix SDC 100
- Ocelová vlákna Dramix 3D 45/50 BL v množství  $50 \text{ kg/m}^3$

### 3. Výroba a ošetřování zkušebních těles

Výroba zkušebních těles probíhala v laboratoři VVCD Univerzity Pardubice. Lehké kamenivo bylo z důvodu své vysoké nasákavosti a s tím souvisejícím odběrem záměsové vody z čerstvého betonu před dávkováním do míchačky nasyceno vodou (obrázek 11). Lehké kamenivo bylo na rozdíl od přírodního kameniva dávkováno objemově.

Míchání probíhalo v laboratorní míchačce s nuceným oběhem o objemu 0,047 m<sup>3</sup>. Do míchačky bylo nejprve vloženo nasycené lehké kamenivo společně s pískem a cementem. Následně byl dávkován vápenec a záměsová voda, ve které byly rozmíchány obě přísady. Po dostatečném promíchání byla pomalu dávkována ocelová vlákna. Po vmísení ocelových vláken nedocházelo k vytváření shluků (ježků). Rovnoměrnost rozptýlení drátků ve ztvrdlém betonu byla ověřena po provedení zkoušek pevnosti v tahu za ohybu na rozlomených trámčích délky 700 mm. Výsledky jsou patrné na obrázcích v Dokladové části (G. Rovnoměrnost rozptýlení drátků). Po namíchání následovalo **zkoušení čerstvého betonu**.

Nejprve byla provedena zkouška sednutí-rozlitím, následně byla stanovena objemová hmotnost čerstvého betonu. U čtyř záměsí byl stanovován i obsah vzduchu. Výsledky všech těchto zkoušek jsou uvedeny v kapitole 4.

Po provedení zkoušek byl beton ukládán do předem připravených forem. Následující den po provedení betonáže bylo provedeno odbednění a označení těles. Tělesa byla po odbednění namočena a zabalena do strečových fólií až do doby dalšího zkoušení.



*Obrázek 11: Předvlhčení lehkého kameniva (vlevo) [vlastní foto]*

*Obrázek 12: Ošetřování části zkušebních těles (vpravo) [vlastní foto]*

## 4. Zkoušení čerstvého betonu

### 4.1 Zkouška sednutí-rozlitím

Zkouška sednutí-rozlitím se provádí pro posouzení tekutosti a průtokové rychlosti samozhutnitelného betonu, časem  $t_{500}$  se zjišťuje rychlost tečení a relativní viskozita.

Zkouška probíhala v souladu s normou ČSN EN 12350-8 [53]. Na podkladní desce byl vyznačen střed a dvě kružnice o průměrech 210 mm a 500 mm. Menší z kružnic sloužila k vycentrování komolého kužele, větší pak pro stanovení času  $t_{500}$ . Kužel byl naplněn betonem a horní povrch urovnán zednickou lžící. Kužel byl následně zvednut jedním pohybem vzhůru. Průměr největšího rozlití byl změřen a zaznamenán jako hodnota  $d_1$ . Ve směru kolmém na  $d_1$  byla změřena hodnota  $d_2$ . Výsledná hodnota rozlití byla stanovena podle vztahu 6. Současně byl zaznamenáván i čas  $t_{500}$ , kdy se beton dotknul kružnice o průměru 500 mm.

$$SF = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \quad (6)$$

kde:

SF je sednutí-rozlitím [mm],

$d_1$  je největší průměr rozlití [mm],

$d_2$  je průměr rozlití ve směru kolmém na  $d_1$  [mm].



Obrázek 13: Průběh zkoušky sednutí-rozlitím [vlastní foto]

Tabulka 10: Výsledky zkoušky sednutí-rozlítím

Číslo záměsi	d <sub>1</sub> [mm]	d <sub>2</sub> [mm]	SF [mm]	Stupeň SF	t <sub>500</sub> [s]	Stupeň VS
1	610	600	<b>605</b>	SF1	<b>1,94</b>	VS1
2	620	610	<b>615</b>	SF1	<b>1,92</b>	VS1
3	610	610	<b>610</b>	SF1	<b>1,83</b>	VS1
4	630	620	<b>625</b>	SF1	<b>1,77</b>	VS1
5	670	650	<b>660</b>	SF2	<b>1,26</b>	VS1
6	680	650	<b>665</b>	SF2	<b>1,32</b>	VS1
7	640	630	<b>635</b>	SF1	<b>1,75</b>	VS1
8	630	600	<b>615</b>	SF1	<b>1,88</b>	VS1
9	610	590	<b>600</b>	SF1	<b>1,80</b>	VS1



## 4.2 Objemová hmotnost čerstvého betonu

Zkouška probíhala v souladu s normou ČSN EN 12350-6 [54]. Ke stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu byla použita spodní část tlakového hrnce. Před vlastní zkouškou byl stanoven objem a hmotnost prázdné nádoby ( $m_1$ ). Následně byl tlakový hrnec navlhčen a naplněn čerstvým betonem bez hutnění. Pouze byly odstraněny velké bubliny poklepem gumovou paličkou. Povrch nádoby byl urovnán a hmotnost nádoby naplněné čerstvým betonem ( $m_2$ ) byla zaznamenána do tabulky.

Objemová hmotnost čerstvého betonu byla vypočtena ze vztahu 7. Výsledné hodnoty byly zaokrouhleny na nejbližších 10 kg/m<sup>3</sup> a uvedeny do tabulky 11.

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (7)$$

kde:

D je objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m<sup>3</sup>],

$m_1$  je hmotnost prázdné nádoby [kg],

$m_2$  je hmotnost nádoby naplněné betonem [kg],

V je objem nádoby [m<sup>3</sup>].

Tabulka 11: Objemové hmotnosti čerstvého betonu

Číslo záměsi	$m_1$ [kg]	V [m <sup>3</sup> ]	$m_2$ [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
1	4,31	0,00784	20,315	<b>2 040</b>
2			20,321	<b>2 040</b>
3			20,148	<b>2 020</b>
4			20,272	<b>2 040</b>
5			19,985	<b>2 000</b>
6			19,968	<b>2 000</b>
7			19,960	<b>2 000</b>
8			20,165	<b>2 020</b>
9			20,250	<b>2 030</b>

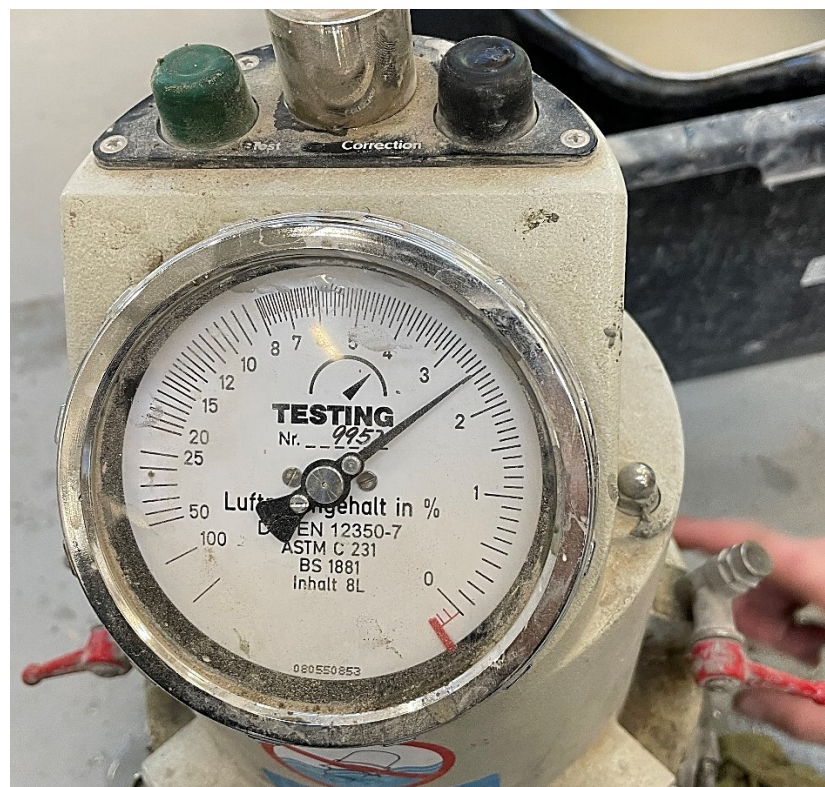
### 4.3 Obsah vzduchu

Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu probíhalo podle ČSN EN 12350-7 [55]. Nádoba byla naplněna čerstvým betonem v jedné vrstvě bez hutnění a povrch byl urovnán ocelovým hladítkem. K nádobě bylo svorkami připevněno víko. Následně se otevřely ventily a jedním z ventilů se nádoba plnila vodou pomocí stříčky, dokud nevytékala z druhého ventilu ven. Oba ventily se uzavřely a do nádoby se natlačil vzduch. Tlakoměr se nastavil na počáteční hodnotu tlaku. Z tlakoměru se následně za lehkého poklepávání odečetla hodnota obsahu vzduchu  $A_1$  v procentech. Před sejmutím víka se ještě otevřely oba ventily, aby se uvolnil tlak.

Tabulka 12: Obsah vzduchu v čerstvém betonu

Číslo záměsi	Obsah vzduchu [%]	Průměrný obsah vzduchu [%]
1	2,1	<b>2,3</b>
3	2,5	
6	2,3	
8	2,2	

Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu proběhlo celkem u čtyř záměsí. Obsah vzduchu se u jednotlivých záměsí pohyboval v rozmezí 2,1 až 2,5 %. Průměrná hodnota byla 2,3 %.



Obrázek 14: Stanovení obsahu vzduchu u záměsi č.3 [vlastní foto]

## 5. Experimentální prostředí

Jedním z cílů práce bylo uložení těles do podmínek, které by simulovaly reálná prostředí XA a XF. Celkem byly vytvořeny čtyři sady těles (REF, CHEM, KOM a PVM). Každá sada obsahovala tři krychle o délce hrany 150 mm a tři trámce o rozměrech 150 × 150 × 700 mm. Sada **REF** (referenční sada) nebyla vystavena žádnému působení. Sada **CHEM** byla vystavena působení kyseliny chlorovodíkové, sada **PVM** periodickému působení vody v kombinaci s povětrnostními vlivy a sada **KOM** působení obojího. Všechny sady byly před vystavením daným prostředím označeny a zváženy.

Doba působení jednotlivých prostředí byla zvolena stejná jako při zkoušce střídavého zmrazování a rozmrazování vodou nasycených trámců podle ČSN 73 1322 [44]. Tělesa jsou při této zkoušce vystavena 150 cyklům (jeden cyklus trvá 6 hodin). Celková doba působení je tedy přibližně 38 dní. Výjimku tvořila pouze sada **KOM** (kombinované působení), která byla vystavena působení HCl po dobu 38 dní a následně v zimním období periodickému působení vody v kombinaci s povětrnostními vlivy rovněž po dobu 38 dní.

### 5.1 Působení kyseliny chlorovodíkové

Sady CHEM a KOM byly ponořeny do agresivního 4,5 % vodného roztoku HCl (obrázek 15). Kyselina chlorovodíková v tomto případě reagovala s portlanditem ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) za vzniku soli a vody, čímž docházelo k vyluhování dle rovnice 8. Vzniklá sůl nadále krystalizovala a nastávala koroze III. druhu [56].



Po vytažení těles z roztoku HCl byla sada CHEM až do doby zkoušení umístěna v laboratorních podmínkách. Sada KOM byla bez prodlení umístěna v exteriéru.



Obrázek 15: Sady CHEM a KOM vystavené působení HCL [vlastní foto]





Obrázek 16: Detail poškození sady CHEM [vlastní foto]

## 5.2 Periodické působení vody v kombinaci s povětrnostními vlivy

Sady PVM a KOM byly umístěny v exteriéru a vystaveny působení povětrnostních vlivů v zimním období (od 2.1 do 8.2.2022). Tělesa byla každý den ve 20:00 polévána vodou, která v mechanismu degradace působí jako agresivní činidlo (viz kapitola 2. Trvanlivost betonu).

Hodnoty teplot vzduchu působícího na tělesa v uvedeném období byly převzaty z oficiálního měření Českého hydrometeorologického ústavu v lokalitě Pardubice, letiště [57]. Teploty vzduchu byly zaznamenávány každých 10 minut po celých 38 dní. Dosažené maximální, minimální a průměrné denní teploty jsou uvedeny v tabulce 13. Graf 4 pak shrnuje vývoj teplot vzduchu v celém zkoumaném období.

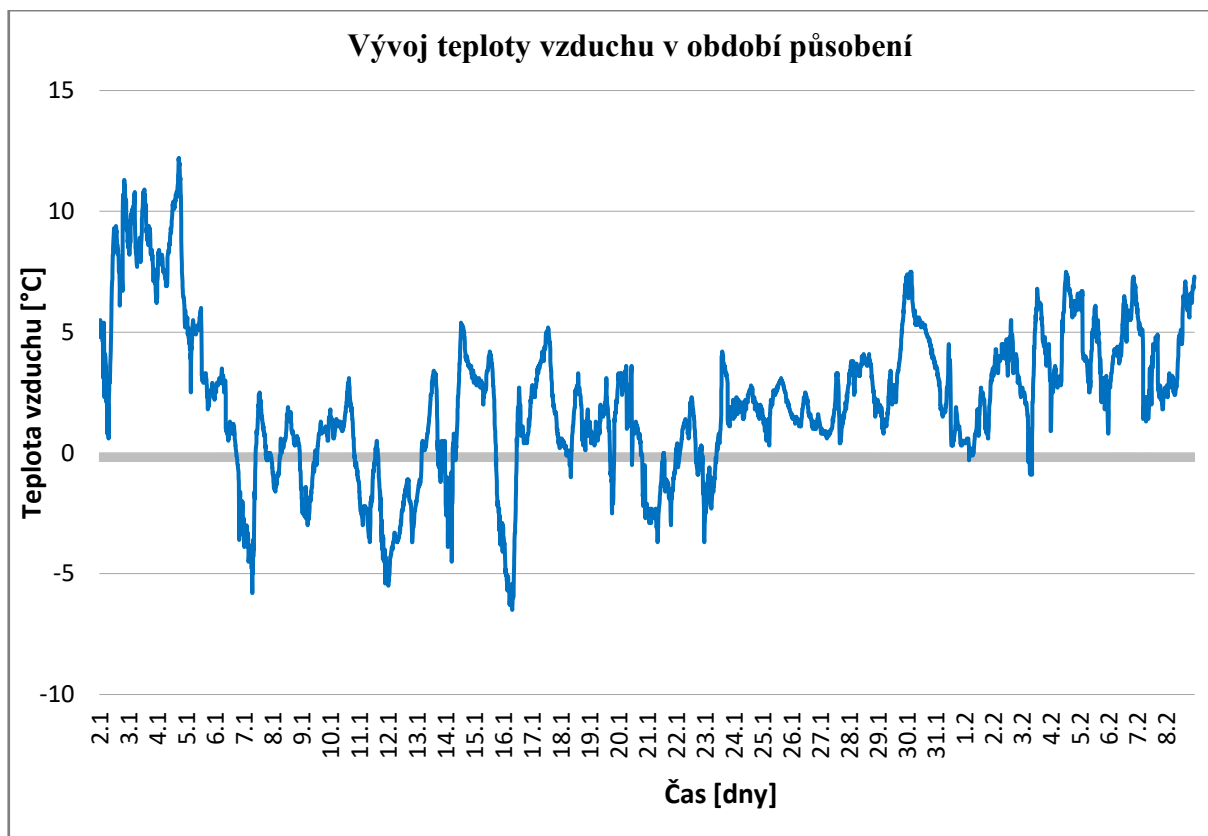


Obrázek 17: Sady KOM a PVM vystavené vodě a povětrnostním vlivům [vlastní foto]



Tabulka 13: Maximální a minimální teploty v období působení, upraveno z [57]

Číslo dne	Datum	Maximální teplota [°C]	Minimální teplota [°C]	Průměrná denní teplota [°C]
1	2.1	11,6	0,6	6,6
2	3.1	11	6,1	8,9
3	4.1	12,3	5,1	8,7
4	5.1	6,1	1,8	4,0
5	6.1	3,5	-3,8	1,0
6	7.1	2,8	-6,1	-1,1
7	8.1	2	-1,6	0,2
8	9.1	1,6	-3	-0,5
9	10.1	3,1	-1,4	1,1
10	11.1	0,6	-5,5	-2,3
11	12.1	-1,1	-5,7	-2,9
12	13.1	3,4	-2	0,6
13	14.1	5,4	-4,7	1,7
14	15.1	4,2	-4,8	1,6
15	16.1	2,8	-6,5	-1,6
16	17.1	5,2	0,1	3,0
17	18.1	3,3	-1,1	1,0
18	19.1	3,2	-2,5	1,0
19	20.1	3,7	-2,7	1,2
20	21.1	0,1	-3,8	-1,8
21	22.1	2,4	-3,7	0,4
22	23.1	4,3	-3,3	0,6
23	24.1	2,8	1,3	2,0
24	25.1	3,1	0,3	2,1
25	26.1	2,5	1	1,5
26	27.1	3,3	0,4	1,4
27	28.1	4,1	1,4	3,3
28	29.1	7,3	0,6	3,0
29	30.1	7,6	3,5	5,5
30	31.1	4,5	0,3	1,8
31	1.2	3,6	-0,4	1,2
32	2.2	5,5	2,3	3,9
33	3.2	6,8	-1	3,5
34	4.2	7,6	0,8	5,0
35	5.2	6,8	1	4,1
36	6.2	7,4	0,8	5,0
37	7.2	6,2	1,3	3,4
38	8.2	7,3	2,2	4,6



Graf 4: Vývoj teploty vzduchu v období působení, upraveno z [57]

## 6. Zkoušení ztvrdlého betonu

### 6.1 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu

Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu probíhalo podle ČSN EN 12390-7 [58]. Norma rozlišuje tři stavy, při kterých může být určena hmotnost zkušebních těles (jak byla dodána, nasycená vodou a vysušená v sušárně).

V této práci byla u všech zkušebních těles určena hmotnost v prvním stavu (jak byla dodána). U těles vystavených jednotlivým experimentálním prostředím byla hmotnost sledována před vystavením těles daným prostředím a poté na konci působení daných prostředí. Jednotlivé hmotnosti jsou zaznamenány v tabulce 14. Výsledná objemová hmotnost byla u těchto těles počítána z rozměrů a hmotností naměřených na konci působení.

U referenčních krychlí byla ještě pro zajímavost doplněna hmotnost v dalších dvou stavech (tělesa nasycená vodou a vysušená v sušárně).

Stanovení objemu probíhalo na základě výpočtu ze změřených rozměrů těles. Výsledná objemová hmotnost byla stanovena ze vztahu 9 a zaokrouhlena na nejbližších  $10 \text{ kg/m}^3$ .

$$D = \frac{m}{V} \quad (9)$$

kde:

D je objemová hmotnost zkušebního tělesa pro příslušné podmínky [ $\text{kg/m}^3$ ],

m je hmotnost zkušebního tělesa [kg],

V je objem vypočítaný ze skutečných rozměrů tělesa [ $\text{m}^3$ ].

### 6.1.1 Objemová hmotnost ve stavu, jak byl dodán

Tabulka 14: Objemová hmotnost ve stavu, jak byl dodán

Sada	Číslo vzorku	Hmotnost vzorku [kg]		Úbytek hmotnosti [g]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
		začátek působení	konec působení		
REF	1	6,709	-	-	2 000
	2	6,817	-	-	2 010
	3	6,722	-	-	1 980
	4	6,776	-	-	2 010
	<b>Ø</b>	<b>6,756</b>	-	-	<b>2 000</b>
CHEM	1	6,762	6,374	388	1 900
	2	6,643	6,135	508	1 860
	3	6,532	6,085	447	1 860
	<b>Ø</b>	<b>6,646</b>	<b>6,198</b>	<b>448</b>	<b>1 870</b>
KOM	1	6,655	6,232	423	1 870
	2	6,646	6,379	267	1 890
	3	6,912	6,501	411	1 970
	<b>Ø</b>	<b>6,738</b>	<b>6,371</b>	<b>367</b>	<b>1 910</b>
PVM	1	6,783	6,712	71	1 970
	2	6,860	6,823	37	2 010
	3	6,626	6,561	65	1 940
	<b>Ø</b>	<b>6,756</b>	<b>6,699</b>	<b>58</b>	<b>1 970</b>

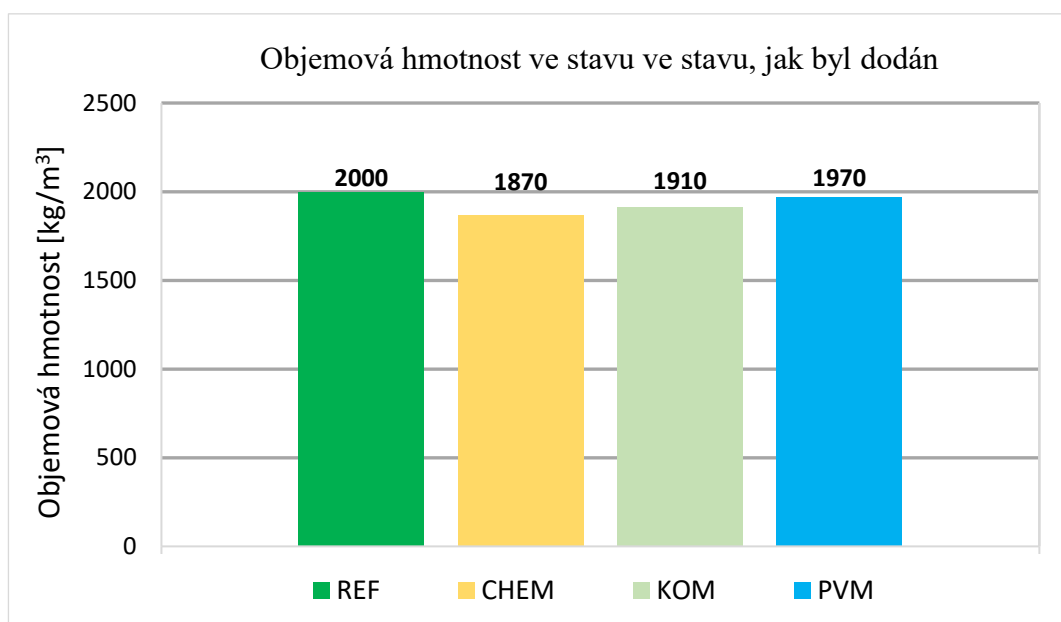


Obrázek 18: Úbytek hmotnosti u tělesa CHEM 2 [vlastní foto]

- **Vyhodnocení zkoušky**

Nejnižší průměrný úbytek hmotnosti byl zaznamenán u sady PVM (58 g), nejvyšší naopak u sady CHEM (448 g). Sada KOM, která byla vystavena oběma prostředím, měla nižší průměrnou hodnotu úbytku hmotnosti (367 g) než sada CHEM.

I přes poměrně velké úbytky hmotnosti u sad CHEM a KOM bylo po rozlomení vzorků zjištěno, že poškození způsobené roztokem HCl bylo pouze povrchového rázu (viz obrázek 16). Porovnání průměrných objemových hmotností je patrné v grafu 5.



Graf 5: Porovnání objemových hmotností ve stavu, jak byl dodán

### 6.1.2 Objemová hmotnost ve stavu nasycení a po vysušení

Zkušební tělesa byla ihned po odbednění ponořena do vody po dobu 28 dní. Po uplynutí doby byla tělesa povrchově otřena a zvážena (hmotnost v nasyceném stavu). Následně byla tělesa sušena v sušárně při teplotě 105 °C až do dosažení konstantní hmotnosti. Poté byla opět zvážena (hmotnost po vysušení v sušárně). Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 15.

Tabulka 15: Objemová hmotnost ve stavu nasycení vodou a po vysušení v sušárně

Číslo vzorku	Ve stavu nasycení vodou		Po vysušení v sušárně	
	$m_s$ [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	$m_o$ [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
1	6,971	2 060	6,115	1 810
2	6,825	2 030	6,070	1 810
3	7,009	2 060	6,267	1 840



Obrázek 19: Hmotnost po nasycení (vlevo) a hmotnost po vysušení (vpravo) [vlastní foto]

## 6.2 Pevnost v tlaku

Zkouška pevnosti betonu v tlaku probíhala v souladu s ČSN EN 12390-3 [59]. Zkušebními tělesy byly krychle o délce hrany 150 mm a válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm. Tělesa byla před zkoušením zvážena a změřena. Následně byla vložena do zkušebního lisu tak, aby směr zatěžování byl kolmý na směr, ve kterém byl beton ukládán. Zkoušení probíhalo na zkušebním lisu od firmy Controls s maximálním rozsahem 4 000 kN. Na zkušebním lisu byla před spuštěním nastavena konstantní rychlost zatěžování 0,6 MPa/s. Výsledná pevnost v tlaku byla vypočítána ze vztahu 10 a zaokrouhlena na nejbližších 0,1 MPa.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (10)$$

kde:

$f_c$  je pevnost v tlaku [MPa],

$F$  je maximální zatížení při porušení [N],

$A_c$  je průřezová plocha zkušebního tělesa změřená ze skutečných rozměrů [mm<sup>2</sup>].

### 6.2.1 Pevnost v tlaku na válcích

Pevnost v tlaku na válcích byla zkoušena pouze v rámci referenčních těles ve stáří 28 dní na třech zkušebních vzorcích. Cílem bylo především ověření dané pevnostní třídy betonu. Nejnižší naměřená hodnota byla **28,3 MPa**, průměrná hodnota měření byla **30 MPa**.

Tabulka 16: Pevnost v tlaku na válcích

Vzorek	Hmotnost vzorku [kg]	Maximální zatížení [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]	Průměrná pevnost [MPa]
1-V	10,515	496,5	28,3	<b>30,0</b>
2-V	10,874	567,6	32,0	
3-V	10,723	524,1	29,7	

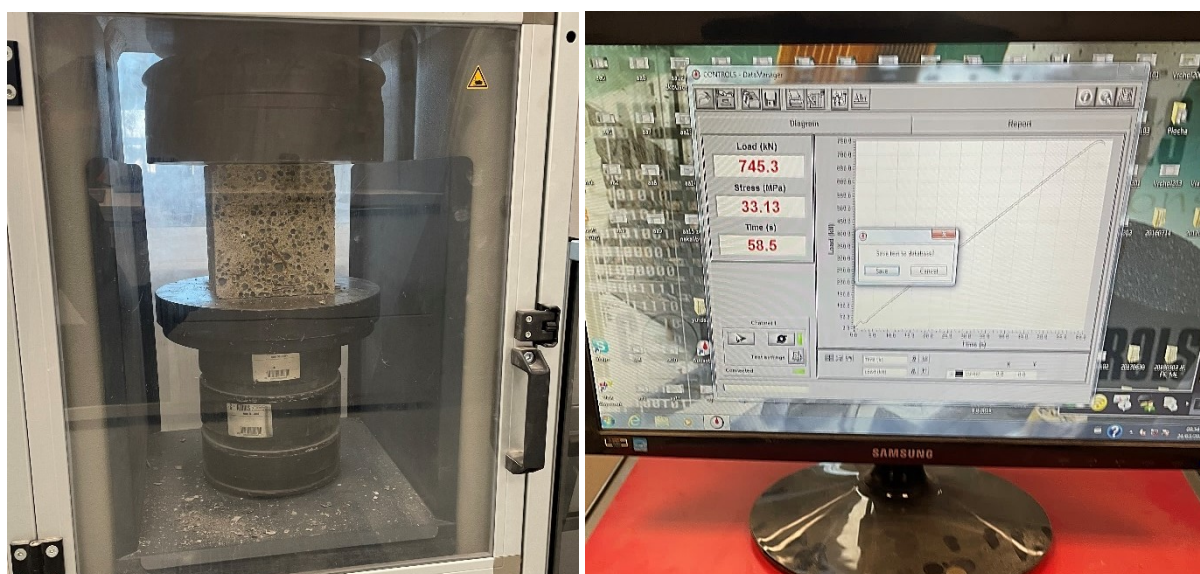


## 6.2.2 Pevnost v tlaku na krychlích

Pevnost v tlaku na krychlích byla zkoumána v rámci všech sad těles. Sada REF byla zkoušena ve stáří 27 dní. Sady těles (CHEM, KOM a PVM) byly zkoušeny ve stáří 205 dní. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 17.

Tabulka 17: Pevnost v tlaku na krychlích

Sada	Číslo vzorku	Tlačná plocha [mm <sup>2</sup> ]	Maximální zatížení [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]	Průměrná pevnost [MPa]
REF	1	22 467	754,9	33,6	34,4
	2	22 575	796,8	35,3	
	3	22 373	765,1	34,2	
	4	22 575	779,4	34,5	
CHEM	1	22 416	763,1	34,0	33,5
	2	22 227	736,9	33,2	
	3	21 898	726,5	33,2	
KOM	1	22 252	745,3	33,5	33,1
	2	22 534	717,6	31,8	
	3	22 111	749,7	33,9	
PVM	1	22 692	856,9	37,8	39,1
	2	22 657	949,7	41,9	
	3	22 605	848,9	37,6	



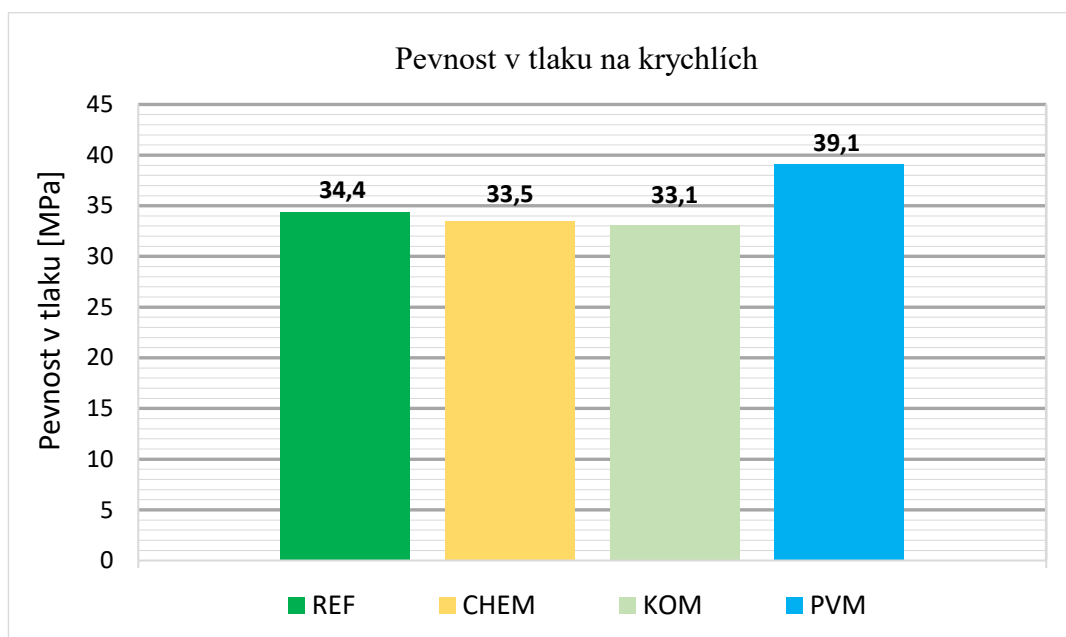
Obrázek 20: Stanovení pevnosti v tlaku na tělese KOM 1 [vlastní foto]



- **Vyhodnocení zkoušky**

Z naměřených hodnot je patrné, že působení jednotlivých experimentálních prostředí mělo na pevnost v tlaku zanedbatelný vliv. Jak bylo zmíněno již v kapitole 6.1.1. Poškození vzorků vystavených působení HCl, bylo pouze povrchového rázu.

Největší průměrná pevnost v tlaku byla zaznamenána u sady těles PVM (39,1 MPa). Důvodem nárůstu pevnosti oproti tělesům REF je pravděpodobně větší stáří těles v době zkoušení a minimální poškození sady PVM. U sad CHEM a KOM došlo ve srovnání se sadou REF naopak k mírnému poklesu průměrné pevnosti v tlaku o 0,9 MPa u sady CHEM, respektive o 1,3 MPa u sady KOM.

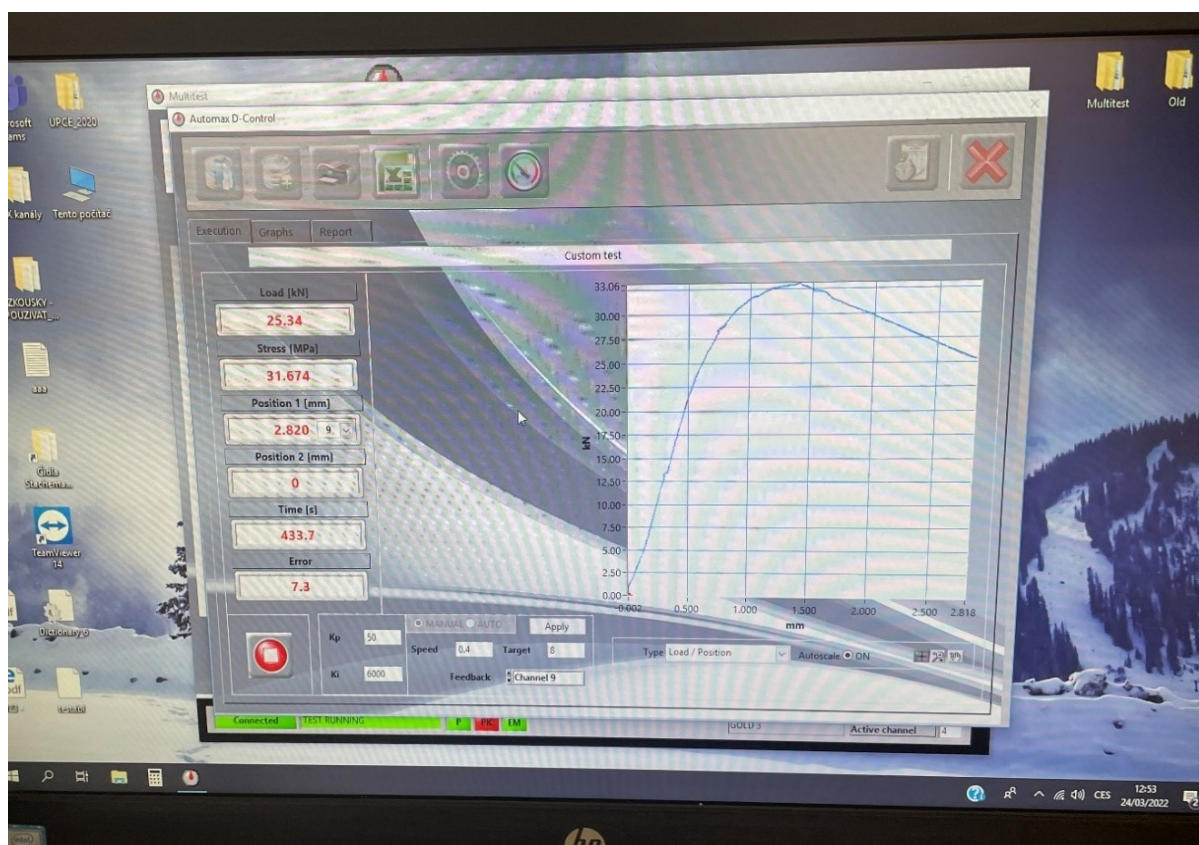


*Graf 6: Porovnání dosažených pevností v tlaku (krychle 150 mm)*

### 6.3 Pevnost v tahu za ohybu

Stanovení pevnosti betonu v tahu za ohybu probíhalo v souladu s ČSN P 73 2452 [60]. Zkušebními tělesy byly normalizované trávce o rozměrech  $150 \times 150 \times 700$  mm. Tělesa byla před samotnou zkouškou zvážena a změřena. Sada REF byla zkoušena ve stáří 31 dní. Sady CHEM, KOM a PVM byly zkoušeny ve stáří 205 dní.

Zkoušení probíhalo na zkušebním lisu Controls 50-C1201/BFR v akreditované zkušební laboratoři Cemex Pardubice. Na zkušebním lisu byla nastavena vzdálenost 600 mm mezi podpěrnými válečky. Horní zatěžovací válečky byly umístěny souměrně ke středu rozpětí v osové vzdálenosti 200 mm. Zatěžování probíhalo konstantní rychlostí  $v_{ft} = 0,4$  mm/min až do okamžiku ukončení zkoušky. Průběh všech zkoušek byl zaznamenáván prostřednictvím řídicí jednotky Automax D-Control (obrázek 21).



Obrázek 21: Automatické zaznamenávání průběhu zkoušky [vlastní foto]

Ze záznamu průběhu zatěžování a odezvy těles byly získány jednotlivé diagramy odolnosti. Průběh průměrného diagramu odolnosti byl u všech sad stanoven statistickým vyhodnocením diagramů odolnosti ze tří jednotlivých trámců. Z průměrného diagramu odolnosti byly následně stanoveny hodnoty:

1.  $F_{Rm,cr}$  při průhybu na mezi vzniku makrotrhliny  $\delta_{tm,cr}$ ;
2.  $F_{Rm,0.5}$  při dohodnutém průhybu  $\delta_{t,0.5} = 0,5$  mm;
3.  $F_{Rm,res,1}$  při dohodnutém mezním průhybu  $\delta_{t1} = 3,5$  mm.

Charakteristický diagram odolnosti byl stanoven podle ČSN EN 1990:2004, příloha D (stanovení vychází ze zajištění 5 % kvantilu spolehlivosti). Z charakteristického diagramu odolnosti byly stanoveny hodnoty:

1.  $F_{Rk,cr}$  při průhybu na mezi vzniku makrotrhliny  $\delta_{tk,cr}$ ;
2.  $F_{Rk,0.5}$  při dohodnutém průhybu  $\delta_{t,0.5} = 0,5$  mm;
3.  $F_{Rk,res,1}$  při dohodnutém mezním průhybu  $\delta_{t1} = 3,5$  mm.

Pomocí charakteristického diagramu odolnosti se ověřuje možnost využití vláknobetonu v nosných konstrukcích. Pro použití v nosných konstrukcích je vyžadováno, aby reziduální odolnost  $F_{Rk,res,i}$  v každém bodě charakteristického diagramu odolnosti, včetně průhybu ( $\delta_{t1} = 3,5$  mm) splnila podmínku  $F_{Rk,res,i} \geq 1/3 F_{Rk,cr}$ . Při nesplnění této podmínky je nutné dále zanedbat vliv vláken a předpokládat chování prostého betonu [60].



Obrázek 22: Porušené těleso při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu [vlastní foto]

Vyjádření pevnosti v tahu za ohybu a v dostředném tahu se provádí pomocí charakteristického diagramu odolnosti.

Stavy napjatosti vláknobetonu při zkoušce:

a) Do vzniku makrotrhliny

$$f_{fc,tk,fl} = \frac{F_{Rk,cr} * l}{d_1 * d_2^2} \quad (11)$$

kde:

$f_{fc,tk,fl}$  je charakteristická pevnost trámce v tahu za ohybu [MPa];

$F_{Rk,cr}$  je charakteristická odolnost trámce při vzniku makrotrhliny [N];

$l$  je rozpětí trámce [mm];

$d_1$  je šířka trámce a  $d_2$  je výška trámce [mm].

Z hodnoty charakteristické pevnosti v tahu za ohybu  $f_{fc,tk,fl}$  je možné odvodit podle ČSN EN 1992-1-1 hodnotu charakteristické pevnosti v dostředném tahu  $f_{fc,tk,cr}$  podle vztahu:

$$f_{fc,tk,cr} = \frac{f_{fc,tk,fl}}{1,45} \quad (12)$$

b) Po vzniku makrotrhliny při dohodnutém průhybu  $\delta_{t,0.5} = 0,5$  mm

Pevnost v dostředném tahu při průhybu 0,5 mm se určí ze vztahu:

$$f_{fc,tk,0.5} = 0,45 * \frac{F_{Rk,0.5} * l}{d_1 * d_2^2} \quad (13)$$

kde:

$f_{fc,tk,0.5}$  je charakteristická reziduální pevnost v dostředném tahu [MPa];

$F_{Rk,0.5}$  je charakteristická odolnost trámce při průhybu  $\delta_{t,0.5} = 0,5$  mm [N].

c) Při dohodnutém mezním průhybu  $\delta_{t,1} = 3,5$  mm

Reziduální pevnost v dostředném tahu při průhybu 3,5 mm se určí ze vztahu:

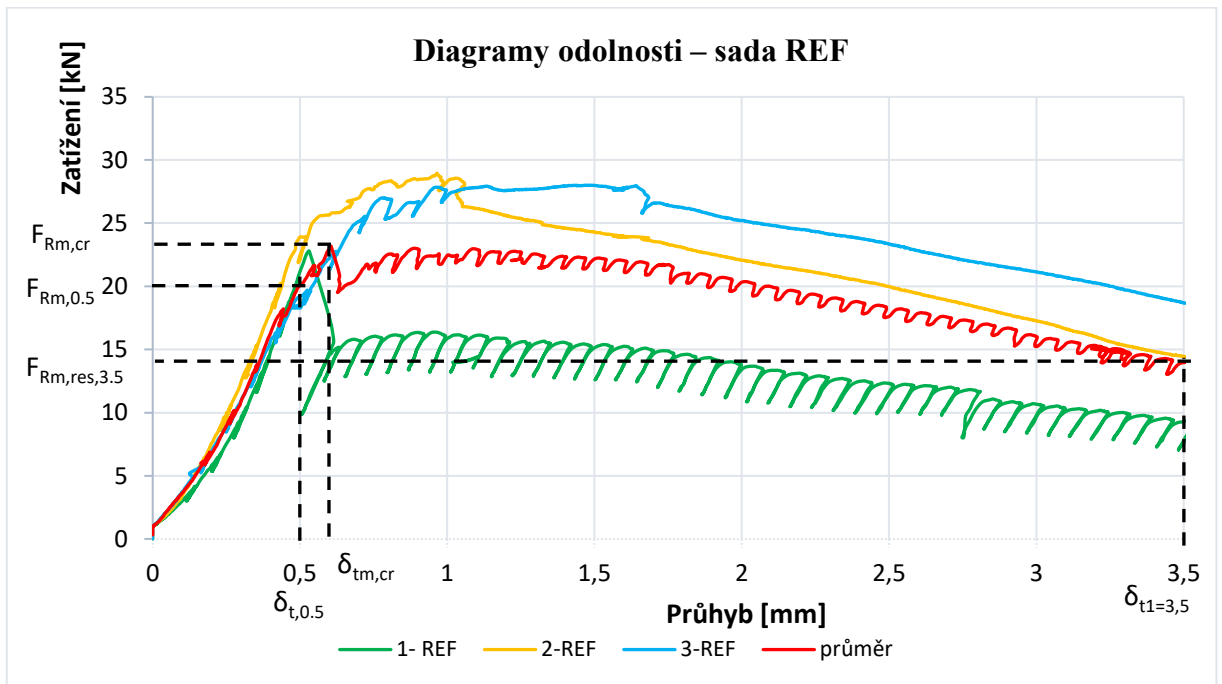
$$f_{fc,tk,res,1} = 0,36 * \frac{F_{Rk,res,1} * l}{d_1 * d_2^2} \quad (14)$$

kde:

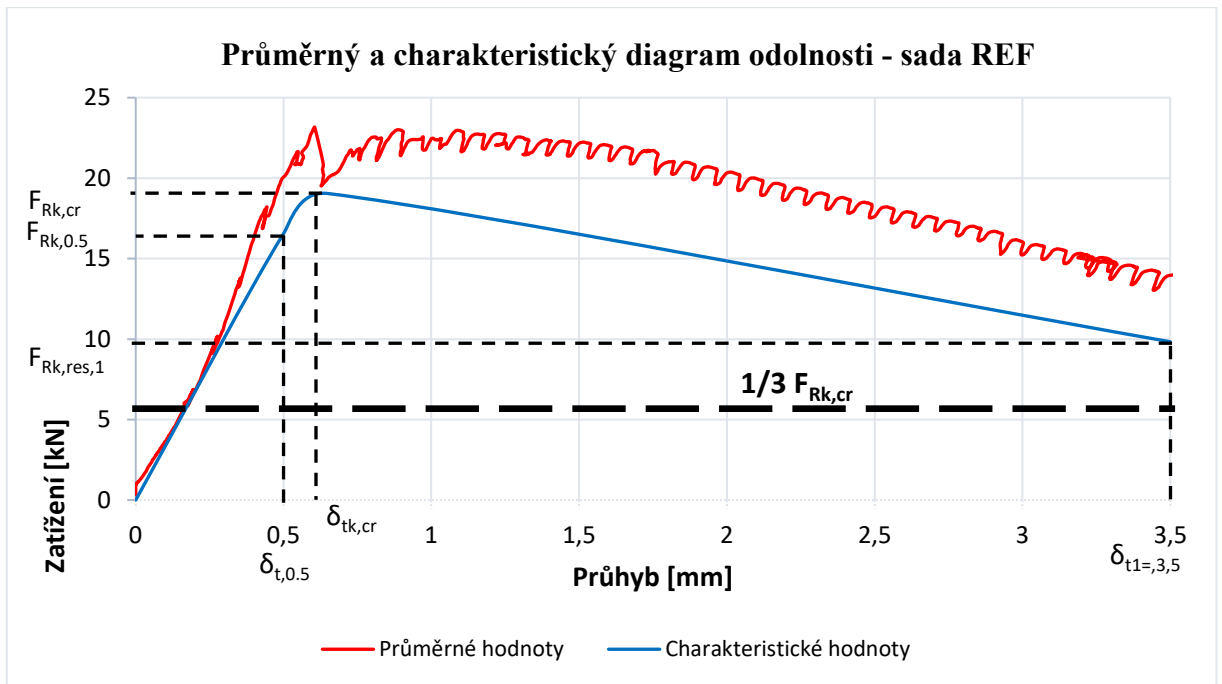
$f_{fc,tk,res,1}$  je charakteristická pevnost v dostředném tahu [MPa];

$F_{Rk,res,1}$  je charakteristická odolnost trámce při průhybu  $\delta_{t,1} = 3,5$  mm [N] [60].

### 6.3.1 Pevnost v tahu za ohybu – sada REF



Graf 7: Diagramy odolnosti – sada REF



Graf 8: Průměrný a charakteristický diagram odolnosti – sada REF

Z charakteristického diagramu odolnosti byly stanoveny hodnoty:

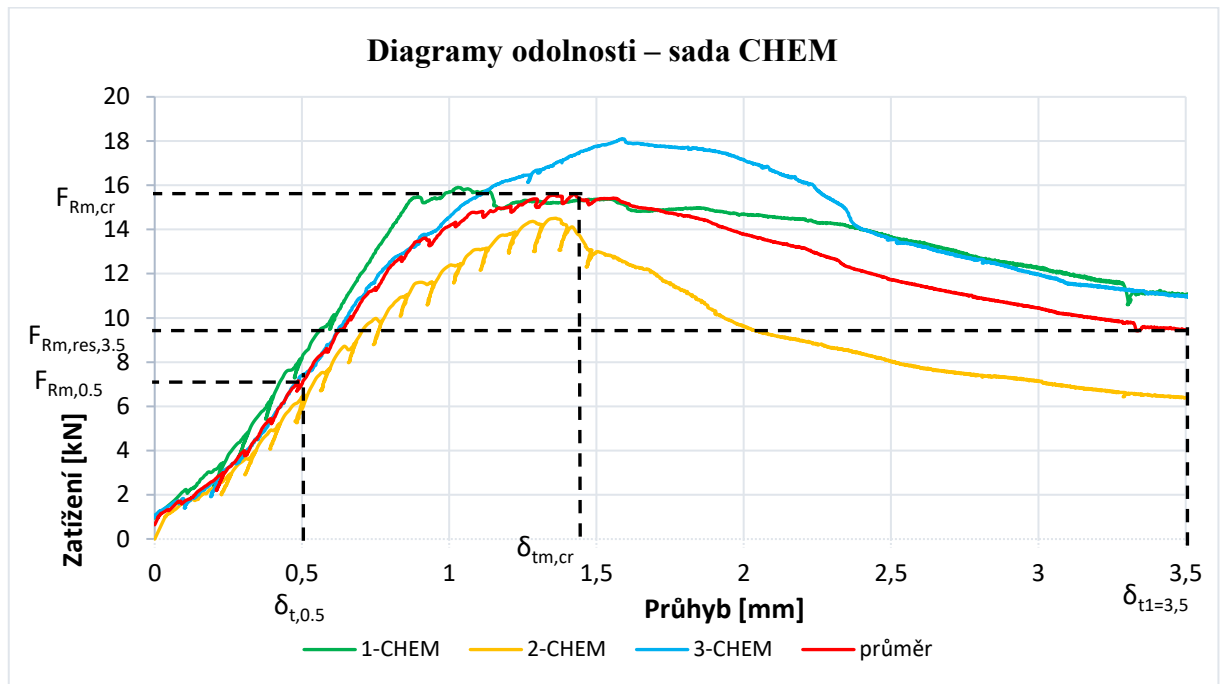
$$F_{Rk,cr} = 19,05 \text{ kN}$$

$$F_{Rk,0.5} = 16,54 \text{ kN}$$

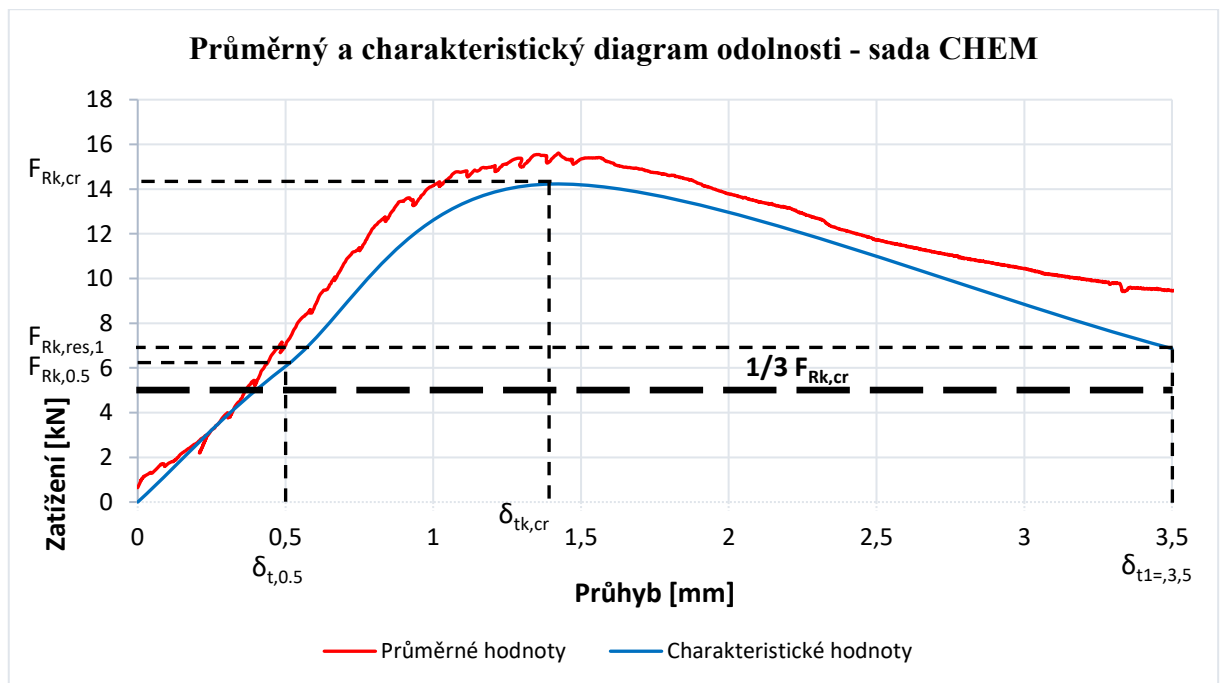
$$F_{Rk,res,1} = 9,83 \text{ kN}$$



### 6.3.2 Pevnost v tahu za ohybu – sada CHEM



Graf 9: Diagramy odolnosti – sada CHEM



Graf 10: Průměrný a charakteristický diagram odolnosti – sada CHEM

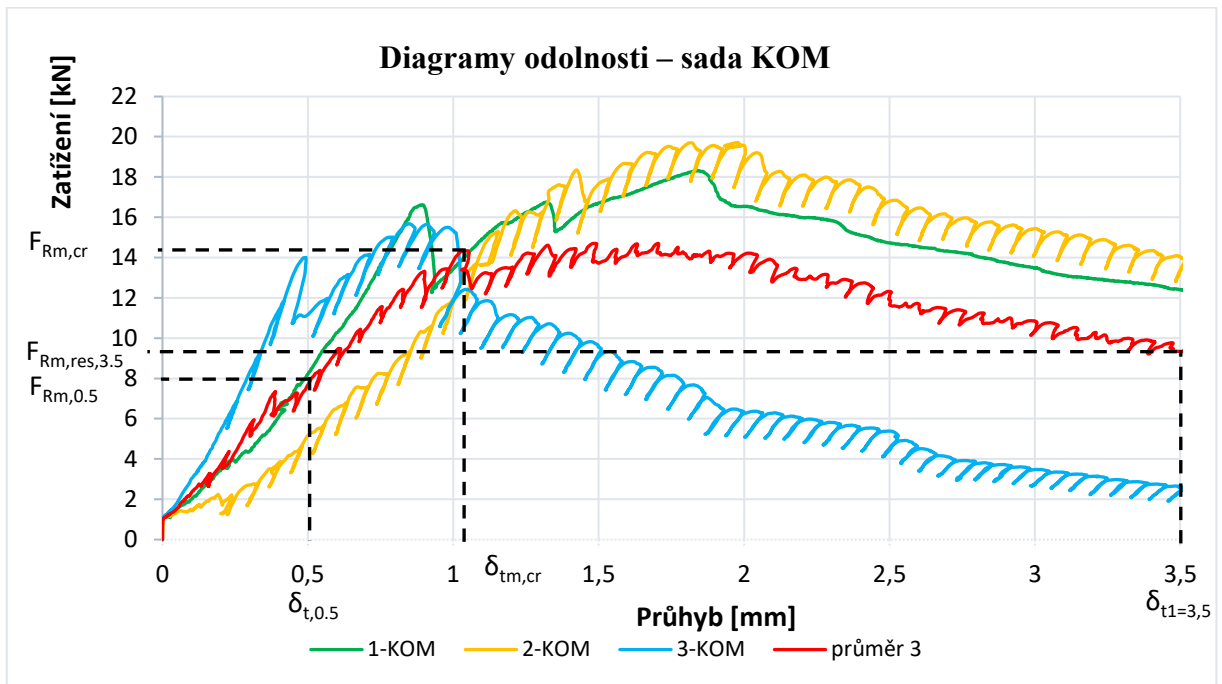
Z charakteristického diagramu odolnosti byly stanoveny hodnoty:

$$F_{Rk,cr} = 14,23 \text{ kN}$$

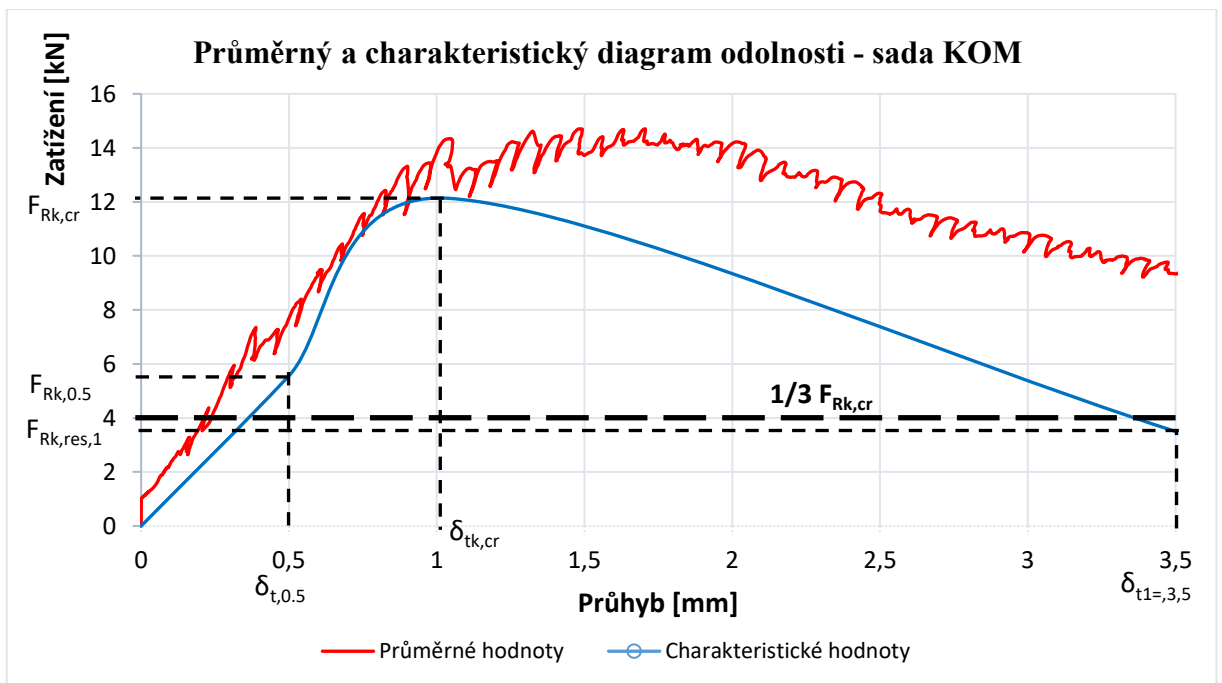
$$F_{Rk,0,5} = 6,07 \text{ kN}$$

$$F_{Rk,res,1} = 6,87 \text{ kN}$$

### 6.3.3 Pevnost v tahu za ohybu – sada KOM



Graf 11: Diagramy odolnosti – sada KOM



Graf 12: Průměrný a charakteristický diagram odolnosti – sada KOM

Z charakteristického diagramu odolnosti byly stanoveny hodnoty:

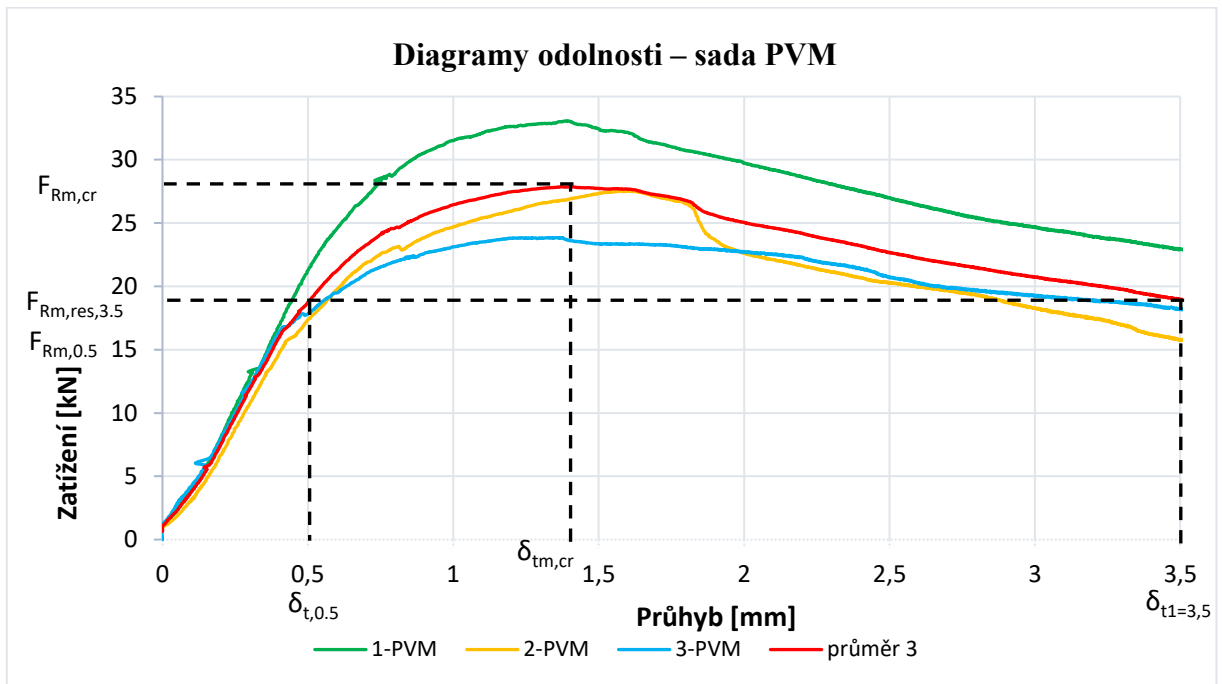
$$F_{Rk,cr} = 12,13 \text{ kN}$$

$$F_{Rk,0,5} = 5,56 \text{ kN}$$

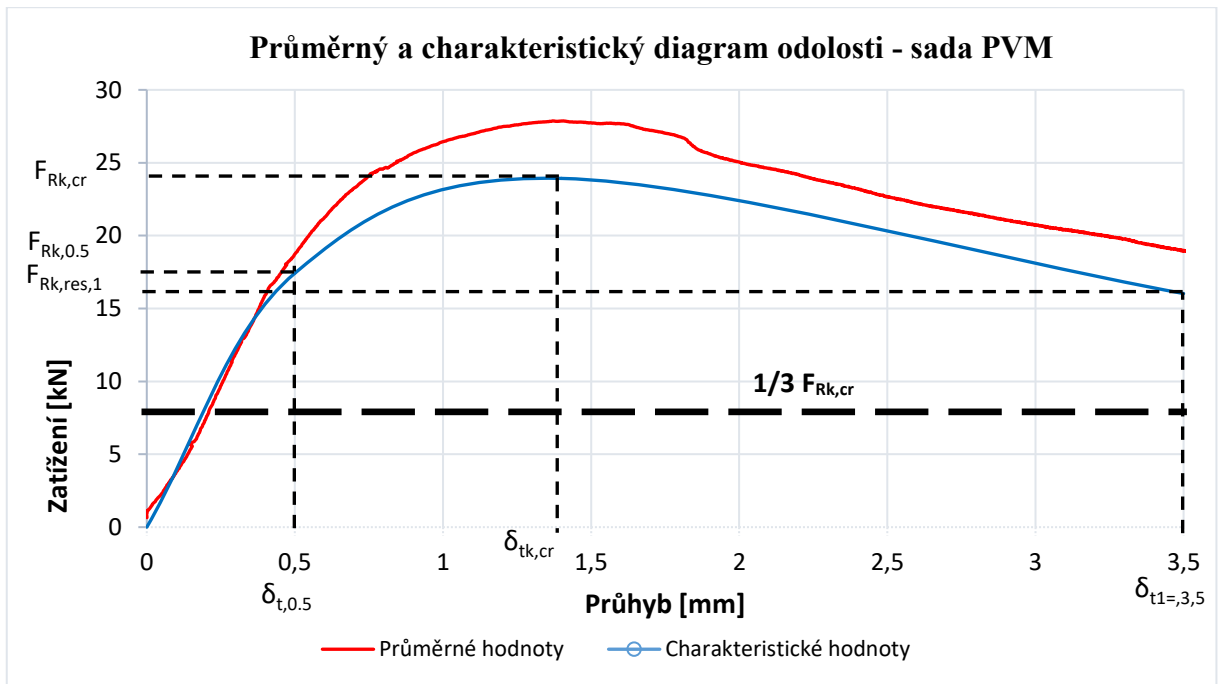
$$F_{Rk,res,1} = 3,5 \text{ kN}$$



### 6.3.4 Pevnost v tahu za ohybu – sada PVM



Graf 13: Diagramy odolnosti – sada PVM



Graf 14: Průměrný a charakteristický diagram odolnosti – sada PVM

Z charakteristického diagramu odolnosti byly stanoveny hodnoty:

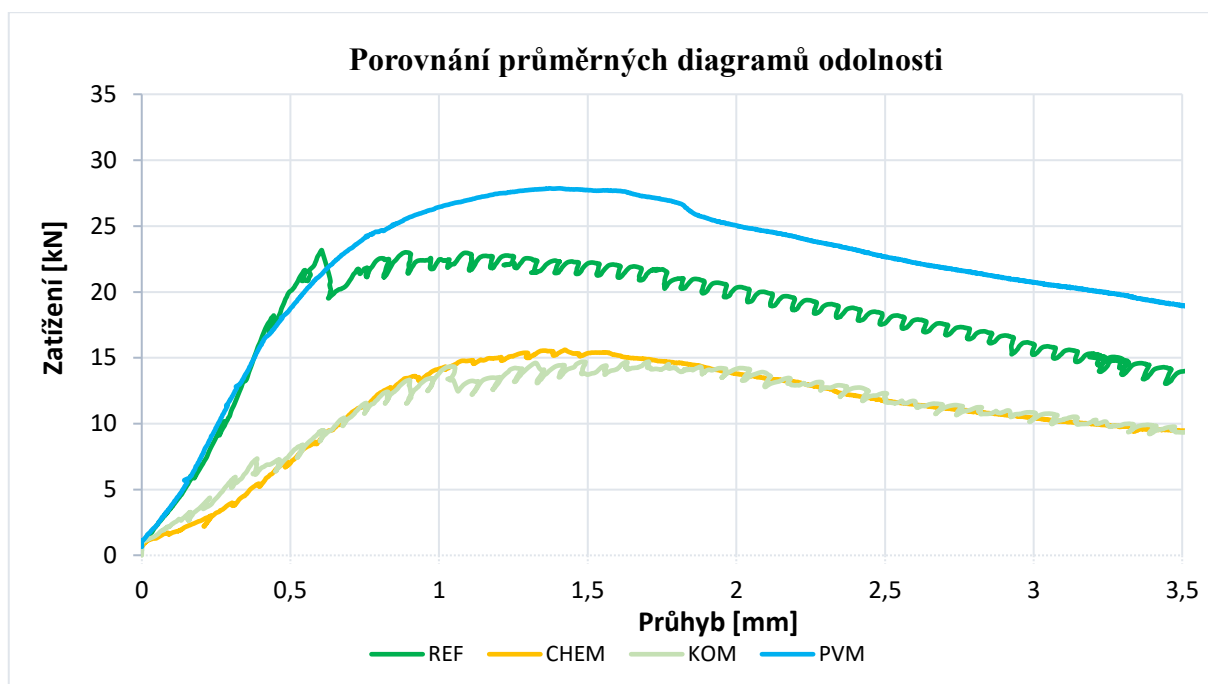
$$F_{Rk,cr} = 23,93 \text{ kN}$$

$$F_{Rk,0,5} = 17,43 \text{ kN}$$

$$F_{Rk,res,1} = 16,03 \text{ kN}$$

### 6.3.5 Porovnání dosažených výsledků

Nejvyšších průměrných hodnot zatížení bylo dosaženo u sady PVM ( $F_{Rm,cr} = 27,9$  kN). U sady REF byla průměrná hodnota odolnosti 23,2 kN. Sady CHEM (15,6 kN) a KOM (14,3 kN) dosahovaly obdobných hodnot zatížení. U sady KOM ovšem nebyla kvůli poklesu v reziduální oblasti (u tělesa č.3) splněna v charakteristickém diagramu podmínka ( $F_{Rk,res,i} \geq 1/3 F_{Rk,cr}$ ), která ověřuje možnost použití v nosných konstrukcích. Odvozené charakteristické hodnoty jsou uvedeny v kapitolách 6.3.1 až 6.3.4.



Graf 15: Porovnání průměrných diagramů odolnosti

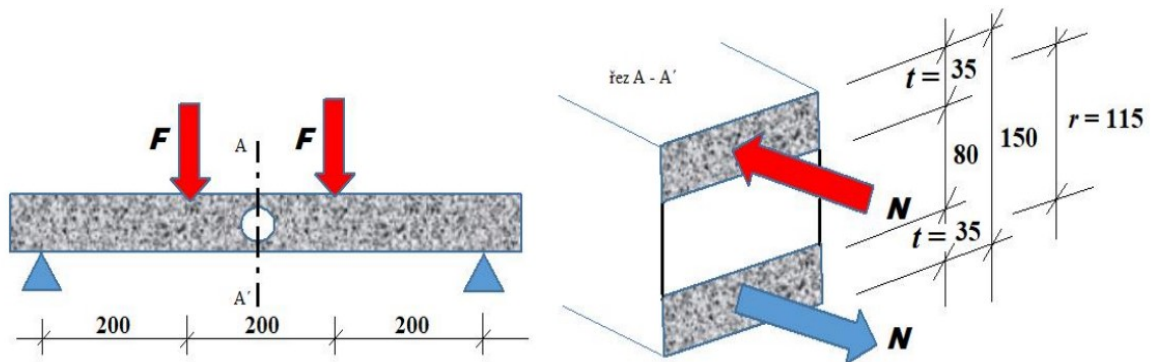
Z charakteristických hodnot odolností pro jednotlivé sady byly spočítány dle rovnic 11, 13 a 14 charakteristické pevnosti v tahu za ohybu a charakteristické reziduální pevnosti v dostředném tahu. Z vypočítané charakteristické pevnosti v tahu za ohybu byla dle vztahu 12 odvozena pevnost v dostředném tahu  $f_{fc,tk,cr}$ . Vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 18.

Tabulka 18: Porovnání pevností v tahu za ohybu a dostředném tahu – všechny sady

Sada	$f_{fc,tk,fl}$ [MPa]	$f_{fc,tk,0.5}$ [MPa]	$f_{fc,tk,res,1}$ [MPa]	$f_{fc,tk,cr}$ [MPa]
REF	3,4	1,3	0,6	2,3
CHEM	2,5	0,5	0,4	1,7
KOM	2,2	0,4	0,2	1,5
PVM	4,3	1,4	1,0	3,0

## 6.4 Pevnost v tahu za ohybu s kruhovou singularitou

Zkouška probíhala dle navrhované metodiky Fakulty stavební ČVUT v Praze [61]. Podle této metodiky je na zkušebních trácích o standardních rozměrech  $150 \times 150 \times 700$  mm vyvrtán kruhový otvor o průměru 80 mm, umístěný v oblasti středu rozpětí. Díky vyvrtanému otvoru dosahujeme rovnoměrného rozložení napětí. Uprostřed rozpětí vznikají dvě úzké oblasti (horní tlačená a spodní tažená). Ve spodní tažené oblasti je po výšce krčku dosaženo rovnoměrného rozložení napětí v čistě osovém tahu [61].

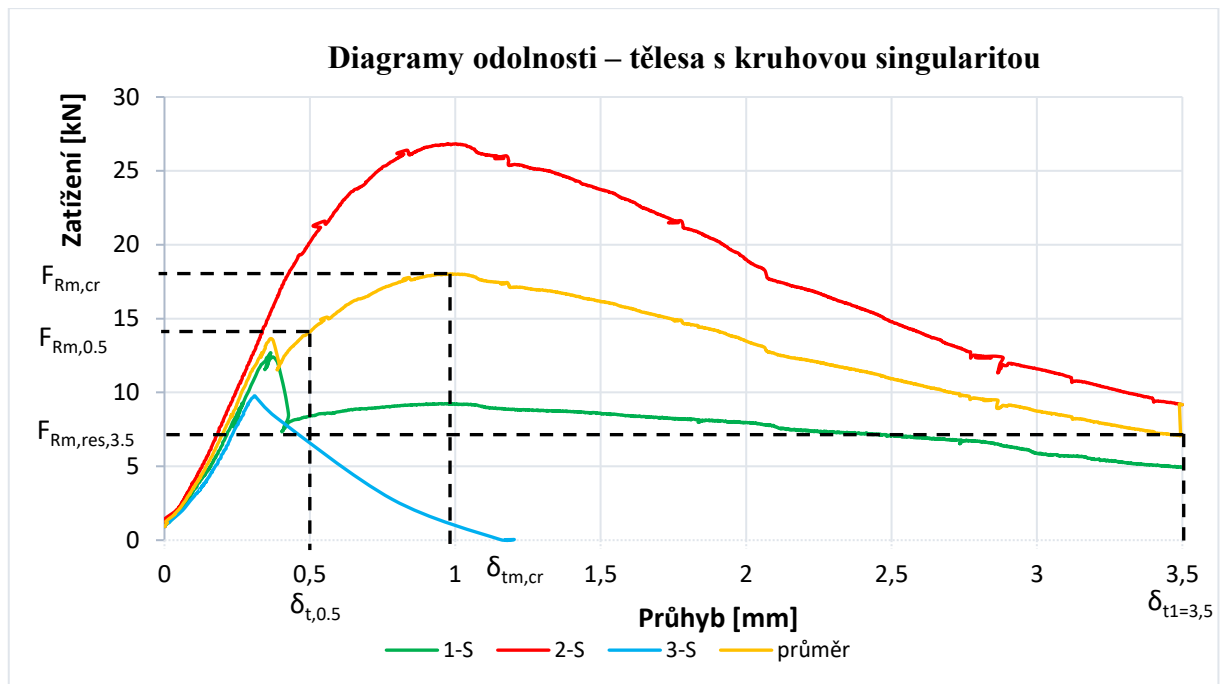


Obrázek 23: Schéma uspořádání zkoušky (vlevo) a axiální síly v krčcích (vpravo) [61]

Zkušební tělesa byla ve stáří 28 dní vyjmuta z folií a byly provedeny jádrové vývrty. Stáří těles v čase zkoušení bylo 31 dní. Zkoušení probíhalo stejně jako v případě tráců bez vývrtu (viz kapitola 6.3) na zkušebním lisu Controls 50-C1201/BFR v akreditované zkušební laboratoři Cemex Pardubice.



Obrázek 24: Jádrové vrtání (vlevo) a porušené těleso (vpravo) [vlastní foto]



Graf 16: Diagramy odolnosti – tělesa s kruhovou singularitou

Nejnižší hodnoty zatížení bylo dosaženo u tělesa 3-S (9,8 kN). Při porušení tělesa bylo zjištěno, že v oblasti krčků se nenacházejí téměř žádné drátky, čemuž odpovídá i průběh diagramu po vzniku trhliny. Průměrný diagram odolnosti byl proto vytvořen pouze z diagramů odolnosti těles 1-S a 2-S. Průměrná hodnota zatížení těchto těles byla 18 kN. Pomocí vztahů 15 a 16 byla spočítána síla v tažené ploše  $N$  a napětí v taženém prvku  $\sigma$ .

$$N = \frac{0,2 * F}{r} = \frac{0,2 * 9}{0,115} = 15,7 \text{ kN} \quad (15)$$

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{15,7 * 10^3}{5250} = 3,0 \text{ MPa} \quad (16)$$

kde:

$r$  je rameno vnitřních sil ( $r = 150 - 2 \times 17,5 = 115 \text{ mm} = 0,115 \text{ m}$ ) [m];

$A$  je vzdorující plocha horní a spodní oblasti [ $\text{mm}^2$ ].

Postup výpočtu je v tomto případě založen výhradně na rovnováze vnějších zatěžujících sil a jim vzdorujících napětí. Výsledky proto není nutné korigovat žádnými opravnými součiniteli jako například při výpočtu v předchozí kapitole (rovnice 12), kde byla výsledná hodnota pevnosti v dostředném tahu pro sadu REF 2,3 MPa [61].



## 6.5 Hloubka průsaku tlakovou vodou

Zkouška probíhala v souladu s normou ČSN EN 12390-8 [40]. Zkušebními tělesy byly čtyři krychle o délce hrany 150 mm. Plochy zkušebních těles vystavené působení vodního tlaku byly ihned po odformování zdrsněny ocelovým kartáčem a dále ošetřovány dle kapitoly 3.

Ve stáří 31 dnů byla tělesa upnuta do zkušebního zařízení a po dobu 72 hodin vystavena působení vodního tlaku o velikosti  $(500 \pm 50)$  kPa. Po uplynutí stanovené doby byla tělesa vyjmuta ze zkušebního zařízení a rozlomena na zkušebním lisu v polovině délky, kolmo k povrchu, na který tlak působil. Hranice průsaku byla na jednotlivých zkušebních tělesech vyznačena fixou. Hloubky největších průsaků byly změřeny posuvným měřítkem a zaznamenány do tabulky 19.



Obrázek 25: Zkušební tělesa vystavená působení vodního tlaku [vlastní foto]

Tabulka 19: Maximální hodnoty průsaku na jednotlivých tělesech

Vzorek	Hmotnost vzorku [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Průsak [mm]
1-V5	6,854	2 040	<b>13</b>
2-V5	6,702	1 990	<b>11</b>
3-V5	6,685	2 000	<b>8</b>
4-V5	6,902	2 030	<b>13</b>

- **Vyhodnocení zkoušky**

Z naměřených hodnot v tabulce 19 je patrné, že největší naměřená hodnota průsaku je **13 mm**, která byla dosažena u těles 1-V5 a 4-V5. Dle tabulky F.1.2 normy ČSN P 73 2404 splňují všechny naměřené hodnoty požadavky i pro nejpřísnější prostředí (XF3 a XF4), kde je přípustná hodnota průsaku maximálně **20 mm**.



Obrázek 26: Hloubka průsaku na tělese 1-V5 [vlastní foto]

## 6.6 Stanovení mrazuvzdornosti

Stanovení mrazuvzdornosti probíhalo podle ČSN 73 1322 [44]. Zkušebními tělesy byly na rozdíl od normového postupu **vyztužené** trámce o rozměrech  $100 \times 100 \times 400$  mm. Celkem bylo vyrobeno 12 trámců (tři referenční a devět zmrazovaných). Trámce byly po odbednění uloženy 25 dní ve vlhkém prostředí. Dále byla tělesa zvážena i změřena a vložena na 3 dny do vody. Před začátkem cyklování byla tělesa vyjmuta z vody, povrchově osušena a znovu zvážena. Referenční trámce byly v tomto stáří zkoušeny na pevnost v tahu ohybem a pevnost v tlaku na koncích trámců (krychle o délce hrany 100 mm).

Zmrazované trámce byly umístěny do zkušebního zařízení KD 20.3, které bylo pro snadnější nastavení a lepší monitorování průběhu zkoušky připojeno k počítači. Tělesa byla zmrazována 4 hodiny při teplotě  $-20$  °C a rozmrazována 2 hodiny ve vodě o teplotě  $+20$  °C. Dosažení požadovaných teplot bylo kontrolováno prostřednictvím pěti čidel rovnoměrně rozmístěných ve zkušebním prostoru. Samotný průběh zkoušky byl průběžně kontrolován prostřednictvím zaznamenávaného grafu (Graf 17). Po každých 50 cyklech byla vždy jedna sada trámců vyjmuta, povrchově osušena, zvážena, změřena a zkoušena na pevnost v tahu ohybem a pevnost v tlaku na koncích trámců. Naměřené hodnoty byly zaznamenány do příslušných tabulek níže.

Stanovení pevnosti v tahu ohybem probíhalo podle ČSN EN 12390-5 [45]. Na zkušebním lisu Matest s řídicí jednotkou Servotronic byla nastavena konstantní rychlost zatěžování  $0,05$  MPa/s. Trámce byly umístěny do lisu centricky tak, aby směr zatěžování byl kolmý na směr ukládání betonu. Výsledná pevnost v tahu ohybem byla vypočtena dle vztahu 17. Z průměrných hodnot pevnosti v tahu ohybem byl následně vypočítán součinitel mrazuvzdornosti po daných cyklech. Beton byl pak vyhodnocen jako mrazuvzdorný na ten počet cyklů, kdy byl součinitel mrazuvzdornosti větší než 75 %.

$$f_{cf,fl} = \frac{F * l}{d_1 * d_2^2} \quad (17)$$

kde:

$f_{cf,fl}$  je pevnost v tahu ohybem [MPa],

F je maximální zatížení [N],

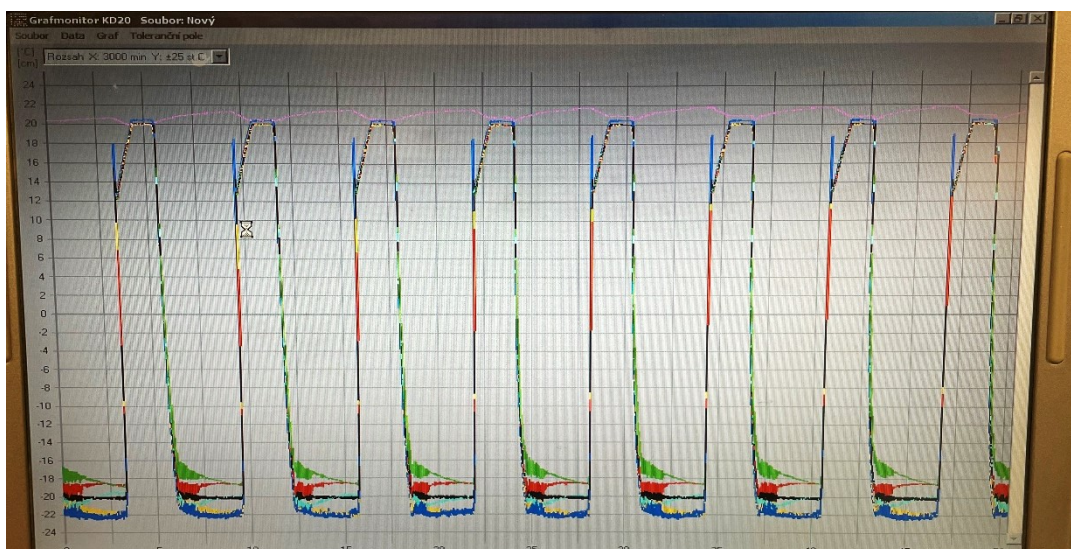
l je vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm],

$d_1$  a  $d_2$  jsou rozměry příčného řezu tělesa [mm].





Obrázek 27: Rozložení těles v cyklovacím zařízení [vlastní foto]



Graf 17: Grafické schéma zkoušky [vlastní foto]



Obrázek 28: Pevnost v tahu ohybem po 50 cyklech [vlastní foto]

## 6.6.1 Referenční sada

Tabulka 20: Naměřené hodnoty na referenčních (nezmrazovaných) tělesech

Sada trámců		Jednotky	Označení těles		
Referenční sada			1	2	3
rozměry těles	šířka ( $d_2$ )	mm	99,7	99,2	99,8
	výška ( $d_1$ )	mm	99,1	99,9	100,7
	délka	mm	400	401	400
hmotnost s přirozenou vlhkostí		kg	7,824	7,904	7,865
objemová hmotnost		kg/m <sup>3</sup>	1 980	1 990	1 960
hmotnost po nasycení vodou		kg	7,841	7,921	7,881
maximální síla v tahu ohybem		kN	15,058	13,131	13,737
pevnost v tahu ohybem		MPa	4,6	4,0	4,1
<b>průměrná pevnost v tahu ohybem</b>		<b>MPa</b>	<b>4,2</b>		
maximální síla v tlaku (1. konec)		kN	316,934	334,808	393,719
tlačná plocha		mm <sup>2</sup>	9 805,675	9 940	10 029,9
pevnost v tlaku (1. konec)		MPa	32,3	33,7	39,3
maximální síla v tlaku (2. konec)		kN	330,711	352,949	384,012
tlačná plocha		mm <sup>2</sup>	10 120,35	10 190,9	10 059,6
pevnost v tlaku (2. konec)		MPa	32,7	34,6	38,2
<b>průměrná pevnost v tlaku</b>		<b>MPa</b>	<b>35,1</b>		

## 6.6.2 Sada vystavená 50 cyklům

Tabulka 21: Naměřené hodnoty po 50 cyklech zmrazování a rozmrazování

Sada trámů		Jednotky	Označení těles		
Po 50 cyklech			4	5	6
rozměry těles	šířka (d <sub>2</sub> )	mm	99,1	100,7	100,2
	výška (d <sub>1</sub> )	mm	101,1	100,3	98,9
	délka	mm	400	401	401
hmotnost s přirozenou vlhkostí		kg	7,871	8,189	7,856
objemová hmotnost		kg/m <sup>3</sup>	1 960	2 020	1 980
hmotnost po nasycení vodou		kg	7,889	8,213	7,876
hmotnost po cyklování		kg	7,862	8,128	7,864
maximální síla v tahu ohybem		kN	15,042	15,197	16,064
pevnost v tahu ohybem		MPa	4,5	4,5	4,9
<b>průměrná pevnost v tahu ohybem</b>		<b>MPa</b>	<b>4,6</b>		
maximální síla v tlaku (1. konec)		kN	324,18	440,37	363,92
tlačná plocha		mm <sup>2</sup>	10 080	10 019,65	9 989,28
pevnost v tlaku (1. konec)		MPa	32,2	44,0	36,4
maximální síla v tlaku (2. konec)		kN	313,96	427,65	429,42
tlačná plocha		mm <sup>2</sup>	10 069,92	10 125,25	10 019,92
pevnost v tlaku (2. konec)		MPa	31,2	42,2	42,9
<b>průměrná pevnost v tlaku</b>		<b>MPa</b>	<b>38,1</b>		

Součinitel mrazuvzdornosti po 50 cyklech je **110 %**.

### 6.6.3 Sada vystavená 100 cyklům

Tabulka 22: Naměřené hodnoty po 100 cyklech zmrazování a rozmrazování

Sada trámců		Jednotky	Označení těles		
Po 100 cyklech			7	8	9
rozměry těles	šířka (d <sub>2</sub> )	mm	100	100,1	100,8
	výška (d <sub>1</sub> )	mm	99,4	100,5	99,5
	délka	mm	400	400	401
hmotnost s přirozenou vlhkostí		kg	7,715	7,833	8,279
objemová hmotnost		kg/m <sup>3</sup>	1 940	1 950	2 060
hmotnost po nasycení vodou		kg	7,736	7,853	8,302
hmotnost po cyklování		kg	7,710	7,820	8,295
maximální síla v tahu ohybem		kN	10,955	13,921	16,775
pevnost v tahu ohybem		MPa	3,3	4,1	5,0
<b>průměrná pevnost v tahu ohybem</b>		<b>MPa</b>	<b>4,1</b>		
maximální síla v tlaku (1. konec)		kN	332,49	351,60	432,14
tlačná plocha		mm <sup>2</sup>	10 124,44	10 064,93	10 190,88
pevnost v tlaku (1. konec)		MPa	32,8	34,9	42,4
maximální síla v tlaku (2. konec)		kN	327,36	403,10	435,32
tlačná plocha		mm <sup>2</sup>	9 918,154	9 969,12	9 970,02
pevnost v tlaku (2. konec)		MPa	33,0	40,4	43,7
<b>průměrná pevnost v tlaku</b>		<b>MPa</b>	<b>37,9</b>		

Součinitel mrazuvzdornosti po 100 cyklech je **98 %**.

## 6.6.4 Sada vystavená 150 cyklům

Tabulka 23: Naměřené hodnoty po 150 cyklech zmrazování a rozmrazování

Sada trámců		Jednotky	Označení těles		
Po 150 cyklech			10	11	12
rozměry těles	šířka (d <sub>2</sub> )	mm	99,4	100,7	101,1
	výška (d <sub>1</sub> )	mm	100,1	100,4	100,8
	délka	mm	400	400	400
hmotnost s přirozenou vlhkostí		kg	7,941	7,931	8,043
objemová hmotnost		kg/m <sup>3</sup>	2 000	1 960	1 970
hmotnost po nasycení vodou		kg	7,965	7,950	8,066
hmotnost po cyklování		kg	8,051	7,938	8,115
maximální síla v tahu ohybem		kN	12,012	14,085	4,578
pevnost v tahu ohybem		MPa	3,6	4,2	1,3
<b>průměrná pevnost v tahu ohybem</b>		<b>MPa</b>	<b>3,0</b>		
maximální síla v tlaku (1. konec)		kN	340,62	311,41	285,29
tlačná plocha		mm <sup>2</sup>	10 124,44	10 185,85	10 170,52
pevnost v tlaku (1. konec)		MPa	33,6	30,6	28,1
maximální síla v tlaku (2. konec)		kN	388,46	381,13	330,83
tlačná plocha		mm <sup>2</sup>	9 949,64	10 060,08	10 281,95
pevnost v tlaku (2. konec)		MPa	39,0	37,9	32,2
<b>průměrná pevnost v tlaku</b>		<b>MPa</b>	<b>33,6</b>		

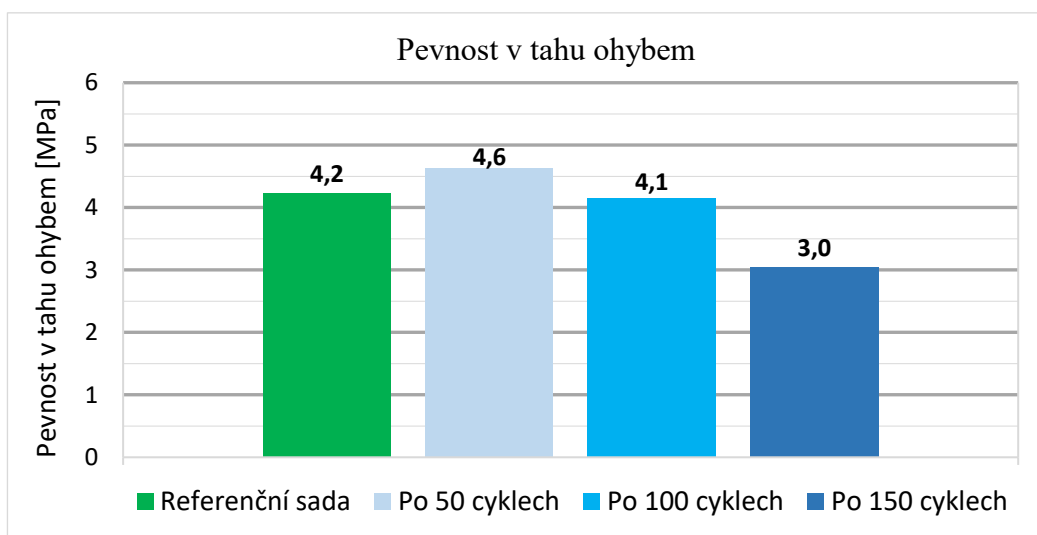
Součinitel mrazuvzdornosti po 150 cyklech je **72 %**.



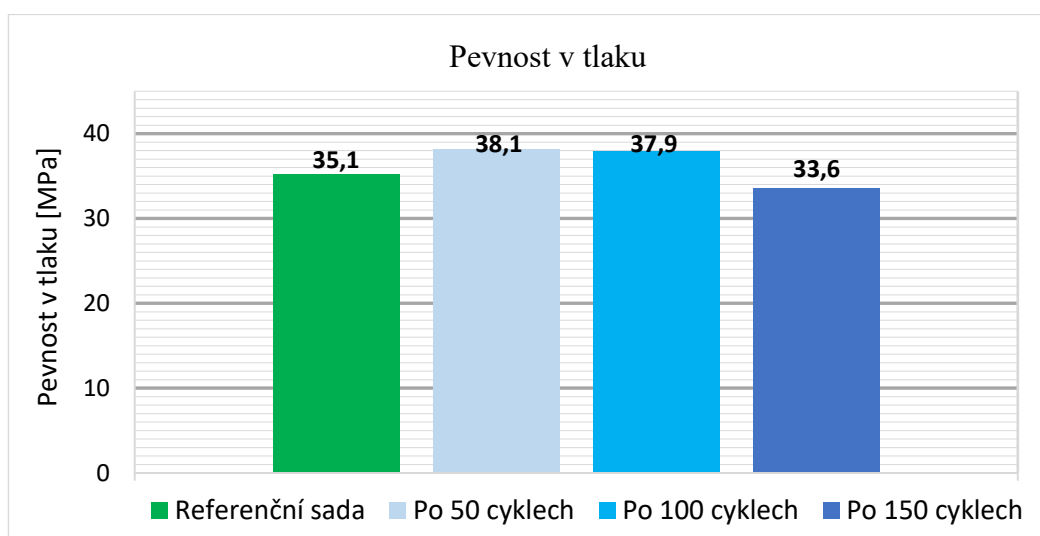
### 6.6.5 Porovnání dosažených hodnot

Tělesa byla vystavena celkem 150 cyklům. Průměrná pevnost v tahu ohybem byla u referenčních těles 4,2 MPa. Součinitel mrazuvzdornosti dosahoval po 50 cyklech hodnoty **110 %** (pevnost 4,6 MPa). Po 100 cyklech byl součinitel mrazuvzdornosti **98 %** (pevnost 4,1 MPa). Po 150 cyklech došlo k poklesu pevnosti na 3,0 MPa a vypočítaný součinitel mrazuvzdornosti se dostal pod hraniční hodnotu na **72 %**. Výsledkem zkoušky je tedy stupeň mrazuvzdornosti **T100**. Z hlediska požadavku ČSN P 73 2404 (tab. F.1.2) tento výsledek splňuje požadovaný stupeň mrazuvzdornosti pro stupeň vlivu prostředí **XF1**.

V případě pevnosti v tlaku byla u referenčních těles průměrná pevnost 35,1 MPa. Nejnižší průměrná pevnost byla zaznamenána po 150 cyklech (33,6 MPa).



Graf 18: Porovnání dosažených pevností v tahu ohybem



Graf 19: Porovnání dosažených pevností v tlaku (krychle 100 mm)



## 6.7 Stanovení odolnosti proti působení vody a CHRL

Zkouška probíhala v souladu s normou ČSN 73 1326 [48]. Celkem byly vybetonovány tři válce normových rozměrů (průměr 150 mm, výška 300 mm). Ve stáří 30 dnů byl z každého tělesa proveden 50 mm tlustý odřez z horního a jeden odřez ze spodního povrchu (4-E). Na boční část zkušebních těles bylo nanášeno lepidlo a přilepena vodotěsná objímka tak, aby přesahovala přes povrch těles minimálně 2 cm. Objímka byla ještě dotažena montážní páskou a prostor mezi povrchem a objímkou byl vyplněn silikonovým tmelem.

Na připravená zkušební tělesa byla nalita voda a ponechána po dobu 48 hodin z důvodu ověření vodotěsnosti objímky. Po uplynutí doby byla voda slita a její zbytky odstraněny stlačeným vzduchem. Tělesa byla následně zalita 3 % roztokem NaCl v tloušťce přibližně 5 mm a umístěna do zkušebního zařízení.

Cyklování probíhalo v akreditované zkušební laboratoři (Ústavu stavebního zkušebnictví v Pardubicích) ve zkušebním zařízení KD 20.5. Jeden cyklus trval dle normy 6 hodin a byl složen ze tří hodin při teplotě - 18 °C a tří hodin při teplotě + 5 °C. Po uplynutí 25 cyklů byla tělesa vyndána, slaný roztok slit a uvolněné částice splaveny do jednotlivých misek prostřednictvím stříčky. Misky byly sušeny v sušárně při teplotě 105 °C až do dosažení konstantní hmotnosti. Po vysušení byla stanovena hmotnost částic s přesností na 0,1 g a přepočtem byl zjištěn odpad betonu v g/m<sup>2</sup>.

I přes velké hodnoty odpadů po 25 cyklech bylo ve zkoušce pokračováno. Očištěné zkušební vzorky byly opět zality roztokem NaCl a podrobeny dalším 25 cyklům. Po dokončení celkem 50 cyklů byla zkouška ukončena a naměřené hodnoty byly zaznamenány do tabulky 24.



Obrázek 29: Zkušební vzorky před začátkem cyklování [vlastní foto]



Obrázek 30: Zkušební vzorky a odpady po 25 cyklech [vlastní foto]



Obrázek 31: Zkušební vzorky a odpady po 50 cyklech [vlastní foto]

Tabulka 24: Odolnost proti působení vody a CHRL

Označení zkušebních těles			1	2	3	4-E
rozměry zkušebních těles	průměr	mm	149,2	149,7	150,1	150
	výška	mm	52,1	52,4	52,9	50,8
plocha zkušebních těles		m <sup>2</sup>	0,0175	0,0176	0,0177	0,0177
hmotnost s přirozenou vlhkostí		g	1 786,5	1 791,2	1 874,1	1 757,5
hmotnost prázdné misky		g	77,58	77,88	74,45	77,52
objemová hmotnost		kg/m <sup>3</sup>	1 960	1 940	2 000	1 960
odpad po cyklech v gramech		25	150,5	105,1	152,0	142,2
		50	412,4	249,3	323,8	348,6
		75	-	-	-	-
odpad po cyklech v g/m <sup>2</sup>		25	8598,9	5973,3	8589,8	8036,2
		50	23563,4	14163,6	18294,9	19696,0
		75	-	-	-	-

- **Vyhodnocení zkoušky**

Nejvyšší hodnota odpadu byla zaznamenána po 50 cyklech u tělesa č. 1 (23 563,4 g/m<sup>2</sup>). Nejnížší hodnoty odpadu dosahovalo těleso č. 2 (14 163,6 g/m<sup>2</sup>). Těleso 4-E, které bylo jako jediné vytvořené odřezem ze spodní plochy dosahovalo podobných hodnot odpadu jako tělesa vytvořená dle normy.

Z výsledných hodnot je patrné, že veškeré vzorky vykazovaly velmi špatnou odolnost proti působení CHRL. Hodnoty odpadu u všech těles přesahovaly několikanásobně maximální dovolené hodnoty uvedené v ČSN P 73 2404, a to již po 25 cyklech. Beton v tomto složení tedy **nesplňuje požadavky** pro prostředí s výskytem rozmrazovacích prostředků (XF2 a XF4).



## ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala problematikou trvanlivosti lehkých samozhutitelných drátkobetonů. Cílem teoretické části bylo shrnout historický a současný stav poznání v oblasti LWSCC.

V praktické části práce byla zkoumána receptura typového LWSCC s umělým kamenivem Rugen. Receptura byla na základě výsledků závěrečné práce pana Ing. Kosinky modifikována pouze přidáním ocelových vláken v množství  $50 \text{ kg/m}^3$ . Vzhledem k vysoké nasákavosti kameniva Rugen bylo při výrobě betonu přistoupeno k dávkování plně nasyceného kameniva. Vlastnosti čerstvého betonu byly ověřovány prostřednictvím zkoušek sednutí-rozlitím, obsahu vzduchu a objemových hmotností čerstvého betonu. Při zkoušce sednutí-rozlitím se konzistence pohybovala v požadovaném stupni **SF1**, pouze u dvou záměsí byla ve stupni **SF2**. Příčinou rozdílné konzistence byla pravděpodobně voda ulpívající na povrchu lehkého kameniva. Objemová hmotnost čerstvého betonu se pohybovala v rozmezí **2 000 až 2 400 kg/m<sup>3</sup>**. Průměrný obsah vzduchu v čerstvém betonu byl **2,3 %**.

U ztvrdlého betonu byla stanovena objemová hmotnost ve všech třech stavech. Objemová hmotnost ve stavu nasycení vodou se pohybovala v rozmezí **2 030 až 2 060 kg/m<sup>3</sup>**, po vysušení v sušárně byla naměřena objemová hmotnost v intervalu **1 810 až 1 840 kg/m<sup>3</sup>**, což odpovídá třídě objemové hmotnosti **D 2,0**. Objemová hmotnost ve stavu, jak byl dodán byla stanovena v rámci sady REF a průměrná hodnota byla **2 000 kg/m<sup>3</sup>**. Pevnostní třída betonu byla ověřena prostřednictvím zkoušek pevnosti v tlaku na válcích i na krychlích (sada REF). Průměrná pevnost v tlaku na válcích byla **30 MPa**. Průměrná pevnost v tlaku na krychlích byla **34,4 MPa**.

Stanovení pevnosti v osovém tahu probíhalo podle navrhované metodiky Fakulty stavební ČVUT v Praze [61]. Výsledná hodnota byla **3,0 MPa**. Hodnota pevnosti v tahu určená přepočtem z charakteristické pevnosti v tahu za ohybu u těles bez singularit pro sadu REF byla **2,3 MPa**.

Hlavním cílem diplomové práce bylo zkoumání trvanlivosti v prostředích XA a XF. Pro analýzu byly použity standardní (normové) i nestandardní postupy.

### **Nestandardní postupy**

Jedním z dalších cílů práce bylo vytvořit podmínky, které by simulovaly reálná prostředí XA a XF. Prostředí XA bylo simulováno potopením těles do 4,5 % vodného roztoku HCl, prostředí XF bylo simulováno vystavením těles periodickému působení vody v kombinaci

s působením povětrnostních vlivů. Zvláštním případem byla sada KOM, která kombinovala obě prostředí. U sad těles vystavených experimentálním prostředím byl sledován úbytek hmotnosti, pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu.

Velké úbytky hmotností byly zaznamenány u sad vystavených působení HCl. Sada CHEM měla průměrný úbytek 448 g a sada KOM 367 g. Tělesa vystavená tomuto působení byla značně poškozena po celém obvodu, který byl ve styku s HCl. Zrna umělého kameniva, která se nacházela na povrchu byla zcela rozpuštěna. Po rozlomení těles bylo však zjištěno, že poškození bylo pouze povrchového rázu a hloubka porušení byla v jednotkách milimetrů. Porušení těles je patrné na obrázku 16. Průměrný úbytek hmotnosti u sady PVM byl 58 g.

U pevnosti v tlaku došlo u sad CHEM a KOM k minimálnímu poklesu pevnosti. Průměrná pevnost byla u sady CHEM **33,5 MPa** a u sady KOM **33,1 MPa**. U sady PVM došlo dokonce k nárůstu pevnosti na **39,1 MPa**. Stáří sad CHEM, KOM a PVM v době zkoušení bylo 205 dní. Naproti tomu sada REF byla zkoušena ve stáří 27 dní a dosahovala pevnosti **34,4 MPa**. Z hlediska pevností v tlaku lze podle dosažených výsledků konstatovat, že daná experimentální prostředí měla na pevnost v tlaku zanedbatelný vliv.

U zkoušky pevnosti v tahu za ohybu bylo nejvyšších průměrných hodnot zatížení dosaženo u sady PVM (27,9 kN). Vypočítaná pevnost v tahu za ohybu dosahovala hodnoty **4,3 MPa**. Sada REF měla pevnost v tahu za ohybu **3,4 MPa**. Nárůst pevnosti u sady PVM může mít stejnou příčinu jako v případě pevnosti v tlaku (větší stáří těles a minimální poškození sady PVM). Sady CHEM a KOM dosahovaly výrazně nižších zatížení. Vypočítané pevnosti v tahu za ohybu byly **2,5 MPa** u CHEM a **2,2 MPa** u KOM. Pokud bychom pro vyhodnocení zkoušky použili stejná kritéria jako v případě hodnocení mrazuvzdornosti (poměr zatěžovaných a referenčních trámců musí být větší než 75 %), sady CHEM a KOM by dosáhly hodnot 74 % a 65 %. Požadovaná hodnota by tak byla splněna pouze u sady PVM (126 %).

### **Standardní (normové) postupy**

Pro ověření trvanlivosti betonu byly provedeny normové zkoušky: stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou, stanovení mrazuvzdornosti a stanovení odolnosti proti působení vody a CHRL. Z hlediska hloubky průsaku tlakovou vodou byla největší naměřená hodnota **13 mm**, která byla dosažena u těles 1-V5 a 4-V5. Všechny hodnoty tedy splňovaly požadavky i pro nejprísnejší prostředí XF4.

V případě stanovení mrazuvzdornosti došlo u zmrazovaných trámců po 50 cyklech k nárůstu pevnosti v tlaku i tahu ohybem. Součinitel mrazuvzdornosti dosahoval po 50 cyklech hodnoty **110 %**. Po 100 cyklech byl zaznamenán mírný pokles obou pevností. Součinitel

mrazuvzdornosti po 100 cyklech byl **98 %**. Po 150 cyklech se součinitel mrazuvzdornosti snížil na **72 %**, rovněž byly zaznamenány i trhlinky ve struktuře betonu a nejnižší hodnoty obou pevností. Výsledkem zkoušky je tedy stupeň mrazuvzdornosti **T100**. Tento stupeň mrazuvzdornosti **splňuje** požadavek normy pro použití ve stupni vlivu prostředí **XF1**.

U zkoušky odolnosti proti působení vody a CHRL byly u všech těles zaznamenány velké odpady, které několikanásobně překračovaly odpady dovolené normou. Nejmenší hodnota odpadu byla 14 163,6 g/m<sup>2</sup>. U této zkoušky se tedy prokázalo, že zkoumaný beton **není rozhodně vhodný** do prostředí s výskytem rozmrazovacích prostředků (**XF2 a XF4**). Příčinou zhoršené odolnosti proti působení vody a CHRL mohou být trhlinky, které se vyskytovaly na povrchu vzorků již před začátkem cyklování. Trhlinky jsou viditelné například na obrázku 29. Příčinou zhoršené odolnosti rovněž může být dávkování lehkého kameniva v nasyceném stavu.

### **Zatřídění do stupňů vlivů prostředí**

Na základě provedených normových zkoušek je možné zkoumaný LWSFRSCC zatřídít jako vhodný do stupňů vlivu prostředí **XA1 a XF1**. Vzhledem k vyhovujícím výsledkům při zkoušce hloubky průsaku tlakovou vodou by bylo možné také uvažovat o použití betonu v prostředích XC1 až XC3, případně XD1 a XD2.

V době dokončení práce bylo však zaznamenáno vydání nové verze ČSN P 73 2404 [62], která nově požaduje u stupně vlivu prostředí XF1 provést zkoušku odolnosti proti působení vody a CHRL podle ČSN 73 1326. Požaduje se provést 50 cyklů (u metody C), přičemž maximální dovolený odpad je 1 250 g/m<sup>2</sup>. Vzhledem k nevyhovujícím výsledkům při této zkoušce by beton v tomto složení nově nesplnil podmínky pro použití v XF1.

Ke zlepšení trvanlivosti zkoumaného LWSFRSCC v prostředí XF by přispělo dávkování suchého lehkého kameniva, případně alespoň dávkování kameniva se stupněm nasycení nižším než 90 %. Souvislosti mezi dávkováním suchého kameniva a mrazuvzdorností jsou podrobněji popsány v kapitole 4.1.3. Dávkování suchého lehkého kameniva s sebou však nese problémy související s odběrem záměsové vody z betonu, rovněž by mohla nastat obrácená segregace lehkého kameniva směrem vzhůru. Pro zlepšení trvanlivosti by tedy byla výhodnější další modifikace typové receptury přidáním provzdušňujících přísad. Pro zlepšení trvanlivosti v prostředí XA by bylo kromě provzdušňujících přísad možné ještě aplikovat síranovzdorný cement SR. V případě záměny vstupních surovin je nutné provést optimalizaci receptury.



## CITACE

- [1] HUBERTOVIÁ, Michala. Lehký beton. *Beton: Betonové konstrukce 21. století - betony s přidanou hodnotou*. Praha: Beton TKS, s.r.o, **2012**(7), 106-119. ISSN 12133116.
- [2] THIENEL, Karl-Christian, Timo HALLER a Nancy BEUNTNER. Lightweight Concrete—From Basics to Innovations. *Materials* [online]. 2020, **13**(5) [cit. 2021-09-05]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13051120
- [3] TGB Metrostav. In: *TBG Metrostav* [online]. 2017 [cit. 2020-09-05]. Dostupné z: [http://www.tbg-metrostav.cz/fileadmin/user\\_upload/napsali\\_o\\_nas/pres\\_55\\_let\\_transportbetonu\\_TBG\\_MTS.pdf](http://www.tbg-metrostav.cz/fileadmin/user_upload/napsali_o_nas/pres_55_let_transportbetonu_TBG_MTS.pdf)
- [4] DE SCHUTTER, Geert. *Samozhutnitelný beton*. Praha: ČBS, Česká betonářská společnost ČSSI, 2008. ISBN 978-80-87158-12-8.
- [5] ČSN EN 13055. *Pórovité kamenivo*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [6] ŠČUČKA, Jiří a Petr MARTINEC. *Stavební hmoty 1* [online]. 2013 [cit. 2020-08-12]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~khe0007/Predmety/Stavebni\\_hmoty\\_II/Scucka\\_Martinec-SH1-Betony.pdf](http://homel.vsb.cz/~khe0007/Predmety/Stavebni_hmoty_II/Scucka_Martinec-SH1-Betony.pdf)
- [7] PAVLÍKOVÁ, Milena a Martin KEPPERT. *Chemie: chemie stavebních materiálů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04237-3.
- [8] ŽELIEZKO, Petr. *Sopky - vše o vulkánech* [online]. In: . [cit. 2021-06-09]. Dostupné z: <https://www.mundo.cz/sopky>
- [9] Liapor: Co je Liapor. In: *Liapor* [online]. Vintířov [cit. 2021-08-10]. Dostupné z: <https://www.liapor.cz/co-je-liapor>
- [10] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty* [online]. 4.vydání. Praha, 2018 [cit. 2019-02-01]. ISBN 978-80-260-4972-2. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodas/sh/SH4v1.pdf>
- [11] Agloporit: Lehké umělé kamenivo určené pro stavebnictví. In: *Agloporit* [online]. [cit. 2021-08-10]. Dostupné z: <http://agloporit.cz/hlavni-vyhody-umele-kamenivo/>
- [12] Rugen: Lehké umělé kamenivo. In: *Beton.cz* [online]. Praha: CEMEX Czech Republic, 2015 [cit. 2021-08-10]. Dostupné z: <https://www.beton.cz/files/Default/cemex-rugen-letak.pdf>

- [13] SUCHÁNEK, Vladimír. *Experimentální analýza speciálních betonů vystavených extrémním teplotním namáháním*. Pardubice, 2018. Disertační práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Jiří Pokorný.
- [14] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Přeložil Vlastimil BÍLEK, přeložil Halina SZKLORZOVÁ. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [15] ČSN EN 206+A1. *Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [16] HELA, Rudolf. *Technologie betonu I* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005 [cit. 2020-09-15]. Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BJ04-Technologie%20betonu%20I/technologie%20betonu%20I.pdf>
- [17] LACHEMI, M., K.M.A HOSSAIN, N. BOUZOUBA a V. LAMBROS. Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement paste. *Cement and Concrete Research* [online]. Elsevier Ltd, 2004, **34**(2), 185-193 [cit. 2021-10-23]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/S0008-8846(03)00233-3
- [18] VÍTEK, Jan. *Samozhutnitelný beton pro mostní objekty pozemních komunikací: schváleno : MD-OI č.j. 1082/07-910-IPK/1 ze dne 5.12.2007 s účinností od 1. ledna 2008*. Praha: Ministerstvo dopravy České republiky, Odbor infrastruktury, 2007.
- [19] HELA, Rudolf. Příměsi do betonu. *Beton: Technologie a materiály*. Praha: Beton TKS, s.r.o, 2015, **2015**(2), 4-10. ISSN 12133116.
- [20] KRÁTKÝ, Jiří, Jan VODIČKA a Karel TRTÍK. *Drátkobetonové konstrukce: úvodní část a příklady použití : směrnice pro navrhování, provádění, kontrolu výroby a zkoušení drátkobetonových konstrukcí*. 1. vydání. Praha: Informační centrum ČKAIT, 1999. Betonové stavitelství. ISBN 80-863-6400-3.
- [21] HUBERTOVIČ, Michala a Rudolf HELA. Vliv přísady vláken na vlastnosti lehkého samozhutnitelného betonu. *Beton: Materiály a technologie*. Praha: BETON TKS, **2007**(5), 16-20. ISSN 1213-3116.
- [22] KOSINKA, Filip. *Experimentální analýza lehkých drátkobetonů zatížených mimořádným zatížením*. Pardubice, 2021. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.

- [23] Vlákno-beton. In: *Ebeton* [online]. [cit. 2021-06-12]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/vlaknobeton/>
- [24] HENKENSIEFKEN, Ryan, Tommy NANTUNG a Jason WEISS. Internal curing - from the laboratory to implementation. *LWC Bridges Workshop: 2009 IBC 1 U.S. Concrete*. San Jose, CA.
- [25] HUBERTO VÁ, Michala. Trvanlivost lehkého konstrukčního betonu. *Beton: Materiály a technologie*. Praha: Beton TKS, s.r.o, **2013**(6), 18-21. ISSN 1213-3116.
- [26] KOCKAL, Niyazi a Turan OZTURAN. Durability of lightweight concretes with lightweight fly ash aggregates. *Construction and Building Materials*. 2011, **25**(3), 1430-1438. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.09.022
- [27] KLIEGER, Paul a J.A. HANSON. Freezing and Thawing tests of Lightweight Aggregate Concrete. *Journal Proceedings*. 1961, (57), 779-796.
- [28] DOMAGAŁA, Lucyna. Durability of Structural Lightweight Concrete with Sintered Fly Ash Aggregate. *Materials*. 2020, **13**(20). Dostupné z: doi:10.3390/ma13204565
- [29] OSBORNE, G.J. The durability of Lightweight aggregate concretes after 10 years in marine and acid water environments. *International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*. Sandefjord, Norway, 1995, s. 591-603.
- [30] POSPÍCHAL, O., B. KUCHARCZYKOVÁ, P. MISÁK a T. VYMAZAL. Freeze-thaw resistance of concrete with porous aggregate. *Procedia Engineering* [online]. 2010, **2**(1), 521-529 [cit. 2021-04-23]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2010.03.056
- [31] HUBERTO VÁ, Michala. Současné trendy ve využití lehkého betonu. *Beton: historie, současnost, budoucnost*. Praha: Beton TKS, 2019, **19**(4), 112-119. ISSN 1213-3116.
- [32] First Use of High Strength Lightweight Precast Concrete in New Zealand. In: *Expanded Shale, Clay And Slate Institute* [online]. 2002 [cit. 2021-10-27]. Dostupné z: <https://www.escsi.org>
- [33] HUBERTO VÁ, Michala. Statický modul pružnosti lehkých konstrukčních betonů. *Beton*. Praha: Beton TKS, s.r.o, 2010, **2010**(4), 50-53. ISSN 1213-3116.
- [34] HUBERTO VÁ, Michala. Mosty: Most rychlostní silnice R6 z lehkého betonu. *Časopis Stavebnictví*. 2011, **2011**(4), 12-13. ISSN 1802-2030.

- [35] RAITHYBY, K.D. a F.D. LYDON. Lightweight concrete in highway bridges. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1981, **3**(2), 133-146. ISSN 0262-5075. Dostupné z: doi:10.1016/0262-5075(81)90007-5
- [36] *Příručka technologa - Beton: suroviny - výroba -vlastnosti* [online]. 1. vydání. 2013. Dostupné také z: <http://www.betonuniversity.cz/stahnout-soubor?id=1025>
- [37] ČSN P 73 2404. *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplnující informace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [38] KRÁLOVÁ, Helena a Břetislav TEPLÝ. Koncentrace oxidu uhličitého - karbonatace betonu - koroze výztuže. *Beton: Podzemní stavby*. Praha: Beton TKS, s.r.o, 2001, **1**(5), 44-45.
- [39] MATOUŠEK, Milan a Rostislav DROCHYTKA. *Atmosférická koroze betonů*. Praha: IKAS, 1998. ISBN 80-902-5580-9.
- [40] ČSN EN 12390-8. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví., 2020.
- [41] AITCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. české vydání. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 80-86769-39-9.
- [42] DOHNÁLEK, Jiří. Vliv mrazuvzdornosti betonu na jeho povrchové úpravy. *Beton: Sanace a rekonstrukce*. Praha: Beton TKS, s.r.o, 2012, **2012**(3), 44. ISSN 12133116.
- [43] TEPLÝ, Břetislav a Pavel ROVNANÍK. Účinky mrazu na beton. *Beton: Mosty*. Praha: Beton TKS, s.r.o, 2007, **2007**(4), 42-45.
- [44] ČSN 73 1322. *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1968.
- [45] ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [46] VALENZA, John a George SCHERER. A review of salt scaling: II. Mechanisms. *Cement and Concrete Research* [online]. Elsevier Ltd, 2007, **37**(7), 1022-1034 [cit. 2021-03-10]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2007.03.003
- [47] ČSN 73 1326. *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1984.

- [48] ČSN 73 1326 ZMĚNA Z1. *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [49] ROVNANÍKOVÁ, Pavla. Vlivy prostředí na korozi betonu z pohledu chemických reakcí. *Beton: Technologie*. Praha: Beton TKS, s.r.o, 2017, **2**(2), 3-8. ISSN 12133116.
- [50] ROVNANÍKOVÁ, Pavla, Pavel ROVNANÍK a Richard KŘÍSTEK. *Stavební chemie: degradace stavebních materiálů a chemie kovů*. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-720-4410-9.
- [51] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 1. Brno: Vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-214-0779-4.
- [52] LYER, Matěj. *Konstrukční lehké betony s důrazem na použitý druh kameniva*. Pardubice, 2018. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Doprvní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Vladimír Suchánek.
- [53] ČSN EN 12350-8. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 8: Samozhutnitelný beton – Zkouška sednutí-rozlitím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [54] ČSN EN 12350-6. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [55] ČSN EN 12350-7. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [56] HANUŠ, Vít a Petr ŠTEMBERK. Vliv okolního prostředí na výsledné vlastnosti betonu. *Beton: technologie, konstrukce a sanace*. Praha: Beton TKS, s.r.o, 2012, **2012**(2), 62-67.
- [57] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Průměrná denní teplota vzduchu v Pardubickém kraji*. 2022. Dostupné také z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/denni-data/Denni-data-dle-z.-123-1998-Sb#>
- [58] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [59] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.

- [60] ČSN P 73 2452. *Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [61] KŘÍSTEK, Vladimír, Jan VODIČKA, Hana HANZLOVÁ, Martin TIPKA a Helmut KURTH. Ohybová zkouška pro výstižnější stanovení tahové pevnosti vláknobetonu. In: *25. Betonářské dny – konference s mezinárodní účastí: Sekce ST4B: Modelování a navrhování 1*. 2018. Pardubice: Česká betonářská společnost, 1993, s. 1-7. ISBN 978-80-906759-6-4.
- [62] ČSN P 73 2404. *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplňující informace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.



# DOKLADOVÁ ČÁST

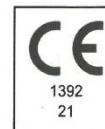
## Obsah dokladové části:

- A. Prohlášení o vlastnostech – Kamenivo těžené fr. 0/4 Čeperka
- B. Osvědčení o stálosti vlastností – CEM I 42,5 R Prachovice
- C. Prohlášení o vlastnostech – Vápencový filer jako kamenivo do betonu
- D. Prohlášení o vlastnostech – MasterGlenium ACE 446
- E. Prohlášení o vlastnostech – MasterMatrix SDC 100
- F. ES prohlášení o vlastnostech – DRAMIX 3D 45/50BL
- G. Rovnoměrnost rozptýlení drátků

## A. Prohlášení o vlastnostech – Kamenivo těžené fr. 0/4 Čeperka

### Prohlášení o vlastnostech č. 01/CP/CPR/2021

podle nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011 a 574/2014



1. Jedinečný identifikační kód typu výrobku: **ČEPERKA 0/4 P**  
**Přírodní kamenivo – drobné těžené, hornina šterkopisek**
2. Zamýšlené/zamýšlená použití:  
**Kamenivo pro přípravu betonu pro pozemní stavby, pozemní komunikace a jiné inženýrské stavby**
3. Výrobce: České šterkopisky spol. s r.o., Cukrovarská 34, 190 00 Praha 9 – Čakovice, IČO: 275 84 534, tel.: +420 283 930 404, e-mail: info@ceske-sterkopisky.cz
4. Zplnomocněný zástupce: –
5. Systém posuzování a ověřování stálostí vlastností (AVCP): **Systém 2+**
6. Harmonizovaná norma: EN 12620:2002+A1:2008 Kamenivo do betonu  
Oznámený subjekt: **Zkušebna kamene a kameniva, s.r.o., oznámený subjekt č. 1392**
7. Deklarované vlastnosti:

Základní charakteristiky	Vlastnosti EN 12620	Harmonizovaná technická specifikace
<b>Tvar zrn, frakce a objemová hmotnost</b>		
- Frakce kameniva	<b>0/4 P</b>	U základních charakteristik a vlastností uvedených ve sloupci:  <b>EN 12620</b> platí odkaz na: <b>EN 12620:2002+A1:2008</b>  <i>Poznámka: Pokud se základní charakteristika nebo vlastnost nevztahuje k harmonizované technické specifikaci, řádek je v příslušném sloupci proškrtnut.</i>
- Zrnitost	Gr85	
- Objemová hmotnost	2,598 Mg/m <sup>3</sup>	
<b>Čistota</b>		
- Obsah jemných částic	f <sub>3</sub>	
- Kvalita jemných částic	NPD	
<b>Složky/Obsah</b>		
- Chloridy	≤ 0,02 % hm.	
- Sírany rozpustné v kyselině	AS <sub>0,2</sub>	
- Celková síra	Vyhovuje	
- Potenciální přítomnost humusu	Vyhovuje	
- Obsah lehkých znečišťujících částic	≤ 0,25 % hm.	
<b>Objemová stálost</b>		
- Objemová stálost - smršťování při vysychání	NPD	
<b>Nasákavost</b>		
- Nasákavost	WA <sub>24</sub> 1,5	
<b>Nebezpečné látky</b>		
- Emise radioaktivity	Index ≤ 1,0	
- Uvolňování těžkých kovů	NPD	
- Uvolňování polycyklických aromatických uhlovodíků	NPD	
- Uvolňování jiných nebezpečných látek	NPD	
<b>Trvanlivost proti alkalicko-křemičité reakci</b>		
- Odolnost proti alkalicko-křemičité reakci	Rozpínavost ASTM	0,154 %
	Rozpínavost ČSN 72 1179	zkoušky dosud probíhají
	Chemická zkouška ČSN 72 1179	zkoušky dosud probíhají

Vlastnosti výše uvedeného výrobku jsou ve shodě se souborem deklarovaných vlastností. Toto prohlášení o vlastnostech se v souladu s nařízením (EU) č. 305/2011 a 574/2014 vydává na výhradní odpovědnost výrobce uvedeného výše.

Podepsáno za výrobce a jeho jménem:

V Praze dne 9. dubna 2021	Jméno	František Jampilek, jednatel	Podpis
---------------------------	-------	------------------------------	--------

Zdroj: <http://www.ceske-sterkopisky.cz/kvalitaceperka.aspx>

## B. Osvědčení o stálosti vlastností – CEM I 42,5 R Prachovice



**TECHNICKÝ A ZKUŠEBNÍ ÚSTAV STAVEBNÍ PRAHA, s.p.**  
**Technical and Test Institute for Construction Prague, SOE**

Akreditovaná zkušební laboratoř, Autorizovaná osoba, Notifikovaná osoba, Oznámený subjekt, Subjekt pro technické posuzování, Certifikační orgán, Inspekční orgán • Accredited Testing Laboratory, Authorized Body, Notified Body, Technical Assessment Body, Certification Body, Inspection Body • Prosecká 811/76a, 190 00 Praha 9 - Prosek, Czech Republic

Oznámený subjekt 1020

# OSVĚDČENÍ O STÁLOSTI VLASTNOSTÍ

certificate of constancy of performance

č. 1020 – CPR – 040 057794

V souladu s nařízením Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011 ze dne 9. března 2011 (nařízení o stavebních výrobcích nebo CPR) se vydává toto osvědčení pro stavební výrobek:

**Portlandský cement**

typ / varianta: **CEM I 42,5 R**

uvedený na trh pod jménem nebo firmou nebo ochrannou známkou výrobce:

**CEMEX Czech Republic, s.r.o.**

Laurinova 2800/4, 155 00 Praha 5

IČO: 27892638

a vyrobený ve výrobním závodě:

**cementárna Prachovice**

Tovární 296, 538 04 Prachovice

Toto osvědčení prokazuje, že všechna ustanovení týkající se posuzování a ověřování stálosti vlastností popsaná v příloze ZA normy

**EN 197-1:2011**

podle systému 1+ pro vlastnosti uvedené v tomto osvědčení byla uplatněna a že řízení výroby u výrobce zajišťuje

**stálost vlastností stavebního výrobku.**

Toto osvědčení bylo poprvé vydáno **1. května 2018** a zůstává v platnosti, dokud se harmonizovaná norma, stavební výrobek, postupy posuzování a ověřování stálosti vlastností ani výrobní podmínky v místě výroby výrazně nezmění nebo pokud oznámený subjekt pro osvědčení výrobku nepozastaví nebo nezruší platnost tohoto osvědčení.

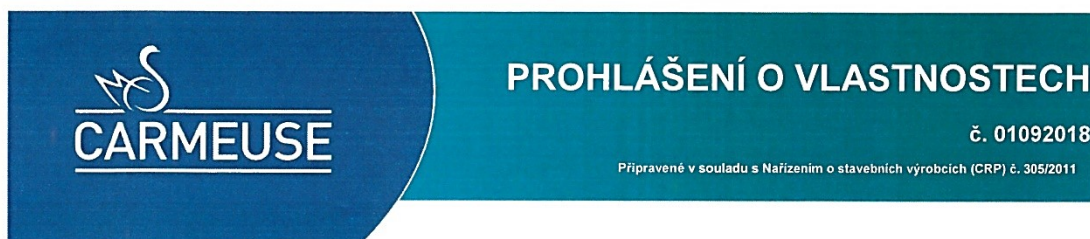
Teplice, 1. května 2018



Ing. Pavel Rubáš, Ph.D.  
zástupce vedoucího oznámeného subjektu

Zdroj: <https://www.cemex.cz/portlandsky-cement-cem-i-42-5-r>

## C. Prohlášení o vlastnostech – Vápencový filer jako kamenivo do betonu



Datum vydání: 1.9.2018

Datum revize : 15.1.2020

### 1. Jedinečný identifikační kód typu výrobku

Jemnozrný uhlíčitán vápenatý jako příměsek betonu typu I s katalytickými pojivovými vlastnostmi dle ETA-18/0664

2. Typ, šarže nebo sériové číslo nebo jiné označení umožňující identifikaci stavebního výrobku podle článku 11, odstavec 4

Vápencový filer jako kamenivo do betonu PREMIACAL P8

3. Zamýšlené použití nebo zamýšlená použití stavebního výrobku v souladu s příslušnou harmonizovanou technickou specifikací podle předpokladu výrobce:

Jako příměs typu I s katalytickými pojivovými vlastnostmi, používaná pro výrobu obzvláště monolitického a prefabrikovaného konstrukčního betonu vyhovujícího evropské normě EN 206:2013+A1:2016(česká verze ČSN EN 206+A1) a všem normám a Eurokódům související s aplikací betonu.

4. Jméno, firma, nebo registrovaná obchodní známka a kontaktní adresa výrobce podle článku 11, odstavec 5:

CARMEUSE CZECH REPUBLIC s.r.o.,664 04 Mokrá 359, provozovna Prachovice

5. Systém nebo systémy posuzování a ověřování stálosti vlastností stavebních výrobků:

Systém 1+

6. V případě prohlášení o vlastnostech týkajících se stavebního výrobku, na který se vztahuje Evropské technické schválení:

Technický a zkušební ústav stavební Praha, s.p., Prosecká 811/76a, Praha 9, OS 1020 vydal ETA - 18/0664 v souladu s pokyny pro Evropské technické schválení EAD 260020-00-0301. Provedl počáteční zkoušku typu výrobku. V souladu s tímto ETA provádí OS průběžné zkoušky výrobku, kontrolu systému řízení výroby v systému prokázání shody 1+

7. Vlastnosti uvedené v prohlášení



Datum vydání: 1.9.2018

Datum revize: 15.1.2020

Základní charakteristiky	Hodnotící kritérium	Harmonizovaná technická specifikace
Obsah CaCO <sub>3</sub> %	≥ 95,0	EAD 260020-00-0301
Obsah jemných částic g/kg	≤ 1,2	
Měrný povrch m <sup>2</sup> /kg	≥ 280	
Zrnitost (%)		
propad sítem : 2mm	100	
0,125mm	85 - 100	
0,063mm	70 - 100	
Obsah chloridů %	≤ 0,1	
Obsah SO <sub>3</sub> %	≤ 3,0	
Obsah síry %	≤ 1,0	
Obsah SiO <sub>2</sub> %	< 4,0	
obsah alkálií %	≤ 5,0	
Obsah TOC %	≤ 0,2	
Obsah vlhkosti %	≤ 1,0	
Hodnota indexu účinnosti 28/90dní %	≥ 0,63/0,69	
Objemová stálost mm	≤ 10,0	
k-hodnota	0,25	

8. Vlastnosti výrobku uvedeného v bodě 1 a 2 jsou ve shodě s vlastnostmi uvedenými v bodě 8.

Toto prohlášení o vlastnostech se vydává na výhradní odpovědnost výrobce uvedeného v bodě 4.

Jménem výrobce: CARMEUSE CZECH REPUBLIC s.r.o.


Jméno a funkce : Karel Palucha, manažer kvality

Místo a den vystavení : V Mokrém 1.9.2018

podpis : 

Datum vydání: 1.9.2018

Datum revize : 15.1.2020

 1020	
<b>CARMEUSE CZECH REPUBLIC s.r.o.</b> <b>závod Vápenka Mokrá</b> <b>Mokrá 359, 664 04 Mokrá</b> <b>provozovna Prachovice</b> <b>18</b>	
<b>EAD 260020-00-0301</b> <i>Jemnozrný uhlíčan vápenatý jako příměs do betonu typu I s          katalytickými pojivovými vlastnostmi</i>	
Vlastnost	Hodnotící kritérium
Zrnitost (%) :propad sítem 2,0mm	100
propad sítem 0,125mm	85-100
propad sítem 0,063mm	70-100
Měrný povrch (m <sup>2</sup> /kg)	≥ 280
Obsah CaCO <sub>3</sub> (%)	≥ 95,0
Celkový organický uhlík (%)	≤ 0,2
Celkový obsah alkalii (%)	≤ 1,0
Obsah SiO <sub>2</sub> (%)	< 4,0
Obsah SO <sub>3</sub> (%)	≤ 3,0
Obsah S (%)	≤ 1,0
Obsah chloridů (%)	≤ 0,1
Obsah jemných částic (g/kg)	≤ 1,2
Obsah vlhkosti (%)	≤ 1,0
Obsah alkálií (%)	< 5,0
Index účinnosti 28/90 dní(%)	≥ 0,63/0,69
k-hodnota	0,25

Page 3 of 3

Zdroj: <http://www.carmeuse.eu/cz>



## D. Prohlášení o vlastnostech – MasterGlenium ACE 446



### Prohlášení o vlastnostech

Podle přílohy III nařízení Evropského parlamentu a rady č. 305/2011

pro produkt **MasterGlenium ACE 446**

č. CZVP0014

1. Jedinečný identifikační kód typu výrobku:  
EN 934-2: T3.1/3.2
2. Typ, série nebo sériové číslo nebo jakýkoli jiný prvek umožňující identifikaci stavebních výrobků podle čl. 11 odst. 4:  
Číslo výrobní šarže: viz etiketa produktu
3. Zamýšlené použití nebo zamýšlená použití stavebního výrobku v souladu s příslušnou harmonizovanou technickou specifikací podle předpokladu výrobce:  
Silně vodoredukující/superplastifikační přísada
4. Jméno, firma nebo registrovaná obchodní známka a kontaktní adresa výrobce podle čl. 11 odst. 5:  
**Master Builders Solutions CZ s.r.o.**  
K Májovu 1244  
537 01 Chrudim
5. Případné jméno a kontaktní adresa zplnomocněného zástupce, jehož plná moc se vztahuje na úkoly uvedené v čl. 12 odst. 2:  
není relevantní
6. Systém nebo systémy posuzování a ověřování stálosti vlastností stavebních výrobků, jak je uvedeno v příloze V:  
Systém 2 +
7. V případě prohlášení o vlastnostech týkajících se stavebního výrobku, na který se vztahuje harmonizovaná norma:  
**QUALIFORM, a. s.**  
Mlaty 8, 642 00 Brno  
Akreditovaný certifikační orgán č. 3012  
Autorizovaná osoba č. 238  
Oznámený subjekt (Notified Body) 1544

Notifikovaný orgán provedl počáteční kontrolu produktů a kontrolu řízení výroby, jakož i následný dohled, zjištění a hodnocení řízení výroby podle systému 2+ a vydal následující:

Certifikát systému řízení výroby:

**1544-CPR-2021-1438-2**

A brand of  
**MBC GROUP**

8. V případě prohlášení o vlastnostech týkajících se stavebního výrobku, pro který bylo vydáno evropské technické posouzení:

není relevantní

9. Vlastnosti uvedené v prohlášení T 3.1 (při stejné konzistenci)

Základní charakteristiky (viz. poznámka 1)	Vlastnosti (viz. poznámka 2)	Harmonizované technické specifikace (viz. poznámka 3)
Obsah chloridů	max. 0,1% hmotnostně	EN 934-2+A1:2012
Obsah alkálií	max. 2,5% hmotnostně	
Korozivní vlastnosti	Korozivní vlastnosti: Obsahuje pouze složky uvedené v EN 934-1:2008 příloha A.1.	
Pevnost v tlaku	Po 1 dnu: Zkušební směr $\geq 140\%$ kontrolní směsi Po 28 dnech: Zkušební směr $\geq 115\%$ kontrolní směsi	
Redukce vody	Ve zkušební směsi $\geq 12\%$ ve srovnání s kontrolní směsí	
Obsah vzduchu v čerstvém betonu	Ve zkušební směsi maximálně o 2 objemová % více než v kontrolní směsi, pokud výrobce nestanovuje jinak	
Nebezpečné látky	NPD	

NPD: No Performance Determined

T3.2 (při stejném vodním součiniteli)

Základní charakteristiky (viz. poznámka 1)	Vlastnosti (viz. poznámka 2)	Harmonizované technické specifikace (viz. poznámka 3)
Obsah chloridů	max. 0,1% hmotnostně	EN 934- 2+A1:2012
Obsah alkálií	max. 2,5% hmotnostně	
Korozivní vlastnosti	Korozivní vlastnosti: Obsahuje pouze složky uvedené v EN 934-1:2008 příloha A.1.	
Pevnost v tlaku	Po 28 dnech: Zkušební směs $\geq 90\%$ kontrolní směsi	
Obsah vzduchu v čerstvém betonu	Ve zkušební směsi maximálně o 2 objemová % více než v kontrolní směsi, pokud výrobce nestanovuje jinak	
Zvětšení konzistence	Zvětšení sednutí $\geq 120$ mm z původních (30 $\pm$ 10) mm Zvětšení rozliti $\geq 160$ mm z původních (350 $\pm$ 20) mm	
Zachování konzistence	30 minut po přidání přísady nesmí konzistence zkušební směsi klesnout pod hodnotu původní konzistence kontrolní směsi	
Nebezpečné látky	NPD	

NPD: No Performance Determined

10. Vlastnost výrobku uvedená v bodě 1 a 2 je ve shodě s vlastností uvedenou v bodě 9. Toto prohlášení o vlastnostech se vydává na výhradní odpovědnost výrobce uvedeného v bodě 4.

Podepsáno za výrobce a jeho jménem: **Ing. Martin Polák**  
 Jednatel

V Praze dne 4. 2. 2021



## E. Prohlášení o vlastnostech – MasterMatrix SDC 100



### Prohlášení o vlastnostech

Podle přílohy III nařízení Evropského parlamentu a rady č. 305/2011

pro produkt **MasterMatrix SDC 100**

č. CZVP0046

1. Jedinečný identifikační kód typu výrobku:  
EN 934-2: T4
2. Typ, série nebo sériové číslo nebo jakýkoli jiný prvek umožňující identifikaci stavebních výrobků podle čl. 11 odst. 4:  
Číslo výrobní šarže: viz etiketa produktu
3. Zamýšlené použití nebo zamýšlená použití stavebního výrobku v souladu s příslušnou harmonizovanou technickou specifikací podle předpokladu výrobce:  
Stabilizační přísada
4. Jméno, firma nebo registrovaná obchodní známka a kontaktní adresa výrobce podle čl. 11 odst. 5:  
**Master Builders Solutions CZ s.r.o.**  
K Májovu 1244  
537 01 Chrudim
5. Případné jméno a kontaktní adresa zplnomocněného zástupce, jehož plná moc se vztahuje na úkoly uvedené v čl. 12 odst. 2:  
není relevantní
6. Systém nebo systémy posuzování a ověřování stálosti vlastností stavebních výrobků, jak je uvedeno v příloze V:  
Systém 2 +
7. V případě prohlášení o vlastnostech týkajících se stavebního výrobku, na který se vztahuje harmonizovaná norma:  
**QUALIFORM, a. s.,**  
Mlaty 8, 642 00 Brno  
Akreditovaný certifikační orgán č. 3012  
Autorizovaná osoba č. 238  
Oznámený subjekt (Notified Body) 1544  
Notifikovaný orgán provedl počáteční kontrolu produktů a kontrolu řízení výroby, jakož i následný dohled, zjištění a hodnocení řízení výroby podle systému 2+ a vydal následující:  
Certifikát systému řízení výroby:  
**1544-CPR-2021-1438-2**
8. V případě prohlášení o vlastnostech týkajících se stavebního výrobku, pro který bylo vydáno evropské technické posouzení:  
není relevantní

A brand of  
**MBCC GROUP**

9. Vlastnosti uvedené v prohlášení

Základní charakteristiky (viz. poznámka 1)	Vlastnosti (viz. poznámka 2)	Harmonizované technické specifikace (viz. poznámka 3)
Obsah chloridů	max. 0,1% hmotnostně	EN 934-2+A1:2012
Obsah alkálií	max. 0,4% hmotnostně	
Korozivní vlastnosti	Korozivní vlastnosti: Obsahuje pouze složky uvedené v EN 934-1:2008 příloha A. 1.	
Pevnost v tlaku	Po 28 dnech: Zkušební směs ≥ 80% kontrolní směsi	
Odlučování vody	Zkušební směs ≤ 50% kontrolní směsi	
Obsah vzduchu v čerstvém betonu	Ve zkušební směsi maximálně o 2 objemová % více než v kontrolní směsi, pokud výrobce nestanovuje jinak	
Nebezpečné látky	NPD	

NPD: No Performance Determined

10. Vlastnost výrobku uvedená v bodě 1 a 2 je ve shodě s vlastností uvedenou v bodě 9. Toto prohlášení o vlastnostech se vydává na výhradní odpovědnost výrobce uvedeného v bodě 4.

Podepsáno za výrobce a jeho jménem: **Ing. Martin Polák**  
Jednatel




V Praze dne 4. 2. 2021



## F. ES prohlášení o vlastnostech – DRAMIX 3D 45/50BL

 **BEKAERT**

better together

<b>ES prohlášení o vlastnostech DRAMIX® 3D 45/50BL</b>	<b>INFORMACE PRO ZÁKAZNÍKY</b>
<p>1. Jedinečný identifikační kód výrobku: <b>DRAMIX® 3D 45/50BL</b></p> <p>2. Zamýšlené použití DRAMIX® 3D 45/50BL představuje ocelová vlákna zhotovená ze za studena taženého drátu, pro <b>KONSTRUKČNÍ POUŽITÍ</b> v betonu, maltě a injektážní maltě.</p> <p>3. Výrobce: NV BEKAERT SA Bekaertstraat 2, B-8550 Zwevegem, Belgium</p> <p>5. Systém posuzování a ověřování stálosti vlastností stavebních výrobků: Systém č. 1</p> <p>6a. EN 14889-1: 2006. Oznámený subjekt: BCCA - registration nr: 0749 / B-1040 Brussels, Aarlenstraat - Rue d' Arlon, 53 TZUS - registration nr: 1020 / CZ-19000 Praha 9, Prosecká 811/76a</p> <p>7. Vlastnosti uvedené v prohlášení: základní charakteristiky podle typu výrobku jsou uvedeny v tabulce 1.</p> <p>Deklarovaná výkonnost: základní vlastnosti jednotlivých typů výrobků jsou uvedeny v tabulce 1.</p> <p>Výkonnost výrobků uvedených výše a v tabulce 1 je ve shodě s uvedenými výkonnostmi v bodě 7. Toto prohlášení o výkonnosti je vydáno ve shodě s nařízením (EU) č. 305/2011 a s výhradní zodpovědností výše uvedeného výrobce.</p> <p>Podepsáno pro a v zastoupení výrobce kým: Raf Rentmeesters, Senior Vice President Building Products - NV Bekaert SA</p>	
	<p>Approved by: Raf Rentmeesters</p> <p>Issued and signed on version date, Zwevegem–Belgium </p> 

Disclaimer: This Customer Information shall not constitute a guarantee for any specific product features. Final determination of suitability of this material is the sole responsibility of the user.

DOP\_CI.00002.BKZW/Version-8: 2021/05/25

Building Products//Geert Demeyere/Aditya Mangrulkar

Replaces: V7-2020-09-14

Creationdate 2021/05/25 – Language CZ Page 1/2

Electronically approved

**Off-line or printed copy is uncontrolled !**



<b>ES prohlášení o vlastnostech DRAMIX® 3D 45/50BL</b>	<b>INFORMACE PRO ZÁKAZNÍKY</b>
--	------------------------------------

Dodatek k bodu 7. Vlastnosti uvedené v prohlášení – základní charakteristiky - tabulce 1

Tabulka 1: Prohlášení o základních charakteristikách v souladu s EN 14889-1: 2006.	
Typ výrobku	DRAMIX® 3D 45/50BL
Osvědčení ES o stálosti vlastností/Vystavený oznámeným subjektem	BC1-251-0024-0016-xxx.1020-CPR-0100341yy
Tvar vlákna	zahnutými konci
Svazkování	volně
Povlakování	-
Délka (mm)	50
Průměr (mm)	1,05
Poměr stran	48
Pevnost v tahu (N/mm <sup>2</sup> )	1115
Vliv na konzistenci (s)	8
Vliv na pevnost betonu (kg/m <sup>3</sup> )	20
Uvolňování nebezpečných látek	Ne
Životnost	NPD
Modul pružnosti (GPa)	200

Disclaimer: This Customer Information shall not constitute a guarantee for any specific product features. Final determination of suitability of this material is the sole responsibility of the user .

DOP\_CI.00002.BKZW/Version-8: 2021/05/25

Building Products//Geert Demeyere/Aditya Mangrulkar

Replaces: V7-2020-09-14

Creationdate 2021/05/25 – Language CZ Page 2/2

Electronically approved

**Off-line or printed copy is uncontrolled !**

Zdroj: <https://www.bekaert.com/en/product-catalog/content/dop/dramix-3d-technical-documents>



G. Rovnoměrnost rozptýlení drátků

