



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

ZMĚNA TRVANLIVOSTI BETONU Z RECYKLOVANÉHO BETONU VARIANTNÍ ADICÍ SILIKÁTOVÝCH PŘÍMĚSÍ

CHANGE IN THE DURABILITY OF CONCRETE MADE OF RECYCLED CONCRETE BY
ALTERNATIVE ADDITION OF CERAMIC ADMIXTURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ STAVARŮ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MICHAL STEHLÍK, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. TOMÁŠ STAVAR
Název	Změna trvanlivosti betonu z recyklovaného betonu variantní adicí silikátových příměsí
Vedoucí diplomové práce	Ing. Michal Stehlík, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2012
Datum odevzdání diplomové práce	11. 1. 2013
V Brně dne 31. 3. 2012	

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- [1]Pytlík, P. Speciální betony. Recyklace betonu. Sborník konference, Beroun, únor 2009
- [2]RILEM Report 12-Performance Criteria for Concrete Durability, edited by J. Kropp, 1995
- [3]RILEM Report 14-Durability design of Concrete Structures, edited by Sarja and E. Vesikari, 1996
- [4]RILEM Report 16-Penetration and Permeability of Concrete, edited by H.W.Reinhardt, 1997
- [5]RILEM Report 40-Non-Destructive Evaluation of the Concrete Cover, edited by R. Torrent, 2007
- [6]Larbi, J.A. Microstructure of Interfacial Zone around Aggregate Particles in Concrete, HERON, Vol. 38, No. 1, 1993
- [7]Matoušek, M., Drochytka, R. Atmosférická koroze betonů. IKAS ČKAIT 1998, Praha

Zásady pro vypracování

Stručný úvod do problematiky betonů z recyklovaného betonu.

Rešerše literatury.

Návrh metodiky stanovení a hodnocení trvanlivostních vlastností betonu z betonového recyklátu. Návrh dvou základních receptur betonů z betonového recyklátu s výrazně odlišnými dávkami cementu. Rozšíření základních receptur o variantní adice strusky, popílu a mikrosiliky.

Výroba zkušebních krychlí. Testování propustnosti povrchu betonových krychlí pro vzduch (Torrent test), vodu (ISAT test) a kyselé plyny (hloubka karbonatace urychleným testem v 98% CO₂), doplňkové testy pevností.

Zhodnocení pozitivního i možného negativního vlivu množství cementu a příměsí na trvanlivostní i mechanické vlastnosti betonů z recyklovaného betonu. Formulování zásad k dosažení vyšší trvanlivosti betonů z recyklovaného betonu.

Předeepsané přílohy

.....

Ing. Michal Stehlík, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou trvanlivosti betonu z recyklovaného betonu variantní adicí silikátových příměsí. O odolnosti betonové konstrukce rozhoduje povrchová vrstva betonu, přes kterou pronikají agresivní plynné a kapalné látky z okolního prostředí. Schopnost této vrstvy propouštět agresivní látky je jedna z nejdůležitějších ukazatelů trvanlivosti betonové konstrukce.

V experimentální části budou provedeny testy obvyklými zkušebními metodami ke zjištění aktuálního stavu povrchových vrstev. Tedy testování propustnosti povrchové vrstvy betonu krychle pro vzduch (metoda TORRENT), pro vodu (metoda ISAT), kyselé plyny (hloubka karbonatace urychleným testem v 98% CO₂) a doplňkové testy pevností. V závěru bude provedeno zhodnocení pozitivního i negativního vlivu jednotlivých příměsí a množství cementu na trvanlivostní i mechanické vlastnosti betonu z recyklovaného betonu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Trvanlivost, povrchová vrstva, propustnost, pórovitost, recyklace, stavební odpad, recyklovaný beton, příměsí, popílek, struska, mikrosilika, ztvrdlý beton, čerstvý beton, pevnost v tlaku, pevnost v příčném tahu, objemová hmotnost, TORRENT, ISAT, karbonatace.

ABSTRAKT

The master thesis dealing with problematic about durability of concrete, with use of recycled concrete and addition of silica additions. Predominant for resistance of concrete constructions is surface layer, through which aggressive gasses and liquids penetrate from surrounding environment. The most important indicator of concrete durability is ability of surface layer transmissions of aggressive substances.

In experimental part will be defined the actual state of surface layer by normal testing methods. The transmissions of surface layer will be tested on concrete cubes. Tests for transmissions of air (method TORRENT), of water (method ISAT), of acid gases (depth of carbonation by quick test in 98% CO₂) will be carried out and also strength tests. Assessment of positive or negative influence of additions and amount of cement on durability and mechanical properties of concrete will be discussed in conclusion.

KEYWORDS

Durability, surface layer, transmissions, porosity, recycling, construction waste, recycled concrete, addition, fly ash, slag, microsilica, hardened concrete, fresh concrete, compressive strength of concrete, tensile strength in the transverse, density, TORRENT, ISAT, carbonation.

Bibliografická citace VŠKP

STAVAŘ, Tomáš. *Změna trvanlivosti betonu z recyklovaného betonu variantní adicí silikátových příměsí*. Brno, 2012. 103 s., 14 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Michal Stehlík, Ph.D.

Prohlášení:

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

V Brně dne 6.1.2013

.....

podpis autora
Bc. Tomáš Stavař

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří se podíleli na tvorbě této diplomové práce a zejména pak vedoucímu mé diplomové práce Ing. Michalovi Stehlíkovi, Ph.D., za vedení, poskytnuté rady a věnovaný čas při zpracování.

1	ÚVOD	12
1.1	Cíle práce.....	13
	TEORETICKÁ ČÁST	14
2	TRVANLIVOST BETONU.....	14
2.1	Degradace betonu	14
2.1.1	<i>Vady a závady v technologii provádění.....</i>	15
2.1.2	<i>Degradace betonu prostředím.....</i>	16
2.2	Faktory ovlivňující trvanlivost betonu	19
2.2.1	<i>Mrazuvzdornost betonu</i>	19
2.2.2	<i>Požární odolnost betonu.....</i>	19
2.2.3	<i>Obrusnost betonu.....</i>	20
2.2.4	<i>Chemická koroze betonu.....</i>	20
2.2.4.1	Karbonatace betonu.....	20
2.2.4.2	Sulfatace betonu.....	21
2.2.4.3	Vápenné a hořečnaté rozpínání	22
2.2.4.4	Výkvěty.....	22
2.3	Jiný pohled na trvanlivost betonu.....	23
2.3.1	<i>Vliv pórovitosti na propustnost betonu.....</i>	24
2.3.1.1	Rozměry molekul plynu.....	25
2.3.2	<i>Vliv trhlin na propustnost betonu</i>	25
2.3.3	<i>Metody stanovení propustnosti.....</i>	26
2.3.4	<i>Interakce mezi příčinami degradace a permeačními vlastnostmi</i>	26
3	RECYKLACE.....	27
3.1	Stavební odpad	28
3.1.1	<i>Využití odpadů v betonářské technologii.....</i>	28
3.2	Provozovna recyklace stavebních materiálů.....	29
3.2.1	<i>Technologie pro recyklaci</i>	30
3.3	Betonový recyklát.....	30
3.4	Beton z recyklovaného betonu	32
3.4.1	<i>Vlastnosti betonu z recyklovaného betonu</i>	33
3.4.2	<i>Využití betonového recyklátu a betonu z recyklovaného betonu</i>	33

4	PŘÍMĚSI	35
4.1	Struska	35
4.1.1	Složení strusky	35
4.1.2	Vliv strusky na vlastnosti betonu	37
4.1.3	Cenový vývoj strusky	37
4.2	Popílek	38
4.2.1	Složení popílků	38
4.2.2	Použití popílků	39
4.2.3	Vliv popílků na vlastnosti betonu	39
4.3	Mikrosilika	40
4.3.1	Vliv mikrosiliky na vlastnosti betonu	40
4.3.2	Přínos mikrosiliky	41
5	METODIK A PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK BETONU	42
5.1	Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Sítový rozbor	42
5.2	Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím	43
5.3	Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles	43
5.4	Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles	44
5.5	Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles	45
5.6	Měření permeability přístrojem TORRENT	46
5.6.1	Princip měření	46
5.6.2	Korekce součinitele kT pro referenční (nominální) hodnotu vlhkosti	48
5.7	Měření povrchové nasákavosti přístrojem ISAT	48
5.7.1	Popis měřicího zařízení	49
5.7.2	Postup měření	49
5.7.3	Výpočet propustnosti betonu	50
5.8	Určení hloubky karbonatace fenolftaleinovým testem	51
5.8.1	Urychlená zkouška karbonatace v 98 % CO_2	51
	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	53
6	BETONOVÁ SMĚS	54
6.1	Složení BS	54
6.1.1	Složení BS na 1 m ³	54
6.2	Identifikace složek pro výrobu betonové směsi	56
6.2.1	Cement	56

6.2.2	<i>Kamenivo</i>	56
6.2.3	<i>Příměsí</i>	57
7	ZKUŠEBNÍ TĚLESA	58
7.1	Výroba zkušebních těles.....	58
7.2	Zhutnění, uložení a ošetřování zkušebních těles	58
7.3	Označení zkušebních těles.....	59
8	FYZIKÁLNĚ MECHANICKÉ VLASTNOSTI ZKOUŠENÝCH BETONŮ	60
8.1	Objemová hmotnost.....	60
8.1.1	<i>Grafické znázornění objemových hmotnost</i>	61
8.1.2	<i>Vyhodnocení výsledků objemové hmotnosti</i>	63
8.2	Pevnost betonu v tlaku.....	63
8.2.1	<i>Grafické znázornění pevnosti v tlaku</i>	64
8.2.2	<i>Vyhodnocení výsledků pevnosti v tlaku</i>	65
8.3	Pevnost betonu v příčném tahu.....	65
8.3.1	<i>Grafické znázornění pevností v příčném tahu</i>	66
8.3.2	<i>Vyhodnocení výsledků pevnosti v příčném tahu</i>	68
9	TRVANLIVOSTNÍ VLASTNOSTI ZKOUŠENÝCH BETONŮ	69
9.1	Měření permeability přístrojem TORRENT.....	69
9.1.1	<i>Grafické znázornění propustnosti betonu pro vzduch metodou TORRENT</i>	72
9.1.2	<i>Vyhodnocení výsledků propustnosti betonu pro vzduch metodou TORRENT</i>	73
9.2	Měření povrchové nasákavosti přístrojem ISAT	74
9.2.1	<i>Grafické znázornění počáteční povrchové nasákavosti betonu metodou ISAT</i>	77
9.2.2	<i>Vyhodnocení výsledků počáteční povrchové nasákavosti betonu metodou ISAT</i>	79
9.3	Určení hloubky karbonatace fenolftaleinovým testem.....	80
9.3.1	<i>Grafické znázornění hloubky karbonatace</i>	85
9.3.2	<i>Vyhodnocení výsledků hloubky karbonatace fenolftaleinovým testem</i>	86
9.4	Korelace mezi hloubkou karbonatace a prostupností betonu pro vzduch a vodu	88
9.4.1	<i>Vyhodnocení korelace mezi hloubkou karbonatace a propustností betonu</i>	90
10	SHRNUTÍ	91
11	ZÁVĚR	94
	SEZNAMY	95
	Seznam použitých zdrojů.....	95

Seznam použitých zkratek a symbolů	99
Seznam tabulek.....	100
Seznam grafů	101
Seznam obrázků.....	102

1 ÚVOD

Ve vyspělých zemích je v současnosti recyklace odpadu a opětovné užití vzniklých produktů již nutným a víceméně zaběhnutým standardem. Recyklace je prováděna nejen z ekologického, ale také z ekonomického hlediska. Odpady ze stavebnictví nebo i z jiných průmyslových odvětví mohou být dále s výhodou použity jako sekundární suroviny s relativně dobrými vlastnostmi. Tato sekundární aplikace recyklátů již nyní přispívá k výraznému snížení počtu skládek nejen stavebních sutí. Avšak v této oblasti je nutno oživit širší výzkum jak materiálových vlastností, tak následně aplikačních možností širokého spektra recyklátů. A to, v našem případě konkrétně u stavebních betonových recyklátů, především z důvodu velké variability jakosti betonových drtí, zvýšeného obsahu podílu jemných částic upravených surovin a výsledné nižší pevnosti a trvanlivosti betonů z betonového recyklátu. Je škoda, že velký objem stavebních recyklátů obecně je použit k „druhotným“ účelům, tedy např. násypům či výplním. Bylo by daleko efektivnější jejich vlastnosti upravit tak, aby mohly konkurovat a ve výsledku nahradit neobnovitelné materiálové zdroje.

Trvanlivost betonu bývá ovlivněna mnoha faktory. Může se jednat o působení či mnohdy spolupůsobení různých vlivů, jako jsou změny teploty, působení slunečního záření, zmrazování, a také působení agresivních a atmosférických plynů. Další faktory, které mohou ovlivnit trvanlivost betonové konstrukce, jsou např. použití nevhodného materiálu, nesprávné složení čerstvého betonu, nedostatečné krytí výztuže, špatné ošetřování betonu, nedokonalé zhutnění, atd. Všechny výše jmenované faktory mohou ovlivnit stav povrchové vrstvy betonu, která tvoří jakousi „vstupní bránu“ pro různé škodlivé látky. Poškození povrchu betonu většinou urychlí korozi výztuže, dojde ke snížení životnosti konstrukce a následným rozsáhlým opravám.

V posledních desetiletích se trvanlivosti stavebních materiálů i celých konstrukcí věnuje stále více času. Byly vyvinuty nové metody a testy, na základě kterých lze předpovědět životnost konstrukce. Taková předpověď může vycházet např. z výsledků testů hloubky průniku agresivních plynů z atmosféry nebo z chemicky znečištěného prostředí, popř. z doby potřebné k dosažení určité hloubky průniku.

Průnik degradujících látek je ovlivňován především množstvím, typem, velikostí a uspořádáním pórů v cementovém kameni, které mají vliv na pevnost, přetvoření, propustnost a smršťování betonu. Důležitou roli hraje obsah volné vody v pórech. Pohyb plynů, kapalin a iontů vede k postupnému narušování struktury betonu a k jeho chátrání. Jedná se především o difuzi, absorpci a pronikání škodlivin.

Vhodnou adicí přísad a příměsí lze upravit vlastnosti surových recyklátů i betonů z nich vyrobených tak, aby výsledný kompozit se sledovanými vlastnostmi blížil, ev. vybranými vlastnostmi i převyšoval, prvky vyrobené stejným postupem z materiálů přírodních.

1.1 Cíle práce

Dnes je již zřejmé, že betony z recyklovaného betonu velmi těžko dosahují vlastností betonů z přírodního kameniva. Alternativní adice silikátových příměsí, zlepšujících vlastnosti cementového tmele spojujícího betonový recyklát, by mohla být jednou z variant možné modifikace s cílem vylepšit fyzikálně-mechanické a trvanlivostní vlastnosti betonu z betonového recyklátu.

Nezbytným průvodcem zdárného řešení práce je vlastní návrh metodiky stanovení a hodnocení trvanlivostních vlastností betonu z betonového recyklátu. Předpokládaným cílem práce je pak prověření očekávaných změn trvanlivostních vlastností betonových prvků při použití betonového recyklátu jakožto náhrady přírodního kameniva včetně variantní adice silikátových příměsí (popílek, struska, mikrosilika).

Praktickým měřením předchází návrh dvou základních receptur betonů z betonového recyklátu s výrazně odlišnými dávkami cementu. Základní receptury budou rozšířeny o variantní adice strusky, popílku a mikrosiliky. Následuje výroba zkušebních krychlí normových rozměrů 150×150×150 mm. Budou provedeny vybrané trvanlivostní zkoušky, tedy testování propustnosti povrchové vrstvy betonu krychle pro vzduch (metoda TORRENT), pro vodu (metoda ISAT), kyselé plyny (hloubka karbonatace urychleným testem v 98% CO₂) a doplňkové testy pevností. Jedna sada krychlí bude uložena tři měsíce v laboratorním prostředí s 0,03 % CO₂ a druhá sada tři měsíce v 98 % prostředí CO₂. Výsledky zkoušek po vyhodnocení pomohou s nalezením pozitivního i možného negativního vlivu množství cementu a příměsí na trvanlivostní i mechanické vlastnosti betonů z recyklovaného betonu. Závěr obohatí formulace zásad vedoucích k dosažení vyšší trvanlivosti betonů z recyklovaného betonu.

TEORETICKÁ ČÁST

2 TRVANLIVOST BETONU

Kvalitu stavebního díla lze souhrnně vyjádřit třemi faktory, a sice a) únosností, b) použitelností a c) dobou životnosti.

Životnost je jedním z důležitých faktorů rentability pro jednotlivé betonové konstrukce a je determinována převážně vlastní trvanlivostí betonu. Tato trvanlivost je výslednicí spolupůsobících vnitřních (druh a množství cementu, kameniva, vody) a vnějších činitelů (zatížení, mechanické poškození, klimatické podmínky, agresivní prostředí. Nejsledovanější je v poslední době degradující účinek plynného CO_2 obsaženého v atmosféře na vlastnosti cementového tmele – tzv. karbonatace betonu. [1]

Trvanlivostí betonu rozumíme jeho odolnost vůči povětrnosti, stárnutí, únavě, opotřebení a jiným vnějším vlivům. V užším slova smyslu to znamená odolnost proti působení atmosféry a mrazuvzdornost. Trvanlivostí celého železobetonového díla míníme dobu použitelnosti konstrukce při zachování deklarovaných vlastností. [2]

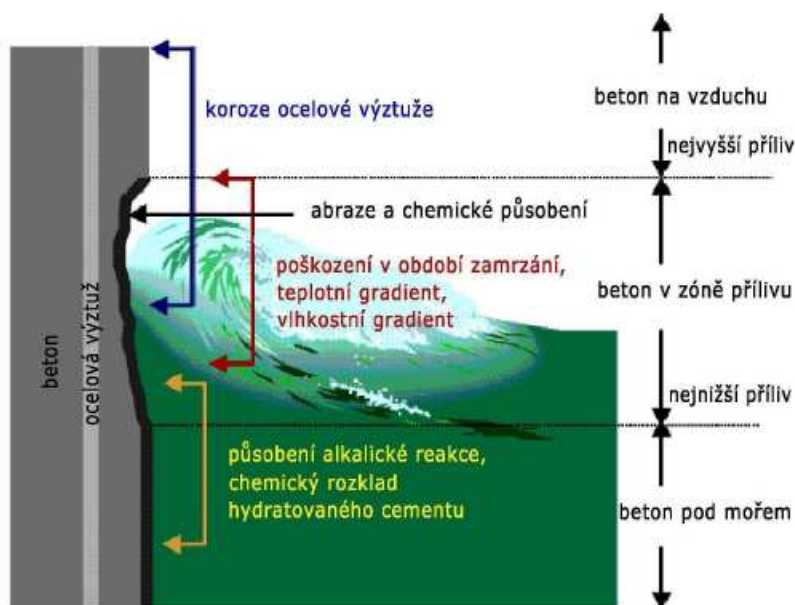
Jednou z nejvýznamnějších fyzikálních vlastností betonu vzhledem k hodnocení jeho trvanlivosti se zdá být jeho permeabilita, a to jak cementového tmele, tak i kameniva. Lze předpokládat, že zvýšená permeabilita betonu může svým dílem (krom jiných faktorů, např. vlhkosti) přispět k urychlení procesu karbonatace betonu, závislost obou jevů však nelze pravděpodobně zjednodušit na závislost lineární.

2.1 Degradace betonu

Degradace betonu znamená postupné a trvalé narušování základních vlastností betonu, vedoucí až k jeho rozpadu.

Základní příčiny degradace:

- **Vady a závady v technologii provádění**
 - nevhodný návrh
 - nízká kvalita materiálu
 - špatné provedení
- **Degradace betonu prostředím**
- **Poruchy z titulu nevhodného užívání**



Obr. 2.1 Degradční procesy ovlivňující trvanlivost betonu [5]

2.1.1 Vady a závady v technologii provádění

1) Použití nevhodného betonu pro daný účel:

- narušení mrazem
- působení agresivních médií
- nedostatečná vodotěsnost

2) Technologická nekázeň při zpracování:

- ředění dodaného betonu vodou
- špatné hutnění – nedosažení požadovaných pevností
- nedostatečné ošetřování – vznik smršťovacích trhlin, případně spálení betonu
- betonáž v zimním období – zpomalení hydratace, ztráta pevnosti
- nesprávné uložení betonové směsi

3) Chybné složení betonu:

Cement – chybně zvolený druh, množství apod. Mezi nejčastější závady vyskytující se na stavbách patří tendence snižování dávky cementu oproti původní receptuře. Minimální dávka cementu u prostého betonu je 200 kg/m^3 a u železobetonu 250 kg/m^3 . Rovněž je také nutno dbát na maximální dávku cementu, aby se omezilo nadměrné smrštění a tím vznik trhlin. Optimální dávka cementu by měla být taková, aby cementový tmel obalil všechna zrna kameniva a vyplnil všechny mezery mezi nimi.

Kamenivo – pro kyselé reagující prostředí nemůžeme použít kamenivo obsahující vápenec, dolomit, tufy nebo pískovec s vápencovým tmelem. Nevhodná je přítomnost jílu. Pro alkalické prostředí zase dobře vyhovuje vápencová nebo dolomitická drť. Také musíme vzít do úvahy dostatečnou pevnost kameniva, vyloučit zvětřalá zrna a uvědomit si, že nevhodná granulometrie či tvar zrn zhoršují zpracovatelnost, mezerovitost a hutnění betonu.

Voda – musí odpovídat požadavkům ČSN 73 2028, musí být čistá, málo tvrdá, nesmí obsahovat kyseliny a organické látky. Důležitým faktorem je také množství vody, které velmi ovlivňuje zpracovatelnost a také pevnosti betonu.

Přísky – je nutné dodržet přesné dávkování z důvodu jejich velice malého množství. Provzdušňující přísky způsobuje, že se ve ztuhnutém betonu vytváří mnoho malých a stejnoměrně rozdělených dutinek. Hlavní účinek spočívá ve zvětšení odolnosti betonu proti mrazu a rozmrazovacím látkám. Plastifikační přísky umožňuje dispergaci cementových částic v betonové směsi. To umožňuje buď dosáhnout lepší zpracovatelnosti při nezměněném vodním součiniteli, nebo při stejné zpracovatelnosti snížení vodního součinitele, což obvykle umožní i případné snížení dávky cementu. Hydratační přísky zvětšuje povrchové napětí kapalin v kapilárách a tak snižuje kapilární nasákavost betonu. [2]

2.1.2 Degradace betonu prostředím

Na stavební dílo působí řada vnějších činitelů, které v důsledku snižují jeho trvanlivost. Tyto činitele lze rozdělit na mechanické (statické a dynamické namáhání), fyzikální (změny teploty, mráz, požár, elektrický proud, záření), biologické (makroskopické a mikroskopické), chemické (plynné, kapalné, tuhé).

Rozdělení agresivního prostředí:

- tuhé – hygroskopické látky
- kapalné
- plynné
- biologické vlivy
- bludné proudy
- působení minerálů, olejů a tuků

- **Degradace betonů vlivem působení koroze tuhými látkami**

V suchém stavu beton nikterak nenarušují a nekorodují, ale ve vlhkém stavu dochází k výraznější korozi, která je analogická s korozi kapalinami. Je nutné se především zaměřit na látky hygroskopické, které mají tu vlastnost, že přijímají vlhkost ze vzduchu. Při těchto reakcích mohou vznikat uvnitř betonu různé chemické sloučeniny, které se vyznačují korozními tlaky.

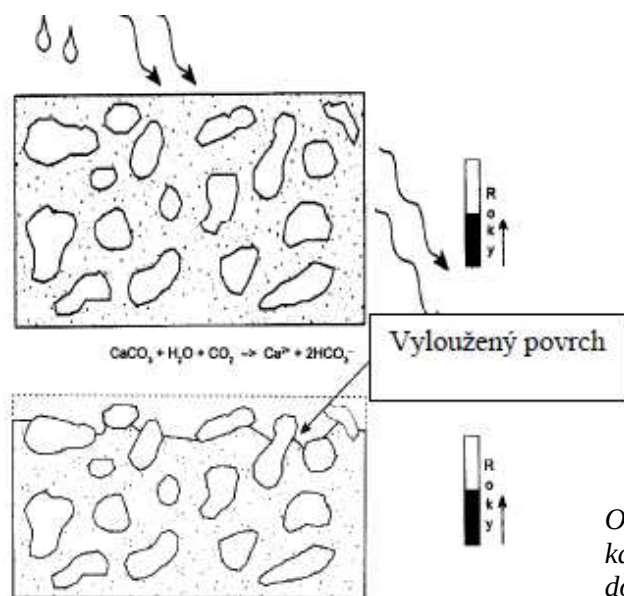
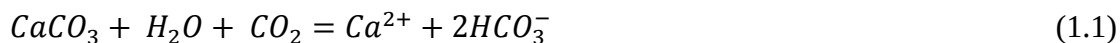
- **Degradace betonů vlivem působení agresivního kapalného prostředí**

Agresivní vody mohou způsobit tři typy koroze, které se od sebe liší jinou mírou poškození betonu:

a) Vody způsobující korozi I. typu

Jsou to vody, které beton vyluhují, tzv. měkké vody. Tvrdost přechodná či uhličitánová je dána obsahem kyselých uhličitů vápenatých i hořečnatých. Hladové vody zpočátku rychle vyluhují $\text{Ca}(\text{OH})_2$, později dochází k rozkladu zhydratovaných křemičitanů a hlinitanů. Tyto procesy vedou k poklesu pH a tím ke korozi výztuže, známý je také nepříznivý vliv na stabilitu některých zhydratovaných slínkových minerálů.

Zvýšený obsah CO_2 ve vodě způsobuje, že CaCO_3 přechází do roztoku:



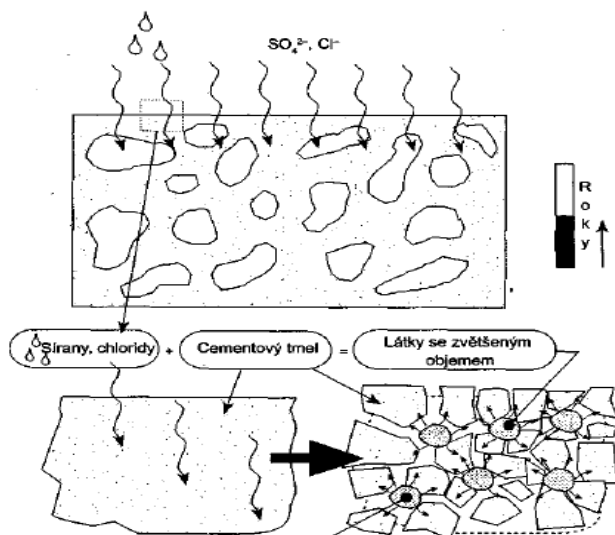
Obr. 2.2 Znárodnění působení kapaliny způsobující korozi I. typu, dochází k vyloučení povrchu [2]

b) Vody způsobující korozi II. typu

Jsou to takové vody, které s cementovým tmelem vytváří snadno rozpustné sloučeniny, a které jádro betonu buď obalují, nebo se zvolna s vodou uvolňují. Jedná se zejména o kyseliny, louhy a jejich rozpustné soli (roztoky obsahující ionty SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} , $(\text{HCO}_3)^-$, $(\text{NH}_4)^+$).

c) Vody způsobující korozi III. typu

Jsou to vody obsahující různé sloučeniny, které reakcí s cementovým tmelem tvoří látky se zvětšeným objemem, což se z počátku projevuje zvýšením pevnosti, hutnosti a tím nepropustnosti betonu, ale další zvětšování objemu vede ke vzniku trhlinek až k úplnému rozpadu. Jedná se o vody s obsahem síranů a chloridů.



Obr. 2.3 Znázornění působení kapaliny způsobující korozi III. typu, tvorba látek se zvětšeným objemem [2]

- **Degradace betonů vlivem působení agresivního plynného prostředí**

Základní plyny způsobující atmosférickou korozi železobetonu:

- oxid uhličitý CO_2
- oxid siřičitý SO_2 resp. oxid sírový SO_3
- sulfan H_2S
- oxidy dusíku N_xO_y
- ostatní kyselinotvorné plyny (HCl , Cl_2 , ...) [2]

2.2 Faktory ovlivňující trvanlivost betonu

Faktory ovlivňující trvanlivost betonu byly částečně popsány v předchozí kapitole 1.1.1. Vady a závady v technologii provádění. Navíc je nutno se zmínit o mrazuvzdornosti, požární odolnosti, obrusnosti a chemické odolnosti betonu.

2.2.1 Mrazuvzdornost betonu

Mrazuvzdorností se rozumí schopnost betonu ve vodou nasyceném stavu odolávat určitému cyklu opakovaného zmrazování a rozmrazování.

Chemicky vázaná voda se nikdy nepřeměňuje na led, gelová voda přechází v led až při velmi nízkých teplotách (-73°C) a fyzikálně vázaná voda, která se nachází v kapilárách, přechází v led při $-0,5^{\circ}\text{C}$ (slabý roztok). Teplota, při níž se voda stává ledem, je závislá na velikosti kapilár.

Led má o 9 % větší objem než stejné množství vody, proto při změně skupenství z kapalného na pevné dochází k objemovým změnám. Vznikající krystalický tlak ledu překračuje hodnotu 200 MPa, proto dochází k objemovým změnám. Po roztátí ledu je až jedna třetina objemových změn (roztažení) nevratná.

Mrazuvzdornost je ovlivněna několika činiteli:

- stáří betonu
- kontakt s vodním prostředím
- pórovitá struktura cementového kamene
- koncentrace roztoku
- pevnost betonu
- provzdušnění betonu.

2.2.2 Požární odolnost betonu

Požární odolnost stavební konstrukce je doba, po kterou je konstrukce schopna odolávat teplotám vzniklých při požáru, aniž by došlo ke ztrátě nosnosti a stability, k porušení celistvosti nebo k překročení mezních teplot. Se vzrůstající teplotou dochází ke snižování pevnosti betonu, při 500°C asi na 80 % a po osmi hodinách trvání teploty 800°C na 0 – 20 % původní pevnosti.

2.2.3 Obrusnost betonu

Obrusnost betonu poukazuje na schopnost betonu dlouhodobě odolávat působení tangenciálních sil na povrch betonu (důležitá vlastnost u cemento-betonových krytů vozovek a betonové dlažby. Obrusnost není téměř závislá na pevnosti, ale na petrografickém složení kameniva, zejména složení hrubé frakce. U betonů nasáklých vodou je obrusnost vyšší. [3]

2.2.4 Chemická koroze betonu

Do chemické koroze betonu lze zařadit i výše zmíněnou kapitolu 1.1.2. Degradace betonu prostředím. Dále je nutno se zmínit o karbonataci betonu, sulfataci betonu, vápenném a hořečnatém rozpínání a tvorbě výkvětů.

2.2.4.1 Karbonatace betonu

Karbonatace betonu je projevem stárnutí betonu, který je soustavně napadán oxidem uhličitým z ovzduší. Přítomnost vlhkosti v betonu je podmínkou karbonatace. Reakcí CO_2 s vápenatými sloučeninami vzniká uhličitán vápenatý. Reakce postupuje za pomoci otevřených kapilár stále hlouběji do betonu. Časovým měřítkem karbonatace jsou roky. Vlivem karbonatace se také snižuje pH betonu, což vede ke korozi výztuže.

Karbonatace probíhá ve čtyřech následných etapách:

I. etapa

Hydroxid vápenatý se působením CO_2 mění na uhličitán vápenatý, který zvětšuje objem o 10 % a zaplňuje póry v cementovém kameni, tím se snižuje propustnost povrchu betonu, pH klesá na hodnotu 11.

II. etapa

Probíhají přeměny ostatních hydratačních produktů cementu a vznikají krystalické jemnozrnné novotvary, pH klesá na hodnotu 9,5. Mechanické vlastnosti se příliš nemění.

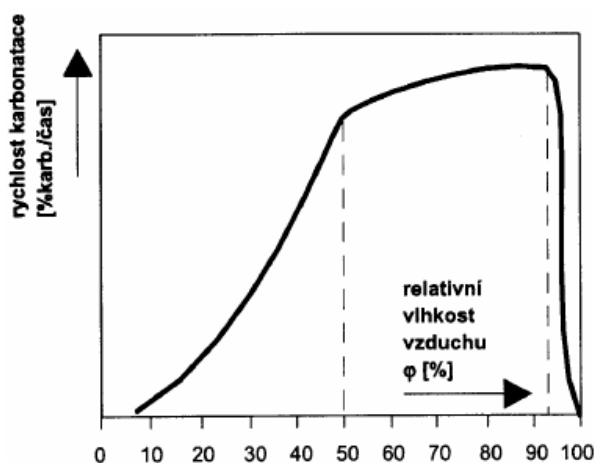
III. etapa

Nastává překrystalizace vzniklých novotvarů a vznikají rozměrné, až 10 krát větší, krystaly kalcitu a aragonitu. Klesá nejen hodnota pH na 8, ale snižují se i pevnosti betonu.

IV. etapa

Nastává téměř úplná karbonatace, kdy hrubé krystaly kalcitu prostupují celou strukturou cementového kamene. Výrazně se snižuje soudržnost betonu s výztuží a také pevnost razantně klesá, pH klesá pod hodnotu 8.

Rychlost postupu karbonatace je rovna obecně rozmezí od 0,1 do 1 mm za rok. Nižší hodnota platí pro velmi hutné kvalitní betony vyšší pevnostní třídy, vyšší hodnota pro málo pevné nekvalitní betony. [4]



Obr. 2.4 Obecná závislost rychlosti karbonatace na relativní vlhkosti vzduchu [2]

2.2.4.2 Sulfatace betonu

Sulfatace znamená degradaci betonu působením oxidu siřičitého SO_2 , který se vyskytuje hlavně v průmyslových oblastech. Dochází k postupné přeměně struktury betonu, jejíž rychlost je zejména ovlivněna relativní vlhkostí prostředí a koncentrací SO_2 . Meziproduktem koroze je hemihydrát siřičitanu vápenatého.

Sulfatace probíhá ve čtyřech následných etapách:

I. etapa

Dochází k přeměně hydroxidu vápenatého na hemihydrát siřičitanu vápenatého a k částečnému zaplnění pórů, hodnota pH se snižuje.

II. etapa

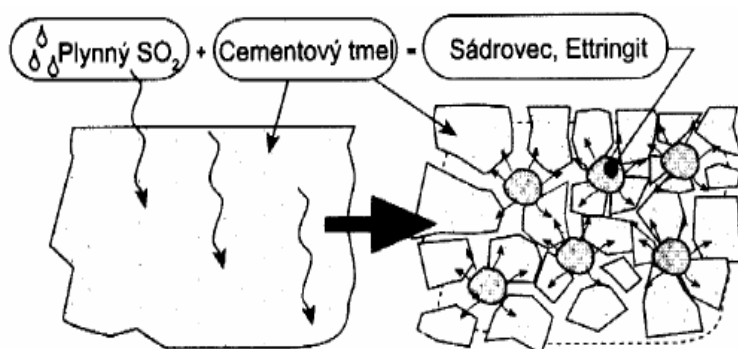
Přeměna ostatních hydratačních produktů cementu společně s primárně vzniklými karbonatačními novotvory. Mechanické vlastnosti betonu vykazují mírné zvýšení hodnot, pokračuje hydratace C_3S .

III. etapa

Překrystalizování primárně vzniklého hemihydrátu siřičitanu vápenatého, resp. síranu vápenatého na velice objemově rozměrné krystaly sádrovce, který zcela zaplňuje póry.

IV. etapa

Naprostá ztráta pevnosti betonu. Hrubé krystaly sádrovce prostupují již celou strukturou cementového tmele. V prostředí, kde působí voda v kapalně formě, vznikají sloučeniny typu ettringitu, které zvětšují svůj objem 8-11 krát. [2]



Obr. 2.5 Mechanismus rozrušení betonu příčinou působení SO_2 a H_2O [2]

2.2.4.3 Vápenné a hořečnaté rozpínání

Vápenné rozpínání je způsobeno obsahem volného, nezreagovaného, vysoce páleného CaO , který velmi pomalu hydratuje a po zhydratování ve ztvrdlém cementu zvětší svůj objem 1,7 krát a tím porušuje strukturu betonu. Podobně se chová i MgO ve formě periklasu. V cementu je obsaženo asi 2,5 % MgO v tuhém roztoku, zbytek je periklas, který velmi pomalu hydratuje na $\text{Mg}(\text{OH})_2$ a zvětšuje svůj objem 2,2 krát.

2.2.4.4 Výkvěty

Objevují se na pórovitých látkách, jestliže obsahují rozpustné soli nebo vznikají-li rozpustné soli chemickou korozí, příp. je-li látka napadána roztokem solí. Difuzí roztoku k povrchu konstrukce se voda odpaří a rozpuštěné soli na povrchu vykristalizují. Tím zvětšují svůj objem a v ojedinělých případech mohou způsobit destrukci skeletu na povrchu pórovité látky.

Podle vzniku rozdělujeme výkvěty na:

- a) **primární** - vznikají v procesu tvrdnutí betonu,
- b) **sekundární** - objeví se až při užívání betonu.

Výkvěty jsou především estetickou závadou na povrchu dekoračního a barevného betonu. [4]

2.3 Jiný pohled na trvanlivost betonu

Vznik a povaha povrchové vrstvy jsou dány technologií výroby betonových prvků, kdy při hutnění pomocí vibračního zařízení dochází ke stoupání vzduchových bublin směrem vzhůru. Tím se beton zbavuje vzduchových bublin, zároveň však dochází ke koncentraci jemných částí při stěnách bednění. Hrubé kamenivo se vlivem své geometrie nedostane celou svou plochou k bednění ani k rohům. Proto má několikacentimetrová vrstva betonu u jeho povrchu zcela jiné vlastnosti než ostatní hmota. Tento proces se nazývá stěnový efekt.

Charakteristickou vlastností povrchové vrstvy je menší obsah hrubého kameniva a naopak zvýšené množství cementového kamene, který je tvořen jemnými frakcemi kameniva a hydratovaným cementem. Velmi důležitou vlastností je především zvýšený obsah pórů oproti vnitřní vrstvě. Takto vzniklá povrchová vrstva mající tloušťku od 20 do 50 mm vykazuje zcela odlišné, a to zpravidla horší, vlastnosti než okolní materiál. [6]

K dosažení objektivního zhodnocení trvanlivosti slouží řada tzv. trvanlivostních charakteristik, k jejichž stanovení jsou vyvíjeny zkušební metody, které se zabývají studiem povrchové vrstvy betonu (cover concrete – covercrete) v síle 30 – 50 mm. Prostup agresivních látek ve formě plynu nebo kapaliny povrchovou vrstvou závisí na stavu pórové struktury této vrstvy. Propustnost vrstvy je ovlivněna mnoha aspekty – od výběru hmot, návrhu čerstvého betonu, jeho ukládání, zhutňování a především jeho ošetřování v průběhu počátku a během tvrdnutí. Propustnost povrchové vrstvy betonu ovlivňuje současně kontaktní fáze mezi zrnem kameniva a cementovým kamenem. Z uvedeného vyplývá, že je nezbytné posoudit pórový systém z hlediska velikosti pórů, rozdělení pórů a celkového objemu pórů.

Již v dokumentu CEB FIP z roku 1991 se konstatuje, že „odolnost betonu proti vnikání agresivních látek je nejlépe popsát měřením jeho propustnosti (permeability) a v současné době neexistuje všeobecně akceptovatelná metoda pro rychlé stanovení jeho permeability. Předpokládá se, že v budoucnu se bude hodnotit trvanlivost betonu podle jeho aktuální propustnosti. Je zřejmé, že beton vyšší pevnosti je trvanlivější než beton méně pevný, ale propustnost závisí především na vlastnostech povrchové vrstvy betonové konstrukce”.

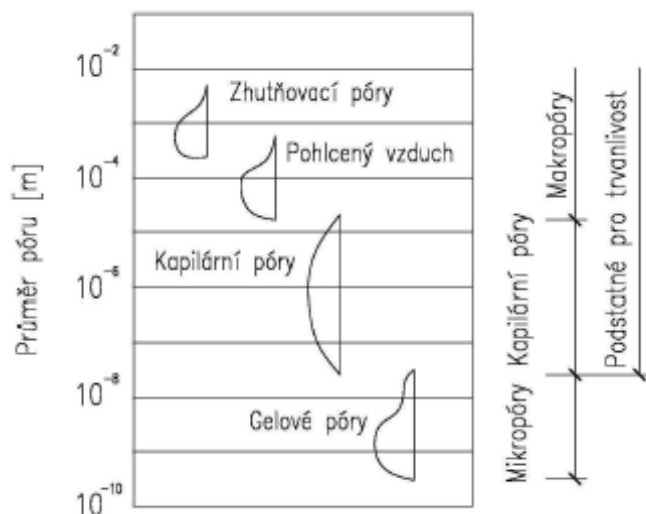
Během 25 let byly vyvinuty nejrůznější zkušební metody na stanovení propustnosti betonu pro kapaliny a plyny. Snaží se popsát propustnost jako fyzikální vlastnost povrchové vrstvy betonu různými originálními postupy. [7]

2.3.1 Vliv pórovitosti na propustnost betonu

Lze zjednodušeně konstatovat, že čím je betonová struktura pórovitější, tím může být zdánlivě propustnější pro vodu a plyny. Důležitými faktory upřesňujícími tuto skutečnost jsou: druh pórovitosti a rozdělení velikosti pórů. Otevřenou pórovitostí je myšlena vzájemná propojenost pórů, ve kterých je umožněn pohyb kapalin, plynů a výměna rozpustných látek.

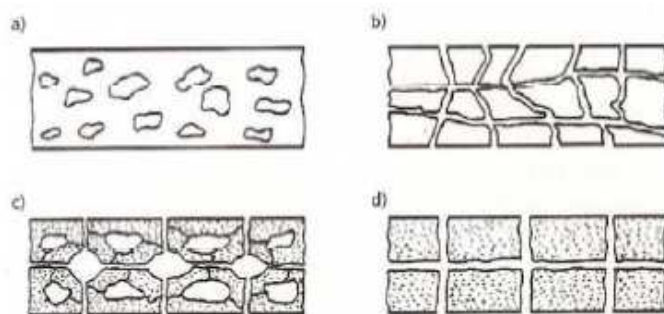
Podle způsobu vzniku a velikosti rozlišujeme:

- **makropóry** s průměrem nad 10^{-3} m – pohlčený vzduch a zhutňovací póry,
- **kapilární póry** s velikostí $10^{-5} - 10^{-7}$ m – až 40% objemu cementového tmele,
- **mikropóry** s průměrem $10^{-7} - 10^{-9}$ m – 20–30% objemu cementového tmele. [8]



Obr. 2.6 Velikost a rozdělení pórů v cementovém tmelu [8]

Na propustnost betonu mají největší vliv především póry kapilární, kterými prochází voda působením tlakového gradientu. Velikost kapilár nejvíce závisí na vodním součiniteli, je-li větší jak 0,42, objem kapilárních pórů výrazně roste, čímž se snižuje odolnost betonu vůči propustnosti pro vodu. [10]

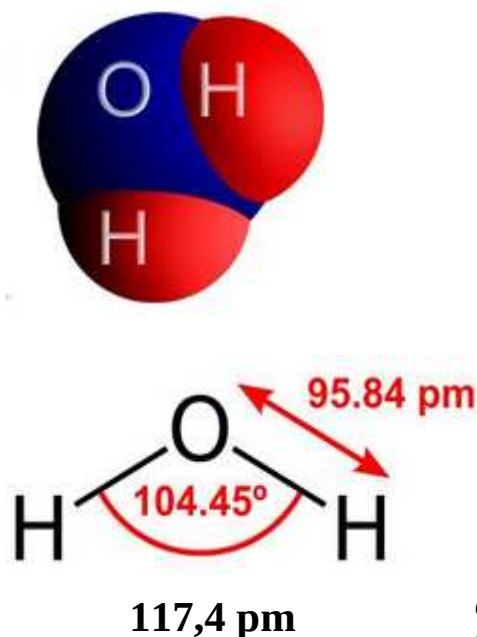


Obr. 2.7 Vztah pórovitosti a permeability podle Bakker [9]

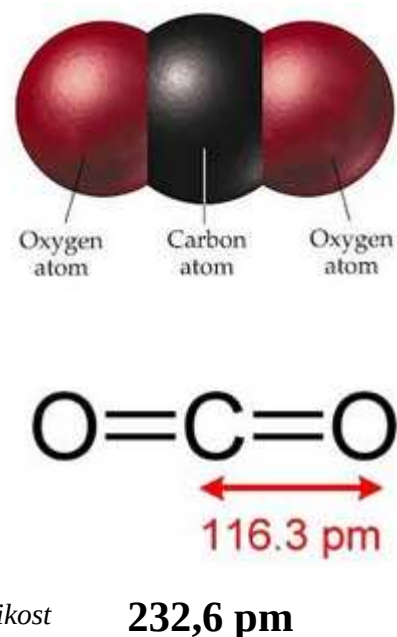
- a) Pórovitý nepropustný materiál
- b) Pórovitý propustný materiál
- c) Nízká propustnost, vysoká pórovitost
- d) Vysoká propustnost, nízká pórovitost

2.3.1.1 Rozměry molekul plynu

Velikost molekuly H_2O



Velikost molekuly CO_2



Obr. 2.8 Tvar a velikost
molekuly H_2O a CO_2

Jak je patrné z obrázku 2.8, molekula H_2O má maximální vnější rozměr $0,117 \cdot 10^{-9}$ m, molekula CO_2 je větší, má rozměr $0,233 \cdot 10^{-9}$ m. Avšak lineární stavba molekuly CO_2 ($O=C=O$) se zdá být výhodou při průniku správně orientované molekuly úzkou kapilárou. Molekula CO_2 pronikne snáze póry o menším průměru oproti molekule H_2O . Z tohoto důvodu lze předpokládat, že existuje alespoň volná závislost mezi rychlostí či dosaženou hloubkou karbonatace a propustností betonu pro vodu resp. i vzduch.

2.3.2 Vliv trhlin na propustnost betonu

Trhliny v betonové konstrukci nepříznivě ovlivňují její vodotěsnost. Pokud v konstrukci vznikne trhlina, která prostupuje celým průřezem konstrukce, je voda transportována v kapalně formě až k druhému povrchu betonu. Prosakování vody trhlinou je závislé na šířce trhliny a hydraulickém spádu vody. V řadě případů průběžné trhliny malé šířky, kde je transport vody v kapalně formě, se samo utěsní, neboť v trhlíně probíhá další hydratace cementu, trhlina se zanášá drobnými částicemi obsaženými v pronikající vodě i cementovým tmelem. Předpokladem samoutěsnění však je, že se šířka trhliny nemění. Velikost trhlin je ovlivňována stupněm a systémem vyztužení konstrukce, způsobem provádění a způsobem ošetřování betonové konstrukce po uložení betonu. Trhliny ve správně navržené železobetonové konstrukci výrazným způsobem negativně neovlivňují její

vodonepropustnost ani při velkém tlaku vody. K tvorbě trhlin může dojít vlivem nedostatků v procesu výstavby bílé vany, a to jednak v čerstvém betonu, jednak ve ztvrdlém betonu. Nejčastějšími činiteli způsobujícími vznik trhlinek je smršťování a dotvarování betonu, ale také plastické sedání, sklon povrchu, vyhlazování betonu a v neposlední řadě teplota. [10]

2.3.3 Metody stanovení propustnosti

- Propustnost pro vodu:
 - metoda počáteční povrchové absorpce (ISAT)
 - metoda propustnosti pro tlakovou vodu (GWT)
 - měření pohltivosti (sorptivity) vody kapilárním systémem
 - počáteční a dlouhodobá nasákavost
 - vysychavost, navlhavost a další
- Propustnost pro plyny:
 - Figgova metoda
 - metoda propustnosti pro vodu a vzduch
 - metoda Cembureau s kyslíkem
 - metoda GGT s oxidem uhličitým
 - metoda TPT (snížení vakua) a řada dalších

2.3.4 Interakce mezi příčinami degradace a permeačními vlastnostmi

Působení rozmrazovacích solí na beton má fyzikální a chemickou podstatu. Dochází ke krystalizaci solí v pórech a následně tvorbě trhlin. Chemické působení se realizuje nepříznivým působením na cement v betonu nebo oxidačním působením na výztuž. Vliv působení sulfátů a kyselin vede ke změnám v pórové struktuře a propustnost povrchové vrstvy se zvětšuje vlivem tvorby trhlin. Působení alkálií na strukturu betonu vede k tvorbě trhlin a tím se zvyšují permeační vlastnosti, především propustnost. Alkalicko – křemičitá reakce vzniká v betonu od alkalicky působícího kameniva a křemičité fáze z cementu a opět zvyšuje propustnost.

Veškerý mechanismus degradace betonu závisí na aktuálním stavu pórů struktury povrchvé vrstvy betonu, která je popsána velikostí a rozdělením pórů v ní. Permeační vlastnosti se nazývají transportními procesy a přímo odpovídají charakteru pórů ve struktuře betonu. Hodnocení trvanlivosti je odvozeno přímo od jejich permeačních vlastností. Mezi permeační vlastnosti patří především propustnost struktury pro plyn a vodu, sorptivita (pohltivost), počáteční nasákavost, vodotěsnost, difuze apod. [7]

3 RECYKLACE

Recyklace (z anglického slova recycling = recirkulace, vrácení zpět do procesu) znamená znovuvyužití, znovuvvedení do cyklu. V původním slova smyslu se recyklací rozumí vrácení do procesu, ve kterém odpad vzniká – tedy pro původní účel a stejný systém. Lze ji považovat za strategii, která opětným využíváním odpadů šetří přírodní zdroje a současně omezuje zatěžování prostředí škodlivinami. Recyklace umožňuje zajištění zásob v případě absolutního nedostatku, snížení nákladů při stoupajících cenách surovin a snížení ekologické zátěže prostředí odpady.

Recyklaci, tj. spotřebu odpadních látek ve výrobním procesu jako sekundární surovinu, lze rozdělit:

1) **Primární recyklace** se uskutečňuje v uzavřeném technologickém cyklu. Odpady vznikající ve výrobním procesu se vrací zpět do výrobního procesu buď neupravené, anebo jednoduše upravené. Další možností je výroba jiného výrobku ze vzniklého odpadu. Příklady z výroby stavebních hmot: zlomky cihel se rozdrtí a prodávají se jako antuka nebo se používají jako ostřívo do suroviny; odprašky v cementárně se používají zpět jako příměs do suroviny; cementový kal a kamenivo ze zbytků čerstvého betonu se vrací zpět do míchačky k výrobě nového čerstvého betonu.

2) **Sekundární recyklace** se zaměřuje na využití odpadů z jiných oblastí ekonomické aktivity. Dochází ke dvěma efektům ochrany životního prostředí. Za prvé není třeba zabírat půdu pro skládku odpadů, která devastuje krajinu a potencionálním nebezpečím kontaminace vod. Za druhé se šetří přírodní surovina, snižuje se objem těžby a s ní spojený odpad z odvalů a změny reliéfu krajiny. V závodech stavebního průmyslu se využívají energetické odpady (popílek, škvára), odpady z hutí (struska), z chemického průmyslu (odpadní sírany a jiné). Využití se nachází v cihelnách, v betonářské technologii, při výrobě pórobetonu.

3) **Terciární recyklace** se uplatňuje desítky let při zpracování kovů, neboť vedle energetických úspor přináší i úspory rudy. Dožívají nejen stroje a kovové výrobky, ale také různé obaly (sklo, plasty, papír) využitelné pro nové výrobky. Při výrobě skla ze skelných střeptů se uspoří 8 MJ.kg⁻¹ energie, 0,2 kg sody, 0,1 kg upraveného písku. Využitím sběrového papíru se ušetří asi 27% energie (5,4 MJ.kg⁻¹) a 0,83 m³ dřeva na 1 t papíru. Recyklací některých plastů se ušetří až 90% energie (asi 41 MJ.kg⁻¹). V posledním desetiletí vystupuje do popředí i recyklace stavebních odpadů z asanovaných staveb, zejména železobetonových konstrukcí, ale i jiných materiálů z demolic. [11]

3.1 Stavební odpad

Stavební odpad představuje významný podíl odpadů společnosti, ale je z velké části recyklovatelný. Odhaduje se, že na jednoho obyvatele připadá 0,6 až 1 tuna SDO ročně.

Evropské dělení stavebního odpadu:

- 1701 – beton, cihly, tašky, keramika a materiály na bázi dřeva
- 1702 – dřevo, sklo, plasty
- 1703 – asfalt, dehet a výrobky z dehtu
- 1704 – kovy, včetně slitin
- 1705 – zeminy a výkopové hlušiny
- 1706 – izolační materiály
- 1707- směsný stavební a demoliční odpad

Vhodnější nomenklaturu uvádí Maydl:

- zemina z výkopů (nepojená zemina) 65-75%
- silniční drť (materiál z dopravních ploch, bez zeminy) 10-15%
- demoliční stavební suť 5-10% (v průmyslových oblastech až 20%)
- odpady ze stavenišť

3.1.1 Využití odpadů v betonářské technologii

Odpady jsou využívány jako kamenivo nebo příměs do betonu. Výrobu betonu lze zajistit jako bezodpadovou a také recyklací lze plně využít asanovaných betonových konstrukcí.

O využití kameniva z průmyslových odpadů svědčí řada průkazných zkoušek a bohaté praktické zkušenosti. Využívají se přímo (škvára, struska), anebo upravené (agloporit). Použité kamenivo musí splňovat podmínky: trvanlivost (nepřípustná je rozpadová struska), chemické složení vylučující nadměrný obsah korozivních sloučenin (síra, chlor, aj.), limitní množství radionuklidů uvolňujících radon.

Jako odpady se v betonářské technologii používají: struska, škvára, agloporit, kamenivo z odvalů, pěnový polystyren, létatý popílek, jemné podíly drceného kameniva, recyklace zbytků čerstvého betonu, recyklovaný beton (recyklát), recyklace živičných směsí a asfaltobetonu. [4]

3.2 Provozovna recyklace stavebních materiálů

Zřízení nové provozovny SDO není náročné po stavební stránce, ale schvalovací proces investičního záměru je velmi náročný. Nutností je vhodný prostor v průmyslové zóně s přístupem pro nákladní dopravu. Územní plán v některých případech přímo určuje plochy pro tuto činnost, vše může překazit místní občanská aktivita, vlastnické vztahy k pozemku a mnoho dalších nástrah, které obsahuje územní řízení.

Vlastní vybavení provozovny se skládá z evidenčního prostoru příjmu materiálů, váhy pro nákladní vozidla, skladového prostoru materiálů, který obsluhuje nejčastěji kolový nakladač. Vlastní technologii zpracování SDO tvoří čelistový nebo odrazový drtič. Velikost a druh drtiče se určuje podle předpokládaného druhu a množství zpracovaných materiálů. Ve většině provozů je v sérii za drtičem napojen třídič nejčastěji dvousítný. Materiály, které jsou zpracovány, se následně deponují v jednotlivých kójkách pro jejich uskladnění a následnou expedici dle druhu a hrubosti materiálů.

Příjem materiálů:

Každá provozovna musí mít v provozním řádu přesně definované druhy přijímaných materiálů. Ve většině případů se jedná o materiály s označením O dle katalogu odpadů přesně definovaných číslem odpadu. Jedná se zejména o stavební suť – cihly, beton a živičné materiály. V případě místních zdrojů většího množství jiného materiálu jsou uvedeny další skupiny přijímaných materiálů – strusky, popílky apod.

Zpracování materiálů:

Provádí se v jednotlivých cyklech, po navození dostatečného množství jednoho druhu materiálu pro zpracování. Tento materiál je již při skládání vlhčen, aby bylo zabráněno prašnosti na pracovišti.

Vlastní drcení probíhá v drtiči po naložení materiálu pomocí kolového nakladače nebo bagru. Materiál po rozdrcení prochází pod permanentním magnetem za účelem separace magnetických částí. Dále je materiál pásovým dopravníkem přepravován do násypky třídičky. Následuje pásová doprava na vibrační síťovou komoru, kde je materiál tříděn na frakce dle osazených sít. Nastavení drtiče nám umožňuje nastavit velikost drceného materiálu pro největší zrna od 32 mm až po 150 mm. Některé materiály se pouze drtí bez třídění.

Výdej materiálů:

Z každého druhu materiálu musíme odebírat vzorky pro provedení laboratorních zkoušek pro dokladování nezávadnosti materiálů. Dále je nutné provádět zkoušky zrnitosti materiálů jednotlivých frakcí.

Výdej materiálu je zajišťován opět pomocí kolového nakladače. Vozidla po naložení jsou vážena ve vstupním prostoru za účelem materiálového toku a finančního uspořádání.

3.2.1 Technologie pro recyklaci

V současné době je na našem trhu mnoho dodavatelů jak mobilních, tak stacionárních recyklačních linek. Hlavní rozdělení je podle způsobu drcení – čelistové nebo odrazové drtiče. Kuželové a další speciální drtiče nejsou běžně provozované a jsou pouze jednoúčelové. Do drtičů jsou již montovány i vlastní sítové komory se zpětnou větví pro vrácení nadrozměrného materiálu zpět do drtiče. Třídíče jsou děleny podle velikosti sítové plochy a počtu sít. Základními parametry pro výběr linky je požadovaný výkon od 10 do 300 t/h a vstupní otvor do drtiče v šířce od 300 do 1500 mm. [12]

3.3 Betonový recyklát

Z hlediska ekonomického hodnocení nesmí použitý recyklát dosáhnout ceny přírodního hutného kameniva. To znamená, že z hlediska odběratele musí být rozhodně pod cenou klasického kameniva, a to nejlépe včetně dopravy.

Na ceně recyklace betonových odpadů se podílí především nutnost šetrnějších postupů při demolici konstrukce. Skládkám stavební suti se tento problém již vyhnul, ale i zde je zapotřebí investice do třídění drtě a k potřebnému vyloučení organických odpadů. V obou případech však k nutným investicím patří i doprava materiálu k recyklačním linkám a samotná recyklace. [13]

K dalším nutným nákladům patří i provádění řady kompletních analýz. Jedná se především o kontrolní testy hygienické nezávadnosti. Jsou prováděny chemické analýzy výluhu v rozsahu úměrném použití výrobku z odpadu, testy ekotoxicity na živých organismech, měří se hmotnostní aktivity materiálu, zejména 226Ra. Výsledky testů jsou porovnávány se vzorky z přírodních materiálů. U druhotně užitých betonů bývá díky vysokému pH cementového tmele zaznamenána i vyšší hodnota pH recyklátu. Zásaditá koncentrace je však nízká a v takovém stavu přírodě neškodí. [14]

V současnosti se cena přírodního drceného kameniva, v závislosti na zdroji a druhu frakce, pohybuje v rozmezí 250 – 340 Kč/t (bez DPH) a cena betonového recyklátu je mezi 120 – 220 Kč/t (bez DPH).

Vlastnosti betonové drtě se vyznačují:

- Přibližně stejnou měrnou hmotností jako přírodní kamenivo, ale objemovou hmotností nižší o 7-10 %,
- sypnou hmotností asi o 15-18% nižší a mezerovitostí o 10-15% vyšší, než přírodní kamenivo stejné zrnitosti,
- vyšší nasákavostí, zvláště drobná frakce < 4mm vykazuje nasákavost 4-12 %,
- velmi dobrou soudržností cementového kamene se zrny recyklátu, pokud je drcený beton navlhčen (hodnoty soudržnosti cementového kamene s betonovým recyklátem dosahují až 8,8 MPa, se žulou 5,2 MPa, s ocelí jen 2,1 MPa),
- nižší pevností a modulem pružnosti proti přírodnímu kamenivu (např. žula má pevnost v tlaku 120-140 MPa a beton většinou 25-60 MPa, modul pružnosti kameniva ze žuly dosahuje 27-51 GPa, oproti 13-40 GPa betonu. [3])

Základní požadavky na prokázání vlastností recyklovaného kameniva jsou:

1. Požadavky na geometrické vlastnosti

- zrnitost
- tvar zrn hrubého kameniva (index plochosti a tvarový index)
- procentní podíl ostrohranných a oblých zrn
- obsah jemných částic

2. Požadavky na fyzikální vlastnosti

- odolnost proti drcení hrubého kameniva
- odolnost hrubého kameniva proti otěru
- objemová hmotnost zrn
- nasákavost

3. Trvanlivost

V případě vydání prohlášení o shodě musí producent recyklátu zajistit provedení počátečních zkoušek typu a dále řízení shody tak, aby zajistil shodu výrobku – recyklát s normou deklarovanými hodnotami. [15]

Recyklované kamenivo do betonu musí geometricky, fyzikálně a chemickými vlastnostmi splňovat požadavky ČSN EN 12620. V této normě nejsou uvedené požadavky na recyklované kamenivo. Od 1. 5. 2008 je již v platnosti změna ČSN EN 206-1 (Z3) kde jsou stanoveny požadavky na recyklované kamenivo.

Při návrhu složení betonu, technologie výroby a dopravy čerstvého betonu je nutno zohlednit obvykle vysokou nasákavost recyklovaného kameniva.

Podle ČSN EN 206-1 (Z3) je recyklované kamenivo rozděleno do čtyř typů:

Typ 1: Drť nebo písek vybraný drcením pouze betonu (betonová drť).

Typ 2: Drť nebo písek vyrobený drcením stavební sutě.

Typ 3: Drť nebo písek vyrobený drcením zdiva (drcené zdivo).

Typ 4: Drť nebo písek vyrobený drcením ze směsi odpadu (směsný recyklát).

3.4 Beton z recyklovaného betonu

Jsou známy dva typy recyklace betonu. Jedná se o recyklaci sestupného typu (down-cycling), kdy jde především o druhotné užití suroviny jako materiálu nižších vlastností a recyklaci vzestupného typu (up-cycling), kdy vzniká prvek stejných nebo lepších vlastností než původní materiál. [18]

Beton z recyklovaného betonu je všeobecně použitelný za podmínek:

A – Betonový recyklát je vytríděn na hrubou a drobnou frakci a zbaven cizorodých částic. Asanované betonové konstrukce nebyly během exploatace extrémně znečištěny organickými látkami (dehet, olej aj.) nebo chemickými sloučeninami.

B – Beton z recyklátu je použitelný pro expoziční třídu (stupeň agresivity prostředí) ve smyslu ČSN EN 206:

- X0 – suché prostředí (např. interiérové konstrukce)
- XC1, XC2 – vlhké prostředí (např. základy)
- XF1 – mírně nasycené vodou, bez rozmrazovacích látek, napadené mrazem a táním

C - Složení betonu pevnostní třídy C 12/15 a C 16/20:

- přírodní písek frakce 0- 4 mm (maximálně s 20 % recyklátu do 4 mm)
- betonový recyklát hrubé frakce s max. zrnem 16 mm
- cement CEM II/A-S 42,5 v množství 320 až 360 kg.m⁻³
- konzistence se upravuje plastifikační přísadou, aby vodní součinitel nepřesáhl hodnotu 0,55-0,6 [14]

3.4.1 Vlastnosti betonu z recyklovaného betonu

Při recyklaci starého betonu vzniká relativně vysoký podíl frakce do 0/4 mm, která převážně obsahuje cementový kámen (z části zkorodovaný) a ten je jednoduše drtitelný. Drobná frakce má vyšší pórovitost, nasákavost a v důsledku toho nižší pevnost. Vzhledem k vyšší nasákavosti se vyžaduje zvýšení vodního součinitele, což vede k nižší pevnosti a zvýšení množství cementu, což způsobuje horší zpracovatelnost betonu, proto se musí část drobné frakce nahradit přírodním kamenivem. Do jaké míry je nutno tuto náhradu uskutečnit, se stále sleduje. [16]

Tab. 3.1 Technické vlastnosti betonu z recyklátu pevnostní třídy C 16/20 [3]

Vlastnost	Stanoveno	Požadavek	Zkušební ČSN
Pevnost v tlaku	27 MPa	$>(20+1,48.2,4)=24$	ISO 4012
Objemová hmotnost	2250 kg.m ⁻³	>2000 kg.m ⁻³	ISO 6275
Pevnost v příčném tahu	1,7 MPa		ISO 4108
Pevnost v tahu ohybem	5 MPa		ISO 4013
Modul pružnosti	30 Gpa		ISO 6784
Smrštění	0,3 mm.m ⁻¹		
Teplotní roztažnost	10.10 ⁻⁶ K ⁻¹		
Mrazuvzdornost	M 150	0,78 > 0,75	73 1322
Trvanlivost (NaCl roztok)	Rozpadá se	nevyhovuje	73 1326
Vodotěsnost	V4	nevyhovuje	ISO 7031
Hmotnostní aktivita	87 Bq.kg ⁻¹	< 150 Bq.kg ⁻¹	Vyhl. 187/97
Vodní výluh	vyhovuje	téměř pitná voda	NV 81/99
Ekotoxicita	vyhovuje	není toxický	Pokyny MZD

3.4.2 Využití betonového recyklátu a betonu z recyklovaného betonu

Postup přípravy RB je složitou technologickou záležitostí a je nutné přihlížet nejen na ekologický efekt recyklace, nýbrž i na ekonomickou stránku celého procesu. Obecně se jedná o rozrušení železobetonové konstrukce s následným drcením bloků. Ocel je z bloků vytrhávána a použita jako kovový šrot do hutnického průmyslu. U technologických linek je nutno uvažovat s odlučovacími zařízeními tuhých emisí a se zamezením prašnosti. Důležitými aspekty jsou doprava a technologie použití RB. [3]

Beton z RB nalézá využití u prvků nižších pevností, dále jako plnivo živičných směsí, zásypů a podkladních vrstev. Jemné frakce lze užít do malt nebo s nástupem nových poznatků aplikovat v jiných částech stavebního oboru. Je zkoumána i možnost využití frakce 0-4 mm

RB pro výrobu cementu (jemný podíl RB mívá obdobné chemické složení jako suroviny pro výpal slinku).

Hlavním cílem je možnost aplikace stavebních a demoličních odpadů v technologii betonu. Životnost volných bilančních zásob přírodního kameniva v České republice je, při současné úrovni těžby, asi 20 let. V České republice zároveň existuje velká potencionální zásoba betonového recyklátu, který představují panelové domy a další betonové stavby z poloviny 20. století, které se v řadě případů blíží k hranici své životnosti. Stavební odpady a recykláty mohou do budoucna představovat zásadní zdroj kameniva do betonu. [15], [17]

4 PŘÍMĚSI

Jsou to většinou práškovité látky přidávané do čerstvého betonu za účelem zlepšení některých vlastností nebo docílení zvláštních vlastností.

Dělí se na dva typy:

- inertní příměsi (typ I)
- pucolány nebo latentně hydraulické látky (typ II)

Dále k příměsím řadíme barevné pigmenty a organické polymery přidávané do polymercementových betonů. Příměsi se přidávají v takovém množství, které nepříznivě neovlivní vlastnosti betonu, zejména jeho trvanlivost a nezpůsobí korozi ocele. [18]

Při řešení diplomové práce byla použita struska, popílek a mikrosilika.

4.1 Struska

Pod pojmem struska si lze představit pevný nekovový odpad z hutní výroby, chemického nebo i jiného průmyslu, vznikající roztavením hlušiny rud, přísadků struskotvorných látek a minerálních podílů z pevných paliv.

4.1.1 Složení strusky

- **Chemické složení strusky**

Výroba surového železa spočívá v redukčním tavení železné rudy spolu se struskotvornou přísadou, kterou je vápenec. Při tomto tavení vzniká nejen surové železo, ale také vysokopecní struska. Ta je lehčí než roztavené železo a tudíž se hromadí nad ním. Tím zabraňuje zpětné oxidaci surového železa a také ho zbavuje nežádoucích příměsí, kterými jsou síra, fosfor, křemík a další. Podle složení rudy, druhu vyráběného železa, popela, koksu a druhu struskotvorné přísady má vysokopecní struska různé složení a tím i vlastnosti. Podle Guttmana se vysokopecní struska dělí podle chemického složení na pět typů: z železa hematitového, slévárenského, Thomasova, ocelářského a zrcadlového.

Stupeň zásaditosti

Poměr zásaditých a kyselých oxidů, konkrétně poměr $\text{CaO}:\text{SiO}_2$, je důležitým ukazatelem jakosti strusek.

Podle tohoto stupně zásaditosti se struska dělí do 4 skupin:

- 1) Při $p > 1,2$ se jedná o strusku vysoce zásaditou.
- 2) Je-li $p > 1$ nazýváme tuto strusku zásaditou.
- 3) Když $p < 1$ jde o strusku kyselou.
- 4) Zvláštním případem je struska s $p > 3,5$ a s vysokým obsahem Al_2O_3 .

V závislosti na chemické povaze a fyzikálním stavu, ve kterém utuhly, nalézají strusky své uplatnění. Používají se jako latentně hydraulická příměs do cementů, jako surovina při výrobě cementu, jako kamenivo do obyčejných betonů, či jako pórovité kamenivo do lehkých betonů. Je možné je použít jako zasypy, násypy a v neposlední řadě jako materiál pro výrobu minerálních vláken.

Tab. 4.1 Chemické složení hlavních typů vysokopecních strusek [19]

Železo	hematitové	slévarenské	Thomasovo	ocelářské	zrcadlové
SiO_2 [%]	32 - 34	30 - 40	29 - 38	33 - 40	30 - 34
Al_2O_3 [%]	10 - 13	10 - 21	9 - 18	6 - 14	8,1 - 8,3
FeO [%]	0,5 - 0,9	0,2 - 1,5	1,0 - 2,2	0,5 - 4,4	0,5 - 1,4
MnO [%]	0,3 - 0,4	0,2 - 0,6	1,3 - 4,0	1,0 - 16	7,7 - 12
CaO [%]	40 - 47	41 - 50	35 - 46	29 - 46	40 - 41
MgO [%]	2,5 - 3,4	1,0 - 4,5	1,2 - 10	20 - 10,5	5,5
CaS [%]	2,2 - 7,5	1,7 - 5,5	0,8 - 5	2,5 - 4,1	5,4

- **Mineralogické složení strusky**

Struska vzniká chlazením taveniny. Podle rychlosti chlazení vzniká struska sklovitá a nebo struskové minerály mají čas vykrytalizovat. Ve strusce je možné nalézt belit C_2S , monticellit CMS, akermanit C_2MS_2 , gehlenit C_2AS . Poslední dva zmíněné minerály tvoří směsné krystaly melilitové řady. Melilit patří mezi hlavní složky vysokopecní strusky. Dále se v ní nachází sulfidy CaS , MnS , FeS . V silně hořecnatých struskách může být přítomen i olivín $(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$. U strusek je důležitý krystalizační sled. Největší nukleární schopnost a krystalizační rychlost mívá belit, nakonec krystalizují nejtavitelnější minerály. Aktivní složkou ve strusce je především belit $\beta\text{-C}_2\text{S}$.

- **Rozpadavost strusek**

Silikátový (křemičitý) rozpad

Je zapříčiněn samovolnou přeměnou β -C₂S na γ -C₂S při chlazení strusky při 675°C, ale může probíhat i po velmi dlouhou dobu (několik let). Tato modifikační přeměna je doprovázena nárůstem objemu o 10%. Silikátový rozpad nastává u strusek s obsahem CaO vyšším než 42%.

Železnatý rozpad

Je způsoben jemně rozptýleným sirníkem železnatým FeS, a to jestliže obsah FeO > 3%. Za přítomnosti vody nastává oxidace a vykrystalizování síranu železnatého za zvětšení objemu o 38%. Často stačí jen zkouška uložením na 1 až 2 dny do vody, aby byla patrna náklonnost k rozpadu tohoto druhu. Železnatý rozpad nastává při tzv. studeném, tj. chybném chodu vysoké pece.

Manganatý rozpad

Je obdobný železnatému, jenže je způsobován sirníkem manganatým MnS. Oxidací nastává rozpínání o 24% a nebezpečí je, zjistí-li se chemickým rozbořem nad 5% MnO. K tomuto rozpadu také dochází při chybném chodu vysoké pece. [19]

4.1.2 Vliv strusky na vlastnosti betonu

Použití strusky nebo cementu obsahující strusku obvykle zlepšuje zpracovatelnost. Doba tuhnutí se zvyšuje se zvyšujícím se množstvím strusky. Snižuje se krvácení betonu z důvodu vyšší jemnosti mletí strusky. Na rozdíl od popílku neobsahuje struska uhlík, který může způsobit nestabilitu a ztrátu vzduchu v betonu. Struska má také příznivý vliv na ohybové pevnosti betonu, z důvodu silnějšího pouta mezi cementem, struskou a kamenivem. Pomáhá také k přeměně velkých pórů v pastě na menší póry, které zajišťují sníženou propustnost matrice v betonu. [21]

4.1.3 Cenový vývoj strusky

Výraznější nárůst ceny strusky započal v roce 2008. Příčinou tohoto zvýšení bylo omezení nebo pozastavení produkce železa v důsledku světové ekonomické krize, která trvala až do roku 2010. Její nedostatek na trhu se projevil nárůstem její ceny, a to až o 140%.

S klesající poptávkou po strusce a omezením skladovacích kapacit producentů strusky nastal obrat v její ceně, která zaznamenala v minulém roce výrazný pokles a dostala se na hodnoty kolem 230 Kč/t [17]. Tento rok cena strusky zase vzrostla, a to z důvodu pozastavení výroby železa, a tím pádem dochází k opětovnému nedostatku strusky.

4.2 Popílek

Elektrárenský popílek se zachycuje v elektrárenských elektrofiltrech v podobě suchého prášku, část pak odpadá v podobě vlhkého popílku po skrápění. Upotřebitelnost popílků záleží jak na chemickém a nerostném složení, tak na jemnosti. Složení je nejvíce ovlivněno chemickým a mineralogickým složením popela uhlí, ale i způsobem topení, zejména nejvyšší teplotou v topeništi, délkou žárového pásma, množstvím spalovacího kyslíku, chladnutím, aj. K nejlepším popílkům patří černouhelné, ale i hnědouhelné nebo i lignitové jsou často upotřebitelné.

4.2.1 Složení popílků

Tab. 4.2 Chemické složení popílků [19]

Uhlí	černé
Topeniště	s tavnými komorami
Původ	české elektrárny
SiO ₂	44 - 50 %
Al ₂ O ₃	22 - 26 %
Fe ₂ O ₃	7 - 14 %
TiO ₂	0,5- 1 %
CaO	4 - 9 %
MgO	1 - 4 %
Ztráty žíháním	5 - 14 %

Popílek má stejné chemické složení jako uhelná škvára a je soustavou drobných ztuhlých kapek její taveniny. Černouhelné popílků bývají sice méně znečištěny i stejnorodější, a proto lepší než hnědouhelné, ale popílků z topenišť s tavnými komorami jsou stejně dobré. Většinou všechny popílků mají vyšší obsah SiO₂ a méně CaO než zásaditá vysokopecní struska a povahu spíše pucolánovou.

Podle chemického složení lze dělit popílků do čtyř skupin:

- 1) **Pucolánové** - uplatňují se jako přirozené pucolány nebo jako Si-látka, tedy aktivní kyslíčník křemičitý.
- 2) **Vápenné** – ty jsou na vápno nejbohatší a chovají se jako vzdušná vápenná malta.
- 3) **Hydraulicky probuditelné** – mají tolik vápenné i hlinité (Al₂O₃) složky, že v nich lze vhodným budičem vzbudit hydrauličnost.
- 4) **Hydraulické** – obsahují slínkové nerosty v takové míře, že se chovají jako hydraulické vápno.

Pucolánový pojivý účinek se projeví po přísadě CaO nebo portlandského cementu. V případě použití popílku ve směsi s cementem se prokázalo, že se na počátku hydratace cementu nepodílí na tvorbě gelu, nýbrž pouze na povrchu svých zrn adsorbuje část Ca^{2+} iontů. Teprve v pozdějším údobí se projevuje aktivní účast pucolánu na průběhu tvrdnutí vytvořením reakční zóny na povrchu zrn, která se vážou intenzivně na vzniklý C-S-H gel.

4.2.2 Použití popílků

Protože popílek obsahuje málo chemicky, resp. hydraulicky aktivních součástí, jeho použití se nejvíce rozšířilo v těchto směrech:

- jako aktivní plnivo při výrobě pórobetonu z popílku,
- jako pucolánová přísada do betonových směsí, k úspoře dávkování cementu,
- jako jemnozrnné plnivo u betonových směsí.

Popílek s vyšším obsahem CaO (poměr $\text{CaO}:\text{SiO}_2=0,8$) lze použít spolu s portlandským cementem k výrobě obyčejného a vyztuženého betonu (nikoli betonu předpjatého). Množství popílku může činit až 150 kg na m^3 směsi. Přídavkem popílku 30 až 150 kg lze snížit množství cementu o 20 až 70 kg na m^3 . Kromě toho lze použít i přísady na zlepšení kvality betonu.

4.2.3 Vliv popílků na vlastnosti betonu

Důležitým aspektem je jemnost popílků, která je závislá na dokonalosti mletí uhlí, způsobu topení i jímání v odprašovacích zařízeních. Výhodou jemných popílků není jen dostatečně velký reakční povrch, ale i okolnost, že v nich nebývá nespálený zbytek, který může způsobovat objemové změny betonu.

Popílek se zúčastňuje reakcí pomaleji než cement, a proto se snižují počáteční pevnosti betonu. Po delší době, např. jednom roce, se často již pevnosti vyrovnají. Takový beton má zvýšenou vodotěsnost, trvanlivost, odolnost k účinkům náporových vod a snížené smršťování.

Výhodné je, že podobně jako u strusky se také u popílků více zlepšuje pevnost v tahu než v tlaku betonu. Opatrnosti je třeba tam, kde bude beton vystaven střídavému mrznutí a tání, neboť popílků nezhoršují mrazuvzdornost jen výjimečně (vadí nespálený uhlík) [19].

Přidání popílku do betonu za účelem snížení spotřeby cementu je velmi efektivní. Cena popílku, která je zlomkem ceny stavebních pojiv, dělá tuto surovinu velmi žádanou. Proto se v tomto směru i vzhledem k dalšímu použití popílku stále obrací pozornost na jeho co nejširší užití ve stavebnictví. [20]

4.3 Mikrosilika

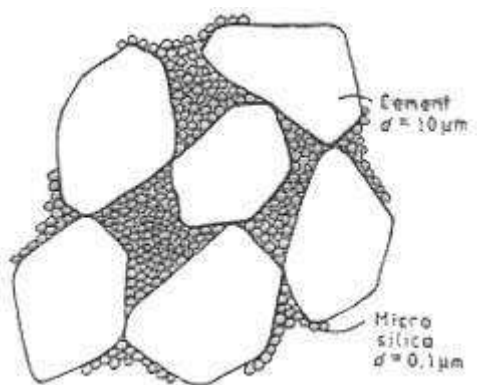
Je to minerální příměs, která vzniká jako odpad některých hutnických provozů nebo je vyráběna uměle s označením mikrosilika, případně nanosilika. Její užití v betonu je známo již asi 70 let. Vyznačuje se mimořádně velkým měrným povrchem a dobrými pucolánovými vlastnostmi. Obsahuje 80 – 98% amorfního SiO_2 ve tvaru kulatých zrn o průměru asi $(1-2) \cdot 10^{-7}$ m, při měrném povrchu 15000 až 25000 $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ a měrné hmotnosti $2120 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Požaduje se ztráta žíháním do 4%. Křemičité látky jsou aktivní příměsi do cementu i betonu, mají charakter pucolánových přísad (typ II). Zlepšují vlastnosti čerstvého betonu jako je odmísení, bleeding, čerpatelnost, avšak zvyšují potřebné množství vody asi o 1litr na 1 kg křemičitých látek pro dosažení stejné zpracovatelnosti. Obvykle se dává 5–10 % z hmotnosti cementu. Pucolánovou reakcí se snižuje pH cementového tmele podle reakce:

$$\text{SiO}_2 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{C} - \text{S} - \text{H}$$

Dávka nemá překročit 11%, aby nedošlo ke snížení pH cementového tmele a tím k depasivaci ocelové výztuže. [18]

4.3.1 Vliv mikrosiliky na vlastnosti betonu

Efekt plniva se projeví obklopením cementového zrna při náhradě cca 8% cementu mikrosilikou milionem částecek siliky. Vzhledem k malému průměru částic je MS schopna vyplnit mezery mezi cementovými zrny a výrazně zvýšit hutnost okolí cementového kamene.



Obr. 4.1 Efekt plniva [22]

Pucolánová reaktivita je dána dvěma faktory: množstvím reaktivních silikátových částecek reagujících s Ca(OH)_2 a měrným povrchem pucolánu. Obě podmínky splňuje MS a NS ve značné míře. Trvanlivost betonu je dána množstvím kapilár. Právě MS je látka snižující podíl kapilár v betonu a to v důsledku pucolánové reakce více než efektem plniva.

Přechodová zóna mezi cementovým kamenem a kamenivem je slabinou každého normálního betonu, protože hutnost v tomto místě je vždy nižší nežli v ostatní struktuře betonu vzhledem k nedostatečnému vyplnění klínů mezi zrny cementu a tvorbě ettringitu působícího svými krystaly jako zábrana spojení. Pouhou přítomností a pucolánovou reakcí zabraňuje mikrosilika tvorbě velkých $\text{Ca}(\text{OH})_2$ krystalů s pevnou orientací.

Tab. 4.3 Vliv mikrosiliky na vlastnosti betonu [22]

Vlastnost betonu	Beton s nano nebo mikrosilikou
Pevnost v tlaku	++
Pevnost v tahu	+
Pevnost v tahu za ohybu	+
E-modul	+, 0
Smršťování	+, 0
Objemové změny	-
Odolnost proti obrušování, erozi	++
Odolnost proti mrazu nebo mrazu a posyp. solím	++
Odolnost vůči průniku	++
Propustnost	--
Odolnost proti chemické agresi	+, ++
Odolnost proti alkalicko křemičité reakci	+, ++
Difuze chloridů	--
Elektrický a elektrolytický odpor	++
Ochrana koroze výztuže	+

Legenda: ++ výrazné zvýšení, + zvýšení, 0 nemá účinek, - snížení, -- výrazné snížení

4.3.2 Přínos mikrosiliky

Úspory hmoty betonu přinášejí nejen přímé ekonomické úspory, ale i vedlejší efekty vztažené k životnímu prostředí (menší zábor půdy na stavbu, snížení produkce betonu tím i menší spotřebu energie, vody, nižší emise SO_2 a prachu). [22]

Z důvodu poměrně vysoké ceny mikrosiliky, ve srovnání s druhotnými surovinami, není její používání obvyklé i přes její velice dobré účinky na vlastnosti betonu [17].

5 METODIKA PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK BETONU

Jednotlivé zkoušky prováděné v rámci výzkumu splňují normové požadavky na aplikace daných postupů.

Jedná se o provedení síťového rozboru z důvodu zajištění optimální zrnitosti přírodního kameniva a recyklátu, stanovení konzistence směsi během její přípravy, zajištění správného uložení a ošetření vzorků, provedení orientační tlakové zkoušky ztvrdlého betonu (po 1 měsíci vlhkého uložení), provedení zkoušky pevnosti v příčném tahu (po 1 měsíci v 0,03% CO₂ + 3 měsících v 98% CO₂ a 4 měsících v 0,03% CO₂), provedení zkoušky na propustnost betonu pro vzduch typu TORRENT a zkoušky na propustnost betonu pro vodu typu ISAT (po 1 měsíci vlhkého uložení a také po 1 měsíci v 0,03% CO₂ + 3 měsících v 98% CO₂ a 4 měsících v 0,03% CO₂) a nakonec stanovení hloubky karbonatace fenolftaleinovým testem (po 1 měsíci v 0,03% CO₂ + 3 měsících v 98% CO₂ a 4 měsících v 0,03% CO₂).

5.1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti - Síťový rozbor (ČSN EN 933-1)

Pro zkoušku se použije normová sada zkušebních sít (tvořená sérií sít, horní část opatřena víkem, dolní dnem), sušárna se samočinným udržováním nastavené teploty, technické váhy, prosévací a prací zařízení, kartáče, štětce.

Pro zkušební navážky používáme množství dané normou. Pro frakci pod 4 mm 0,2 kg, pro frakci nad 8 mm 0,6 kg a pro frakci nad 16 mm 2,6 kg. Použijeme vzorky vysušeného kameniva. Suchým vzorkem rozumíme vzorek vysušený při konstantní teplotě 105 °C do ustálené hmotnosti. Proséváme sadou normových sít pomocí strojního prosévacího zařízení. Strojní prosévání ukončíme proséváním ručním (tak dlouho, dokud neprosejeme během 1 minuty více jak 0,1% hmotnosti navážky). Dílčí zbytky na sítích zvážíme a procentuálně vyjádříme dle níže uvedeného vztahu (zaokrouhlíme na 0,1%), dále vypočteme celkový zbytek na každém síti (na 0,1%) a celkový propad každým sítem. [23]

$$a_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100$$

$$A_i = a_i + a_{i+1} + \dots + a_n$$

$$Z_i = 100 - A_i$$

a_i ... dílčí zbytek na síti [%]

m ... hmotnost vzorku kameniva po zkoušce [g]

m_i ... hmotnost dílčího zbytku na síti [g]

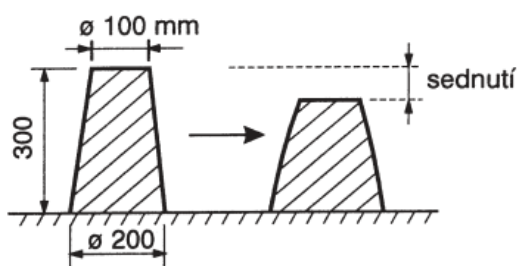
A_i ... celkový zbytek na síti [%]

Z_i ... celkový propad každým sítem [%]

5.2 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím (ČSN EN 12350-2)

Pro zkoušku sednutím použijeme Abramsův kužel (forma), propichovací tyč, násypku, podkladní desku, pravítko, lopatku a vlhký hadřík.

Kužel, podkladní desku i propichovací tyč navlhčíme. Poté se forma položí na podkladní desku a přislápne se, aby nedocházelo při plnění betonem k jeho vytékání. Beton poté lopatkou plníme ve 3 vrstvách. Každá vrstva (přibližně v 1/3 výšky kužele) se zhutní 25 vpichy propichovací tyčí. Při plnění horní vrstvy beton přeplníme přes okraj formy. Po zhutnění poslední vrstvy nadbytečný beton odstraníme současným otáčením a příčným pohybem propichovací tyčí. Dále odstraníme beton z podkladní desky a kužel opatrným pohybem rovnoměrně bez otáčení během 2 až 5 sekund zvedneme svisle nahoru. Ihned po zvednutí formy změříme a zaznamenáme sednutí h (viz. Obr. 5.1) mezi výškou formy a nejvyšším bodem sednutého zkušební vzorku. Podle skutečného sednutí změřeného s přesností na 10 mm určíme danou konzistenci betonu. [24]



Obr. 5.1 Sednutí kužele při zkoušce konzistence a způsob odečtu naměřených hodnot [24]

Tab. 5.1 Stupně konzistence BS při zkoušce sednutím kužele [24]

Stupeň	Sednutí [mm]
S1	10 až 40
S2	50 až 90
S3	100 až 150
S4	160 až 210
S5	≥220

5.3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles (ČSN EN 12390-2)

Pro zkoušku použijeme formy vyhovující EN 12390-1, vibrační stůl s minimální frekvencí 40 Hz, lopatku, ocelovou zednickou lžící, separační prostředek, který nereaguje s betonem.

Příprava a plnění forem

Před plněním by se vnitřní strany formy měly natřít separačním přípravkem, aby nedocházelo k přilnutí betonu k formě. Plníme ve dvou vrstvách a každou zhutňujeme tak,

aby nedocházelo k nadměrné segregaci a odlučování vody a přitom se dosáhlo náležitého zhutnění.

Urovnání povrchu

Odstraníme přebytečný beton nad horní hranou formy a povrch opatrně urovnáme ocelovou zednickou lžící.

Značení

Tělesa zřetelně a nesmazatelně označíme, aniž by došlo k poškození tělesa.

Ošetřování zkušebních těles

Zkušební tělesa ponecháme ve formě nejméně po dobu 16 hodin, ale ne déle než 3 dny, při teplotě $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$, přičemž je nutno zabránit otřesům, vibraci a vysoušení. Po vyjmutí z formy zkušební tělesa uložíme do vody o teplotě $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ nebo je ponecháme v místnosti o teplotě $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ a relativní vlhkosti $> 95\%$. [25]

5.4 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles (ČSN EN 12390-3)

Ke stanovení pevnosti v tlaku na vzorcích zkušebních krychlí je použit zkušební lis, vyhovující EN 12390-4.

Dotykové plochy tlačných desek lisu otřeme a odstraníme všechny zbytky písku nebo jiného uvolněného materiálu z povrchu zkoušeného tělesa na plochách, které poté budou v dotyku s tlačnými deskami. Krychle osadíme tak, aby směr zatěžování byl kolmý na směr ukládání betonu. Nastavíme konstantní rychlost zatěžování s nárůstem $0,6 \pm 0,2\text{ MPa/s}$. Dané zkušební těleso zatěžíme plynule, bez rázů. Nepřetržitě zvyšujeme stanovenou konstantní rychlost až do porušení. Poté zaznamenáme dosažené maximální zatížení v kN. Způsob porušení vzorků je znázorněn na obr. 5.2 a obr. 5.3.

Pevnost v tlaku byla spočítána následujícím vztahem:

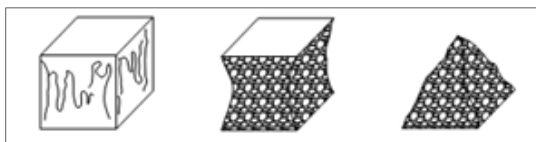
$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (5.1)$$

kde f_c je pevnost v tlaku, v MPa [N/mm^2]

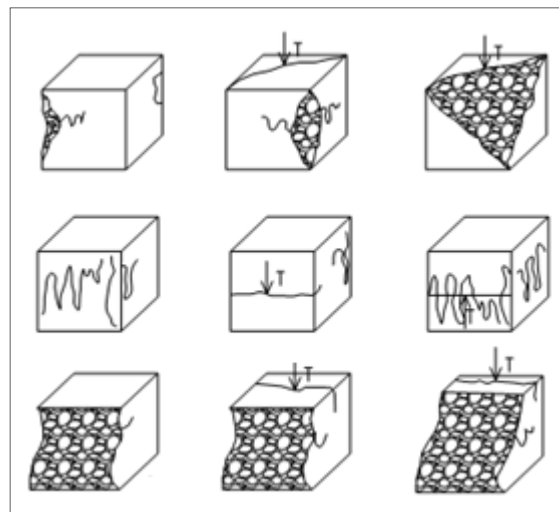
F je maximální zatížení při porušení [N]

A_c je průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení v tlaku, vypočtená z jmenovité velikosti tělesa (viz EN 12390-1) [mm^2].

Pevnost v tlaku se zaokrouhlí na nejbližších $0,1\text{ MPa}$ [N/mm^2]. [24]



Obr. 5.2 Vyhovující způsoby porušení zkušebních krychlí [26]



Obr. 5.3 Některé nevyhovující způsoby porušení zkušebních krychlí [26]

5.5 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles (ČSN EN 12390 -6)

Pevnost v příčném tahu se stanovuje na zkušebních tělesech tvaru válce nebo krychle. Tělesa změříme s přesností na 1 mm a stanovíme jejich objemovou hmotnost. Poté nerovné povrchy zarovnáme broušením a umístíme do zatěžovacího lisu. Na vrchní i spodní plochu umístíme roznášecími proužky, které musí být nad sebou. Jejich délka je minimálně rovna délce zkušebního tělesa, tedy v případě krychle šířka 15 ± 2 mm a tloušťka 4 ± 1 mm. Roznášecí proužky mohou být vyrobeny z překližky nebo z tvrdého dřeva.

Při zkouškách na krychlích je nutné krychli umístit do válcového zatěžovacího segmentu, který má zesponu a shora krychle segment ve tvaru úseče kruhu o poloměru 75 mm. Rychlost zatěžování je v rozsahu od 0,04 MPa/s do 0,06 MPa/s a doba trvání zkoušky je nejméně 30 s. Výsledek zaokrouhlíme na 0,05 MPa.

Pevnost v příčném tahu byla stanovena následujícím vztahem:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times l \times d} \quad (5.2)$$

kde f_c je pevnost v příčném tahu, v MPa [N/mm^2]

F je maximální zatížení při porušení [N]

l je délka dotykové přímky tělesa

d je příčný rozměr tělesa [mm] [27]

5.6 Měření permeability přístrojem TORRENT

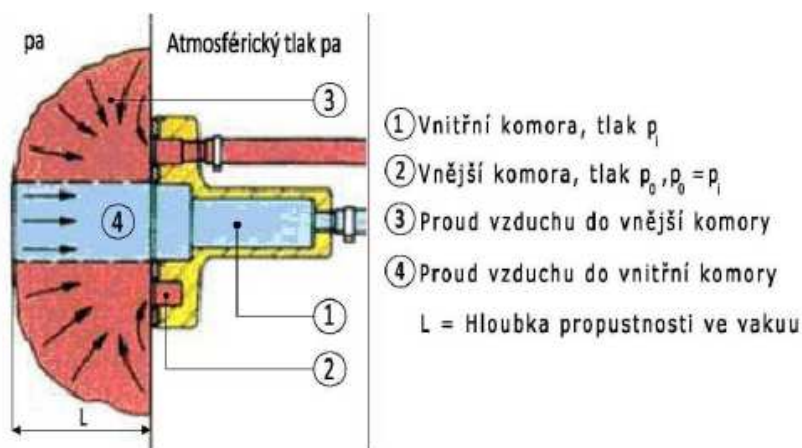
Přístroj na zkoušení permeability TORRENT je měřicí přístroj, který je vhodný pro nedestruktivní stanovení vzduchové nepropustnosti krycí vrstvy betonu. Přístroj pracuje ve spojení s vakuovým čerpadlem a může být použit k měření jak na stavbě, tak v laboratoři. Měření je považováno za velmi spolehlivé a snadné, můžeme ho použít pro plochy vodorovné i svislé a není nijak časově náročné.

5.6.1 Princip měření

Hlavními částmi přístroje jsou dvoudílná vakuová komora (s vnitřní komorou o průměru 32 mm a vnější komorou o průměru 86 mm) a tlakový regulátor. Ten zajišťuje proudění vzduchu kolmo k povrchu směrem do vnitřní komory, ze které je odsáván vzduch vývěvou.

Princip stanovení vzduchové propustnosti betonu spočívá ve vytvoření vakua při povrchové vrstvě betonu a měření průtoku vzduchu betonem do měřicího zařízení během stanoveného časového úseku.

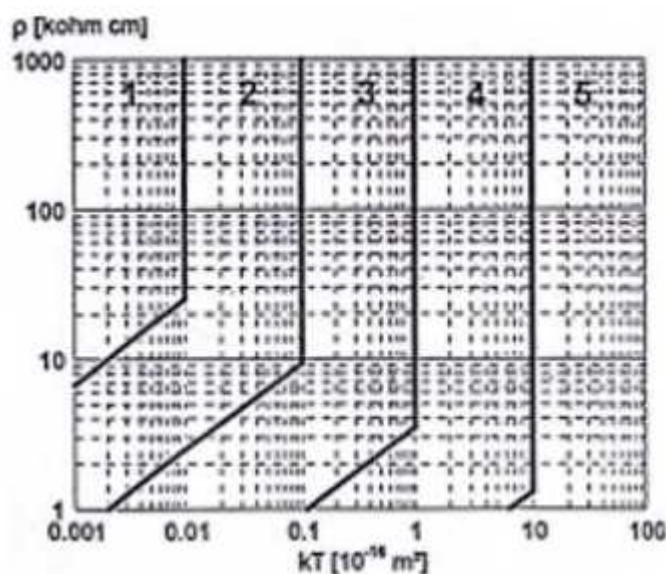
Je-li vzduch z betonu dostatečně odsátý, sníží se tlak a měřicí jednotka začne ve vnitřní komoře zaznamenávat naopak vzestup tlaku za jednotku času. Pak je zaznamenáván tok vzduchu betonem. Aby bylo zajištěno, že do vnitřní komory bude proudit vzduch pouze pod jejím ústím a ne z okolního betonu nebo atmosféry, je využita vnější komora. Stabilizátor tlaku kontroluje tlak ve vnitřní komoře p_i tak, aby odpovídal tlaku ve vnější komoře p_0 . Předpokládá se, že zachování stejného tlaku zaručuje přestup vzduchu z okolního betonu a atmosféry do vnější komory a neovlivní tak tlak p_i ve vnitřní komoře. [29]



Obr. 5.4 Proudění vzduchu ve vakuových komorách [28]

Tab. 5.2 Třídy kvality povrchové vrstvy betonu [28]

Kvalita povrchové vrstvy betonu	Index	$kT [10^{-16} \text{ m}^2]$
velmi špatná	5	>10
špatná	4	1,0 - 10
střední	3	0,1 - 1,0
dobrá	2	0,01 - 0,1
velmi dobrá	1	$<0,01$

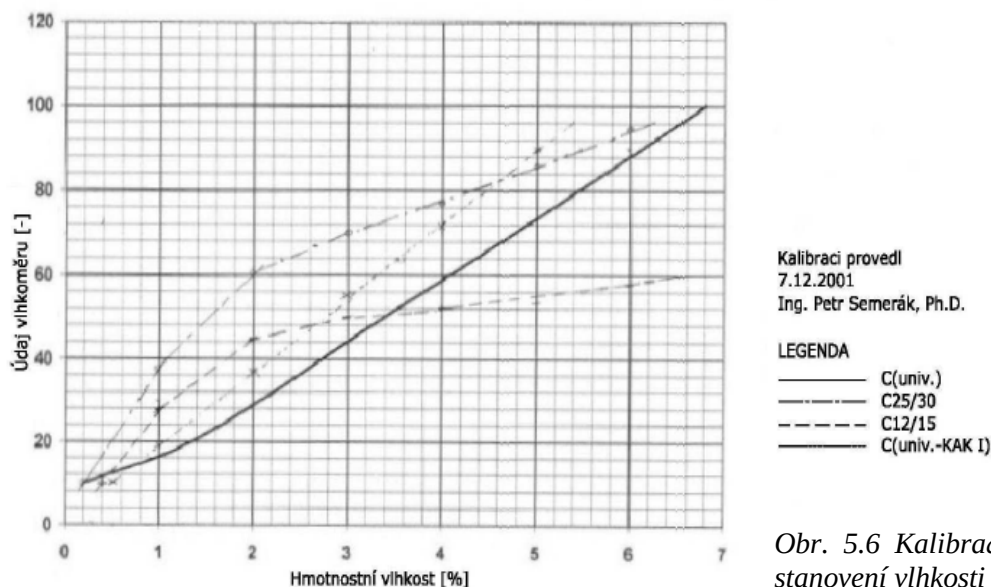


Obr. 5.5 Normogram pro zjištění kvality betonu [28]

V případě, že je beton suchý, může se kvalita jeho povrchové vrstvy určit přímo z naměřené hodnoty kT , kterou indikuje přístroj. Zařazení se provede podle stupnice dle tabulky 5.2.

Je-li beton vlhký nebo není-li známa jeho vlhkost, zjišťují se kromě hodnoty kT i hodnota $\rho/k\Omega$ (elektrický odpor měřený Wennerovou metodou). Třída kvality betonové vrstvy je pak stanovena z nomogramu.

Aktuální vlhkost betonu můžeme stanovit nepřímo použitím kapacitního vlhkoměru KAKASO. Pomocí vhodné kalibrační křivky (pro známou či předpokládanou třídu betonu) lze analogový údaj na vlhkoměru přetransformovat na hmotnostní vlhkost povrchové vrstvy testovaného betonu.



Obr. 5.6 Kalibrační křivka pro stanovení vlhkosti betonu

5.6.2 Korekce součinitele k_T pro referenční (nominální) hodnotu vlhkosti

Z důvodu porovnávání součinitelů propustnosti k_T , stanovených při rozdílných vlhkostních stavech vzorků, byla provedena korekce součinitele k_T pro referenční hodnotu hmotnostní vlhkosti odpovídající 3%.

Vztah ke korekci k_T :

$$\ln k_{T;3} = \ln k_{T;w} [1 - \alpha(3 - w)] \quad (5.3)$$

Kde: $k_{T;3}$ = součinitel vzduchové propustnosti při hmotnostní vlhkosti materiálu 3 %

$k_{T;w}$ = součinitel vzduchové propustnosti při aktuální vlhkosti w

α = opravný vlhkostní koeficient

Z rovnice (5.3) byla získána hodnota opravného součinitele $\alpha = 0,42$. Koeficient byl stanoven pro beton třídy C 20/25 a její hodnotu tedy nelze považovat za obecnou, ale u různých materiálů se příliš neliší. [30]

5.7 Měření povrchové nasákavosti přístrojem ISAT

Zařízení ISAT se používá pro určení propustnosti pro vodu měřením výhradně na zkušebních tělesech. Zacházení s přístrojem vyžaduje preciznost, vlastní měření může být časově poměrně náročné. Smí se použít výhradně na vodorovné ploše a před měřením je nutné stanovit aktuální vlhkost měřeného povrchu. [31]

Principem zkoušky je stanovit, jaký objem vody (měřeno dílky kalibrované skleněné kapiláry) je konstantním přetlakem 200 mm vodního sloupce pohlcen povrchovou vrstvou betonu o známé ploše.

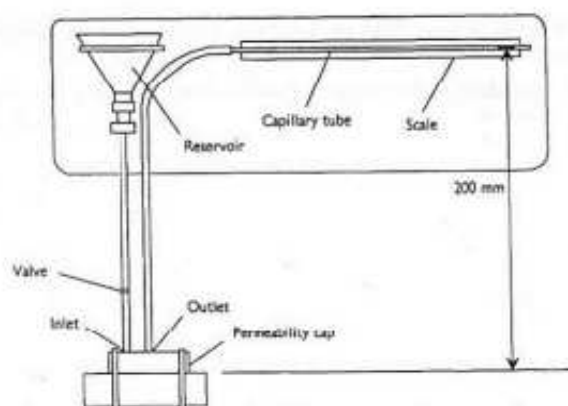
5.7.1 Popis měřicího zařízení

Přístroj se skládá ze dvou stojanů propojených nosnou polymerní deskou, ke které je připevněna kapilární trubička o průměru 1,81 mm a délce 327 mm. Trubička je kalibrována, každý dílek stupnice odpovídá pohlcenému 0,01 ml vody na metr čtvereční povrchové vrstvy betonu za sekundu. Vertikálně nastavitelná poloha vodorovné kapiláry včetně trychtýřovitého zásobníku umožňuje dodržení konstantního přtlaku vodního sloupce v hodnotě 200 mm nad povrchem zkoušeného betonu. Trychtýřovitý zásobník, sloužící pouze k prvotnímu zavodnění systému a event. jeho průběžnému doplnění, je spojen s akrylátovým zvonem, zajišťujícím kontakt vody s betonem, přes uzavírací kohout. Zvon průměru 85 mm je opatřen pryžovým těsněním a má dvě vyústění. Jedno slouží k prvotnímu zavodnění systému z trychtýře, druhé přivádí vodu z kapilární trubice během celé doby měření.

Z důvodu následného porovnání výsledků propustnosti rozdílných receptur betonů je nutno vždy testovat vzorky s minimálním obsahem vlhkosti. Vlhkost betonů je snižována v elektrické sušárně při teplotě 105 °C po dobu 48 hodin. Poté jsou vzorky následujících 24 hodin ochlazovány na laboratorní teplotu 20 ± 2 °C.

5.7.2 Postup měření

Kontaktní zvon lze pomocí svěrek přitisknout k testovanému povrchu betonu, z důvodu nepropustnosti kontaktu zvon-povrch betonu je vhodné mezilehlé pryžové těsnění doplnit vrstvičkou silikonu. Kapilára se nastaví horizontálně 200 mm nad zkoušený povrch betonu a zásobní trychtýř se naplní destilovanou vodou. Poté se povolí uzavírací kohout a zaznamená zahájení testu. Jakmile je kapilára naplněna vodou, kohout trychtýře se uzavře a po 5 sekundách se odečte a zaznamená hodnota pokleslé (lépe posunuté – jde o horizontální směr) hladiny na kalibrované stupnici kapiláry. Dle posunu (úbytku) hodnoty na kapiláře po 5 sekundách se stanoví intervaly indikace hladiny vody v kapiláře na 30, 60 nebo 120 sekund. Na jednom vzorku provádíme tři následné cykly měření, a to po 10, 30 a 60 minutách od zavodnění systému.



Obr. 5.7 Měřicí zařízení, metoda ISAT [31]

5.7.3 Výpočet propustnosti betonu

Jednotlivé dílky stupnice vyjadřují rychlost toku vody povrchem betonu v závislosti na určitém čase. Výpočtový vztah je dán vzorcem:

$$f = \frac{60}{t} \times D \times 0,01 \quad (5.4)$$

kde f je tok vody [$\text{ml.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$]

D je počet dílků na stupnici v čase t

t je čas testu [s] [35]

Pokud rychlost toku je po 5 sekundách větší než 30 dílků, znamená to, že propustnost je $3,60 \text{ [ml.m}^{-2}.\text{s}^{-1}]$ a v měření není vhodné pokračovat z důvodu velké povrchové propustnosti betonu (metoda není určena pro velmi propustné betony).

Tab. 5.3 Klasifikace absorpce povrchové vrstvy betonu, metoda ISAT [32]

propustnost betonu	tok vody [$\text{ml.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$]			
	intervaly měření			
	10 min	30 min	60 min	120 min
vysoká	>0,5	>0,35	>0,2	>0,15
střední	0,25 - 0,5	0,17- 0,35	0,10 - 0,20	0,07 - 0,15
nízká	<0,25	<0,17	<0,1	<0,07

5.8 Určení hloubky karbonatace fenolftaleinovým testem

Test indikace hloubky karbonatace je založen na principu změny barvy indikátoru v závislosti na změně pH betonu. Na obě části čerstvě oddělených lomových ploch testovaných krychlí po zkoušce v příčném tahu se aplikuje 1% roztok fenolftaleinu v denaturovaném lihu. Po standardních 60 minutách reakčního intervalu je posouzeno zabarvení fenolftaleinem ošetřené lomové části betonu. Pokud se beton zbarví do červenofialové barvy, je „zdravý“ a není tedy zkarbonatován (obsahuje dostatek portlanditové složky – hydroxidu vápenatého $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Nezabarví-li se beton vůbec, je plně zkarbonatován a došlo tedy k úplné přeměně portlanditu na neutrální kalcit. Tato přeměna je doprovázena poklesem pH betonu na 8,5 - 9,8 a odpovídá přibližně II. etapě karbonatace, kdy již může docházet ke korozi výztuže.

Po zrakovém posouzení je nutno stanovit hloubku hranice zabarvení pomocí délkového měřidla s přesností na 1 mm. Při vyhodnocení průměrné hloubky karbonatace lomové plochy je nutno vyjít z požadavků specifikovaných v ČSN EN 13 295 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení odolnosti proti karbonataci.



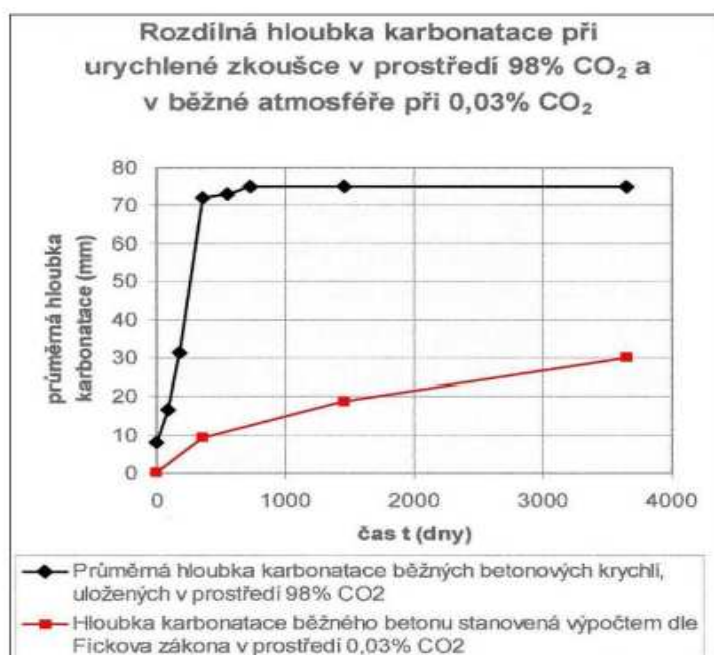
Obr. 5.8 Stanovení hloubky karbonatace fenolftaleinovým testem

5.8.1 Urychlená zkouška karbonatace v 98 % CO_2

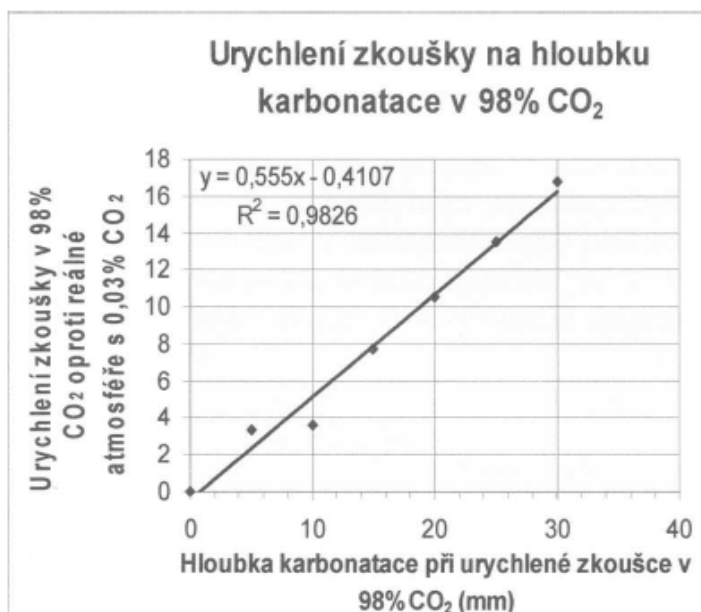
Urychlená zkouška na hloubku karbonatace v 98% CO_2 byla vyvinuta Ústavem stavebního zkušebnictví VUT v Brně v roce 2009. Důvodem vývoje nové, tzv. urychlené metody, byla jednak příliš vysoká cena 1% CO_2 z Belgie (tuto koncentraci předepisuje ČSN EN 13 295), jednak normový test dle ČSN EN 13 295 je krátkodobý (uložení 56 dnů v 1%

CO₂ – test hodnotí náchylnost ke karbonataci) a málo vypovídá o skutečné hloubce karbonatace vzorků v průběhu nebo na konci jejich životnosti.

Rychlost karbonatace v 98% CO₂ se oproti prostředí s 0,03 % CO₂ neustále zvyšuje, jak je patrné z obr. 5.9. Na základě těchto výsledků byla stanovena korelační křivka, pomocí níž lze z hodnot hloubek karbonatace při urychlené zkoušce stanovit odpovídající skutečnou dobu karbonatace (pro stejnou hloubku poškození) v reálném prostředí 0,03 % CO₂. [33]



Obr. 5.9 Rychlost karbonatace v 98 % CO₂ a běžné atmosféře s 0,03 % CO₂ (teoreticky dle Fickova zákona)



Obr. 5.10 Korelační vztah mezi hloubkou karbonatace v 98 % CO₂ a urychlením zkoušky oproti reálné atmosféře s 0,03 % CO₂

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální práce byly zaměřeny obecně na zjištění trvanlivostních vlastností betonů z betonového recyklátu. Původní hutné hrubé kamenivo určené do referenčního betonu bylo nahrazeno neupraveným betonovým recyklátem alternativně s příměsí strusky, popílku a mikrosiliky. Referenční i testované záměsi byly vyráběny se dvěma rozdílnými dávkami cementu, a to 250 kg/m^3 a 450 kg/m^3 . Zkoušky byly prováděny na třech sadách normových betonových krychlí o hraně 150 mm.

První sada krychlí byla určena ke zkouškám povrchové propustnosti pro vzduch (TORRENT) a povrchové propustnosti pro vodu (ISAT). Tyto zkoušky byly prováděny po 1 měsíci zrání betonu ve vlhkém uložení a následném vysušení (identifikace počátečního stavu propustností povrchové vrstvy betonu) a následně po uplynutí dalších 3 měsíců laboratorního uložení v prostředí 0,03 % CO_2 a nutného vysušení (celkové stáří betonu 4 měsíce). Po provedení propustnostních zkoušek byla stanovena pevnost v příčném tahu a zkouška na hloubku karbonatace fenolftaleinovým testem. U druhé sady byly provedeny stejné zkoušky jako u sady první s tím rozdílem, že krychle byly po 1 měsíci vlhkého uložení umístěny na 3 měsíce do komory s 98 % CO_2 . Na třetí sadě krychlí byla stanovena orientační pevnost v tlaku po 1 měsíci vlhkého uložení.

Výsledky výše popsaných zkoušek přispějí k zhodnocení vlivu silikátových příměsí na aktuální stav propustnosti povrchových vrstev betonu z betonového recyklátu v agresivním prostředí a napomohou hrubému odhadu trvanlivosti testovaných betonů.

6 BETONOVÁ SMĚS

6.1 Složení BS

Zkušební krychle byly vyráběny dle celkem 5 rozdílných receptur BS. Krychle dle první receptury R1 jsou vyrobeny z referenčního betonu z hrubého kameniva (tab. 6.1). U druhé receptury R2 jsme provedli pouze náhradu hrubého kameniva za betonový recyklát frakce 0-16 mm (tab. 6.2). Receptury R3-R5 jsou založeny také na náhradě hrubého kameniva za recyklát s přidavkem příměsí, kde receptura R3 obsahuje 30 % vysokoteplotního popílku z hmotnosti cementu, R4 30 % mleté vysopeční strusky, R5 10 % průmyslové mikrosiliky (tab. 6.3 – 6.5). BS pod označením R1 – R5 byly vyráběny ve dvou variantách, a to s množstvím cementu 250 kg/m^3 a s 450 kg/m^3 (dávka příměsí byla pro obojí množství cementu totožná).

Ze záměsí všech receptur byly vyráběny krychle vždy tří sad. První a druhá sada sloužila ke zjištění trvanlivostních vlastností s tím rozdílem, že první sada byla po 1 měsíci zrání ve vlhkém uložení umístěna další 3 měsíce do laboratorního prostředí s 0,03 % CO_2 a druhá sada 1 měsíc ve vlhkém uložení + 3 měsíce v 98 % CO_2 . Třetí sada sloužila ke zjištění pevnosti v tlaku po 1 měsíci zrání ve vlhkém uložení. Z každé receptury bylo vyrobeno 6 krychlí o rozměrech $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$, tedy sumárně 30 krychlí. Vždy první tři krychle ze záměsí receptur R1 – R5 byly vyrobeny z betonu s množstvím cementu 250 kg/m^3 , poté bylo množství cementu upraveno na hodnotu 450 kg/m^3 . Avšak přidavkem cementu se zvýšila konzistence, která byla upravena dodatečnou adicí vody. Všechny záměsi byly míchány na konzistenci S1 (sednutí kužele 10 – 40 mm).

6.1.1 Složení BS na 1 m^3

Tab. 6.1 Receptura BS pro referenční beton

Receptura R1/1, R1/2, R1/3		Receptura R1/4, R1/5, R1/6	
Referenční receptura, použito přírodní hrubé kamenivo Olbramovice frakce 8-16 mm.		Referenční receptura, použito přírodní hrubé kamenivo Olbramovice frakce 8-16 mm.	
CEM II 32,5/B-S R	250 kg/m^3	CEM II 32,5/B-S R	450 kg/m^3
0-4 Bratčice	760 kg/m^3	0-4 Bratčice	760 kg/m^3
4-8 Tovačov	228 kg/m^3	4-8 Tovačov	228 kg/m^3
8-16 Olbramovice	912 kg/m^3	8-16 Olbramovice	912 kg/m^3
voda	136 kg/m^3	voda	191 kg/m^3

Tab. 6.2 Receptura BS s náhradou hrubého kameniva betonovým recyklátem

Receptura R2/1, R2/2, R2/3		Receptura R2/4, R2/5, R2/6	
100% hrubého kameniva 8-16 mm nahrazeno surovým recyklátem 0-16 mm.		100% hrubého kameniva 8-16 mm nahrazeno surovým recyklátem 0-16 mm.	
CEM II 32,5/B-S R	250 kg/m ³	CEM II 32,5/B-S R	450 kg/m ³
0-4 Bratčice	760 kg/m ³	0-4 Bratčice	760 kg/m ³
4-8 Tovačov	228 kg/m ³	4-8 Tovačov	228 kg/m ³
0-16 surový recyklát	690 kg/m ³	0-16 surový recyklát	690 kg/m ³
voda	182 kg/m ³	voda	236 kg/m ³

Tab. 6.3 Receptura BS s náhradou hrubého kameniva betonovým recyklátem + popílek

Receptura R3/1, R3/2, R3/3		Receptura R3/4, R3/5, R3/6	
100% hrubého kameniva 8-16 mm nahrazeno surovým recyklátem 0-16 mm.		100% hrubého kameniva 8-16 mm nahrazeno surovým recyklátem 0-16 mm.	
CEM II 32,5/B-S R	250 kg/m ³	CEM II 32,5/B-S R	450 kg/m ³
0-4 Bratčice	628 kg/m ³	0-4 Bratčice	628 kg/m ³
4-8 Tovačov	228 kg/m ³	4-8 Tovačov	228 kg/m ³
0-16 surový recyklát	690 kg/m ³	0-16 surový recyklát	690 kg/m ³
voda	205 kg/m ³	voda	250 kg/m ³
popílek	75 kg/m ³	popílek	75 kg/m ³

Tab. 6.4 Receptura BS s náhradou hrubého kameniva betonovým recyklátem + struska

Receptura R4/1, R4/2, R4/3		Receptura R4/4, R4/5, R4/6	
100% hrubého kameniva 8-16 mm nahrazeno surovým recyklátem 0-16 mm.		100% hrubého kameniva 8-16 mm nahrazeno surovým recyklátem 0-16 mm.	
CEM II 32,5/B-S R	250 kg/m ³	CEM II 32,5/B-S R	450 kg/m ³
0-4 Bratčice	672 kg/m ³	0-4 Bratčice	672 kg/m ³
4-8 Tovačov	228 kg/m ³	4-8 Tovačov	228 kg/m ³
0-16 surový recyklát	690 kg/m ³	0-16 surový recyklát	690 kg/m ³
voda	205 kg/m ³	voda	250 kg/m ³
struska	75 kg/m ³	struska	75 kg/m ³

Tab. 6.5 Receptura BS s náhradou hrubého kameniva betonovým recyklátem + mikrosilika

Receptura R5/1, R5/2, R5/3		Receptura R5/4, R5/5, R5/6	
100% hrubého kameniva 8-16 mm nahrazeno surovým recyklátem 0-16 mm.		100% hrubého kameniva 8-16 mm nahrazeno surovým recyklátem 0-16 mm.	
CEM II 32,5/B-S R	250 kg/m ³	CEM II 32,5/B-S R	450 kg/m ³
0-4 Bratčice	623 kg/m ³	0-4 Bratčice	623 kg/m ³
4-8 Tovačov	228 kg/m ³	4-8 Tovačov	228 kg/m ³
0-16 surový recyklát	690 kg/m ³	0-16 surový recyklát	690 kg/m ³
voda	205 kg/m ³	voda	259 kg/m ³
mikrosilika	25 kg/m ³	mikrosilika	25 kg/m ³

6.2 Identifikace složek pro výrobu betonové směsi

6.2.1 Cement

Cement je hydraulické pojivo pálené nad mez slinutí. Po smíchání s vodou dochází k hydratačním reakcím, které způsobují tuhnutí a tvrdnutí cementové kaše. Po zatvrdnutí si zachovává svoji pevnost jak na vzduchu, tak ve vodě.

V prezentovaném výzkumu byl na výrobu betonu použit cement CEM I 42,5 R z cementárny Hranice. Portlandské cementy CEM I musí obsahovat nejméně 95% portlandského slínku. Portlandský cement se vyrábí semletím portlandského slínku, regulátoru tuhnutí, případně doplňujících složek či přísad usnadňující výrobu nebo upravující vlastnosti cementu. Hlavní složkou portlandského cementu je portlandský slínek, který se vyrábí pálením nejméně do meze slinutí přesně připravené surovinové směsi obsahující prvky, vyjádřené jako oxidy CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ a malé množství jiných látek. Slínek se musí sestávat nejméně ze dvou třetin hmotnosti z křemičitanů vápenatých, ve zbytku jsou obsaženy slínkové fáze tvořené sloučeninami zejména hliníku a železa. [34]

6.2.2 Kamenivo

Pro přípravu referenčních betonů, neobsahujících kamenivo z recyklovaného betonu, bylo použito přírodní hutné kamenivo obsahující drobné kamenivo frakce 0 – 4 mm z pískovny Bratčice, přírodní těžené kamenivo frakce 4 – 8 mm z Tovačova, drcené kamenivo frakce 8 – 16 mm z Olbramovic (křivky zrnitosti jednotlivých kameniv jsou v příloze č. 4). Při přípravě ostatních betonů byla hrubá frakce přírodního kameniva 8-16 Olbramovice

nahrazena surovým betonovým recyklátem firmy Dufonev s.r.o. frakce 0-16 mm (křivka zrnitosti recyklátu je v příloze č. 4).



Obr. 6.1 Betonový recyklát od firmy Dufonev s.r.o., frakce 0-16 mm

6.2.3 Příměsi

Pro modifikaci betonových směsí dle receptur R3 – R5 byly použity anorganické příměsi. V receptuře R3 byl použit popílek do betonu, výrobce Elektrárna Chvaletice, dodavatel Cemex ČR, sypná hmotnost 840 kg/m^3 . V receptuře R4 byla použita granulovaná vysokopecní struska, výrobce Dětmárovice, dodavatel Cemex ČR, sypná hmotnost 1100 kg/m^3 . V receptuře R5 byla použita průmyslová mikrosilika, výrobce Romex Rumunsko, sypná hmotnost 260 kg/m^3 . Podrobný popis těchto příměsí se nachází v kapitole 4 Příměsi.

Tab. 6.6 Vlastnosti příměsí

příměs	popílek	struska	mikrosilikilka
měrný povrch	$240 \text{ m}^2/\text{kg}$	$420 \text{ m}^2/\text{kg}$	$2350 \text{ m}^2/\text{kg}$
sypná hmotnost	840 kg/m^3	1100 kg/m^3	260 kg/m^3
hustota	2000 kg/m^3	2900 kg/m^3	2200 kg/m^3

7 ZKUŠEBNÍ TĚLESA

7.1 Výroba zkušebních těles



*Obr. 7.1 Homogenizace suché BS
a pohled na míchací zařízení*

Dle popisu jednotlivých receptur byly na vážícím zařízení odměřeny suché složky vstupních surovin a následně vsypány do vanové míchačky s nuceným oběhem v pořadí plnivo, pojivo. Po částečné homogenizaci suchých složek BS v mísicím zařízení byla postupně dávkována voda. Po odebrání BS pro první 3 krychle byl do BS v míchačce přidán cement, aby jeho hmotnost byla navýšena z 250 na 450 kg/m³, dále byla přidána voda a směs byla znovu homogenizována.

7.2 Zhutnění, uložení a ošetřování zkušebních těles

Beton byl plněn a hutněn do polystyrenových forem o vnitřní hraně 150 mm, opatřených z vnitřní dotykové strany separačním přípravkem. Po zhutnění byl beton ve formách přiklopen polystyrénovým víkem a nechán v laboratorním prostředí z důvodu zatuhnutí a částečného zatvrdnutí betonu (cca 48 hod). Po odformování stlačeným vzduchem (kompresor) byly jednotlivé krychle uloženy ve vlhkém prostředí s relativní vlhkostí vzduchu 95 % mimo přímý kontakt s vodním prostředím.

7.3 Označení zkušebních těles

Tab. 7.1 Označení zkušebních těles

druh betonu	množství cementu [kg/m ³]	označení tělesa	vyrobena dne	rozměry tělesa [mm]	počet těles	objem [m ³]
referenční	250	R1/1 R1/2 R1/3	15.5.2012	150x150x150	3	0,0101
referenční	450	R1/4 R1/5 R1/6	15.5.2012	150x150x150	3	0,0101
recyklát	250	R2/1 R2/2 R2/3	15.5.2012	150x150x150	3	0,0101
recyklát	450	R2/4 R2/5 R2/6	15.5.2012	150x150x150	3	0,0101
recyklát + popílek	250	R3/1 R3/2 R3/3	15.5.2012	150x150x150	3	0,0101
recyklát + popílek	450	R3/4 R3/5 R3/6	15.5.2012	150x150x150	3	0,0101
recyklát+struska	250	R4/1 R4/2 R4/3	16.5.2012	150x150x150	3	0,0101
recyklát+struska	450	R4/4 R4/5 R4/6	16.5.2012	150x150x150	3	0,0101
recyklát+mikrosilika	250	R5/1 R5/2 R5/3	16.5.2012	150x150x150	3	0,0101
recyklát+mikrosilika	450	R5/4 R5/5 R5/6	16.5.2012	150x150x150	3	0,0101
celkový objem [m ³]						0,101

Vysvětlivky:

- **Referenční** – BS obsahuje pouze přírodní kamenivo
- **Recyklát** – v BS je místo přírodního kameniva frakce 8-16 mm betonový recyklát frakce 8-16 mm od firmy Dufonev s.r.o.
- **Recyklát+popílek, struska, mikrosilika** – přídavek příměsi u určité dávce

8 FYZIKÁLNĚ MECHANICKÉ VLASTNOSTI ZKOUŠENÝCH BETONŮ

8.1 Objemová hmotnost

Byla stanovena objemová hmotnost čerstvého betonu a objemová hmotnost tvrdnoucího betonu po 1 měsíci zrání ve vlhkém uložení, dále po 3 měsících v prostředí 0,03 % CO₂ a po uložení v prostředí 98 % CO₂ (1 měsíc zrání + 3 měsíce v 98 % CO₂). Všechny hmotnosti tvrdnoucího betonu byly stanoveny po 48 hod. sušení těles v sušárně při 105 °C. Vlhkost těles byla kontrolována kapacitním analogovým přístrojem KAKASO. Hodnoty zbytkových vlhkostí betonů po 48 hod. sušení se výrazně nelišily a pohybovaly se řádově kolem 2,5% hmotnostních (údaje odvozeny z kalibrační stupnice pro KAKASO, běžný beton).

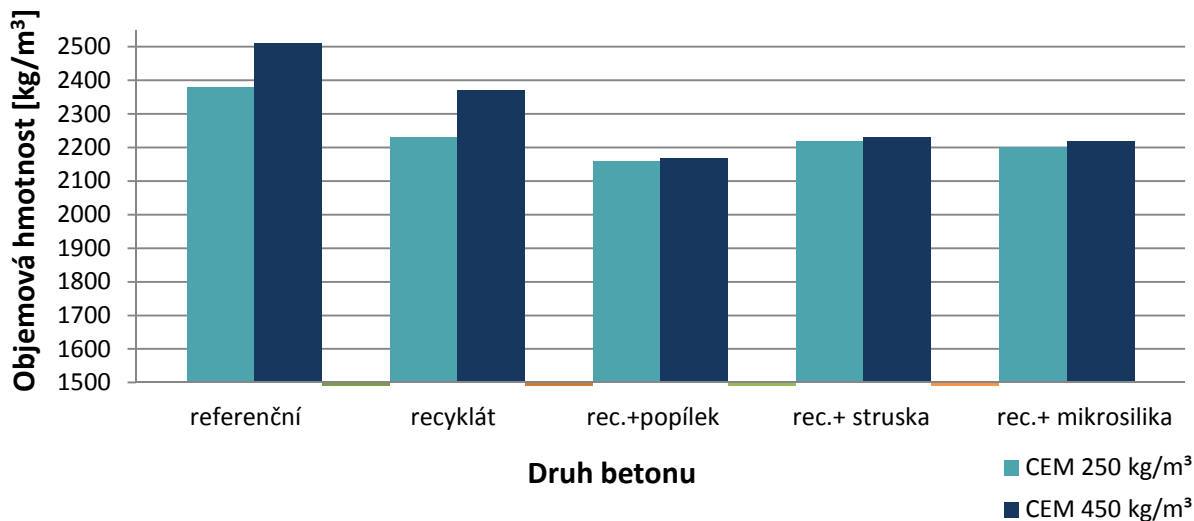
Průměrné hodnoty objemových hmotností jsou uvedeny v tab. 8.1.

Tab. 8.1 Průměrné objemové hmotnosti zkušebních těles

druh betonu	množství cementu [kg/m ³]	objemová hmotnost ČB [kg/m ³]	objemová hmotnost po 1 měsíci [kg/m ³]	objemová hmotnost po 4 měsících v 0,03 % CO ₂ [kg/m ³]	objemová hmotnost po uložení v 98 % CO ₂ [kg/m ³]
referenční	250	2380	2270	2260	2290
	450	2510	2300	2300	2330
recyklát	250	2230	2080	2080	2110
	450	2370	2090	2090	2110
recyklát+popílek	250	2160	2020	2010	2060
	450	2170	2030	2030	2070
recyklát+struska	250	2220	2090	2090	2110
	450	2230	2130	2140	2150
recyklát+mikrosilika	250	2200	2070	2070	2090
	450	2220	2100	2090	2130

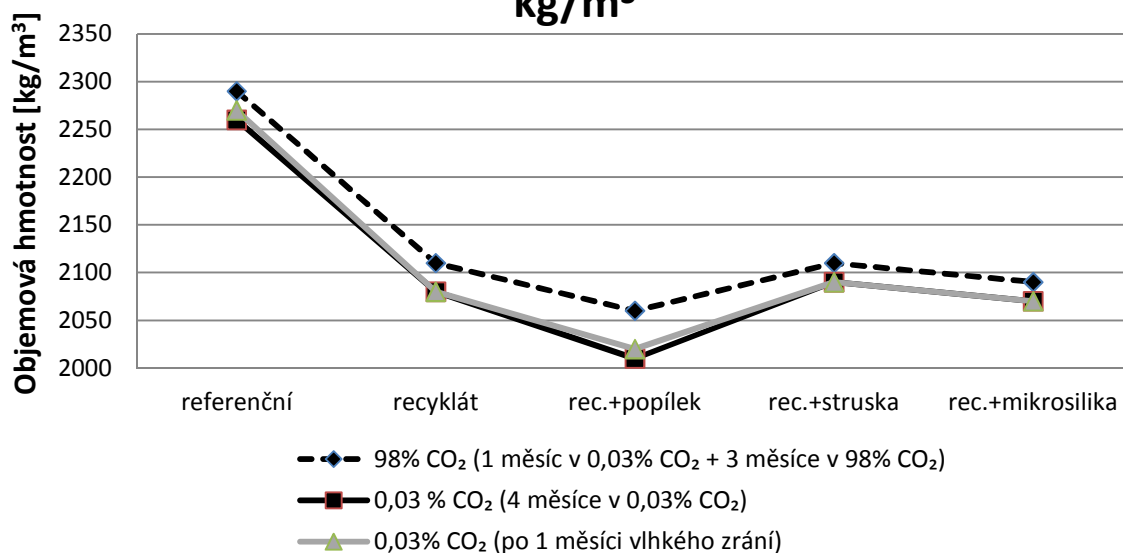
8.1.1 Grafické znázornění objemových hmotnost

Objemová hmotnost čerstvého betonu



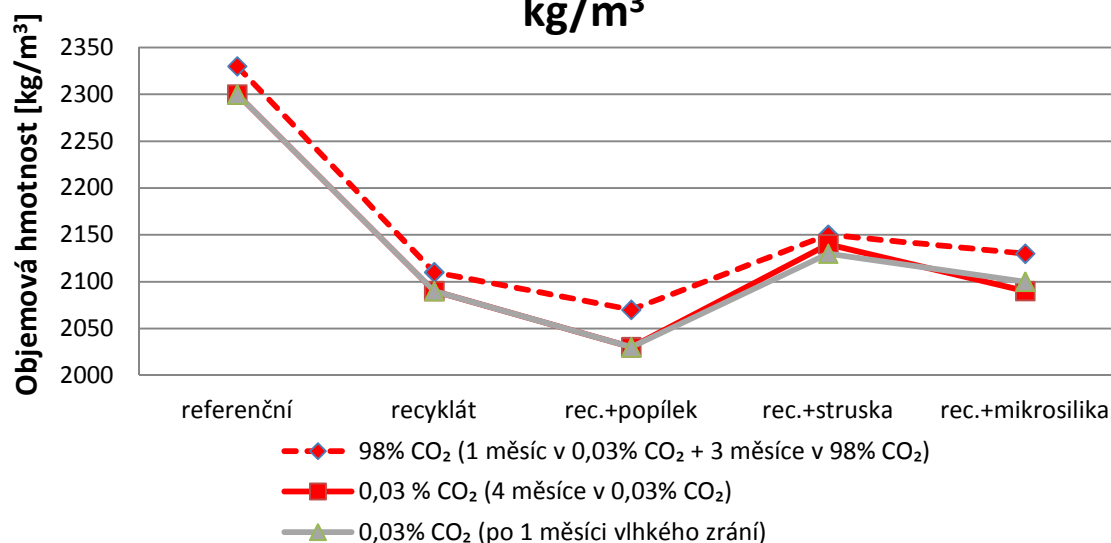
Graf 8.1 Objemové hmotnosti čerstvého betonu

Vliv CO₂ na objemovou hmotnost ztvrdlého vysušeného betonu, množství cementu 250 kg/m³



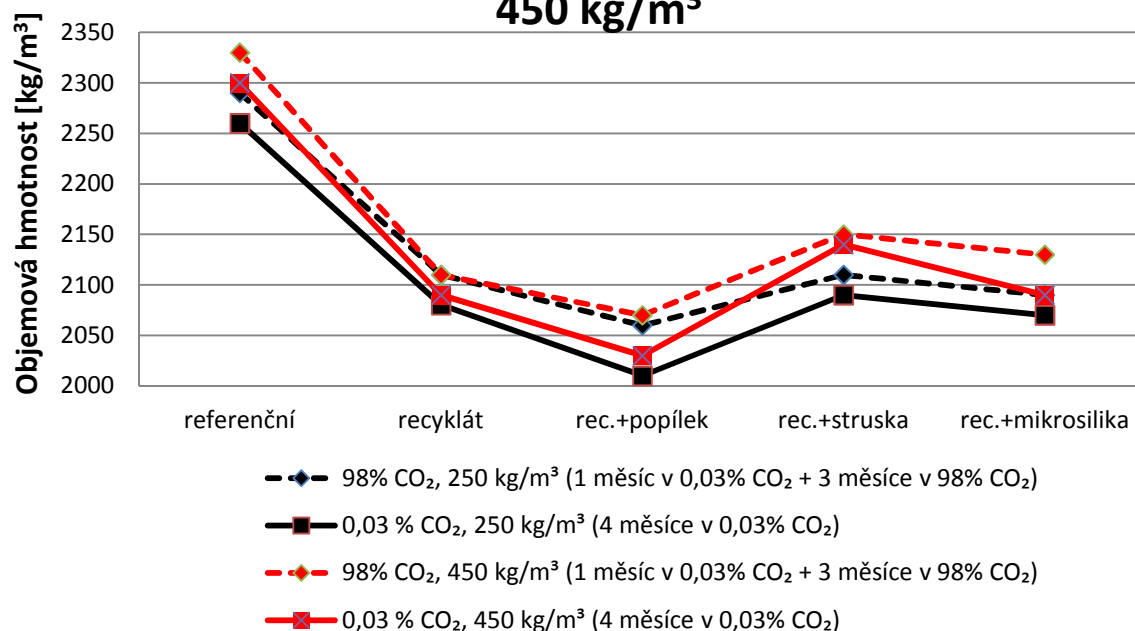
Graf 8.2 Vliv CO₂ na objemovou hmotnost ztvrdlého betonu, CEM 250 kg/m³

Vliv CO₂ na objemovou hmotnost ztvrdlého vysušeného betonu, množství cementu 450 kg/m³



Graf 8.3 Vliv CO₂ na objemovou hmotnost ztvrdlého betonu, CEM 450 kg/m³

Vliv CO₂ na objemovou hmotnost ztvrdlého vysušeného betonu, množství cementu 250 a 450 kg/m³



Graf 8.4 Vliv CO₂ na objemovou hmotnost ztvrdlého betonu, CEM 250 a 450 kg/m³

8.1.2 Vyhodnocení výsledků objemové hmotnosti

Jak je patrné z grafu 8.4, objemové hmotnosti u betonů s množstvím cementu 450 kg/m³ jsou ve všech pěti případech vyšší než u betonů s množstvím cementu 250 kg/m³. Je to dáno vyšším množstvím cementu, což má na objemovou hmotnost určitý vliv. Objemová hmotnost betonu z recyklovaného betonu je nižší než objemová hmotnost betonu z přírodního kameniva, a to z důvodu, že sypaná hmotnost recyklátu je 1130 kg/m³ a sypaná hmotnost kameniva frakce 8-16 mm je 1500 kg/m³.

Objemové hmotnosti po 1 měsíci ve vlhkém uložení (0,03 % CO₂) a po 3 dalších měsících v prostředí 0,03 % CO₂ se od sebe příliš neliší, v některých případech jsou dokonce totožné. To ale neplatí u těles uložených 1 měsíc ve vlhkém uložení (také 0,03 % CO₂) + 3 měsíce v 98 % CO₂. Zde objemová hmotnost narostla v rozmezí od 10 – 50 kg/m³ oproti tělesům uloženým souhrnně 4 měsíce v 0,03 % CO₂. Největší nárůst byl zaznamenán u receptury s popílkem, a to při množství cementu 250 kg/m³ byl nárůst 50 kg/m³ a při množství 450 kg/m³ byl nárůst 40 kg/m³. Jinak u zbylých druhů betonu byly nárůsty zhruba stejné okolo 20 kg/m³.

Nárůst objemové hmotnosti lze vysvětlit reakcí CO₂ s Ca(OH)₂ za vzniku CaCO₃, který má větší molární hmotnost, konkrétně CaCO₃ = 100,1 g/mol a Ca(OH)₂ = 74,1 g/mol.

Rovnice vzniku: $CO_2 + Ca(OH)_2 + H_2O \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O$ (8.1)

8.2 Pevnost betonu v tlaku

Pevnost v tlaku byla stanovena na krychlích o rozměrech 150×150×150 mm po 1 měsíci zrání ve vlhkém prostředí, tedy na třetí sadě těles. Byla prováděna pouze orientační zkouška, testovala se jen jedna krychle od každého druhu betonu.

Vlastní zkouška byla provedena dle požadavků ČSN EN 12390-3. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Uložení tělesa na střed tlačné desky (Obr. 8.1) a následným přitěžováním konstantní rychlosti došlo u jednotlivých krychlí k překonání meze pevnosti a destrukci, všechny vzorky vykazovaly správné usmýknutí. [26]

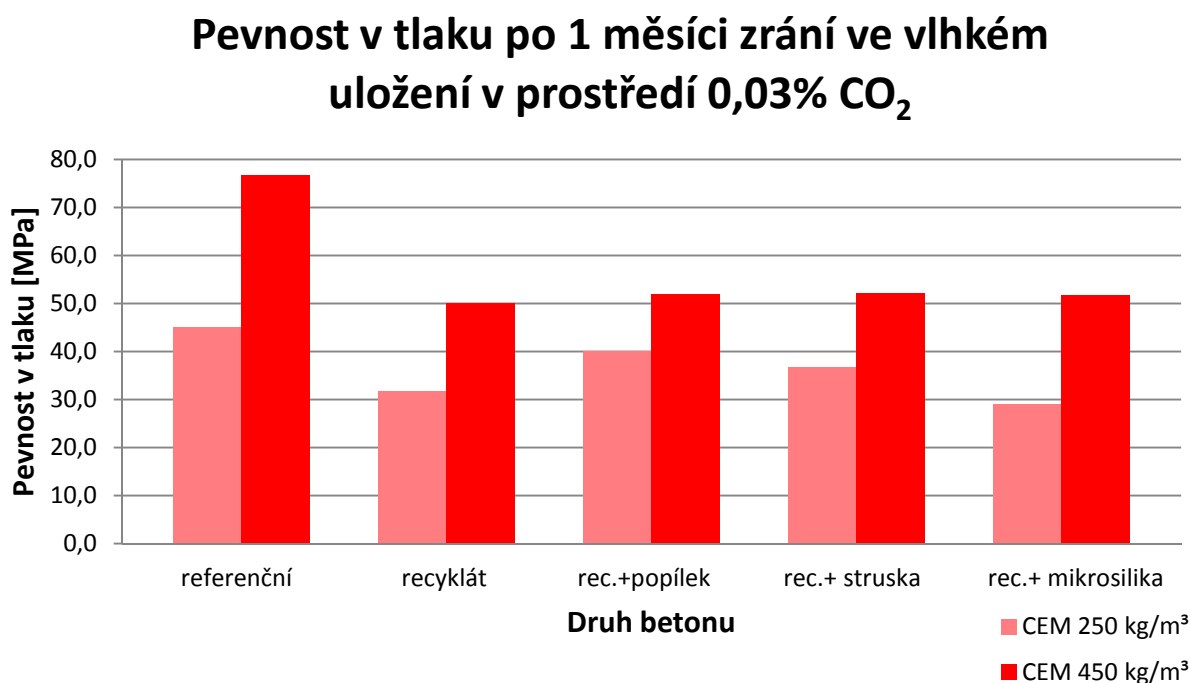


Obr. 8.1 Uložení zkušebního tělesa na střed tlačné plochy v lisu na provádění zkoušky pevnosti v tlaku

Tab. 8.2 Výsledné pevnosti v tlaku zkušebních těles po 1 měsíci zrání ve vlhkém prostředí

druh betonu	množství cementu [kg/m ³]	síla na mezi pevnosti v tlaku [kN]	pevnost v tlaku [Mpa]
referenční	250	1012,5	45,0
	450	1728,0	76,8
recyklát	250	713,3	31,7
	450	1125,0	50,0
recyklát+popílek	250	902,3	40,1
	450	1167,8	51,9
recyklát+struska	250	825,8	36,7
	450	1172,3	52,1
recyklát+mikrosilika	250	654,8	29,1
	450	1165,5	51,8

8.2.1 Grafické znázornění pevnosti v tlaku



Graf 8.5 Pevnost v tlaku po 1 měsíci zrání ve vlhkém uložení

8.2.2 Vyhodnocení výsledků pevnosti v tlaku

Tlakové pevnosti betonu z přírodního kameniva (referenční) a betonu převážně z betonového recyklátu (recyklát) jsou v poměru 1/0,75. Tento poměr už je dlouho znám a fakticky omezuje použití recyklovaného betonu jako kameniva do konstrukčních betonů.

Adice 30% příměsí vysokopecní strusky a popílku do betonu z recyklovaného betonu při dávce cementu 250 kg/m^3 značně zvýší jeho pevnost, u množství cementu 450 kg/m^3 není zvýšení nijak značné. Je to dáno mimo jiné tím, že u vyššího množství cementu byly příměsí dávkovány pouze v množství 15% z hmotnosti cementu. Dá se předpokládat, že při aplikování dávky 30% z hmotnosti cementu, by pevnosti byly také vyšší. Avšak při vysokém podílu cementu v betonové záměsi se pevnostní účinky silikátových příměsí obecně tolik neprojeví. Přidáním 10% (ev. pro 450 kg cementu jen 5%) příměsí mikrosiliky se pevnosti nijak nezměnily, může to být dáno použitím pouze jednoho zkušebního tělesa, protože dle dosud publikovaných prací má mikrosilika velice kladný vliv na pevnosti v tlaku u betonů z betonového recyklátu.

Zvýšení pevnosti v tlaku přidáním vysokopecní strusky a popílku se děje pravděpodobně proto, že tyto příměsí zaplňují póry v cementovém kameni a tím se zvyšuje jeho hutnost.

8.3 Pevnost betonu v příčném tahu

Pevnost v příčném tahu byla provedena na krychlích o rozměrech $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$, byla stanovena po 4 měsících na první a druhé sadě krychlí, po provedení zkoušek TORRENT a ISAT (první sada – 4 měsíce uloženo v laboratorním prostředí s 0,03 % CO_2 , druhá sada – 1 měsíc ve vlhkém uložení + 3 měsíce v prostředí 98 % CO_2).

Vlastní zkouška byla provedena dle požadavků ČSN EN 12390-6 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles. Uložením tělesa mezi válcové zatěžovací segmenty, opatřené zespodu i z vrchu dřevěnými pásky (Obr. 8.2) a následným přitěžováním konstantní rychlostí došlo u jednotlivých krychlí k překonání meze pevnosti a destrukci, všechny vzorky se rozlomily přibližně po spojnici tlačných pásků. [27]



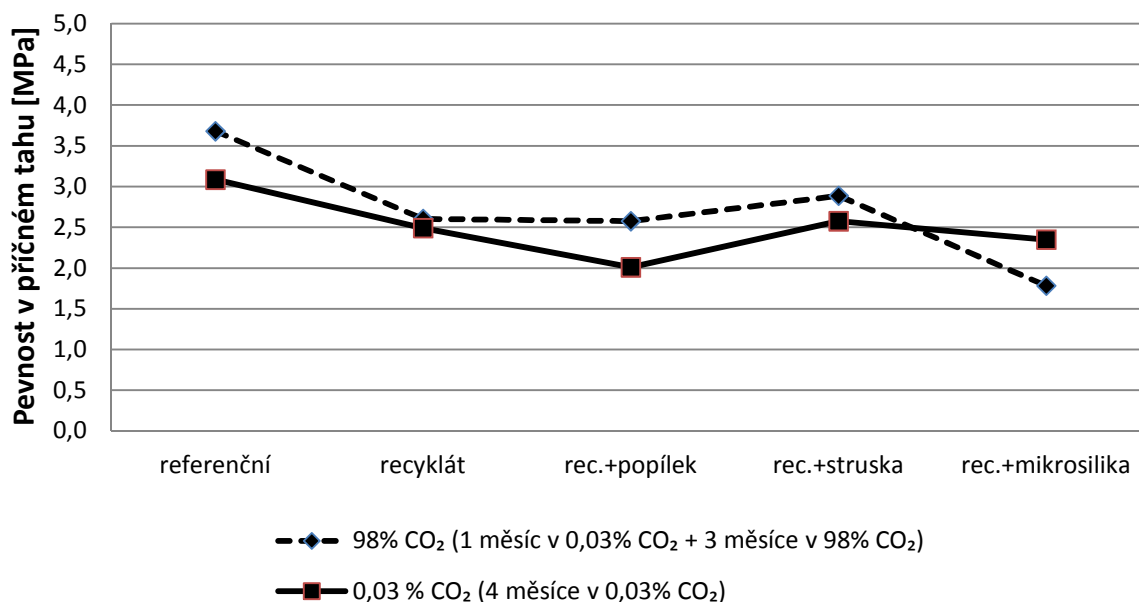
Obr. 8.2 Uložení vzorku mezi válcové zatěžovací segmenty před zkouškou pevnosti v příčném tahu

Tab. 8.3 Výsledné pevnosti v příčném tahu zkušebních těles

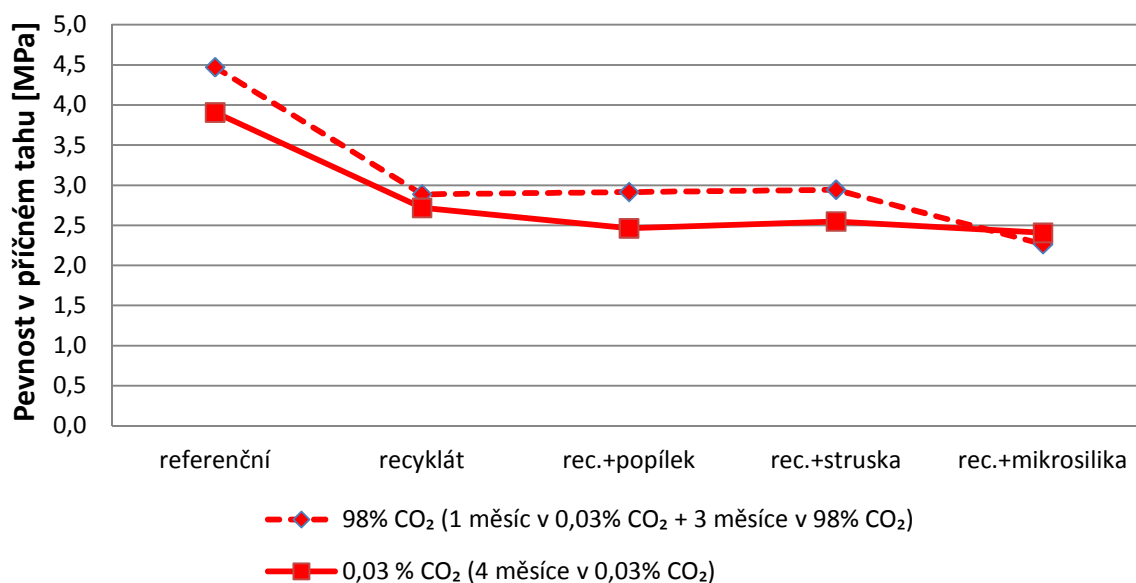
druh betonu	množství cementu [kg/m ³]	pevnost v příčném tahu betonu uloženého v lab. prostředí 0,03 % CO ₂ [MPa]	pevnost v příčném tahu betonu uloženého v prostředí 98 % CO ₂ [MPa]
referenční	250	3,09	3,68
	450	3,91	4,47
recyklát	250	2,49	2,60
	450	2,72	2,89
recyklát+popílek	250	2,01	2,58
	450	2,46	2,92
recyklát+struska	250	2,58	2,89
	450	2,55	2,94
recyklát+mikrosilika	250	2,35	1,78
	450	2,41	2,26

8.3.1 Grafické znázornění pevností v příčném tahu

Vliv CO₂ na pevnost v příčném tahu, množství cementu 250 kg/m³

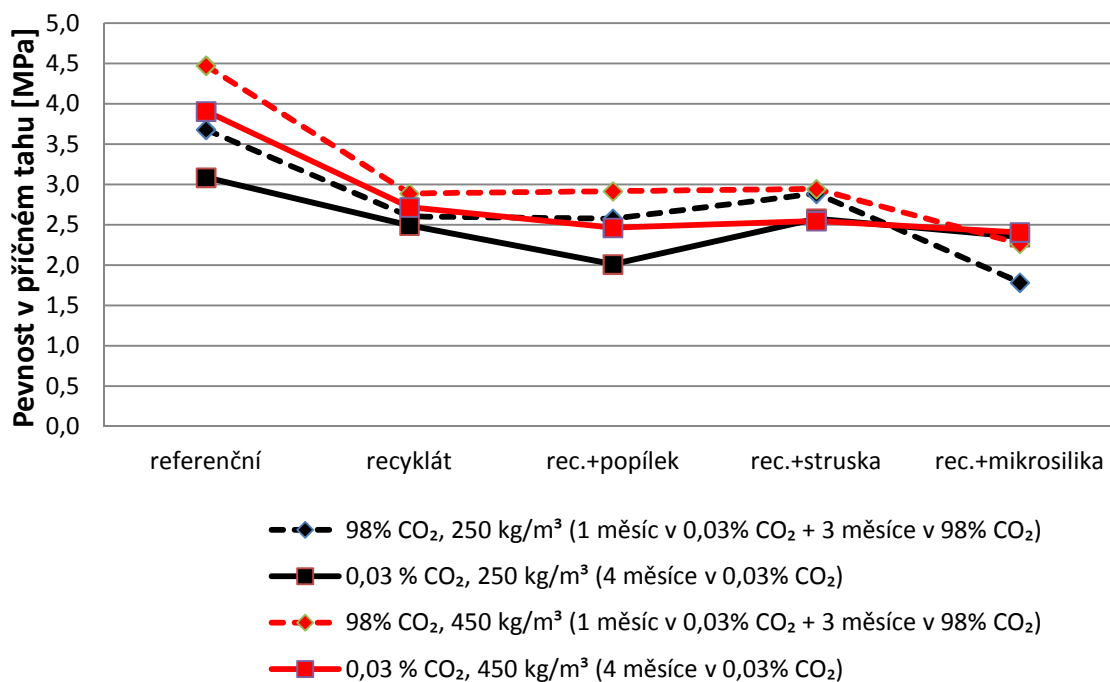
Graf 8.6 Vliv CO₂ na pevnost v příčném tahu betonu, CEM 250 kg/m³

Vliv CO₂ na pevnost v příčném tahu, množství cementu 450 kg/m³



Graf 8.7 Vliv CO₂ na pevnost v příčném tahu betonu, CEM 450 kg/m³

Vliv CO₂ na pevnost v příčném tahu, množství cementu 250 a 450 kg/m³



Graf 8.8 Vliv CO₂ na pevnost v příčném tahu betonu, CEM 250 a 450 kg/m³

8.3.2 Vyhodnocení výsledků pevnosti v příčném tahu

Obdobně jako pevnosti v tlaku, tak i pevnosti v příčném tahu betonu z přírodního kameniva (referenční) a betonu převážně z betonového recyklátu (recyklát) vychází v poměru 1/0,75. Je to způsobeno tím, že betonový recyklát má větší pórovitost než přírodní kamenivo, což znamená, že i pevnost (jak v tlaku, tak v příčném tahu) samotného recyklátu je poměrně nižší ve srovnání s přírodním kamenivem.

Adice příměsí u záměsí s dávkou cementu 450 kg/m^3 v podstatě pevnost v příčném tahu výrazně neovlivní, ale u záměsí s dávkou cementu 250 kg/m^3 můžeme pozorovat mírný pokles hodnot při aplikaci popílku a mikrosiliky, což může být způsobeno, stejně jako u pevností v tlaku, statistickou chybou (použití pouze jednoho zkušebního tělesa).

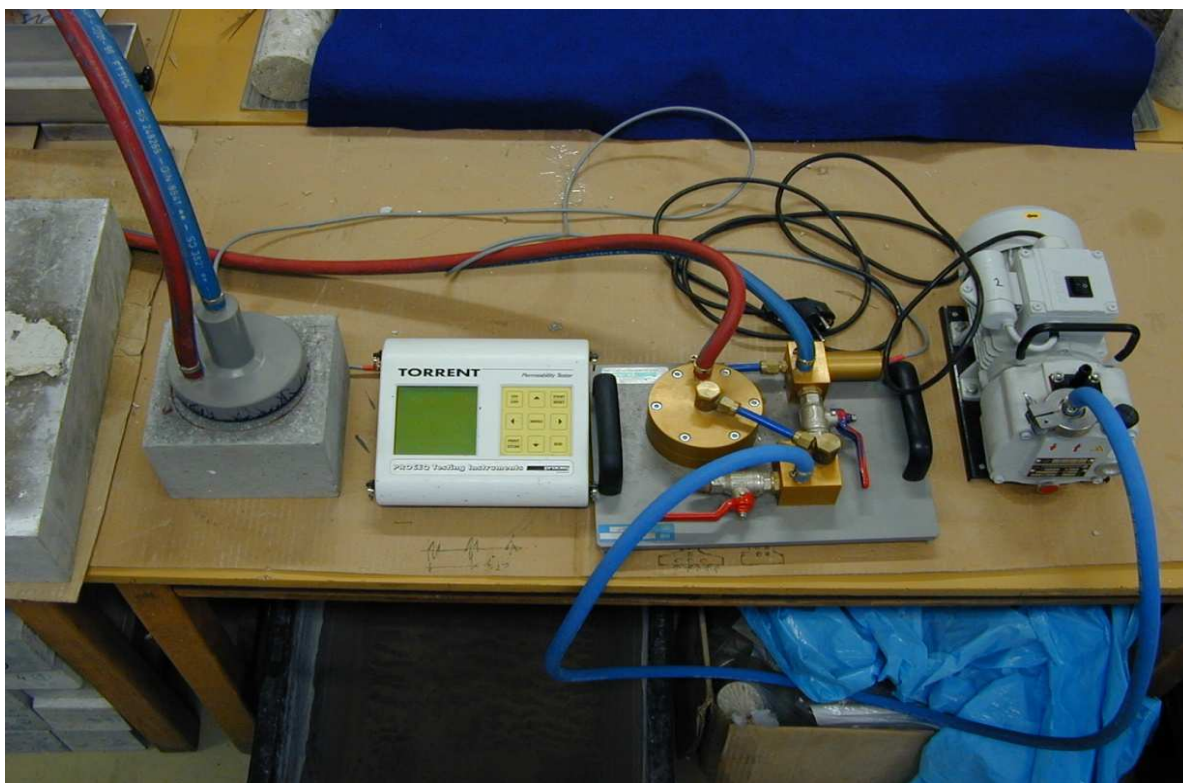
Zajímavé je, že pevnosti v příčném tahu byly vyšší u těles, které byly uloženy v 98 % CO_2 (1 měsíc ve vlhkém uložení + 3 měsíce v prostředí 98 % CO_2) než u těles, uložených 4 měsíce v prostředí 0,03 % CO_2 . Tento výsledek je důsledkem zkarbonatování povrchové vrstvy betonu, která má vyšší tvrdost oproti vrstvě nezkarbonatované. Karbonatace probíhá dle reakce viz. rovnice 8.1, kdy vzniká z portlanditu uhličitán vápenatý a voda. Nárůst pevností v příčném tahu byl pozorován u všech zkoušených druhů betonu při uložení v prostředí 98 % CO_2 kromě betonu s mikrosilikou, a to při obou dávkách cementu.

9 TRVANLIVOSTNÍ VLASTNOSTI ZKOUŠENÝCH BETONŮ

9.1 Měření permeability přístrojem TORRENT

Měření povrchové propustnosti pro vzduch (metoda TORRENT) bylo provedeno na krychlích o rozměrech $150 \times 150 \times 150$ mm. Měření se rozdělilo do dvou etap. V první etapě měření propustnosti proběhlo na tělesech první a druhé sady po 1 měsíci ve vlhkém uložení a byly zaznamenány výsledky. V druhé etapě se měření provedlo po 4 měsících na první sadě (4 měsíce uloženo v laboratorním prostředí s 0,03 % CO_2) a současně i druhé sadě krychlí (1 měsíc ve vlhkém uložení + 3 měsíce v prostředí 98 % CO_2) a také byly zaznamenány výsledky k pozdějšímu porovnání.

Jelikož je vlhkost betonu jedním z nejdůležitějších faktorů, ovlivňujících měření propustnosti betonu pro vzduch, byla před samotným měřením stanovena aktuální povrchová vlhkost zkoušených těles. Vlhkost byla stanovena pomocí digitálního analogového vlhkoměru KAKASO PSXMI. Údaje z tohoto přístroje byly zprůměrovány a převedeny pomocí kalibrační křivky (obr. 5.6) na hmotnostní vlhkost tělesa. Aby bylo možné jednotlivé výsledky mezi sebou porovnávat, byla provedena korekce součinitele vzduchové propustnosti kT na hmotnostní vlhkost 3%. Všechna tělesa byla před vlastním testováním propustnosti po dobu 48 hod. sušena v sušárně při teplotě 105°C .



Obr. 9.1 Sestava k měření propustnosti pro vzduch metodou TORRENT



Obr. 9.2 Přístroj KAKASO PSMXI na měření povrchové vlhkosti betonu

Tab. 9.1 Propustnost betonu pro vzduch po 1 měsíci ve vlhkém uložení

druh betonu	množství cementu [kg/m ³]	aktuální hmotnostní vlhkost	hodnota kT pro aktuální w	korekce hodnoty kT pro w=3%	kvalita vrstvy betonu pro w=3%
		průměr	průměr	průměr	průměr
		[%]	[*10 ⁻¹⁶ m ²]	[*10 ⁻¹⁶ m ²]	
referenční	250	2,2	1,625	1,380	špatná
	450	2,45	0,984	0,988	střední
recyklát	250	2,25	5,529	3,226	špatná
	450	2,4	3,263	2,422	špatná
recyklát+popílek	250	2,4	6,413	4,015	špatná
	450	2,6	4,291	3,360	špatná
recyklát+struska	250	2,5	3,455	2,663	špatná
	450	2,55	2,842	2,333	špatná
recyklát+mikrosilika	250	2,6	0,527	0,587	střední
	450	2,7	1,528	1,449	špatná

Tab. 9.2 Propustnost betonu pro vzduch po 4 měsících v 0,03 % CO₂

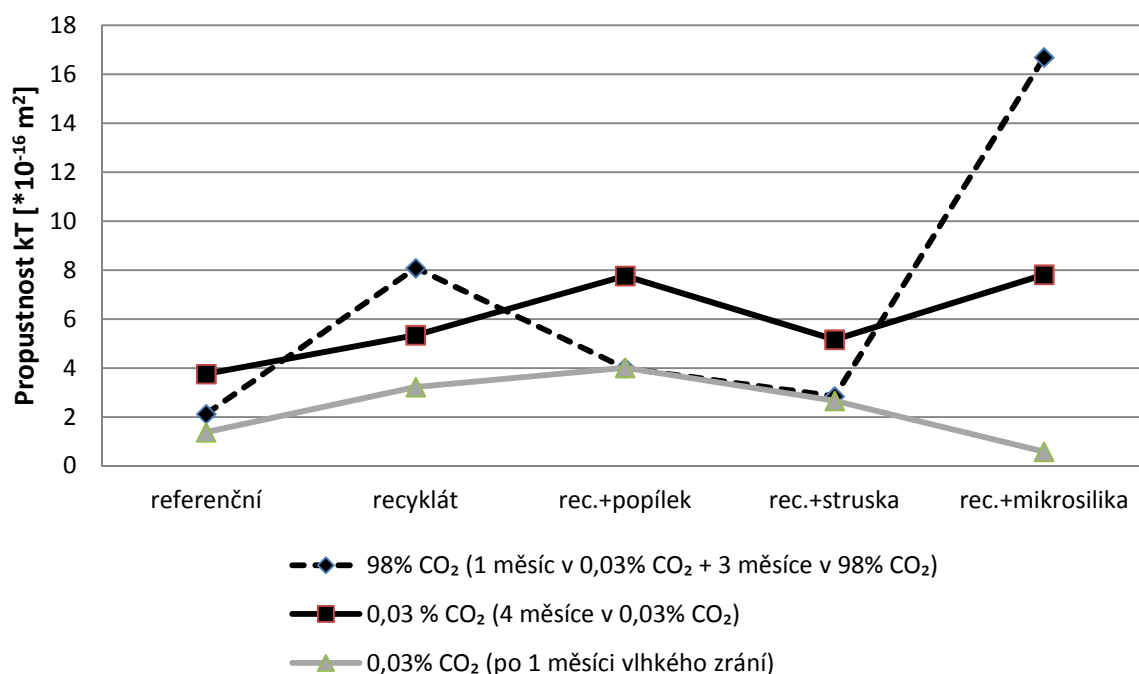
druh betonu	množství cementu [kg/m ³]	aktuální hmotnostní vlhkost	hodnota kT pro aktuální w	korekce hodnoty kT pro w=3%	kvalita vrstvy betonu pro w=3%
		průměr	průměr	průměr	průměr
		[%]	[*10 ⁻¹⁶ m ²]	[*10 ⁻¹⁶ m ²]	
referenční	250	2,36	6,114	3,758	špatná
	450	2,45	4,117	2,969	špatná
recyklát	250	2,42	9,173	5,346	špatná
	450	2,45	7,025	4,478	špatná
recyklát+popílek	250	2,55	12,522	7,766	špatná
	450	2,7	5,461	4,409	špatná
recyklát+struska	250	2,6	7,192	5,163	špatná
	450	2,75	7,144	5,811	špatná
recyklát+mikrosilika	250	2,95	8,169	7,817	špatná
	450	3	5,112	5,112	špatná

Tab. 9.3 Propustnost betonu pro vzduch po 1 měsíci vlhkého uložení+3 měsíce v 98 % CO₂

druh betonu	množství cementu [kg/m ³]	aktuální hmotnostní vlhkost	hodnota kT pro aktuální w	korekce hodnoty kT pro w=3%	kvalita vrstvy betonu pro w=3%
		průměr	průměr	průměr	průměr
		[%]	[*10 ⁻¹⁶ m ²]	[*10 ⁻¹⁶ m ²]	
referenční	250	2,1	3,355	2,123	špatná
	450	2,3	2,906	2,124	špatná
recyklát	250	2,22	22,381	8,085	špatná
	450	2,35	11,723	5,987	špatná
recyklát+popílek	250	2,25	7,567	4,000	špatná
	450	2,4	11,514	6,220	špatná
recyklát+struska	250	2,28	4,476	2,845	špatná
	450	2,3	7,525	4,157	špatná
recyklát+mikrosilika	250	2,3	53,911	16,694	velmi špatná
	450	2,4	38,891	15,460	velmi špatná

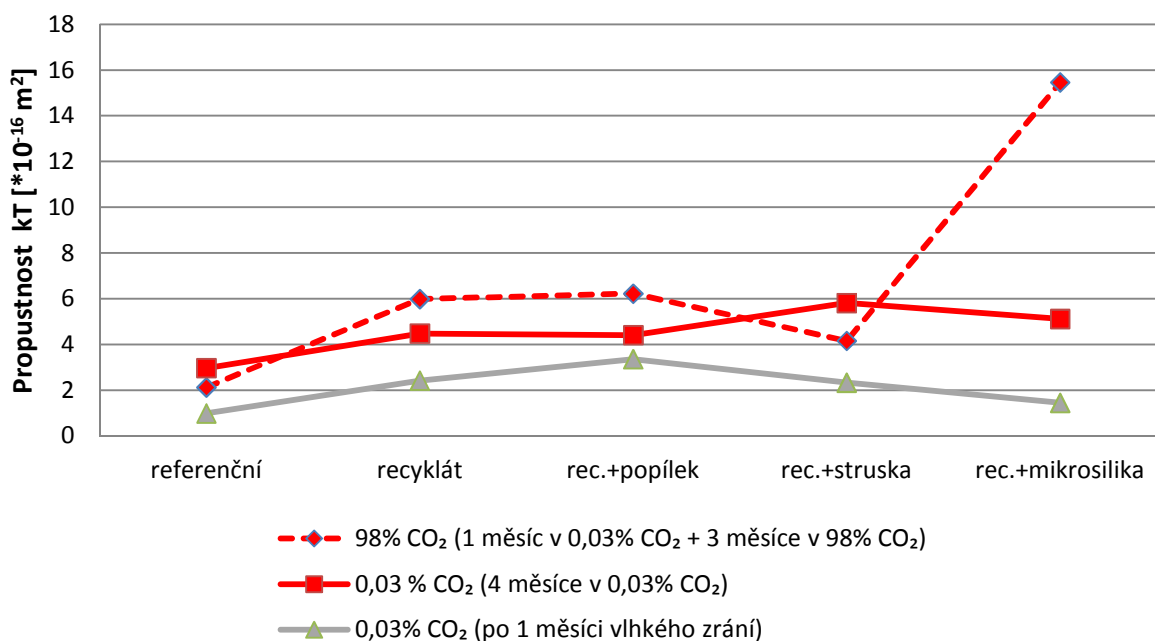
9.1.1 Grafické znázornění propustnosti betonu pro vzduch metodou TORRENT

Vliv CO_2 na propustnost betonu pro vzduch (metoda Torrent), množství cementu 250 kg/m^3



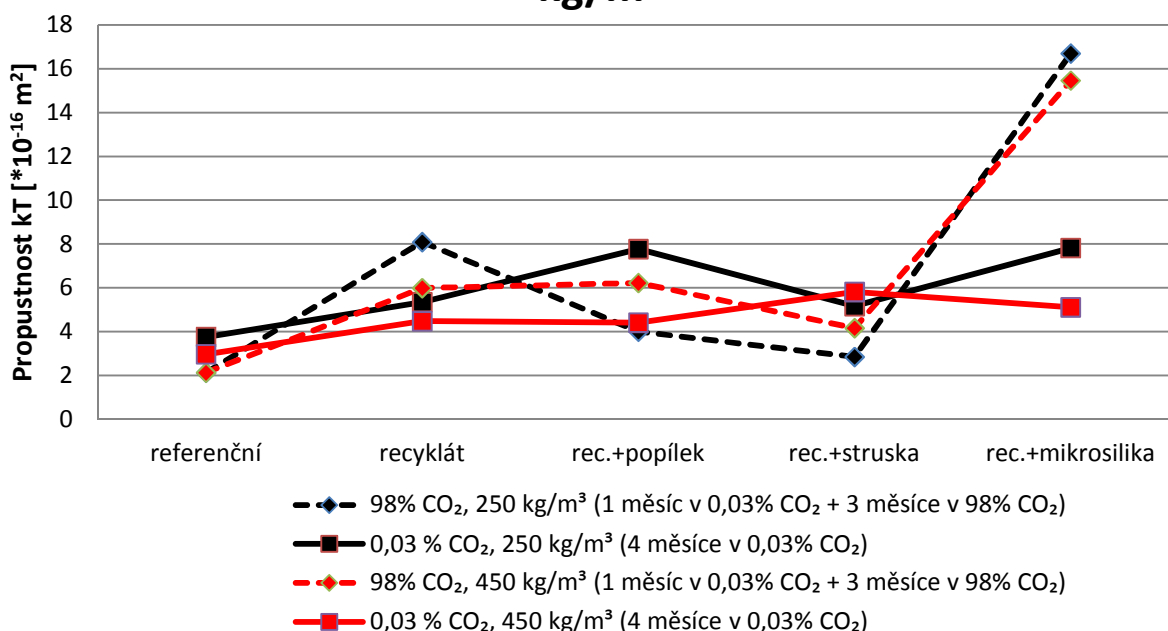
Graf 9.1 Vliv CO_2 na propustnost betonu pro vzduch, CEM 250 kg/m^3

Vliv CO_2 na propustnost betonu pro vzduch (metoda Torrent), množství cementu 450 kg/m^3



Graf 9.2 Vliv CO_2 na propustnost betonu pro vzduch, CEM 450 kg/m^3

Vliv CO_2 na propustnost betonu pro vzduch (metoda Torrent), množství cementu 250 a 450 kg/m^3



Graf 9.3 Vliv CO_2 na propustnost betonu pro vzduch, CEM 250 a 450 kg/m^3

9.1.2 Vyhodnocení výsledků propustnosti betonu pro vzduch metodou TORRENT

Zkouška stanovení vzduchové propustnosti povrchové vrstvy betonů (TORRENT) společně se zkouškou stanovení počáteční povrchové nasákavosti (ISAT) byly hlavními zkouškami indikujícími stav struktury povrchových vrstev betonů. Zjištěné vlastnosti povrchové vrstvy betonu mohou napomoci k odhadu jeho trvanlivosti. Výsledky testů propustnosti mohou být výrazně ovlivněny rozdílnou vlhkostí povrchové vrstvy betonů, proto byla před každým měřením stanovena hmotnostní vlhkost vzorků přístrojem KAKASO.

V mladém betonu po 1 měsíci zrání ve vlhkém uložení byla propustnost betonu pro vzduch na nejnižší hodnotě u všech zkoušených betonů. Tento výsledek je zapříčiněn částečným zaplněním pórů vodou, kdy přístroj TORRENT z těchto míst vzduch neodebral.

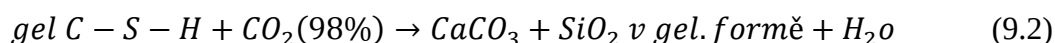
Po 4 měsících uložení v prostředí 0,03 % CO_2 byla propustnost betonu značně vyšší než propustnost v mladém betonu. Pravděpodobně už póry neobsahovaly žádnou vlhkost, která by kladla odpor průchodu vzduchu. Pozoruhodné je, že hodnoty propustnosti se jen velmi málo liší u betonu z přírodního kameniva od propustnosti betonu z betonového recyklátu, a to ve prospěch betonu z přírodního kameniva. Tento jev lze pozorovat u obou dávek cementu. I když u záměsí s dávkou cementu 250 kg/m^3 vykazují horší hodnoty příměsí

popílku a mikrosiliky. U záměsí s dávkou cementu 450 kg/m^3 jsou výsledky relativně podobné. Avšak celkově vyšší dávka cementu propustnost betonu snížila, a to z důvodu většího podílu jemných částic, které lépe vyplnily póry a mezery v cementovém kameni.

Uložení 1 měsíc ve vlhkém prostředí + 3 měsíce v CO_2 značně ovlivnilo propustnost. A to u záměsí s dávkou cementu 250 kg/m^3 adice popílku a strusky výrazně propustnost snížila, avšak adice mikrosiliky propustnost razantně zvýšila. U záměsí s dávkou cementu 450 kg/m^3 se propustnosti nijak výrazně nezměnily vyjma adice mikrosiliky, která způsobila stejně razantní zvýšení jako u nižší dávky cementu. Zdá se ale, že množství cementu v karbonatovaném betonu přímo neovlivňuje propustnost povrchové vrstvy pro vzduch, oproti betonu nezkarbonatovanému.

Snížení vzduchové propustnosti u těles v 98 % CO_2 s adicí popílku lze vysvětlit tím, že povrchová vrstva je silně zkarbonatována, což potvrzuje i poměrné zvýšení objemové hmotnosti. Karbonatace způsobuje přeměnu Ca(OH)_2 na CaCO_3 , který ucpává póry cementového kamene, a tím se snižuje propustnost pro vzduch. U adice strusky se vzduchová propustnost také snížila, ale karbonatace nebyla tak silná. Struska totiž lépe zaplnila póry cementového tmele ve srovnání s popílkem. U adice mikrosiliky také došlo ke značnému zkarbonatování povrchové vrstvy, avšak na povrchu betonu se vytvořily mikrotrhlíčky, které vzduchovou propustnost značně zvýšily. Vznik mikrotrhlíček lze odůvodnit hydratací cementu s mikrosilikou za vzniku gelu C-S-H, který velmi rychle karbonatuje na $\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$ v gelové formě obsahující H_2O . Během sušení se tenhle zkarbonatovaný produkt smrští a ztrácí H_2O , čímž vzniknou mikrotrhlíčky, kterými proudí více vzduchu.

Rovnice reakce:



Beton z recyklovaného kameniva bez adice příměsí dosáhl přibližně stejné hloubky zkarbonatování jako beton s adicí strusky, avšak jeho vzduchová propustnost byla vyšší. Lze tedy konstatovat, že adice strusky příznivě působí na snížení vzduchové propustnosti povrchové vrstvy betonu z recyklovaného betonu.

9.2 Měření povrchové nasákavosti přístrojem ISAT

Měření povrchové nasákavosti pro vodu (metoda ISAT) bylo provedeno na krychlích o rozměrech $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$. Měření bylo rozděleno do dvou etap, stejně jako v případě měření permeability přístrojem TORRENT. Tedy, v první etapě bylo měření provedeno

na tělesech první a druhé sady po 1 měsíci ve vlhkém uložení a byly zaznamenány výsledky. V druhé etapě se měření provedlo po 4 měsících na první sadě (4 měsíce uloženo v laboratorním prostředí s 0,03 % CO₂) a druhé sadě krychlí (1 měsíc ve vlhkém uložení + 3 měsíce v prostředí 98 % CO₂) a také byly zaznamenány výsledky k pozdějšímu porovnání.

Měření povrchové nasákavosti je opět ovlivňováno vlhkostním stavem tělesa, proto byla před každou zkouškou stanovena pomocí kalibrační křivky (Obr. 5.6) aktuální povrchová hmotnostní vlhkost krychle vlhkoměrem KAKASO PSXMI. Všechna tělesa byla před vlastním testováním propustnosti po dobu 48 hod. sušena v sušárně při teplotě 105 °C.

K hodnocení povrchové nasákavosti betonu je stanovován 10-ti minutový kapilární tok f [ml/m²/s], vzorky jsou hodnoceny třemi stupni absorbce viz. tab. 9.4.



Obr. 9.3 Sestava k měření počáteční povrchové nasákavosti metodou ISAT

Tab. 9.4 Počáteční povrchová nasákavost po 1 měsíci ve vlhkém uložení

druh betonu	množství cementu [kg/m ³]	aktuální hmotnostní vlhkost	propustnost po 10 min od začátku testu	absorbce betonu
		průměr	průměr	průměr
		[%]	[ml/m ² /s]	
referenční	250	2,2	0,235	nízká
	450	2,45	0,271	střední
recyklát	250	2,25	0,353	střední
	450	2,4	0,579	vysoká
recyklát+popílek	250	2,4	0,513	vysoká
	450	2,6	0,442	střední
recyklát+struska	250	2,5	0,310	střední
	450	2,55	0,558	vysoká
recyklát+mikrosilika	250	2,6	0,383	střední
	450	2,7	0,501	vysoká

Tab. 9.5 Počáteční povrchová nasákavost po 4 měsících v 0,03 % CO₂

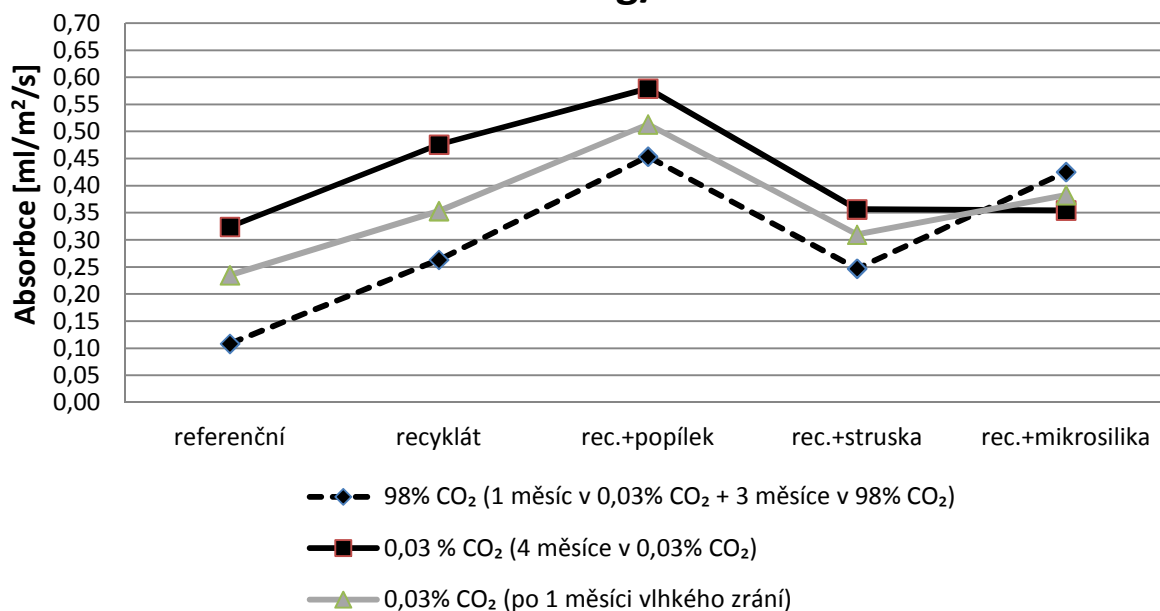
druh betonu	množství cementu [kg/m ³]	aktuální hmotnostní vlhkost	propustnost po 10 min od začátku testu	absorbce betonu
		průměr	průměr	průměr
		[%]	[ml/m ² /s]	
referenční	250	2,36	0,324	střední
	450	2,45	0,367	střední
recyklát	250	2,42	0,476	střední
	450	2,45	0,470	střední
recyklát+popílek	250	2,55	0,579	vysoká
	450	2,7	0,492	střední
recyklát+struska	250	2,6	0,356	střední
	450	2,75	0,506	vysoká
recyklát+mikrosilika	250	2,95	0,354	střední
	450	3	0,450	vysoká

Tab. 9.6 Počáteční povrchová nasákavost po 1 měsíci vlhkého uložení + 3 měsíce v 98 % CO₂

druh betonu	množství cementu [kg/m ³]	aktuální hmotnostní vlhkost	propustnost po 10 min od začátku testu	absorbce betonu
		průměr	průměr	průměr
		[%]	[ml/m ² /s]	
referenční	250	2,1	0,108	nízká
	450	2,3	0,142	nízká
recyklát	250	2,22	0,263	střední
	450	2,35	0,393	střední
recyklát+popílek	250	2,25	0,454	střední
	450	2,4	0,361	střední
recyklát+struska	250	2,28	0,247	nízká
	450	2,3	0,456	střední
recyklát+mikrosilika	250	2,3	0,425	střední
	450	2,4	0,679	vysoká

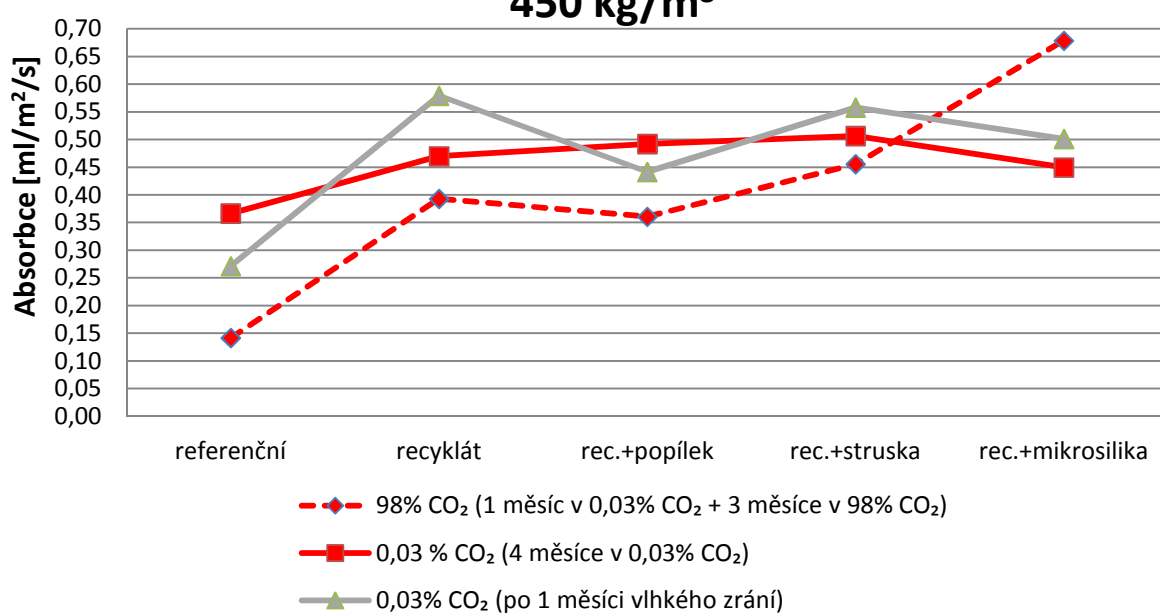
9.2.1 Grafické znázornění počáteční povrchové nasákavosti betonu metodou ISAT

Vliv CO_2 na počáteční povrchovou nasákavost (metoda ISAT), po 10 min., množství cementu 250 kg/m^3



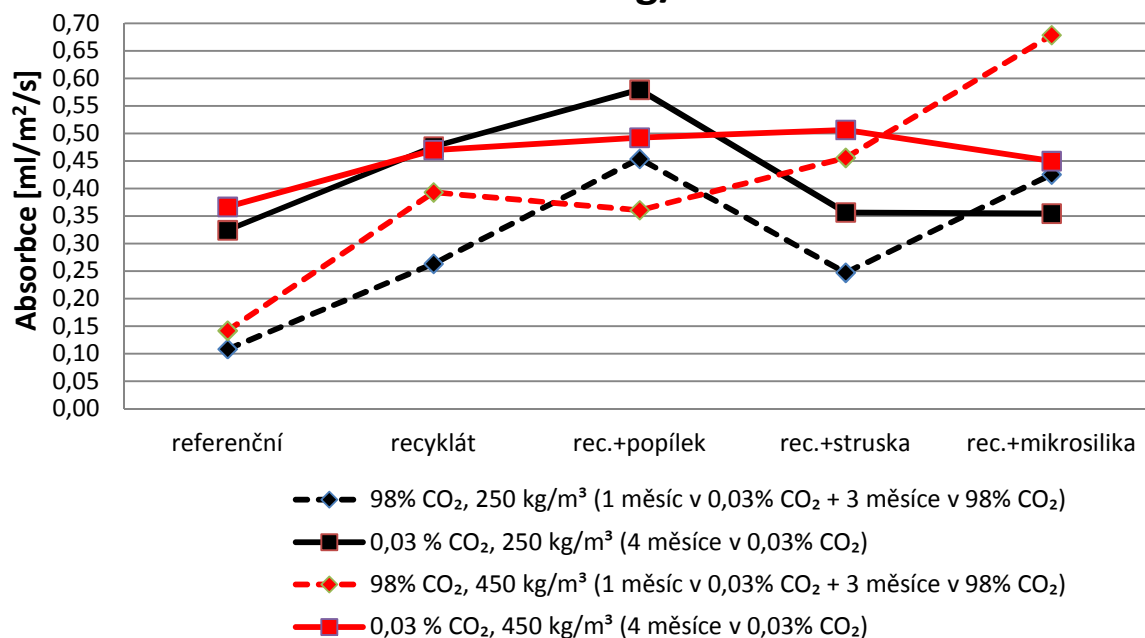
Graf 9.4 Vliv CO_2 na počáteční povrchovou nasákavost, CEM 250 kg/m^3

Vliv CO_2 na počáteční povrchovou nasákavost (metoda ISAT), po 10 min., množství cementu 450 kg/m^3



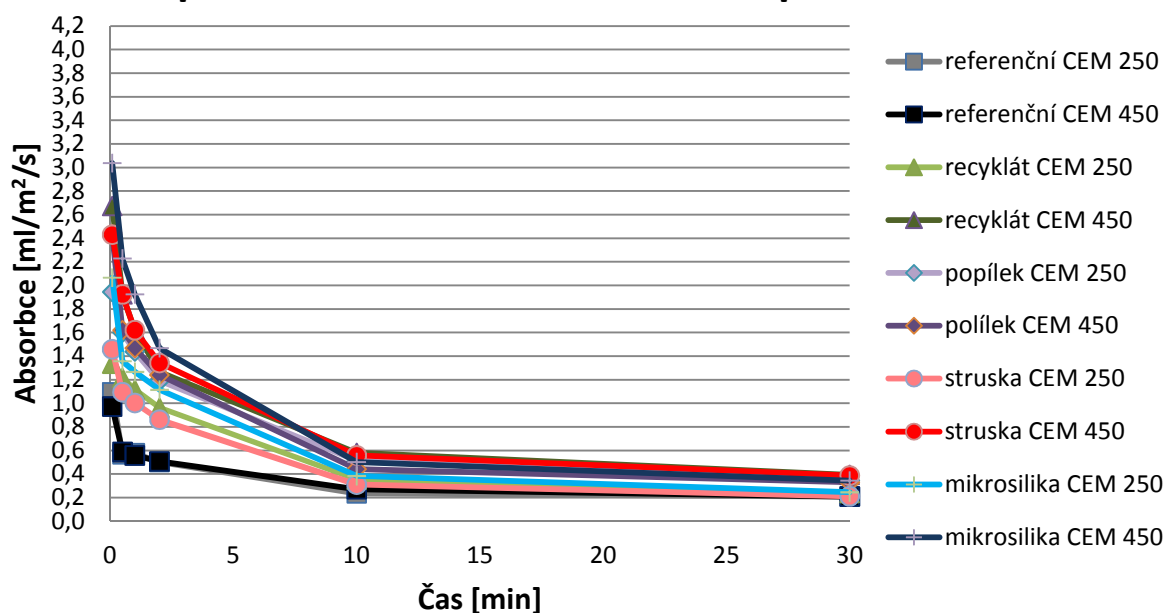
Graf 9.5 Vliv CO_2 na počáteční povrchovou nasákavost, CEM 450 kg/m^3

Vliv CO₂ na počáteční povrchovou nasákavost (metoda ISAT), po 10 min., množství cementu 250 a 450 kg/m³



Graf 9.6 Vliv CO₂ na počáteční povrchovou nasákavost, CEM 250 a 450 kg/m³

Počáteční povrchová nasákavost (metoda ISAT) po 1 měsíci uložení ve vlhkém prostředí



Graf 9.7 Počáteční povrchová nasákavost po 1 měsíci ve vlhkém uložení

9.2.2 Vyhodnocení výsledků počáteční povrchové nasákavosti betonu metodou ISAT

Pro porovnání různých druhů betonů byl použit kapilární tok po 10-ti minutách. Největší množství vody je totiž absorbováno během prvních 10 minut, s přibývajícím časem množství absorbované vody mírně klesá jak je vidět na grafu 9.7.

Počáteční povrchová nasákavost těles po **1 měsíci vlhkého zrání (v 0,03% CO₂) a těles uložených další 3 měsíce v 0,03% CO₂** byla relativně obdobná u obou dávek cementů. U některých druhů betonu se hodnoty lišily o něco více, což mohlo být způsobeno rozdílnou vlhkostí vzorků. U záměsí s dávkou cementu 250 kg/m³ nejlepší hodnoty vykazoval beton z přírodního kameniva, i když betony z betonového recyklátu s adicí strusky a mikrosiliky se k těmto hodnotám velmi blížily. Nejhorší povrchovou nasákavost vykazoval beton s adicí popílku. U záměsí s dávkou cementu 450 kg/m³ měl beton z přírodního kameniva také nejmenší povrchovou nasákavost, avšak ostatní druhy betonů byly propustnější o něco více.

Tělesa uložená v 98% CO₂ vykazovala u všech druhů betonů a u obou dávek cementu relativně nižší povrchové nasákavosti ve srovnání s tělesy uloženými v 0,03 % CO₂. Vyjímkou byla opět adice mikrosiliky, která tyto hodnoty spíše zvyšovala. U záměsí s dávkou cementu 250 kg/m³ vykazoval nejnižší povrchovou nasákavost beton z přírodního kameniva. Beton z recyklovaného betonu bez adice a s adicí strusky vykazoval také dobré hodnoty, avšak ne takové jako beton z kameniva přírodního. Adice popílku a mikrosiliky se v tomto směru neosvědčila, protože vykazovala hodnoty nejhorší. U záměsí s dávkou cementu 450 kg/m³ měl beton z přírodního kameniva výrazně nejnižší povrchovou nasákavost. Ostatní druhy betonu vykazovaly hodnoty vyšší, avšak povrchová nasákavost betonu s adicí mikrosiliky byla výrazně nejvyšší.

U těles uložených v 98 % CO₂ se povrchová nasákavost zlepšila z důvodu zkarbonatování povrchové vrstvy, kdy nově vzniklý objemnější CaCO₃ ucpává póry. Příměsi hodnoty nasákavostí příliš nevylepšily, spíše v některých případech zhoršily (popílek, mikrosilika). Příčinou je, že betony s adicí popílku a mikrosiliky obsahují více jemných částic, což může být jedním z mechanických důvodů zvýšené povrchové nasákavosti. U adice mikrosiliky je dalším důvodem vytvoření mikrotrhlinek na povrchu betonu, což také nasákavost značně změní. Vznik mikrotrhlinek lze odůvodnit hydratací cementu s mikrosilikou za vzniku gelu C-S-H, který velmi rychle karbonatuje na CaCO₃+SiO₂ v gelové formě obsahující H₂O. Během sušení se tenhle zkarbonatovaný produkt smrští a ztrácí H₂O, čímž vzniknou mikrotrhlínky, kterými nasákne více vody (viz. reakce vzniku 9.1 a 9.2)

U betonů s vyšší dávkou cementu se povrchové nasákavosti také většinou zvýšily oproti dávce nižší, což může být způsobeno intenzivnějším vývinem hydratačních trhlinek.

9.3 Určení hloubky karbonatace fenolftaleinovým testem

Zkoumání napadení betonů karbonatací bylo sledováno v jedné etapě, a to na vzorcích uložených souhrnně 4 měsíce v prostředí 0,03% CO₂ a na vzorcích uložených 1 měsíc v 0,03% CO₂ + 3 měsíce v 98% CO₂. K urychlenému testu karbonatace je zapotřebí sestava zařízení nutná k provádění testu – tlaková bomba s 98% CO₂, tlakové vedení, plně utěsněná mírně přetlaková komora o obsahu 500 litrů + vodní uzávěr, udržující konstantní přetlak 200 mm vodního sloupce (obr. 9.4).

Po provedení zkoušky pevnosti v příčném tahu vznikly z každého tělesa 2 díly, na jejichž vnitřní čerstvě odlomené plochy byl aplikován jemným rozprášením 1% roztok indikátoru fenolftaleinu v denaturovaném lihu. Tělesa s naneseným roztokem fenolftaleinu se nechala 1 hodinu zaschnout a poté se provedlo měření hloubky nezbarvené části, a to ze všech čtyř stran. Hloubka karbonatace h_{karb} je průměr těchto hodnot. Výsledky jsou uvedeny v tab. 9.7 společně s fotkami obr. 9.5 až 9.9.



Obr. 9.4 Sestava zařízení k urychlenému testu karbonatace

Tab. 9.7 Hloubka karbonatace zkušebních těles

druh betonu	množství cementu [kg/m ³]	h_{karb} po 4 měsících uložení v 0,03 % CO ₂ [mm]	h_{karb} po 1 měsíci v 0,03 % CO ₂ + 3 měsíce v 98 % CO ₂ [mm]
referenční	250	2	13
	450	1	8
recyklát	250	4	15
	450	3	13
recyklát+popílek	250	4	32
	450	2	19
recyklát+struska	250	4	14
	450	2	10
recyklát+mikrosilika	250	10	22
	450	5	18

Obrázky hloubek karbonatace na jednotlivých dílech vzorků:



4 měsíce v 0,03 % CO₂, CEM 250 kg/m³, h_{karb} = 2 mm



4 měsíce v 0,03 % CO₂, CEM 450 kg/m³, h_{karb} = 1 mm



1 měsíc v 0,03 % CO₂ + 3 měsíce v 98 % CO₂, CEM 250 kg/m³, h_{karb} = 13 mm



1 měsíc v 0,03 % CO₂ + 3 měsíce v 98 % CO₂, CEM 450 kg/m³, h_{karb} = 8 mm

Obr. 9.5 Postup karbonatace na zlomcích krychle referenčního betonu



4 měsíce v 0,03 % CO₂ CEM
250 kg/m³, $h_{\text{karb}} = 4 \text{ mm}$



4 měsíce v 0,03 % CO₂ CEM
450 kg/m³, $h_{\text{karb}} = 3 \text{ mm}$



1 měsíc v 0,03 % CO₂+3 měsíce v 98 %
CO₂, CEM 250 kg/m³, $h_{\text{karb}} = 15 \text{ mm}$



1 měsíc v 0,03 % CO₂+3 měsíce v 98 %
CO₂, CEM 450 kg/m³, $h_{\text{karb}} = 13 \text{ mm}$

Obr. 9.6 Postup karbonatace na zlomcích krychle betonu z betonového recyklátu



4 měsíce v 0,03 % CO₂, CEM
250 kg/m³, $h_{\text{karb}} = 4 \text{ mm}$



4 měsíce v 0,03 % CO₂, CEM
450 kg/m³, $h_{\text{karb}} = 2 \text{ mm}$



1 měsíc v 0,03 % CO₂+3 měsíce v 98 %
CO₂, CEM 250 kg/m³, $h_{\text{karb}} = 32 \text{ mm}$

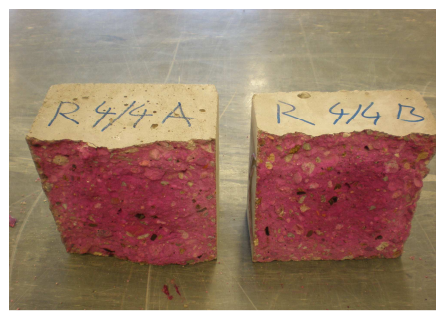


1 měsíc v 0,03 % CO₂+3 měsíce v 98 %
CO₂, CEM 450 kg/m³, $h_{\text{karb}} = 19 \text{ mm}$

Obr. 9.7 Postup karbonatace na zlomcích krychle betonu z betonového recyklátu + 30 % popílku



4 měsíce v 0,03 % CO₂ CEM
250 kg/m³, $h_{\text{karb}} = 4 \text{ mm}$



4 měsíce v 0,03 % CO₂ CEM
450 kg/m³, $h_{\text{karb}} = 2 \text{ mm}$



1 měsíc v 0,03 % CO₂+3 měsíce v 98 %
CO₂, CEM 250 kg/m³, $h_{\text{karb}} = 14 \text{ mm}$



1 měsíc v 0,03 % CO₂+3 měsíce v 98 %
CO₂, CEM 450 kg/m³, $h_{\text{karb}} = 10 \text{ mm}$

Obr. 9.8 Postup karbonatace na zlomcích krychle betonu z betonového recyklátu + 30 % strusky



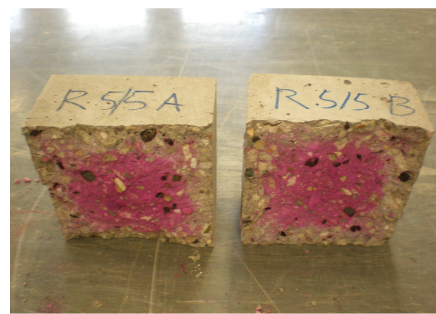
4 měsíce v 0,03 % CO₂, CEM
250 kg/m³, $h_{\text{karb}} = 10 \text{ mm}$



4 měsíce v 0,03 % CO₂, CEM
450 kg/m³, $h_{\text{karb}} = 5 \text{ mm}$



1 měsíc v 0,03 % CO₂+3 měsíce v 98 %
CO₂, CEM 250 kg/m³, $h_{\text{karb}} = 22 \text{ mm}$



1 měsíc v 0,03 % CO₂+3 měsíce v 98 %
CO₂, CEM 450 kg/m³, $h_{\text{karb}} = 18 \text{ mm}$

Obr. 9.9 Postup karbonatace na zlomcích krychle betonu z betonového recyklátu + 10% mikrosiliky

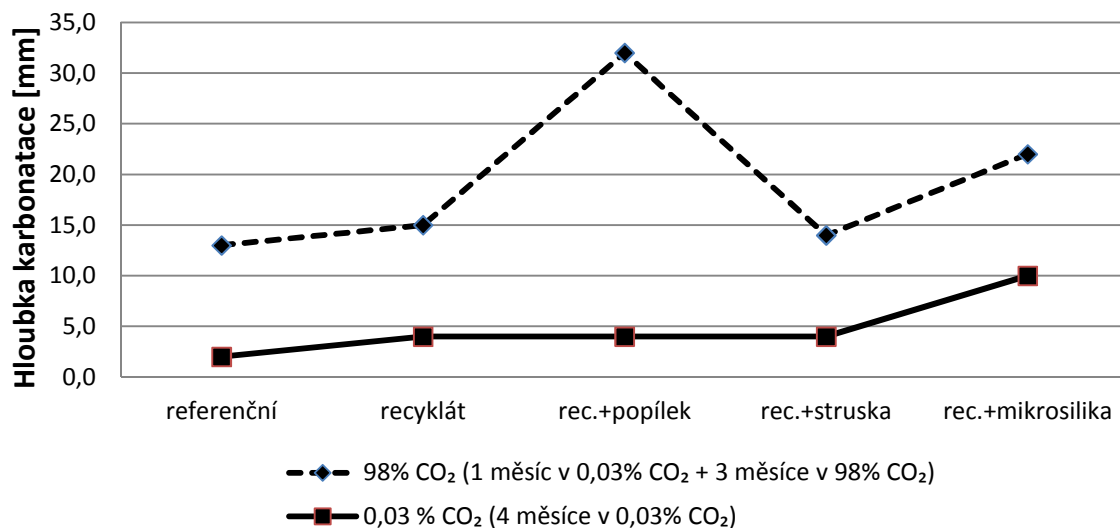
Tab. 9.8 Převod hloubky karbonatace v prostředí 98 % CO₂ na prostředí 0,03 % CO₂

druh betonu	množství cementu [kg/m ³]	doba uložení v 98% CO ₂ t ₁ [měsíce]	hloubka karbonatace po uložení v 98 % CO ₂ [mm]	násobek urychlení zkoušky v 98 % CO ₂ oproti prostředí 0,03 % CO ₂ 0,555x - 0,4107	doba potřebná k dosažení stejné hloubky karbonatace v 0,03 % CO ₂ (0,555x-0,4107)*t ₁ t ₂ [měsíce]
referenční	250	3	13	6,8	20,4
	450		8	4,0	12,1
recyklát	250		15	7,9	23,7
	450		13	6,8	20,4
recyklát+popílek	250		32	17,3	52,0
	450		19	10,1	30,4
recyklát+struska	250		14	7,4	22,1
	450		10	5,1	15,4
recyklát+mikrosilika	250		22	11,8	35,4
	450		18	9,6	28,7

Pomocí korelačního vztahu se naměřené hloubky karbonatace v prostředí 98 % CO₂ převedly na hodnoty v běžné atmosféře s 0,03 % CO₂. Naznačeno v tab. 9.8.

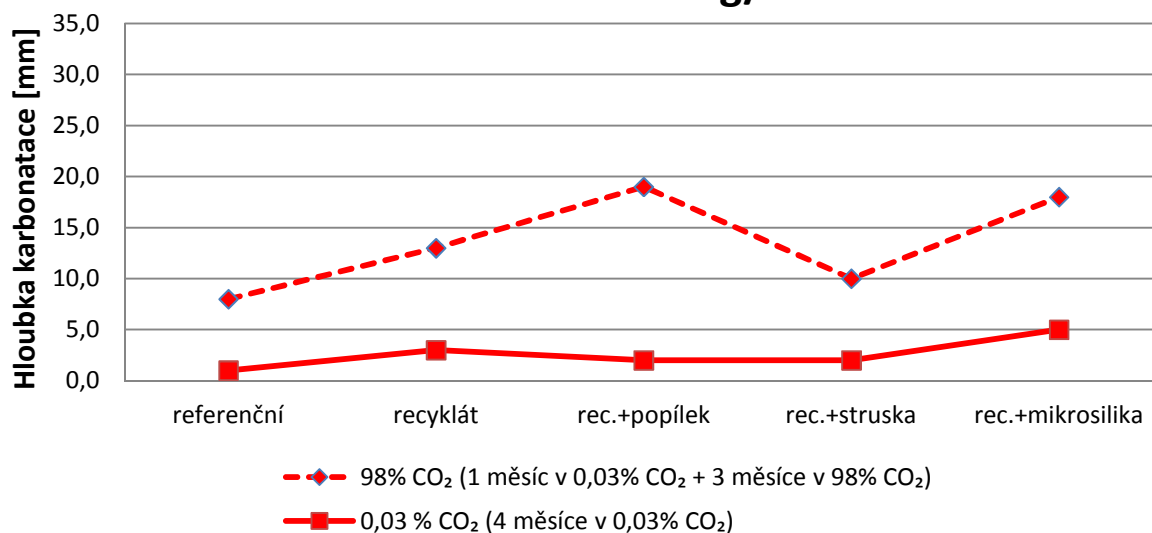
9.3.1 Grafické znázornění hloubky karbonatace

Vliv CO₂ na hloubku karbonatace, množství cementu 250 kg/m³



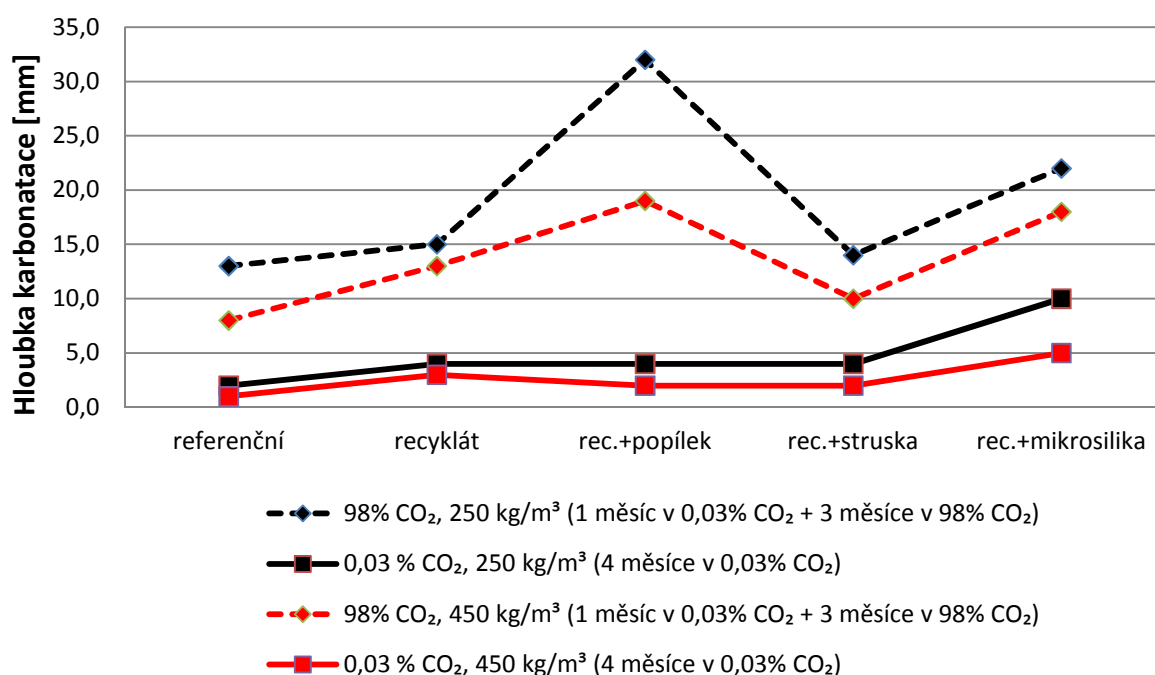
Graf 9.8 Vliv CO₂ na hloubku karbonatace, CEM 250kg/m³

Vliv CO₂ na hloubku karbonatace, množství cementu 450 kg/m³



Graf 9.9 Vliv CO₂ na hloubku karbonatace, CEM 450kg/m³

Vliv CO_2 na hloubku karbonatace, množství cementu 250 a 450 kg/m^3



Graf 9.10 Vliv CO_2 na hloubku karbonatace, CEM 250 a 450 kg/m^3

9.3.2 Vyhodnocení výsledků hloubky karbonatace fenolftaleinovým testem

Naměřená hloubka karbonatace u těles uložených 4 měsíce v prostředí 0,03% CO_2 byla u všech záměsů s dávkou cementu 450 kg/m^3 nižší ve srovnání se záměsemi s dávkou cementu 250 kg/m^3 . To samé lze pozorovat i u těles uložených 1 měsíc v 0,03% CO_2 + 3 měsíce v 98% CO_2 . Tento jev je pravděpodobně dán větší nepropustností povrchové vrstvy z důvodu vyššího množství cementu, který zaplňuje póry a lépe brání průniku CO_2 .

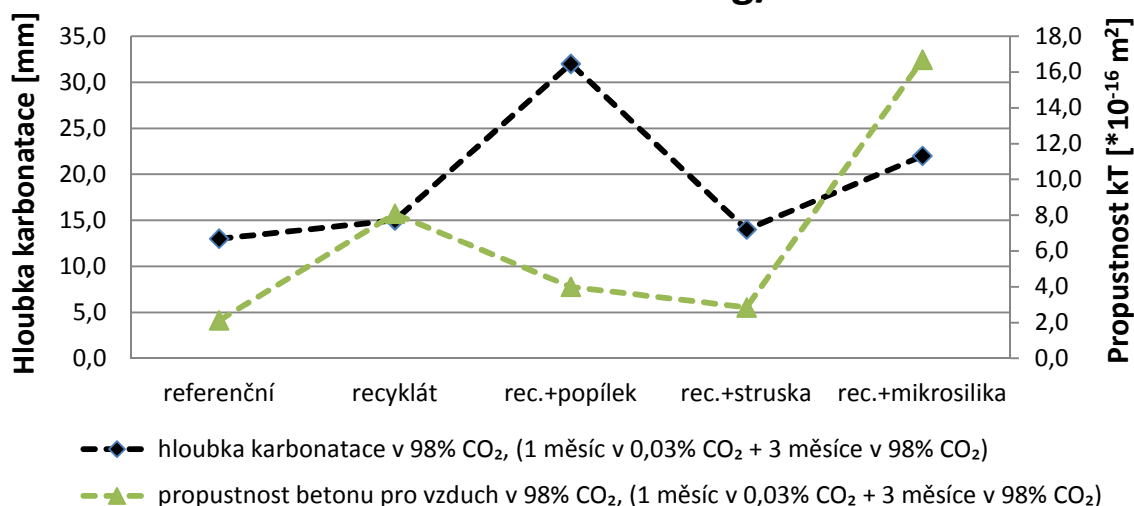
U těles uložených 4 měsíce v prostředí 0,03% CO_2 vykazuje nejnižší hloubku karbonatace beton z přírodního kameniva a naopak je nejhlouběji zkarbonatován beton z betonového recyklátu s 10% adicí mikrosiliky, a to u obou dávek cementu. Důvodem je vznik mikrotrhlinek hydratací cementu s mikrosilikou za vzniku gelu C-S-H, který velmi rychle karbonatuje na $\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$ v gelové formě obsahující H_2O . Během sušení se tenhle zkarbonatovaný produkt smrští a ztrácí H_2O , čímž vzniknou mikrotrhlinky.

Pozoruhodné je, že u těles uložených **1 měsíc v 0,03% CO_2 + 3 měsíce v 98% CO_2** vykazuje záměs s dávkou cementu 250 kg/m^3 a 30% adicí popílku výrazně nejvyšší hloubku karbonatace. Zato hloubka karbonatace u betonu s 30% adicí strusky a betonu z betonového recyklátu bez příměsí, je srovnatelná s hloubkou karbonatace betonu z přírodního kameniva.

U záměsi s dávkou cementu 450 kg/m^3 můžeme říci, že adice 30% strusky také velmi dobře zabraňuje karbonataci, v podstatě odolnost je obdobná betonu z přírodního kameniva. Naopak adice 30% popílku a 10% mikrosiliky karbonataci spíše podporují. Je to pravděpodobně dáno stejným mechanismem jako v minulém odstavci, protože obě tyto příměsi jsou pucolány a dochází u nich k podobným reakcím (viz. rovnice 9.1 a 9.2).

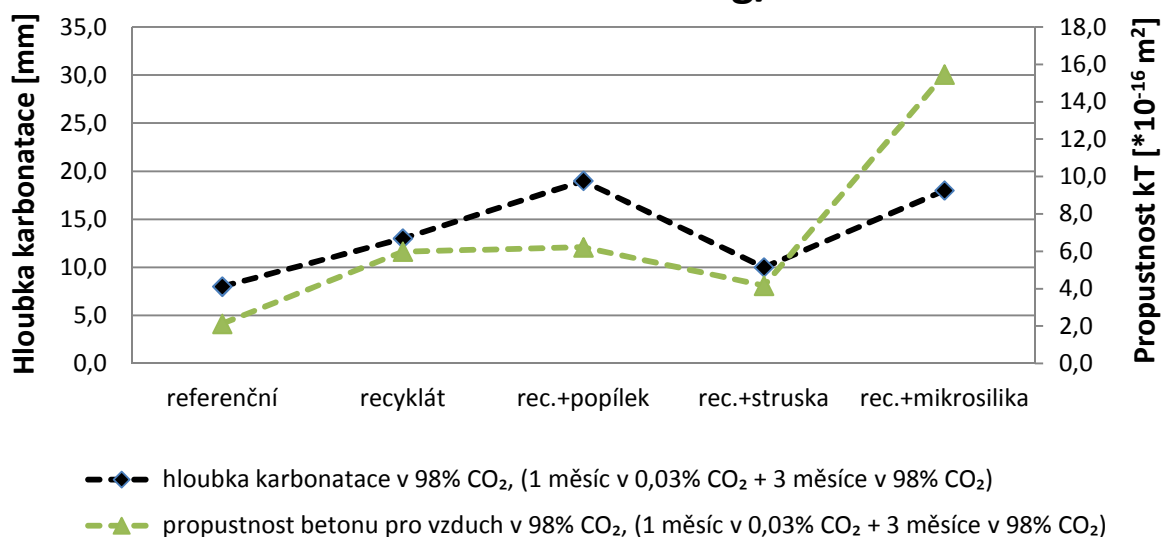
9.4 Korelace mezi hloubkou karbonatace a propustností betonu pro vzduch a vodu

Korelace mezi hloubkou karbonatace a propustností betonu pro vzduch (TORRENT), množství cementu 250 kg/m³



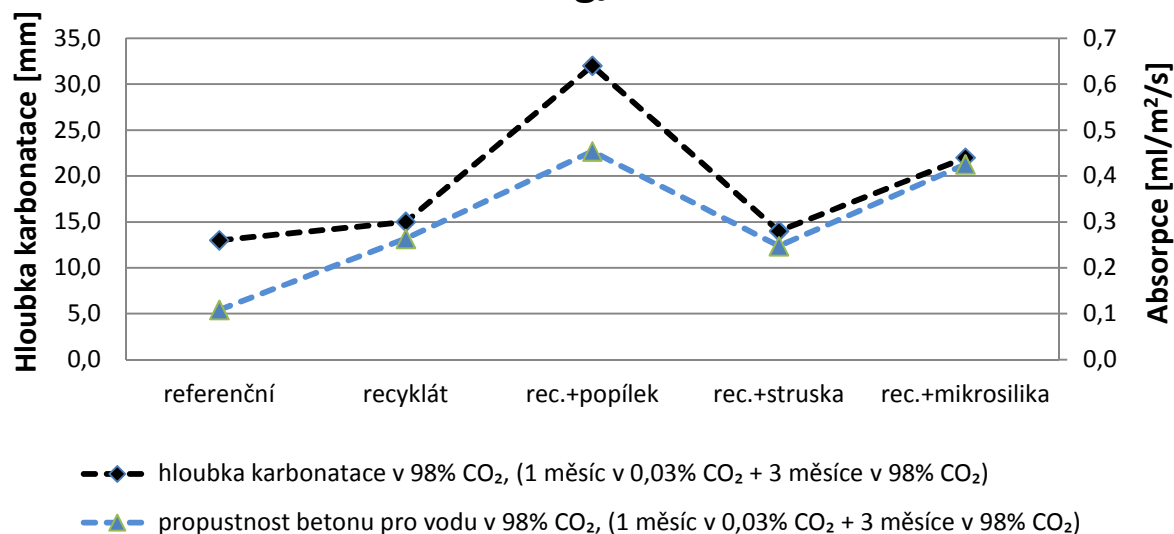
Graf 9.11 Korelace mezi hloubkou karbonatace a propustností betonu pro vzduch, CEM 250 kg/m³

Korelace mezi hloubkou karbonatace a propustností betonu pro vzduch (TORRENT), množství cementu 450 kg/m³



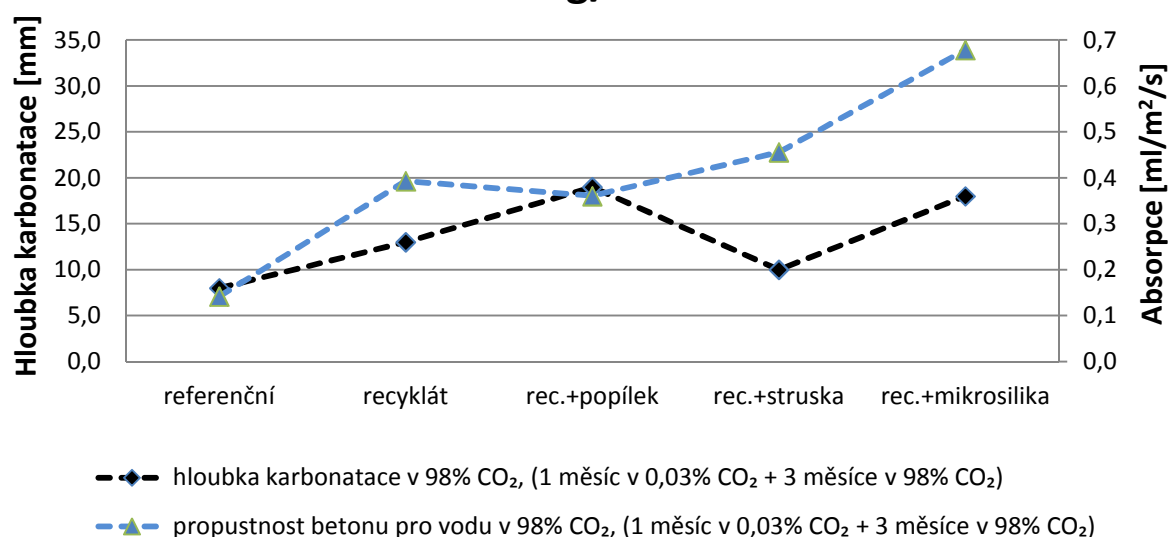
Graf 9.12 Korelace mezi hloubkou karbonatace a propustností betonu pro vzduch, CEM 450 kg/m³

Korelace mezi hloubkou karbonatace a absorpcí vody betonem (ISAT), množství cementu 250 kg/m³



Graf 9.13 Korelace mezi hloubkou karbonatace a absorpcí vody betonem, CEM 250 kg/m³

Korelace mezi hloubkou karbonatace a absorpcí vody betonem (ISAT), množství cementu 450 kg/m³



Graf 9.14 Korelace mezi hloubkou karbonatace a absorpcí vody betonem, CEM 450 kg/m³

9.4.1 Vyhodnocení korelace mezi hloubkou karbonatace a propustností betonu

Na základě rozboru grafů 9.11 - 9.12 lze konstatovat, že zvyšující se propustnost betonu pro vzduch (metoda TORRENT) může indikovat i jeho hlubší karbonataci výhradně při testování kvalitnějších betonů. Korelační vztah propustnost pro vzduch - karbonatace je totiž těsnější u receptur s vyšší dávkou cementu (450 kg/m^3) - viz Graf 9.12. U receptur s dávkou cementu 250 kg/m^3 je patrná disproporce mezi značnou hloubkou karbonatace a současně nízkou povrchovou propustností pro vzduch u betonu z betonového recyklátu s adicí popílku. Tato odchylka může být způsobena fyzikálně-chemickými procesy během procesu tuhnutí a tvrdnutí popílkem aditivovaného betonu (při nižší dávce centu vzniká v procesu hydratace méně silikagelu, který po vysušení výrazně zhoršuje propustnost), může však také jít o náhodnou chybu měření. Z výsledků pilotních měření lze konstatovat, že hodnoty propustností povrchu betonu pro vzduch metodou TORRENT mohou být použity k hrubému odhadu trvanlivosti výhradně kvalitnějšího betonu. Pravděpodobně platí, že vyšší hodnoty propustností vzduchu povrchem kvalitnějšího betonu indikují jeho nižší trvanlivost z důvodu očekávané větší hloubky karbonatace.

Na základě rozboru grafů 9.13 - 9.14 lze konstatovat, že zvyšující se absorpce vody betonem (metoda ISAT) pravděpodobně indikuje i jeho hlubší karbonataci a naopak. Korelační vztah absorpce - karbonatace se zdá být těsnější u receptur s nižší dávkou cementu (250 kg/m^3) - viz Graf 9.13. U receptur s dávkou cementu 450 kg/m^3 je taktéž patrná disproporce u betonu z betonového recyklátu s adicí popílku, kdy je stanovená absorpce vody betonem nižší oproti betonu s recyklátem a betonu s recyklátem a struskou. Tato odchylka může být způsobena fyzikálně-chemickými procesy během procesu tvrdnutí popílkem aditivovaného betonu, může však také jít o náhodnou chybu měření. Zdá se, že hodnoty absorpce vody betonem metodou ISAT mohou být použity k hrubému odhadu trvanlivosti betonu. Pravděpodobně platí, že vyšší hodnoty absorpce vody betonem indikují jeho nižší trvanlivost z důvodu očekávané větší hloubky karbonatace. Závěrem nutno poznamenat, že k přijetí objektivních hodnocení obou korelací bude zapotřebí rozšířit počet testovaných betonových vzorků i spektrum receptur za účelem dosažení statistického vyhodnocení výsledků a omezení možných chyb měření.

10 SHRNUTÍ

Cílem zde prezentované diplomové práce bylo provést zhodnocení trvanlivostních vlastností betonu z betonového recyklátu s variantní adicí silikátových přísad. Pro testy byly alternativně navrhovány vždy dvě receptury s výrazně odlišnými dávkami cementu. Trvanlivost je u betonu predikována především vlastnostmi jeho krycí (povrchové) vrstvy (2-5 cm). Proto bylo vybráno několik zkušebních metod, hodnotících povrchovou vrstvu betonu, a to: stanovení propustnosti pro vzduch (metoda TORRENT), stanovení propustnosti pro vodu (metoda ISAT), hloubka karbonatace urychleným testem v 98% CO₂ a doplňkové testy pevností.

Z výsledků měření v kapitole 8 a 9 vyplývá:

1) **Zkarbonatovaný beton** (1 měsíc ve vlhkém uložení + 3 měsíce v prostředí 98% CO₂) vykazuje oproti betonu uloženému 4 měsíce v 0,03% CO₂ (přírodní atmosféra) vyšší objemovou hmotnost, větší pevnost v tlaku i v příčném tahu a nižší propustnost pro vodu (metoda ISAT). Tyto závěry jsou platné pro všechny zkoušené druhy betonů, tedy pro množství cementu 250 kg/m³ i pro 450 kg/m³. Výjimkou je beton s 10% adicí přísady mikrosiliky z důvodu vzniku hydratačních mikrotrhlinek vedoucích ke zhoršení sledovaných fyzikálně-mechanických vlastností. Při hodnocení výsledků propustností betonu pro vzduch (metoda TORRENT) nelze jednoznačně konstatovat zvýšení nebo snížení hodnot po proběhlé karbonataci, dosažené výsledky se liší druhem betonu a množstvím cementu.

2) **Množství cementu** má na sledované vlastnosti pórové struktury značný vliv. Vyšší množství cementu, dávka 450 kg/m³ oproti dávce 250 kg/m³, nepochybně zvyšuje objemovou hmotnost, výrazně zvyšuje pevnost v tlaku, mírně i pevnost v příčném tahu a to jak u betonu uloženého 4 měsíce v 0,03% CO₂, tak u betonu uloženého 1 měsíc ve vlhkém uložení + 3 měsíce v prostředí 98 % CO₂. Rozdíl nastává u povrchové propustnosti betonu pro vzduch (metoda TORRENT), kdy sice u těles uložených v běžné atmosféře (4 měsíce v 0,03% CO₂) vyšší dávka cementu snižuje propustnost, ale u betonu silně zkarbonatovaného (1 měsíc ve vlhkém uložení + 3 měsíce v prostředí 98 % CO₂) již žádný vliv na propustnost nemá. Negativní vliv má větší dávka cementu na povrchovou propustnost (absorpci) betonu pro vodu (metoda ISAT), kdy ve všech případech, kromě adice 30% popílku, vychází propustnosti pro vodu vyšší, než při dávce cementu 250 kg/m³. Velmi kladný vliv má větší množství cementu na hloubku karbonatace, kdy je ve všech případech při dávce cementu 450 kg/m³ hloubka karbonatace menší než při použití nižší dávky cementu.

3) **Použití příměsí** přineslo také zajímavé výsledky. Tlakové pevnosti betonu z přírodního kameniva (referenční) a betonu pouze z betonového recyklátu (recyklát) jsou v poměru 1/0,75. Tento poměr už je dlouho známý a fakticky omezuje použití recyklovaného betonu jako kameniva do konstrukčních betonů. V případě 30% adice popílku a strusky se pevnosti u betonů s nižší dávkou cementu značně zvýšily. 10% adice mikrosiliky neměla v podstatě na pevnosti v tlaku žádný vliv. Pevnost v příčném tahu betonu z přírodního kameniva a betonu z betonového recyklátu byla stanovena také poměrem 1/0,75. Kupodivu adice silikátových příměsí pevnosti v příčném tahu neovlivnily, kromě 10% adice mikrosiliky, která pevnost v příčném tahu ještě zhoršila. Povrchová propustnost betonu pro vzduch (metoda TORRENT) se výrazně lišila u betonu uloženého v přirozené atmosféře (4 měsíce v 0,03% CO₂) a betonu zkarbonatovaného (1 měsíc ve vlhkém uložení + 3 měsíce v prostředí 98 % CO₂). U betonu uloženého v přirozené atmosféře vykazovaly nejhorší hodnoty betony s adicí popílku a mikrosiliky, u betonu zkarbonatovaného adice popílku a strusky vykazovaly hodnoty velice dobré, srovnatelné s hodnotami referenčního betonu (beton z přírodního kameniva). Naopak adice mikrosiliky propustnost betonu výrazně zvýšila. U povrchové propustnosti betonu pro vodu (metoda ISAT) se příměsí příliš nepodílely na snižování propustnosti betonu pro vodu. Adice strusky prakticky neměla žádný vliv na propustnost betonu, který se choval obdobně jako beton z betonového recyklátu bez adice. Adice popílku a mikrosiliky propustnost pro vodu spíše zhoršovaly. Stejně je tomu i u hloubky karbonatace, kdy adice popílku a mikrosiliky karbonataci spíše podporovaly, a naopak adice strusky karbonataci snižovala. U betonu z přírodního kameniva byla karbonatace jasně nejmenší.

Předchozí výsledky nás dovedly k závěru, že beton z přírodního kameniva vykazoval nejlepší hodnoty ze všech zkoušených vlastností. Jako druhý nejlepší se jeví beton z betonového recyklátu s 30% adicí strusky, který se sice ve fyzikálně-mechanických vlastnostech zdaleka nevyrovná betonu z přírodního kameniva, ale trvanlivostní vlastnosti, zejména povrchová propustnost pro vzduch, se k referenčnímu betonu velmi blíží. Naopak jako nejhorší varianta se ukázala 10% adice mikrosiliky, která zhoršila všechny zkoušené vlastnosti, zejména pak vlastnosti trvanlivostní.

4) **Za účelem dosažení vyšší trvanlivosti** betonu z betonového recyklátu by bylo především vhodné volit kvalitní betonový recyklát, který splňuje všechny požadavky pro použití do betonu, poté volit správný návrh složení betonové směsi. Důležité se zdá optimální množství cementu, které by dle výsledků práce mohlo ležet v rozmezí 250 – 450 kg/m³. Vhodné je i použití příměsí, velice se osvědčila struska v množství 30% z hmotnosti cementu.

Dále je nezbytné dostatečné hutnění směsi a následné ošetřování, aby na povrchu nevznikaly mikrotrhlíčky hydratační a smršťovací z vysušení povrchové vrstvy betonu, které mají velice negativní vliv na trvanlivost betonu.

11 ZÁVĚR

Odpadní materiály nejsou jen pouhou náhradou za suroviny primární, ale stávají se rovnocennými surovinami, které mohou být přínosem z ekonomického i technologického hlediska. Kvalita betonu z recyklátu závisí v první řadě na kvalitě vlastního recyklátu, na složení betonu, na vhodné technologii a také na konkrétním použití recyklovaného betonu. V dnešní době jsou k dispozici velmi kvalitní recyklační linky, kdy lze kvalitu recyklátu srovnat s přírodními materiály.

Trvanlivost je v posledních desetiletích pravděpodobně nejvíce sledovanou vlastností stavebních materiálů, beton nevyjímaje. Zdá se, že trvanlivost betonu lze nejlépe vyjádřit podle jeho aktuální propustnosti, neboť ta přímo ovlivňuje průnik agresivních látek ve formě plynu nebo kapaliny jeho povrchovou vrstvou. Užití betonového recyklátu jako náhrady přírodního hutného kameniva je, vzhledem k jeho velké nasákavosti, bohužel spojeno s očekáváním nižší pevnosti i trvanlivosti betonů z betonového recyklátu. Adicí silikátových příměsí lze propustnost a částečně i pevnost betonů z betonového recyklátu upravit, nutno však brát v potaz fázi budoucího agresivního média. U betonů z recyklovaného betonu s velkou propustností pro plyn nelze vždy očekávat stejně intenzivní propustnost pro kapaliny a naopak. Celkově lze konstatovat, že masovému použití betonů z betonového recyklátu brání většinou horší mechanické a trvanlivostní vlastnosti ve srovnání s betony z přírodního kameniva.

Nelze pominout ani dosti vysokou cenu betonového recyklátu (asi 200 Kč za 1 m^3) ve srovnání s přírodním těžným kamenivem (asi 300 Kč za 1 m^3). Trvanlivost betonů z recyklovaného betonu lze do jisté míry vylepšit variantní kombinací přísad a příměsí, to stejné platí i pro pevnost. Laboratorními testy se nejlépe osvědčila jako příměs struska. Avšak dostupnost strusky je v posledních letech dosti špatná z důvodu pozastavení výroby železa, což vede k výraznému zdražování strusky (cena strusky se pohybuje při dávce 30% z hmotnosti cementu na 1 m^3 čerstvého betonu kolem 50 Kč). Položka to sice není nijak závratná, ale při použití různých disperzních přísad navíc cena betonu z recyklovaného betonu stále roste, což velmi omezuje jeho použití pro masivní uplatnění. Lze tedy očekávat cílenou úpravu pevností a trvanlivostních vlastností jen u úzkého spektra speciálních betonů z betonového recyklátu, např. vodostavebných, síranovzdorných, odolávajících karbonataci apod.

SEZNAMY

Seznam použitých zdrojů

- [1] STEHLÍK, M., JURÁNKOVÁ, V., a ADÁMEK, J. *Možnost ovlivnění průběhu karbonatace cementových malt a betonu*. 12th International Scientific Conference, Brno, 2009.
- [2] DROCHYTKA, R. *Trvanlivost stavebních materiálů, studijní opory*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2007.
- [3] PYTLÍK, P. *Technologie betonu I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1994. ISBN 80-85867-07-9.
- [4] PYTLÍK, P. *Vlastnosti a užití stavebních výrobků*. Brno: Vutium, 1998. ISBN 80-214-1123-6.
- [5] MEHTA, P. K., a MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: Structures, Properties and Materials*. New Jersey: Englewood Cliffs, 1993.
- [6] REITERMAN, P., KADLECOVÁ, Z. aj. *Beton. Zohlednění trvanlivosti při hodnocení kvality povrchové vrstvy betonu* [online]. Březen 2012 [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <http://www.betontks.cz/casopis/2012-3/62.pdf>.
- [7] STEHLÍK, M., JURÁNKOVÁ, V., a ADÁMEK, J. *Jiný pohled na trvanlivost betonu*. 12th International Scientific Conference, Brno, 2009.
- [8] ŠMERDA, Z. a kol. *Životnost betonových staveb*. Řada C – Technická knihnice autorizovaného inženýra a technika. Praha: Šel, 1999. ISBN 80-902697-8-8.
- [9] BAJZA, A., ROUSKOVÁ, I. *Technológia betonu*. Bratislava: Jaga Group, 2007. ISBN 80-8076-032-2.
- [10] VYTLAČILOVÁ, V., DVORSKÝ, T. *Juniorstav. Permeabilita a vodotěsnost betonu* [online]. 2008 [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008_sekce/pdf/4_1/Vytlacilova_Vladimira_CL.pdf.

- [11] *Ekologie aktuálně.cz* [online]. 2001 [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <http://ekologie.xf.cz/temata/recyklace/recyklace.htm>.
- [12] WACHSMANN, M. Zkušenosti provozovatele recyklační linky stavebního a demoličního odpadu. *Recycling 2011*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství ve spolupráci s Asociací pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v ČR, březen 2011. ISBN 978-80-214-4253-5.
- [13] BECKEROVÁ, L., PYTLÍK, P. *Beton*. Recyklace stavebních minerálních odpadů. 2002.
- [14] PYTLÍK, P. Recyklace betonu. *Speciální betony*. Beroun, únor 2009.
- [15] MLČOCHOVÁ, V. Nové poznatky z oblastí recyklace betonů. *Recycling 2006*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství ve spolupráci s Asociací pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v ČR, březen 2006. ISBN 80-214-3142-3.
- [16] LEDEROVÁ, M. Vplyv betonového recyklovaného materiálu na vybrané vlastnosti betonu. *Recycling 2011*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství ve spolupráci s Asociací pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v ČR, březen 2011. ISBN 978-80-214-4253-5.
- [17] STAVARŽ, T. *Přísady a příměsy pro vylepšení fyzikálně-mechanických vlastností betonů z recyklovaného betonu*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [18] HELA, R. *Technologie betonu I, studijní opory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2005.
- [19] BÁRTA, R. *Chemie a technologie cementu*. Praha: Československé akademie věd, 1961.
- [20] *Enviweb* [online]. 2004 [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/clanek/odpady/47050/>.

- [21] HELA, R. *Technologie betonu II, studijní opory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2007.
- [22] *Stavební technologie* [online]. 2002 [cit. 2012-01-04]. Dostupné z: <http://www.stavebnitechnologie.cz/view.php?cisloclanku=2002032802>.
- [23] ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor, 2012.
- [24] ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím, 2009.
- [25] ČSN EN 12390-2 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti, 2009.
- [26] ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles, 2009.
- [27] ČSN EN 12390-6 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles, 2009.
- [28] ADÁMEK, J. *Sledování kvality těsnících technologií stanovením součinitele propustnosti povrchu sanovaných betonů pro vodu a vzduch*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [29] ROMMER, M. *Effect of moisture and concrete composition on the Torrent permeability measurement*. Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Laboratories for Concrete & Construction Chemistry. Switzerland, 2004.
- [30] DROCHYTKA, R., a ROVNANÍKOVÁ, P. *Progresivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí*. Výzkumný záměr VVZ MSM 0021630511. 2005-2011.
- [31] KUCHARCZYKOVÁ, B. *Ověřování kvality povrchových vrstev betonu, přednáška z předmětu BI03 – Diagnostické metody ve stavebnictví*.

[32] TORRENT, R., a LUCO, L. F. *Non-Destructive Evaluation of the Penetrability and Thickness of the Concrete Cover*. State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 189-NEC. 157 rue des Blains, France: RILEM Publications S.A.R.L., 2007. ISBN 978-2-35158-054-7.

[33] STEHLÍK, M. *Princip urychlené zkoušky na hloubku karbonatace v 98% CO₂*. In Non-destructive testing in engineering practice. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2008. ISBN: 978-80-7204-610- 2.

[34] Technický list. *Portlandské cementy*. Českomoravský cement, a.s., Heidelberg Cement Group, 2006.

Seznam použitých zkratk a symbolů

BS	betonová směs
RB	recyklovaný beton
SDO	stavební a demoliční odpad
MS	mikrosilika
AKR	alkalicko - křemičitá reakce
ČB	čerstvý beton
pH	vodíkový exponent
TPT	torrent permeability tester
kT	součinitel vzduchové propustnosti
Obr.	obrázek
Tab.	tabulka
č.	číslo
apod.	a podobně

Seznam tabulek

Tab. 3.1 Technické vlastnosti betonu z recyklátu pevnostní třídy C 16/20

Tab. 4.1 Chemické složení hlavních typů vysokopecních strusek

Tab. 4.2 Chemické složení popílků

Tab. 4.3 Vliv mikrosiliky na vlastnosti betonu

Tab. 5.1 Stupně konzistence BS při zkoušce sednutím kužele

Tab. 5.2 Třídy kvality povrchové vrstvy betonu

Tab. 5.3 Klasifikace absorpce povrchové vrstvy betonu, metoda ISAT

Tab. 6.1 Receptura BS pro referenční beton

Tab. 6.2 Receptura BS s náhradou hrubého kameniva betonovým recyklátem

Tab. 6.3 Receptura BS s náhradou hrubého kameniva betonovým recyklátem + popílek

Tab. 6.4 Receptura BS s náhradou hrubého kameniva betonovým recyklátem + struska

Tab. 6.5 Receptura BS s náhradou hrubého kameniva betonovým recyklátem + mikrosilika

Tab. 6.6 Vlastnosti příměsí

Tab. 7.1 Označení zkušebních těles

Tab. 8.1 Průměrné objemové hmotnosti zkušebních těles

Tab. 8.2 Výsledné pevnosti v tlaku zkušebních těles po 1 měsíci zrání ve vlhkém prostředí

Tab. 8.3 Výsledné pevnosti v příčném tahu zkušebních těles

Tab. 9.1 Propustnost betonu pro vzduch po 1 měsíci ve vlhkém uložení

Tab. 9.2 Propustnost betonu pro vzduch po 4 měsících v 0,03 % CO₂

Tab. 9.3 Propustnost betonu pro vzduch po 1 měsíci vlhkého uložení+3 měsíce v 98 % CO₂

Tab. 9.4 Počáteční povrchová nasákavost po 1 měsíci ve vlhkém uložení

Tab. 9.5 Počáteční povrchová nasákavost po 4 měsících v 0,03 % CO₂

Tab. 9.6 Počáteční povrchová nasákavost po 1 měsíci vlhkého uložení+3 měsíce v 98 % CO₂

Tab. 9.7 Hloubka karbonatace zkušebních těles

Tab. 9.8 Převod hloubky karbonatace v prostředí 98 % CO₂ na prostředí 0,03 % CO₂

Seznam grafů

Graf 8.1 Objemové hmotnosti čerstvého betonu

Graf 8.2 Vliv CO_2 na objemovou hmotnost ztvrdlého betonu, CEM 250 kg/m^3

Graf 8.3 Vliv CO_2 na objemovou hmotnost ztvrdlého betonu, CEM 450 kg/m^3

Graf 8.4 Vliv CO_2 na objemovou hmotnost ztvrdlého betonu, CEM 250 a 450 kg/m^3

Graf 8.5 Pevnost v tlaku po 1 měsíci zrání ve vlhkém uložení

Graf 8.6 Vliv CO_2 na pevnost v příčném tahu betonu, CEM 250 kg/m^3

Graf 8.7 Vliv CO_2 na pevnost v příčném tahu betonu, CEM 450 kg/m^3

Graf 8.8 Vliv CO_2 na pevnost v příčném tahu betonu, CEM 250 a 450 kg/m^3

Graf 9.1 Vliv CO_2 na propustnost betonu pro vzduch, CEM 250 kg/m^3

Graf 9.2 Vliv CO_2 na propustnost betonu pro vzduch, CEM 450 kg/m^3

Graf 9.3 Vliv CO_2 na propustnost betonu pro vzduch, CEM 250 a 450 kg/m^3

Graf 9.4 Vliv CO_2 na počáteční povrchovou nasákavost, CEM 250 kg/m^3

Graf 9.5 Vliv CO_2 na počáteční povrchovou nasákavost, CEM 450 kg/m^3

Graf 9.6 Vliv CO_2 na počáteční povrchovou nasákavost, CEM 250 a 450 kg/m^3

Graf 9.7 Počáteční povrchová nasákavost po 1 měsíci ve vlhkém uložení

Graf 9.8 Vliv CO_2 na hloubku karbonatace, CEM 250 kg/m^3

Graf 9.9 Vliv CO_2 na hloubku karbonatace, CEM 450 kg/m^3

Graf 9.10 Vliv CO_2 na hloubku karbonatace, CEM 250 a 450 kg/m^3

Graf 9.11 Korelace mezi hloubkou karbonatace a propustností betonu pro vzduch, CEM 250 kg/m^3

Graf 9.12 Korelace mezi hloubkou karbonatace a propustností betonu pro vzduch, CEM 450 kg/m^3

Graf 9.13 Korelace mezi hloubkou karbonatace a absorpcí vody betonem, CEM 250 kg/m^3

Graf 9.14 Korelace mezi hloubkou karbonatace a absorpcí vody betonem, CEM 450 kg/m^3

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Degradální procesy ovlivňující trvanlivost betonu

Obr. 2.2 Znázornění působení kapaliny způsobující korozi I. typu, dochází k vyloučení povrchu

Obr. 2.3 Znázornění působení kapaliny způsobující korozi III. typu, tvorba látek se zvětšeným objemem

Obr. 2.4 Obecná závislost rychlosti karbonatace na relativní vlhkosti vzduchu

Obr. 2.5 Mechanismus rozrušení betonu příčinou působení SO_2 a H_2O

Obr. 2.6 Velikost a rozdělení pórů v cementovém tmelu

Obr. 2.7 Vztah pórovitosti a permeability podle Bakkeru

Obr. 2.8 Tvar a velikost molekuly H_2O a CO_2

Obr. 4.1 Efekt plniva

Obr. 5.1 Sednutí kužele při zkoušce konzistence a způsob odečtu naměřených hodnot

Obr. 5.2 Vyhovující způsoby porušení zkušebních krychlí

Obr. 5.3 Některé nevyhovující způsoby porušení zkušebních krychlí

Obr. 5.4 Proudění vzduchu ve vakuových komorách

Obr. 5.5 Normogram pro zjištění kvality betonu

Obr. 5.6 Kalibrační křivka pro stanovení vlhkosti betonu

Obr. 5.7 Měřicí zařízení, metoda ISAT

Obr. 5.8 Stanovení hloubky karbonatace fenolftaleinovým testem

Obr. 5.9 Rychlost karbonatace v 98 % CO_2 a běžné atmosféře s 0,03 % CO_2 (teoreticky dle Fickova zákona)

Obr. 5.10 Korelační vztah mezi hloubkou karbonatace v 98 % CO_2 a urychlením zkoušky oproti reálné atmosféře s 0,03 % CO_2

Obr. 6.1 Betonový recyklát od firmy Dufonev s.r.o., frakce 0-16 mm

Obr. 7.1 Homogenizace suché BS a pohled na míchací zařízení

Obr. 8.1 Uložení zkušebního tělesa na střed tlačené plochy v lisu na provádění zkoušky pevnosti v tlaku

Obr. 8.2 Uložení vzorku mezi válcové zatěžovací segmenty před zkouškou pevnosti v příčném tahu

Obr. 9.1 Sestava k měření propustnosti pro vzduch metodou TORRENT

Obr. 9.2 Přístroj KAKASO PSMXI na měření povrchové vlhkosti betonu

Obr. 9.3 Sestava k měření počáteční povrchové nasákavosti metodou ISAT

Obr. 9.4 Sestava zařízení k urychlenému testu karbonatace

Obr. 9.5 Postup karbonatace na zlomcích krychle referenčního betonu

Obr. 9.6 Postup karbonatace na zlomcích krychle betonu z betonového recyklátu

Obr. 9.7 Postup karbonatace na zlomcích krychle betonu z betonového recyklátu + 30 %
popílku

Obr. 9.8 Postup karbonatace na zlomcích krychle betonu z betonového recyklátu + 30 %
strusky

Obr. 9.9 Postup karbonatace na zlomcích krychle betonu z betonového recyklátu + 10%
mikrosiliky

Seznam příloh

1	TABELÁRNÍ PŘÍLOHY	2
1.1	Příloha č. 1 – Složení betonové směsi na 1 l.....	2
1.2	Příloha č. 2 – Počáteční povrchová nasákavost – 30-ti minutový kapilární vtok.....	4
1.3	Příloha č. 3 – Objemová hmotnost.....	6
2	GRAFICKÉ PŘÍLOHY	9
2.1	Příloha č. 4 – Křivky zrnitosti přírodního kameniva a recyklátu.....	9
2.2	Příloha č. 5 – Propustnost betonu pro vzduch (metoda TORRENT).....	10
2.3	Příloha č. 6 – Propustnost betonu pro vodu (metoda ISAT).....	11
2.4	Příloha č. 7 – Pevnost betonu v příčném tahu.....	14

TABELÁRNÍ PŘÍLOHY

1.1 Příloha č. 1 – Složení betonové směsi na 11 l.

Tab. 1.1 Receptura BS pro referenční beton

Receptura R1/1, R1/2, R1/3		Receptura R1/4, R1/5, R1/6	
Referenční receptura, použito přírodní hrubé kamenivo Olbramovice frakce 8-16 mm.		Referenční receptura, použito přírodní hrubé kamenivo Olbramovice frakce 8-16 mm.	
CEM II 32,5/B-S R	2,75 kg/m ³	CEM II 32,5/B-S R	4,95 kg/m ³
0-4 Bratčice	8,36 kg/m ³	0-4 Bratčice	8,36 kg/m ³
4-8 Tovačov	2,51 kg/m ³	4-8 Tovačov	2,51 kg/m ³
8-16 Olbramovice	10,00 kg/m ³	8-16 Olbramovice	10,00 kg/m ³
voda	1,5 kg/m ³	voda	2,1 kg/m ³

Tab. 1.2 Receptura BS s náhradou hrubého kameniva betonovým recyklátem

Receptura R2/1, R2/2, R2/3		Receptura R2/4, R2/5, R2/6	
100% hrubého kameniva 8-16 mm nahrazeno surovým recyklátem 0-16 mm.		100% hrubého kameniva 8-16 mm nahrazeno surovým recyklátem 0-16 mm.	
CEM II 32,5/B-S R	2,75kg/m ³	CEM II 32,5/B-S R	4,95 kg/m ³
0-4 Bratčice	8,36 kg/m ³	0-4 Bratčice	8,36 kg/m ³
4-8 Tovačov	2,51 kg/m ³	4-8 Tovačov	2,51 kg/m ³
0-16 surový recyklát	7,59 kg/m ³	0-16 surový recyklát	7,59 kg/m ³
voda	2,00 kg/m ³	voda	2,60 kg/m ³

Tab. 1.3 Receptura BS s náhradou hrubého kameniva betonovým recyklátem + popílek

Receptura R3/1, R3/2, R3/3		Receptura R3/4, R3/5, R3/6	
100% hrubého kameniva 8-16 mm nahrazeno surovým recyklátem 0-16 mm.		100% hrubého kameniva 8-16 mm nahrazeno surovým recyklátem 0-16 mm.	
CEM II 32,5/B-S R	2,75 kg/m ³	CEM II 32,5/B-S R	4,95 kg/m ³
0-4 Bratčice	6,90 kg/m ³	0-4 Bratčice	6,90 kg/m ³
4-8 Tovačov	5,51 kg/m ³	4-8 Tovačov	5,51 kg/m ³
0-16 surový recyklát	7,59 kg/m ³	0-16 surový recyklát	7,59 kg/m ³
voda	2,26 kg/m ³	voda	2,75 kg/m ³
popílek	0,83 kg/m ³	popílek	0,83 kg/m ³

Tab. 1.4 Receptura BS s náhradou hrubého kameniva betonovým recyklátem + struska

Receptura R4/1, R4/2, R4/3		Receptura R4/4, R4/5, R4/6	
100% hrubého kameniva 8-16 mm nahrazeno surovým recyklátem 0-16 mm.		100% hrubého kameniva 8-16 mm nahrazeno surovým recyklátem 0-16 mm.	
CEM II 32,5/B-S R	2,75 kg/m ³	CEM II 32,5/B-S R	4,95 kg/m ³
0-4 Bratčice	7,39 kg/m ³	0-4 Bratčice	7,39 kg/m ³
4-8 Tovačov	5,51 kg/m ³	4-8 Tovačov	5,51 kg/m ³
0-16 surový recyklát	7,59 kg/m ³	0-16 surový recyklát	7,59 kg/m ³
voda	2,26 kg/m ³	voda	2,75 kg/m ³
struska	0,83 kg/m ³	struska	0,83 kg/m ³

Tab. 1.5 Receptura BS s náhradou hrubého kameniva betonovým recyklátem + mikrosilika

Receptura R5/1, R5/2, R5/3		Receptura R5/4, R5/5, R5/6	
100% hrubého kameniva 8-16 mm nahrazeno surovým recyklátem 0-16 mm.		100% hrubého kameniva 8-16 mm nahrazeno surovým recyklátem 0-16 mm.	
CEM II 32,5/B-S R	2,75 kg/m ³	CEM II 32,5/B-S R	4,95 kg/m ³
0-4 Bratčice	6,85 kg/m ³	0-4 Bratčice	6,85 kg/m ³
4-8 Tovačov	5,51 kg/m ³	4-8 Tovačov	5,51 kg/m ³
0-16 surový recyklát	7,59 kg/m ³	0-16 surový recyklát	7,59 kg/m ³
voda	2,26 kg/m ³	voda	2,85 kg/m ³
mikrosilika	0,28 kg/m ³	mikrosilika	0,28 kg/m ³

1.2 Příloha č. 2 – Počáteční povrchová nasákavost – 30-ti minutový kapilární vtok

Tab. 1.6 Počáteční povrchová nasákavost po 1 měsíci ve vlhkém uložení

druh betonu	množství cementu [kg/m ³]	aktuální hmotnostní vlhkost	propustnost po 30 min od začátku testu	absorbce betonu
		průměr	průměr	průměr
		[%]	[ml/m ² /s]	
referenční	250	2,2	0,209	střední
	450	2,45	0,209	střední
recyklát	250	2,25	0,239	střední
	450	2,4	0,393	vysoká
recyklát+popílek	250	2,4	0,345	střední
	450	2,6	0,329	střední
recyklát+struska	250	2,5	0,211	střední
	450	2,55	0,387	vysoká
recyklát+mikrosilika	250	2,6	0,245	střední
	450	2,7	0,344	střední

Tab. 1.7 Počáteční povrchová nasákavost po 4 měsících v 0,03% CO₂

druh betonu	množství cementu [kg/m ³]	aktuální hmotnostní vlhkost	propustnost po 30 min od začátku testu	absorbce betonu
		průměr	průměr	průměr
		[%]	[ml/m ² /s]	
referenční	250	2,36	0,267	střední
	450	2,45	0,263	střední
recyklát	250	2,42	0,330	střední
	450	2,45	0,334	střední
recyklát+popílek	250	2,55	0,413	vysoká
	450	2,7	0,340	střední
recyklát+struska	250	2,6	0,241	střední
	450	2,75	0,338	střední
recyklát+mikrosilika	250	2,95	0,237	střední
	450	3	0,308	střední

Tab. 1.8 Počáteční povrchová nasákavost po 1 měsíci v 0,03%+3 měsíce v 98% CO₂

druh betonu	množství cementu [kg/m ³]	aktuální hmotnostní vlhkost	propustnost po 30 min od začátku testu	absorbce betonu
		průměr	průměr	průměr
		[%]	[ml/m ² /s]	
referenční	250	2,1	0,074	nízká
	450	2,3	0,097	nízká
recyklát	250	2,22	0,154	nízká
	450	2,35	0,217	střední
recyklát+popílek	250	2,25	0,273	střední
	450	2,4	0,213	střední
recyklát+struska	250	2,28	0,128	nízká
	450	2,3	0,255	střední
recyklát+mikrosilika	250	2,3	0,269	střední
	450	2,4	0,440	vysoká

1.3 Příloha č. 3 – Objemová hmotnost

Tab. 1.9 Objemová hmotnost čerstvého betonu

druh betonu	množství cementu	hmotnost formy	hmotnost celková	hmotnost betonu	hmotnost betonu	objemová hmotnost
	[kg/m ³]	[kg]	[kg]	[kg]	průměr [kg]	průměr [kg/m ³]
referenční	450	1,131	9,329	8,198	8,474	2510
		1,097	9,134	8,037		
		0,127	9,313	9,186		
	250	1,122	9,169	8,047	8,034	2380
		1,13	9,074	7,944		
		1,233	9,343	8,110		
recyklát	450	1,139	9,169	8,030	7,996	2370
		1,221	9,074	7,853		
		1,239	9,343	8,104		
	250	1,13	8,607	7,477	7,524	2230
		1,17	8,672	7,502		
		1,201	8,793	7,592		
recyklát + popílek	450	1,172	8,456	7,284	7,326	2170
		1,135	8,516	7,381		
		1,14	8,454	7,314		
	250	1,126	8,426	7,300	7,303	2160
		1,176	8,485	7,309		
		1,134	8,433	7,299		
recyklát + struska	450	1,127	8,712	7,585	7,543	2230
		1,091	8,667	7,576		
		1,202	8,669	7,467		
	250	1,128	8,672	7,544	7,506	2220
		1,156	8,599	7,443		
		1,136	8,667	7,531		
recyklát + mikrosilika	450	1,139	8,566	7,427	7,492	2220
		1,093	8,602	7,509		
		1,088	8,627	7,539		
	250	1,171	8,645	7,474	7,423	2200
		1,1	8,492	7,392		
		1,129	8,533	7,404		

Tab. 1.10 Objemová hmotnost ztvrdlého vysušeného betonu po 1 měsíci v 0,03 % CO₂

druh betonu	množství cementu	hmotnost betonu	rozměry formy			objemová hmotnost	objemová hmotnost
	[kg/m ³]	[kg]	a	b	c	[kg/m ³]	průměr
			[mm]	[mm]	[mm]		[kg/m ³]
referenční	450	7,713	149,5	149,3	150,3	2300	2300
		7,742	149,9	149,4	150,4	2300	
	250	7,660	149,8	149,6	150,5	2270	2270
		7,617	150,0	149,6	150,1	2260	
recyklát	450	7,007	149,7	149,5	150,3	2080	2090
		7,036	149,7	149,6	150,2	2090	
	250	7,034	150,0	149,7	150,3	2080	2080
		7,000	149,8	149,9	150,4	2070	
recyklát + popílek	450	6,815	149,3	148,9	150,9	2030	2030
		6,855	149,4	149,7	150,8	2030	
	250	6,790	149,5	149,2	150,5	2020	2020
		6,780	149,2	149,5	150,3	2020	
recyklát + struska	450	7,119	149,5	148,9	150,7	2120	2130
		7,183	149,9	148,7	150,6	2140	
	250	7,061	148,9	149,8	150,6	2100	2090
		6,993	149,9	149,2	150,2	2080	
recyklát + mikrosilika	450	7,033	149,6	149,4	150,1	2100	2100
		7,026	149,4	149,1	150,2	2100	
	250	7,025	149,5	149,8	150,6	2080	2070
		6,855	148,8	149,9	150,2	2050	

Tab. 1.11 Objemová hmotnost ztvrdlého vysušeného betonu po 4 měsíci v 0,03% CO₂

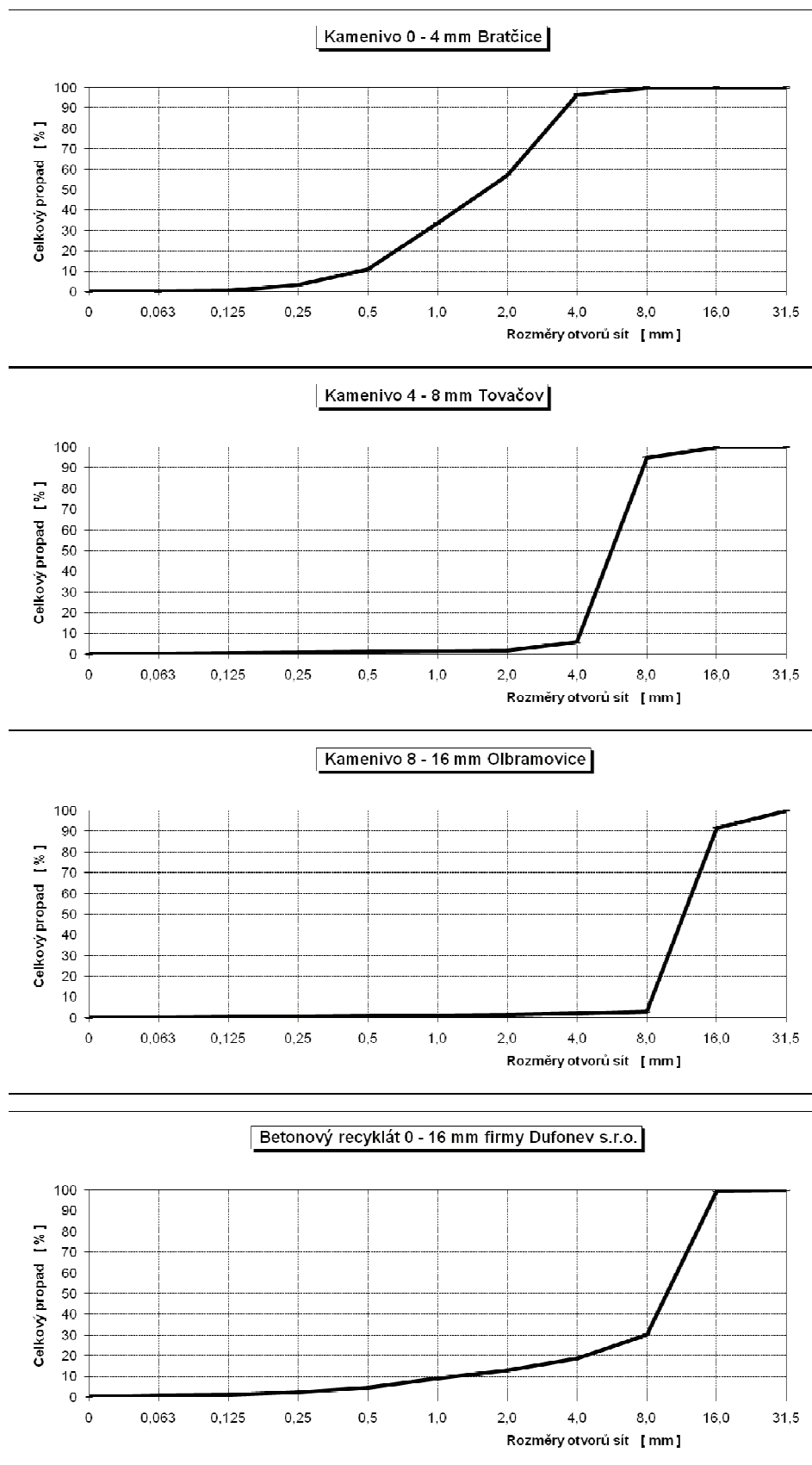
druh betonu	množství cementu	hmotnost betonu	rozměry formy			objemová hmotnost
	[kg/m ³]	[kg]	a	b	c	[kg/m ³]
			[mm]	[mm]	[mm]	
referenční	450	7,743	149,9	149,4	150,4	2300
	250	7,635	149,8	149,6	150,5	2260
recyklát	450	7,029	149,7	149,6	150,2	2090
	250	7,004	150,0	149,7	150,3	2080
recyklát + popílek	450	6,781	149,4	149,7	150,8	2030
	250	6,811	149,5	149,2	150,5	2010
recyklát + struska	450	7,167	149,9	148,7	150,6	2140
	250	7,016	148,9	149,8	150,6	2090
recyklát + mikrosilika	450	6,987	149,4	149,1	150,2	2090
	250	6,971	149,5	149,8	150,6	2070

Tab. 1.12 Objemová hmotnost ztvrdlého vysušeného betonu po 1 měsíci v 0,03% CO₂+3 měsíce v 98% CO₂

druh betonu	množství cementu	hmotnost betonu	rozměry formy			objemová hmotnost
	[kg/m ³]	[kg]	a	b	c	[kg/m ³]
			[mm]	[mm]	[mm]	
referenční	450	7,806	149,5	149,3	150,3	2330
	250	7,715	150,0	149,6	150,1	2290
recyklát	450	7,110	149,7	149,5	150,3	2110
	250	7,134	149,8	149,9	150,4	2110
recyklát + popílek	450	6,947	149,3	148,9	150,9	2070
	250	6,918	149,2	149,5	150,3	2060
recyklát + struska	450	7,220	149,5	148,9	150,7	2150
	250	7,100	149,9	149,2	150,2	2110
recyklát + mikrosilika	450	7,130	149,6	149,4	150,1	2130
	250	6,998	148,8	149,9	150,2	2090

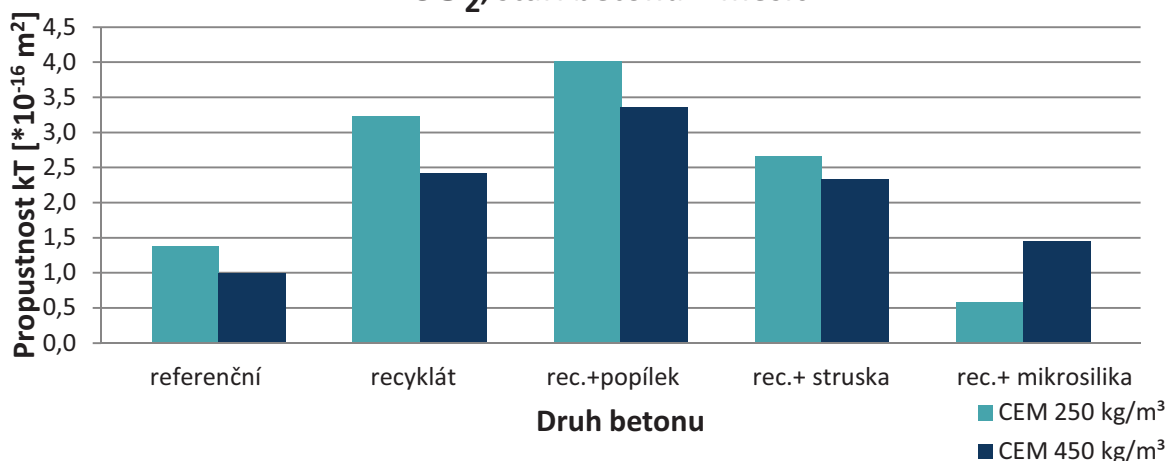
2 GRAFICKÉ PŘÍLOHY

2.1 Příloha č. 4 – Křivky zrnitosti přírodního kameniva a recyklátu



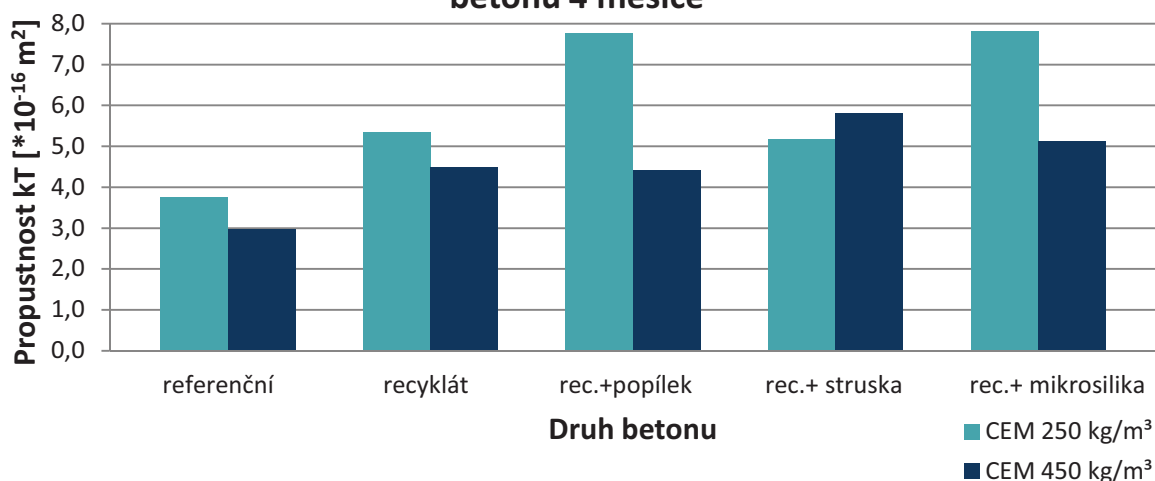
2.2 Příloha č. 5 – Propustnost betonu pro vzduch (metoda TORRENT)

Propustnost betonu pro vzduch (metoda TORRENT) po 1 měsíci zrání ve vlhkém uložení v prostředí 0,03% CO₂, před uložení do 98% CO₂, stáří betonu 1 měsíc



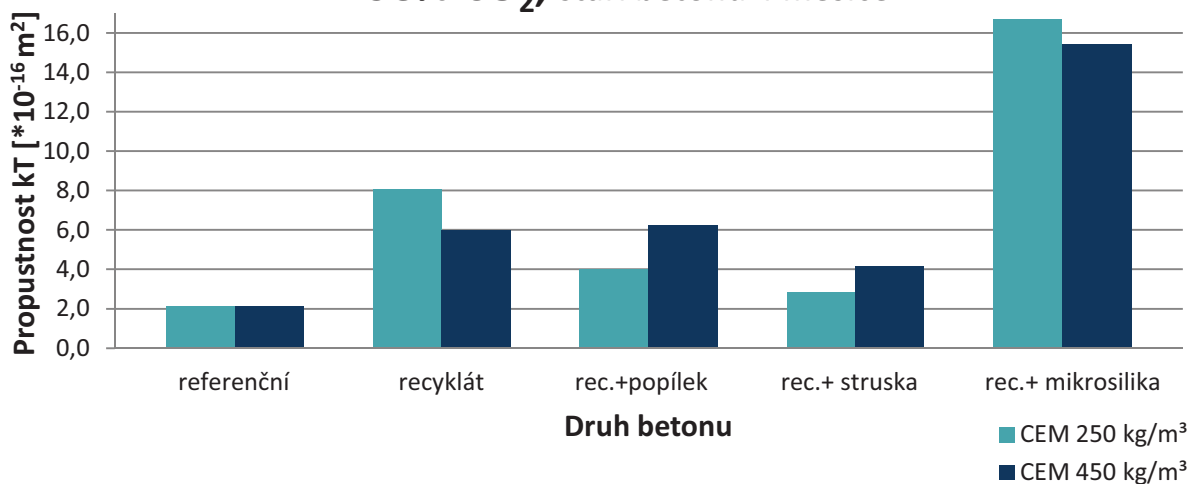
Graf 2.1 Propustnost betonu pro vzduch po 1 měsíci vlhkého uložení

Propustnost betonu pro vzduch (metoda TORRENT) po 4 měsících v 0,03% CO₂, stáří betonu 4 měsíce



Graf 2.2 Propustnost betonu pro vzduch po 4 měsících v 0,03% CO₂

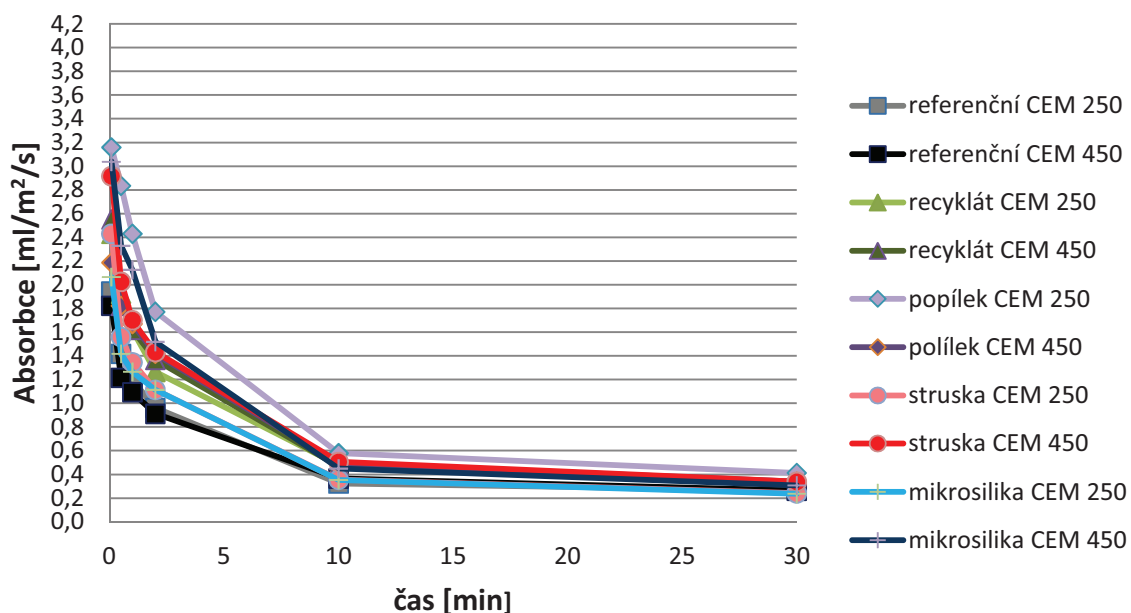
Propustnost betonu pro vzduch (metoda TORRENT) po 1 měsíci v 0,03% CO₂ + 3 měsíce v 98% CO₂, stáří betonu 4 měsíce



Graf 2.3 Propustnost betonu pro vzduch po 1 měsíci v 0,03% CO₂ + 3 měsíce v prostředí 98% CO₂

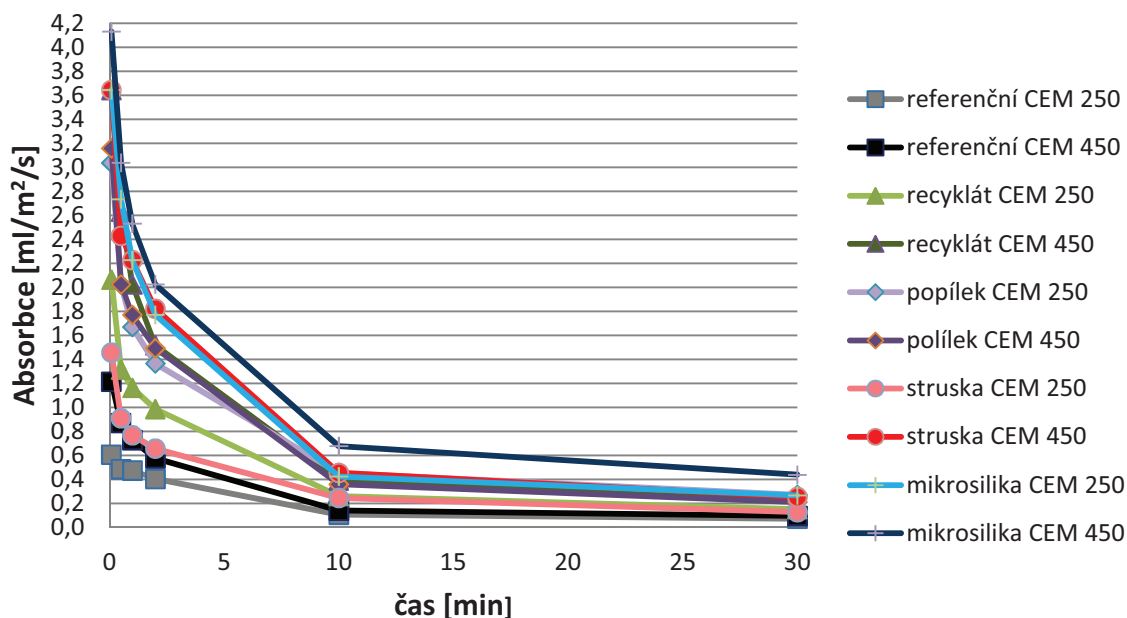
2.3 Příloha č. 6 – Propustnost betonu pro vodu (metoda ISAT)

Počáteční povrchová nasákavost (metoda ISAT) po 4 měsících v 0,03% CO₂, stáří betonu 4 měsíce



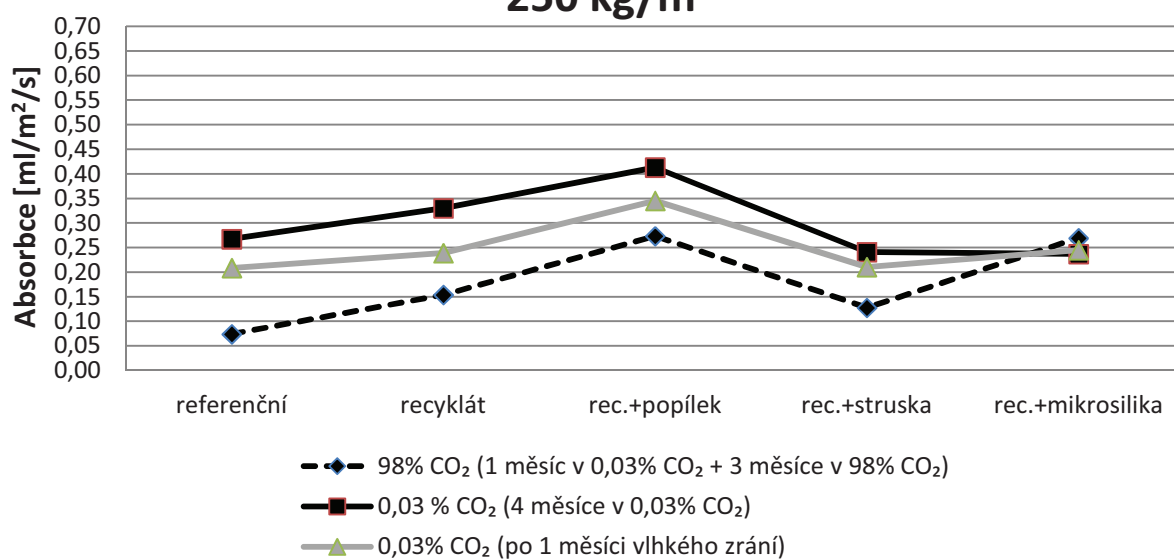
Graf 2.4 Počáteční povrchová nasákavost po 4 měsících v 0,03 % CO₂

Počáteční povrchová nasákavost (metoda ISAT) po 1 měsíci v 0,03% CO₂ + 3 měsíce v 98% CO₂, stáří betonu 4 měsíce



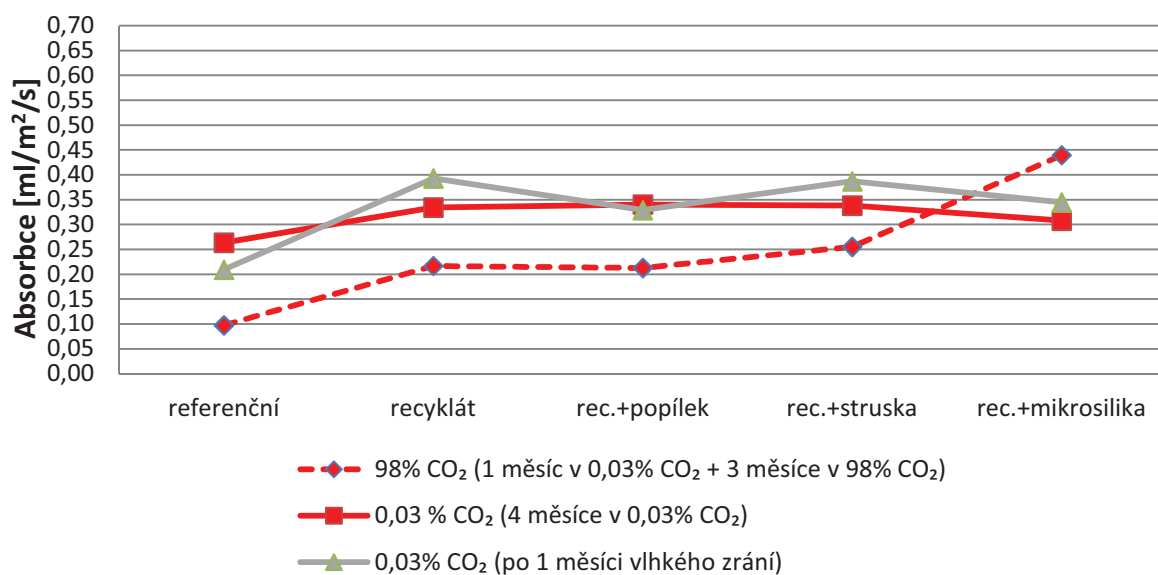
Graf 2.5 Počáteční povrchová nasákavost po 1 měsíci v 0,03% CO₂ + 3 měsíce v prostředí 98% CO₂

Vliv CO₂ na počáteční povrchovou nasákavost (metoda ISAT), po 30 min., množství cementu 250 kg/m³



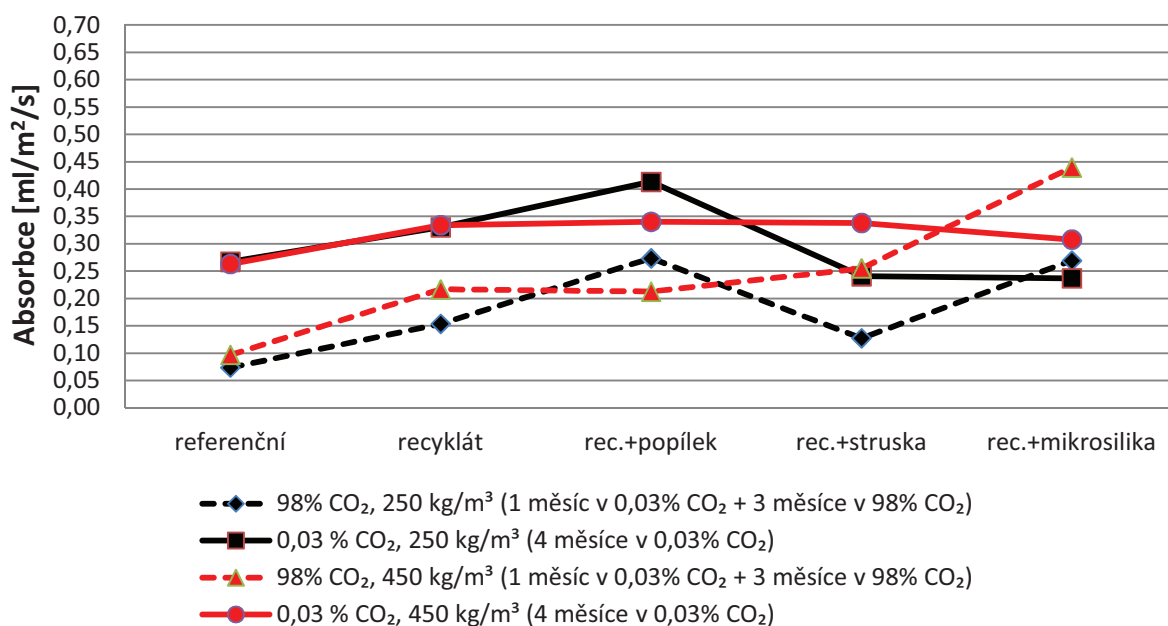
Graf 2.6 Vliv CO₂ na počáteční povrchovou nasákavost, po 30 min., CEM 250 kg/m³

Vliv CO₂ na počáteční povrchovou nasákavost (metoda ISAT), po 30 min., množství cementu 450 kg/m³



Graf 2.7 Vliv CO₂ na počáteční povrchovou nasákavost, po 30 min., CEM 450 kg/m³

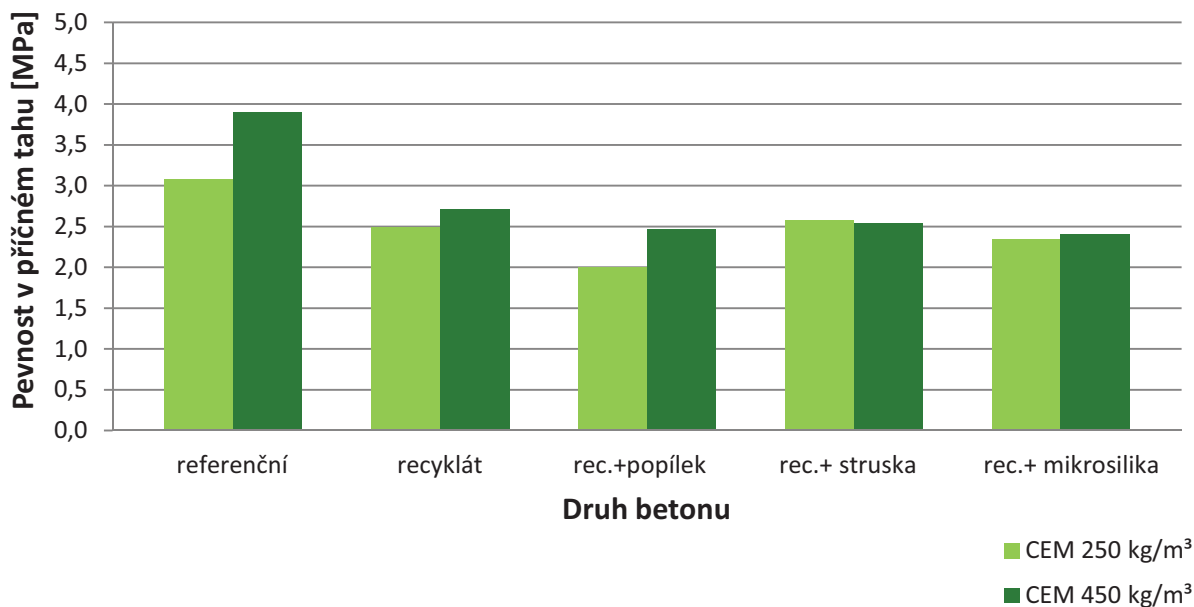
Vliv CO₂ na počáteční povrchovou nasákavost (metoda ISAT), po 30 min., množství cementu 250 a 450 kg/m³



Graf 2.8 Vliv CO₂ na počáteční povrchovou nasákavost, po 30 min., CEM 250 a 450 kg/m³

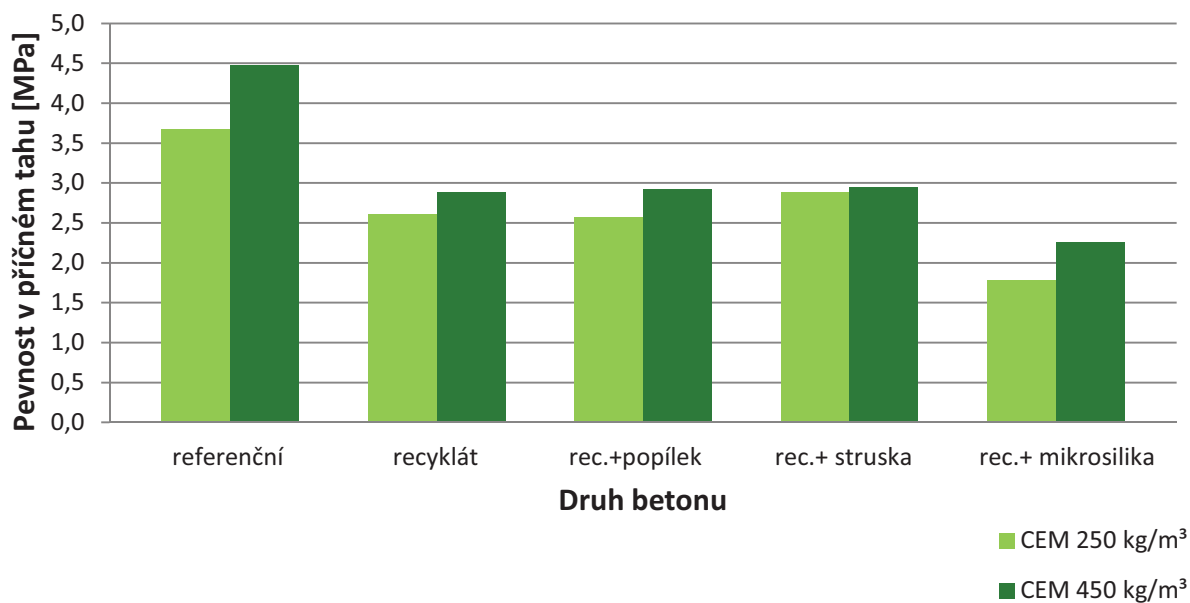
2.4 Příloha č. 7 – Pevnost betonu v příčném tahu

Pevnost v příčném tahu betonu po 4 měsících v 0,03% CO₂, stáří betonu 4 měsíce



Graf 2.9 Pevnost v příčném tahu betonu po 4 měsících v 0,03 % CO₂

Pevnost v příčném tahu betonu po 1 měsíci v 0,03% CO₂ + 3 měsíce v 98% CO₂, stáří betonu 4 měsíce



Graf 2.10 Pevnost v příčném tahu betonu po 1 měsíci v 0,03% CO₂ + 3 měsíce v prostředí 98% CO₂