

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA STAVEBNÍ
Katedra technologie staveb**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
Možnosti využití metody měření částečných
výbojů pro zjišťování porozity betonu**

Petra Járková

2016

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Rostislav Šulc, PhD.

Prohlašuji, že jsem předkládanou bakalářskou práci vypracovala samostatně, pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze

.....

Petra Járková



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Járková Jméno: Petra Osobní číslo: 395815
Zadávací katedra: K122 - Katedra technologie staveb
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Příprava, realizace a provoz staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Možnosti využití metody měření částečných výbojů pro zjišťování porozity betonu
Název bakalářské práce anglicky: The possibilities of using of partial discharge measurement for detection of concrete porosity

Pokyny pro vypracování:

- 1) Porozita v materiálech, důvody vzniku, důsledky porozity, druhy porozity. Porozita ve betonech.
- 2) Metody měření porozity se zaměřením na měření porozity v betonech.
- 3) Princip metody měření částečných výbojů, možnosti využití této metody k měření porozity v betonech.
- 4) Příprava zkušebních vzorků betonu o definované prorožitě. Určení referenčních hodnot pro betonu na základě tředičnických měření.
- 5) Určení porozity zkušebních vzorků pomocí metody částečných výbojů.
- 6) Zhodnocení možnosti využití metody částečných výbojů k měření porozity betonu.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ZÁLIŠ, Karel. Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů. Praha: Academia, 2005. ISBN 80-200-1358-X.
- [2] BAJZA, Adol; ROUSEKOVÁ, Ildikó. Technológia betónu. Jaga group, 2006.
- [3] BAŠKOVÁ, R.; REALIZÁCIA BETÓNOVÝCH KONŠTRUKCIÍ, 2008.
- [4] ŠMERDA, Zdeněk. Životnost betonových staveb, 1999.
- [5] AÏTCIN, Pierre-Claude. Vysokohodnotný beton, 2005

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Rostislav Šulc PhD.

Datum zadání bakalářské práce: 1.3.2016 Termín odevzdání bakalářské práce: 20.5.2016

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Anotace:

Tato práce se zabývá experimentální analýzou porozity betonu měřením aktivity částečných výbojů. Měření se provádělo na vzorcích cementového betonu s různou porozitou, které bylo docíleno dávkováním rozdílného množství provzdušňovací přísady. Výsledkem práce je zhodnocení možnosti využití metody měření částečných výbojů k určování porozity betonu.

Klíčová slova:

Póry, beton, porozimetrie, částečné výboje

Abstract:

This bachelor thesis deals with the experimental analysis of concrete porosity using measurement of partial discharge activity. The measurement were performed on samples of cement concrete with varying porosity, which was achieved by dosing of different quantities of air-entraining agents. The conclusion of this thesis is the evaluation of possibility of using method for concrete porosity detection by using measurement of partial discharge.

Keywords:

Pores, concrete, porosimetry, partial discharge

OBSAH

ÚVOD	8
1. TEORETICKÁ ČÁST	10
1.1. Pórovitost	10
1.2. Pórovitost betonu	11
1.2.1. Porézní struktura betonu	11
1.2.2. Vznik porézní struktury betonu	13
1.2.3. Faktory ovlivňující porozitu betonu.....	13
1.2.3.1. Kamenivo	13
1.2.3.2. Vodní součinitel	14
1.2.3.3. Cement.....	15
1.2.3.4. Přísady.....	16
1.2.3.5. Příměsi	21
1.2.3.6. Zhutňování.....	24
1.2.4. Důsledky porozity betonu	25
1.2.4.1. Pevnost betonu.....	25
1.2.4.2. Trvanlivost betonu	29
1.3. Metody měření pórovitosti betonu	31
1.3.1. Gravimetrická metoda – zkouška nasákavosti	31
1.3.2. Rtuťová porozimetrie	32
1.3.3. Plynová porozimetrie – sorpce plynu.....	35
1.3.4. Optická porozimetrie – obrazová analýza	38
1.3.5. Metoda měření částečných výbojů	40
2. PRAKTICKÁ ČÁST	47
2.1.1. Příprava vzorků	47
2.1.2. Vzorky S1 – 1. série.....	48
2.1.3. Vzorky S2 – 2. série.....	48
2.1.3. Vzorky S3 – 3. série.....	51
2.2. Zjišťování porozity betonu užitím tradičních metod	55
2.2.1. Zkouška nasákavosti – gravimetrická metoda.....	55
2.2.2. Obrazová analýza betonových vzorků S3	59
2.3. Zjišťování pórovitosti měřením aktivity částečných výbojů	62

3. VÝSLEDKY A DISKUZE.....	64
3.1. Zkouška nasákavosti – gravimetrická metoda	64
3.2. Obrazová analýza	69
3.3. Měření aktivity částečných výbojů.....	75
ZÁVĚR	81
Seznam obrázků	83
Seznam tabulek	85
Seznam grafů	86
PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY.....	87
Příloha č. 1:	91
Příloha č. 2:	92
Příloha č. 3:	95
Příloha 4:.....	96
Příloha č. 5:	98
Příloha č. 6:	101

ÚVOD

Beton je v odborné literatuře definován jako kompozitní stavební materiál tvořený složkami pojiva, plniva a záměsovou vodou s možným přidavkem přísad. Vnitřní struktura betonu má však přirozeně porézní charakter, kdy ve většině případů při běžných podmínkách jsou tyto póry vyplněny vzduchem. Problematika obsahu vzduchových pórů v betonu je přitom dobře známá a pórovitost betonu má významný dopad na vlastnosti mechanické, tepelně-technické, akustické a na celkovou trvanlivost betonových konstrukcí. Proto by vzduch vyplňující póry neměl být v definici betonu opomíjen a měl by být její součástí, jelikož je zřejmé, že jeho význam nelze zanedbat.

Problematika porézní struktury je velmi obsáhlá. Možnosti eliminace vzduchových pórů, stejně jako jejich řízené vnášení do betonu, jsou předmětem výzkumu už dlouhá léta a s postupujícím vývojem vysokohodnotných betonů jsou součástí výzkumu dodnes. Je tedy jasné, že informací o vzniku vzduchových pórů v betonu, o jejich charakteristikách, jako je tvar, velikost, distribuce v objemu betonového vzorku, atd., a o vlivu na výše zmíněné vlastnosti zatvrdlého betonu máme v současnosti (aktuálně) dostatek. Oblast, ve které jsou dodnes nedostatky, je oblast samotného měření a detekce pórů v betonu.

V dnešní době, kdy máme dokonalá technická vybavení, existuje několik různých metod měřících pórovitost betonu. Tyto metody jdou mnohdy dál, a je možné jimi získat poměrně konkrétní představu o zkoumaném porézním materiálu (distribuce velikosti pórů, celkový objem pórů, objemová hmotnost materiálu či měrný povrch vzorku). Každá z těchto metod má však svá omezení a lze detekovat pouze póry v určitém rozsahu velikosti. Navíc žádná z těchto metod není schopna s přijatelnou přesností určit pórovitost uzavřenou. V případě, že tedy zkoumaný vzorek podrobíme všem možným, technicky náročným a drahým analýzám, sloučením získaných dat jsme schopni dostat velice přesnou specifikaci otevřené (kapilární) pórovitosti. Nelze ale tvrdit, že známe pórovitost celkovou.

Cílem této práce je experimentální ověření možnosti užití metody měření aktivity částečných výbojů ke zjištění celkové pórovitosti betonu. Jedná se o základní diagnostickou metodu izolačních systémů v elektrotechnice, jež slouží k detekci

nehomogenit či jiných vad izolace zkoumaných dielektrik. Měření aktivity částečných výbojů spočívá v záznamu a vyhodnocení činnosti elektrických výbojů, vznikajících v plynové dutince uvnitř nebo na povrchu dielektrika mezi přiloženými elektrodami s dostatečným rozdílem potenciálu. Tímto je zajištěna (pokryta) i oblast pórů uzavřených, jelikož částečné výboje vznikají ve všech plynových dutinkách bez omezení uzavřeností/otevřeností těchto pórů.

1. TEORETICKÁ ČÁST

1.1. Pórovitost

Pórovitost je veličina, která vypovídá o existenci pórů ve vnitřní struktuře materiálu. Vztahuje se pouze k pevným strukturám (látkám), u sypkých materiálů hovoříme o mezerovitosti. Je definována jako poměr objemu dutin vůči celkovému objemu materiálů a patří mezi základní fyzikální vlastnosti materiálů (stavebních hmot).

$$n = \frac{V_p}{V_c} \quad (1.1)$$

Kde n je pórovitost [%], V_p je objem pórů [m^3] a V_c je celkový objem materiálů [m^3].

Tímto výpočtem však nezískáme přímou představu o porézní struktuře materiálu. V případě, že chceme zjistit objemové zastoupení pórů o dané velikosti, musíme využít dalších zkušebních metod.

Pórovitost podstatně ovlivňuje mnohé vlastnosti stavebních materiálů, zejména objemovou hmotnost, nasákavost, odolnost proti mrazu, pevnost, tepelnou vodivost a akustické vlastnosti.

Obecně lze pórovitost materiálů dělit na [1]:

- Otevřenou

Otevřená pórovitost je tvořena póry, které jsou kapilárami spojené s prostředím, ve kterém se materiál nachází, tzn. póry spojené s povrchem materiálu. Tyto póry umožňují transportní procesy uvnitř materiálu. Materiál jimi může do svého objemu přijímat vodu, plyny, vzdušnou vlhkost a s tím spojené další látky, které mohou ovlivnit trvanlivost daného materiálu a mohou vést k postupné degradaci.

Otevřená pórovitost může vzniknout např. únikem plynů během výroby (lehčené materiály), postupným odpařováním vody z materiálu (beton, omítky, keramika), záměrným provzdušněním (lehké betony) a napěněním materiálu (pěnový polystyren).

- Uzavřenou

Jedná se o póry uzavřené uvnitř struktury materiálu, nejsou mezi sebou propojené a neumožňují spojení materiálu s okolním prostředím.

- Celkovou

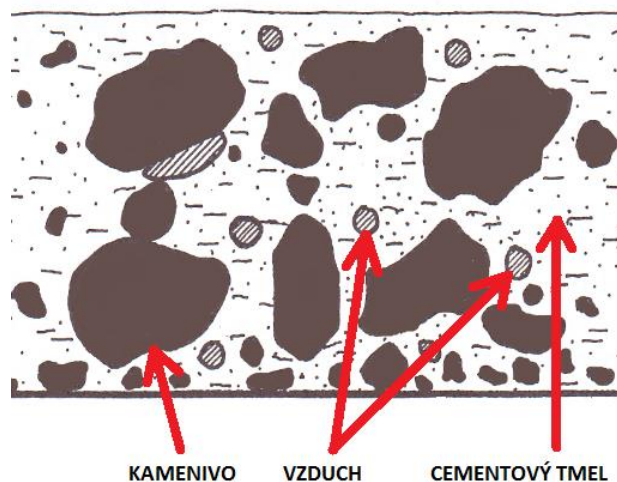
Celková pórovitost je pouze výsledným součtem pórovitosti otevřené a uzavřené a je popsána výše zmíněným výpočtem. Jde tedy o celkový objem póru ve zkoumaném objemu materiálu.

U některých materiálů (hornin, zemin) lze pórovitost dále dělit a blíže specifikovat, ale s ohledem na zaměření této práce je pro stavební hmoty dané rozdělení dostačující.

1.2. Pórovitost betonu

1.2.1. Porézní struktura betonu

Beton je nehomogenní materiál s přirozeně porézní strukturou.



Obrázek 1.1 – Schéma vnitřní struktury betonu, vlastní tvorba

Vzduchové póry uvnitř matrice lze rozdělit dle několika různých hledisek, přičemž mnohdy se jedná o časově závislé parametry (mnoho vlastností těchto pórů je závislých na čase – v čase se mění.). Základními údaji, které nám dávají představu o porézní struktuře betonu, jsou velikost a tvar pórů, jejich množství a rozložení v rámci zkoumaného vzorku nebo konstrukce.

Póry v hydratované cementové pastě lze klasifikovat takto:

Tabulka 1.1 Klasifikace pórů v zatvrdlé cementové pastě

Název	Velikost	Charakteristika	Význam ve vztahu k vlastnostem betonu
Technologické póry	15-1000 μ m	velké, přibližně kulové póry	podstatně ovlivňují pevnost a propustnost
Kapilární póry	0,05-15 μ m	širší kapiláry	ovlivňují pevnost, propustnost a smrštivost na počátku tuhnutí
	10-50 nm	střední kapiláry, kapilární dutiny	ovlivňují pevnost, propustnost a smrštění při vyšší rel. vlhkosti
Gelové póry	2,5-10 nm	úzké kapiláry	ovlivňují průběh smrštění při rel. vlhkosti nižší než 50%
	0,5-2,5 nm	póry mezi zhydratovanými útvary v gelu	ovlivňují smrštění a dotvarování
	do 0,05 nm	póry mezi vrstvy gelu	ovlivňují smrštění a dotvarování

Dle [2] platí:

- Gelové póry - submikroskopické (ultrkapilární) póry

Gelové póry jsou součástí pevné fáze hydratované cementové kaše. Vyznačují se poloměrem $< 10^{-9}$ m a v objemu cementového tmelu zabírají zhruba 20-30 %. Tato velikost pórů je natolik malá, že její vliv na pevnost a propustnost betonu nelze předpokládat. Rozměry těchto pórů jsou porovnatelné s rozměry molekul, neovlivňují průsak vody. Voda se nemůže těmito póry pohybovat, ale mohou se zde vytvářet řetězce vody, které přispívají ke smršťování z vysušování a dotvarování betonu.

- Kapilární póry

Jedná se o prostory nevyplněné pevnými látkami hydratovaného cementového tmelu v rozměrové škále 10^{-9} až 10^{-3} m. Jejich objem a velikost závisí na vzdálenosti nehydratovaných cementových částic v čerstvém betonu a na stupni hydratace. Vzhledem k velkému číselnému rozpětí velikosti těchto pórů jsou pro bližší specifikaci dále rozděleny na:

- Kapilární mikropóry: $2 \cdot 10^{-9}$ - $2 \cdot 10^{-6}$ m

- Kapilární přechodové póry (mezopóry): $2 \cdot 10^{-6}$ - $60 \cdot 10^{-6}$ m
- Kapilární makropóry: $60 \cdot 10^{-6}$ - $2 \cdot 10^{-3}$ m

Voda a plyny se zde chovají jako v soustavě kapilár, pohyb vody je vyvolán povrchovým napětím (kapilárními silami). Tyto póry mají velký význam z hlediska transportních procesů a mohou tvořit až 40% objemu cementového tmelu.

- Technologické póry - makropóry a vzdušné póry

Vznikají při betonáži nebo záměrně při použití provzdušňovacích přísad, obvykle mají sférický tvar. Jedná se o pohlcený vzduch a o tzv. zhutňovací póry. Dutiny (póry) jsou příliš rozsáhlé (poloměr $> 10^{-3}$ m), neuplatňují se kapilární síly a převládá gravitace. Tyto póry, pokud netvoří uzavřenou pórovitost, ovlivňují propustnost betonu.

1.2.2. Vznik porézní struktury betonu

Porézní strukturu betonu lze jinými slovy nazvat chybějící hmotou a špatným uspořádáním částic. Vznik pórů v betonové struktuře má počátek v podstatě už ve fázi výběru jednotlivých složek betonové směsi při návrhu receptury. V případě, že se nám podaří betonovou směs vzhledem k výsledné porozitě optimálně navrhnout, dalším faktorem, který porézní strukturu může zcela zásadně změnit, je ošetřování betonu a jeho zhutňování.

1.2.3. Faktory ovlivňující porozitu betonu

1.2.3.1. Kamenivo

Problematika kameniva z hlediska porozity betonu je složitá. Kamenivo do betonu přidáváme jako tzv. plnivo. Jeho smyslem je zabrat co největší podíl objemu betonu tak, aby mezery mezi zrny kameniva byly co nejmenší. Užití drobného kameniva (velikost zrn 0 - 4 mm) není rizikové. Velké póry se ve zvodnělém prostředí neudrží a mizí samy (vzduch se dostává k povrchu a je vytlačen), pouze malé póry zůstávají uvnitř. Nebezpečí představují velká zrna kameniva, obzvláště ta s nepravidelným, různě zakřiveným tvarem. Velká zrna kameniva zabraňují rovnoměrnému rozložení vody při zhutňování, tím pádem v tranzitní zóně vznikají velké vzduchové póry a velké krystaly hydratačních produktů. Zároveň při zhutňování, když vzduch začne stoupat k povrchu, může dojít k jeho zachycení právě o velká,

nepravidelná zrna kameniva a zůstane zde zadrženo. Proto je obvyklé navrhovat recepturu betonové směsi se směsí kameniva minimálně ze tří na sebe navazujících frakcí (písek, jemný štěrk a hrubý štěrk) v různém poměru. To zajišťuje dobrou zpracovatelnost a s tím předpoklad, že při hutnění dojde k vytěsnění vzduchu zachyceného uvnitř čerstvého betonu a zaplnění mezer pevnými složkami.

V neposlední řadě je nutné u kameniva podotknout, že se jedná o materiál, který je sám o sobě porézni. Tato porozita kameniva by měla být zohledněna při návrhu množství záměsové vody, protože jedná-li se o kamenivo s vyšší pórovitostí, je nutné zvýšit tuto dávku vody právě o množství potřebné k zaplnění těchto pórů.

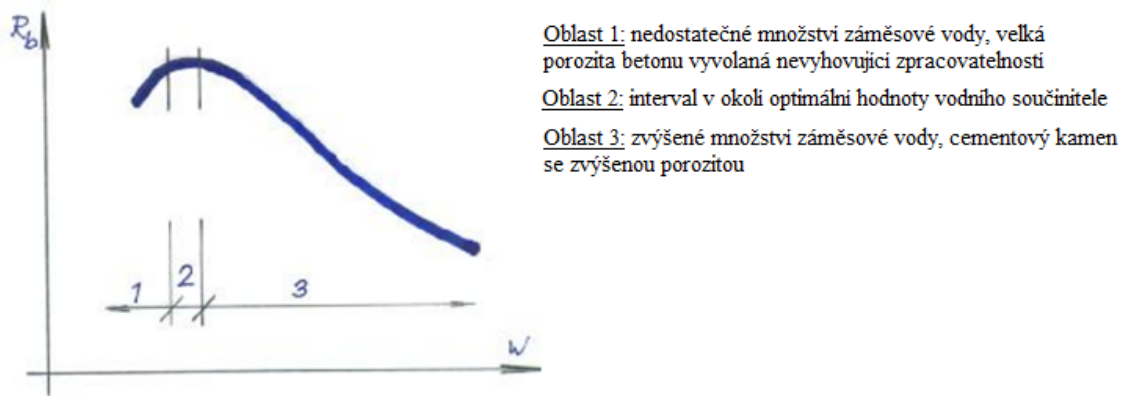
1.2.3.2. Vodní součinitel

Vodní součinitel je parametr, který udává poměr hmotnosti obsahu vody k hmotnosti cementu v čerstvém betonu. Platí:

$$w = \frac{v}{c} \quad (1.2)$$

Kde w je vodní součinitel [-], v je hmotnost účinné vody [kg/m^3 betonu] a c je hmotnost cementu [kg/m^3 betonu].

Že vodní součinitel je hlavním faktorem, který ovlivňuje pórovitost pojivé složky betonu, dokázal již v roce 1892 Féret. Féretův vztah je blíže popsán v kapitole 1.2.4.1. Obecně platí, že s rostoucí hodnotou vodního součinitele vzrůstá objem větších pórů v hydratujícím cementovém tmelu. Je-li vodní součinitel v/c větší jak 0,42, významně narůstá objem kapilárních pórů. Redukcí vodního součinitele docílíme, že částice cementu jsou blíže k sobě, čímž dochází ke snížení kapilární pórovitosti, jelikož vazby mezi zrny cementu se vyvinou rychleji. S tím pak souvisí zlepšení mechanických vlastností betonu, zejména zvýšení pevnosti v tlaku a modulu pružnosti, dále vyšší odolnost vůči prosakující vodě (nepropustnost) a trvanlivost. Snižování vodního součinitele s sebou ale zároveň nese horší zpracovatelnost. Při velmi nízkých hodnotách vodního součinitele se beton stává téměř nezhutitelným, což má za následek výskyt větších mezer ve struktuře betonu a tedy nárůst pórovitosti. To potom vede zpět ke snížení pevnosti betonu, čemuž přesně odpovídá další tvrzení Féreta, dle kterého mezi velikostí vodního součinitele a pevností betonu v tlaku platí nepřímá úměra.



Obrázek 1.2 – Závislost pevnosti betonu na hodnotě vodního součinitele, převzato z [3]

Problém se zpracovatelností betonu při malém objemu záměsové vody vyřešil vývoj plastifikačních přísad, které jsou dnes nedílnou součástí receptury betonové směsi. O této problematice bude více pojednáno samostatně v části přísady a příměsi.

Velikost vodního součinitele je řešena normou, např. aktuální norma ČSN P 73 2404 udává maximální velikost vodního součinitele ve vztahu k trvanlivosti betonu s ohledem na stupeň vlivu prostředí, přičemž běžně se tato hodnota pohybuje v rozmezí hodnot 0,3 – 0,6. Obecně platí, že s rostoucí velikostí vodního součinitele se zvětšuje velikost kapilárních dutin a roste jejich počet. [4] Čím nižší tato hodnota je, tím lze dosáhnout vyšších pevností a větší odolnosti vůči agresivitě okolního prostředí (lepší trvanlivost). Názory na množství vody, které jde považovat za úplné minimum k řádnému průběhu hydratace, se v různé literatuře liší a dají se dohledat zdroje, jež uvádějí jako minimální hodnotu vodního součinitele 0,25. Pravdou je, že v současnosti se čím dál více setkáváme s betony vysokohodnotnými, kdy zejména u betonů vysokopevnostních tyto hodnoty nejsou v žádném případě nemyslitelné, ba naopak se jako optimální považuje vodní součinitel v rozmezí 0,25 až 0,4 a dokonce hodnota 0,45 už nesmí být překročena. [5]

Při hodnotách nad 0,4 totiž dochází k odpařování přebytečné vody a vzniku drobných pórů v zatvrdlém cementovém tmelu, vedoucích ke snížení tlakové pevnosti.

1.2.3.3. Cement

Pórovitost ztvrdlé cementové kaše je kromě velikosti vodního součinitele ovlivňována stupněm hydratace cementu, která je ovšem do jisté míry na velikosti vodního součinitele závislá. Rychlost hydratace cementu narůstá s jeho jemností mletí.

Čím jsou částice cementu menší, tím větší je povrch cementu, vystavený působení vody, z čehož vyplývá větší rychlost hydratace, zejména v počátečním stádiu. [6] Vliv jemnosti mletí cementu se využívá při výrobě rychletuhnoucích a rychletvrdnoucích portlandských cementů, proto rychletvrdnoucí portlandský cement hydratuje rychleji než obyčejný portlandský nebo směsný portlandský cement, a proto bude vykazovat v počáteční fázi hydratace při nižším vodním součiniteli nižší pórovitost (s tím vyšší pevnost).

1.2.3.4. Přísady

Smyslem přísad do betonu je zlepšování nebo změna některé z vlastností čerstvého a zatvrdlého betonu. Použití přísad umožňuje docílit mnohdy takových vlastností betonu (velmi vysoká pevnost, vodonepropustnost, pohledovost), které jsou bez nich nedosažitelné. Dá se říci, že některé z přísad se staly standardem a většina betonových směsí, vzhledem k požadavkům dnešní doby, se bez nich neobejde. Přísady mohou být organické nebo anorganické, v kapalném nebo pevném stavu a do betonu se přidávají v malém množství před mícháním, nebo v jeho průběhu, případně při dodatečném míchání. Dávkují se zpravidla do záměsové vody. Přísad do betonu v současnosti existuje nepřehledné množství, kdy každá přísada ovlivňuje jiný parametr čerstvého či zatvrdlého betonu a užívání více přísad najednou nemusí být v interakci. Pro účely této práce bude následující text zaměřen pouze na přísady ovlivňující množství, velikost a uspořádání póru ve struktuře betonu.

- **Plastifikační přísady**

Plastifikační přísady lze jinými slovy nazvat jako změkčovadla či ztekucovadla. Jsou to látky, jejichž užití vede ke snížení konzistence čerstvého betonu, čímž dochází ke zlepšení zpracovatelnosti. Pro zajímavost plastifikační přísady znali již v dávných dobách Římané, kteří používali živočišný tuk, mléko a krev ke zlepšení zpracovatelnosti tehdejších maltových směsí. V dnešní době je samozřejmě stavební chemie daleko za možnostmi starých Římanů a plastifikačních přísad existuje celá řada. Nejčastěji se jedná o chemikálie na bázi lignosulfonanů, naftalenů, melaminu, polykarboxylátu, ale je i mnoho dalších.

Přidání plastifikační přísady do záměsové vody zajišťuje vyšší stupeň rozptýlení cementových zrn v hydratujícím pojivu a zabraňuje shlukování (flokulaci) opačně nabitých, pevných částic, které k sobě jinak vlivem elektrostatické přitažlivosti váží i

značné množství vody, jež se pak nemůže podílet na snížení viskozity cementové kaše. Následkem toho dochází k lepšímu vyplnění pórů a dutin v makrostruktuře betonu a tedy i ke snížení porozity a eliminaci mikrotrhlin.

Protože plastifikátory zajišťují elektrostatickou odpudivost cementových zrn, čímž zabraňují výskytu chemicky nevázané vody, mají tyto přísady v betonu tzv. vodoredukující funkci, takže umožňují snižovat množství záměsové vody, aniž by došlo ke změně konzistence. Redukce vodního součinitele je, jak již bylo popsáno, velmi žádoucí. Snižování velikosti vodního součinitele za použití plastifikačních přísad vede ke snižování pórovitosti betonu, a tím k nárůstu pevnosti v tlaku.

Při zachování velikosti vodního součinitele tyto přísady zlepšují zpracovatelnost, takže výrazně usnadňují proces dopravy a ukládání betonu do bednění, beton může být čerpán čerpadlem, také se omezuje použití intenzivní vibrace při zhutňování betonu. Díky těmto svým účinkům jsou v současnosti plastifikační přísady nejvíce používanou skupinou přísad vůbec a nemalou měrou se podílí na dnešní možnosti vyrábět betony s přidanou hodnotou (vysokohodnotné betony).

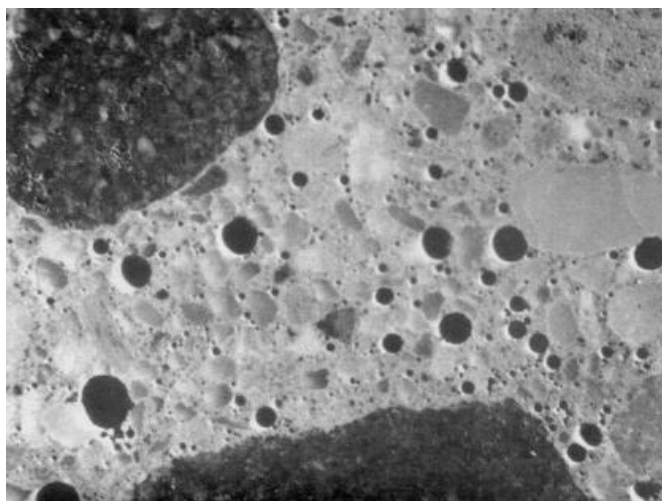
Plastifikátory se do betonu přidávají v množství v rozmezí od 0,2 do 5 % hmotnosti cementu [7] a podléhají požadavkům několika norem, zejména ČSN EN 934-2. Tato norma např. předepisuje pro obyčejné plastifikační přísady v betonu s konstantní konzistencí snížení dávky záměsové vody ve zkoušeném betonu minimálně o 5 % oproti kontrolnímu betonu. Současně obsah vzduchu ve zkoušeném čerstvém betonu může v porovnání s kontrolním betonem vzrůst maximálně o 2 % a pevnost v tlaku zkoušeného betonu po 7 a 28 dnech tvrdnutí musí vykazovat minimálně 110 % pevnosti kontrolního betonu.

Speciální skupinou plastifikačních přísad jsou superplastifikátory. Ty dovolují snížit dávku záměsové vody citelně více, než obyčejné plastifikátory, což se projeví výraznějším ovlivněním vlastností čerstvého i zatvrdlého betonu. Dle normy ČSN EN 934-2 musí superplastifikátory v betonu s totožnou konzistencí mimo jiné umožnit snížení dávky záměsové vody ve zkoušeném betonu minimálně o 12 % v porovnání s kontrolním betonem. Nárůst obsahu vzduchu v porovnání s kontrolním betonem maximálně o 2 % zůstává zachován, ale pevnost v tlaku zkoušeného betonu po 1 dni musí být minimálně 140 % a po 28 dnech 115 % pevnosti kontrolního betonu.

- Pro vzdušňovací přísady

Většina betonových stavebních konstrukcí je vystavována přirozeným klimatickým podmínkám a povětrnosti a v zimních měsících tak musí odolávat střídavě mrazu a oteplování. Zároveň s vlhkostí okolního vzduchu, vlivem srážek nebo jiných faktorů se do otevřených kapilárních a technologických pórů této konstrukce dostává voda, která se změnou teploty vykazuje objemovou roztažností (objemové změny). V případě, že tedy dochází ke střídavému promrzání konstrukce a následnému oteplení, změna objemu vody v konstrukci vyvolává vnitřní síly a pnutí, které vedou k poškozování a postupné degradaci této konstrukce. Zároveň s vodou se z okolního prostředí do struktury betonu dostávají agresivní látky, jež mohou zapříčinit korozi výztuže či jiné defekty (vady, poruchy), a tím je pak snížena i trvanlivost konstrukce.

Mrazuvzdornost betonu závisí zejména na charakteru jeho pórového systému (porézní struktury). Jak již bylo výše popsáno, mrazuvzdornost betonu ovlivňuje množství a velikost otevřených kapilárních a technologických pórů, které jsou z tohoto hlediska nežádoucí. Smyslem užití provzdušňovacích přísad je vytvořit strukturu cementové kaše s obrovským množstvím malých (10 až 100 μm), rovnoměrně rozptýlených bublinek se sférickým tvarem, umístěných relativně blízko sebe. Charakteristickým znakem těchto pórů je, že nemají tendenci navzájem se shlukovat nebo spojovat v póry větší velikosti, takže zůstávají uzavřené, bez vzájemného propojení. Zároveň mají minimální tendenci se při procesu hutnění přesouvat a stoupat k povrchu. Tyto vzduchové póry, jejichž objem obvykle nemá překročit hodnotu deseti procent objemových, přerušují kapiláry ve struktuře betonu a významně tak snižují jeho nasákavost.[3] Tím je zamezeno průsaku vody dovnitř konstrukce a značné zvýšení mrazuvzdornosti betonu (lepší odolávání střídavému zmrazování a tání), se kterou úzce souvisí i jeho trvanlivost.



Obrázek 1.3 – Mikroskopický snímek provzdušněného betonu, převzato z [3]

Dalším benefitem je, že malé bublinky se ve směsi čerstvého betonu chovají jako elastické plnivo s nízkým součinitelem tření, což snižuje interakci mezi pevnými částicemi a přispívá ke zlepšení zpracovatelnosti. Při zvýšení obsahu vzduchových uzavřených bublin o 1 % lze při stejné konzistenci snížit dávku záměsové vody o cca 5 litrů v jednom metru krychlovém.[8] Provzdušňovadla mají tedy i plastifikační účinky, nelze je ale považovat zcela za náhradu plastifikačních přísad. Užití plastifikačních a provzdušňovacích přísad současně se nevylučuje.

Používání provzdušňovacích přísad má bohužel i svá úskalí, a to zejména tehdy, potřebujeme-li docílit vysokých pevností betonu v tlaku. Problematika vlivu pórovitosti betonu na jeho tlakovou pevnost je ale značně rozsáhlá a bude řešena v samostatné kapitole.

Pro provzdušnění betonu se používají tyto látky:

- Soli dřevných pryskyřic (aniontové)
- Syntetické detergenty (neiontové, aniontové)
- Soli sulfonovaných ligninů (aniontové)
- Soli sulfonovaných ligninů (aniontové)
- Soli proteinových látek (aniontové, kationtové)
- Mastné a pryskyřičné kyseliny a jejich soli (aniontové)
- Organické soli sulfonovaných uhlovodíků (aniontové)

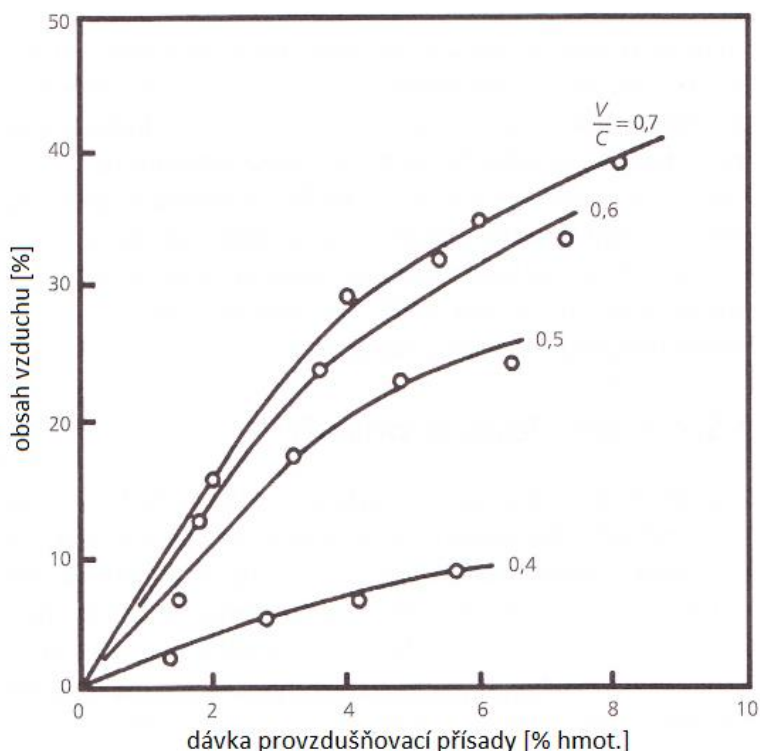
Kvalita provzdušnění se hodnotí pomocí tzv. součinitele prostorového rozložení vzduchových pórů (spacing factor), který je definován průměrnou maximální vzdáleností jakéhokoliv bodu v cementovém kameni od okraje póru v mm. [6] Požadavky na hodnoty tohoto součinitele jsou dány normou ČSN EN 206, kdy součinitel prostorového rozložení pórů $L \leq 0,2$ mm a zároveň obsah mikropórů do 300 μm $A_{300} \geq 1,5$ %. Výpočet součinitele prostorového rozložení pórů je uveden v normě ČSN EN 480-11 a závisí na poměru cementového tmelu vůči celkovému obsahu vzduchových pórů.

Výsledný obsah vzduchu v provzdušněném betonu závisí na více faktorech, primárně však na dávce provzdušňovací přísady. Dávkování vždy stanoví výrobce přísady, obvykle se ale dávka pohybuje v rozmezí 0,005 – 0,05 % z hmotnosti cementu a přidává se, stejně jako jiné přísady, do záměsové vody. Zvyšováním dávky přísady dochází ke zvyšování obsahu vzduchu v betonu, velikost bublinek se ale zmenšuje a součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů klesá.

Mezi další faktory ovlivňující účinnost provzdušňovací přísady a výsledný stupeň provzdušnění patří:

- Přítomnost většího množství jemných částic - např. větší množství drobného kameniva, jemné minerální příměsi (popílek), pigmenty nebo jemně mletý cement zapříčiňují snižování obsahu vzduchu. V takovém případě je nutné uvažovat s vyšší dávkou přísady.
- Doba míchání - při velmi krátkém míchání není přísada dostatečně dispergovaná, při míchání dlouhém je vzduch z čerstvého betonu vypuzován.
- Konzistence čerstvého betonu - tekutější beton udrží víc vzduchu oproti betonu s konzistencí (S1 – S3).
- Zhutňování – obsah vzduchu s prodlužováním času vibrace výrazně klesá. Po 3 minutách ve zhutněném betonu zůstane přibližně jen polovina z původního množství vzduchu, po 9 minutách asi jen pětina.
- Teplota – s rostoucí teplotou provzdušnění čerstvého betonu klesá.
- Vodní součinitel – se zvyšujícím se vodním součinitelem vzrůstá velikost pórů (při $w = 0,35$ za současného použití superplastifikační přísady je průměr pórů 10 – 100 μm , při $w = 0,75$ se póry zvětšují až na průměr 50–500 μm [9])

- Velikost maximálního zrna kameniva – s rostoucí velikostí maximálního zrna kameniva klesá optimální stupeň provzdušnění, jelikož pro dosažení požadované konzistence stačí méně cementového tmelu.



Obrázek 1.4 – Závislost provzdušnění cementové kaše na množství provzdušňovací přísady, převzato z [6]

Kvalita provzdušnění může být ovlivněna i některými vlastnostmi složek betonu. Např. přítomnost většího množství jemných částic, jako je drobné kamenivo, jemné minerální příměsi (popílek), pigmenty nebo jemně mletý cement, zapříčiňují snižování obsahu vzduchu. V takovém případě je nutné uvažovat s vyšší dávkou přísady. Obsah vzduchu v čerstvém betonu ovlivňuje ale i doba míchání. Při velmi krátkém míchání není přísada dostatečně dispergovaná, při míchání dlouhém je vzduch z čerstvého betonu vypuzován. V neposlední řadě vliv na stupeň provzdušnění má konzistence čerstvého betonu, kdy tekutější beton udrží víc vzduchu oproti betonu konzistencí S1 – S3.

1.2.3.5. Příměsi

Příměsi jsou práškové látky, které se stejně jako přísady do betonu přidávají za účelem zlepšit nebo změnit některou z jeho vlastností, případně docílit vlastností speciálních. Jedná se zejména o vlastnosti technologické, jako je lepší zpracovatelnost

a čerpatelnost čerstvého betonu, lepší proces tuhnutí a tvrdnutí, zlepšují také vlastnosti technické u betonů zatvrdlých. Kromě toho jsou tu navíc ale i důvody ekonomické a ekologické. Některé příměsi se podílejí na procesu hydratace, takže umožňují snížit potřebné množství cementu a tím tedy i náklady. Velkým rozdílem oproti přísadám je množství, ve kterém se do betonu dávkuje. Příměsi je totiž, na rozdíl od přísad, které se přidávají do záměsové vody v nepatrném množství, třeba dávkovat v rozpětí 2 – 40 % z hmotnosti cementu a přidávají se do kameniva.

Příměsi do betonu lze rozdělit na dvě skupiny.

- Příměsi inertní

Jedná se o látky, jež se nepodílejí na procesu hydratace, hydrataci neovlivňují, ale jejich nejjemnější zrna se mohou aktivně podílet na tvorbě pevného kamene. Funkcí těchto příměsí je vyplnění mezer mezi zrny cementu, čímž dochází ke zvýšení hutnosti betonu. Z toho je zřejmé, že inertní příměsi póry zaplňují a používají se tedy zejména do betonů s nedostatkem jemných částic. Mezi inertní příměsi patří např. kamenná moučka nebo barevné pigmenty.

- Příměsi latentně hydraulické a pucolány

Tyto příměsi plní funkci tzv. filleru (mikroplniva), zároveň se ale aktivně podílejí na procesu hydratace. Z hlediska problematiky pórovitosti betonu jsou poměrně významné, jelikož v určité míře mění mikrostrukturu betonu. Přidání dodatkových cementových materiálů, jako je létavý popílek, mletá vysokopecní struska, mikrosilika (křemičitanový úlet) nebo metakaolin, vede k vytváření sekundární C-S-H a tím zlepšují pórovitou strukturu betonu. Zejména mikrosilika a metakaolin přispívají ke zjemnění pórů v betonu.

- Vysokoteplotní úletový popílek

Elektrárenský úletový popílek vzniká při spalování uhlí v tepelných elektrárnách. Je jedním z tuhých zbytků spalování a má podobu jemných částic o velikosti $< 150 \mu\text{m}$. [10] Užití vysokoteplotních popílků v betonu vede ke snižování vývoje hydratačního tepla a pomalejšímu nárůstu pevnosti, zároveň zvyšují odolnost betonu v určitých typech agresivního prostředí (síranová agresivita). Jelikož se pucolánové vlastnosti popílku projevují výrazněji až po 28 dnech zrání betonu, vyplňují vznikající hydratační produkty pucolánových reakcí póry vzniklé při hydrataci do 28 dnů, čímž

snižují porozitu betonu a zároveň mění větší póry na menší. Nezareagovaný popílek v cementové matrici má efekt mikroplniva, díky tomu zlepšuje hutnost cementové matrice. [11]

- Křemičitý úlet, mikrosilika

Jedná se o ultra jemný materiál s obsahem 80-98 % amorfního SiO_2 ve tvaru kulatých zrn s mimořádně velkým měrným povrchem 15 000 až 25 000 m^2/kg . Mikrosilika je z hlediska porozity betonu jednou z nejvýznamnějších přísad. [ebeton.cz] Způsobuje modifikaci mikrostruktury betonu a jejím hlavním efektem je snížení porozity tranzitní zóny mezi cementovým tmelem a kamenivem, což je nejslabší místo ve většině betonů. Vzhledem ke své jemnosti (velikost zrn 100 x menší než zrna cementu) může vyplňovat mezery mezi zrny cementu, zabírá mezery mezi kamenivem, zlepšuje obalení částic plniva a pevnost tranzitních zón na povrchu kameniva. Přispívá k vytvoření hutnější struktury s menším průměrem vzduchových pórů a menším množstvím pórové vody v struktuře zatvrdělého betonu, zlepšuje odolnost proti vlivům chemického agresivního prostředí a trvanlivost betonu. Zlepšuje se také odolnost proti smršťování a vzniku mikrotrhlin. [11] Mikrosilika také zvyšuje počáteční a konečné pevnosti. Použitím křemičitého úletu se podařilo vyrobit betony s pevností přes 130 MPa.

Pórovitost cementového kamene je ovlivněna použitým vodním součinitelem, stupněm a hloubkou karbonatace a rozsahem trhlin na rozhraní cementový kámen - povrch kameniva.

- Metakaolin

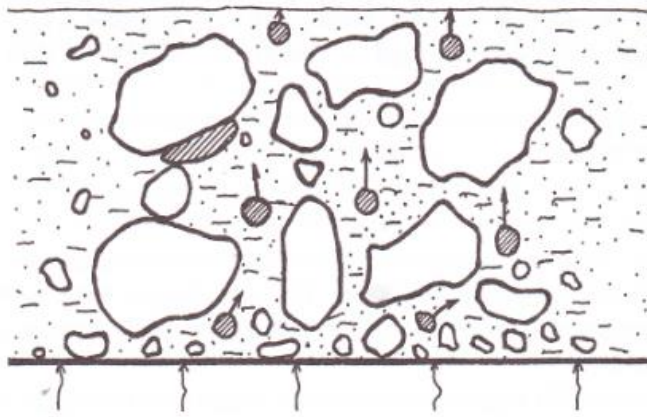
Další významnou přísadou, mající vliv na pórovou strukturu betonu, je metakaolin - produkt typu pucolánu, vyrobený výpalem kaolinů, kaolinitických jílů a jiných vhodných surovin v teplotním rozmezí cca 600 až 900 °C. Metakaolin se vyznačuje velmi dobrou pucolánovou aktivitou, která je srovnatelná s aktivitou křemičitého úletu. S Ca(OH)_2 vytváří nové hydratační zplodiny, modifikuje pórovou strukturu a způsobuje všeobecné zlepšení parametrů čerstvého i ztvrdělého betonu, jako zpracovatelnost, odolnost, vodonepropustnost, snížení rizika alkalické reakce kameniva aj.. V současnosti je metakaolin využíván zejména v oblasti výroby vysokohodnotných betonů. [11],[12]

1.2.3.6. Zhutňování

Podstatou výroby kvalitního betonu s co nejvyšší tlakovou pevností je dosažení co nejhutnější skladby, to znamená co nejvíce zaplnit mezery mezi zrny kameniva zatvrdlým cementem a snížit tak množství vzduchových pórů na minimum. Do značné míry je možné hutnost betonu zajistit optimálním návrhem betonové směsi, ale dobře navržený beton ještě není zárukou kvality, protože během procesu míchání jeho složek se do hmoty současně vnáší okolní vzduch, jenž výslednou porozitu zatvrdlého betonu zvyšuje. Čerstvý beton ukládaný do bednění tedy obsahuje velké množství vzduchových mezer a pórů, a ty je třeba vypudit.

Zhutňování betonu je proces, který vynucuje relativní pohyb všech složek čerstvého betonu tak, aby se co nejtěsněji seskupily a vytvořily kompaktní hmotu bez vzduchových mezer. Způsobů zhutňování betonu existuje mnoho, avšak v současnosti je v praxi nejpoužívanější vibrování. Jedná se o velmi účinný způsob zhutnění čerstvého betonu jak u monolitických konstrukcí, tak při průmyslové výrobě betonových prefabrikátů. [12] Samotná vibrace je definována jako působení rychle za sebou následujících rázů na jednotlivé částice betonové směsi. Tyto rázy vyvolávají kmitání jednotlivých částic betonové směsi, čímž dochází ke snížení vnitřního tření a uvolnění struktury směsi. [13] Rozkmitaný čerstvý beton nabývá vlastností těžké kapaliny [12]. Takový stav umožňuje přeuspořádání částic směsi v objemu, při kterém se z betonu uvolňuje vzduch, vzduchové dutiny jsou vyplněny (zaplněny) pevnými částicemi, vytváří se kompaktní hmota a objem čerstvého betonu se zmenšuje. Jako zařízení pro zhutňování betonové směsi jsou běžně užívány (slouží) ponorné nebo příložené (povrchové) vibrátory.

Kromě vibrace lze jmenovat a popsat mnoho dalších způsobů zhutňování betonu. Více o této problematice např. v [12].



Obrázek 1.5 – Schéma vypuzování vzduchu z betonu zhutňováním, převzato z [6]

1.2.4. Důsledky porozity betonu

1.2.4.1. Pevnost betonu

Pevnost v tlaku je nejcennější vlastností betonu, kvůli které je ve stavebnictví v tak velké míře využíván. V pevných látkách obecně existuje (nepřímá) závislost mezi pórovitostí materiálu a jeho pevností. U vícesložkových nehomogenních materiálů, jako je beton, je výsledná pórovitost podmíněna porézností jednotlivých dílčích složek. Vliv jednotlivých složek betonu na jeho pórovitost byl již popsán.

Nositelem pevnosti betonu je kamenivo a cementový kámen včetně tranzitní zóny mezi nimi (rozhraní mezi zrny kameniva a ztvrdlou cementovou pastou). Když vezmeme v úvahu, že pevnostní parametry samotného cementového kamene se pohybují v rozsahu od cca. 80 – 250 MPa (při 100% hydrataci cementu a nízké pórovitosti), použitého kameniva v rozsahu od cca. 100 – 150 MPa (pro kvalitní dostupné kamenivo) a běžně dosahujeme pevností betonu 30 – 50 MPa, je zřejmé, že tyto značné rezervy jsou dány právě nedostatky ve vnitřní struktuře betonu vzniklými v průběhu výroby a hydratace. [14] Je-li do betonu použito přírodní kamenivo, které je obvykle pevné a hutné s obsahem pórů většinou 1 – 5 %, výslednou pevnost betonu pak ovlivňuje zejména porézní struktura cementové matrice včetně přechodové (tranzitní) zóny a v nich vyskytující se mikromechanické jevy (tvorba mikrotrhlin). Póry a mikrotrhliny v cementovém kameni a přechodové zóně vznikají přirozeně v průběhu hydratace. Vliv na vznik těchto pórů má ale i ošetřování betonu, jeho zhutnění a nemalou roli hrají i vnější podmínky na beton působící (fyzikální

a chemické zatížení), jako je např. samotná atmosféra, agresivní prostředí zemin, podzemních či slaných vod, klimatické jevy a jiné.

Souvislost porézni struktury betonu s jeho pevností v tlaku popsal již v roce 1892 Féret, který definoval, že pevnost betonu v tlaku je nepřímo úměrná obsahu pórů v makrostruktuře.

Dle Féreta platí:

$$f_c = k \cdot H_t^2 = k \cdot \left(\frac{c}{c + w + a} \right)^2 \quad (1.3)$$

, kde f_c je tlaková pevnost zhydratované cementové pasty, k je konstanta závisející na druhu použitého cementu, c je objem cementu, w je objem vody a a je objem vzduchu. Funkce H_t tedy vyjadřuje hutnost cementového tmele, která je dána poměrem objemu pevné složky (cementu) k celkovému objemu cementového tmele.

Podělením zlomku objemem cementu je rovnici možné přepsat jako:

$$f_c = k \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{w}{c} + \frac{a}{c}} \right)^2 \quad (1.4)$$

Jelikož objem zachyceného vzduchu bývá obvykle velmi malý (1 – 2 % ve srovnání s objemem betonu), je možné tento parametr zanedbat a rovnici zjednodušit:

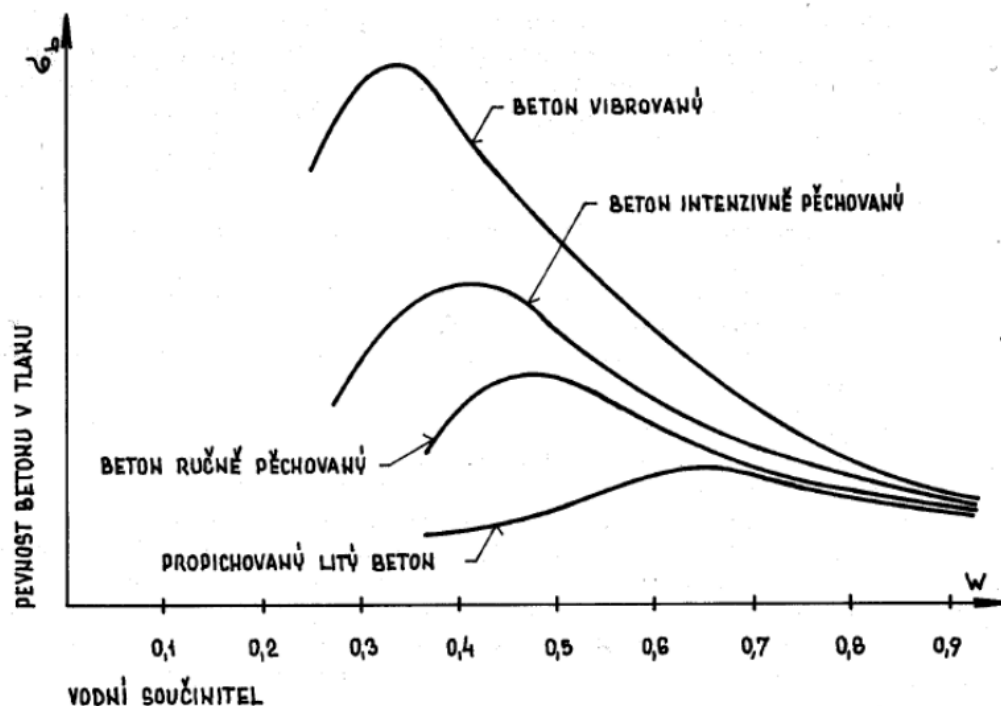
$$f_c = k \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{w}{c}\right)^2} \quad (1.5)$$

Z tohoto vztahu je patrné, že pro zvýšení tlakové pevnosti betonu je nutné snižovat hodnotu vodního součinitele. [15]

Souvislost vodního součinitele s porozitou betonu byla již popsána (v kapitole 1.2.3.2.). Redukce vodního součinitele vede ke snižování pórovitosti betonu, vzduch zbytečně nezabírá objem cementového kamene a tranzitní zóna vykazuje lepší soudržnost mezi zrny kameniva a cementovým tmelem, takže výsledná tlaková pevnost betonu vzrůstá.

Při snižování množství záměsové vody je ale nutné dbát opatrnosti z hlediska vlivu na zpracovatelnost betonu (způsobuje horší zpracovatelnost) a tento problém případně řešit přidáním plastifikační přísady nebo jiným způsobem. Horší zpracovatelnost totiž vede k nemožnosti zhutnění, a tedy zpět ke vzniku pórů

ve struktuře betonu. Proto pro vztah mezi vodním součinitelem a pevností betonu v tlaku platí nepřímá úměra.



Obrázek 1.6 – Závislost velikosti vodního součinitele na pevnost betonu v tlaku s ohledem na způsob zhuňování, převzato z [16]

Z Féretovy rovnice lze dle [6] odvodit i další souvislosti, jako například to, že při daném objemu cementu bude beton tím hutnější, čím větší množství kameniva bude obsahovat, přičemž zvyšování množství kameniva vede ke zvyšování pevnosti v tlaku. Inverzně platí, že při určitém množství kameniva bude pevnost betonu v tlaku tím větší, čím větší bude dávka cementu.

Na Féretovo tvrzení, že pevnost betonu v tlaku závisí na velikosti vodního součinitele, navázal Abrams a Bolomey. Abrams odvodil v roce 1919 vztah:

$$f_c = \frac{A}{B^{1,5w}} \quad (1.6)$$

kde f_c je pevnost betonu v tlaku, A je experimentálně určená konstanta vyjadřující pevnost betonu při nulovém vodním součiniteli, B je konstanta závislá na vlastnostech použitých materiálů, způsobu ošetřování a věku betonu a w je hmotnostní vodní součinitel ($w = \frac{V}{C}$). [6]

Bolomey v roce 1925 sestavil rovnici:

$$f_c = a_k \cdot R_{cv} \cdot \left(\frac{C}{V} - 0,5\right) \quad (1.7)$$

, kde f_c je opět pevnost betonu v tlaku [MPa], a_k je koeficient závislý na druhu použitého kameniva [-], R_{cv} je výpočtová pevnost cementu v tlaku [MPa], C dávka cementu [kg/m^3] a V dávka vody [kg/m^3].

Dávka vody V je součtem množství vody potřebného pro hydrataci cementu V_c a množství vody pro zvlhčení kameniva a dosažení požadované konzistence V_k .

$$V = V_c + V_k \quad (1.8)$$

Tento Bolomeyův vztah tedy umožňuje spočítat množství právě potřebné dávky vody a dodnes je jedním z používaných vztahů pro výpočtový návrh složení betonu.

Další, kdo významně přispěl k těmto teoriím, byl Američan T.C.Powers, který podrobně studoval vliv pórovitosti na pevnost zatvrdlé cementové pasty a v roce 1958 publikoval vztah:

$$f_c = A \cdot X^n \quad (1.9)$$

, kde f_c je pevnost cementové pasty [MPa], A je pevnost cementového tmelu bez kapilárních pórů (při $X = 1$) a X^n je funkce vyjadřující vliv pórovitosti, přičemž n je konstanta nabývající hodnot 2,6 – 3 v závislosti na druhu cementu.

Funkci X , jakožto závislost mezi pevností a poměrem gelu v prostoru Powers definoval takto:

$$X = \frac{V_g}{V_g \cdot V_p} \quad (1.10)$$

, kde V_g je objem gelu hydratovaného cementu a V_p je objem pórů. Výpočet těchto objemů je popsán např. v [6].

Je důležité mít na paměti, že tento vztah nezahrnuje závislost na složení a stáří cementové malty. Celá teorie T. C. Powerse byla ve své době velmi významná a tuto problematiku podrobně popisuje jeho publikace [17].

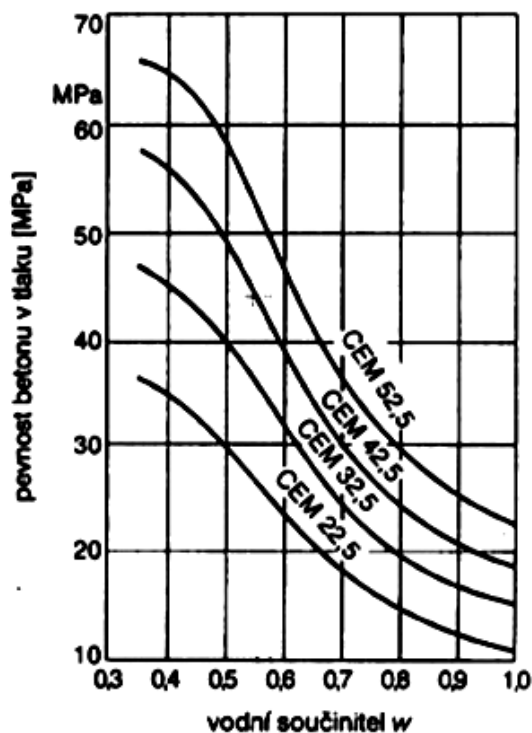
Jelikož výše popsané rovnice dokazují, že pórovitost betonu je jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících jeho pevnost, byla postupem času navržena

ještě celá řada modelů popisujících tuto závislost [18],[19],[6]. Všechny tyto vztahy však počítají s nepřímou úměrou mezi pórovitostí a tlakovou pevností betonu, a tu lze zobecnit jako:

$$f = f_0 \cdot e^{-kP} \quad (1.11)$$

, kde f je pevnost při dané pórovitosti [MPa], f_0 je pevnost při nulové pórovitosti [MPa], k je konstanta a p je pórovitost.

Problematika porozity betonu je značně složitá, a je tedy třeba zdůraznit, že parametry typu velikost pórů, jejich distribuce v objemu, otevřenost/uzavřenost či jejich případné zaplnění kapalinou žádná z těchto teorií nezahrnuje. Stejně tak je třeba upozornit, že porozita betonu není jediný faktor, který jeho výslednou tlakovou pevnost ovlivňuje.



Obrázek 1.7 – Vliv vodního součinitele s ohledem na druh použitého cementu na pevnost betonu v tlaku [14]

1.2.4.2. Trvanlivost betonu

Beton díky svým vlastnostem našel uplatnění pro širokou škálu konstrukcí a staveb včetně staveb speciálních (vrtné plošiny, přehrad, tunely,...), přičemž velmi

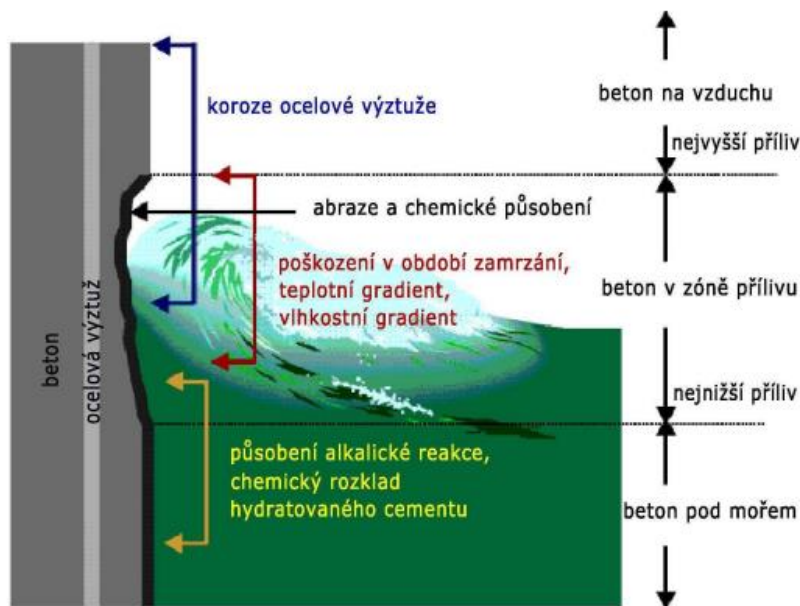
často tato díla bývají v kontaktu s agresivním prostředím, jehož účinky vedou k postupné degradaci materiálu. Okolní prostředí může beton ohrožovat mechanicky nebo chemicky a mezi škodlivé vlivy lze zařadit např. klimatické podmínky (povětrnost, déšť, přímé sluneční záření, mráz,..), působení vod, chemických činidel, elektřiny, aj. Odolnost betonu vůči agresivitě okolního prostředí udává jeho trvanlivost.

Trvanlivost betonových výrobků je úzce spjata s jejich mikrostrukturou. Mezi pórovitostí betonu a jeho trvanlivostí platí v zásadě stejná závislost, jako pro pevnost, tedy že rozhodujícím faktorem je hutnost betonu. Nelze ale tvrdit, že čím více je struktura betonu pórovitější, tím méně je beton trvanlivý, jelikož nebezpečí představuje pouze pórovitost otevřená. Propojená soustava kapilárních pórů umožňuje průnik kapalin, plynů a iontů do vnitřní struktury betonu, kdy právě zejména kapaliny a plyny jsou nositeli agresivních látek. Vztah mezi pórovitostí a trvanlivostí betonu je tedy závislý na objemu pouze kapilárních pórů ve struktuře betonu.

Skrz kapilární póry, otevřené póry v tranzitní zóně a mikrotrhliny dochází k tranzitnímu proudění, které je způsobeno vlivem [21],[22]:

- Absorpce – kapilární nasávání látek do pórů v materiálu
- Difúze – pohyb volných molekul nebo iontů v pórovém systému vlivem koncentračního spádu
- Penetrace – látky vstupují a pronikají materiálem v důsledku jejich rozdílných tlaků u obou povrchů materiálu

Pronikání vody, vodních par a plynů do vnitřní struktury betonu v závislosti na obsahu škodlivých látek vede k různým typům chemické koroze, jako je např. kyselinová, uhličítá, síranová, aj., a k mechanickému poškození, kterým může být např. krystalizace solí, střídavé zmrazování a rozmrazování, eroze, koroze ocelové výztuže a jiné problémy. Problematika poruch betonových konstrukcí vlivem probíhajících transportních procesů je značně obsáhlá a podrobně popsána v [6]. Samotná trvanlivost betonu obecně by mohla tvořit samostatnou vědní disciplínu.



Obrázek 1.8 – Degradací procesy ovlivňující trvanlivost betonu [21]

1.3. Metody měření pórovitosti betonu

1.3.1. Gravimetrická metoda – zkouška nasákavosti

Jedná se o jednu z nejstarších přímých analytických metod, jejíž podstatou je vážení. Gravimetrická metoda jako taková, nachází uplatnění v mnoha vědních oborech ke zjišťování rozličných parametrů, bývá používána ke kalibraci jiných měřících metod, avšak u stavebních materiálů slouží zejména ke zjišťování vlhkosti, nasákavosti, objemové hmotnosti a výpočtu pórovitosti přístupné vodě. Gravimetrická metoda je jednou z nejčastěji užívaných ve stavební praxi. Jde o metodu normovou a postup provádění gravimetrické metody pro zkoušku nasákavosti je popsán normou ČSN EN ISO 12570.

K výpočtu objemu pórů přístupných vodě pomocí zkoušky nasákavosti je nutné znát rozměry zkoumaného vzorku a jeho hmotnosti v různých ustálených stavech - vysušení/nasycení vodou.

Vysoušení vzorku:

Vysoušení vzorku se provádí v laboratoři v horkovzdušných sušárnách s relativní vlhkostí menší než 10 % při teplotě 105 ± 2 °C pro beton, bez dalšího vysoušecího činidla. Vysoušení se provádí tak dlouho, dokud se nedocílí ustálené

hmotnosti. Dle ČSN EN ISO 12570 je ustálené konstantní hmotnosti dosaženo, pokud změna hmotnosti 3 vážení po sobě, provedených po 24h, je menší, než 0,1 % z celkové hmotnosti vzorku. Doba trvání vysoušecího procesu závisí na počáteční vlhkosti vzorku a na jeho velikosti (rozměrech), řádově se však délka vysoušení pohybuje v rozmezí několika dní.

Nasáknutí vzorku:

Jedná se o jednoduchou proceduru, kdy jsou zkoušená tělesa ponořena do laboratorní vany naplněné vodou a zde se nechají přirozeně nasáknout. Obvykle se tato tělesa ukládají na speciální podstavce či konstrukce, které zajišťují kontakt těchto těles s vodou v co největší možné ploše. Nasakování vodou trvá tak dlouho, dokud není dosaženo ustáleného stavu, který je definován stejně, jako v případě vysušování. Je důležité zmínit, že pro zkoušku nasákavosti voda není jediným vhodným médiem a v závislosti na zkoumaném materiálu může být použita i jiná kapalina, jako např. líh.

Vyhodnocení:

Z hmotností vzorků vysušených a hmotností vzorků plně nasycených vodou vážených na vzduchu a vážených hydrostaticky lze dosazením do jednoduchých vzorců vypočítat objemovou hmotnost, otevřenou pórovitost a nasákavost. Rovnice pro výpočet těchto veličin jsou uvedeny v části Výsledky a diskuze (kapitola 3.1).

1.3.2. Rtuťová porozimetrie

Rtuťová porozimetrie je nejvyužívanější metodou pro charakteristiku porézních materiálů v rozsahu velikosti póru 3 nm až cca 600 μm [23]. Poskytuje o zkoumaném vzorku širokou škálu informací, jako je např. distribuce velikosti pórů, celkový objem pórů a pórovitost, objemová hmotnost materiálu či měrný povrch vzorku, a tím nám udává relativně přesnou představu o porézní struktuře materiálu. Je třeba si ale uvědomit, že do analýzy nejsou zahrnuty uzavřené póry, protože rtuť nemá možnost k těmto pórům proniknout a existuje ještě několik dalších faktorů, které nejsou v měření zahrnuty. [24] Z těchto důvodů by měly být výsledky interpretovány s jistou rezervou.

Rtuťová porozimetrie je založena na jevu kapilární deprese, kdy se měří objem rtuti vniknuté do sítě póru daného vzorku, který závisí na vnějším tlaku působícím na

rtuť. Na rozdíl od vody je rtuť v kontaktu se vzduchem, až na výjimky, nesmáčejší kapalina (tzn. úhel smáčení θ je vyšší než 90°). Nedochází tedy k povrchovému napětí, jež by vyvolalo její spontánní absorpci do pórů pevné látky. V případě, že je ale vnější tlak působící na rtuť úměrný velikosti pórů pevné látky, je tento odpor překonán. Za předpokladu, že je pór válcovitý s pevnými stěnami, které se použitým tlakem nedeformují a za předpokladu, že je známa hodnota kontaktního úhlu (úhel smáčení), je tento vztah popsán Young – Laplaceovou rovnicí:

$$h \cdot \rho \cdot g = p = -\frac{2\gamma \cdot \cos \theta}{R} \quad (1.12)$$

, kde γ je povrchové napětí rtuti [N/m], ρ je hustota rtuti [g/m^3], R je poloměr póru kruhového průřezu [m], g je tíhové zrychlení [m/s^2], h je výška sloupce rtuti v póru [m], θ je úhel smáčení póru rtuť [°] a p je celkový tlak [Pa], pod nímž rtuť vniká do póru.

Rovnice tak ukazuje, že poloměr póru je nepřímo úměrný působícímu tlaku, takže platí, že při nejmenších tlacích jsou rtuť zaplněny póry o největším poloměru. Postupným zvyšováním vnějšího tlaku rtuť prostupuje do dalších frakcí pórů s menším poloměrem a při současném měření lze tedy zjistit rozdělení objemu pórů podle velikosti.

Přestože v téměř žádné přírodní porézní látce válcové póry neexistují, rovnice je používána pro výpočet rozdělení velikosti pórů z údajů získaných rtuťovou porozimetrií.

Tento vztah, ze kterého Young – Laplaceova rovnice vychází, poprvé pro účel experimentální porozimetrie vyjádřil Washburn v roce 1921. Ten uvedl, že tlak potřebný k vtlačení rtuti do vyprázdněného kapilárního póru, je vztažen k poloměru kapiláry rovnicí:

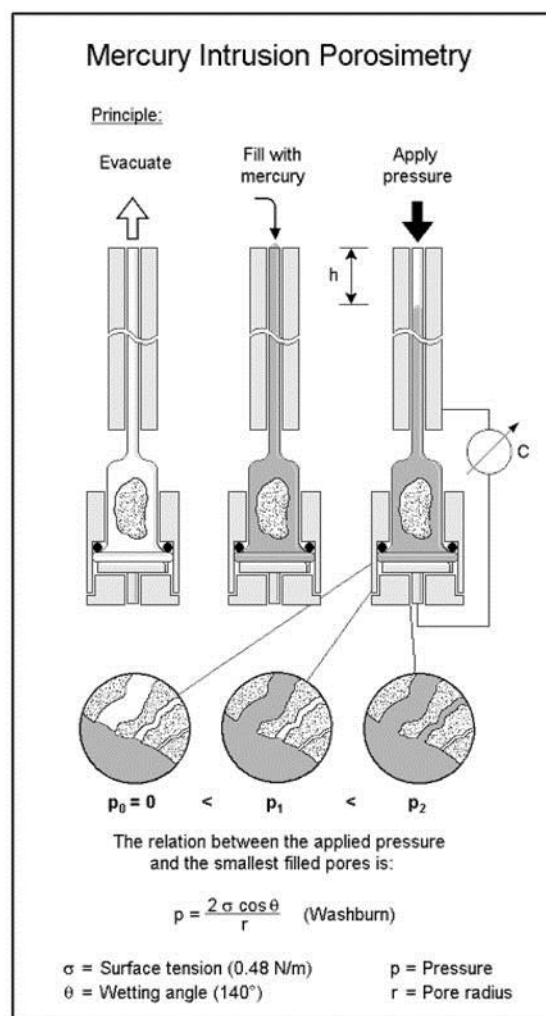
$$\pi \cdot r^2 \cdot p = -2\pi \cdot r \cdot \gamma \cdot \cos \theta \quad (1.13)$$

Pro rtuťovou porozimetrii se využívá přístroj zvaný rtuťový porozimetr. Jedná se o standardizovaný, analytický přístroj, který se skládá z tlakové nádoby, snímače tlaku, vakuového a vysokotlakého čerpadla, tlakového násobiče a zásadní částí přístroje je penetrometr, který obsahuje vzorek, do něhož je v průběhu analýzy rtuť vtlačována.

Princip měření rtuťovým porozimetrem spočívá ve sledování závislosti vloženého tlaku na úbytku rtuti v nádobce, z níž je rtuť vytlačována do pórů měřeného materiálu. Úbytek rtuti a tím zjištění tzv. intruzního objemu se v moderních přístrojích určuje například ze změny kapacity kondenzátoru, který je tvořen kovovou vrstvou nanesenou na skleněné kapiláře a rtuť, která kapiláru částečně zaplňuje. Vysokých tlaků (200 MPa nebo 400 MPa) je dosaženo pomocí tlakových násobičů (multiplikátorů).

Měření rtuťové porozimetrie je standardně rozděleno na dvě fáze dané velikostí působícího tlaku. Nejprve se provádí nízkotlaká analýza, při které probíhá evakuace vysušeného vzorku, naplnění komory rtuťí a samotné měření v oblasti makropórů při tlakovém rozsahu od 0,003 – 0,01 MPa (dle povahy vzorku) do 0,13 MPa. Nízkotlaká analýza udává množství otevřených pórů o poloměru 4 μ m - 100 μ m. Poté následuje vysokotlaká analýza při tlaku v rozmezí od 0,13 MPa do 200 - 400 MPa. Ta se odehrává převážně v oblasti mezopórů, tj. poloměry pórů 3 nm - 4 μ m. [25] Pro stanovení množství póru s menším poloměrem je třeba použít jiné metody měření jako např. adsorpci plynů (dusíku).

V průběhu celého měření dochází k postupnému zvyšování tlaku a zaznamenávání objemu rtuti vtlačené do pórů. Tento objem rtuti, který je přítomen v porézním vzorku, je vyhodnocován jako funkce tlaku rtuti. Z odečtených údajů lze sestavit tzv. kumulativní distribuci pórů, která vyjadřuje závislost objemu pórů s poloměry většími, než odpovídá okamžitému tlaku podle Washburnovy rovnice. Záporně vzatou derivací této závislosti se získá frekvenční křivka rozdělení pórů podle poloměru názorně ukazující, které póry přispívají k celkovému objemu pórů nejvíce. [25]



Obrázek 1.9 – Princip rtuťové porozimetrie, převzato z [26]

Při vyhodnocení rtuťové porozimetrie by měly být do výsledků zahrnuty korekce na stlačitelnost rtuti, skla a na změnu objemu pórů s tlakem. Dále by měla být uvažována možná deformace struktury materiálu. Ve skutečnosti ale součet všech těchto korekcí ukazuje, že jejich zanedbáním nedochází k podstatnému zkreslení naměřených výsledků proti skutečnosti, neboť suma všech korekcí činí jen několik procent z celkového měřeného objemu. [25]

1.3.3. Plynová porozimetrie – sorpce plynu

Plynová porozimetrie je metoda založená na adsorpci plynu na povrchu materiálu. Adsorpce je jev, kdy molekuly plynu (adsorbátu) zůstávají účinkem mezipovrchových přitažlivých sil zachycené na povrchu pevné látky (adsorbentu).

Tuto adsorpci je podle charakteru sil působících mezi adsorbentem (tj. povrch vzorku) a adsorbátem (tj. molekuly plynu) možné rozdělovat na fyzikální, chemickou

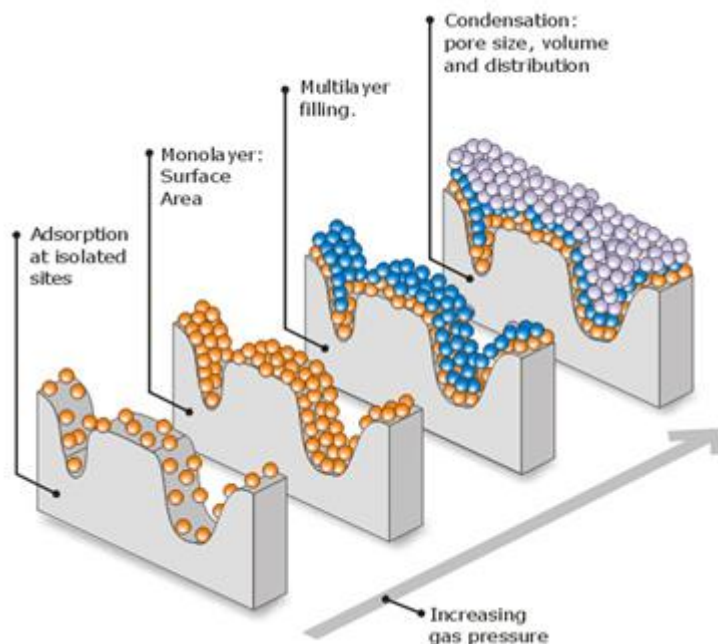
nebo elektrickou. [27] Pro charakterizaci porézních látek, je nejrozšířenější metodou fyzisorpce dusíku (fyzikální adsorbce).

Fyzisorpce je adsorbce, kdy molekuly adsorbátu (inertní nebo málo reaktivní plyny, např. argon, dusík a krypton) jsou na povrchu pevné látky vázány van der Waalsovými silami. Tato fyzikální vazba je relativně slabá (řádově desítky kJ) s dlouhým dosahem. Fyzisorpce probíhá za všech teplot a tlaků, měřitelná je ale pouze za velmi nízkých teplot. Obvykle se provádí při teplotě varu měřícího plynu, která zvyšuje množství adsorbovaného plynu a také umožňuje kapilární kondenzaci měřícího plynu v pórech. [28]

Fyzisorpce plynů nám o zkoumaném porézním vzorku poskytuje velmi cenné informace. V praxi se využívá nejčastěji ke zjišťování specifického povrchu (plocha vzorku vztahovaná na jeho hmotnost), současně ale umožňuje získat data o distribuci šířek pórů, jejich objemu a celkové porozitě materiálu. Ovšem i tato metoda, stejně jako rtuťová porozimetrie, má svá omezení. Fyzisorpce plynu je vhodná pro póry o poloměru 0,4 – 100 nm a vztahuje se pouze k pórům otevřeným. Jelikož tato metoda umožňuje detekovat póry menších velikostí než porozimetrie rtuťová, je možné výslednou křivkou doplnit kumulativní (distribuční) křivku naměřenou pomocí rtuťové porozimetrie – oblast malých pórů.

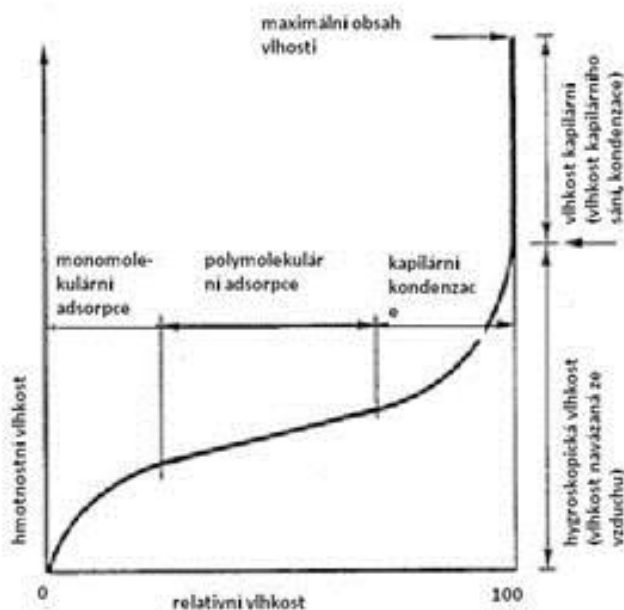
Zjišťování měrného povrchu a analýza velikostí pórů plynovou sorpcí začíná přípravou vzorku. Ve vzorku je obvykle adsorbovaná vlhkost a jiné znečišťující látky, které musí být odstraněny. Vzorek se tedy nejprve evakuuje a pak se ochladí na kryogenní teplotu dle použitého adsorbátu (obvykle 77 K, teplotu kapalného dusíku). Vlastní měření sorpce plynu začíná vystavením vzorku nízkému tlaku adsorpčního plynu. Tehdy dochází k tzv. objemovému zaplňování v nejužších pórech adsorbentu. Se zvyšováním tlaku plynu vzrůstá množství adsorbované na povrchu, až se vytvoří jednodílná monovrstva, ve které má adsorbát charakter velmi podobný kapalině. V tuto chvíli jsou adsorbátem zaplněny mikropóry. Dalším zvyšováním tlaku dochází k vícevrstvé adsorbci, která vede k postupnému zaplňování mezopórů. K úplnému zaplnění mezopórů dochází poté, kdy je křivost menisku adsorbovaného filmu na stěnách pórů natolik vysoká, že tlak nasycených par adsorbátu nad tímto filmem je významně nižší než tlak nasycených par nad rovným povrchem. V důsledku toho tlak nasycených par adsorbátu poklesne pod tlak adsorbátu v plynné fázi, dojde

ke spontánní kondenzaci a pór se kapalným adsorbátem zcela zaplní. Tento stav je definován jako kapilární kondenzace.



Obrázek 1.10 – Průběh vícevrstvé adsorpce plynu, převzato z [29]

Funkční stav popisující závislost adsorbovaného množství adsorbátu na tlaku adsorbátu za konstantní teploty vyjadřuje adsorpční isoterma. Je-li zkoumaná porézní látka (adsorbent) vystavena v uzavřené nádobě určitému tlaku plynu nebo páry (adsorbátu), dochází k adsorpci plynu na povrchu vzorku. Vlivem toho sledovaná hmotnost adsorbentu (vzorku) roste a hodnota tlaku v systému klesá. Po určité době dojde k ustálení, tedy že hmotnost vzorku i tlak plynu se již nemění. V tu chvíli je celková rychlost procesu nulová a je dosaženo adsorpční rovnováhy. Množství adsorbovaného plynu lze spočítat z přírůstku hmotnosti vzorku, nebo z poklesu tlaku adsorbátu (je-li znám objem zařízení) s použitím stavové rovnice plynu. Opakuje-li se takové měření při řadě tlaků plynu a při stále stejné teplotě, získá se adsorpční isoterma.[30]



Obrázek 1.11 – Interpretace sorpční izotermy podle teorie multimolekulární adsorpce (teorie BET), převzato z [31]

Adsorpčních isoterem je v odborné literatuře definováno několik různých typů v závislosti na typu adsorbentu a adsorbátu. Pro měření specifického povrchu se využívá isoterma BET (Brunauera, Emmetta a Teller), ze které je možné dále určit distribuci pórů např. metodou BJH (Barreta, Joynera, Halendy), která vychází z Kelvinovy rovnice a vypočítat jejich objem. Podrobný popis BET isotermy a způsob výpočtu kumulativní distribuce pórů metodou BJH je popsán v [30].

1.3.4. Optická porozimetrie – obrazová analýza

Optickou porozimetrií se rozumí metoda analýzy obrazových dat a optického pozorování.

Obrazová analýza umožňuje měřit různé charakteristické rysy zkoumaných objektů a dokáže poskytnout informace o pórové struktuře (soustavě) na základě analýzy obrazových dat a optického pozorování. Jedná se o soubor technologických a analytických procedur, které jsou spolu úzce spojeny. Technologická část obnáší přípravu vzorků, základem které je vizualizace pórové sítě výřezu zkoumaného materiálu pro účely snadné detekce jednotlivých elementů. Tento proces obnáší zaplnění pórů barevnou látkou/hmotou, která zajistí jejich výrazné kontrastní odlišení od zbývající sledované plochy. S takto připraveným vzorkem pak můžeme přistoupit k části analytické, jejíž náplní je samotná digitální analýza obrazových dat.

[32] Tuto analýzu provádí a vyhodnocuje příslušný speciální software, tudíž v první fázi musí být fyzický vzorek nejprve převeden do digitální podoby. K tomuto účelu lze použít např. klasický fotoaparát nebo skener. Je však jasné, že kvalita vstupních dat (obrazů) rozhoduje o přesnosti získaných výsledků a může proces vyhodnocení značně ovlivnit či zkreslit. Platí tedy, že čím lepší přístroj je pro převod obrazu do digitální podoby použit, tím přesnějších výsledků dosáhneme. Kvalita digitálních obrazů může být dále zlepšena např. vhodnou úpravou v grafickém editoru či jiném grafickém programu. Když je vzorek převeden do digitální podoby a připraven k samotnému vyhodnocení, přichází na řadu práce se softwarem. V současnosti softwarů pro analýzu obrazu existuje mnoho a některé z nich jsou určeny přímo pro beton. Software vstupní obraz vyhodnocuje na základě analýzy barevných fází, kdy je důležité správně provést tzv. naprahování. Tím softwaru jasně zadáváme, s jakými vybranými oblastmi snímku má na základě barevných odstínů dále pracovat. Z tohoto důvodu se v přípravné fázi póry vzorku zaplňují barevnou hmotou, pro jejich jasné odlišení.

Samotný software pracuje s 2D daty, dokáže tedy vyhodnotit parametry, jako jsou obsah pórů, jejich počet a geometrie ve sledované ploše výřezu vzorku. Interpretace výsledků vzhledem k celému objemu (do objemu) zkoumaného vzorku představuje značný problém.

Zkušebními metodami stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu se zabývá norma ČSN EN 480-11, ve které je zároveň uveden výpočet pro celkový obsah vzduchu v pórech tzv. traverzní metodou. Princip této metody a samotný postup provedení je popsán v dané normě. Zároveň jsou ale v této normě uvedeny požadavky na přístrojové vybavení, kterým tato analýza může být prováděna a vyhodnocována.

Dnes proto pro obrazovou analýzu existují i ucelené měřicí soustavy, které jsou na této normové metodě založeny. Jejich součástí je CCD kamera, optický mikroskop a k nim připojený PC. CCD kamera zajišťuje digitalizaci snímaného obrazu, optický mikroskop umožňuje zkoumat vzorek ve větší podrobnosti. Software v připojeném PC pak současně zpracovává obrazové informace a provádí vyhodnocení, ze kterého pak získáváme výsledná data. Např. pro stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu existuje měřicí zařízení LUCIA Concrete, sestávající z makro-optického stativu nebo mikroskopu, rychlé 3.3 MPix firewire kamery, motorizovaného

3-osého stolku s joystickem, osvětlovače s řídicí jednotkou a softwarového modulu Concrete. [33]



Obrázek 1.12 – Systém pro stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu, převzato z [33]

1.3.5. Metoda měření částečných výbojů

Měření aktivity částečných výbojů se v praxi využívá v elektrotechnice pro elektrotechnologickou diagnostiku izolačních systémů elektrických strojů, vysokonapěťových zařízení nebo vysokonapěťových kabelů. Tato diagnostika slouží k detekci nehomogenit (vzduchových dutin, pórů) či jiných vad izolace zkoumaných dielektrik. Jelikož je beton nehomogenní materiál s přirozeně porézní strukturou, nabízí se možnost tuto porozitu detekovat právě metodou měření částečných výbojů.

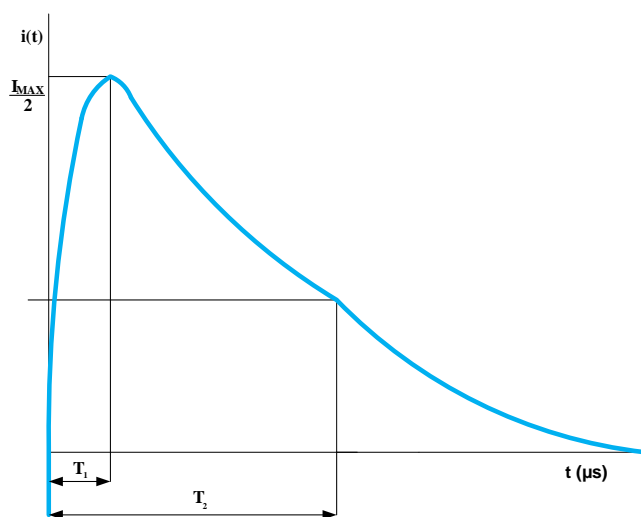
Částečný výboj je elektrický výboj, který vzniká v plynové dutince uvnitř nebo na povrchu dielektrika mezi přiloženými elektrodami s dostatečným rozdílem potenciálu. Dielektrikum je elektrický materiál mající schopnost polarizace po přiložení vnějšího elektrického pole. To znamená, že po přiložení elektrod se začnou v materiálu vytvářet nabitě dipóly, které se natáčí proti směru intenzity vnějšího elektrického pole. Při střídavém vnějším elektrickém poli je toto pole přiloženým dielektrikem oslabováno a vznikají tak dielektrické ztráty. Mezi dielektrika patří například PVC, PE, syntetický olej a v jistém smyslu i beton. Částečné

výboje vznikají jako důsledek elektrického namáhání s velmi krátkou dobou trvání ($t < 1$ mikrosekundy).

Dle normy ČSN EN 60270 je částečný výboj definován jako lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostí uje izolaci mezi vodiči, a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče. Dle této normy se definují také techniky zkoušek detekce částečných výbojů vysokým napětím. Celá problematika částečných výbojů (vliv částečných výbojů na elektrickou izolaci, elektroerozivní, chemické, tepelné účinky, vedení proudu v plynech, apod.) je značně obsáhlá a pro účely dané práce je zaměřena pouze na nutnou část potřebnou k pochopení.

Jak bylo psáno výše, částečné výboje vznikají v plynu mezi elektrodami (nebo alespoň jednou elektrodou) obklopenými dielektrikem při dostatečně velkém rozdílu potenciálu elektrod. Plyn je velmi dobrý izolant, co se týká jeho elektrické vodivosti, jelikož je tvořen elektricky neutrálními atomy a molekulami. Výboje v plynu mohou vznikat přidáním ionizačního činidla, či překročením kritické intenzity elektrického pole plynu, tzv. jeho elektrické pevnosti. Více o elektrických výbojích např. v [34].

Tvar ideálního proudového impulsu pro částečný výboj je znázorněn níže na obrázku. I_{max} je amplituda proudového impulsu, T_1 je doba týlu (v řádu jednotek ns), T_2 je doba půltýlu (řádově desítky ns). Celkový náboj q [pC] je pak dán integrací tohoto časového průběhu proudu:



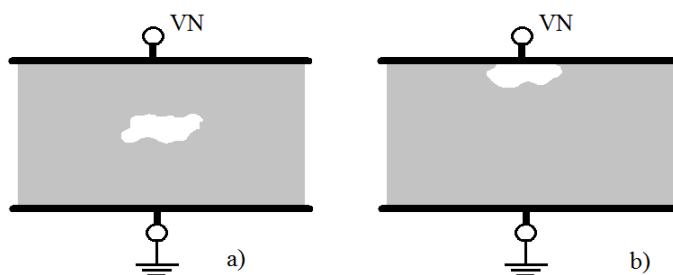
Obrázek 1.13 – Ideální tvar elektrického impulsu při částečném výboji, vlastní tvorba

$$q(t) = \int_0^{\infty} i(t) dt \quad (1.14)$$

Částečné výboje také můžeme rozlišit podle místa výskytu plynové dutinky, a to buď uvnitř, nebo na povrchu zkoumaného objektu. Obecně lze částečné výboje dle [dizertační práce] dělit na:

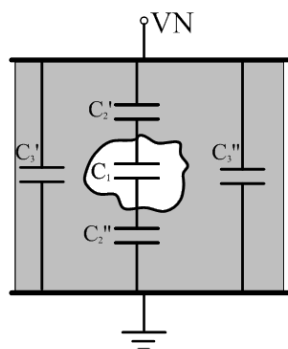
- Vnitřní (interní) – částečné výboje v plynech, obklopené dielektrikem.
- Povrchové – částečné výboje v blízkosti elektrod na rozhraní pevného a plynného dielektrika.
- Vnější (externí) – částečné výboje v plynech v okolí elektrod malých poloměrů nebo zakřivení.

Existuje mnoho možností uspořádání elektrod, pro účel této práce jsou ale podstatné následující:

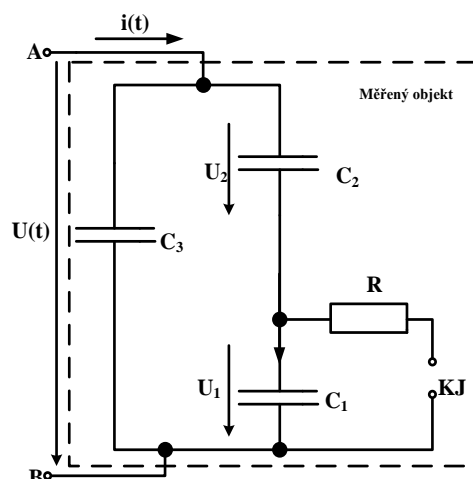


Obrázek 1.14 – a) Plynová dutinka uvnitř materiálu, b) Plynová dutinka pod elektrodou, vlastní tvorba

Pro schéma pevného dielektrika s vnitřní plynovou dutinkou (Obrázek 1.15 – Znárodnění elektrických kapacit v materiálu s plynovou dutinkou, vlastní tvorba) lze sestavit náhradní elektrické schéma (tzv. Gemant – Philippowův obvod), (Obrázek 1.16 – Náhradní elektrické schéma pevného dielektrika s plynovou dutinkou (Gemant – Philippowův obvod), vlastní tvorba).



Obrázek 1.15 – Znárodnění elektrických kapacit v materiálu s plynovou dutinkou, vlastní tvorba



Obrázek 1.16 – Náhradní elektrické schéma pevného dielektrika s plynovou dutinkou (Gemant – Philippowův obvod), vlastní tvorba

Výsledná elektrická kapacita materiálu bez plynových dutinek je dána paralelní kombinací:

$$C_3 = C_3' + C_3'' \quad (1.15)$$

Vlivem plynové dutinky vyskytující se v izolačním materiálu jeho celková elektrická pevnost klesá. Samotná dutinka pak oslabí celkovou kapacitu materiálu, pro kapacitu materiálu s plynovou dutinkou platí:

$$\frac{1}{C_{dut}} = \frac{1}{C_2'} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2''} \quad (1.16)$$

Celková kapacita vyjádřená pro schéma je pak paralelní kombinací, tedy součtem kapacity materiálu s dutinkou a kapacity dutinkami nepoškozeného materiálu:

$$C = C_3 + C_{dut} \quad (1.17)$$

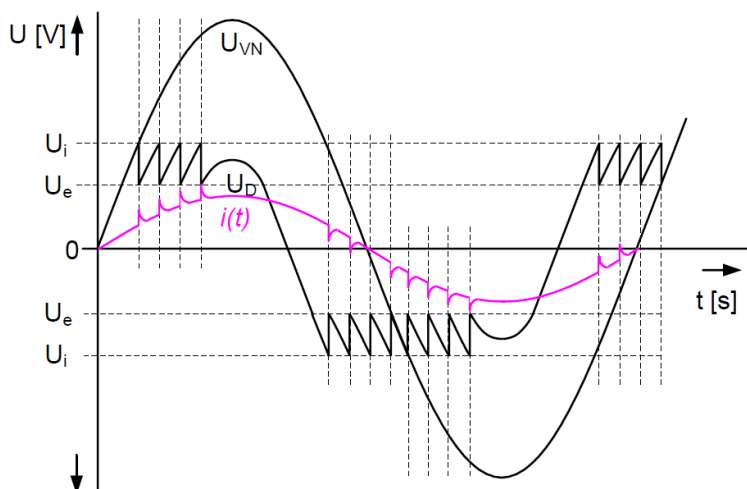
Přiložením střídavého napětí $u(t)$ bude protékat střídavý proud $i(t)$. Nedojde-li k přeskoku v dutince, bude platit pro napětí na dutince:

$$u_1(t) = \frac{C_2}{C_2 + C_1} \cdot u(t) \quad (1.18)$$

Dojde-li k částečnému výboji, projeví se to jako přeskok na kulovém jiskřišti KJ a následným poklesem napětí a nárůstem proudu v dutince. Pro hodnotu napětí, kterého dosáhne VN zdroj U_{VN} , dojde k elektrickému přeskoku v dutince a vlivem

hodnoty zápalného napětí U_i začne přes kapacitu C_1 procházet proud a díky malému elektrickému odporu dojde k poklesu napětí na hodnotu zhášecího napětí U_e .

Pro velmi malé rozměry dutinek, které se vyskytují v materiálu, proběhne výboj řádu jednotek ns, situaci vyjadřují následující obrázky:



Obrázek 1.17 – Časový průběh napětí a proudu, převzato z [35]

Pro malou dutinku platí, že $C_3 \gg C_1 \gg C_2$ a přeskok v dutince nastává v momentě, kdy napětí z vysokonapět'ového zdroje dosáhne hodnoty zápalného napětí v dutince. Během přeskoku (výboje) na dutince dochází k poklesu napětí nejen v samotné dutince, ale také na jeho rozhraní. Následkem toho se mohou pohybovat náboje podél dutinky a ovlivňovat tak zpětně napětí na dutince.

Detekce a vyhodnocení částečných výbojů:

Základní parametry, dle kterých je možné projevy částečných výbojů kvantifikovat, lze rozdělit do několika skupin, kdy statistický charakter výbojové činnosti můžeme pozorovat zvláště u parametrů sad pulsů částečných výbojů, kam patří např. střední proud částečných výbojů, součtový náboj a četnost impulsů částečných výbojů.

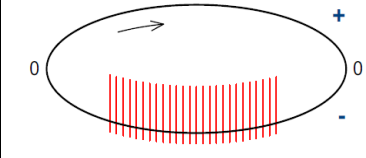
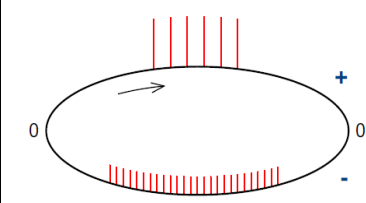
Střední proud částečných výbojů I [C/s] představuje součet absolutních hodnot jednotlivých úrovní zdánlivého náboje q_i během zvoleného referenčního intervalu T_{ref} , dělený tímto intervalem. [34]

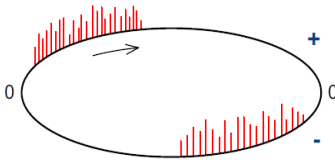
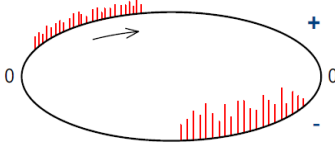
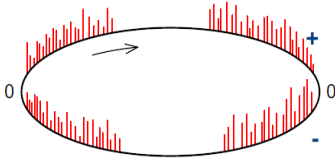
Součtový náboj Q [C] vyjadřuje součet absolutních hodnot jednotlivých úrovní zdánlivých nábojů během určitého časového intervalu, obvykle během periody napájecího napětí. [34]

Četnost impulsů n [s^{-1}] je poměr mezi celkovým počtem impulsů částečných výbojů zaznamenaných ve vybraném časovém intervalu a dobou trvání tohoto intervalu. [34]

Měření aktivity částečných výbojů bývá současně zobrazováno v podobě Lissajousových obrazců napájecího napětí se superponovanými impulsy částečných výbojů, převedených na osciloskopický obraz (diagram částečných výbojů), ze kterých lze také interpretovat mnohé výsledky. Tyto obrazy srozumitelně a přehledně popisuje následující tabulka [35].

Tabulka 1.2 - Typy obrazců částečných výbojů

Typ	Osciloskopický obraz	Popis	Typ výboje
A		Pulsy stejné velikosti v jedné půlperiodě, symetricky okolo napěťového maxima. Se zvyšováním napětí narůstá počet pulsů, ale jejich velikost se nemění. Pulsy v druhé půlperiodě pouze při vyšším napětí.	Uspořádání hrot-deska (tyč-rovina) v plynech. Jestliže se pulsy objevují v záporné půlperiodě, je hrot (tyč) na vysokém potenciálu; jestliže se pulsy objevují v kladné půlperiodě, je hrot (tyč) na zemním potenciálu.
B		Pulsy v obou půlperiodách, symetricky okolo napěťových maxim; v jedné půlperiodě pulsy větší, ve druhé půlperiodě větší počet menších pulsů stejné velikosti. Se zvyšováním napětí počet pulsů narůstá.	Uspořádání hrot-deska (tyč-rovina) v kapalných izolantech. Jestliže se velké pulsy objevují v kladné půlperiodě, je hrot (tyč) na vysokém potenciálu; jestliže se velké pulsy objevují v záporné půlperiodě, je hrot (tyč) na zemním potenciálu.

C		<p>Pulsy mezi průchody nulou napětí a vrcholy v obou půlperiodách. Pulsy v obou půlperiodách mají přibližně stejnou velikost.</p>	<p>Dutinky v pevném izolantu. Vzduchové dutinky v kapalném izolantu. Dotyk izolovaných vodičů. Výboje na povrchu bez galvanického spojení. Neuzemněné kovové části měřicího obvodu.</p>
D		<p>Pulsy mezi průchody nulou a vrcholy v obou půlperiodách. Pulsy v jedné půlperiodě jsou vyšší než pulsy v druhé půlperiodě.</p>	<p>Dutinky v pevném izolantu u elektrod. Vzduchové dutinky v kapalném izolantu u elektrod. Jestliže se velké pulsy objevují v kladné půlperiodě, jsou výboje na vysokém potenciálu; jestliže se velké pulsy objevují v záporné půlperiodě, jsou výboje na zemním potenciálu.</p>
E		<p>Pulsy symetricky kolem obou průchodů nulovým napětím.</p>	<p>Špatný kontakt mezi kovovými částmi nebo mezi polovodivými (odporovými) vrstvami.</p>

Při výskytu částečných výbojů jsou charakteristické jejich degradační až destruktivní účinky na izolační systém. Mezi typické účinky částečných výbojů patří:

- Elektrické – při výskytu elektrického oblouku v dutince materiálu se vytvoří vodivá dráha, která způsobuje čistě elektrický průraz.
- Erozivní – vlivem výboje uvnitř dutinky, či po jejím povrchu může vzniknout eroze stěn dutinky. Je to dáno destruktivními účinky elektrony a ionty, které se při částečný výboj v materiálu vyskytují, následně může dojít ke zvětšování dutinky a případné erozi celého materiálu.
- Chemické – je – li v dutince přítomen kyslík, vzniká vlivem výboje ozón, který má silné oxidační účinky. Vlivem částečného výboje a vystavení určité

intenzitě elektrického pole mohou uvnitř materiálu vznikat další chemické procesy, které mohou mít vliv na jeho strukturu a vlastnosti.

- Tepelné – vlivem částečného výboje a opakovaným elektrickým namáháním mohou vznikat v materiálu lokální tepelné procesy a nestability, které se také na něm mohou negativně projevovat.

Výše zmíněné negativní účinky tohoto měření mohou samozřejmě ovlivnit i zkoušený beton. Je ovšem otázkou, které převáží a které si můžeme dovolit, bez nějakých závažnějších důsledků, zanedbat.

2. PRAKTICKÁ ČÁST

2.1.1. Příprava vzorků

Ke zjišťování porozity betonu užitím několika různých metod vyhodnocení bylo nutné pořídit dostatečný počet zkušebních vzorků. Aby bylo možné při zkoumání porozity získat rozmanité výsledky, bylo navíc třeba již výrobním procesem zkušebních těles zajistit, že porozita těchto těles bude nabývat znatelně rozdílných hodnot a parametrů. Z toho důvodu příprava vzorků sestávala z několika betonáží (výrobních procesů) odlišných betonových směsí a přípravu vzorků lze rozdělit do 3 samostatných sérií.

2.1.2. Vzorky S1 – 1. série

Aby bylo možné zjistit, zdali bude metoda měření částečných výbojů na beton vůbec aplikovatelná, bylo nutné provést čistě zkušební měření. Pro tyto účely mi byly vedoucím bakalářské práce zapůjčeny již hotové vzorky – betonové krychle 10 x 10 cm. Těchto vzorků se tedy samotná příprava netýká.

K těmto vzorkům existovaly údaje ze zkoušky nasákavosti, tedy byly známe hmotnosti po nasáknutí a hmotnosti po vysušení, ze kterých se dala dopočítat nasákavost betonu a z ní získat představa o otevřené pórovitosti daných betonových krychlí. To se zprvu zdálo jako velká výhoda. Problémem ale je, že metoda měření aktivity částečných výbojů se vztahuje ke všem vzduchovým dutinkám ve zkoumaném materiálu, takže tyto výsledky mezi sebou nelze porovnávat.

2.1.3. Vzorky S2 – 2. série

Příprava vzorků druhé série je značně obsáhlejší a zajímavější. V této sérii bylo postupně vyrobeno 5 sad trámců cementového betonu s přídavkem rozdílného množství provzdušňovací přísady. Každá sada se skládá z 3 kusů betonových trámců (podle velikosti formy), celkový počet vzorků v této sérii je tedy 15 kusů.

Příprava těchto vzorků byla prováděna v laboratoři Ústavu skla a keramiky VŠCHT a byla rozdělena na několik etap. Jako první bylo nutné sestavit vhodnou recepturu základní betonové směsi, která byla navržena pro naplnění jedné formy takto:

Tabulka 2.1 – Složení betonové směsi

Č.	Složka:	Množství:
1.	Portlandský cement CEM I R42,5 (výrobní závod Mokrá)	500 g
2.	Kamenivo fr. 0/4 (šterkovna Dobřín)	1 244 g
1.	Voda	220 ml
2.	Provzdušňující přísada BASF MicroAir (dávkování v % z hmotnosti cementu)	1. sada 0,000% 2. sada 0,005% 3. sada 0,225% 4. sada 0,500% 5. sada 1,000%

Dle této receptury jsem navázila jednotlivě všechny složky betonu. Poté následovalo míchání betonové směsi dvourychlostní normovou míchačkou po dobu 2 minut. V průběhu míchání byl zhruba po jedné minutě proces zastaven, kdy jsem za účelem důkladného promíchání směsi ručně plastovou stěrkou setřela zachycenou hmotu přilnutou na stěnách míchací nádoby. Neprodleně na to byl opět obnoven míchací proces normovou míchačkou. Rozmíchanou směs jsem rovnoměrně uložila do sestavené ocelové formy na tři zkušební betonové trámce o rozměru 40 x 40 x 160 mm a tuto formu vyplněnou směsí čerstvého betonu položila na laboratorní vibrační stůl, který beton v době 2 minut ztuhlil. Takto zpracovaný beton byl pro ochranu před vysušováním zakryt igelitovým sáčkem a uložen v laboratoři na místo, kde mohl hydratovat, tuhnout a tvrdnout.

Stejně jsem postupovala u dalších 4 sad vzorků (4 x 3 trámce) pouze s tím rozdílem, že do záměsové vody byla dávkována provzdušňovací přísada MicroAir v odstupňovaném množství. Výrobce provzdušňovací přísady udává pro naše množství cementu dávkování v rozpětí 0,25 ml až 2,5 ml. První dávka provzdušňovadla tedy byla odměřena v množství 0,25 ml, jakožto úplné minimum. Další dávka obsahovala 1,125 ml přísady, poté 2,5 ml a nakonec dávka 5 ml, která překračovala maximální množství udávané výrobcem směsi.



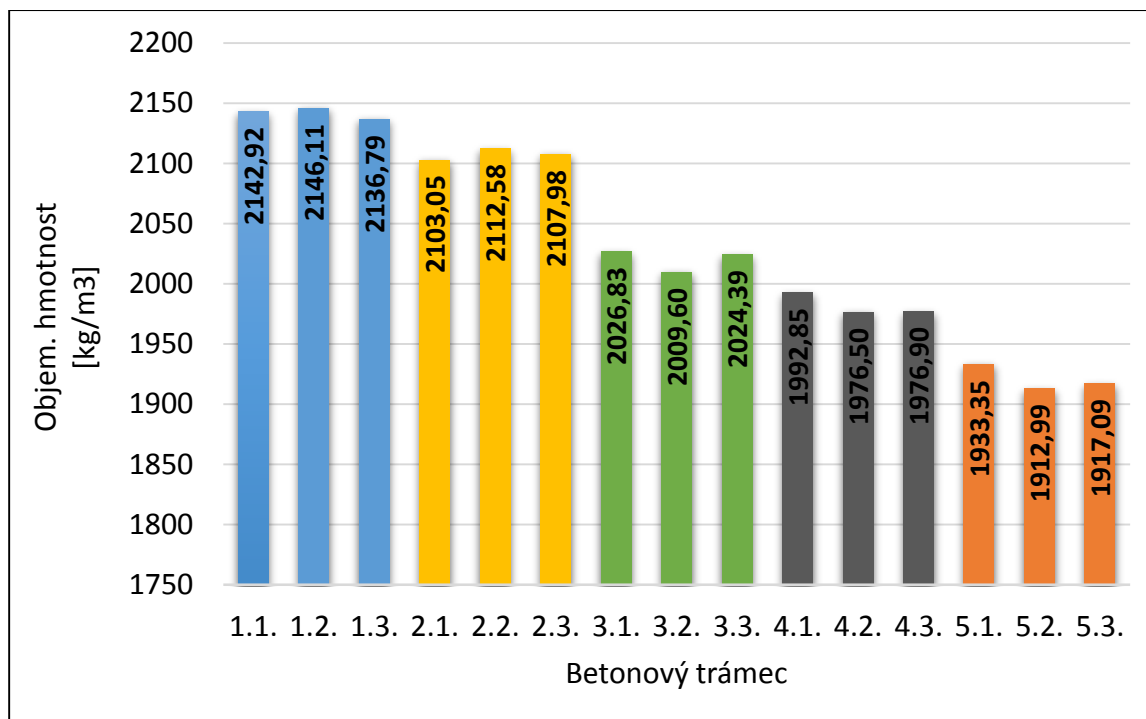
Obrázek 2.1 – Betonové trávce 2. série, vlastní tvorba

Po týdnu jsem betonové trávce odbednila a ihned po odbednění zvažila a změřila. Vážení bylo prováděno na laboratorních váhách KERN, měření délkových rozměrů posuvným měřítkem (šuplerou).



Obrázek 2.2 – Vážení betonového trávce, vlastní tvorba

Z těchto hodnot jsem dopočítala objemové hmotnosti, ze kterých je patrný účinek provzdušňovací přísady, kdy s rostoucím množstvím přísady klesá objemová hmotnost vlivem záměrně vnesených vzduchových bublin. Je ale zřejmé, že týden staré betonové trávce stále hydratují a obsahují určité množství chemicky nevázané vody. Spočítaná objemová hmotnost se tedy vztahuje k tělesům čerstvě po odbednění. Změřené rozměry a zvážené hmotnosti betonových trávců po odbednění včetně výpočtu objemových hmotností jsou zaznamenány v tabulce v příloze č. 1. Změnu objemové hmotnosti v závislosti na množství přidávané provzdušňovací přísady popisuje následující graf:

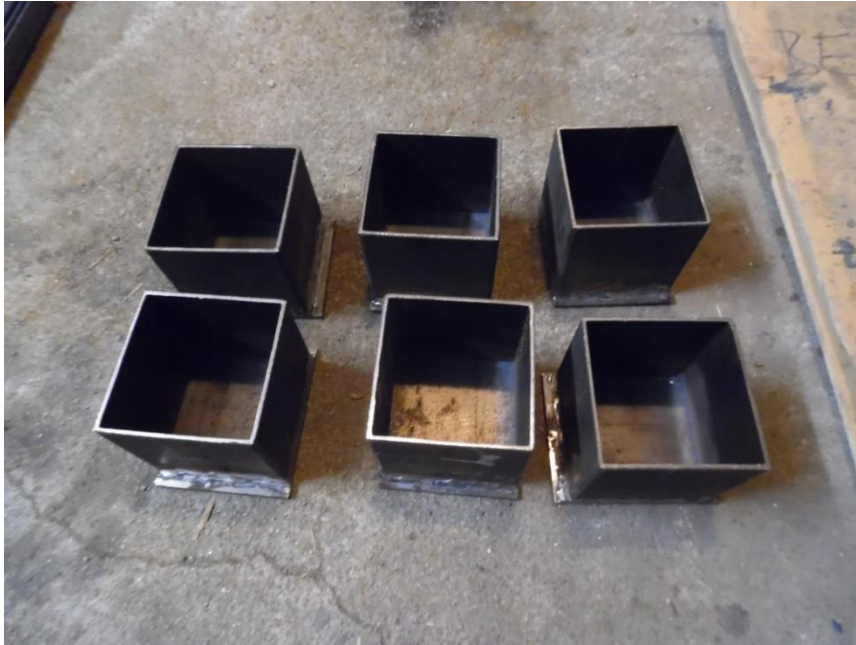


Graf 2.1 – Vyhodnocení objemové hmotnosti po odbednění

U těchto vzorků bylo následně provedeno měření aktivity částečných výbojů a poté zkouška nasákavosti – gravimetrická metoda, kterou lze zjistit otevřenou pórovitost přístupnou vodě.

2.1.3. Vzorky S3 – 3. série

Vzorky 3. série byly vyráběny v domácím prostředí, takže je nelze považovat za laboratorní zkušební tělesa. I přesto se tyto vzorky vydařily a daly se následně využít jak pro měření aktivity částečných výbojů, tak pro detekci porozity obrazovou analýzou. Pro přípravu těchto vzorků bylo nejprve nutné sehnat vhodné formy, u kterých je zajištěna rovinnost a kolmost hran a které půjdou odbednit. K tomuto účelu jsem si nechala soukromou firmou na pásové pile nařezat ocelový jekl 100 x 100 x 3 mm po vzdálenosti 100 mm, aby vznikla pravidelná krychle. Dno formy tvořil k tomuto jeklu částečně přivařený ocelový plech tloušťky taktéž 3 mm. Rozměr krychlí z této formy pak byl 97 x 97 x 100 mm.



Obrázek 2.3 – Bednicí formy pro betonové krychle 3. série, vlastní tvorba

Dále jsem si pro výrobu betonových vzorků musela sehnat nástroje a pomůcky typu:

- vrtačka s ponorným míchadlem pro rozmíchání betonové směsi
- drátěný kartáč pro očištění ocelové formy
- odbedňovací olej na vymazání formy pro snadné odbednění
- nádobu pro míchání betonové směsi (použita plastová zednická kruhová nádoba 60 l)
- zednickou lžící, fanku a pracovní rukavice

Samozřejmě tou nejdůležitější součástí výrobního procesu 3. série betonových vzorků je samotná betonová směs, jako kterou jsem zvolila průmyslově vyráběnou suchou směs Baumit Beton B30 a Baumit ProofBeton s deklarovanými (zaručenými) vlastnostmi.

Složení těchto směsí není výrobcem přesně specifikováno. V následující tabulce jsou zapsány údaje, které je o těchto směsích možné z technických listů výrobce zjistit.

Tabulka 2.2 – Složení betonové směsi Baumit Beton B30

Baumit Beton B30	
Charakteristika:	Mrazuvzdorná betonová směs pro přípravu betonu třídy C25/30
Složení:	Cement, písky, přísady
Zrnitost:	4 mm
Potřeba vody:	4 - 4,5l vody/40kg suché směsi

Tabulka 2.3 - Složení betonové směsi Baumit ProofBeton

Baumit ProofBeton	
Charakteristika:	Vodonepropustný beton třídy C30/37 XC4, XF4
Složení:	Cement, kamenivo, přísady
Zrnitost:	4 mm
Potřeba vody:	2,5l vody/25kg suché směsi



Obrázek 2.4 – Pytle průmyslově vyráběné betonové směsi pro betonové krychle 3. série, vlastní tvorba

Jakmile byly všechny potřebné pomůcky pohromadě, začala jsem se samotnou výrobou vzorků. Nejprve jsem nasypala obsah celého pytle suché směsi Beton B30

do 60 l plastové nádoby a ručně zednickou fankou promíchala, jelikož výrobce upozorňuje na možnost nerovnoměrně rozmísené směsi v objemu. Poté jsem odvážíla množství suché směsi potřebné pro betonáž 4 krychlí 97 x 97 x 100 mm, které jsem nasypala do čistého plastového kýble určeného pro míchání betonu a dle technického listu výrobce odměřila tomuto množství odpovídající dávku vody. Část této vody jsem přilila do suché směsi přímo a začala s mícháním. V průběhu míchání jsem přilila zbylé množství vody a všechny složky betonu důkladně promíchala.



Obrázek 2.5 – Míchání betonové směsi, vlastní tvorba

Když byly všechny složky betonové směsi dostatečně promíseny, naplnila jsem tímto čerstvým betonem předem připravené ocelové formy, které bylo nutné očistit drátěným kartáčem a vymazat odbedňovacím olejem pro usnadnění odbedňovacího procesu. Uloženou betonovou směs ve dvou bednicích formách jsem se pokusila co nejlépe ztuhnit propichováním dřevěnou lištou. U betonu uloženého ve zbylých dvou formách jsem ztuhnění vynechala s cílem dosáhnout větších technologických pórů a celkově větší porozity. Je ale jisté, že vzhledem k malé velikosti formy byl tento beton částečně ztuhněn v průběhu ukládání do bednicí formy zednickou lžící.



Obrázek 2.6 – Čerstvý beton uložený do bednicích forem, vlastní tvorba

Stejným pracovním postupem jsem pokračovala i u přípravy betonu ze suché směsi ProofBeton. Po uložení do ocelové bednicí formy byl čerstvý beton vyrobený z této směsi zhuštěn taktéž propichováním dřevěnou latí a všechny formy se následně nechali hydratovat, tuhnout a tvrdnout. Po týdnu proběhlo odbednění, kdy se muselo přivařené dno z ocelového plechu odříznout úhlovou bruskou, aby tyto betonové krychle mohly být z formy vyjmuty.

2.2. Zjišťování porozity betonu užitím tradičních metod

2.2.1. Zkouška nasákavosti – gravimetrická metoda

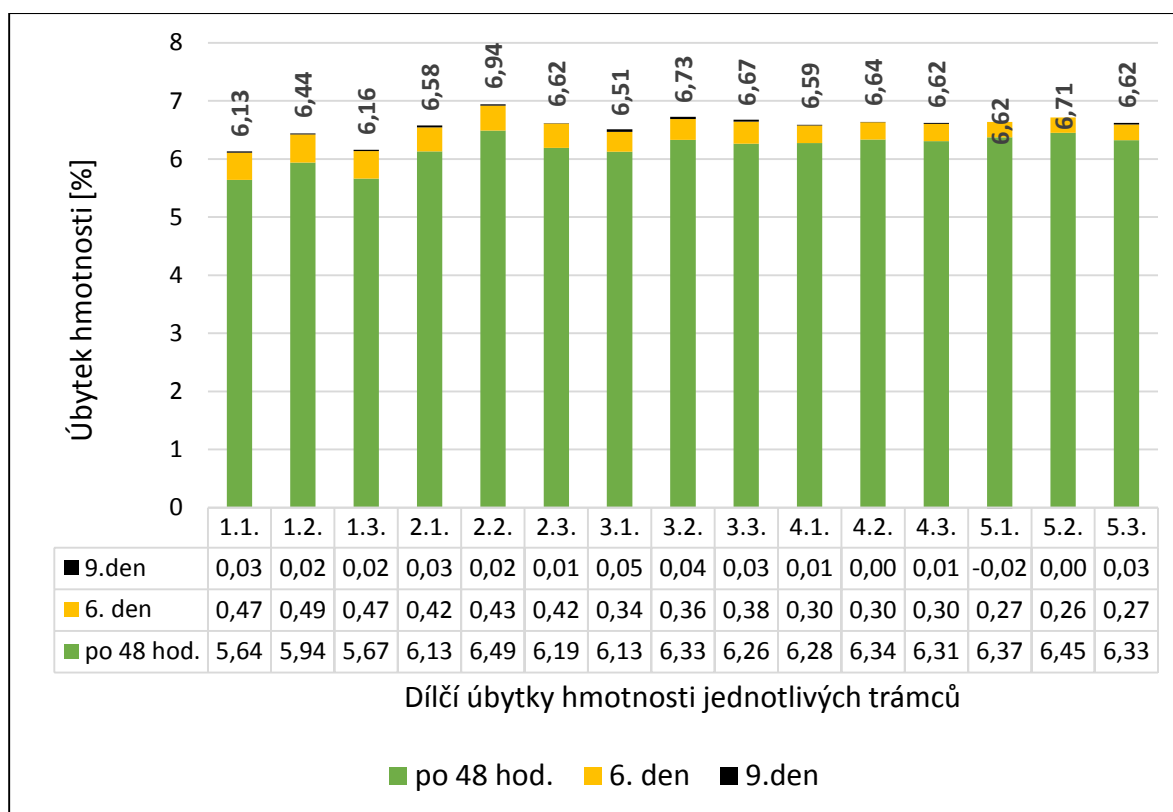
Pro získání hodnot pórovitosti přístupné vodě byly betonové trávce série S2 podrobeny vysoušení a nasáknutí vodou do ustáleného stavu a při obou těchto stavech váženy.

Jako první se provedlo vysoušení. K tomuto účel byla použita laboratorní horkovzdušná sušárna Binder v laboratoři Ústavu skla a keramiky na VŠCHT v Praze. Všechny vzorky jsem do sušárny naskládala tak, aby mezi nimi byly zachovány určité rozestupy, poté se nechaly při konstantní teplotě 105 °C vysoušet.



Obrázek 2.7 – Vysoušení betonových trámů v laboratorní sušárně, vlastní tvorba

V určitých časových intervalech (každý 3. den) jsem vzorky ze sušárny vyndala, nechala vychladnout na pokojovou teplotu a zvažila na laboratorní váze KERN pro ověření, zdali jsou již dostatečně vysušené. Normový požadavek ČSN EN ISO 12570 říká, že vysoušení se provádí tak dlouho, dokud není dosaženo ustálené konstantní hmotnosti. Za dosažení ustálené konstantní hmotnosti se považuje stav, kdy změna hmotnosti 3 vážení po sobě, provedených po 24 h, je menší, než 0,1 % z celkové hmotnosti vzorku [Norma]. Ustáleného stavu bylo dosaženo 9. den od zahájení vysoušení a tehdy jsem ze sušárny vzorky vyndala. Hodnoty vážení prováděného v průběhu vysoušení jsou zaznamenány v tabulce v příloze 2. Velikost úbytku vlhkosti (vody) z objemu betonových trámů v průběhu procesu vysušování je zaznamenána v grafu:



Graf 2.2 – Úbytky vlhkosti jednotlivých trámů v průběhu vysušování

V další fázi bylo nutné zjistit hmotnosti zkoumaných betonových trámů ve stavu plně nasyceném vodou. Pro nasáknutí jsem trámce naskládala do speciální konstrukce tvořené ocelovými mřížkami k tomuto účelu určené. Ocelová mřížka zajišťuje mezi jednotlivými trámcí dostatečné rozestupy tak, aby všechny hrany těchto trámů byly v kontaktu s vodou v co největší možné ploše. Poté jsem trámce naskládané v této pomocné konstrukci uložila do laboratorní vany naplněné vodou.



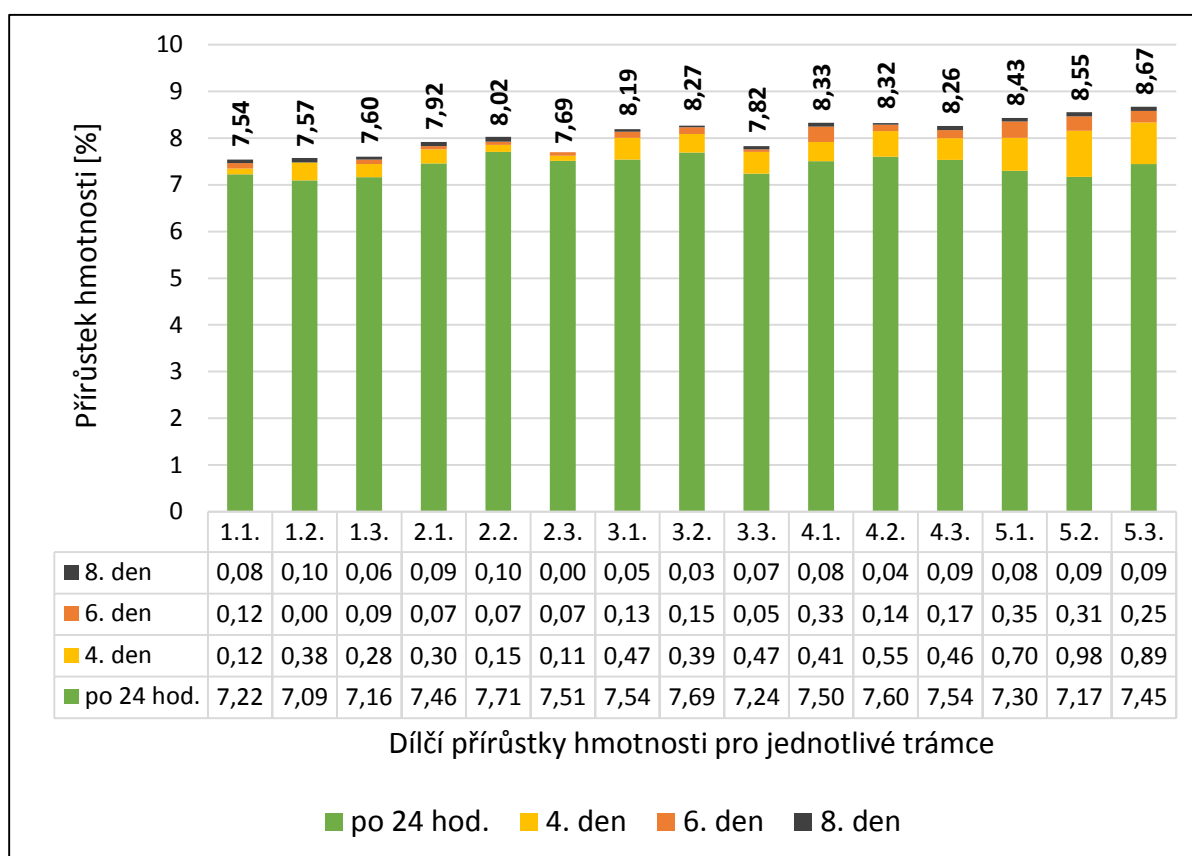
Obrázek 2.8 – Příprava vzorků pro zkoušku nasákavosti, vlastní tvorba



Obrázek 2.9 – Betonové trámce v laboratorní vaně naplněné vodou, vlastní tvorba

Další postup byl obdobný jako při vysoušení. Opět jsem v určitých časových intervalech vzorky musela zvážit. Abych mohla dopočítat otevřenou pórovitost přístupnou vodě, bylo nutné vážení provádět ve dvou etapách. První etapa zahrnovala hydrostatické vážení, při kterém se vážil vzorek na vahách zavěšený a ponořený do vody. V etapě druhé byla zjišťována hmotnost vzorku nasyceného vodou vážením na vzduchu. Tento proces jsem absolvovala tolikrát, dokud všechny vzorky nebyly vodou plně nasyceny, tedy dokud nedosáhly ustáleného stavu. Ustálený stav

je definován normou ČSN EN ISO 12570 a je totožný jako v případě vysušování. Platí tedy, že změna hmotnosti 3 vážení po sobě, provedených po 24h, musí být menší, než 0,1 % z celkové hmotnosti vzorku. Ustáleného stavu bylo dosaženo 8. den od začátku (počátku) nasakování vodou. Po posledním vážení jsem vzorky uložila do regálu, kde mohly přirozeně vyschnout. Hodnoty získané z vážení vzorků nasycených vodou na vzduchu a vážení hydrostatického, prováděného v průběhu vysoušení jsou zaznamenány v tabulce v příloze 2. Velikost přírůstku vlhkosti (vody) v objemu betonových trámců v průběhu procesu nasakování je zaznamenána (vynesena) v grafu:



Graf 2.3 - Přírůstky hmotnosti jednotlivých trámců v průběhu nasakování

2.2.2. Obrazová analýza betonových vzorků S3

Pro vyhodnocení porozity betonových krychlí obrazovou analýzou byla nejnáročnější příprava vzorků. V první řadě bylo nutné nechat krychle rozdělit na několik výřezů, které by bylo následně možné vyhodnotit. Jelikož se jednalo o krychle o rozměru 97 x 97 x 100 mm, obrátila jsem se na Kamenictví Záruba

v Divišově a požádala je s tímto úkolem o pomoc. Vzhledem k tomu, že pro práci běžně používají stolní pilu s diamantovým kotoučem o průměru 500 mm, nebyl pro ně problém deseticentimetrovou betonovou krychli uříznout. Pracovníci Kamenictví Záruba odvedli precizní práci, takže se ke mě dostaly 3 výřezy s velice rovnou a hladkou řezovou rovinou (plochou, kterou prochází řez).

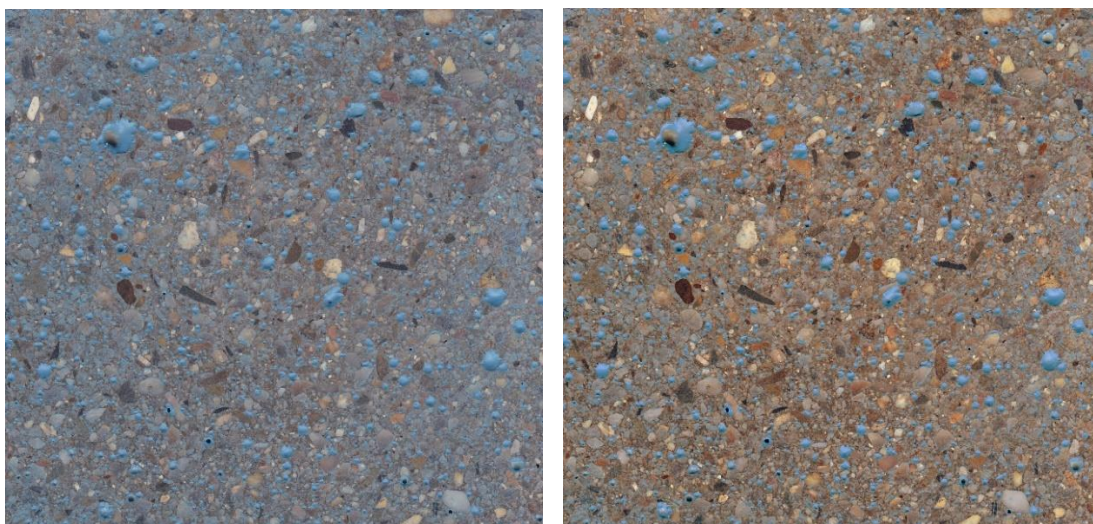
Další problém, který jsem musela vyřešit, bylo (se kterým jsem si musela poradit), jakou použít hmotu či chemickou látku, se kterou by se dalo co nejlépe zaplnit póry na povrchu řezné plochy všech velikostí a barevně je odlišit od cementového tmelu a kameniva. Zároveň tato hmota musela být dobře brousitelná, aby po úpravě vzorků zůstaly vidět pouze barevně odlišené póry zaplněné danou hmotou. Po dlouhém bádání mi byl doporučen rychleschnoucí akrylátový barevný plnič ve spreji BodyFill 360 v červené a modré barvě. Jedná se o přípravek, jenž se běžně používá v automobilovém průmyslu jako plnicí základ pro zaplnění i velmi jemných nerovností a rýh a po zaschnutí je nutné tuto vrstvu přebrousit. Dle údajů výrobce je sice určen pro kovové, případně dřevěné povrchy, ale jinak všemi parametry přesně vyhovoval mým požadavkům.

Při první aplikaci na beton dle návodu na použití se plnič dobře dostal do velkých pórů, ale ostatní, menší póry v nanesené vrstvě tvořily praskající vzduchové bubliny. I při nástřiku další vrstvy se barevný lak pouze hromadil okolo těchto dutinek a dovnitř se vůbec nedostal. Opustila jsem tedy návod na použití a způsob aplikace upravila svým potřebám. Ihned po nasprejování tenoučké vrstvy plniče na povrch betonu jsem tento film hadrem zatřela do pórů. Výhodou bylo, že po rozetření barvy zůstal na povrchu vzorku opravdu jen velmi jemný povlak, který se dal následně poměrně dobře zbrousit zpět na holý beton s barevně odlišenými póry. Pro přebroušení povrchu jsem použila brusku s brusným kotoučem na suchý zip o různých zrnitostech.



Obrázek 2.10 – Příprava výřezu betonové krychle pro obrazovou analýzu, vlastní tvorba

Poslední fází před samotným procesem vyhodnocování bylo převedení obrazu, jakožto fyzické 2D předlohy, do digitální podoby. Tento převod jsem provedla oskenováním vzorku na klasickém skeneru s nastavením rozlišení na 600 dpi. Jelikož na některých vzorcích se vyskytují různé větší nerovnosti vzniklé již při betonáži, též zabarvené plničem i po přebroušení, musela jsem tyto digitální obrazy oříznout pomocí softwaru Infranview. Ořezání obrazu bylo provedeno tak, aby byla u všech vzorků zachována stejná hodnocená plocha. Dále jsem tyto výřezy ještě dále upravovala v programu Gimp, který umožňuje vyvážení barev a úpravy jasu i kontrastu, díky čemuž jsou výsledné obrazy ve formátu jpg pro vyhodnocovací software QuickPHOTO INDUSTRIAL ve verzi 3.0. lépe zpracovatelné (analyzovatelné) s vyšší přesností výsledků.

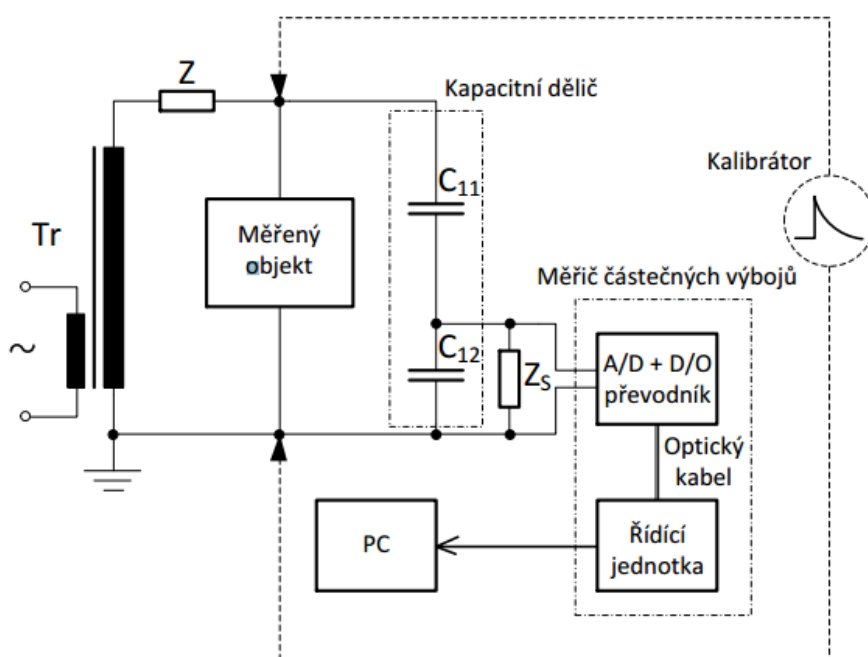


Obrázek 2.11 – Porovnání digitálních obrazů výřezů před a po úpravě, vlastní tvorba

Obrazová analýza byla stejně jako příprava vzorků 2. série provedena ve spolupráci s Ústavem skla a keramiky VŠCHT, kde mi umožnili přístup k vyhodnocovacímu softwaru QuickPHOTO INDUSTRIAL v. 3.0. S tímto programem jsem se naučila velmi rychle samostatně pracovat. Abych získala co nejpřesnější výsledky, pro každý digitální obraz sledovaného vzorku jsem obrazovou analýzu provedla minimálně 2krát.

2.3. Zjišťování pórovitosti měřením aktivity částečných výbojů

V první řadě je nutno říci, že metoda měření částečných výbojů není pro detekci porozity betonu primárně určena. Bylo proto pro začátek nejdůležitější zjistit, zdali je tato metoda na beton vůbec aplikovatelná a stanovit, jakým způsobem interpretovat změřené výsledky. Měření aktivity částečných výbojů na betonu bylo realizováno ve spolupráci s Katedrou elektroenergetiky Fakulty elektrotechnické ČVUT v Laboratoři vysokých napětí, kde mají pro toto měření přístrojové vybavení. Schéma zapojení obvodu měřícího pracoviště popisuje Obrázek 2.12 – Schéma zapojení obvodu měřícího pracoviště, převzato z [36].



Obrázek 2.12 – Schéma zapojení obvodu měřícího pracoviště, převzato z [36]

Obvod příslušného měřícího pracoviště sestává ze zkušební transformátoru Tr 120 kV, ČKD Praha, omezovací impedance Z [Ω], kapacitního děliče OMICRON 100 kV C_{11} , C_{12} , snímací impedance OMICRON Z_s a měřiče částečných

výbojů. Samotný měřič tvoří analogově-digitální převodník (A/D) a digitálně-optický převodník (D/O), dále pak optický kabel a řídicí jednotka. Pro kalibraci měření v tomto případě slouží elektronický kalibrátor Tettex.

Měřitelnost částečných výbojů byla ověřena na vzorcích 1. série, tedy na betonových krychlích 10 x 10 cm zapůjčených vedoucím bakalářské práce. Samotný postup měření částečných výbojů je jednoduchý a snadný, ale jelikož se jedná o zařízení pracující pod vysokým napětím, musí být prováděno osobou se zvláštní odbornou způsobilostí dle Vyhlášky č.50/1978, Sb. Měření se mnou tedy prováděli kvalifikovaní pracovníci Katedry elektroenergetiky FEL ČVUT.

Pro měření částečných výbojů je nejprve nutné zkoumaný vzorek zapojit do měřicího obvodu. To se provede jeho upevněním mezi dvě kovové elektrody. Pro měření betonu byly použity elektrody kruhového tvaru s průměrem 10 cm tak, aby pokryly co největší plochu zkoumané betonové krychle s hranou 10 x 10 cm. Před samotným měřením se u každého vzorku provádí kalibrace měřiče částečných výbojů. Poté se může přejít k samotnému měření, které spočívá ve spuštění zdroje VN a zvýšení napětí na požadovanou úroveň měření. Jakmile po nastavené hodnotě napětí vzorkem protéká proud, osciloskop (v našem případě PC) snímá aktivitu částečných výbojů, vyhodnocuje ji a převádí do diagramu.

Při úplně prvním měření aktivity částečných výbojů na betonu byl u měřených vzorků zjištěn nedostatek v podobě velkých nerovností povrchu zkoumaného tělesa, které způsobovaly nedostatečné přilnutí k elektrodám. Tento problém byl rozpoznán tak, že nedocházelo k opakovatelnosti výsledků měření a v případě otočení krychle, při měření jiných dvou hran, byl na obrazcích částečných výbojů (diagramu četnosti pulsů) patrný znatelně odlišný pattern (vzorek). Betonové krychle z 1. série vzorků tedy pro účely měření částečných výbojů nebyly použitelné.

Způsobem, jak daný problém vyřešit, bylo nové měření realizované na vzorcích 3. série. Tyto vzorky jsem v rámci přípravy pro obrazovou analýzu (popsáno v 2.2.2) musela nechat nařezat na několik menších částí. Kameníci z Kamenictví Záruba v Divišově, kteří řezání betonových krychlí prováděli, odvedli práci natolik precizní, že řezné hrany byly perfektně rovné, takže naprosto vhodné (ideální) k měření částečných výbojů.

I měření výřezů krychlí z 3. série vzorků ale ještě nebylo dokonalé a doprovázel ho jev, kdy při konstantním napětí 7 kV, kterému byl beton vystaven, výrazně klesala hodnota součtového náboje v průběhu času. Při snížení měřicího napětí na úroveň 3 kV

byla aktivita částečných výbojů téměř stabilní, ale vzhledem k velice malým, měřeným hodnotám součtového náboje je jisté, že aktivita neprobíhala ve všech dutinkách a vzduchových pórech. Jelikož při řezání betonových krychlí byl beton v kontaktu s vodou, která ochlazovala řezací kotouč, usoudili jsme, že za tímto problémem stojí právě voda (vlhkost) přítomná ve vzorku.

Vzhledem k tomu, že v té době již byly vybetonovány vzorky 2. série, které se stejně musely podrobit vysušení kvůli plánované zkoušce nasákavosti, se od měření aktivity částečných výbojů na výřezech betonových krychlí 3. série taktéž ustoupilo a počkalo se na vysušené betonové trámce. Navíc tyto vzorky měly nesmírnou výhodu v tom, že již při jejich výrobě byla pomocí provzdušňovací přísady záměrně ovlivněna jejich pórovitost, takže jsem mohla na základě logického úsudku rozlišit trámce s nejmenší a největší pórovitostí a zároveň bylo možné udělat si přibližnou představu o tom, jaké výsledky součtového náboje by ideálně měly vycházet. Měření těchto vysušených betonových trámců bylo stabilní, bez předchozích nedostatků a jeho výsledky jsou použity pro vyhodnocení této metody.

3. VÝSLEDKY A DISKUZE

3.1. Zkouška nasákavosti – gravimetrická metoda

Jak již bylo zmíněno v kap. 1.3.1, zkouška nasákavosti nám umožňuje získat představu o množství otevřených pórů přístupných vodě ve struktuře betonu, zjistit jeho objemovou hmotnost a množství vody, které je beton do své struktury schopen pojmout.

Pro výpočet těchto veličin je nutné znát jako vstupní data hmotnosti zkoumaných betonových trámců ve stavu vysušeném a ve stavu plně nasyceném vodou, kdy vážení trámců při nasákavosti je rozděleno na vážení vzorku nasyceného vodou na vzduchu a vážení hydrostatické (viz. kap. 1.3.1).

Hledané veličiny se pak spočítají jako:

Objemová hmotnost:

$$OH = \frac{m_0}{\frac{m_3 - m_4}{\rho_{H2O}}} \cdot 10^{-3} \quad (3.1)$$

Otevřená pórovitost přístupná vodě:

$$P = \frac{(m_3 - m_0) \cdot 100}{m_3 - m_4} \quad (3.2)$$

Nasákavost vodou:

$$NV = \frac{(m_3 - m_0) \cdot 100}{m_0} \quad (3.3)$$

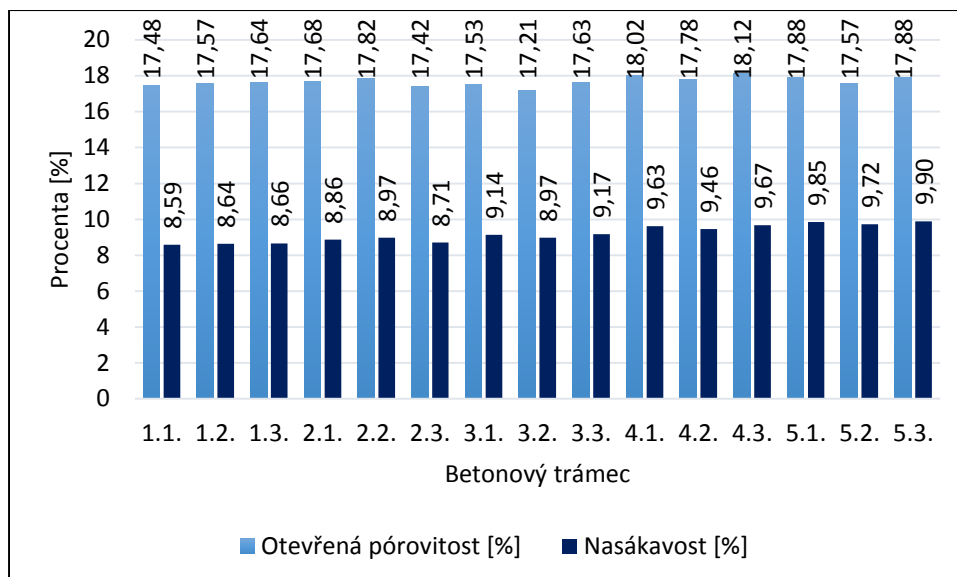
Kde m_0 je hmotnost vzorku po vysušení [g], m_3 je hmotnost vzorku nasyceného vodou při vážení na vzduchu, m_4 je hmotnost vzorku nasyceného vodou při hydrostatickém vážení a ρ_{H_2O} je hustota vody při laboratorní teplotě [g/cm^3].

Tyto hledané veličiny jsou vypočítané v následující tabulce, kde jsou současně zaznamenány vstupní hmotnosti vzorků vysušených a plně nasycených (nasáklých) vodou.

Tabulka 3.1 – Výsledky zkoušky nasákavosti

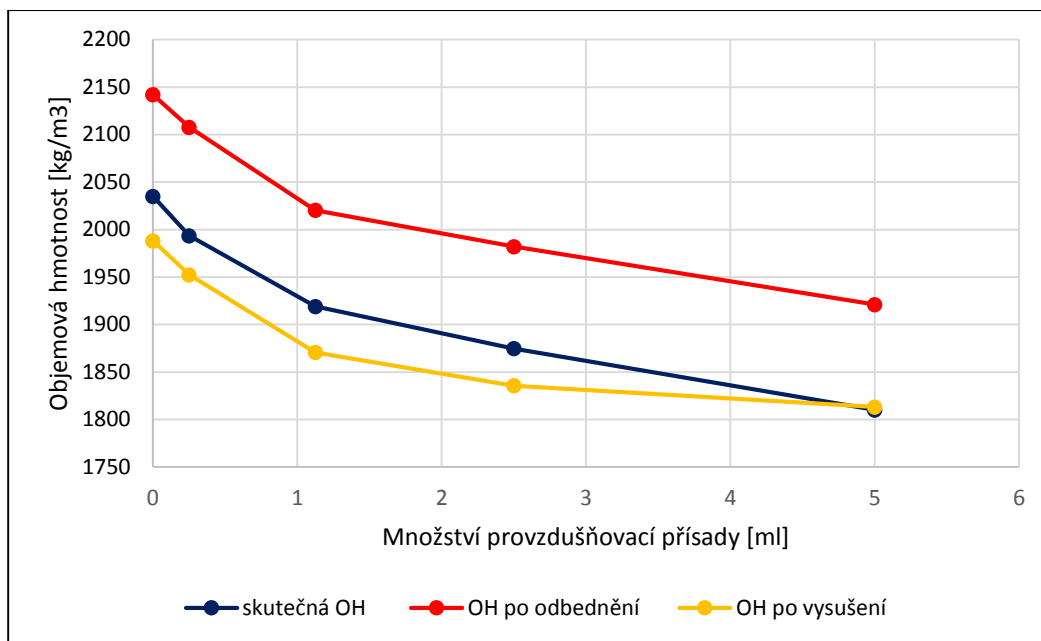
Sada trámčů	Číslo	Hmotnost vzorku po vysušení [g]	Hmotnost vzorku nasyceného vodou		OH [kg/m ³]	P [%]	NV [%]
			Vážení na vzduchu [g]	Hydrostat. vážení [g]			
1. sada prostý beton bez provzdušňovadla	1.1.	517,96	562,47	307,82	2034,01	17,5	8,6
	1.2.	522,93	568,09	311,08	2034,67	17,6	8,6
	1.3.	528,42	574,20	314,67	2036,07	17,6	8,7
2. sada provzdušňovadlo 0,25 ml	2.1.	518,40	564,34	304,50	1995,07	17,7	8,9
	2.2.	506,65	552,09	297,07	1986,71	17,8	9,0
	2.3.	518,10	563,24	304,07	1999,07	17,4	8,7
3. sada provzdušňovadlo 1,125 ml	3.1.	492,70	537,75	280,74	1917,05	17,5	9,1
	3.2.	488,19	531,98	277,47	1918,16	17,2	9,0
	3.3.	491,70	536,79	280,99	1922,20	17,6	9,2
4. sada provzdušňovadlo 2,5 ml	4.1.	472,20	517,66	265,45	1872,25	18,0	9,6
	4.2.	472,82	517,57	265,86	1878,43	17,8	9,5
	4.3.	478,42	524,69	269,33	1873,51	18,1	9,7
5. sada provzdušňovadlo 5,0 ml	5.1.	470,18	516,48	257,60	1816,21	17,9	9,8
	5.2.	468,95	514,54	255,12	1807,69	17,6	9,7
	5.3.	466,78	512,97	254,62	1806,77	17,9	9,9

Pro lepší představu a možnost srovnání jsou tyto výsledky převedeny do grafu.



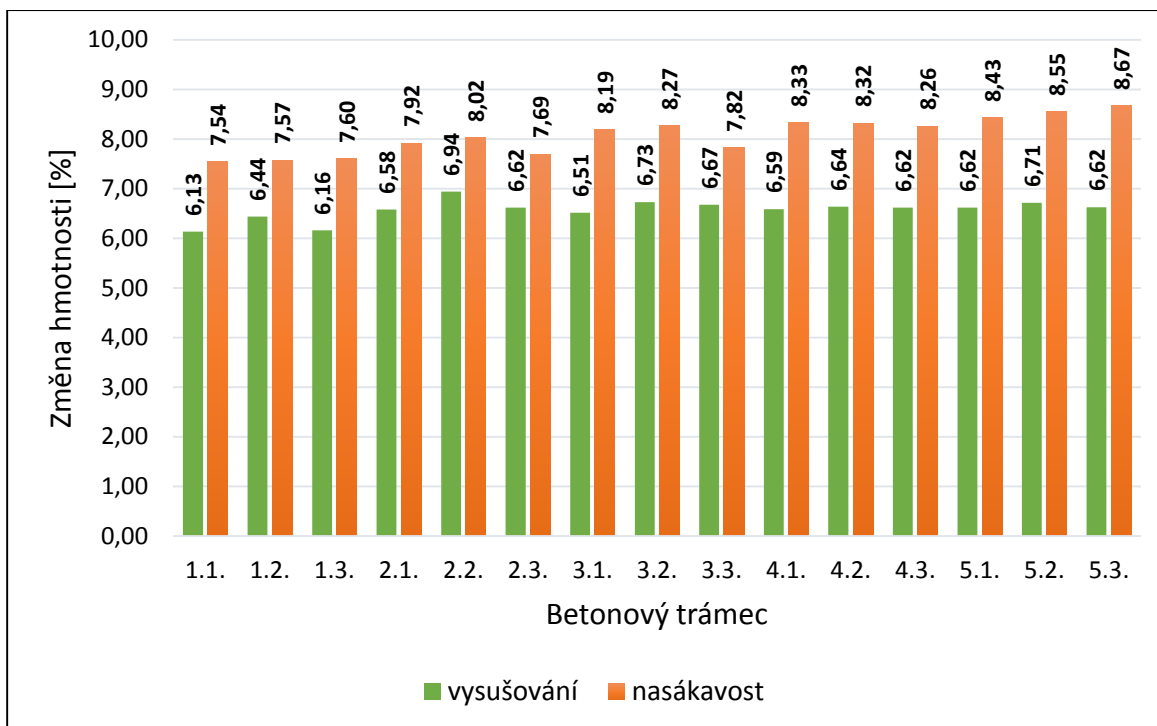
Graf 3.1 - Výsledky zkoušky nasákavosti

Zajímavé je i porovnání objemových hmotností sledovaných v závislosti na stavu vzorku, tedy objemových hmotností vzorků právě odbedněných, vzorků zcela vysušených a skutečných objemových hmotností získaných výpočtem ze zkoušky nasákavosti, vynesných v grafu 3.2. Z tohoto grafu lze ve všech třech případech vyčíst klesající trend objemové hmotnosti s rostoucí dávkou provzdušňovací přísady. Vztáhneme-li navíc tyto hodnoty k výsledkům otevřené pórovitosti, která je pro všechny betonové trávce v podstatě identická (shodná, stejná), je potom zřejmé, že pokles objemové hmotnosti způsobuje právě množství vzduchu zachycené v malých, uzavřených pórech vodě nepřístupných, jenž v betonovém trávci vytvořila provzdušňovací přísada. Z toho vyplývá, že celková pórovitost trávců s klesající objemovou hmotností vzrůstá.



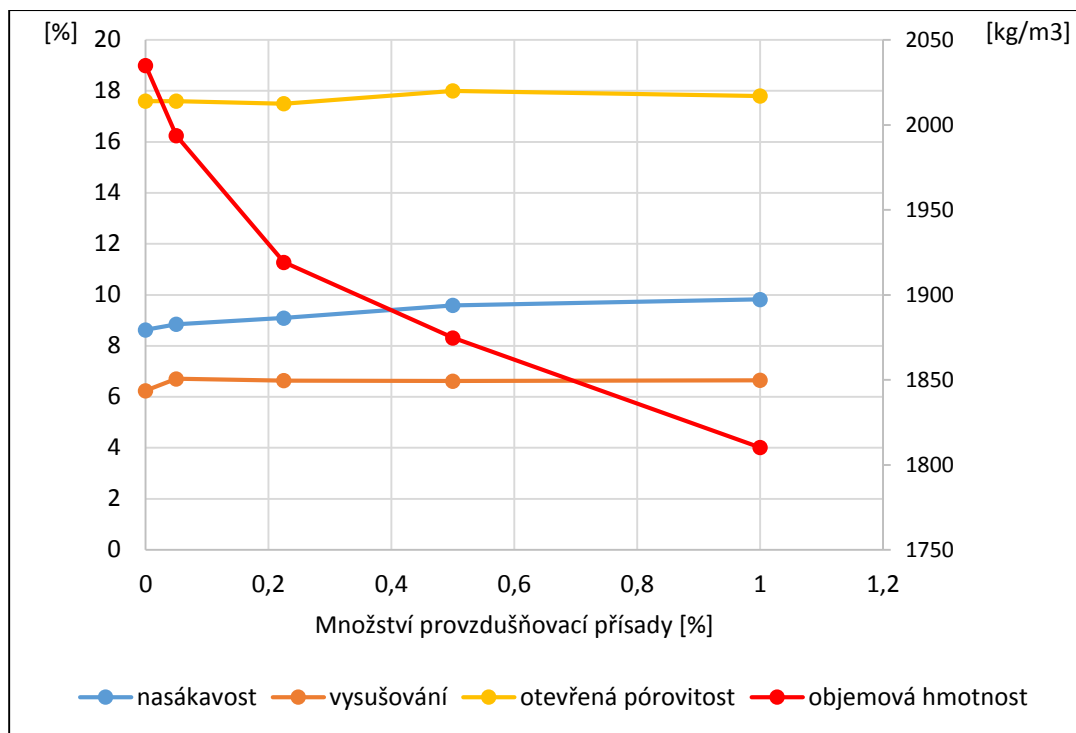
Graf 3.2 – Závislost objemové hmotnosti na množství provzdušňovací přísady

Z dat zjištěných v průběhu zkoušky nasákavosti lze dále posoudit (zhodnotit) chování jednotlivých betonových trámců při postupném vysušování a nasakování vodou. Při sledování dat v grafu 3.3 jde zřetelně vidět, že nejmenší úbytek vlhkosti při vysušování vykazují trámce z prostého betonu bez provzdušňovací přísady (1.sada). To je zapříčiněno tím, že trámce 1. sady byly betonovány a odebdeny o týden dříve, než trámce provzdušňované, a jejich vlhkost byla nižší již před samotným vysušováním. Všechny ostatní vzorky v průběhu vysušování vykazují vyrovnaný průběh, pouze trámec 2.2. z tohoto hodnocení vyčnívá a je u něj patrný nejvyšší úbytek vlhkosti. Vzhledem k tomu, že množství nasáklé vody do tohoto vzorku hodnoty ostatních trámců nijak nepřevyšuje a pohybuje se v tomto případě spíše blíže hodnotám nižším, lze tento úkaz v daném trámci přisoudit většímu množství zbytkové (nezhydratované) vody po odebdení oproti trámecům ostatním.



Graf 3.3 – Změny hmotnosti během vysušování a nasákavosti

Nejmenší přírůstek množství vlhkosti (vody) při nasakování opět vykazují trámečky 1. sady, tedy bez provzdušňovací přísady, což je ukazatelem nejmenší nasákavosti, kterou zároveň ověřují výsledky získané výpočtem v tabulce 3.1.. Dále je vidět, že až na výjimky v podobě trámčů 2.3. a 3.3. se množství vody nasáklé do objemu betonových trámčů s rostoucí dávkou provzdušňovací přísady plynule zvyšuje, kdy nejvyšších hodnot dosahují trámečky 4. a 5. sady, tedy trámečky s dávkou provzdušňovačla 2,5 a 5 ml. Tento trend potvrzuje i průběh vypočítaných hodnot nasákavosti. Současně se zvětšuje i rozptyl mezi hodnotami z procesu vysušování a procesu nasákavosti.



Graf 3.4 – Výsledky zkoušky nasákavosti v závislosti na množství provzdušňovadla

Z výše uvedených výpočtů a grafů lze vyvodit závěr, že vzhledem ke srovnání vypočítaných objemových hmotností a hodnot otevřené pórovitosti mají celkovou pórovitost nejmenší trávce z prostého betonu bez provzdušňovací přísady a naopak největší celkovou pórovitost vykazují trávce s nejvyšší dávkou provzdušňovací přísady, konkrétně trávce z 5. sady. Rozptyl hodnot otevřené pórovitosti přístupné vodě je příliš malý, nelze ho tedy nijak kategorizovat. Jelikož byla betonová směs pro všechny zkoušené trávce shodná a pouze se do ní v různém množství přidávala provzdušňovací přísada, která by na otevřenou pórovitost zásadní vliv mít neměla, domnívám se, že téměř shodných výsledků otevřené pórovitosti bylo dosaženo totožným výrobním procesem a zejména zhutňováním za stejných podmínek.

3.2. Obrazová analýza

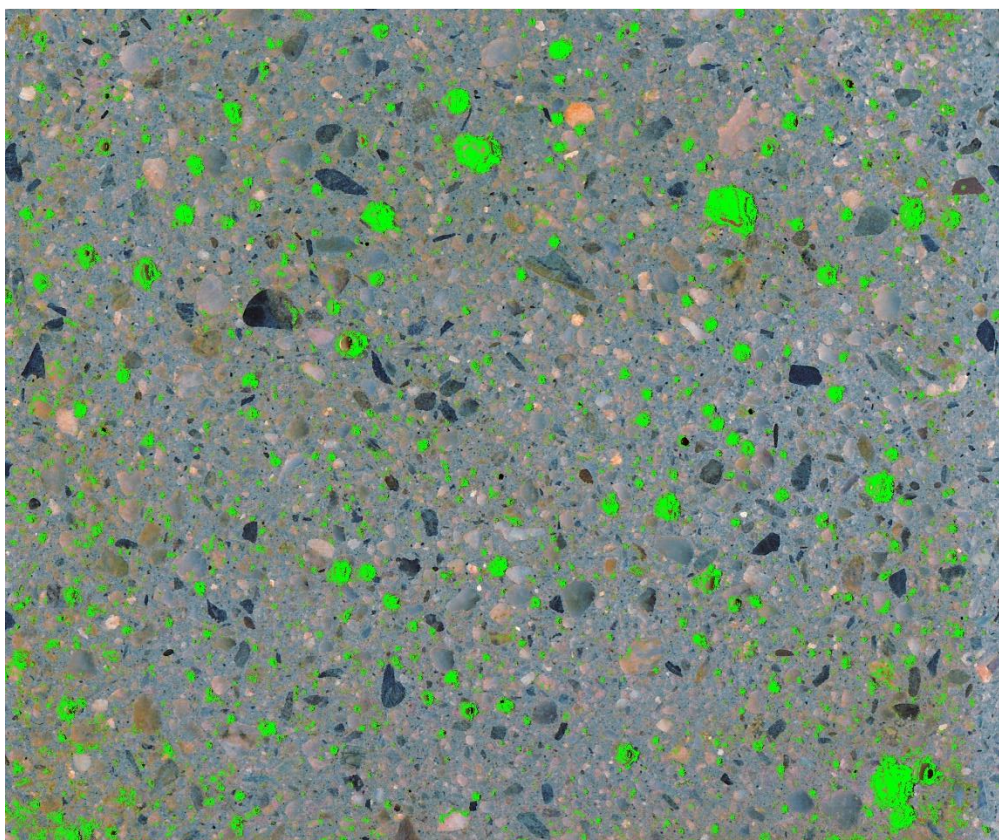
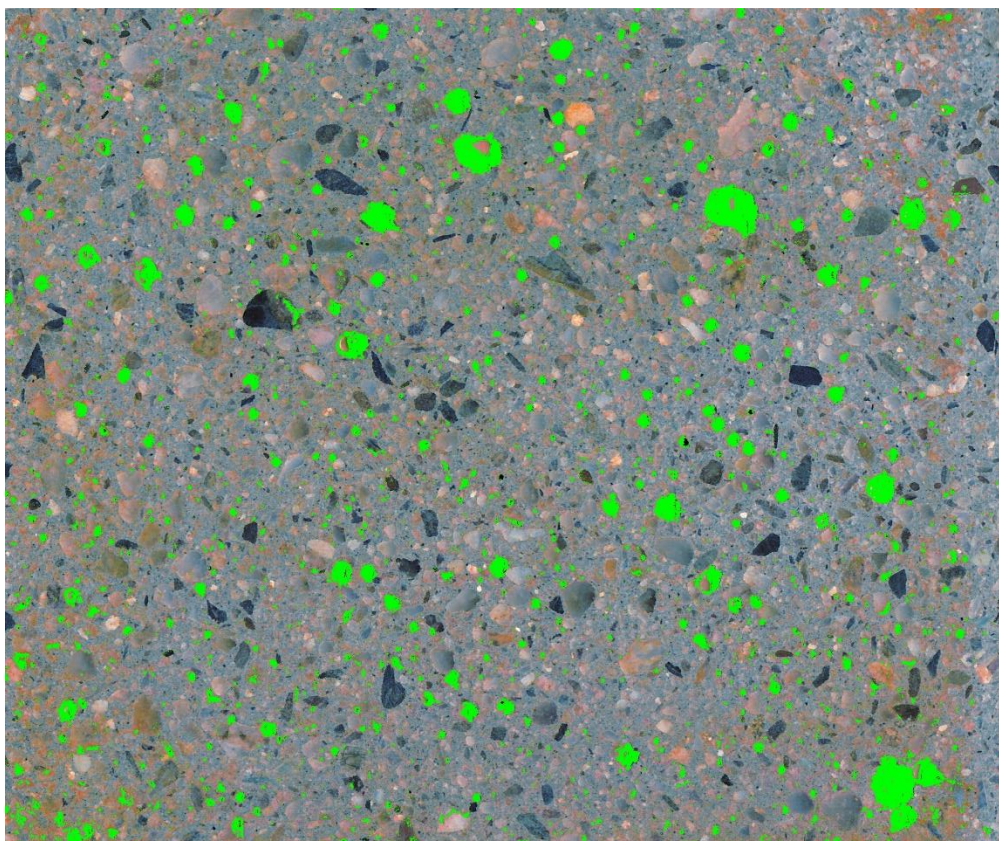
Největší problém v interpretaci výsledků představuje fakt, že data vyhodnocená softwarem se vztahují pouze k 2D ploše a i přes veškerou mou snahu se mi, bohužel, nepodařilo v žádných zdrojích vyhledat, jak tyto výsledky vztáhnout k celému objemu zkoumaného vzorku a jestli to vůbec lze. Norma ČSN EN 480-11 se zabývá zkušebními metodami stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu, ale v tomto případě se jedná o analýzu mikroskopickou, realizovanou za pomoci

speciálního stereoskopického mikroskopu. Takovéto zkoušky lze provádět např. pomocí měřicího zařízení Lucia Concrete, jenž zkoumané vzorky vyhodnocuje v souladu s danou normou a součástí této analýzy je i mimo jiné výpočet celkového obsahu vzduchových pórů vyjádřený v objemových procentech

Přesnost výsledků získaných obrazovou analýzou velmi úzce souvisí s kvalitně připraveným vzorkem pro tuto analýzu. V případě, že budou všechny póry zkoumané plochy dokonale barevně odlišeny od okolního povrchu v celém svém objemu, získáme výsledek velice přesný. Tento stav je ideální, v praxi ale připravit vzorek s těmito parametry jde obtížně. Dalším činitelem, který přesnost výsledků ovlivňuje je samozřejmě lidský faktor – rozlišení lidského oka, jímž je vyhodnocovací proces softwaru podmíněn.

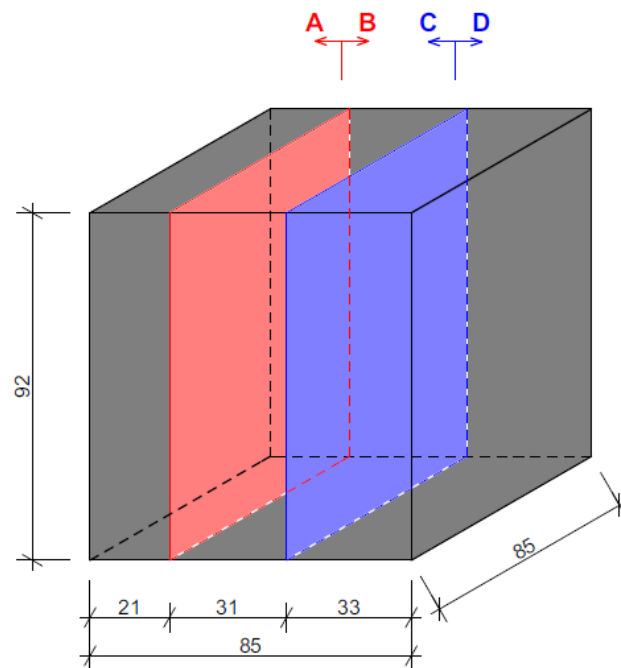
Při vyhodnocování svých vzorků jsem se setkávala zejména s problémem nedokonale zbroušeného povrchu, kdy částičky barevného akrylátového plniče zůstaly zachyceny na zrnech kameniva nebo v rýhách vzniklých při řezání betonových krychlí. Tento problém jsem sice částečně eliminovala grafickou úpravou obrazů vzorků v digitální podobě, i přesto je tento defekt při vyhodnocení někde patrný (viz. příloha 4). Druhým nedostatkem, který nepříznivě ovlivňuje výsledek je, že při broušení u větších pórů docházelo k vydrolení plniče z objemu těchto pórů. V případě, že barva póru v tomto místě byla shodná s barvou kameniva nebo cementového tmelu, nebylo možné tuto plochu póru do vyhodnocení zahrnout. Bylo výhodou, když se u daného vzorku vyskytovaly oba tyto jevy souběžně, jelikož právě části jako kamenivo a rýhy v materiálu softwarem zahrnuté do výsledné porozity kompenzovaly nevyhodnocené části pórů v místech vydroleného plniče.

Z výše popsaných důvodů jsem obrazovou analýzu pro každý vzorek provedla minimálně 2x a následným porovnáním obrazových výstupů zhodnotila, který výsledek lze považovat za nejpřesnější. Tato hodnota představující procentní zastoupení pórů ve zkoumané ploše je v tabulce výsledků zvýrazněna zeleně. Výstupy softwaru se získanými hodnotami procentního zastoupení pórů ve zkoumané ploše výřezu z betonové krychle B30 jsou pro představu a porovnání zobrazeny na následující obrázku. 3.1. Všechny ostatní obrazy zkoumaných ploch, ke kterým se vztahuje následující vyhodnocení, jsou pro ověření v příloze 4.



Obrázek 3.1 – Porovnání výstupů z obrazové analýzy výřezu krychle B30 D, vlastní tvorba

B 30:



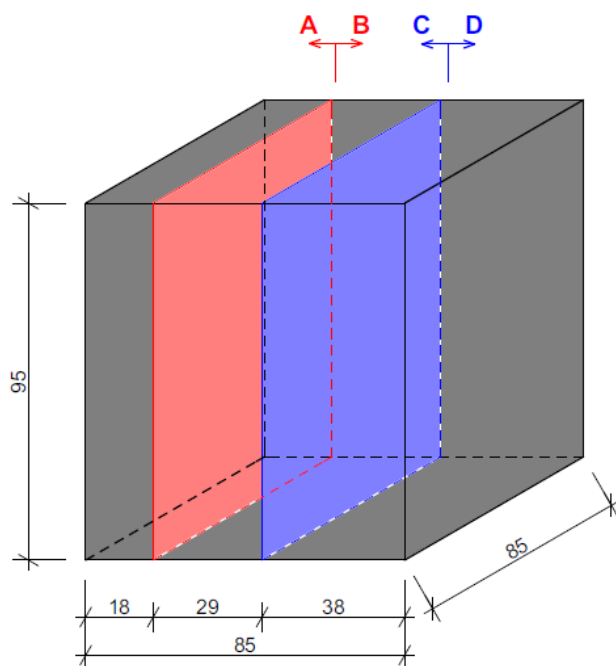
Obrázek 3.2 – Schéma hodnocených výřezů betonové krychle B 30, vlastní tvorba

Tabulka 3.2 – Výsledky obrazové analýzy pro výřezy krychle B30

B30	1.	2.
A	4,57%	5,26%
B	5,31%	6,89%
C	5,47%	5,83%
D	5,61%	6,32%

Z těchto výsledků je patrné, že vždy u protilehlých stran jednoho řezu je výsledná pórovitost obou těchto ploch téměř totožná. Hodnota zastoupení pórů v ploše se zároveň s menšími odchylkami shoduje u všech zkoumaných výřezů, což poukazuje na to, že póry by mohly být v objemu vzorku rozmístěny rovnoměrně a pórovitost celé betonové krychle by se mohla pohybovat v rozpětí těchto hodnot. Porovnáním vstupních obrazů těchto výřezů lze vidět, že i distribuce velikosti pórů v ploše je pro všechny výřezy obdobná.

B30 nehtněný:



Obrázek 3.3 - Schéma hodnocených výřezů betonové krychle B 30 nehtněné, vlastní tvorba

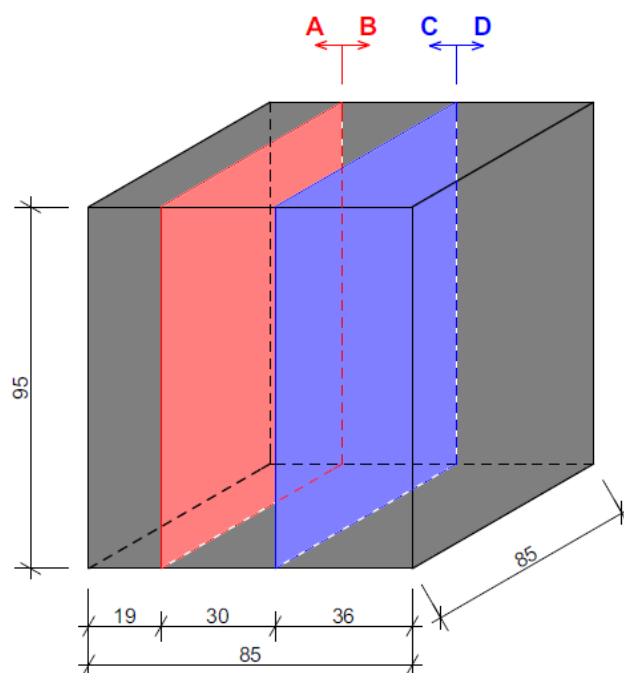
Tabulka 3.3 - Výsledky obrazové analýzy pro výřezy krychle B30 nehtněný

B30 Nehut	1.	2.
A	7,02%	7,91%
B	5,58%	6,01%
C	6,83%	8,02%
D	5,59%	5,68%

Interpretace výsledků u krychle z nehtněné betonové směsi Baunit Beton B30 je problematická a hodnoty porozity v daných plochách získané obrazovou analýzou nelze kvantifikovat. U výřezu A sice vychází výsledky obou analýz podobně, při přiblížení hodnocené oblasti je ale v obou případech patrné, že dochází k započítání i jiných částí betonu, než samotných pórů, v důsledku nedokonale zbroušeného a graficky upraveného výřezu. Zároveň se v tomto vzorku nenachází takové množství nevyplněných pórů, u nichž došlo k vydrolení plniče při broušení povrchu, které by bylo možné vztáhnout na úkor ploch zabarvených navíc. Z toho důvodu výsledky získané pro výřez A nelze brát jako směrodatné. Tentýž problém platí i pro výřez D, byť jsou výsledky z obou analýz takřka shodné.

U výřezu B se vyskytuje přesně opačný jev, kde značné plochy velkých technologických pórů nejsou obrazovou analýzou vůbec vyhodnoceny. Pokud by tyto plochy černé barvy byly do vyhodnocovacího procesu zahrnuty, došlo by k započítání i veškerých tmavých zrn kameniva. Skutečná porozita výřezu B tedy bude rozhodně vyšší, než softwarem vypočítaných 5,5 - 6%. Výsledek 6,83% pro výřez C se dle mého názoru přibližuje skutečnosti nejvíce a lze ho považovat za platný. Vzhledem k výše uvedenému rozboru výsledků pro tuto betonovou krychli nelze vyvodit žádné závěry ani teorie.

Proof beton:



Obrázek 3.4 - Schéma hodnocených výřezů betonové krychle Proof beton, vlastní tvorba

Tabulka 3.4 - Výsledky obrazové analýzy pro výřezy krychle Proof betonu

Proof beton	1.	2.
A	5,69%	6,29%
B	8,00%	8,61%
C	4,78%	5,06%
D	5,04%	5,06%

U tohoto vzorku betonu se zcela jasně shoduje pórovitost protilehlých stran C a D, a jelikož při opakované analýze je tato hodnota téměř totožná, lze ji považovat za přesnou a skutečnou. Naopak u stran A a B nastal veliký nepoměr. Při důkladnějším

zkoumání výřezu B při velkém přiblížení ale nelze říci, že by se zde ve zvýšené míře vyskytoval jev zabarvení kameniva či jiných částí betonové struktury vlivem špatného zbroušení. Vyšší výslednou hodnotu oproti ostatním lze s nejvyšší pravděpodobností přisoudit několika velkým technologickým pórům, které jsou v makrostruktuře zřetelně vidět.

Ze vstupních obrazů (viz. příloha 4) jde pozorovat, že betonová krychle tvořená směsí betonu Baunit Proofbeton obsahuje zejména velké množství menších, drobných pórů. V případě výřezů C a D jejich procentní zastoupení v ploše číselně odpovídá celkové plošné pórovitosti krychlí z betonové směsi Baunit B30, ve které se objevují v poměrně vyváženém množství póry různých velikostí. Výskyt větších technologických pórů ve zkoumaném výřezu vzorku výsledný obsah pórů v ploše u tohoto vzorku tedy výrazně zvyšuje a celková porozita krychle z betonové směsi Proofbeton tak v důsledku výskytu těchto pórů může být ve skutečnosti vyšší, než z daných výřezů vyplývá.

3.3. Měření aktivity částečných výbojů

Při důkladném hledání zdrojů ke své bakalářské práci se mi nepodařilo ani v zahraniční literatuře či ve vědeckých publikacích najít žádné dokumenty zabývající se užitím této metody pro stavební materiály. Pouze jistý Associate Professor (u nás odpovídající titul Docent) Narayanan Neithalath, PhD. z Arizona State Univerzity se zabýval měřením elektrické impedance pórobetonů. Jelikož se tedy žádné záznamy o měření aktivity částečných výbojů na betonu nepodařilo dohledat, odrazovým můstkem pro vhodnou interpretaci získaných výsledků byla fakta platná pro diagnostiku izolačních systémů v elektrotechnice.

Dle této teorie by výsledkem měření aktivity částečných výbojů měl být záznam, ze kterého vyplývá, že čím vyšší aktivita částečných výbojů je naměřená, tím vyšší je pórovitost betonu. Aktivitu částečných výbojů v tomto případě bylo neoptimálnější hodnotit pomocí parametrů sad pulsů částečných výbojů, kam patří střední proud částečných výbojů, součtový náboj a četnost impulsů částečných výbojů. Definice těchto veličin je popsána v kapitole 1.3.5.

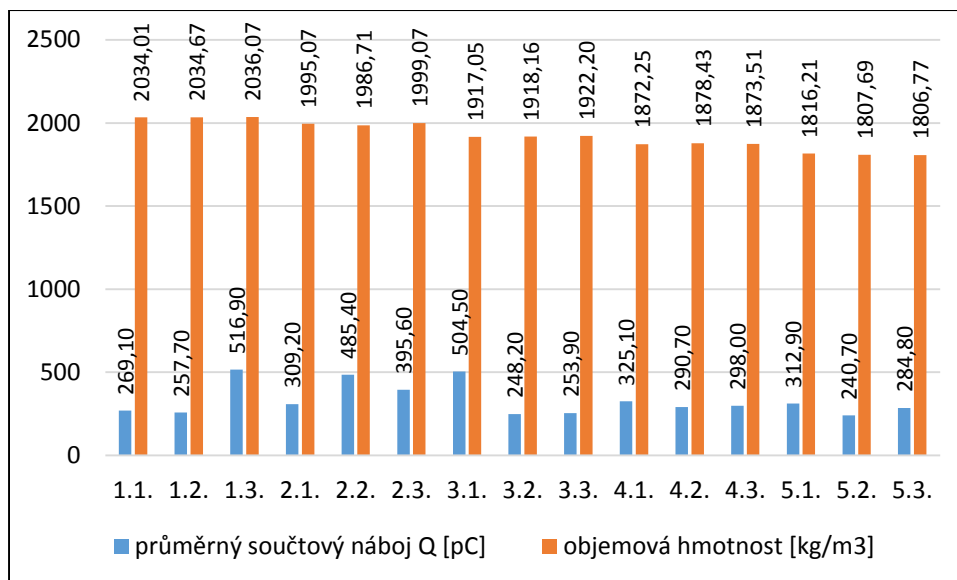
Hodnoty těchto veličin naměřené u jednotlivých betonových trámů jsou zaznamenány v následující tabulce. Měření bylo prováděno při velikosti zkušebního

napětí 10 kV síťové frekvence, kalibrace byla prováděna při hodnotě součtového náboje 100 pC.

Tabulka 3.5 – Vyhodnocení měření částečných výbojů

Sada trámců	Číslo	Průměrný součtový náboj Q [pC]	Četnost impulsů n [kPDs/s]	Střední proud ČÁSTEČNÝ VÝBOJ I [μ C/s]
1. sada prostý beton bez provzdušňovadla	1.1.	269,10	32,08	0,975
	1.2.	257,70	38,65	1,417
	1.3.	516,90	30,41	1,341
2. sada provzdušňovadlo 0,25 ml	2.1.	309,20	31,38	0,924
	2.2.	485,40	18,18	0,846
	2.3.	395,60	31,56	1,450
3. sada provzdušňovadlo 1,125 ml	3.1.	504,50	17,20	0,737
	3.2.	248,20	8,59	0,279
	3.3.	253,90	41,15	1,618
4. sada provzdušňovadlo 2,5 ml	4.1.	325,10	34,45	1,479
	4.2.	290,70	33,73	1,055
	4.3.	298,00	34,14	1,187
5. sada provzdušňovadlo 5 ml	5.1.	312,90	36,63	1,486
	5.2.	240,70	36,42	1,367
	5.3.	284,80	27,68	0,864

V případě detekce částečných výbojů v objemu měřených betonových vzorků jsem v první řadě vyhodnocovala hlavně součtový náboj. Pro srovnání průměrného součtového náboje a pórovitosti betonových trámců jsou tyto dvě hodnoty vyneseny v grafu. Pórovitost betonových trámců je v tomto případě zastoupena objemovou hmotností.



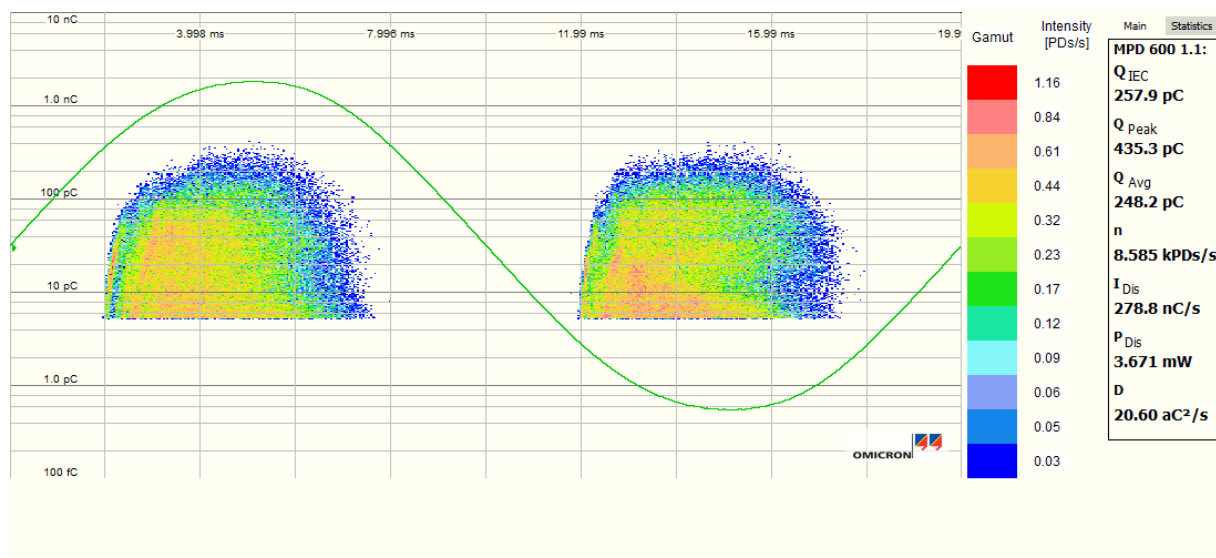
Graf 3.5 – Porovnání průměrného součtového náboje s objemovou hmotností trámců

Jak je z tabulky i z grafu patrné, nelze tvrdit, že by mezi velikostí průměrného součtového náboje a pórovitostí zkoušených betonových trámců platila nějaká přímá závislost. Tuto závislost, bohužel, nepotvrzují ani změřené četnosti impulsů, ani střední proud částečných výbojů. Jelikož se ale jedná o prvotní průzkum využití této metody na trámcích betonu, lze předpokládat zkreslení výsledků vlivem mnoha různých příčin, které v průběhu měření nebylo možné potvrdit ani vyvrátit.

Samotné výsledky mohou být do značné míry ovlivněny velkými technologickými póry na povrchu hran betonových trámců, které byly ve styku s elektrodami. Jedná se o případ znázorněný na obr. 3.7 a je možné, že velké i menší rozdíly ve výsledných velikostech průměrného součtového náboje mohou být tímto defektem způsobeny. V případě, že se na styku s elektrodou tyto velké póry vyskytují, mohou výsledný součtový náboj značně zvyšovat. Výskyt velkých technologických pórů na hranách některých trámců je přitom z obr. 3.7 patrný. V neposlední řadě je nutné upozornit i na možné chyby v zapojení měřícího obvodu, které také mohou výsledný součtový náboj ovlivnit.

Dalším výstupem z měření jsou obrazce částečných výbojů (diagramy četnosti pulsů). Podle umístění částečných výbojů na křivce napájecího napětí, tedy podle fázového úhlu částečných výbojů, lze rozlišit druh výbojové činnosti a určit tak místo jeho výskytu. Existuje pět základních obrazců, viz. kapitola 1.3.5, přičemž v případě měření částečných výbojů na zkoumaných betonových trámcích jsem se setkala pouze s obrazcem typu C a typu D.

Typický obrazec typu C vytváří výbojová činnost např. u trámce 3.2.



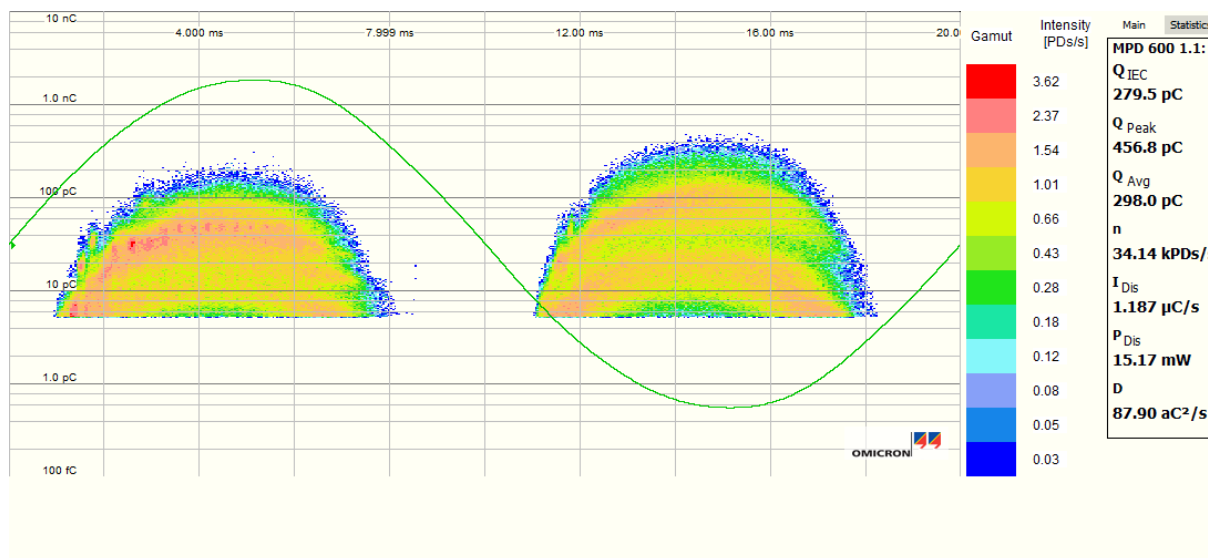
Obrázek 3.5 – Diagram četnosti pulsů částečných výbojů pro betonový trámec 3.2., vlastní tvorba

Obrazec typu C vzniká při výbojové činnosti v dutinkách v pevném izolantu, jedná se tedy skutečně o vnitřní výboje v porézni struktuře betonu. Zde je patrná symetrie, kdy pulsy v obou půlperiodách mají přibližně stejnou velikost, navíc oblast s nejvyšší intenzitou pulsů není nijak výrazná a převažující, což poukazuje na rovnoměrné rozložení pórů v objemu sledovaného vzorku. Jelikož intenzita částečných výbojů se pohybuje převážně ve střední oblasti, lze se domnívat, že tyto póry jsou menších rozměrů. Z těchto výsledků je tedy možné očekávat, že tento betonový trámec obsahuje velké množství malých vzduchových pórů v celém sledovaném objemu. Vzhledem k výsledné velikosti průměrného součtového náboje se nepředpokládá výskyt velkých, technologických pórů ve zkoumaném objemu.

Některé betonové vzorky vytvářely obrazce nesymetrické – typu D, kdy je velikost pulsů v první půlperiodě odlišná od pulsů v půlperiodě druhé. Stejně jako v předchozím případě se jedná o vnitřní výbojovou činnost – póry ve vnitřní struktuře betonu, avšak vyšší velikost pulsů u jedné z půlperiod poukazuje na výboje v blízkosti elektrody.

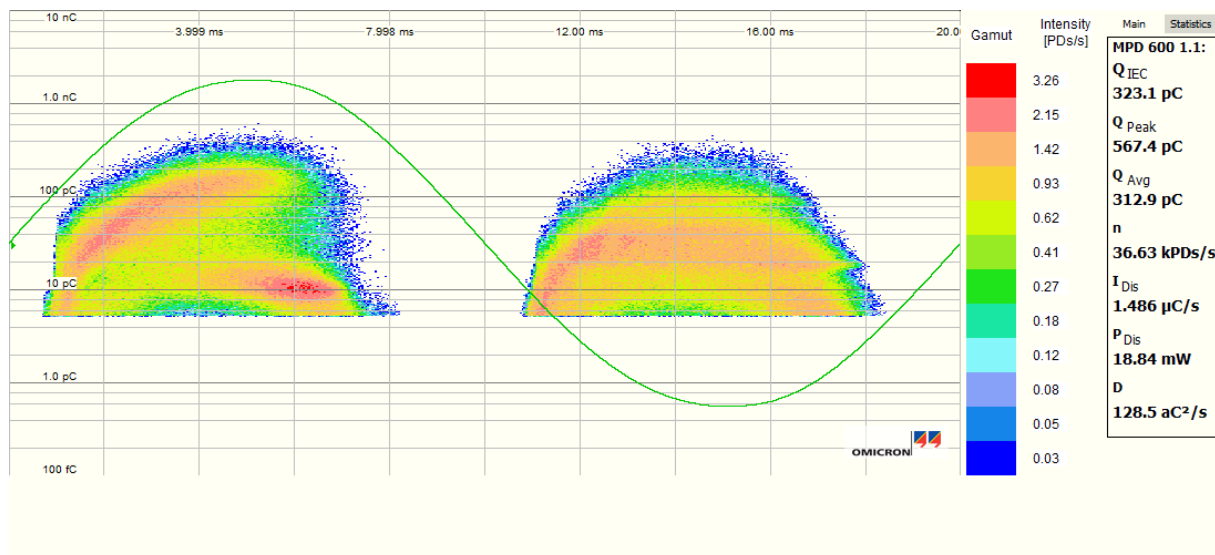
Pro příklad je uveden diagram četnosti pulsů betonového trávce 2.3. U tohoto vzorku lze očekávat zvýšenou koncentraci vzduchových dutinek v blízkosti zemnicí elektrody (u hrany trávce, která je v kontaktu s touto elektrodou). Možnou interpretací tohoto obrazce je výskyt obrovského množství malých pórů, ovšem s ohledem na

intenzitu se zde s největší pravděpodobností vyskytují místa (oblasti), kde jsou tyto póry velmi zhuštěny. Vyšší hodnota průměrného součtového náboje může ukazovat na přítomnost několika pórů větší velikosti (technologických pórů).



Obrázek 3.6 - Diagram četnosti pulsů částečných výbojů pro betonový trámec 2.3., vlastní tvorba

Zajímavostí je, že téměř u všech zkoušených trámců se objevuje pattern, kdy se nejvyšší intenzita částečných výbojů vyskytuje při kladné polaritě v jiných oblastech, než při polaritě záporné. Tento jev se nejspíše vyskytuje proto, že k měření částečných výbojů na těchto trámcích velikosti 4 x 4 x 16 cm byly použity tytéž elektrody, které byly obstarány pro původně měřené krychle 10 x 10 cm. Jelikož elektrody značně přesahovaly hrany trámců, ke kterým byly přiloženy, mohlo docházet k toku (průchodu) svodového proudu i přes horní a dolní povrch betonových trámců, přičemž právě horní povrch představuje hrbolatá strana.



Obrázek 3.7 - Diagram četnosti pulsů částečných výbojů pro betonový trámec 1.1., vlastní tvorba

Vzhledem k tomu, že existuje tolik faktorů, kterými mohly být výsledky zkruseny, nelze využití této metody ke zjišťování pórovitosti betonu hned zavrhnout. Spíše naopak, tyto problémy představují další výzvy, kterými má smysl se dále zabývat.

ZÁVĚR

Tato práce se zabývala problematikou pórovitosti betonu se zaměřením na možnosti měření této veličiny. První část seznamuje s minimálním teoretickým základem v této oblasti, kde jsou mimo jiné shrnuty informace ohledně činitelů podílejících se na tvorbě porézní struktury betonu a popsán vliv pórovitosti na ostatní vlastnosti betonu, jakými jsou zejména pevnost v tlaku a trvanlivost. Následující část řeší metody měření pórovitosti. Zde jsou uvedeny metody tradiční, současně je ale v této části představena i metoda měření částečných výbojů, která se v praxi zatím používá pouze v odvětví elektrotechniky.

Dále je v práci podrobně popsán postup výroby jednotlivých betonových vzorků včetně jejich přípravy pro zkoušky a příslušná měření pórovitosti. K těmto účelům byly vytvořeny 3 série vzorků z různých betonových směsí, přičemž vzorky 1. série sloužily pouze pro ověření měřitelnosti aktivity částečných výbojů na betonu jako takovém a nejsou součástí vyhodnocení.

Vzorky 2. série byly připraveny z cementového betonu, do kterého byla dávkována v různém množství provzdušňovací přísada. Tyto trámce byly podrobeny zkoušce nasákavosti, kterou byla zjišťována jejich objemová hmotnost, otevřená pórovitost a nasákavost. Z výsledků je patrný trend klesající objemové hmotnosti s rostoucí dávkou provzdušňovací přísady. Nejvyšší objemovou hmotností se tedy vyznačují betonové trámce 1. sady – bez provzdušňovačla a nejnižší objemovou hmotnost vykazují trámce 5. sady – s dávkou provzdušňovačla 5 ml. Výsledná hodnota otevřené pórovitosti je u všech trámec téměř totožná, z čehož vyplývá, že objemová hmotnost klesá v důsledku rostoucího množství malých uzavřených vzduchových pórů vytvořených provzdušňovací přísadou s jejím zvyšujícím se množstvím. Zajímavostí je, že nasákavost oproti téměř konstantní otevřené pórovitosti se zvyšující se dávkou provzdušňovačla mírně vzrůstá.

Pórovitost vzorků 3. série, připravených z průmyslově vyráběných suchých betonových směsí, byla vyhodnocována prostřednictvím obrazové analýzy. Na tyto výsledky měla značný vliv kvalita vstupních dat v podobě digitálních obrazů výřezů s barevně odlišenými póry. Navíc se jedná o hodnoty vztažené k 2D ploše a za daných

okolností je nebylo možné do 3D objemu vzorku interpretovat. Proto se jedná pouze o hodnoty orientační.

Aktivita částečných výbojů byla měřena na vzorcích 2. i 3. série, ovšem jelikož vzorky 3. série nebyly vysušovány a v době měření obsahovaly poměrně značné množství vody, což měření značně zkreslovalo a komplikovalo, nejsou tyto výsledky v konečném vyhodnocení zahrnuty. Průměrný součtový náboj, četnost impulsů i střední proud částečných výbojů, měřené na betonových trámcích 2. série se u každého vzorku značně liší. Z výsledků měření aktivity částečných výbojů na těchto trámcích tedy nevyplývá žádná přímá závislost vzhledem k pórovitosti zastoupené objemovou hmotností. Je ale nutné připomenout, že aplikace této metody ke zjišťování pórovitosti betonu byla v rámci této práce čistě experimentální, a že existuje mnoho faktorů, které mohly výsledky měření do značné míry zkreslovat. V tuto chvíli tuto metodu nelze pokládat za zcela věrohodnou, zároveň ale nelze závěrem vyvodit, že další studium využití této metody ke zjišťování pórovitosti betonu je bezvýznamné.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 – Schéma vnitřní struktury betonu, vlastní tvorba	11
Obrázek 1.2 – Závislost pevnosti betonu na hodnotě vodního součinitele, převzato z [3]	15
Obrázek 1.3 – Mikroskopický snímek provzdušněného betonu, převzato z [3]	19
Obrázek 1.4 – Závislost provzdušnění cementové kaše na množství provzdušňovací přísady, převzato z [6].....	21
Obrázek 1.5 – Schéma vypuzování vzduchu z betonu zhutňováním, převzato z [6]	25
Obrázek 1.6 – Závislost velikosti vodního součinitele na pevnost betonu v tlaku s ohledem na způsob zhutňování, převzato z [16].....	27
Obrázek 1.7 – Vliv vodního součinitele s ohledem na druh použitého cementu na pevnost betonu v tlaku [14]	29
Obrázek 1.8 – Degradální procesy ovlivňující trvanlivost betonu [21].....	31
Obrázek 1.9 – Princip rtuťové porozimetrie, převzato z [26]	35
Obrázek 1.10 – Průběh vícevrstvé adsorpce plynu, převzato z [29]	37
Obrázek 1.11 – Interpretace sorpční izoterm podle teorie multimolekulární adsorpce (teorie BET), převzato z [31].....	38
Obrázek 1.12 – Systém pro stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu, převzato z [33].....	40
Obrázek 1.13 – Ideální tvar elektrického impulsu při částečném výboji, vlastní tvorba.....	41
Obrázek 1.14 – a) Plynová dutinka uvnitř materiálu, b) Plynová dutinka pod elektrodou, vlastní tvorba.....	42
Obrázek 1.15 – Znázornění elektrických kapacit v materiálu s plynovou dutinkou, vlastní tvorba.....	42
Obrázek 1.16 – Náhradní elektrické schéma pevného dielektrika s plynovou dutinkou (Gemant – Philippowův obvod), vlastní tvorba	43
Obrázek 1.17 – Časový průběh napětí a proudu, převzato z [35]	44
Obrázek 2.1 – Betonové trámce 2. série, vlastní tvorba.....	50
Obrázek 2.2 – Vážení betonového trámce, vlastní tvorba.....	50
Obrázek 2.3 – Bednicí formy pro betonové krychle 3. série, vlastní tvorba	52
Obrázek 2.4 – Pytle průmyslově vyráběné betonové směsi pro betonové krychle 3. série, vlastní tvorba.....	53
Obrázek 2.5 – Míchání betonové směsi, vlastní tvorba.....	54
Obrázek 2.6 – Čerstvý beton uložený do bednicích forem, vlastní tvorba.....	55
Obrázek 2.7 – Vysoušení betonových trámců v laboratorní sušárně, vlastní tvorba.....	56
Obrázek 2.8 – Příprava vzorků pro zkoušku nasákavosti, vlastní tvorba.....	58
Obrázek 2.9 – Betonové trámce v laboratorní vaně naplněné vodou, vlastní tvorba	58

Obrázek 2.10 – Příprava výřezu betonové krychle pro obrazovou analýzu, vlastní tvorba ...	61
Obrázek 2.11 – Porovnání digitálních obrazů výřezů před a po úpravě, vlastní tvorba.....	61
Obrázek 2.12 – Schéma zapojení obvodu měřicího pracoviště, převzato z [36].....	62
Obrázek 3.1 – Porovnání výstupů z obrazové analýzy výřezu krychle B30 D, vlastní tvorba	71
Obrázek 3.2 – Schéma hodnocených výřezů betonové krychle B 30, vlastní tvorba.....	72
Obrázek 3.3 - Schéma hodnocených výřezů betonové krychle B 30 neuhutněné, vlastní tvorba	73
Obrázek 3.4 - Schéma hodnocených výřezů betonové krychle Proof beton, vlastní tvorba ..	74
Obrázek 3.5 – Diagram četnosti pulsů částečných výbojů pro betonový trámec 3.2., vlastní tvorba.....	78
Obrázek 3.6 - Diagram četnosti pulsů částečných výbojů pro betonový trámec 2.3., vlastní tvorba.....	79
Obrázek 3.7 - Diagram četnosti pulsů částečných výbojů pro betonový trámec 1.1., vlastní tvorba.....	80

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1 Klasifikace pórů v zatvrdlé cementové pastě	12
Tabulka 1.2 - Typy obrazců částečných výbojů	45
Tabulka 2.1 – Složení betonové směsi	48
Tabulka 2.2 – Složení betonové směsi Baumit Beton B30	53
Tabulka 2.3 - Složení betonové směsi Baumit ProofBeton.....	53
Tabulka 3.1 – Výsledky zkoušky nasákavosti.....	65
Tabulka 3.2 – Výsledky obrazové analýzy pro výřezy krychle B30.....	72
Tabulka 3.3 - Výsledky obrazové analýzy pro výřezy krychle B30 neuhutněný	73
Tabulka 3.4 - Výsledky obrazové analýzy pro výřezy krychle Proof betonu	74
Tabulka 3.5 – Vyhodnocení měření částečných výbojů.....	76

SEZNAM GRAFŮ

Graf 2.1 – Vyhodnocení objemové hmotnosti po odbednění.....	51
Graf 2.2 – Úbytky vlhkosti jednotlivých trámů v průběhu vysušování.....	57
Graf 2.3 - Přírůstky hmotnosti jednotlivých trámů v průběhu nasakování.....	59
Graf 3.1 - Výsledky zkoušky nasákavosti.....	66
Graf 3.2 – Závislost objemové hmotnosti na množství provzdušňovací přísady.....	67
Graf 3.3 – Změny hmotnosti během vysušování a nasákavosti	68
Graf 3.4 – Výsledky zkoušky nasákavosti v závislosti na množství provzdušňovadla.....	69
Graf 3.5 – Porovnání průměrného součtového náboje s objemovou hmotností trámů.....	77

PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY

[1] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Praha: Jaga, 2007. ISBN 978-80-8076-057-1.

[2] *Základní fyzikální vlastnosti stavebních materiálů ve vazbě na izolační vlastnosti* [online]. Praha, [cit. 2016-05-21]. Dostupné z:

http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/IZMA/prednaskaII_IZMA.pdf

[3] TRTÍK, Karel. *Technologie betonu*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04408-7.

[4] SHETTY, M.S. *Concrete technology: Theory and practise*. 23rd Revised Edition. New Delhi, India: S. Chand & Company Ltd., 2005. ISBN 9788121900034.

[5] Technické podmínky TP 226. Vysokohodnotné betony pro mosty PK. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, Odbor silniční infrastruktury, 2010

[6] BAJZA, Adolf a Ildikó ROUSEKOVÁ. *Technológia betonu*. Bratislava: Jaga, 2006. ISBN 80-8076-032-2.

[7] plastifikátory. *Mujbeton.cz*. [online]. 22.5.2016 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.mujbeton.cz/plastifikatory>

[8] přísady do betonu III. *mct – betonové výrobky a beton*. [online]. 22.5.2016 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <https://www.mct.cz/soubor/prisady-do-betonu-iii/>

[9] KLAUDOVÁ, Dana. *Možnosti testování a zlepšování trvanlivosti provzdušněných betonů* [online]. Brno, 2013 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=77698

[10] ŠAFÁŘ, Martin. *Trvanlivost alkalicky aktivovaných systémů* [online]. Brno, 2015 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=99329

[11] HELA, Rudolf. Příměsi do betonu. *Beton TKS*, 2015, č. 2, s. 04-10. ISSN: 1213-3116.

[12] BAŠKOVÁ, Renáta. *Realizácia betónových konštrukcií*. Martin: Stavebný trh, 2008. ISBN 978-80-969877-4-0.

[13] SÝKORA, Vladislav a Jan MAY. *Technologie (výroba maltovin a betonu) pro 4. ročník SPŠ stavebních hmot*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury.

[14] KOLÁŘ, Karel a Pavel REITERMAN. *Stavební materiály: pro SPŠ stavební*. Praha: Grada, 2012. Studium (Grada). ISBN 978-80-247-4070-6.

[15] VELEBA, Ondřej. *Studium vlivu složení na mechanické vlastnosti vysokohodnotného betonu* [online]. Brno, 2008 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=4670

[16] Betonové konstrukce. *Ústav mechaniky a materiálů*. [online]. 22.5.2016 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z:

http://mech.fd.cvut.cz/members/malinovsky/materialy/Beton_1_prezentace.pdf

[17] POWERS, Treval Clifford. Structure and physical properties of hardened Portland cement paste. *Journal of the American Ceramic Society*, 1958, 41.1: 1-6.

[18] MEHTA, Kumar P. a Paulo J. M. MONTEIRO. *Concrete: microstructure, properties, and materials*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, c2006. ISBN 00-714-6289-9.

[19] LIAN, Chunqi; ZHUGE, Y.; BEECHAM, S. The relationship between porosity and strength for porous concrete. *Construction and Building Materials*, 2011, 25.11: 4294-4298.

[20] BECHYNĚ, Stanislav. *Technologie betonu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957. Stavitelství betonové.

[21] KOVALČÍKOVÁ, Hana. *Vliv změn v pórové struktuře betonu na aktuální trvanlivost ŽB a předpjatých konstrukcí* [online]. Brno, 2012 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=48902

[22] PROCHÁZKA, Jaroslav. *Trvanlivost betonových konstrukcí* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z:

http://people.fsv.cvut.cz/www/prochja2/YTBK/Prednaska_2_2015.pdf. Přednáška YTBK. ČVUT v Praze.

[23] Rtuťová porozimetrie. *E – Lab Services*. [online]. 22.5.2016 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.elabservices.cz/produkty-2/rtutova-porozimetrie/>

[24] GIESCHE, Herbert. Mercury porosimetry: a general (practical) overview. *Particle & particle systems characterization*, 2006, 23.1: 9-19.

[25] *Laboratorní práce: Rtuťová porozimetrie*. Ústav anorganické technologie. VŠCHT Praha.

[26] Mercury Porosimetry. *Particle analytical*. [online]. 22.5.2016 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://particle.dk/methods-analytical-laboratory/mercury-porosimetry-pore-size/>

[27] URBÁNKOVÁ, Radka. *Vývoj metody termoporozimetrie polymerních prášků* [online]. Brno, 2012 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=50580

[28] PECHOUŠEK, Jiří. *Měření plochy povrchu pevných látek a určování jejich porozity metodou sorpce plynu* [online]. Olomouc, 2010 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/ostatni/BET.pdf>

[29] Surface area. *Micrometrics Analytical Services*. [online]. 22.5.2016 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z:

<http://www.particletesting.com/Services-Provided/Surface-Area.aspx>

[30] SCHNEIDER, Petr. *Textura porézních látek* [online]. Praha, 2007 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z:

<https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/ostatni/BET.pdf>. Učební text pro doktorské studium. Ústav chemických procesů AV ČR.

[31] Úvaha k interpretaci faktoru difúzního odporu kapilárně pórovitých materiálů. *AWAL*. [online]. 22.5.2016 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.awal.cz/index.asp?module=ActiveWeb&page=WebPage&DocumentID=2615>

[32] Optická porozimétrie. *Geology*. [online]. 22.5.2016 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://www.geology.sk/images/bb/Opticka_porozimetria.pdf

[33] LUCIA Concrete. *Laboratory imaging*. [online]. 22.5.2016 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z:http://www.lim.cz/files/File/limaging/Leaflets/Lucia_Concrete_leaflet_cze.pdf

[34] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Praha: Academia, 2005. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-1358-X.

[35] HAVLÍČEK, Tomáš. *Částečné výboje v elektronických zařízeních pracujících na vyšších kmitočtech* [online]. Brno, 2009 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=20100

[36] Technika vysokých napětí. *powerwiki*. [online]. 22.5.2016 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/TVNPodklady/Zadani-10_TV.N.pdf

PŘÍLOHA Č. 1: Charakteristické údaje betonových trámců 2. série po odbednění

sada trámců	číslo	šířka [mm]	výška [mm]			délka [mm]	váha [g]	objem [m ³]	objem. hmotnost [kg/m ³]
1. sada prostý beton bez provzdušňovadla	1.1.	40	40	41	41	160	557,73	0,000260	2142,92
	1.2.	40	41	41	41	160	563,14	0,000262	2146,11
	1.3.	40	42	41,5	41,5	160	569,81	0,000267	2136,79
2. sada provzdušňovadlo 0,25 ml	2.1.	40	41,5	41	42	160	558,57	0,000266	2103,05
	2.2.	40	40	41	40,5	160	547,58	0,000259	2112,58
	2.3.	40	41	42	41,5	160	559,88	0,000266	2107,98
3. sada provzdušňovadlo 1,125 ml	3.1.	40	41	41	41	160	531,84	0,000262	2026,83
	3.2.	40	41	41	41	160	527,32	0,000262	2009,60
	3.3.	40	41	41	41	160	531,20	0,000262	2024,39
4. sada provzdušňovadlo 2,5 ml	4.1.	40	40	40	40	160	510,17	0,000256	1992,85
	4.2.	40	41	40	40	160	510,20	0,000258	1976,50
	4.3.	40	40,5	41	41	160	516,63	0,000261	1976,90
5. sada provzdušňovadlo 5,0 ml	5.1.	40	41	41	41	160	507,31	0,000262	1933,35
	5.2.	40	41	42	41	160	506,05	0,000265	1912,99
	5.3.	40	41,5	41	41	160	505,09	0,000263	1917,09

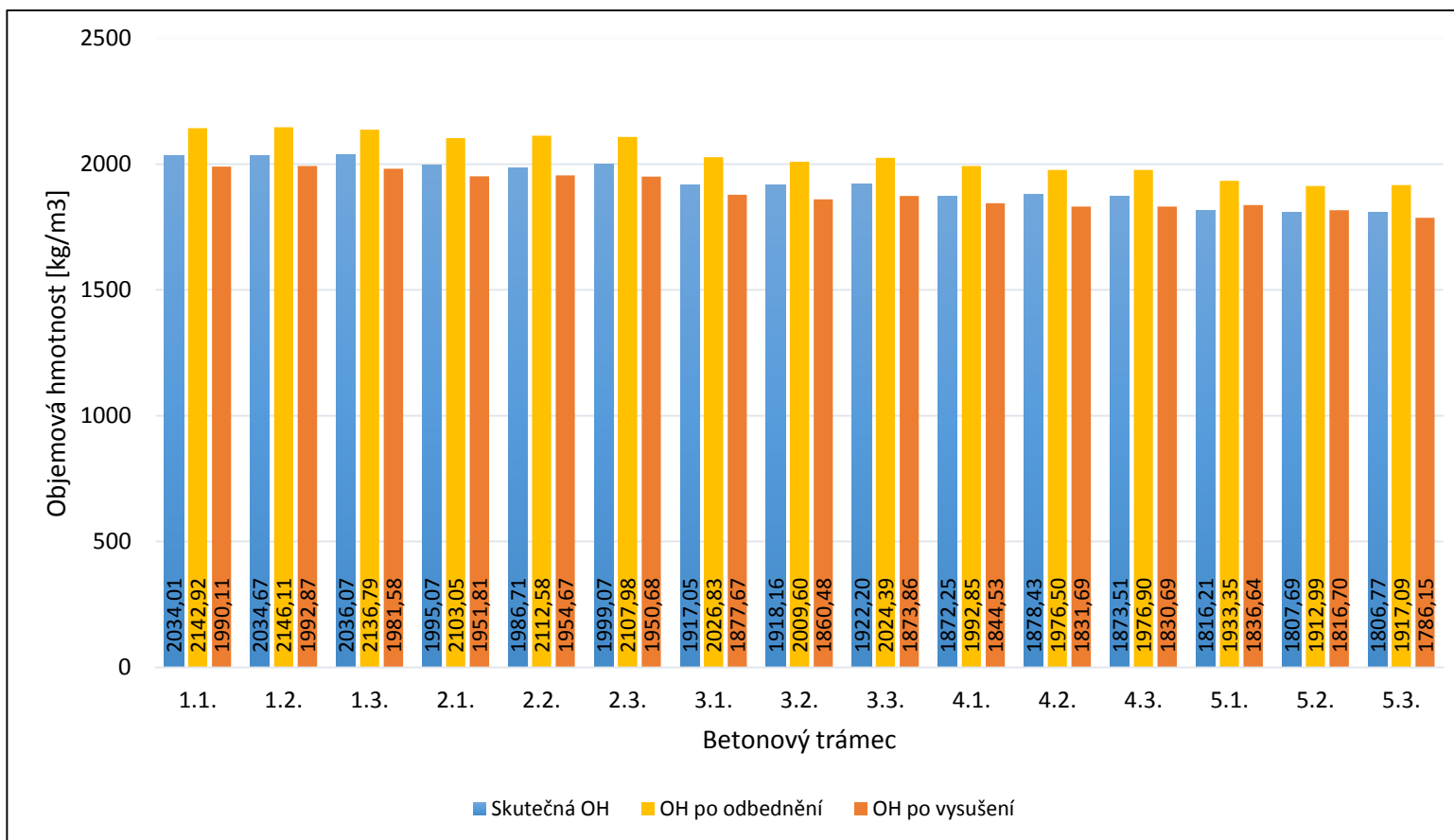
PŘÍLOHA Č. 2: Měřené hodnoty v průběhu vysušování a nasákavosti

sada trámů	číslo	5.4.2016	7.4.2016	11.4.2016	14.4.2016			objem. hmotnost [kg/m ³]	
		hmotnost [g]	hmotnost [g]	úbytek [%]	hmotnost [g]	úbytek [%]	hmotnost [g]		úbytek [%]
1. sada prostý beton bez provzdušňovadla	1.1.	551,64	520,52	5,64	518,09	0,47	517,96	0,03	1990,11
	1.2.	558,75	525,57	5,94	523,02	0,49	522,93	0,02	1992,87
	1.3.	562,93	531,04	5,67	528,52	0,47	528,42	0,02	1981,58
2. sada provzdušňovadla 0,25 ml	2.1.	554,75	520,74	6,13	518,57	0,42	518,40	0,03	1951,81
	2.2.	544,27	508,95	6,49	506,75	0,43	506,65	0,02	1954,67
	2.3.	554,67	520,31	6,19	518,13	0,42	518,10	0,01	1950,68
3. sada provzdušňovadla 1,125 ml	3.1.	526,90	494,62	6,13	492,93	0,34	492,70	0,05	1877,67
	3.2.	523,27	490,15	6,33	488,40	0,36	488,19	0,04	1860,48
	3.3.	526,72	493,74	6,26	491,86	0,38	491,70	0,03	1873,86
4. sada provzdušňovadla 2,5 ml	4.1.	505,39	473,67	6,28	472,23	0,30	472,20	0,01	1844,53
	4.2.	506,34	474,26	6,34	472,84	0,30	472,82	0,00	1831,69
	4.3.	512,24	479,92	6,31	478,49	0,30	478,42	0,01	1830,69
5. sada provzdušňovadla 5,0 ml	5.1.	503,44	471,35	6,37	470,10	0,27	470,18	-0,02	1836,64
	5.2.	502,61	470,18	6,45	468,94	0,26	468,95	0,00	1816,70
	5.3.	499,79	468,17	6,33	466,91	0,27	466,78	0,03	1786,15

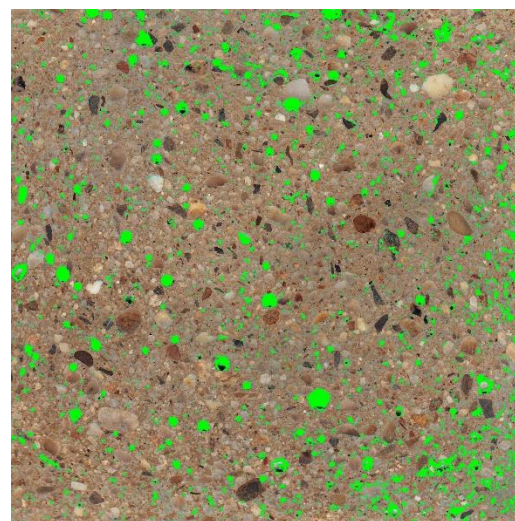
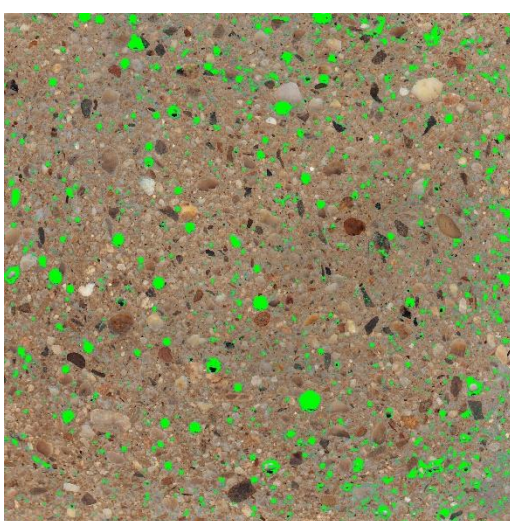
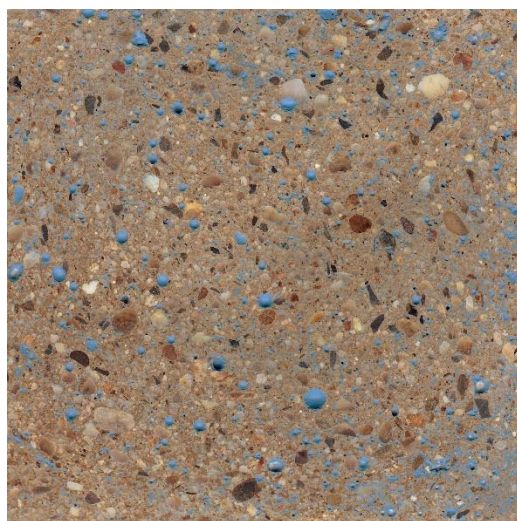
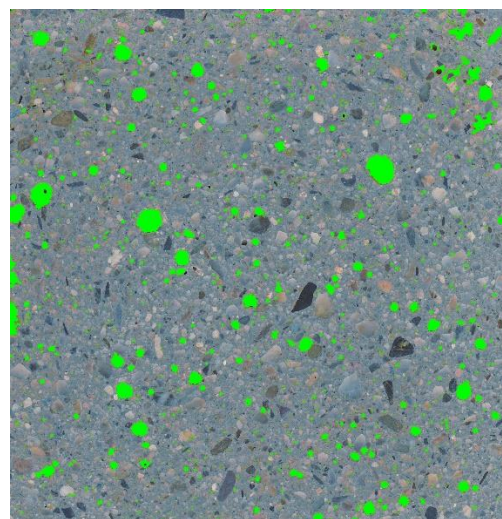
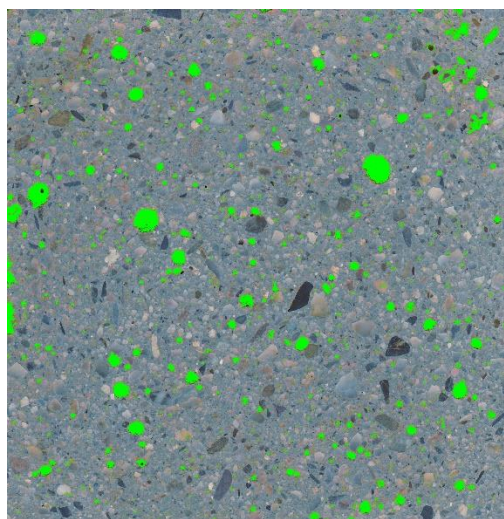
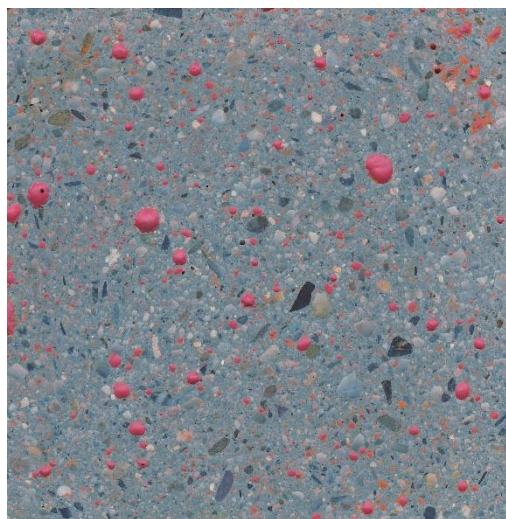
sada trámčů	číslo	5.5.2016	6.5.2016		9.5.2016		11.5.2016		13.5.2016	
		hmotnost [g]	hmotnost [g]	nárůst [%]	hmotnost [g]	nárůst [%]	hmotnost [g]	nárůst [%]	hmotnost [g]	nárůst [%]
1. sada prostý beton bez provzdušňovadla	1.1.	522,92	560,70	7,22	561,37	0,12	562,03	0,12	562,47	0,08
	1.2.	527,94	565,39	7,09	567,55	0,38	567,54	0,00	568,09	0,10
	1.3.	533,48	571,70	7,16	573,30	0,28	573,83	0,09	574,20	0,06
2. sada provzdušňovadla 0,25 ml	2.1.	522,77	561,75	7,46	563,43	0,30	563,85	0,07	564,34	0,09
	2.2.	510,97	550,35	7,71	551,17	0,15	551,55	0,07	552,09	0,10
	2.3.	522,94	562,22	7,51	562,84	0,11	563,26	0,07	563,24	0,00
3. sada provzdušňovadla 1,125 ml	3.1.	496,82	534,26	7,54	536,76	0,47	537,46	0,13	537,75	0,05
	3.2.	491,16	528,94	7,69	531,02	0,39	531,81	0,15	531,98	0,03
	3.3.	497,64	533,65	7,24	536,16	0,47	536,44	0,05	536,79	0,07
4. sada provzdušňovadla 2,5 ml	4.1.	477,58	513,42	7,50	515,54	0,41	517,24	0,33	517,66	0,08
	4.2.	477,56	513,86	7,60	516,67	0,55	517,37	0,14	517,57	0,04
	4.3.	484,40	520,90	7,54	523,31	0,46	524,20	0,17	524,69	0,09
5. sada provzdušňovadla 5,0 ml	5.1.	475,94	510,67	7,30	514,27	0,70	516,07	0,35	516,48	0,08
	5.2.	473,54	507,50	7,17	512,48	0,98	514,06	0,31	514,54	0,09
	5.3.	471,62	506,74	7,45	511,24	0,89	512,51	0,25	512,97	0,09

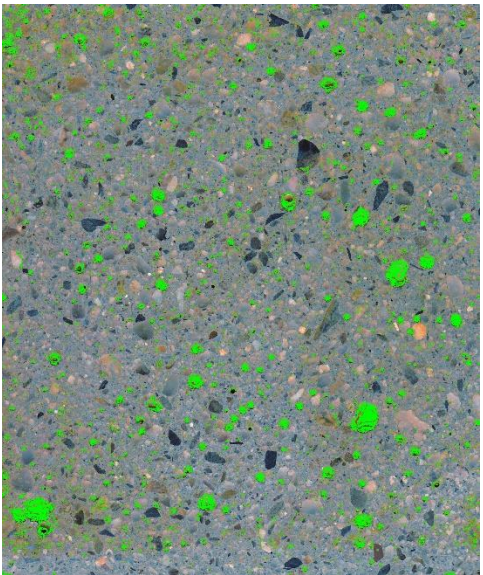
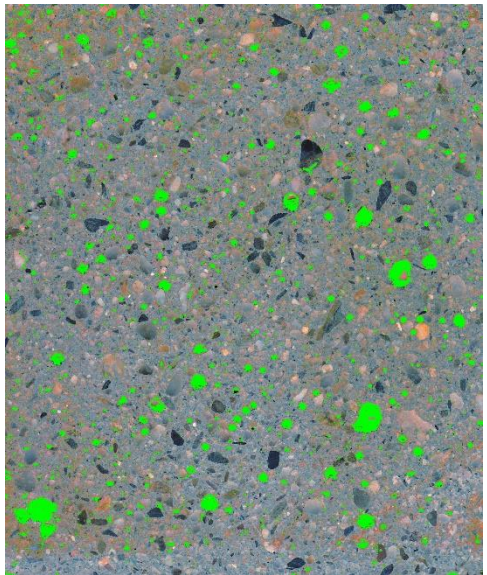
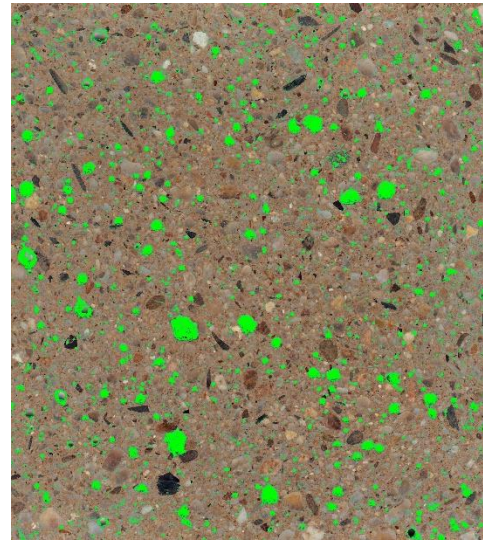
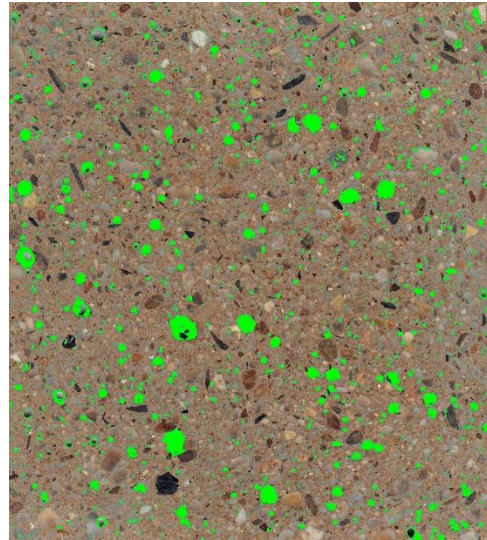
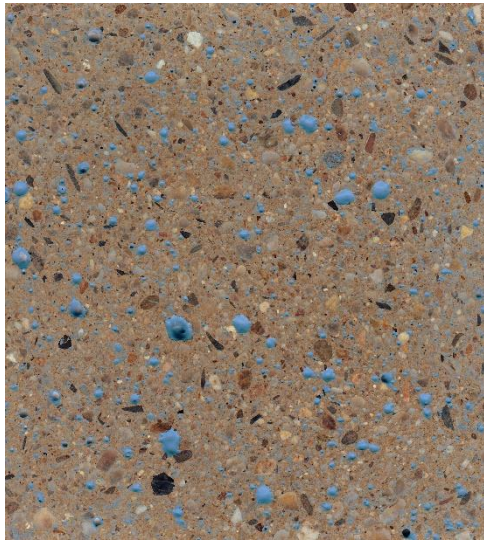
sada trámčů	číslo	6.5.2016	9.5.2016		11.5.2016		13.5.2016	
		hmotnost [g]	hmotnost [g]	nárůst [%]	hmotnost [g]	nárůst [%]	hmotnost [g]	nárůst [%]
1. sada prostý beton bez provzdušňovadla	1.1.	306,40	307,53	0,37	307,65	0,04	307,82	0,06
	1.2.	308,80	310,72	0,62	310,79	0,02	311,08	0,09
	1.3.	312,50	314,37	0,60	314,53	0,05	314,67	0,04
2. sada provzdušňovadla 0,25 ml	2.1.	302,30	304,10	0,60	304,20	0,03	304,50	0,10
	2.2.	295,00	296,66	0,56	296,77	0,04	297,07	0,10
	2.3.	302,10	303,71	0,53	303,86	0,05	304,07	0,07
3. sada provzdušňovadla 1,125 ml	3.1.	277,80	280,18	0,86	280,51	0,12	280,74	0,08
	3.2.	274,50	276,74	0,82	277,23	0,18	277,47	0,09
	3.3.	278,10	280,35	0,81	280,77	0,15	280,99	0,08
4. sada provzdušňovadla 2,5 ml	4.1.	261,70	264,36	1,02	265,19	0,31	265,45	0,10
	4.2.	262,20	264,88	1,02	265,59	0,27	265,86	0,10
	4.3.	266,10	268,61	0,94	269,12	0,19	269,33	0,08
5. sada provzdušňovadla 5,0 ml	5.1.	252,10	256,02	1,55	257,34	0,52	257,60	0,10
	5.2.	248,70	253,75	2,03	254,88	0,45	255,12	0,09
	5.3.	248,90	253,34	1,78	254,37	0,41	254,62	0,10

PŘÍLOHA Č. 3: Porovnání objemových hmotností:

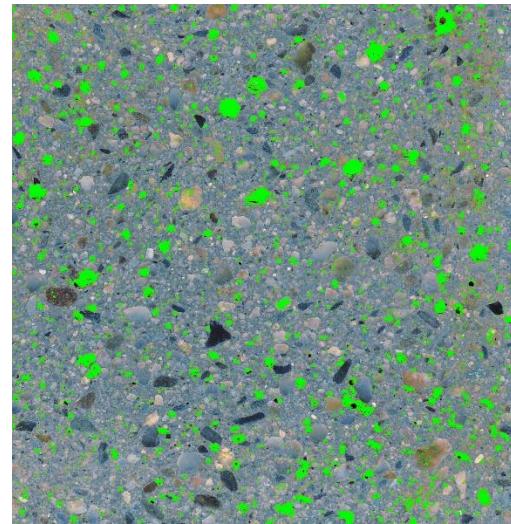
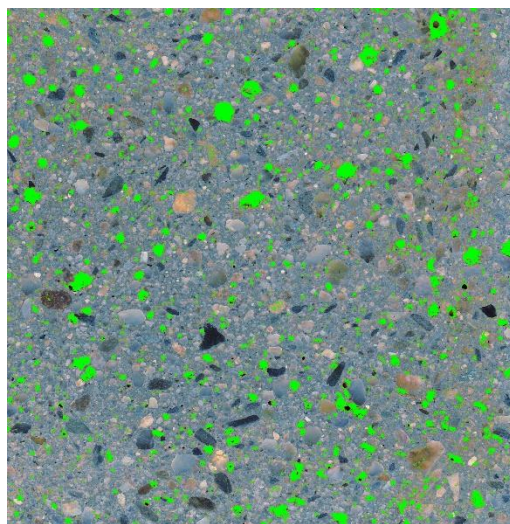
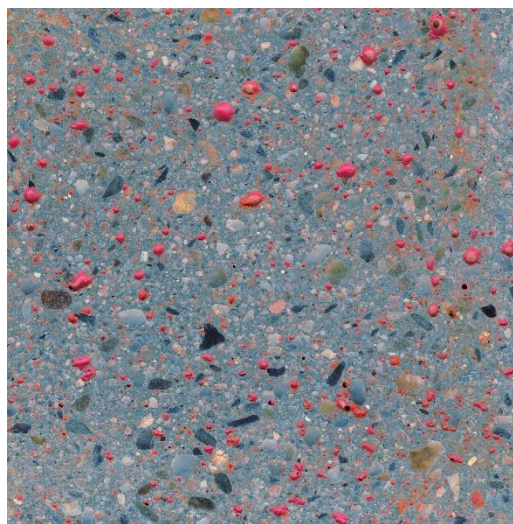


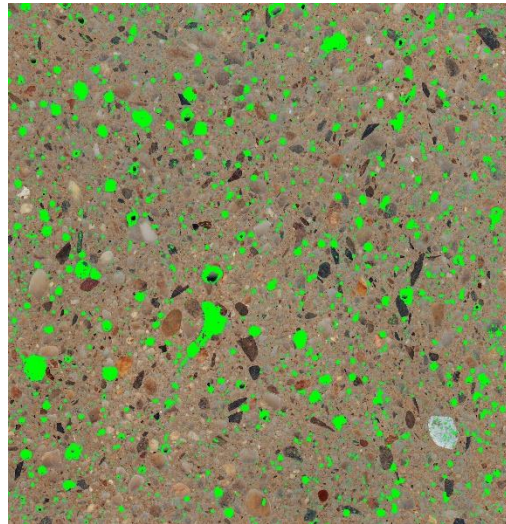
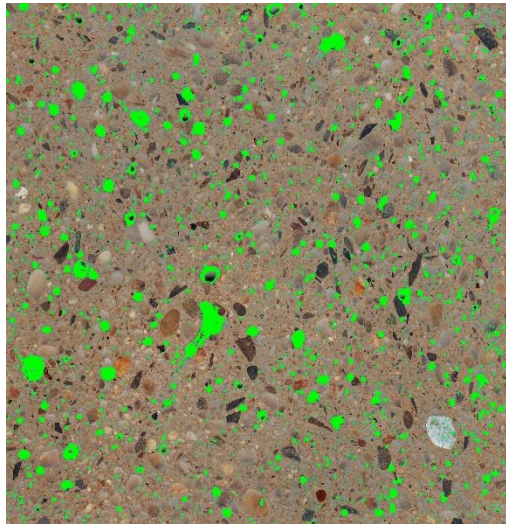
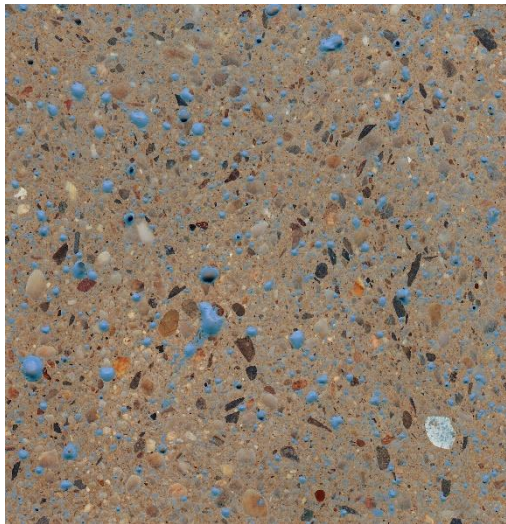
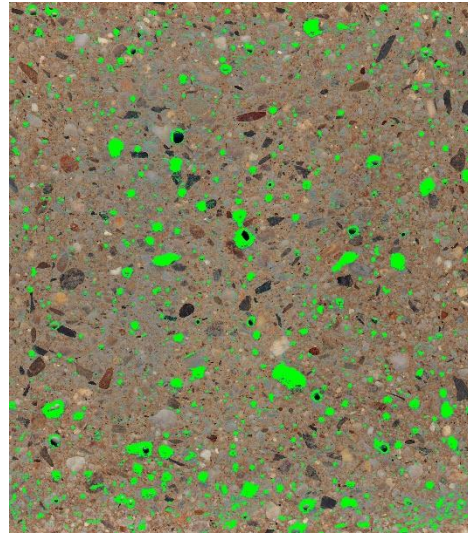
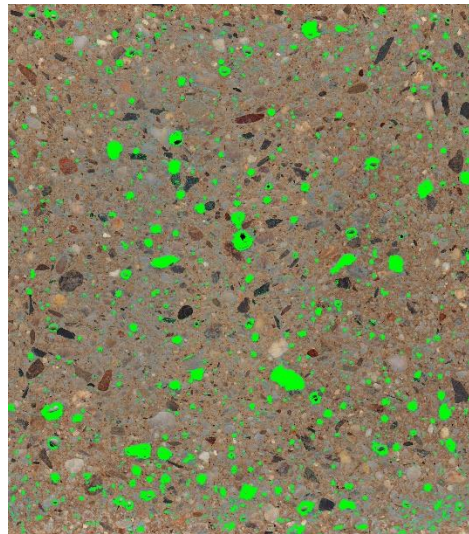
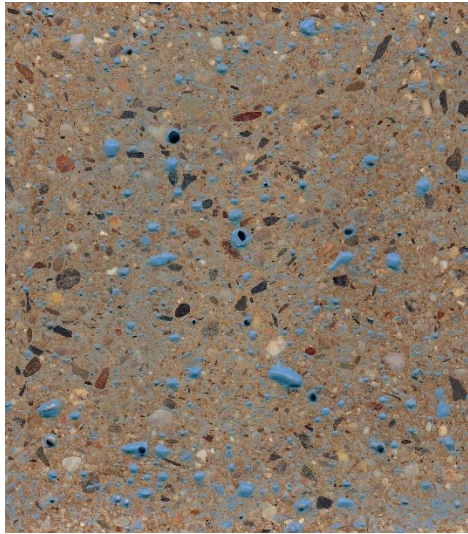
PŘÍLOHA 4: Obrazová analýza B30 A,B,C,D

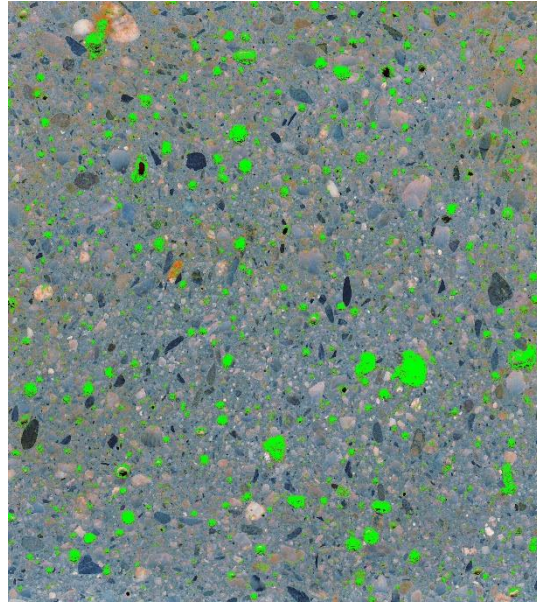
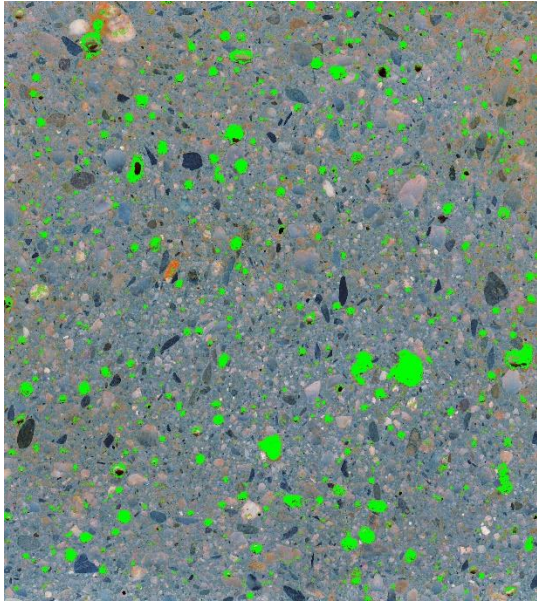




PŘÍLOHA Č. 5: Obrazová analýza B30 Nehutněný A,B,C,D







PŘÍLOHA Č. 6: Obrazová analýza Proof beton A,B,C,D

