

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra technologie staveb



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Alternativní metody pro měření pórovitosti betonu pomocí
digitálního zpracování a analýzy obrazu**

Petra Járková

2018

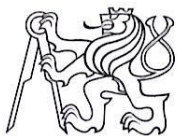
Vedoucí diplomové práce: Ing. Rostislav Šulc, PhD.

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

V Praze

.....

Petra Járková



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Járková Jméno: Petra Osobní číslo: 395815

Zadávací katedra: k122 - Katedra technologie staveb

Studijní program: (N3607) Stavební inženýrství - SI

Studijní obor: (3607T045) Příprava, realizace a provoz staveb - L

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Alternativní metody pro měření pórovitosti betonu pomocí digitálního zpracování a analýzy obrazu

Název diplomové práce anglicky: Alternative methods for measuring the porosity of concrete by use a digital processing and image analysis.

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rešerše k tradičním metodám pro stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu.
- 2) Princip a využití metody digitálního zpracování a analýzy obrazu pro účely měření pórovitosti betonu, metody provedení analýzy, interpretace výsledků.
- 3) Příprava zkušebních vzorků betonu o definované porositě. Určení referenčních hodnot pro betony na základě tradičních měření.
- 4) Návrh alternativní postupy určení pórovitosti betonu využívající počítačového zpracování obrazů strukturu povrchu řezu betonového vzorku.
- 5) Porovnání výsledků alternativního návrhu a tradičních metod.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN EN 480-11: Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Zkušební metody - Část 11: Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2006.
- [2] Hlaváč V., Sedláček M.: Zpracování signálu a obrazu, skriptum FEL ČVUT, Vydavatelství ČVUT, Praha 2009
- [3] Šonka M., Hlaváč V., Boyle R.: Image, processing, analysis and machine vision, Thomson Learning, Canada, 3rd edition, 2008.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 12.10.2017

Termín odevzdání diplomové práce: 7.1.2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové 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“.

12.10.2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Anotace:

Diplomová práce se zabývá měřením pórovitosti a stanovení charakteristik vzduchových pórů v ztvrdlém betonu s využitím počítačového zpracování obrazů a matematického modelování. V praktické části práce je pomocí matematického modelu provedena simulace tzv. traverzní metody na krychli velikosti 100 x 100 x 100 mm, kde byly různě upravovány vzdálenosti měřících přímk, jejich počet, množství vzduchových pórů a výpočet byl prováděn pro různé počty řezů tělesa. Výsledkem práce je vyhodnocení přesnosti normové metody a porovnání výsledků pro různé varianty vstupních dat.

Klíčová slova:

Póry, pórovitost, beton, obrazová analýza, matematický model.

Abstract:

The master thesis deals with porosity measurement and determination of air pores characteristics in hardened concrete using computer image processing and mathematical modeling. In the practical part of the thesis using a mathematical model is performed the simulation of the linear traverse method on a 100 x 100 x 100 mm cube. The calculations were performed for different distance and numbers of measuring lines, quantities of air voids. The result of the work is to accuracy evaluation of the standard method and comparison of the results for the different variants of input data.

Keywords:

Pores, Porosity, Concrete, Image analysis, Mathematical model.

OBSAH

<i>ÚVOD</i>	7
1. TEORETICKÁ ČÁST	8
1.2. Tradiční metody měření pórovitosti a stanovení charakteristik vzduchových pórů v zatvrdlém betonu:	11
1.2.1. Gravimetrická metoda – zkouška nasákavosti.....	11
1.2.2. Rtuťová porozimetrie	12
1.2.3. Plynová porozimetrie – sorpce plynu	15
1.2.4. Optická porozimetrie	18
1.3. Digitální zpracování a analýza obrazu pro účely měření pórovitosti betonu	24
2. PRAKTICKÁ ČÁST	30
2.1. Výroba zkušebního tělesa	30
2.2. Příprava zkušebních vzorků	31
2.3. Zkouška stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu ...	32
2.3. Gravimetrická metoda	38
3. MATEMATICKÝ MODEL	42
4. VÝSLEDKY A DISKUZE	46
4.2. Matematické modelování	51
4.3. Gravimetrická metoda	57
<i>Závěr</i>	59
<i>Seznam obrázků</i>	60
<i>Seznam grafů</i>	62
<i>Seznam tabulek</i>	63
PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY	64

ÚVOD

Beton je kompozitní stavební materiál složený z pojiva, plniva, záměsové vodou a v dnešní době standardně i s přidavkem různých příměsí a přísad. Jelikož jeho výroba zahrnuje několik různých procesů, jako je návrh směsi, míchání jednotlivých složek, ukládání do bednicích forem a patřičné ošetřování, tak je zřejmé, že jeho výsledná struktura může být značně rozličná. Vnitřní struktura betonu má však vždy jakýsi porézní charakter, kde se jedná o soustavu vzájemně spojených i uzavřených dutin, ve většině případů při běžných podmínkách vyplněných vzduchem. Problematika obsahu vzduchových pórů v betonu je dobře známá a pórovitost betonu má významný dopad na vlastnosti mechanické, tepelně-technické, akustické a na celkovou trvanlivost betonových konstrukcí. Je tedy zřejmé, že jeho význam nelze zanedbat.

V dnešní době existuje několik různých metod pro účely měření pórovitost betonu. Každá z těchto metod má svá omezení a většinou dokáže detekovat póry pouze v určitém rozsahu velikosti. Zároveň jsou tyto metody ve většině případů náročné na přístrojové vybavení, zkušenost a kvalifikaci personálu a samozřejmě také finance a čas. Z toho důvodu jsou dnes snahy veškeré tyto procesy plně automatizovat, urychlit a současně zvýšit přesnost vyhodnocení.

Cílem práce je simulace normové zkoušky stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu pomocí matematického modelování a analýzy obrazu, experimentální ověření přesnosti této metody a její optimalizace.

1. TEORETICKÁ ČÁST

1.1. Pórovitost betonu

Obecně je pórovitost definovaná jako poměr objemu dutin vůči celkovému objemu materiálů.

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

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

Jelikož je beton kompozitní, nehomogenní materiál, skládající se z pojiva, plniva, záměsové vody a v dnešní době standardně i mnoha různých příměsí a přísad zlepšujících jeho vlastnosti, je zřejmé, že jeho vnitřní struktura bývá značně rozmanitá, kde vzduchové póry tvoří přirozenou součást. Porézní strukturu betonu lze jinými slovy nazvat chybějící hmotou a špatným uspořádáním částic.

Póry v hydratované cementové pastě lze klasifikovat takto [1]:

Tabulka 1.1 - Klasifikace pórů v zatvrdlé cementové pastě

Název	Velikost	Charakteristika	Význam ve vztahu k vlastnostem betonu
Technologické póry	15-1000 μm	velké, přibližně kulové póry	podstatně ovlivňují pevnost a propustnost
Kapilární póry	0,05-15 μm	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 [1] platí:

- Gelové póry - submikroskopické (ultrakapilární) 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.

Množství vzduchových pórů lze ovlivnit samotným návrhem betonové směsi, kdy můžeme póry do struktury záměrně vnášet nebo je eliminovat.

Snížit množství vzduchových pórů lze např. použitím plastifikátorů, které zajišťují elektrostatickou odpudivost cementových zrn, čímž zabraňují výskytu chemicky nevázané vody a umožňují snižovat množství záměsové vody, nebo přidáním příměsí, jejichž nejjemnější zrna potenciální póry zaplňují (tzv. filler, mikroplnivo) a v případě přísad latentně hydraulických se i aktivně podílejí na procesu hydratace, kdy vytvářejí sekundární C-S-H, a tím zlepšují pórovitou strukturu betonu. Snížení množství vzduchových pórů v betonu vede k vyšší tlakové pevnosti, jelikož vzduchové mezery, které vytvářejí bariéru pro přenos tlakových sil, jsou nahrazeny pevným cementovým tmelem. Dále snižováním pórovitosti se do jisté míry zvyšuje i trvanlivost betonové konstrukce, protože podaří-li se nám pevnou fází co nejvíce přerušit propojenou soustavu kapilárních pórů, je více bráněno průniku kapalin, plynů a iontů do vnitřní struktury betonu, kdy právě zejména kapaliny a plyny jsou nositeli agresivních látek způsobujících degradaci materiálu.

V praxi se setkáváme také často s případy, kdy je žádoucí vzduchové dutiny v betonové struktuře naopak vytvořit a celkovou pórovitost betonu zvýšit. Jedná se zejména o případy, ve kterých potřebujeme zlepšit tepelný odpor konstrukce (využití zejména u pórobetonů), snížit nasákavost, zlepšit odolnost proti mrazu a celkově zajistit trvanlivost betonu.

Záměrné vnášení pórů se většinou provádí pomocí provzdušňovacích přísad. Jejich smyslem 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. [1] Záměrným vnesením takovýchto pórů lze efektivně zamezit vzniku pórů kapilárních, spojených s povrchem, a tedy zabránit pronikání vody, vodních par či plynů do vnitřní struktury betonu, a s tím souvisejícím transportním procesům vedoucím k různým typům chemické koroze, jako je např. kyselinová, uhličitá, síranová, aj., a k mechanickému poškozování, kterým může být

např. krystalizace solí, střídavé zmrazování a rozmrazování, eroze, koroze ocelové výztuže a jiné problémy. [1]

Neméně důležitým faktorem, ovlivňujícím výslednou pórovitost, je ukládání čerstvé betonové směsi do bednění a ošetřování betonu v průběhu jeho počátečního tuhnutí a tvrdnutí. Čerstvý beton ukládaný do bednění obsahuje velké množství vzduchových mezer a pórů, které je třeba vypudit správně provedeným zhutněním [1].

Hrozbu dále představuje vysychání během hydratace, při kterém dochází k objemové kontrakci (smrštění) a v betonu tak vznikají tahová napětí, která mohou být doprovázena vznikem trhlin [2]. K vysoušení povrchu betonu a jeho smrštění může dojít také vlivem vysokých teplot nebo působením větru. To lze eliminovat např. zakrýváním čerstvě vybetonované konstrukce různými fóliemi, vodním mlžením, vlhčením přes geotextílii a vhodným návrhem pomocné výztuže [3].

1.2. Tradiční metody měření pórovitosti a stanovení charakteristik vzduchových pórů v zatvrdlém betonu:

1.2.1. 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. [1]

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. [1]

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. [1]

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 [1]. Rovnice pro výpočet těchto veličin jsou uvedeny v části Výsledky a diskuze (kapitola 4.3).

1.2.2. Rtuťová porozimetrie

Rtuťová porozimetrie je nejvyžívanější metodou pro charakteristiku porézních materiálů v rozsahu velikosti póru 3 nm až cca 600 μm . 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. 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, nesmáčejíci kapalina (tzn. úhel smáčení θ je vyšší než 90°). Nedochozí 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:

$$h \cdot \rho \cdot g = p = -\frac{2\gamma \cdot \cos \theta}{R} \quad (1.2)$$

, kde γ je povrchové napětí rtuti [N/m], ρ je hustota rtuti [g/m³], R je poloměr póru kruhového průřezu [m], g je tíhové zrychlení [m/s²], h je výška sloupce rtuti v póru [m], θ je úhel smáčení póru rtutí [°] 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 rtutí zaplněny póry o největším poloměru. Postupným zvyšováním vnějšího tlaku rtuť postupuje 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:

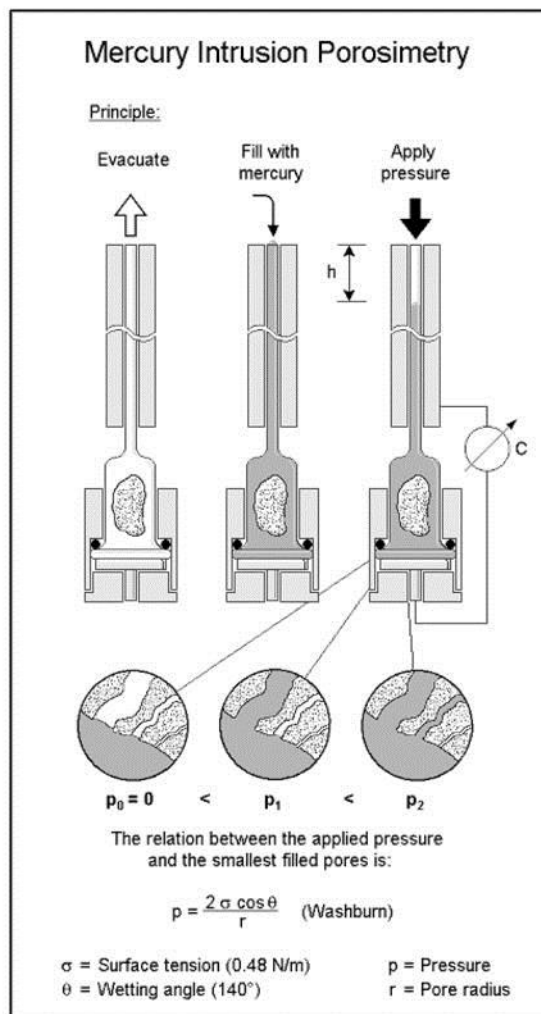
$$\pi \cdot r^2 \cdot p = -2\pi \cdot r \cdot \gamma \cdot \cos \theta \quad (1.3)$$

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 rtutí, 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 rtutí 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 4μm - 100 μm. 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 - 4μm. 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 sestrojit 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.



Obrázek 1.1 - Princip rtuťové porozimetrie, převzato z [1]

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. [1]

1.2.3. 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).

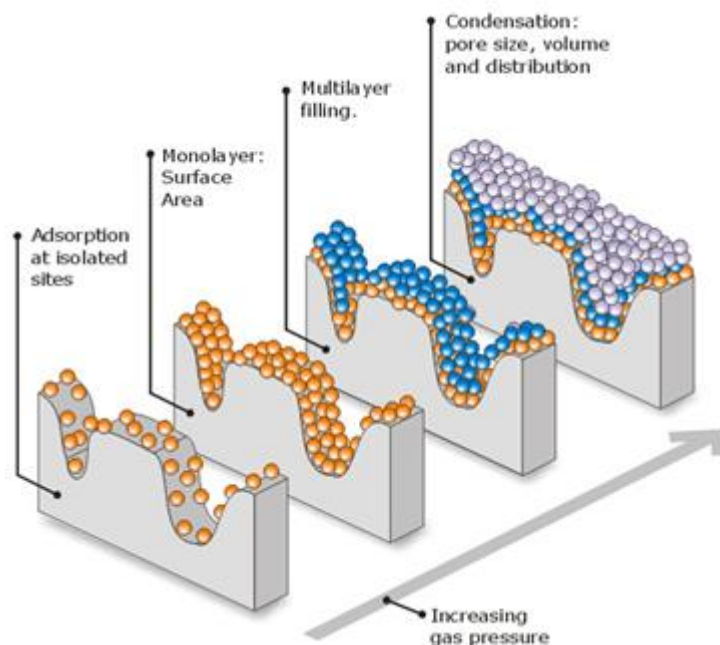
Tuto adsorpci je podle charakteru sil působících mezi adsorbentem (tj. povrch vzorku) a adsorbátem (tj. molekuly plynu) možné rozdělovat na fyzikální, chemickou nebo elektrickou. Pro charakterizaci porézních látek, je nejrozšířenější metodou fyzisorpce dusíku (fyzikální adsorbce).

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.

Fyzisorpce plynů nám o zkoumaném porézním vzorku poskytuje velmi cenné informace. V praxi se využívá nejčastěji ke zjišťování specifického povrchu (plocha vzorku vztahená 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.

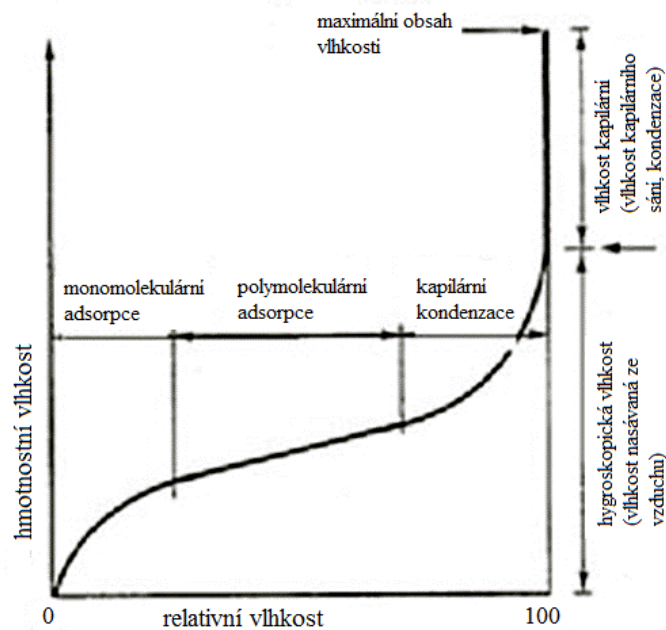
Zjišťování měrného povrchu a analýza velikosti pórů plynovou sorpcí začíná přípravou vzorku. Ve vzorku je obvykle adsorbovaná vlhkost a jiné znečišťující látky, které musí být odstraněny. Vzorek se tedy nejprve evakuuje a pak se ochladí na kryogenní teplotu dle použitého adsorbátu (obvykle 77 K, teplotu 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 jednolitá monovrstva, ve které má adsorbát charakter velmi podobný kapalině. V tuto chvíli jsou adsorbátem zaplněny mikropóry. Dalším zvyšováním tlaku dochází k vícevrstvé adsorpci, 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 1.2 - Průběh vícevrstvé adsorpce plynu, převzato z [1]

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. [1]



Obrázek 1.3 - Interpretace sorpční izotermy podle teorie multimolekulární adsorpce (teorie BET), převzato z [1]

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 [4].

1.2.4. Optická porozimetrie

Optickou porozimetrií se rozumí metoda světelné mikroskopie a analýzy obrazových dat. Tato metoda umožňuje měřit různé charakteristiky zkoumaných objektů, které jsou předmětem pozorování. Dokáže poskytnout informace o struktuře materiálu a soustavě pórů uvnitř této struktury na základě analýzy obrazových dat a optického pozorování. Jedná se o soubor technologických a analytických procedur, které jsou spolu úzce spojeny.

Zatímco výše uvedené techniky měření porozity betonu jsou destruktivní, založené na impregnaci materiálu kapalnou nebo plynnou látkou a kvantifikují objem otevřených pórů, optická porozimetrie je metoda přímého pozorování, nedestruktivní, která vyhodnocuje jak otevřené, tak uzavřené póry, ovšem nedokáže oba typy pórů od sebe rozlišit. Zároveň se ale daná metoda zaměřuje pouze na měření makropórů, tedy

pórů větších než 0,05 μm . Mezní rozlišení pórů se liší v závislosti na použitém systému snímání obrazu. Podle některých výzkumníků nejsou póry o průměru $< 8 \mu\text{m}$ pomocí optické mikroskopie měřitelné.

Samotnou zkušební metodou stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu se zabývá norma ČSN EN 480-11 Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Zkušební metody – Část 11: Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu.

1.2.5. Základní princip metody:

Stanovení charakteristik vzduchových pórů je prováděno tzv. traverzní metodou. Jedná se o normovou zkušební metodu, kde veškeré požadavky na výrobu a přípravu zkušebních vzorků, postup provádění zkoušky, zaznamenání a výpočet hodnot jsou definovány ve výše uvedené technické normě ČSN EN 480-11.

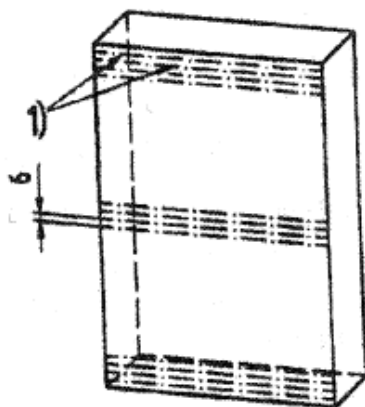
Princip tzv. traverzní metody spočívá v tom, že na zkušební vzorek se rozmístí soustava měřících přímek, podél kterých se vzorek pozoruje speciálním mikroskopem. V rámci tohoto pozorování se zaznamenávají všechny zachycené póry T_a , které jsou reprezentovány tětivami, resp. měřícími přímkami protínajícími vzduchový pór, a pevné části povrchu zkušebního vzorku T_s , které jsou definovány zbývajícími délkami měřících přímek neprocházejících skrz póry. Součet těchto dvou hodnot (T_a a T_s) dává celkovou měřenou délku T_{tot} . [5]

Měřící přímky musí být vedeny rovnoběžně s původním horním povrchem zkušebního vzorku a rozmisťují se dle [5] následujícím způsobem:

- a) Čtyři měřící přímky vedené přes šířku vzorku se umístí v jeho horní oblasti. Nejvyšší přímka by měla být přibližně 6 mm od horního okraje vzorku a následující přímky by měly být umístěny ve vzdálenosti přibližně 6 mm od sebe.
- b) Další čtyři měřící přímky se umístí v dolní oblasti vzorku. Nejnižší přímka by měla být přibližně 6 mm od dolního okraje vzorku a následující přímky by měly být umístěny přibližně 6 mm od sebe.
- c) Další měřící přímky se rozloží ve středové oblasti vzorku a umístí se přibližně 6 mm od sebe tak, aby byl splněn požadavek na celkovou délku soustavy měřících přímek. V této oblasti budou potřeba minimálně čtyři měřící přímky. Pokud na

povrchu existují poškozené plochy, může jich být pro dosažení minimální délky soustavy měřících přímek zapotřebí více.

Současně musí být splněn požadavek na minimální délku celé soustavy měřících přímek, která činí 1 200 mm na jeden zkušební vzorek.



Legenda

- 1 Měřicí přímký v rozestupu 6 mm

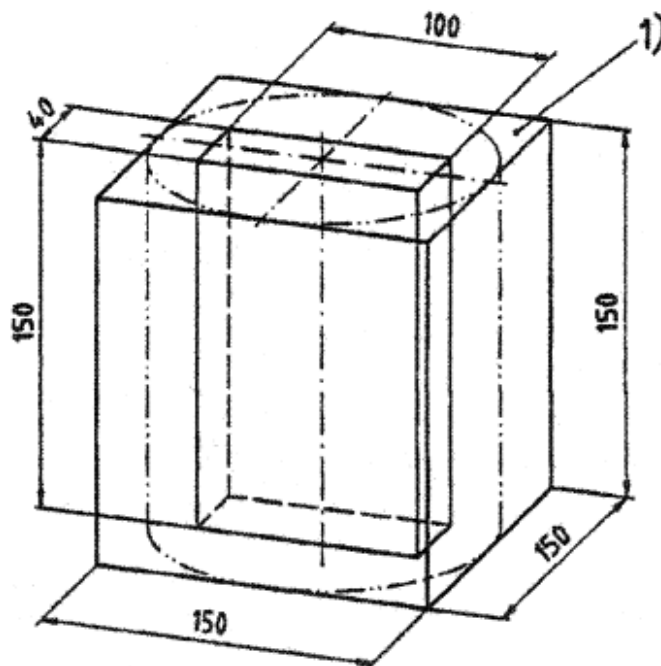
Obrázek 1.4 - Rozložení měřících přímek na zkušebním povrchu, převzato z [5]

Provedením této zkoušky bychom měli získat následující parametry a charakteristiky:

- Celkový obsah vzduchových pórů
- Obsah tmele
- Spacing faktor – součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů
- Měrný povrch systému vzduchových pórů
- Histogram distribuce velikosti pórů v závislosti na počtu a/nebo objemu vzduchových pórů
- Poměr tmel / vzduchové póry
- Průměrnou velikost vzduchových pórů

1.2.6. Požadavky na výrobu a přípravu zkušebních vzorků:

Dle normy ČSN EN 480-11 musí být ze zkoumaného betonu vyrobena 2 tělesa o minimálním rozměru 150 mm, kdy vhodnými tělesy jsou krychle o straně 150 mm nebo válce o průměru 150 mm. Přibližně ze středu obou betonových těles se, nejméně po 7 dnech ošetřování, vyříznou zkušební vzorky o šířce 100 mm, výšce 150 mm a tloušťce 20 mm kolmo k hornímu povrchu (podle směru betonáže). Viz. Obr. 1.5.



Legenda

1 Horní plocha při výrobě (původní volný horní povrch)

Obrázek 1.5 - Příprava zkušebního vzorku 150 mm x 100 mm x 40 mm z tělesa 150 mm (přibližné rozměry)^{NPI}, převzato z [2]

Na každém vzorku se určí jedna z největších ploch pro mikroskopickou zkoušku. Tyto zvolené plochy musí být za mokra broušeny, dokud nejsou rovné, s jemně zabroušeným povrchem. Vhodný povrch by měl mít za sucha matný lesk a neměl by vykazovat patrné podbroušení tmelu oproti povrchu kameniva, okraje pórů by měly být ostré a neměly by být porušené nebo zaoblené. Po zbroušení se povrch musí důkladně očistit od všech nečistot tak, aby nebyly póry zaplněny zbytky z broušení. Čištění je vhodné provádět vodou a stlačeným vzduchem, případně vhodným jemným kartáčem. Lze použít i čištění ultrazvukem. Při čištění nesmí dojít k poškození okrajů pórů. [5]

1.2.7. Požadavky na zkušební zařízení:

Výše uvedená norma uvádí výčet zařízení vhodných pro přípravu zkušebních vzorků a provádění samotné mikroskopické analýzy. Jelikož se jedná o normu, její charakter je doporučující, nikoliv závazný a samotná norma připouští možnost použití i jiných

zařízení, poskytují-li uspokojivé výsledky. Zároveň není nutné využít všech zmíněných přístrojů.

Zařízení pro přípravu zkušebních vzorků dle [5]:

- a) Diamantová pila
- b) Brousící zařízení
- c) Chladící zařízení a sušárna
- d) Různé chemikálie pro ošetření vyleštěného povrchu, jako např. glycerín, razítková barva, zinková pasta a sádrový prášek

Zařízení pro mikroskopickou analýzu dle [5]:

- a) Motorem nebo ručně ovládaný manipulační (skenovací) stolek
- b) Osvětlovací zařízení
- c) Zařízení pro záznam velikostí úseček a celkového počtu protnutých vzduchových pórů, rozdělených do tříd podle jednotlivých délek tětiv
- d) Stereoskopický mikroskop se zvětšením $(100 \pm 10) \times$.

Dnes pro světelnou mikroskopii a obrazovou analýzu existují 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. [1]

Jako konkrétní příklad takové pracovní stanice můžeme jmenovat např. 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. [1]



Obrázek 1.6 - Systém pro stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu, převzato z [1]

1.2.8. Protokol o zkoušce:

Finálním výstupem zkoušky bývá standardně protokol o zkoušce, který dle [5] standardně obsahuje:

- Všechny údaje o složení zkoušeného betonu společně s údaji o objemové hmotnosti a naměřeném obsahu vzduchových pórů v čerstvém betonu;
- Údaje o výpočtu obsahu tmele v betonu;
- Vypočtené hodnoty celkového obsahu vzduchových pórů, specifického povrchu pórů a součinitele prostorového rozložení vzduchových pórů.

Je-li požadováno, tak ještě:

- Obsah mikroskopických vzduchových pórů
- Zobrazení rozdělení vzduchových pórů

1.3. Digitální zpracování a analýza obrazu pro účely měření pórovitosti betonu

1.3.1. Obrazová analýza

Analýza obrazu je proces, při kterém lze z digitálních obrazů, obvykle pomocí počítačových algoritmů, získávat hledané důležité informace nebo provádět různá měření.

Obrazová analýza byla vyvinuta pro kvantitativní (objektivní) hodnocení vlastností obrazu. Její podstatou je digitalizace obrazu a zpracování vzniklého souboru dat v počítači. Do obrazové analýzy lze zahrnout všechny postupy, které umožňují kvantitativně vyhodnotit obrazovou informaci z hlediska geometrických rozměrů, morfologických znaků, optické hustoty, barvy a počtu zkoumaných objektů a popřípadě ji porovnávat s jinými soubory dat a určovat míru shody. Relevantní objekty přitom lze popsat buď prostřednictvím parametrů jejich hranice (pokud nás zajímají tvarové charakteristiky) nebo prostřednictvím obrazových bodů objekty tvořících (pokud nás zajímá jejich barva, optická hustota či textura). [6]

Jelikož se jedná o počítačový proces, analýza obrazu vyžaduje speciální počítačové vybavení se zobrazovacím zařízením připojeným k mikroskopu. Od počátku 60. let 20. století, kdy byly sestaveny první komerční počítače určené k třídění oceli měřeními nekovových inkluzí právě pomocí analýzy obrazu, se tato metoda výrazně rozšířila do mnoha oblastí průmyslu a opravdu velké uplatnění nachází ve zdravotnictví, v kriminalistice a dalších odvětvích našich každodenních životů.

V dnešní době jsou snahy celý proces snímání, digitalizace, zpracování a analýzy obrazu plně automatizovat, protože systémy částečně automatizované a manuální jsou velmi náročné na čas a vyžadují vysoce kvalifikovaný a zkušený personál.

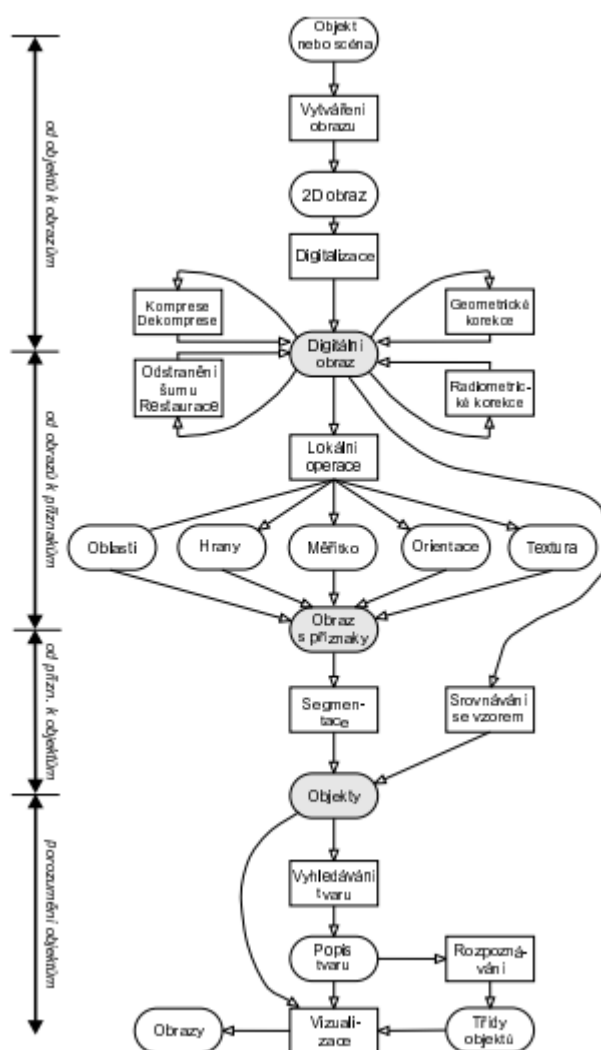
1.3.2. Obraz

Tento pojem v intuitivním smyslu chápeme jako obraz na sítnici lidského oka nebo obraz sejmutý kamerou. Matematicky ho lze modelovat pomocí tzv. obrazové funkce, kdy se jedná o spojitou skalární funkci f dvou nebo tří proměnných. V případě, že se jedná o obraz statický, popíše se obrazovou funkcí dvou souřadnic $f(x,y)$ v rovině.

Pokud se plošné obrazy v čase mění, nebo v případě, že se jedná o obrazy objemové (např. u tomografů), použije se funkce tří proměnných $f(x,y,t)$. [7]

Hodnoty obrazové funkce jsou určeny příslušnou aplikací, například odpovídají některé měřené fyzikální veličině (jasu u obrazu z černobílé TV kamery, teplotě termovizní kamery nebo schopnosti pohlcovat záření v daném místě objemu u rentgenového tomografu). [6]

Úlohou vnímání obrazu počítačem je najít relaci mezi vstupním obrazem a vytvořenými modely reálného světa. Přejdem od vstupního obrazu k modelu se obrazová informace zhušťuje a přitom se stále více využívá znalostí interpretace obrazových dat. Mezi vstupním obrazem a modelem (úplným popisem, interpretací, klasifikací) se definuje několik úrovní reprezentace obrazové informace. [7]



Obrázek 1.7 - Systém pro stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu, převzato z [7]

1.3.3. Snímání a digitalizace obrazu

Abychom obrazovou funkci mohli zpracovat v počítači, musíme ji digitalizovat. Při zpracování obrazů počítačem se pracuje s digitálními obrazovými funkcemi $f(x,y)$, které mají omezený obor hodnot, jsou reprezentované maticemi $M \times N$ bodů a jejich souřadnice i hodnoty jsou celočíselné. Definičním oborem obrazu je rovinná oblast R . $R = \{(x, y), 1 \leq x \leq x_m, 1 \leq y \leq y_n\}$. (2.1) kde x_m, y_n jsou maximálními souřadnicemi v obrazu.

V rámci digitalizace dochází ke vzorkování obrazu v této matici a v kvantování spojité jasové úrovně každého vzorku do K intervalů. Volba vhodného rozlišení obrazu a volba vzorkovací mřížky (čtvercová nebo hexagonální) je v rámci digitalizace klíčová. Čím jemnější vzorkování (čím větší M, N) a kvantování je, tím lépe je aproximován původní spojité obrazový signál. [7]

Prvky matice jsou obrazové elementy (pixely), jejichž hodnota je úměrná množství světelné energie. V trojrozměrném prostoru se pro objemový prvek používá pojem voxel (volume pixel) a ve trojrozměrném zpracování dvojrozměrných obrazů se pracuje se spicely (space intensity cell). [6]

V dnešní době existuje nepřeberné množství zařízení, díky kterým můžeme získat analyzovaný obraz přímo v digitální formě. Jedná se zejména o digitální fotoaparáty a kamery, co v sobě mají zabudovaný vhodný snímací prvek. Tyto přístroje převádějí světelnou energii na energii elektrickou (kamery typu CMOS a CCD). Velmi zjednodušeně lze tento proces popsat tak, že každá buňka převádí světelnou informaci ze své malé části obrazu na elektrický signál. Tisíce až milióny buněk citlivých na světlo jsou uspořádány do plošné matice. Rozlišovací schopnost použitého přístroje pak udává velikost této matice. [8]

1.3.4. Kalibrace

Po zvolení vhodné optické soustavy (objektiv, mezikroužky, ...), kamery či fotoaparátu a mikroskopu je před zahájením samotného snímání nezbytnou operací kalibrace celého systému. Ke kalibraci systému patří definování standardu pro bílou barvu, vhodné nastavení kamery, fotoaparátu, mikroskopu (clona, zaostření) a poté délková kalibrace. Kalibrace systému je nutnou podmínkou objektivizace a reprodukovatelnosti měření [6].

1.3.5. Zpracování obrazu

Zpracování obrazu je prostředkem, kterým je vstupní obraz modifikován jedním nebo více matematickými algoritmy pro generování výstupního obrazu, který je nějakým způsobem vylepšen. Například mohou být ořezány hrany nebo snížěn šum. Při zpracování obrazu je vstup i výstup ve formě obrazu na rozdíl od obrazové analýzy, kdy proces začíná zadáním obrazu a končí číselnými daty. Zpracování obrazu se často používá k přípravě obrázků před jejich analýzou.

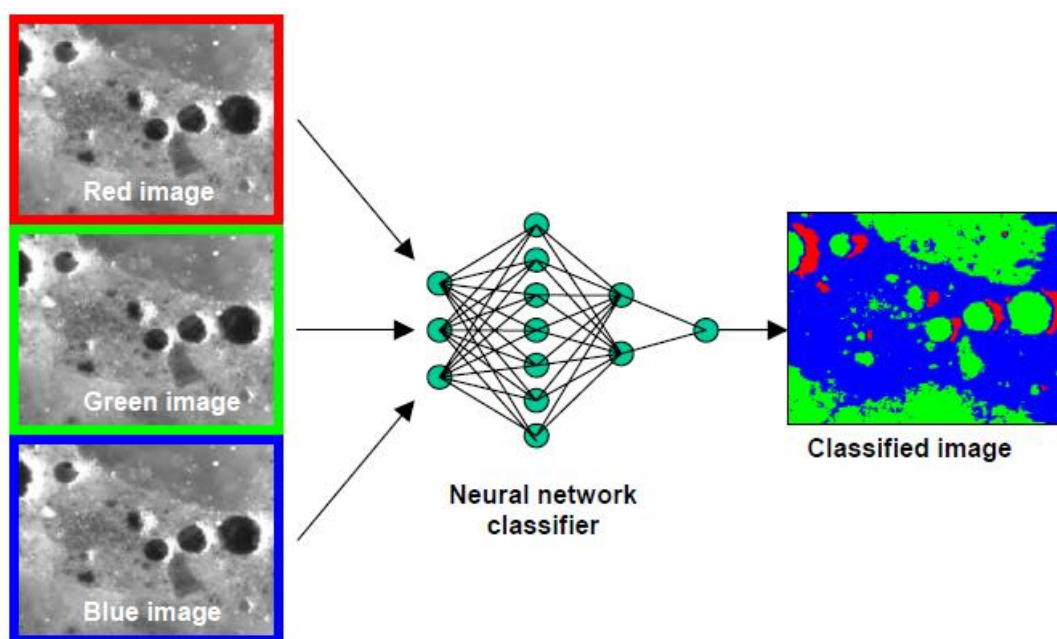
1.3.6. Analytický software

Když je vzorek převeden do digitální podoby a připraven k samotnému vyhodnocení, přichází na řadu práce se softwarem. Samotný software pracuje již s 2D daty. V současnosti softwarů pro analýzu obrazu existuje celá řada [1]. V rámci této práce se budeme zabývat pouze těmi, které jsou určeny speciálně pro beton. Mezi nejznámější lze jmenovat např. komplexní softwarové řešení NIS Elements Advanced Research, vyvíjené společností Laboratory Imaging s.r.o., nebo softwarový systém Lucia Concrete, který byl vytvořen stejnou společností přímo pro normovou zkoušku Stanovení charakteristik vzduchových pórů v zatvrdlém betonu. Dále např. software Image-Pro od společnosti Media Cybernetics, Inc., který mimo jiné nachází uplatnění při vyhodnocování pórovitosti polymerů a kompozitních materiálů, analýze vzduchových pórů a trhlin v betonu či mikroskopii cementového slínku.

Software optimalizuje proces zobrazování, celý pracovní postup a je klíčovým prvkem správy informací pro systémovou mikroskopii. Cílem analytického softwaru je identifikovat z obrázku vzduchové póry (prázdná místa) v pevné fázi betonu a rozlišit ostatní složky ve struktuře, jako je kamenivo a cementový tmel. Toho se dosáhne použitím několika způsobů vyhodnocení obrazu a fúzí dat, při které se spojí výsledky poskytované několika technikami. Software pro tyto účely využívá tři metody analýzy k identifikaci konkrétních součástí získaných snímků. [9]

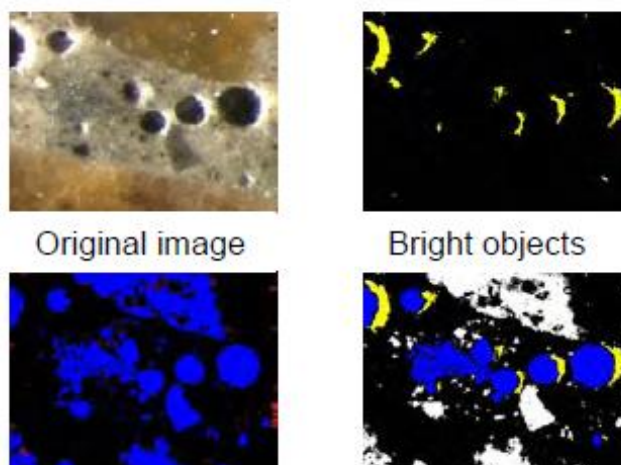
První z nich je analýza barev (viz. Obr. 1.8). Software vstupní obraz vyhodnocuje na základě analýzy barevných fází, kdy je důležité správně provést tzv. naprahování. Při této metodě jsou hodnoty barev RGB (červená, zelená, modrá) a poměry spektrálních pásem v každém bodě obrázku použity jako vstup do neuronové sítě, která byla vycvičena pro identifikaci specifických barevných vlastností jednotlivých složek

betonu. Softwaru pak jasně zadáváme, s jakými vybranými oblastmi snímku má na základě barevných odstínů dále pracovat. Z tohoto důvodu je vhodné v přípravné fázi póry vzorku zaplnit barevnou hmotou, která je jasně odlišná od zbývající hmoty, a při vyhodnocení můžeme dosáhnout vyšší přesnosti. Výsledkem je barevná mapa původního obrazu, která koreluje s identifikovanými složkami betonu. [9]



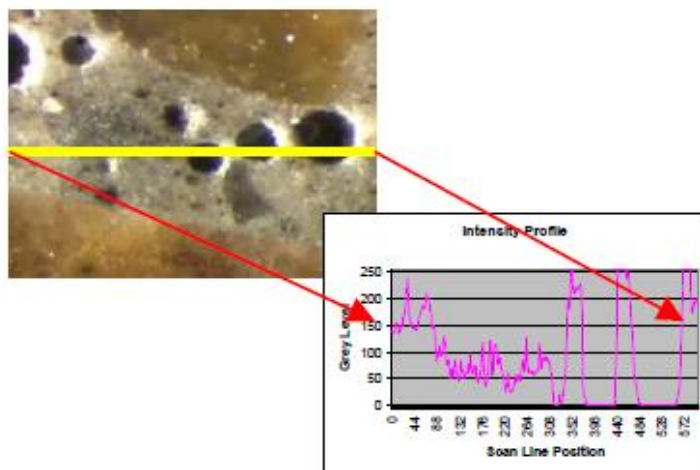
Obrázek 1.8 - Analýza barev [9]

Ve druhé fázi je prováděna analýza morfologických obrazů k identifikaci dutin v betonu na základě jejich tvaru (viz. Obr. 1.9). Tato metoda segmentuje každý snímek na jednotlivé objekty či skvrny, a poté analyzuje každý z nich svou jedinečnou charakteristikou tvaru a intenzity. Pro identifikaci dutin založených na korelaci klíčových obrazových komponent, které korelují s prázdnými místy (vzduchovými dutinami), se používá algoritmus korelace fuzzy logiky. [9]



Obrázek 1.9 - Metoda analýzy tvaru [9]

Třetí přístup analýzy využívá jedinečnou strukturu intenzity prázdného prostoru (vzduchových pórů) pro generování modelu (nebo filtru), který analyzuje intenzitu profilu podél zvolené linie měřící přímky (viz. Obr. 1.10). Jedinečné vlastnosti intenzity spojené se vzduchovými dutinami jsou pak identifikovány pomocí expertního systémového základního pravidla a vzduchový pór je detekován. [9]



Obrázek 1.10 - Analýza barev [9]

Nakonec jsou výsledky těchto tří metod analýzy sloučeny pomocí dvou různých algoritmů. První je aplikován na každý jednotlivý obraz po obrazu a koreluje klasifikační výstupy z výše uvedených tří klasifikačních metod. Kombinací a korelací vlastností z každé jednotlivé metody analýzy se zlepšuje spolehlivost detekce komponentů a počet nesprávných klasifikací se snižuje. [9]

Druhý algoritmus se aplikuje v celé sadě obrazových dat a používá se pro korelaci výsledků klasifikace jednotlivých obrázků v několika souvislých snímcích. Opět platí, že korelace výsledků klasifikace mezi více obrazy pomáhá zlepšit klasifikaci komponent a snížit chybnou klasifikaci. [9]

Navzdory nejlepším snahám navrhnout analytický software pro přesné detekování a vyhodnocování vzduchových dutin ve struktuře betonu ze zdrojových snímků stále existují případy, kdy některé prázdné prostory (vzduchové dutiny) nejsou vyhodnoceny. Malé rozdíly ve světle napříč vzorkem, neobvyklé struktury a malé, mělké vzduchové póry někdy vedou k jejich vynechání při procesu vyhodnocení. To lze očekávat, protože žádný počítačový algoritmus nemůže předvídat všechny potenciální defekty, které se mohou vyskytnout ve struktuře sledovaného obrazu betonu. [9]

2. PRAKTICKÁ ČÁST

2.1. Výroba zkušebního tělesa

Ke zjišťování porozity betonu užitím gravimetrické metody a metodou světelné mikroskopie a obrazové analýzy bylo nutné pořídit dostatečný počet zkušebních vzorků.

V první řadě bylo žádoucí vybetonovat těleso, ze kterého by poté mohly být zkušební vzorky odebrány. Dle technické normy ČSN EN 480-11 Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Zkušební metody – Část 11: Stanovení charakteristiky vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu, kterou se daná zkouška řídí, jsou vhodnými tvary těles krychle o straně 150 mm nebo válce o průměru 150 mm. Jako zkušební těleso pro účely dané diplomové práce byl zvolen trámec o rozměrech 150 x 150 x 750 mm.

Výroba trámce byla prováděna v laboratoři Experimentálního centra ČVUT na Fakultě stavební. Receptura základní betonové směsi, která měla složit pro naplnění jedné formy (objem 20 l), byla navržena takto:

Tabulka 2.1 - Složení betonové směsi

Č.	Složka	Množství
1.	Portlandský cement CEM I 42,5 R	8,73 kg
2.	Kamenivo fr. 0/4	17,45 kg
3.	Kamenivo fr. 4/8	5,82 kg
4.	Kamenivo fr. 8/16	11,64 kg
5.	Voda	3,92 l

Jedná se o směs prostého betonu bez výztuže a bez přísad a příměsí. Vodní součinitel navržené směsi $w/c = 0,43$.

Dle této receptury byly jednotlivě naváženy všechny složky betonu. Poté následovalo míchání betonové směsi laboratorní míchačkou. V průběhu míchání byl dvakrát proces zastaven, aby mohla být zachycená hmota, přilnutá na stěnách míchací nádoby, zednickou lžící setřena a vrácena k míchané hmotě pro zajištění důkladného promíchání směsi. Jakmile směs nabyla správné konzistence a všechny složky byly důkladně promíseny, byla směs čerstvého betonu uložena do čisté, předem sestavené ocelové formy, která byla vymazána odbedňovacím olejem pro usnadnění odbedňovacího procesu. Nakonec beton uložený ve formě musel být pomocí laboratorního vibračního stolu dobře zhutněn. Takto zpracovaný beton byl pro ochranu před vysušováním zakryt fólií a uložen v laboratoři na místo, kde mohl hydratovat, tuhnout a tvrdnout. Druhý den byl betonový trámec opatrně odbedněn a vložen do vodní lázně. Po 3 týdnech byl trámec z lázně vyndán, aby mohl být o týden později rozřezán na menší hranoly normové velikosti určené pro další zkoušky.

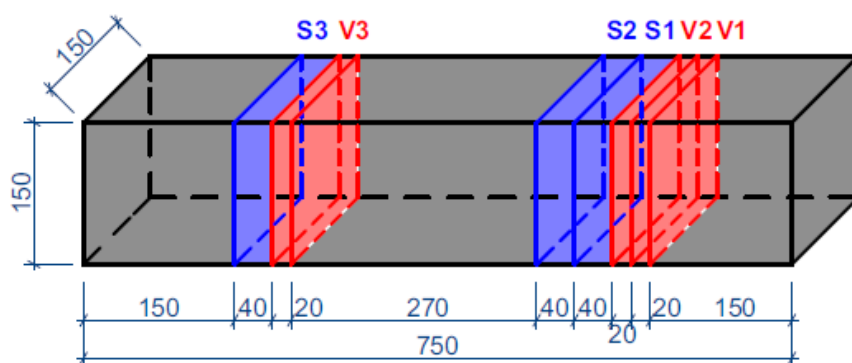
2.2. Příprava zkušebních vzorků

Jelikož na vzorcích měla být prováděna zkouška Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu, příprava vzorků podléhala jasným pokynům a požadavkům výše zmíněné české technické normy ČSN EN 480-11.

V první řadě bylo nutné ze zkušebního tělesa vyříznout nejméně 2 zkušební vzorky o šířce 100 mm, výšce 150 mm a tloušťce 20 mm kolmo k hornímu povrchu zkušebního vzorku. Jelikož je zapotřebí mít povrch výřezů co nejvíce rovný, hladký,

bez porušených hran, atd., byla tato práce svěřena pracovníkům Kamenictví Záruba v Divišově, kde mají k dispozici stolní pilu s diamantovým kotoučem o průměru 500 mm s vodním chlazením, díky čemuž byly nařezané hranoly skutečně precizní s velice rovnou a hladkou řezovou rovinou.

Betonový trámec 150 x 150 x 750 mm byl nařezán na několik menších hranolů dle následujícího obrázku.



Obrázek 2.1 - Zkušební betonový trámec, vlastní tvorba

Vznikly tedy 3 vzorky o tloušťce 20 mm, určené pro normovou zkoušku optické mikroskopie a obrazové analýzy, a dále pak další 3 vzorky o tloušťce 40 mm, které byly následně podrobeny vysušování a nasakování vodou pro výpočet objemové hmotnosti a hodnot pórovitosti přístupné vodě.

Z obrázku 2.1 je patrné, že řezy zkušebního tělesa jsou voleny tak, aby byly vždy dva vzorky stejné tloušťky vedle sebe a jeden samostatně ve vzdálenějším místě.

Další fází přípravy zkušebních vzorků pro optickou mikroskopii a obrazovou analýzu bylo zbroušení, vyleštění a vyčištění zkušební povrchu. Tato činnost již byla přenechána akreditované zkušební laboratoři, která následně prováděla i samotnou zkoušku a její vyhodnocení.

2.3. Zkouška stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu

Zkoušku stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu na připravených zkušebních betonových vzorcích/ploškách prováděla akreditovaná

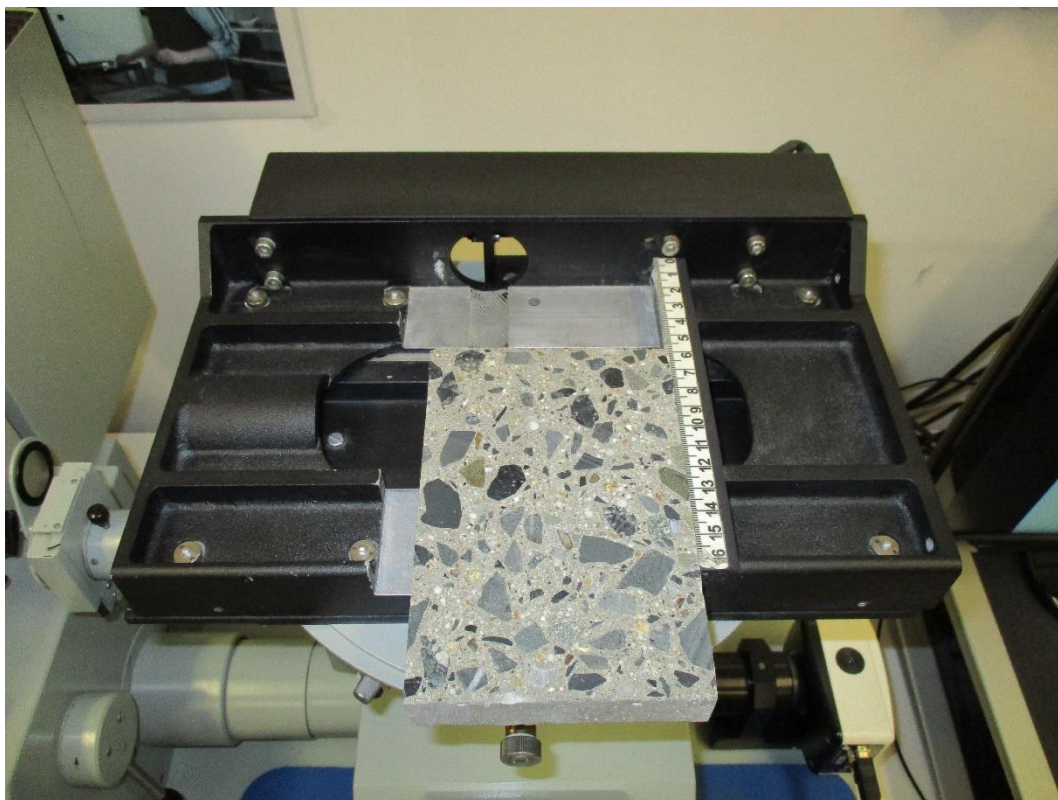
zkušební laboratoř společnosti BETOTECH s.r.o., Laboratoř Most, která je pro tuto zkoušku vybavena potřebnými přístroji.



Obrázek 2.2 - Pracovní stanice, vlastní tvorba

Daná laboratoř disponuje metalografickým mikroskopem ZEISS JENA NEOPHOT 21, který je vybaven barevnou digitální CCD kamerou Olympus C-8080 a softwarem pro snímání, zpracování a analýzu obrazu. Pracovní stanice obsahuje 100W halogenové a 150W xenonové světelné zdroje a mikroskop umožňuje zvětšení 6,3x, 12x, 25x, 50x a 100x. Při provádění zkoušky je normou požadováno stonásobné zvětšení s povolenou odchylkou ± 10 a mikroskop je pro zkoušku tedy vyhovující.

Před samotným zahájením zkoušky musí být správně usazen zkušební vzorek na manipulační stolek tak, aby hrana vzorku byla rovnoběžná s lištou. Měřítka, které je součástí manipulačního stolku, slouží pro přesný posun měřících přímek. Mimo to je ale přístroj nastaven tak, že právě jedno otočení šroubu, který zkušební vzorek po manipulačním stolku posouvá, zajistí posunutí o 6 mm, což je vzdálenost stanovená normou ČSN EN 480-11.



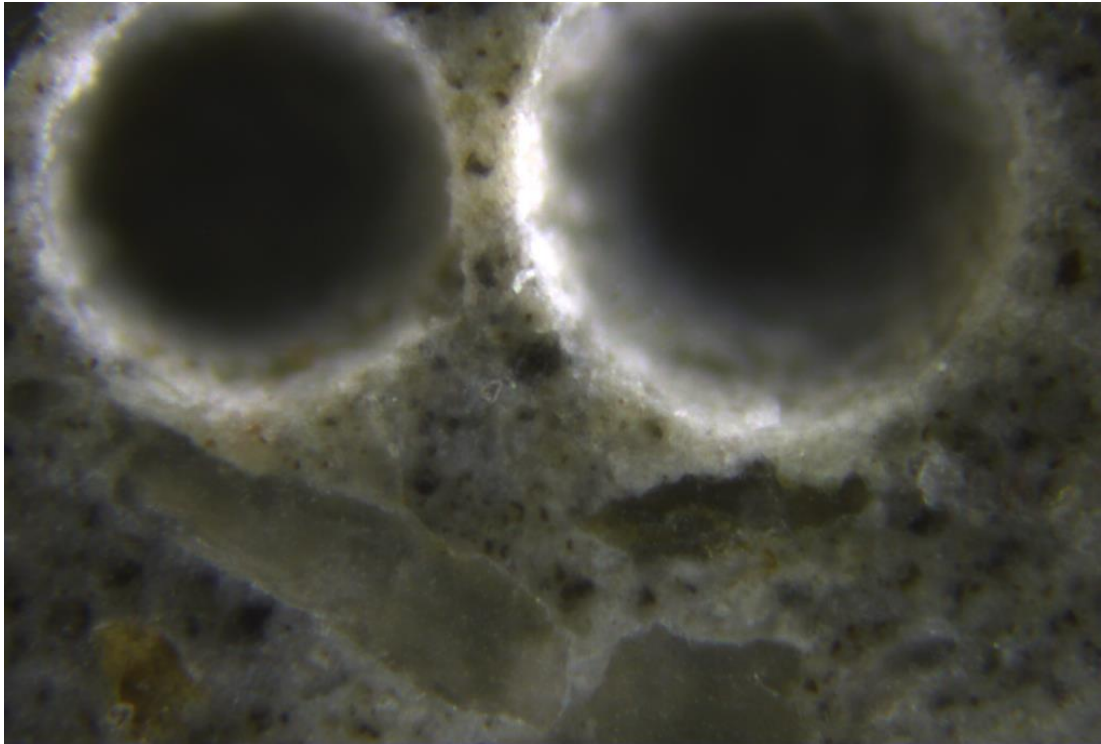
Obrázek 2.3 - Zkušební vzorek na manipulačním stolku, vlastní tvorba

Jakmile je vzorek v mikroskopu správně umístěn a obraz sledované plochy automaticky snímán kamerou, musí být celá sestava vhodně nakalibrována, nastaví se požadované zvětšení, zaostření obrazu a další úkony nutné pro úspěšné provedení zkoušky.



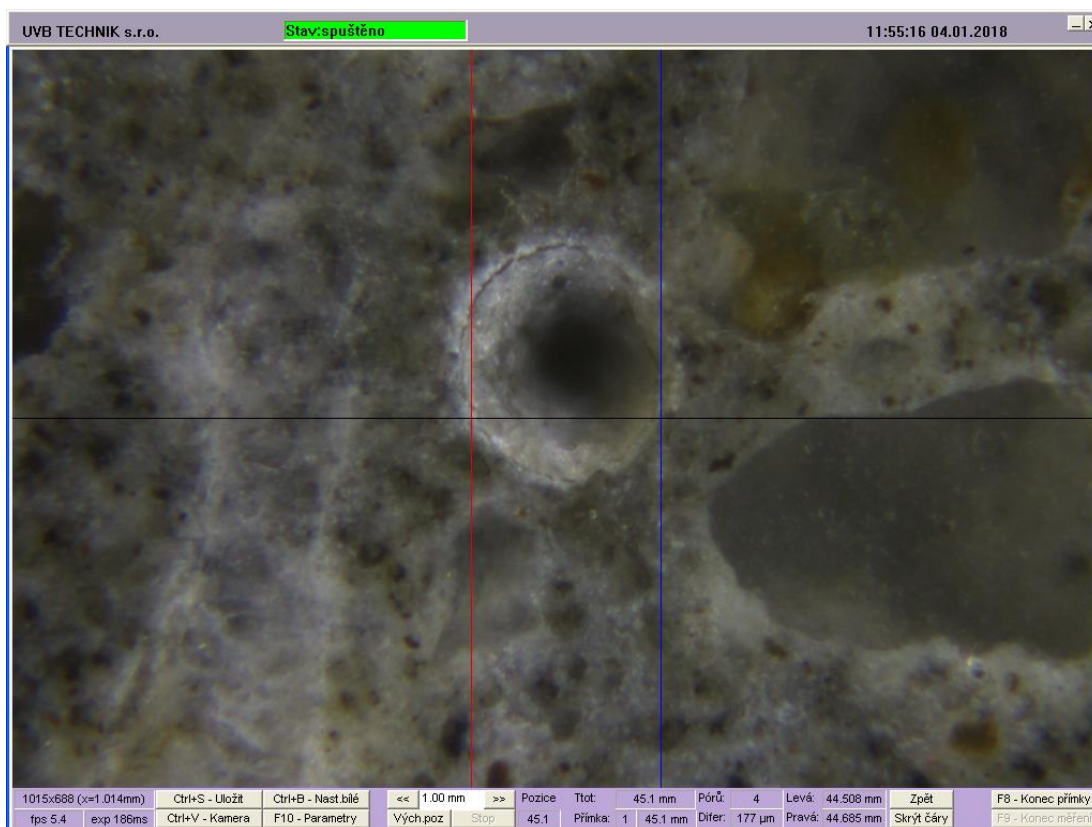
Obrázek 2.4 - Průběh zkoušky, vlastní tvorba

Poté, kdy je vše správně nastaveno, může být sledovaný živý obraz kontinuálně pozorován na monitoru připojeného PC a vyhodnocován příslušným softwarem. V dané laboratoři pro stanovení charakteristik vzduchových pórů v zatvrdlém betonu používají analytický software UVB TECHNIK-MVP.



Obrázek 2.5 -.Světelná mikroskopie, obrazová analýza, vlastní tvorba

Daný software zobrazuje obraz snímaný kamerou s vyznačenou měřicí přímkou a kvalifikovaná obsluha zařízení manuálně zadává body, kde měřicí přímka protíná vzduchový pór. Na základě toho software automaticky provádí vyhodnocení všech měřených veličin. V souladu s normou ČSN EN 480-11 se jedná zejména o celkovou délku měřících přímek T_{tot} , délku měřících přímek protínajících vzduchové póry T_a , ale i např. počet zachycených pórů, jejich polohu definovanou vzdáleností od počátku konkrétní měřicí přímky, a jiné další parametry.



Obrázek 2.6 - Obrazová analýza, vyhodnocení, vlastní tvorba

V případě, že si obsluhující osoba není jista, zda – li se na snímaném obrazu vyskytuje skutečně vzduchový pór, nebo jestli se jedná o odlomenou či jinak poškozenou hranu, případně pouze o nějaké zkreslení obrazu, může provést ověření pohledem do okuláru mikroskopu.

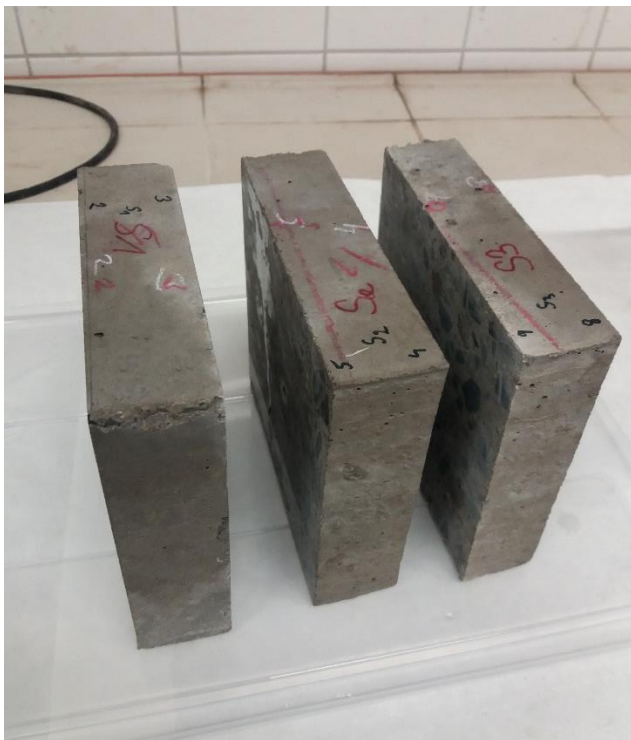
Jakmile je tímto způsobem analyzována celá měřicí přímka, může být vzorek na manipulačním stolku přesunut do polohy další měřicí přímky, tedy při normové zkoušce se jedná o vzdálenost 6 mm. Tímto způsobem se pokračuje, dokud není vyhodnocena celá zkoumaná ploška.

Z výše uvedeného textu a z obrázku 2.6 je zřejmé, že výsledky takovéto zkoušky jsou do značné míry závislé na zkušenostech a kvalifikaci, případně i fyzickém stavu (poruchy zraku, únava) personálu, který zkoušku provádí.

Po ukončení světelné mikroskopie a obrazové analýzy všech vzorků jsou ze všech zaznamenaných dat počítačovým softwarem dopočítány všechny hledané veličiny. Výpočty jsou prováděny dle vzorců stanovených příslušnou normou ČSN EN 480-11.

2.3. Gravimetrická metoda

Daná metoda se skládá ze dvou fází, kdy jako první bylo prováděno vysušení, a poté nasakování vodou. Pro tuto zkoušku byly použity řezy tl. 40 mm s rozměry stran 150 x 150 mm, jak již bylo uvedeno v textu výše.



Obrázek 2.7 - Sada zkušebních vzorků S1, S2 a S3, vlastní tvorba

Vysušování betonových vzorků S1, S2 a S3 proběhlo v Laboratoři vysokých napětí na Fakultě elektrotechnické ČVUT, kterou spravuje Katedra elektroenergetiky. Laboratoř je vybavena horkovzdušnou sušárnou Binder, do které byly všechny 3 betonové vzorky pár dní po nařezání naskládány a při konstantní teplotě 105 °C vysušeny.

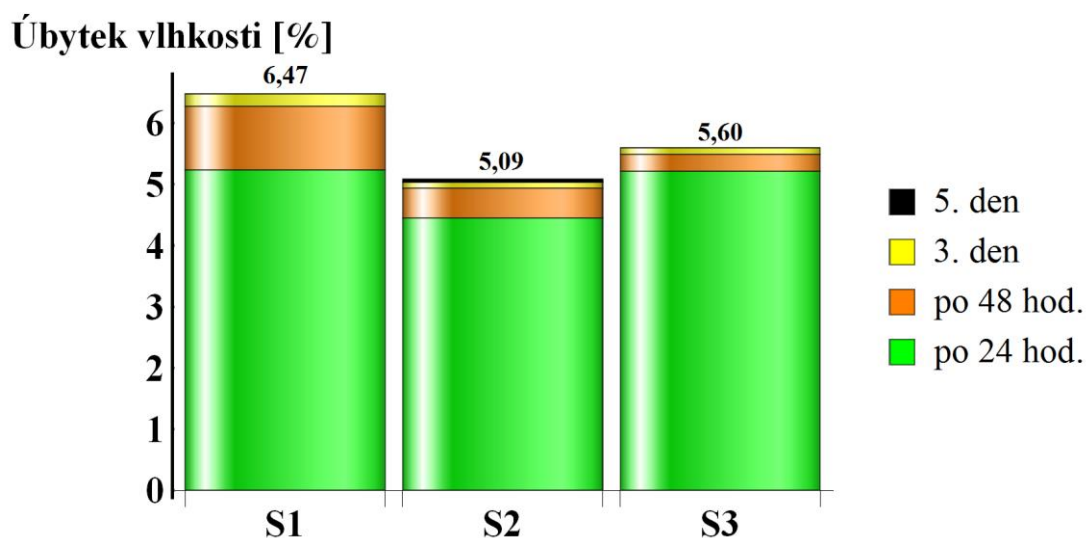
Vzorky byly každý den od zahájení vysoušení váženy, kdy nejprve byly vyjmuty ze sušárny, poté se nechaly chvíli vychladnout, dokud se nedosáhlo pokojové teploty, a teprve tehdy se zvažily na laboratorních vahách KERN.

V předchozích fázích přípravy, při řezání, byly vzorky vystaveny vodnímu chlazení řezacího kotouče, tudíž jejich vlhkost byla před zahájením vysoušení mírně zvýšena. Jelikož se ale jednalo o poměrně tenké betonové hranoly, proces vysoušení bylo možné 5. den prohlásit za ustálený a ukončit ho.

Za dosažení ustálené konstantní hmotnosti se dle ČSN EN ISO 12570 považuje stav, kdy změna hmotnosti 3 vážení po sobě, provedených po 24 h, je menší, než 0,1 % z celkové hmotnosti vzorku [10].

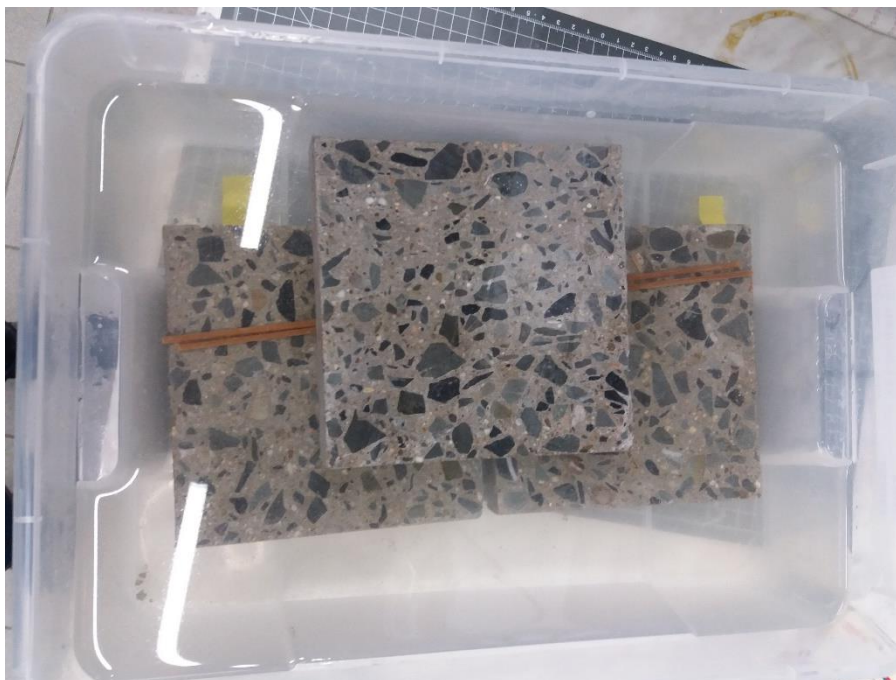
Vzorky tedy byly ze sušárny vyndány a následující 2 dny ponechány volně na vzduchu v místnosti.

Hodnoty navážených hmotností v průběhu vysoušení jsou zaznamenány v tabulce v příloze 2. Velikost úbytku vlhkosti (vody) z objemu betonových vzorků S1, S2 a S3 během procesu vysušování ukazuje následující graf:



Graf 2.1 - Přírůstky hmotnosti jednotlivých trámů v průběhu vysoušení

Ve druhé fázi gravimetrické metody musí zkušební vzorky naopak dosáhnout stavu plného nasycení vodou. Tato fáze byla prováděna v laboratoři Ústavu skla a keramiky na VŠCHT v Praze a byla zahájena uložením betonových vzorků do plastové nádoby naplněné vodou v takovém množství, aby byl beton pod vodou kompletně ponořen. Vložením dřevěných špejlí mezi hranoly se zajistily rozestupy tak, aby všechny hrany těchto vzorků byly v kontaktu s vodou v co největší možné ploše.



Obrázek 2.8 - Nasákavost betonu, vlastní tvorba

Další postup byl obdobný jako při vysoušení. Opět se v určitých časových intervalech vzorky musely vážit, dokud se nedosáhlo ustáleného stavu. Aby se dala dopočítat otevřená pórovitost přístupná vodě, bylo nutné vážení provádět ve dvou různých etapách. První etapa zahrnovala vážení vzorku ponořeného ve vodě, na laboratorních vahách zavěšeného. V etapě druhé se zjišťovala hmotnost vzorku nasyceného vodou vážením na vzduchu. [1]



Obrázek 2.9 - Gravimetrická metoda, vážení pod vodou, vlastní tvorba

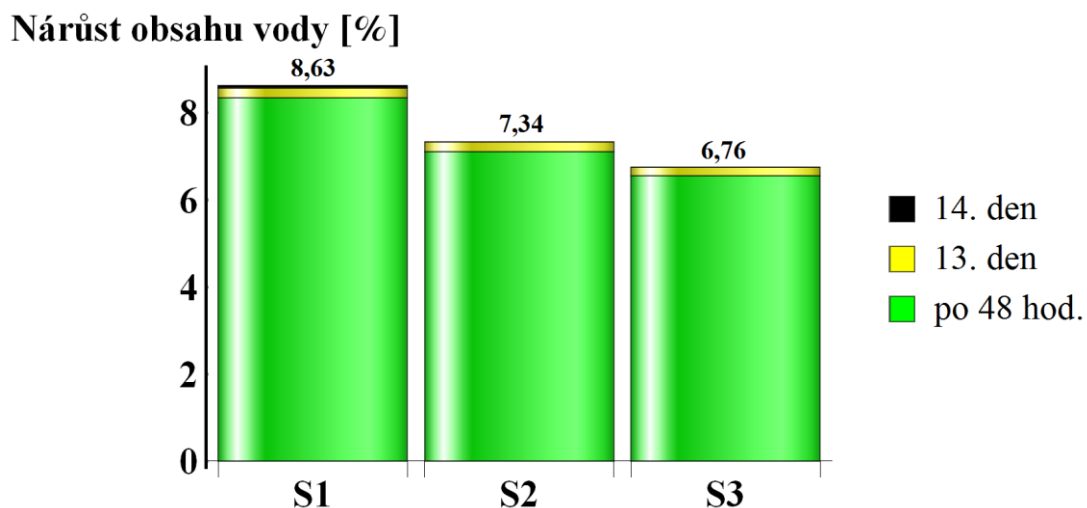


Obrázek 2.10 - Gravimetrická metoda, vážení na vzduchu, vlastní tvorba

Vážení bylo opět prováděno v pravidelných časových intervalech tak dlouho, dokud všechny vzorky nebyly vodou plně nasyceny, tedy dokud nedosáhly ustáleného stavu [1].

Ustálený stav je definován normou ČSN EN ISO 12570 úplně stejně, jako pro případ vysušování, a platí tedy, že změna hmotnosti 3 vážení po sobě, provedených po 24h, musí být menší, než 0,1 % z celkové hmotnosti vzorku. Ustálený stav byl v našem případě konstatován 14. den od vložení betonových vzorků do vody.

Hodnoty získané z obou typů vážení vzorků v průběhu nasakování vodou jsou zaznamenány v tabulce v příloze 2. Velikost přírůstku vlhkosti (vody) v objemu betonových hranolů během procesu nasakování je zaznamenána v následujícím grafu:



Graf 2.2 - Přírůstky hmotnosti jednotlivých trámců v průběhu nasakování

3. MATEMATICKÝ MODEL

Pro výpočty složitějších matematických problémů, jako výpočet řešení většího množství lineárních či nelineárních algebraických rovnic, je třeba použít numerických metod. Numerické metody jsou takové, které na rozdíl od analytických, poskytují diskrétní číselné řešení ve zvolených bodech předem definované oblasti. Počítačovým řešením daného problému a sestavením vhodného matematického modelu lze daný výpočet velmi urychlit a lze tak vypočítat řešení soustav tisíců a více rovnic.

Je třeba tedy sestavit matematický model dané úlohy. V této části je však potřeba vzít v potaz, že musíme daný fyzikální problém zjednodušit tak, aby byl vůbec řešitelný pomocí dostupných prostředků. Jde tedy o obtížnou úlohu, model musí splňovat požadavky na řešitelnost a také na jistou přesnost výsledků. Nebylo by vhodné, aby se výsledky, které nám řešení matematického modelu poskytne, pohybovaly mimo rozsah výsledků reálného fyzikálního modelu zjištěné např. měřením. Citlivé sestavení matematického modelu popisující určitý problém je tedy z hlediska samotného návrhu velmi důležité.

Dalším krokem je návrh samotného výpočetního algoritmu řešení a volba vhodného výpočetního prostředku. Jde o volbu programovacího jazyka, ve kterém budeme daný matematický model popisovat a implementovat navržené algoritmy.

Pro počítačový model vyhodnocení a určení pórovitosti daného vzorku betonu byl zvolen program Wolfram Mathematica. Jedná se o tzv. vyšší programovací jazyk, který v sobě obsahuje již předprogramované početní operace a výpočtové bloky. Jako vstupní parametry byly zvoleny geometrické rozměry betonového vzorku. Aby navržený algoritmus výpočtu pórů a dutinek byl relativně snadno spočitatelný, je potřeba geometricky vyjádřit jejich velikost. Jako geometrický tvar pórů byly pro potřeby matematického modelu zvoleny rotační elipsoidy. Pro vyjádření plochy elipsoidu umístěného v počátku souřadnic platí obecná rovnice:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \leq 1 \quad (3.1)$$

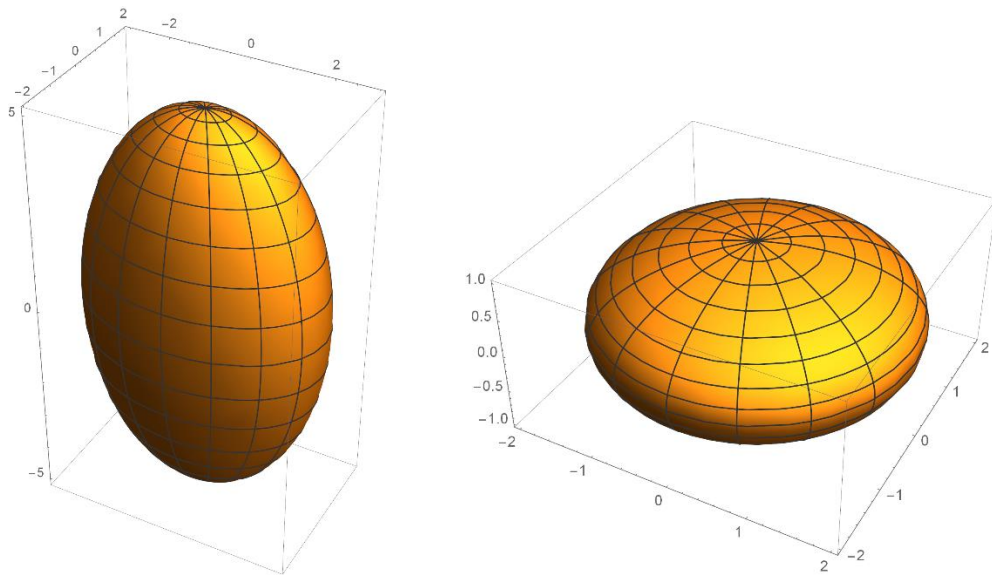
Tato nerovnice zahrnuje množinu všech bodů, které se nacházejí uvnitř elipsoidu, v případě rovnosti jsou body na povrchu elipsoidu. Koeficienty a , b , c představují velikosti hlavních poloos elipsoidu. Aby se však mohlo s elipsoidem dále pracovat, tedy jej měnit jeho velikost, čili velikost jeho poloos, měnit jeho umístění v prostoru a různě jej prostorově natáčet, je třeba danou rovnici parametrizovat. Pro parametrické vyjádření plochy platí, že souřadnice každého bodu je zapsána jako funkce dvou reálných proměnných, tedy parametrů. V případě rotačního elipsoidu:

$$x = a \cdot \cos(t) \cdot \cos(u) \quad (3.2)$$

$$y = b \cdot \sin(t) \cdot \cos(u) \quad (3.3)$$

$$z = c \cdot \sin(u) \quad (3.4)$$

Díky periodicitě funkcí platí pro definiční obor $u \in \langle 0; 2\pi \rangle$, $v \in \langle -\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2} \rangle$. Výše uvedené rovnice představují vektor parametrizace elipsoidu se středem v počátku.



Obrázek 3.1 - Protáhlý a zploštělý elipsoid, vlastní tvorba

Aby bylo možné vyhodnotit řez elipsoidem v různé vzdálenosti od počátku souřadnic a v různém úhlu pootočení, je potřeba výše uvedené vztahy upravit. Řezem je plocha roviny, která protíná daný objem, ve kterém se nachází náhodně rozmístěné elipsoidy. Parametrizace elipsoidu pak nebude úplně jednoduchá, je potřeba sestavit matici rotací kolem všech os. $M1, M2, M3 = f(\alpha, \beta, \gamma)$. Matice M1, M2, M3 jsou v následujícím kroku přenásobeny vektorem parametrizace, a tím je získán obecně otočený elipsoid pro zadané úhly pootočení v maticích M1, M2, M3. Dále je nastavena vhodná vzdálenost elipsoidů od počátku soustavy souřadnic a jejich náhodné rozmístění do prostoru s náhodnou velikostí poloos. Pro případ, že budou mít poloosy stejnou velikost ($a = b = c$), jde o kouli. Velikosti pórů a dutinek ve vzorku betonu jsou tedy aproximovány náhodně rozmístěnými elipsoidy a koulemi pro potřeby matematického modelu.

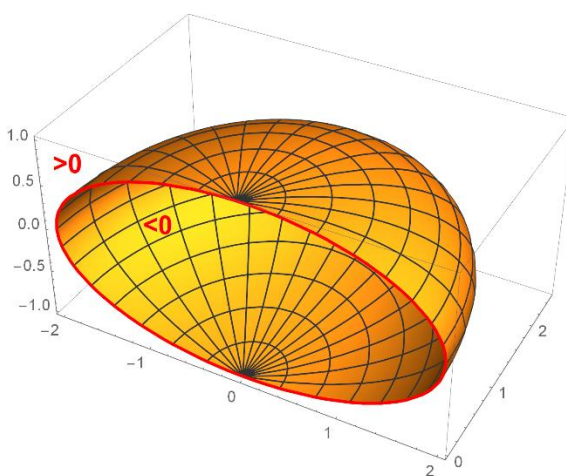
Samotné vyhodnocování pórovitosti v matematickém modelu spočívá v tom, že se předem definuje počet elipsoidů. Z tohoto známého počtu se vypočítá objem póru:

$$V = \frac{4}{3} \cdot a \cdot b \cdot c \quad (3.5)$$

Takto vypočtené póry se pak porovnávají s hodnotou pórovitosti počítané tzv. traverzní metodou zakotvenou v normě. Tento postup je popsán v kapitole 4.2.

Je potřeba ze zvolené geometrie krychle definovat řez a v něm zobrazit plochy průniku roviny řezu s elipsoidy. Vzniklé plochy jsou různě natočené a rozmístěné elipsy. Pro rovnici elipsy platí vztah:

$$\frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} \leq 1 \quad (3.6)$$



Obrázek 3.2 - Řez elipsoidem a znázornění testu zobrazované plochy elipsy v řezu, vlastní tvorba

Pokud by se elipsy protínaly a řezem vzniklá plocha by tvořila geometricky složitější obrazec, byl by výpočet pórovitosti celkem složitý. Aby k tomuto jevu nedocházelo, je vždy zvolen určitý krok dělení elipsoidů, který v případě modelu o velké procentuální pórovitosti zmenší jejich velikost.

Řez betonovou krychlí (100 x 100 x 100 mm) zobrazí v rovině (100 x 100 mm) náhodně rozmístěné elipsy. K zobrazení elipsy je použito testování bodem. Pokud je

bod menší, než nula, zobrazí se celá elipsa, pokud je bod roven nule, zobrazí se daný bod, který je na křivce. Pokud je větší než nula, nezobrazí se nic.

$$p \cdot x^2 + q \cdot y^2 + 2 \cdot r \cdot x + 2 \cdot s \cdot y + t = 0 \quad (3.7)$$

Vynesené měřicí přímky protínají jednotlivé elipsy a velikost tětiv je pak určena jako absolutní hodnota rozdílu těchto průsečíků.

4. VÝSLEDKY A DISKUZE

4.1. Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu

Jak již bylo popsáno kapitole 2.3, na 3 vzorcích prostého betonu o normové velikosti 150 x 100 x 20 mm byla v akreditované zkušební laboratoři provedena zkouška Stanovení charakteristik vzduchových pórů v zatvrdlém betonu.

Podle vzorce definovaného normou ČSN EN 480-11 se celkový obsah vzduchových pórů spočítá jako:

$$A = \frac{T_a \cdot 100}{T_{tot}} \quad (3.7)$$

, kde T_a je délka tětiv přes všechny póry, tedy celková délka měřících přímek protínajících vzduchové póry [mm], T_{tot} je celková měřená délka, tedy součet délek všech měřících přímek [mm] a A je celkový obsah vzduchu [objemová %].

Jelikož obrazová analýza, kterou je zkouška vyhodnocována, pracuje se 2D daty a je tedy zřejmé, že výsledek musí být vztažen ke sledované ploše, nikoliv objemu, jak uvádí daná norma, což je patrné i ze vzorce pro výpočet. Výsledný celkový obsah vzduchu by ve skutečnosti v objemových procentech vycházel pouze za předpokladu, že by se jednalo o póry válcové, procházející skrz celé zkušební těleso s konstantním průměrem, rovnoběžně s hranou tělesa. I přesto nám ale tato zkouška umožňuje si určitou představu o pórovitosti zkoušeného vzorku udělat.

Při zkoušce byly testovány vzorky V1, V2 a V3 viz. Obrázek 2.1.

Z obrázku 2.1 jde vidět, že zkouškou můžeme porovnat výsledky u dvou zkoušených sousedních plošek, jejichž obsah pórů by měl být v podstatě totožný. Dále byla zkoumána ploška dostatečně vzdálena předchozím dvěma, z čehož můžeme vidět, jak moc se liší pórovitost ve dvou různých místech zkušebního tělesa.

Jelikož se jednalo o zkoušku normovou, bylo standardně provedeno vyhodnocení celkové, všech tří plošek, s celkovou délkou měřících průmek 3 600 mm (1 200 mm/vzorek). Výsledky jsou uvedené v následující tabulce a jsou vztažené k celému zkušebnímu tělesu – betonovému trámci o rozměrech 150 x 150 x 750 mm.

Tabulka 4.1 - Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu

Celková délka soustavy měřících průmek	T_{tot}	3602,43	Mm
Celková délka tětív přes všechny póry	T_a	111,723	Mm
Celková délka přes pevnou fázi	T_s	3490,71	Mm
Objem cementového tmele v betonu	P	33,9	%
Celkový obsah vzduchu	A	3,10	%
Celkový počet měřených tětív	N	1015	
Měrný povrch systému vzduchových pórů	a	36,3	mm⁻¹
Poměr tmel : vzduch	R	10,94	
Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů	L	0,184	mm
Obsah mikroskopického vzduchu	A₃₀₀	0,88	%

Pro výpočet hodnot v tabulce byly použity tyto vzorce:

$$N = \sum_{i=1}^n C_i \quad (4.1)$$

N je celkový počet tětív [-] v každé velikostní třídě.

$$\alpha = \frac{4 \cdot N}{T_a} \quad (4.2)$$

α vyjadřuje měrný povrch vzduchových pórů [mm⁻¹], T_a je celková délka měřících průmek přes vzduchové póry [mm].

$$R = \frac{P}{A} \quad (4.3)$$

R [-] je poměr objemu tmel: vzduch. P je objem cementového tmele v betonu [-], A celkový objem vzduchu [-].

Následující rovnice udává součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů \bar{L} [mm]. Použitá rovnice pro tento výpočet závisí na vypočteném R z výše uvedeného vztahu. Pokud je $R > 4,342$, musí se použít se vztah:

$$\bar{L} = \frac{3 \cdot [1,4 \cdot (1 + R)^{\frac{1}{3}} - 1]}{\alpha} \quad (4.4)$$

Je-li $R \leq 4,342$, musí se použít:

$$\bar{L} = \frac{P \cdot T_{tot}}{400 \cdot N} \quad (4.5)$$

Podíváme-li se na plošky jednotlivě, výsledky vychází takto:

Vzorek V1

Tabulka 4.2 Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu, vzorek V1

Celková délka soustavy měřících přímek	T_{tot}	1200,05	mm
Celková délka tětív přes všechny póry	T_a	43,513	mm
Celková délka přes pevnou fázi	T_s	1156,54	mm
Objem cementového tmele v betonu	P	33,7	%
Celkový obsah vzduchu	A	3,63	%
Celkový počet měřených tětív	N	380	
Měrný povrch systému vzduchových pórů	a	34,9	mm⁻¹
Poměr tmel : vzduch	R	9,29	
Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů	L	0,177	mm
Obsah mikroskopického vzduchu	A₃₀₀	0,74	%

Vzorek V2

Tabulka 4.3 - Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu, vzorek V2

Celková délka soustavy měřících přímek	T_{tot}	1202,33	mm
Celková délka tětív přes všechny póry	T_a	30,603	mm
Celková délka přes pevnou fázi	T_s	1171,73	mm
Objem cementového tmele v betonu	P	33,7	%
Celkový obsah vzduchu	A	2,55	%

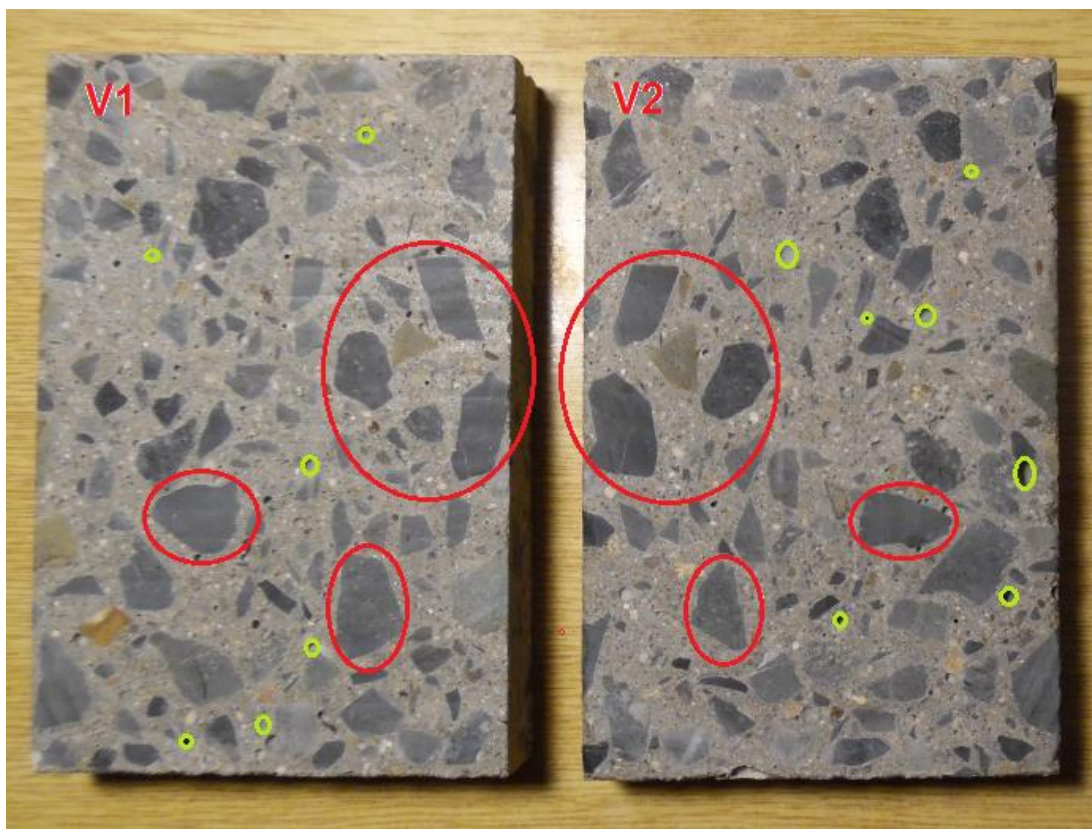
Celkový počet měřených tětív	N	330
Měrný povrch systému vzduchových pórů	a	43,1 mm⁻¹
Poměr tmel : vzduch	R	13,23
Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů	L	0,168 mm
Obsah mikroskopického vzduchu	A₃₀₀	0,86 %

Vzorek V3

Tabulka 4.4 - Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu, vzorek V3

Celková délka soustavy měřících přímek	T _{tot}	1200,05	mm
Celková délka tětív přes všechny póry	T _a	37,607	mm
Celková délka přes pevnou fázi	T _s	1162,44	mm
Objem cementového tmele v betonu	P	33,7	%
Celkový obsah vzduchu	A	3,13	%
Celkový počet měřených tětív	N	305	
Měrný povrch systému vzduchových pórů	a	32,4	mm⁻¹
Poměr tmel : vzduch	R	10,77	
Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů	L	0,184	mm
Obsah mikroskopického vzduchu	A₃₀₀	1,04	%

Z výsledků zkoušky uvedených v tabulkách 4.2 a 4.3 pro zkoumané plochy V1 a V2 i přes to, že se jedná o sousední plochy původně spolu spojené, vychází celkový obsah vzduchu, reprezentovaný vzduchovými póry v ploše jiný (pro V1 je $A = 3,63\%$ a pro vzorek V2 je $A = 2,55\%$). To jde vidět i z fotografie 4.1 obou těchto plošek, která byla pořízena ještě před jejich broušením a samotnou zkouškou.



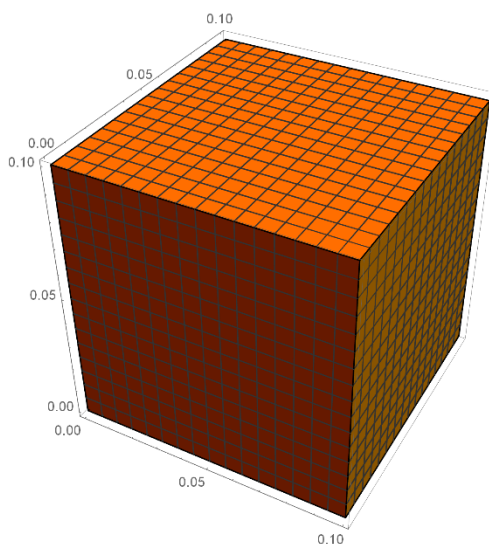
Obrázek 4.1 - Zkoumané plochy V1 a V2, vlastní tvorba

Na obrázku jsou červeně označené řezy kameniva, dle kterých lze identifikovat, že se jedná skutečně o sousední plošky, ovšem žlutě označené některé, pouhým okem dobře viditelné póry ukazují, že jejich rozmístění a počet se u každé z plošek významně liší. Na vině však rozhodně nemusí být nedokonale provedená nebo špatně vyhodnocená zkouška ani různorodá směs betonu. Jelikož prořez pily při řezání těchto vzorků byl cca. 3 mm, jedná se o rozměr, který tyto plošky od sebe fakticky dělí. Je tedy jasné, že póry, které byly kotoučem pily protnuty se vlivem jejich velikosti a jejich poloze a natočení v prostoru, mohly zobrazit pouze na jedné z těchto plošek, případně na ploškách obou, ale pokaždé v jiné poloze.

Co se týká vyhodnocení poslední zkoumané plochy V3, celkový obsah vzduchu, kterým lze stanovit pórovitost, se od ostatních dvou plošek nijak významně neliší. Z celkových výsledků provedené zkoušky závěrem vyplývá, že obsah vzduchu v betonu, který reprezentuje objem pórů, vychází dle interpretace normy ČSN EN 480-11 okolo 3 % objemových. Otázkou však zůstává, do jaké míry můžeme převod dat ze 2D plochy do 3D objemu tímto způsobem a při tomto počtu zkoumaných řezů pokládat za správný a přesný. Řešením této problematiky se zabývá následující kapitola.

4.2. Matematické modelování

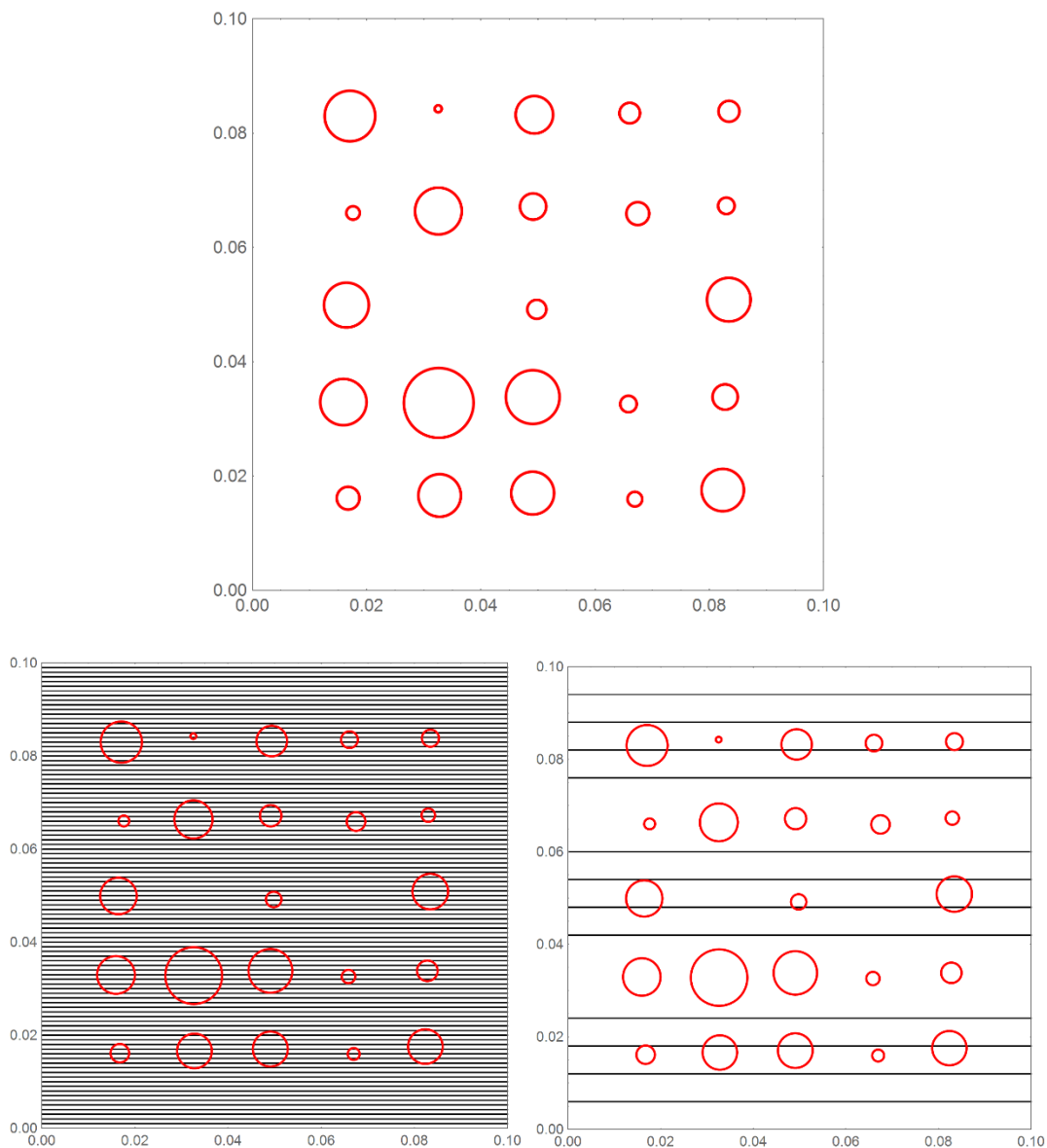
Matematickým výpočetním programem Wolfram Mathematica byl zpracován matematický model, jehož charakteristika je popsána v kapitole 3. V tomto modelu bylo vytvořeno těleso krychle o rozměrech 100 x 100 x 100 mm, ve kterém byly nadefinovány póry v podobě elipsoidů, případně koulí (speciální případ elipsoidu), s náhodnými rozměry, natočením a umístěním v prostoru. Náhodně byl zároveň vygenerován počet těchto pórů, respektive pórovitost. Tento proces byl proveden pětkrát, aby vzniklo 5 stejně velkých krychlí A, B, C, D a E s různými hodnotami „pórovitosti“, na kterých byly dále provedeny simulace tzv. traverzní metody a jejich vyhodnocení.



Obrázek 4.2 - Model krychle s definovanou pórovitostí, vlastní tvorba

V první řadě byla snaha stanovit vzdálenost měřících přímek od sebe tak, aby bylo ve 2D obrazu/řezu dosaženo co největší přesnosti vůči skutečným hodnotám. Tato rozteč přímek se zkušebně zvolila 1 mm a měřící přímky tedy byly po 1 mm vyneseny na čtverec 100 x 100 mm s náhodně rozmístěnými kružnicemi o různých poloměrech, které se v žádném bodě vzájemně neprotínají. Skutečný obsah těchto kružnic byl znám. Přímky byly pro porovnání do čtverce vyneseny i dle normové metody, tedy 4 přímky u horního okraje, 4 přímky u spodního okraje a 4 přímky ve středové oblasti, vždy 6 mm od sebe.

Součet délek všech tětiv T_a , neboli měřících přímek protínajících kružnice symbolizující vzduchové póry, spočítal software.

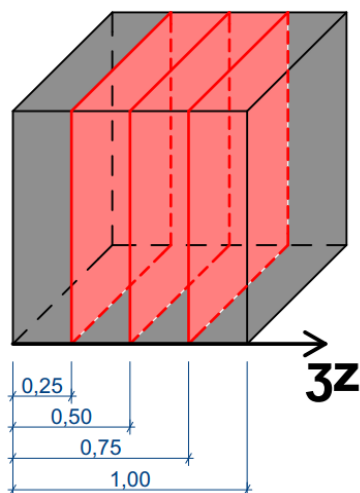


Obrázek 4.3 - Simulace traverzní metody (metody měřících přímk), vlastní tvorba

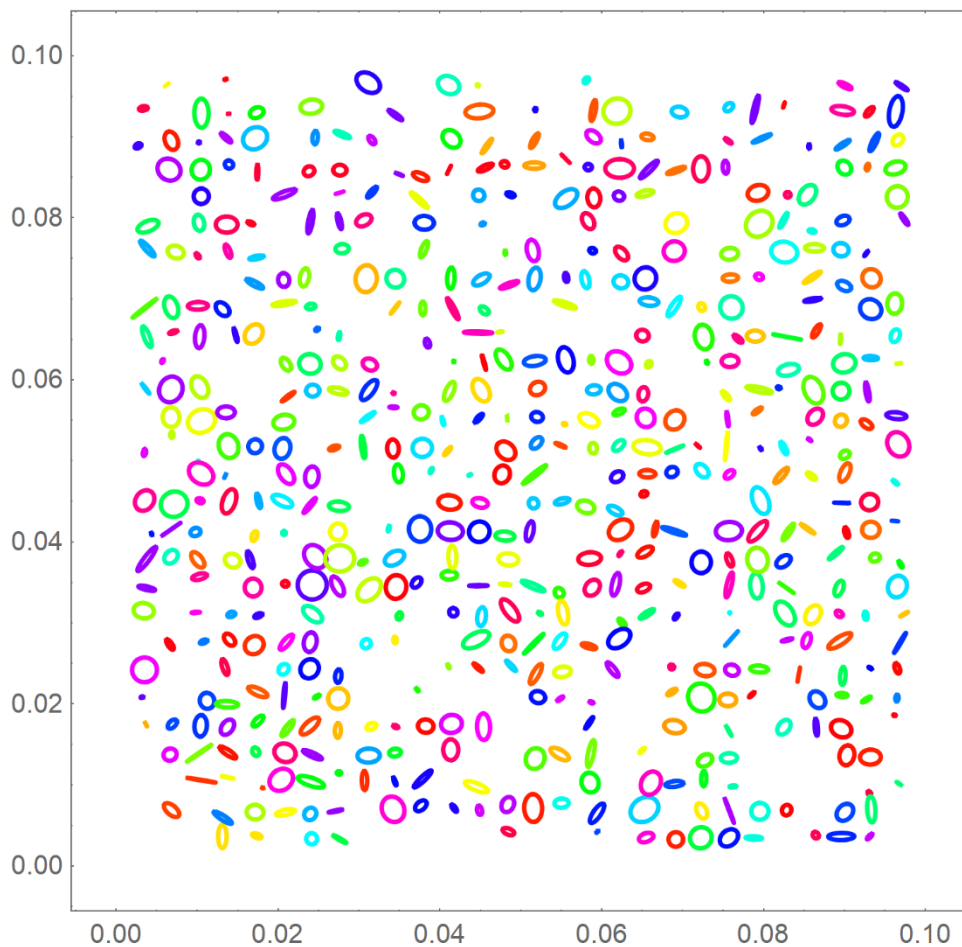
Obsah všech vygenerovaných kružnic v řezu se rovná $0,001291 \text{ m}^2$. Pro variantu přímk rozvrstvených po 1 mm v celé ploše vzorku vychází celková délka tětív $T_a = 0,001284 \text{ m}$, v případě přímk volených v souladu s normou ČSN EN 480-11 pak $T_a = 0,0000137 \text{ m}$.

Z výše uvedených hodnot je patrné, že zvolením vzdálenosti měřících přímk 1 mm od sebe se dosahuje veliké přesnosti, téměř totožné s reálnou hodnotou celkového obsahu všech kruhů. Oproti tomu celková délka tětív vyhodnocená pro variantu přímk dle normové metody se ve 2D řezu od skutečnosti liší výrazně. To ukazuje právě pro tento případ i obrázek 4.3, kde jde jasně vidět, že 10 kruhů nebylo měřícími přímkami vůbec zachyceno, a tím pádem ani vyhodnoceno.

Aby bylo možné zjistit, s jakou přesností lze tato vyhodnocená 2D data interpretovat do 3D, jak uvažuje norma, a případně tento proces optimalizovat, byla úplně stejná simulace měřících přímk provedena na 5 krychlích A, B, C, D a E popsaných v textu výše. Pro každou krychli byly analyzovány 3 různé řezy dle obrázku **XXX**.



Obrázek 4.4 - , vlastní tvorba



Obrázek 4.5 – Model porozity , vlastní tvorba

Celkový objem elipsoidů, příp. koulí uvnitř krychle je v modelu opět známá veličina. V níže uvedené tabulce 4.5 jsou zaznamenány výsledky vyhodnocených simulací měřících příemek pro jednotlivé řezy na jednotlivých krychlích.

Tabulka 4.5 - Výsledky

Krychle	Celková „pórovitost“ krychle [%]	Řez	ξz	Přímký po 1 mm			Přímký dle ČSN EN 480-11		
				Poměrný obsah elips v řezu [%]	Průměrný obsah elips v krychly [%]	Chyba [%]	Poměrný obsah elips v řezu [%]	Průměrný obsah elips v krychly [%]	Chyba [%]
A	8,329	1.	0,25	1,233	3,226	61,3	0,233	2,601	68,8
		2.	0,50	7,313			6,856		
		3.	0,75	1,133			0,714		
B	9,717	1.	0,25	6,803	3,802	60,9	8,568	4,574	52,9
		2.	0,50	3,917			4,658		
		3.	0,75	0,685			0,497		
C	10,228	1.	0,25	10,127	13,095	28,0	10,932	13,633	33,3
		2.	0,50	18,367			17,598		
		3.	0,75	10,791			12,370		
D	16,605	1.	0,25	4,228	4,623	72,2	4,741	4,908	70,4
		2.	0,50	6,643			7,970		
		3.	0,75	2,999			2,012		
E	20,470	1.	0,25	21,478	19,993	2,3	23,228	21,904	7,0
		2.	0,50	13,837			16,087		
		3.	0,75	24,664			26,398		

Z předchozího 2D příkladu víme, že rozmístěním měřících přímků po 1 mm v celé sledované ploše získáme výsledky v podstatě totožné s realitou, a proto jsou v rámci vyhodnocení tyto hodnoty považovány pro daný řez za referenční. Zajímavostí ovšem je, že při porovnání výsledků ze simulace měřících přímků po 1 mm a přímků podle normové metody u všech 5 krychlí se nyní jejich hodnoty, oproti předchozímu příkladu, od sebe zas tak výrazně neliší.

Zároveň jde ale u všech pěti prověřovaných krychlí vidět, že chybovost obou těchto metod vůči skutečnosti je opravdu velká, a to jak v případě jednotlivých řezů, tak i v případě průměrných hodnot získaných z 3 vyhodnocených řezů.

V poslední fázi bylo úkolem tohoto matematického modelu zhodnotit, jaký vliv na přesnost tzv. traverzní metody má počet analyzovaných řezů zkoumaného tělesa. Tato analýza vede k zajímavějším zjištěním, oproti předchozím závěrům, které jsou v této části zároveň ověřeny a doplněny. Výpočet byl tentokrát postupně zadán pro 3, 5, 10, 20, 30 a 50 řezů vymodelované krychle s konstantní „pórovitostí“ pro všechny řezy. Je ovšem důležité zmínit, že řezy jsou modelem generovány náhodně, nikoliv

v pravidelných intervalech. Opět byly v rámci vyhodnocení simulovány obě varianty rozmístění měřících přímek (po 1 mm a podle normy ČSN EN 480-11).

Výsledky numerické analýzy pro jednotlivé počty řezů a způsoby rozmístění měřících přímek uvádí následující tabulka:

Tabulka 4.6 – Výsledky porozity

Celková „pórovitost“ krychle [%]	Počet řezů	Přímky po 1 mm			Přímky dle ČSN EN 480-11		
		Celkový obsah elips [%]	Chyba [%]	Směrodatná odchylka [%]	Celkový obsah elips [%]	Chyba [%]	Směrodatná odchylka [%]
9,717	3	8,286	14,73	11,07	9,907	1,96	13,30
	5	9,439	2,87	8,19	11,524	18,60	10,09
	10	9,451	2,74	7,66	12,391	27,51	8,82
	20	9,465	2,60	7,29	11,801	21,44	8,83
	30	9,575	1,46	7,18	11,941	22,88	8,68
	50	9,575	1,46	7,15	11,924	22,70	8,65

V rámci tohoto zadání při rozmístění měřících přímek 1 mm od sebe po celé ploše vzorku již při provedení 5 náhodných řezů vypočtený obsah všech elips, protnutých těmito řezy, koreluje se skutečnou pórovitostí krychle. Následné zvyšování počtů řezů samozřejmě vede k dalšímu přibližování se skutečnosti, ovšem tento nárůst je vůči provedenému počtu řezů minimální.

Podíváme-li se na případ, kde byly měřící přímky vedeny dle požadavků normy, ke skutečné hodnotě se nejvíce přiblížíme provedením právě 3 řezů a platí, že s každým dalším zvyšováním počtů řezů chybovost metody narůstá. Pórovitost vypočítaná tímto způsobem vychází výrazně vyšší, než je pórovitost skutečná.

Porovnáním těchto výsledků s výsledky předchozí úlohy pro 5 různě porézních krychlí jde vidět, že v předchozím vyhodnocení se hodnoty pórovitosti stanovené třemi přesně definovanými řezy od skutečnosti liší dosti značně v případě obou variant rozmístění měřících přímek.

Je vhodné připomenout, že rozmístění pórů v prostoru, jejich velikost, natočení, apod. jsou v každém případě náhodné.

Z celkové analýzy všech modelovaných simulací a vyhodnocením získaných dat nelze v tuto chvíli vyvodit závěr, že by provedení právě 3 nebo právě 5 řezů tělesa vždy zajistilo optimální výsledek, stejně tak že by rozmístění měřících přímek po 1 mm v celé ploše vzorku oproti normové metodě vedlo k výrazně vyšší úspěšnost.

4.3. Gravimetrická metoda

Aby bylo možné definovat, jak veliké je množství pórů, které optickou porozimetrií, oproti jiným tradičním metodám, není možné změřit, tak byly na betonových vzorcích S1, S2 a S3, odebraných ze stejného zkušebního tělesa, spočteny hodnoty pórovitosti z dat získaných gravimetrickou metodou při vážení těchto vzorků ve stavu vysušeném a zcela nasyceném vodou (viz. Kapitola XXX).

Touto zkouškou lze vyhodnotit množství otevřených pórů přístupných vodě ve struktuře betonu, zjistit jeho objemovou hmotnost a množství vody, které je beton do své struktury schopn pojmout.

Hledané veličiny se vypočítají jako:

Objemová hmotnost:

$$OH = \frac{m_0}{\frac{m_3 - m_4}{\rho_{H_2O}}} \cdot 10^{-3} \quad (4.6)$$

Otevřená pórovitost přístupná vodě:

$$P = \frac{(m_3 - m_0) \cdot 100}{m_3 - m_4} \quad (4.7)$$

Nasákavost vodou:

$$NV = \frac{(m_3 - m_0) \cdot 100}{m_0} \quad (4.8)$$

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/cm³].

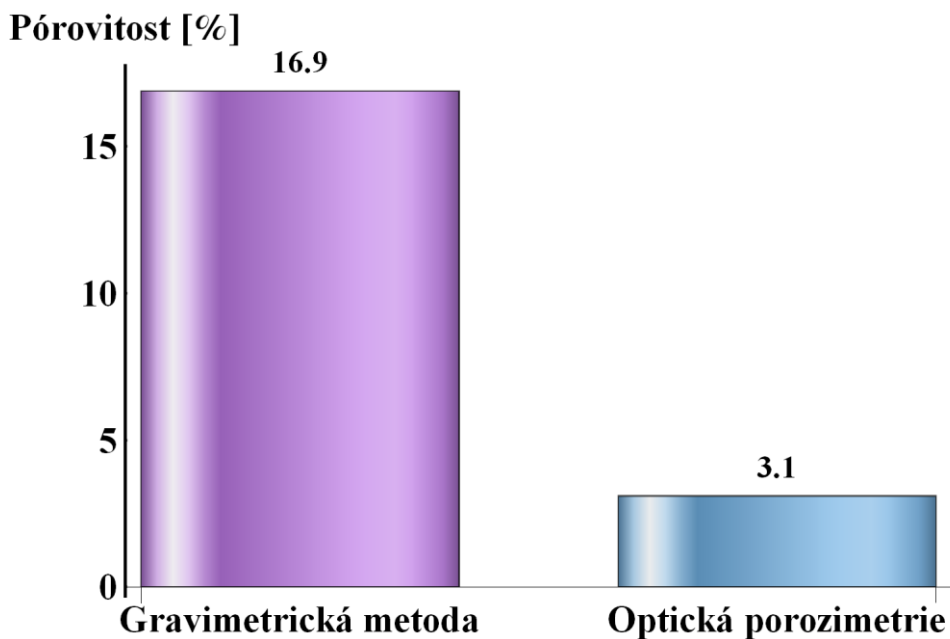
Výsledné hodnoty těchto veličin pro konkrétní betonové vzorky S1, S2 a S3 jsou uvedeny v následující tabulce 4.7, kde jsou současně zaznamenány vstupní data potřebné pro výpočet, tedy hmotnosti vzorků vysušených a plně nasycených (nasáklých) vodou.

Tabulka 4.7 - Výsledky zkoušky nasákavosti

Vzorek	Hmotnost vzorku po vysušení [g]	Hmotnost vzorku nasyceného vodou		OH [kg/m ³]	P [%]	NV [%]
		Vážení na vzduchu [g]	Vážení pod vodou [g]			
S1	2000,00	2173,00	1262,00	2195,39	19,0	8,7
S2	2025,00	2174,00	1263,00	2222,83	16,4	7,4
S3	1860,00	1986,00	1158,00	2246,38	15,2	6,8

Z těchto naměřených hodnot lze konstatovat, že průměrná pórovitost daného zkušebního trávce z prostého cementového betonu činí 16,9%. Jak již bylo uvedeno, jedná se o pórovitost přístupnou vodě, tedy o póry kapilární o velikosti přibližně 10 nm a více.

Následující graf porovnává výslednou pórovitost získanou gravimetrickou metodou pro vzorky S1, S2, S3 s pórovitostí zjištěnou pomocí světelné mikroskopie a obrazové analýzy na zkušebních vzorcích V1, V2 a V3. Všechny vzorky byly odebrány z jednoho zkušebního tělesa – betonového trávce o rozměrech 150 x 150 x 750 mm.



Graf 4.1 - Srovnání porovitosti

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. Dále jsou zde uvedeny tradiční metody měření pórovitosti se zaměřením na metody využívající analýzu obrazu a počítačové zpracování dat.

Dále je v práci podrobně popsán postup výroby jednotlivých betonových vzorků včetně jejich přípravy pro zkoušky a příslušná měření pórovitosti. K těmto účelům bylo vytvořeno 1 zkušební těleso a z něj poté odebrán potřebný počet vzorků.

Nakonec byl vytvořen matematický model, který simuluje normovou metodu. Výsledky jsou porovnáním normové metody se známou hodnotou porozity vzorku.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 - Princip rtuťové porozimetrie, převzato z [1].....	15
Obrázek 1.2 - Průběh vícevrstvé adsorpce plynu, převzato z [1].....	17
Obrázek 1.3 - Interpretace sorpční izotermy podle teorie multimolekulární adsorpce (teorie BET), převzato z [1]	18
Obrázek 1.4 - Rozložení měřících přímek na zkušební povrchu, převzato z [5]....	20
Obrázek 1.5 - Příprava zkušební vzorku 150 mm x 100 mm x 40 mm z tělesa 150 mm (přibližné rozměry) ^{NP1} , převzato z [2]	21
Obrázek 1.6 - Systém pro stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu, převzato z [1].....	23
Obrázek 1.7 - Systém pro stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu, převzato z [7].....	25
Obrázek 1.8 - Analýza barev [9]	28
Obrázek 1.9 - Metoda analýzy tvaru [9]	29
Obrázek 1.10 - Analýza barev [9]	29
Obrázek 2.1 - Zkušební betonový trámec, vlastní tvorba	32
Obrázek 2.2 - Pracovní stanice, vlastní tvorba.....	33
Obrázek 2.3 - Zkušební vzorek na manipulačním stolku, vlastní tvorba.....	34
Obrázek 2.4 - Průběh zkoušky, vlastní tvorba	35
Obrázek 2.5 - Světelná mikroskopie, obrazová analýza, vlastní tvorba	36
Obrázek 2.6 - Obrazová analýza, vyhodnocení, vlastní tvorba.....	37
Obrázek 2.7 - Sada zkušebních vzorků S1, S2 a S3, vlastní tvorba.....	38
Obrázek 2.8 - Nasákavost betonu, vlastní tvorba.....	40
Obrázek 2.9 - Gravimetrická metoda, vážení pod vodou, vlastní tvorba.....	41
Obrázek 2.10 - Gravimetrická metoda, vážení na vzduchu, vlastní tvorba	41
Obrázek 3.1 - Protáhlý a zploštělý elipsoid, vlastní tvorba.....	44
Obrázek 3.2 - Řez elipsoidem a znázornění testu zobrazované plochy elipsy v řezu, vlastní tvorba.....	45
Obrázek 4.1 - Zkoumané plochy V1 a V2, vlastní tvorba	50
Obrázek 4.2 - Model krychle s definovanou pórovitostí, vlastní tvorba.....	51
Obrázek 4.3 - Simulace traverzní metody (metody měřících přímek), vlastní tvorba	52

Obrázek 4.4 - , vlastní tvorba.....	53
Obrázek 4.5 - , vlastní tvorba.....	54

SEZNAM GRAFŮ

Graf 2.1 - Přírůstky hmotnosti jednotlivých trámců v průběhu vysoušení	39
Graf 2.2 - Přírůstky hmotnosti jednotlivých trámců v průběhu nasakování	42
Graf 4.1 -	59

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1 - Klasifikace pórů v zatvrdlé cementové pastě	8
Tabulka 2.1 - Složení betonové směsi.....	31
Tabulka 4.1 - Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu	47
Tabulka 4.2 Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu, vzorek V1	48
Tabulka 4.3 - Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu, vzorek V2.....	48
Tabulka 4.4 - Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu, vzorek V3.....	49
Tabulka 4.5 -	55
Tabulka 4.6 -	56
Tabulka 4.7 - Výsledky zkoušky nasákavosti	58

PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY

[1] JÁRKOVÁ, Petra. *Možnosti využití metody měření částečných výbojů pro zjišťování porozity betonu*. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra technologie staveb. Vedoucí práce Rostislav Šulc.

[2] BETONÁŽ ZÁKLADŮ POMOCÍ DRÁTKOBETONU. *ASB-portál: odborný stavební portál* [online]. Praha: Jaga Media, 2014 [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/beton/betonaz-zakladu-pomoci-dratkobetonu>

[3] Beton – vztah mezi strukturou a vlastnostmi. *Katedra materiálového inženýrství a chemie*. [online]. Praha, [cit. 2018-01-07]. Dostupné z:

http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/MAIN/MI_beton.pdf

[4] SCHNEIDER, Petr. *Textura porézních látek* [online]. Praha, 2007 [cit. 2018-01-07]. Dostupné z:

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

[5] ČSN EN 480-11. *Příspěvky do betonu, malty a injektážní malty - Zkušební metody - Část 11: Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2006.

[6] JEŘÁBKOVÁ, Petra. *Studium vlastností biologického materiálu pomocí metod obrazové analýzy*. Brno, 2010. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav fyzikální a spotřební chemie. Vedoucí práce Oldřich Zmeškal.

[7] HLAVÁČ, Václav a Miloš SEDLÁČEK. *Zpracování signálů a obrazů*. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04442-1.

[8] *Charakterizace částic a částicových soustav* [online]. VŠCHT Praha, 2007 [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/sil/keramika/Characterization_of_particles/CPPS%20_Czech%20version_.pdf

[9] BAUMGART, Chris, Ray BLAIR a Kim LINDER. *Image Analysis of Hardened Concrete: Performance Enhancement of the Automated Concrete Evaluation System (ACES)* [online]. Kansas City, Missouri: Missouri Department of Transportation, 2006

[cit. 2018-01-06]. ISBN OR07.004. Dostupné z:
<https://library.modot.mo.gov/rdt/reports/ri98006/or07004.pdf>

[10] ČSN 73 1316. *Stanovení vlhkosti, nasákavosti a vzlínivosti betonu*. Praha: Český normalizační institut, 1989.

